



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL (EECA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E
SANITÁRIA

EDSON SUBTIL DA COSTA

**Previsão de enchentes e análise da vulnerabilidade ambiental
com base no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do
rio Meia Ponte, Região Metropolitana de Goiânia**

GOIÂNIA

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Edson Subtil da Costa

3. Título do trabalho

Previsão de enchentes e análise da vulnerabilidade ambiental com base no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte, região metropolitana de Goiânia

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Edson Subtil Da Costa, Discente**, em 20/02/2025, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilson Clementino Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 17/03/2025, às 07:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5182415** e o código CRC **17108B6F**.

EDSON SUBTIL DA COSTA

**Previsão de enchentes e análise da vulnerabilidade ambiental
com base no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do
rio Meia Ponte, Região Metropolitana de Goiânia**

Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Escola de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Linhas de pesquisa: Planejamento e Gestão de Sistemas de Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Doutor Nilson Clementino Ferreira

Coorientador: Professor Doutor Klebber Teodomiro Martins Formigas

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Costa, Edson Subtil da
PREVISÃO DE ENCHENTES E ANÁLISE DA VULNERABILIDADE
AMBIENTAL COM BASE NO USO E COBERTURA DA TERRA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEIA PONTE, REGIÃO
METROPOLITANA DE GOIÂNIA [manuscrito] / Edson Subtil da
Costa. - 2025.
CXXII, 122 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira; co-orientador Dr.
Klebber Teodomiro Martins Formiga.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2025.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico,
tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Região Metropolitana de Goiânia. 2. bacia do rio Meia Ponte. 3.
ARIMA. 4. inundações. 5. planejamento urbano sustentável. I. Ferreira,
Nilson Clementino, orient. II. Título.

CDU 628.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **02/2025** da sessão de Defesa de Dissertação de **Edson Subtil da Costa**, que confere o título de **Mestre em Engenharia Ambiental e Sanitária**, na área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Ao(s) **vinte e sete dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco**, a partir da(s) **09:00 horas**, por meio de **videoconferência pelo link: <https://meet.google.com/mnr-xqqe-vtv>**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "**Previsão de enchentes e análise da vulnerabilidade ambiental com base no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte, região metropolitana de Goiânia**". Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Nilson Clementino Ferreira (UFG/PPGEAS)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Juliana Dorn Nóbrega (USP/PPGEAS)**, membro titular interno, e Professor(a) Doutor(a) **Wellington Nunes de Oliveira (EECA/UFG)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Nilson Clementino Ferreira**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **vinte e sete dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Nilson Clementino Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2025, às 12:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Dorn Nóbrega, Usuário Externo**, em 27/02/2025, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wellington Nunes De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2025, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5182417** e o código CRC **412C9C95**.

AGRADECIMENTO

Com muita gratidão, começo agradecendo a Deus, fonte inesgotável de força e sabedoria, por me conceder a coragem e a perseverança necessárias para realizar este trabalho, que representa um marco importante em minha trajetória profissional. Manifesto também meus profundos agradecimentos ao Prof. Nilson Clementino Ferreira, cujo comprometimento como orientador foi indispensável, demonstrando uma dedicação ímpar ao longo desta jornada inicial.

Da mesma forma, expresso minha sincera gratidão a todos os professores do PPGEAS que, com seu conhecimento e orientação, foram fundamentais para meu crescimento acadêmico. Em particular, gostaria de destacar o Prof. Klebber Teodomiro Martins Formiga, o Prof. Paulo Scalize, a Prof.^a Juliana Dorn Nobrega, e o Prof. Raviel Eurico Basso, cujo apoio foi de grande valor.

Não poderia deixar de mencionar, com especial carinho, meus pais (em memória) e meus irmãos, Ivan da Costa, Adelaide da Costa, Shelsia da Costa, Leonel da Costa e Sandro da Costa. Vossa oração e apoio incondicional bem como sacrifícios constantes foram essenciais para que eu alcançasse este momento.

Agradeço também à CAPES pelo suporte financeiro oferecido para a realização deste estudo, e a todos aqueles que, de alguma forma, estiveram ao meu lado durante este processo, estendo meus mais sinceros agradecimentos.

"O que está atrás de nós e o que está à nossa frente são questões minúsculas comparadas com o que está dentro de nós. Quando nos permitimos explorar as profundezas do espírito, encontramos que o poder de transformar o mundo sempre esteve em nossas mãos."

Ralph Waldo Emerson

RESUMO

A Região Metropolitana de Goiânia (RMG) enfrenta desafios ambientais significativos devido ao crescimento urbano desordenado nos seus municípios. Essa expansão urbana tem causado impactos ambientais na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte (BHMP). Entre 1985 e 2022, as áreas urbanizadas dos municípios que integram a RMG aumentou 307,83%. Esse avanço descontrolado tem resultado na perda de cobertura vegetal nativa, na impermeabilização e compactação dos solos, na intensificação do escoamento superficial e no aumento dos riscos de inundações. Uma análise geomorfológica indicou que a predominância de pediplanos degradados e solos suscetíveis à erosão agrava a vulnerabilidade ambiental, especialmente em áreas de fundo de vale. A análise da precipitação acumulada anual na BHMP entre 1990 e 2023 revelou variações de 600 mm a 1.700 mm, com estabilizações em períodos específicos. A simulação estatística indicou que a série temporal é estacionária, sendo o modelo ARIMA(1,1,1) o mais adequado para previsão, estimando chuvas médias anuais entre 1.000 mm e 1.200 mm para o período de 2024 a 2033. Já a análise hidrodinâmica das inundações evidencia que o aumento do tempo de retorno (10, 50, 100 e 500 anos) amplia a extensão das áreas alagadas, com profundidades de até 10 metros em seções críticas do rio. Os perfis de velocidade indicaram variações de até 7 m/s em um trecho de 25 km, refletindo a dinâmica do fluxo na bacia. As limitações na coleta de dados em campo (trechos de difícil acesso, sinais inconsistentes do GPS, áreas com baixa profundidade, variação do nível de água) entre outros, contribuíram para que se tivesse um NSE (Coeficiente de Nash-Sutcliffe) de 0,509 e um R^2 (Coeficiente de determinação) de 0,875 para os níveis de água, mostrando concordância moderada com os dados observados. No entanto, para a vazão, o NSE de 0,014, apesar do R^2 elevado (0,952), indicou dificuldades na representação de variações locais. Além disso, a ocupação irregular das margens e a emissão de efluentes aumentam os riscos ambientais, reduzindo a capacidade da bacia hidrográfica de escoar grandes volumes de água. Os resultados ressaltam a necessidade de planejamento urbano integrado e ações de mitigação, como a recomposição da vegetação nativa, a proteção de áreas de preservação permanente e a implementação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade. A colaboração entre municípios é essencial para minimizar a vulnerabilidade da RMG, conciliando o crescimento urbano com a conservação ambiental.

Palavras-chave: Região Metropolitana de Goiânia; bacia do rio Meia Ponte; ARIMA; inundações; planejamento urbano sustentável; fontes hidrológicas.

ABSTRACT

The Goiânia Metropolitan Region (RMG) faces significant environmental challenges due to disorganised urban growth in its municipalities. This urban expansion has caused environmental impacts in the Meia Ponte river basin (BHMP). Between 1985 and 2022, the urbanised areas of the municipalities that make up the RMG increased by 307.83%. This uncontrolled advance has resulted in the loss of native vegetation cover, soil sealing and compaction, intensification of surface run-off and an increase in the risk of flooding. A geomorphological analysis indicated that the predominance of degraded pediplains and soils susceptible to erosion aggravates environmental vulnerability, especially in valley bottom areas. Analysis of annual accumulated rainfall in the BHMP between 1990 and 2023 revealed variations of between 600 mm and 1,700 mm, with stabilisations in specific periods. Statistical simulation indicated that the time series is stationary, with the ARIMA(1,1,1) model being the most suitable for forecasting, estimating average annual rainfall of between 1,000 mm and 1,200 mm for the period 2024 to 2033. The hydrodynamic analysis of the floods shows that increasing the return time (10, 50, 100 and 500 years) increases the extent of the flooded areas, with depths of up to 10 metres in critical sections of the river. The velocity profiles indicated variations of up to 7 m/s over a 25 km stretch, reflecting the dynamics of the flow in the basin. The limitations in collecting data in the field (difficult-to-access stretches, inconsistent GPS signals, areas with low depths, water level variation), among others, contributed to an NSE (Nash-Sutcliffe Coefficient) of 0.509 and an R^2 (Coefficient of Determination) of 0.875 for the water levels, showing moderate agreement with the observed data. However, for the flow, the NSE of 0.014, despite the high R^2 (0.952), indicated difficulties in representing local variations. In addition, irregular occupation of the banks and the emission of effluents increase environmental risks, reducing the capacity of the river basin to drain large volumes of water. The results emphasise the need for integrated urban planning and mitigation actions, such as restoring native vegetation, protecting permanent preservation areas and implementing public policies aimed at sustainability. Collaboration between municipalities is essential to minimize the vulnerability of the RMG, reconciling urban growth with environmental conservation.

Keywords: Goiânia Metropolitan Region; Meia Ponte river basin; ARIMA; flooding; sustainable urban planning; hydrological sources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Região Metropolitana de Goiânia	37
Figura 2: Comparação de uso e ocupação do solo da RMG.....	41
Figura 3: Comparação de uso e ocupação do solo da RMG.....	43
Figura 4: Tipos de Solos da RMG	45
Figura 5: Geologia	46
Figura 6:Declividade	48
Figura 7: Vulnerabilidades Ambientais	50
Figura 8: Localização e limites da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte e destaque do Alto Rio Meia Ponte.	67
Figura 9: Fluxograma	69
Figura 10:ADCPSONTEK M9.....	75
Figura 11: GPS Y1 GNSSReceiver	75
Figura 12:RiverSurveyo.....	76
Figura 13:Série Temporal da chuva.....	82
Figura 14: Decomposição da serie.....	84
Figura 15: Previsão da chuva.....	87
Figura 16:macha de Inundação.....	88
Figura 17: Profundidade na secção transversal com tempo de retorno	89
Figura 18:velocidades na secção transversal.....	92
<i>Figura 19:</i> Elevação da superfície da água na secção transversal.....	94
Figura 20: perfil de elevação	95
Figura 21:velocidade do canal longitudinal.....	97
Figura 22: velocidade do canal longitudinal.....	98
<i>Figura 23:</i> Validação de dados da vazão	100
Figura 24:elevação e vazão do canal longitudinal.....	102
Figura 25: Suscetibilidade a inundação.....	104
Figura 26:Inundação de residência	106
Figura 27:Susceptibilidade a inundação (tempo de retorno 10 anos) e vulnerabilidade ambiental.....	107
Figura 28:: Susceptibilidade a inundação (tempo de retorno 50 anos) e vulnerabilidade ambiental.....	108
Figura 29:: Susceptibilidade a inundação (tempo de retorno 100 anos) e vulnerabilidade ambiental.....	109
Figura 30:Susceptibilidade a inundação (tempo de retorno 500 anos) e vulnerabilidade ambiental.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: coeficiente de Manning.....	25
Tabela 2: Comparação de uso e ocupação do solo da RMG	42
Tabela 3: Modelos de previsão	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estimativa do crescimento populacional na RMG	18
Quadro 2: Classes de suscetibilidade.....	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
DGPS	Differential Global Positioning System
ESRI	Environmental Systems Research Institute
MNT	Modelo numérico do terreno
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
DEM	Digital Elevation Model
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC- HMS	Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
WGS84	World Geodetic System 1984
BHMP	Bacia Hidrográfica do Meia Ponte
RMG	Região Metropolitana de Goiânia
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
TAC	Taxa de crescimento anual
ARIMA	Autoregressivo integrado de média móvel
APP	Área de preservação permanente
UTB	Unidades de territórios básicos
PNUD	Programa das Nações Unidas para desenvolvimento
FJP	Fundação João Pinheiro
IDH	Índice de desenvolvimento humano
SNIRH	Sistema Nacional de informações sobre recursos hídricos
FACP	Função de autocorrelação parcial
FAC	Função de autocorrelação
AIC	Critério de informação de Akaike
BIC	Critério de informação Bayesiano

LISTA DE SÍMBOLO

n	- Coeficiente de manning.
vA	- Vulnerabilidade ambiental.
U_g	- Unidade geomorfológica.
g_e	- Geologia.
d_e	-Declividade.
S_0	- Solo.
UCT	- Uso e cobertura da terra.
Y_t	- Série temporal.
T_t	- Tendência.
S_t	- Sazonalidade.
ε_t	- Erro ou Ruído.
IC	- Intervalo de confiança.
ρ	- Coeficiente associado ao termo defasado.
μ_t	- Termo de erro aleatório.
Δ	- Operador de diferença.
N	- Número de termos.
E_T	- Média
$\text{var}(t_n)$	- Variância
H_0	- Hipótese nula
K	- Número de anos.
R_j	- Soma das classificações.
T_{1c}	- Valor crítico.
α	- Nível de significância.
$\log L(\theta^{\wedge})$	- Logaritmo da função.
$f(x_n \theta)$	- Modelo escolhido.
p	- Quantidade de parâmetros.
x	- Vazão.
\bar{x}	- Média.
s	- Desvio padrão.
TR	- Tempo de retorno.
MAE	- Erro médio absoluto.
M_i	- Valores médios.
S_i	- Valores simulados.
MBE	- Erro relativo médio.

NSE	– Coeficiente de Nash-Sutcliffe
R^2	– Coeficiente de determinação
Cov(M, S)	– Covariância
σ_S	– Desvio padrão.

Índice

1.1.	Introdução Geral	14
1.2.	Objetivos.....	15
1.2.1.	Objetivo Geral	15
1.2.2.	Objetivos Específicos	15
1.3.	Estrutura da Dissertação	16
1.4.	Revisão Bibliográfica	17
1.4.1.	Geoprocessamento	17
1.4.2.	Crescimento Populacional da RMG	17
1.4.3.	Vulnerabilidade Ambiental.....	18
1.4.4.	Crescimento Populacional e Degradação Ambiental na Bacia do Rio Meia Ponte	20
1.4.5.	Impactos do Crescimento Populacional e Urbanização na Qualidade Ambiental	20
1.5.	Batimetria	21
1.6.	Modelo Hidrodinâmico Hec-Ras.....	23
1.6.1.	Comparação do Hec-Ras Com Outros Modelos.....	23
1.6.2.	Coeficiente de Manning (N)	24
1.7.	Análise da Série Temporal Usando o Modelo Arima.....	25
1.8.	Referências Bibliográficas	27
2.1.	Resumo	32
2.2.	Abstract.....	33
2.3.	Introdução	34
2.4.	Metodologia	37
2.4.1.	Descrição da Área de Estudo.....	37
2.5.	Geoprocessamento	38
2.7.	Resultados e Discussão.....	40
2.7.1.	Uso e Cobertura da Terra (Mapas Temporais)	40
2.7.2.	Tipos de Solo da RMG	44
2.7.3.	Geologia.....	45
2.7.4.	Declividade	47
2.7.5.	Vulnerabilidade Ambiental.....	50
2.8.	Conclusão	54
2.9.	Referências Bibliográficas	56
3.1.	Resumo	62
3.2.	Abstract.....	64
3.3.	Introdução	65

3.4.	Metodologia	67
3.4.1.	Descrição da Área de Estudo	67
3.4.2.	Clima e Vegetação	68
3.4.3.	Fluxograma Resumo das Etapas da Pesquisa	68
3.5.	Análise da Série Temporal Usando o Modelo Arima.....	69
3.5.1.	Teste de Estacionariedade.....	70
3.5.2.	Testes de Tendência.....	71
3.5.3.	Teste de Sazonalidade.....	72
3.5.4.	Critérios de Seleção Do Modelo.....	73
3.5.5.	Critérios de Informação De Akaike – Aic	73
3.5.6.	Critérios de Informação Bayesiano (Bic)	74
3.6.	Levantamento de Dados em Campo (Batimetria)	74
3.7.	Análise da Simulação Hidrodinâmica e da Suscetibilidade a Inundação	76
3.7.1.	Regime Não Permanente	76
3.7.2.	Calibração e Validação Do Modelo Hidrodinâmico.....	77
3.8.	Suscetibilidade a Inundação	79
3.9.	Resultados e Discussão.....	81
3.9.2.	Decomposição da Série de Chuva	83
3.9.3.	Seleção de Modelos Para Previsão	85
3.9.4.	Previsão da Chuva Máxima Anual Acumulada.....	86
3.9.5.	Mancha de Inundação	88
3.9.6.	Velocidade na Secção Transversal com Tempos de Retorno	92
3.9.7.	Elevação da Superfície da Água na Secção Transversal	94
3.9.8.	Representação dos Gráficos da Mancha de Inundação.....	95
3.9.9.	Validação de Nível de Água	98
3.9.10.	Validação da Vazão	100
	Validação de Dados da Vazão	100
3.9.11.	Hidrograma de Nível de Água e Vazão	101
3.10.	Avaliação da Suscetibilidade a Inundação	104
3.11.	Conclusão	111
3.12.	Referências Bibliográficas	112
4.1.	Conclusão Geral.....	116
Anexos		117

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

As alterações no uso e cobertura da terra podem influenciar significativamente em vários aspectos da hidrologia, alterando o ciclo hidrológico natural, o regime hídrico de córregos, ribeirões e rios, e a produção de sedimentos. Especificamente, no caso das áreas urbanizadas, ocorre o aumento de áreas impermeabilizadas, retirada da vegetação nativa, compactação dos solos e conseqüentemente aumento do escoamento superficial, resultando em ocorrência de processos erosivos, assoreamento de corpos hídricos e afetando a recarga de águas subterrâneas e a vazão de base (Mcgrane *et al.*, 2016; Oudin, Salavati, Furusho-percot, Ribstein & Saadi, 2018; Shukla & Gedam, 2018; Cheng li *et al.*, 2020; Luo, li, Zhu, xu & Huo, 2020).

Localizado no estado de Goiás, o rio Meia Ponte integra bacia hidrográfica do rio Paraná, localizando-se na porção norte da bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Em termos sociais e econômicos, a bacia hidrográfica do rio Meia Ponte é considerada a mais importante do estado de Goiás, pois nela reside 48% da população goiana. A nascente do rio Meia Ponte está localizada na Serra dos Brandões no município de Itauçu, e sua foz está localizada no reservatório da usina hidrelétrica de Cachoeira Dourada, no rio Paranaíba, percorrendo cerca de 471 km. O rio Meia Ponte possui 85 afluentes, sendo que a maior parte desses corpos hídricos apresenta algum tipo de degradação ambiental (Dos santos *et al.*,2023).

A Região Metropolitana de Goiânia (RMG) está localizada na porção norte da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte. Por conter a capital do estado de Goiás, na RMG o processo de urbanização tem sido acelerado, impulsionado por fatores como o aumento populacional, a expansão das atividades econômicas e o desenvolvimento da infraestrutura. Esse crescimento, entretanto, tem gerado impactos significativos sobre os ecossistemas locais, em especial nas áreas de vegetação nativa e recursos hídricos, fundamentais para a manutenção do equilíbrio ambiental.

O crescimento populacional em Goiânia, capital do estado de Goiás, superou as previsões iniciais de planejamento urbano de acordo com (De Miranda, 2021), a cidade foi planejada para ter uma população de 50 mil habitantes no ano 2000. Entretanto, a expansão urbana superou muito a meta planejada e com isso surgiram vários problemas ambientais, tais

como impermeabilização, compactação e erosão dos solos, assoreamento de corpos hídricos, desmatamentos, queimadas, entre outros problemas.

Segundo (Portis *et al.*, 2020), o uso do solo das cidades pode ser definido como a distribuição espacial das diferentes funções sociais da cidade, em que se destacam os usos residencial, industrial, comercial, de serviços, de lazer e institucional.

Desta forma, a questão científica formulada no âmbito desta pesquisa é: Como a urbanização da Região Metropolitana de Goiânia tem influenciado nos processos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

- ✓ Analisar a hipótese de que a urbanização da região metropolitana de Goiânia tem influenciado na vulnerabilidade ambiental do rio Meia Ponte, que pode resultar na ocorrência de enchentes e demais impactos ambientais.

1.2.2. Objetivos específicos

Com o intuito de se atingir o objetivo geral, serão necessários considerar os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Analisar o uso e ocupação da terra, bem como a vulnerabilidade ambiental da Região Metropolitana de Goiânia (RMG);
- ✓ Analisar a previsão da precipitação na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte (BHMP) por meio de modelo ARIMA; e
- ✓ Avaliar a suscetibilidade a inundações do rio Meia Ponte por meio da distribuição de Gumbel e da modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS, envolve a compreensão do comportamento hidrológico e dos impactos potenciais.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em quatro capítulos, em que os capítulos 2 e 3 são constituídos por artigos científicos que serão submetidos para avaliação e publicação em periódicos científicos.

No capítulo 1, constam a introdução geral, os objetivos da pesquisa e a revisão bibliográfica.

No capítulo 2, constam análises do uso e ocupação do solo, bem como a vulnerabilidade ambiental da Região Metropolitana de Goiânia (RMG).

No capítulo 3, constam, as séries temporais de precipitação em forma de chuva e a verificação da suscetibilidade à inundação do rio Meia Ponte por meio de modelagem com HEC-RAS.

No capítulo 4 e último constam as conclusões gerais da presente pesquisa.

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.4.1. Geoprocessamento

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser descrito como uma plataforma computacional equipada com recursos para processar, transformar, armazenar, exibir, analisar e modelar dados georreferenciados. Esse tipo de sistema tem como objetivo principal a geração de informações, sendo amplamente reconhecido como uma ferramenta essencial para auxiliar processos de tomada de decisão (Star ; Estes, 1990; Câmara, 1995; Bonham-Carter, 1996).

Segundo (Star; Estes, 1990), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) servem como ferramentas para integrar dados espaciais obtidos em diferentes períodos, escalas e formatos. Além disso, os autores destacam que os usuários de SIG geralmente se envolvem em quatro atividades principais: medir, mapear, monitorar e modelar.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm a capacidade de realizar análises avançadas ao combinar dados provenientes de diferentes fontes e ao estruturar bancos de dados com informações georreferenciadas (Câmara *et al.*, 2001). Essa integração de informações permite uma visão abrangente e integrada das condições analisadas. Conforme observado por (Florenzano, 2002), essa funcionalidade é extremamente útil para o monitoramento ambiental, além de ser aplicada no planejamento de cidades, regiões, países e em diversos tipos de atividades e serviços.

1.4.2. Crescimento Populacional da RMG

Conforme estimativas do IBGE para 2015, a Região Metropolitana de Goiânia (RMG) atingiu uma população total de 2.413.138 pessoas. Goiânia se destacou como o município mais populoso, com 1.430.697 habitantes, seguido por Aparecida de Goiânia, que registrou 521.910 habitantes. Já Trindade conta com 117.454 moradores, e Senador Canedo soma 100.367 habitantes (IBGE, 2015). Esses dados populacionais da RMG, referentes aos levantamentos de 2010 e 2015, podem ser visualizados no quadro abaixo.

Municípios	2010	2015 (estimativa)
Abadia de Goiás	6.876	7.897
Aparecida de Goiânia	455.657	521.910
Aragoiânia	8.365	9.444
Bela Vista de Goiás	24.554	27.628
Bonfinópolis	7.536	8.694
Brazabrante	3.232	3.526
Caldazinha	3.325	3.624
Caturai	4.686	4.977
Goianápolis	10.695	11.024
Goiânia	1.302.001	1.430.697
Goianira	34.060	39.484
Guapó	13.976	14.441
Hidrolândia	17.398	19.761
Inhumas	48.246	51.543
Nerópolis	24.210	27.341
Nova Veneza	8.129	9.105
Santo Antônio de Goiás	4.703	5.527
Senador Canedo	84.443	100.367
Terezópolis	6.561	7.389
Trindade	104.488	117.454
Total da RMG	2.173.141	2.413.139

Quadro 1: Estimativa do crescimento populacional na RMG

Fonte: IBGE, censo 2010 e estimativa 2015. Citado por (Luciano, 2016)

1.4.3. Vulnerabilidade ambiental

A noção de vulnerabilidade ambiental apresenta diversas interpretações, dependendo da perspectiva adotada por cada autor, o que evidencia a riqueza e a complexidade do tema. No entanto, também revela a existência de divergências conceituais, especialmente na distinção entre os termos risco e vulnerabilidade, dificultando a aplicação prática desses conceitos em situações específicas.

De acordo com (Aquino, 2017), a vulnerabilidade ambiental é definida pela suscetibilidade de sistemas naturais aos efeitos de pressões externas, sejam elas de origem natural ou antrópica. O autor enfatiza que essa vulnerabilidade está ligada à fragilidade intrínseca de determinados ecossistemas e à sua baixa capacidade de resiliência. Nesse contexto, um ambiente com baixa resiliência demonstra maior dificuldade em retornar ao estado original após a ocorrência de adversidades, o que reforça sua vulnerabilidade.

Por outro lado, (Cunha *et al.*, 2011) destacam a relação direta entre a vulnerabilidade ambiental e as características específicas de um espaço natural que é frequentemente ou ocasionalmente impactado por atividades humanas. Para esses autores, tais interferências podem gerar consequências negativas que comprometem a estabilidade ecológica da área, parcial ou totalmente. Essa abordagem coloca maior ênfase nas pressões antrópicas e no impacto direto sobre o equilíbrio do ecossistema.

(Figueirêdo, 2010) amplia a discussão ao trazer a ideia de que a vulnerabilidade ambiental está intrinsecamente ligada à capacidade de adaptação e recuperação do ambiente. Para o autor, essa capacidade é um fator-chave que pode ser fortalecido por meio de ações de conservação e preservação. Entretanto, ele alerta que ambientes submetidos a pressões intensas apresentam maior sensibilidade aos impactos e menor capacidade de resposta, tornando-se ainda mais vulneráveis. Essa visão propõe uma abordagem mais prática, ao sugerir medidas para mitigar os efeitos negativos das atividades humanas.

Embora (Aquino, 2017) e (Cunha *et al.*, 2011) tenham pontos de partida semelhantes ao abordarem a vulnerabilidade como uma consequência das pressões externas sobre sistemas naturais, suas análises diferem na ênfase. (Aquino, 2017) adota uma perspectiva mais ampla, considerando a capacidade de resiliência como um atributo essencial do sistema, enquanto (Cunha *et al.*, 2011) direcionam o foco para os impactos diretos de atividades antrópicas sobre o equilíbrio ecológico.

(Figueirêdo, 2010), por sua vez, complementa essas perspectivas ao enfatizar o papel das ações de conservação e preservação como estratégias para reduzir a vulnerabilidade ambiental. Sua visão sugere que, embora os sistemas naturais possam ser vulneráveis, sua capacidade de adaptação pode ser reforçada por meio de intervenções humanas conscientes, o que traz uma abordagem mais otimista e voltada para soluções.

A vulnerabilidade ambiental, conforme discutida pelos autores, é um conceito multidimensional que envolve fatores intrínsecos e extrínsecos. (Aquino, 2017) destaca a fragilidade e resiliência dos sistemas naturais, (Cunha *et al.*, 2011) apontam para os impactos das atividades humanas recorrentes, e (Figueirêdo, 2010) propõe estratégias de mitigação e adaptação como elementos centrais.

Essas visões, embora diferentes, não são excludentes, mas complementares. Juntas, elas oferecem uma compreensão mais ampla da vulnerabilidade ambiental, permitindo uma análise mais precisa dos desafios enfrentados pelos sistemas naturais em um mundo cada vez mais

pressionado pelas atividades humanas. A discussão integrada desses conceitos reforça a necessidade de ações coordenadas que combinem a preservação ambiental com o desenvolvimento sustentável, promovendo a resiliência dos ecossistemas frente às adversidades.

1.4.4. Crescimento populacional e Degradação Ambiental na Bacia do Rio Meia Ponte

A Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte (BHMP), localizada no estado de Goiás, apresenta uma intensa dinâmica econômica e populacional, que tem impactado significativamente a qualidade ambiental da região. A principal atividade econômica é a agropecuária, que ocupa 84,4% da área total da bacia, destacando-se na produção de soja, milho, feijão, cana-de-açúcar e na pecuária leiteira (AAPAC, 2008). No entanto, a indústria também desempenha um papel relevante, concentrando 25% dos estabelecimentos industriais da região (ANA, 2013). O Produto Interno Bruto (PIB) da bacia reflete essa diversidade, sendo composto por 61,50% do setor de serviços, 21,46% do setor industrial, 2,61% da agropecuária e 14,43% do setor administrativo (Estado de Goiás, 2020).

A região tem enfrentado um rápido crescimento populacional, com uma Taxa Geométrica de Crescimento Anual (TAC) de 2,09% entre 2000 e 2010, superior à média nacional de 1,16% no mesmo período. Na região metropolitana de Goiânia, essa taxa chegou a 2,23%, evidenciando a atratividade da região (ANA, 2013). Entre 2010 e 2018, a população da BHMP cresceu em média 86% ao ano, atingindo 2.555.067 habitantes em 2018. Este crescimento está concentrado principalmente em 10 municípios, incluindo Goiânia, Anápolis, Aparecida de Goiânia e Senador Canedo, que são também os mais populosos e urbanizados (Estado de Goiás, 2020).

1.4.5. Impactos do crescimento populacional e urbanização na qualidade ambiental

O avanço urbano desordenado, associado à especulação imobiliária e à ocupação irregular das áreas de vale e margens do Rio Meia Ponte, tem causado degradação significativa desse recurso hídrico. Conforme (Ribeiro *et al.*, 2021), os planos urbanísticos das décadas de 1960 e 1970 foram insuficientes para proteger o rio, e nas décadas subsequentes a situação se agravou. Os impactos são visíveis ao longo do percurso do rio, especialmente na região

metropolitana de Goiânia, onde a poluição é atribuída a fatores como despejo de resíduos industriais, acúmulo de lixo, desmatamento da vegetação ciliar e uso excessivo da água.

Ademais, a população de Goiânia percebe o Rio Meia Ponte como um curso d'água poluído, uma imagem reforçada pelos meios de comunicação, que frequentemente retratam o rio como abandonado e degradado. Essa percepção é corroborada por diversas reportagens que denunciam a situação crítica do rio, como apontado por (Ribeiro *et al.*, 2021).

A degradação ambiental do Rio Meia Ponte é amplamente reconhecida pela população local, que demonstra interesse em participar de projetos de educação ambiental (Peixoto *et al.*, 2013). Essa conscientização é fundamental para promover mudanças de comportamento e práticas mais sustentáveis. No entanto, (Peixoto *et al.*, 2013) destacam que iniciativas isoladas não são suficientes. É necessária uma abordagem integrada que envolva tanto o governo quanto a sociedade em esforços conjuntos para efetivar a proteção e recuperação do rio.

1.5. BATIMETRIA

Segundo (Teixeira, 2007), aborda na sua pesquisa que a elaboração de mapas batimétricos e a possibilidade de comparação destes quando realizados em diferentes épocas do ano possibilita um estudo muito consistente das condições para usos múltiplos dos reservatórios. Sendo os polinômios característicos atualizados, consegue-se maior eficiência de operação e geração energética, quando a principal finalidade do reservatório é essa.

Enquanto (Vieira, 2020), faz a seguinte conclusão na sua pesquisa sobre o impacto antrópico no processo do assoreamento da enseada da Japuíba, avaliando as variações batimétricas ocorridas durante 39 anos, onde foram constatadas as distribuições sedimentares, as mudanças das ocupações humanas e as alterações nas vegetações, constatando-se a ocorrência de assoreamento na Enseada da Japuíba. Aponta-se aqui que este processo está relacionado, principalmente, a um desequilíbrio no aporte sedimentar causado por ações antrópicas.

Essas práticas resultam em um incremento no transporte de partículas de solo, decorrente do desenvolvimento urbano não planejado, conforme identificado na área em questão. Algumas das principais atividades contribuintes incluem a retificação das trajetórias dos rios Japuíba e Gamboa, a supressão da vegetação nas margens dos rios, aliada à extração de areia dessas águas, e a degradação das extensões de mangue.

Conforme indicado por (Minhoni,2013) em sua pesquisa sobre a estimativa do assoreamento do reservatório, foram conduzidos dois levantamentos batimétricos na área. No primeiro, utilizando um ecobatímetro monofeixe, a instalação dos equipamentos, a fase inicial de preparação e o processamento dos dados coletados foram mais simples e menos laboriosos em comparação com o segundo levantamento, realizado com um ecobatímetro multifeixe. O segundo levantamento proporcionou uma representação mais completa do terreno, devido à cobertura mais abrangente da área e à coleta de uma maior quantidade de dados.

O volume de sedimentos identificado no primeiro levantamento batimétrico foi superior ao do segundo. Essa discrepância pode ser explicada pelo fato de que o ecobatímetro monofeixe, mesmo ao realizar um grande número de seções, consegue abranger menos de 10% da área total. Assim, o cálculo do volume depende fortemente da interpolação entre os resultados efetivamente medidos. Já o ecobatímetro multifeixe é capaz de mapear praticamente 100% da área, exigindo pouca interpolação entre os dados coletados. Adicionalmente, as medições realizadas com o ecobatímetro multifeixe apresentam uma maior precisão em comparação com as do monofeixe. Em conclusão, o uso do ecobatímetro multifeixe na presente pesquisa resultou em dados com melhor resolução e maior precisão.

Olhando pelas abordagens do (Teixeira, 2007), (Vieira, 2020) e (Minhoni, 2013), todos eles reconhecem a relevância da elaboração de mapas batimétricos para estudos de reservatórios e corpos de água como bacias hidrográficas, destacando a sua utilidade na avaliação de condições para usos diversos. (Teixeira, 2007) e (Minhoni, 2013) abordam a importância de realizar levantamentos em diferentes épocas do ano para obter dados mais abrangentes e atualizados sobre as condições dos reservatórios, enquanto que (Vieira, 2020) e (Minhoni, 2013) destacam a influência das atividades humanas no processo de assoreamento, apontando ações como retificações dos rios, extração de área e degradação de vegetação como contribuintes para o aumento de transporte de sedimentos.

Enquanto Teixeira se concentra na eficiência operacional e geração energética relacionadas à elaboração de mapas batimétricos, (Vieira, 2000) e (Minhoni,2013) abordam o impacto antrópico no processo de assoreamento, com ênfase nas mudanças ambientais e na precisão dos levantamentos batimétricos, respectivamente. (Vieira, 2020) destaca o desequilíbrio no aporte sedimentar causado por ações antrópicas como a principal causa do assoreamento na Enseada da Japuíba, enquanto (Minhoni, 2013) aborda as diferenças na eficiência dos ecobatímetros monofeixe e multifeixe como fatores contribuintes para a variação no volume de sedimentos.

Em resumo, os autores convergem na importância dos mapas batimétricos e na influência antrópica no assoreamento, mas divergem nos enfoques, causas do assoreamento e metodologias de levantamento batimétrico, devendo-se aos estudos ou pesquisas de abordagens diferentes.

1.6. MODELO HIDRODINÂMICO HEC-RAS

Um modelo representa, de forma física ou matemática, a realidade, com o propósito de simular o funcionamento de um sistema e prever suas respostas. Os modelos físicos consistem em réplicas reduzidas do sistema analisado, como os modelos hidráulicos em escala. Por outro lado, os modelos matemáticos utilizam equações para descrever os processos envolvidos, como as equações de infiltração e as equações de perguntas (Graciosa, 2010).

O HEC-RAS (River Analysis System) é um software de modelagem hidrodinâmica desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) como parte de seus projetos em engenharia hidrológica. Por ser gratuito e altamente funcional, o programa conquistou uma ampla base de usuários, especialmente nos Estados Unidos. Ele permite realizar simulações unidimensionais de escoamentos uniformes, além de simulações uni e bidimensionais de escoamentos transitórios. O *software* também oferece ferramentas para modelagem de transporte de sedimentos em escoamentos quase transitórios ou completamente transitórios, além de análises de qualidade da água em redes de canais (Brunner, 2016). Adicionalmente, o HEC-RAS inclui recursos hidráulicos avançados, como estações de bombardeio, barragens, diques e pontes, que podem ser integrados às simulações.

1.6.1. Comparação do hec-ras com outros modelos

Segundo (Mendes, 2008), o HEC-RAS se distingue do HEC-HMS em diversos aspectos metodológicos. Enquanto o HEC-RAS exige uma quantidade maior de dados de entrada com maior precisão, o HEC-HMS é menos detalhado nesse sentido. O HEC-RAS também se destaca por calcular o fluxo supercrítico, recurso não presente no HEC-HMS, além de oferecer uma visualização mais interativa da mancha de inundação, ao contrário do HEC-HMS, que limita os resultados a gráficos.

Para realizar uma modelagem 2D no HEC-RAS, é necessário inserir um modelo digital de elevação do terreno. (Sen *et al.*, 2012) destacam que mapas topográficos de alta resolução, preferencialmente digitais, são indispensáveis para delimitar as áreas de inundação em

diferentes níveis de risco. Além disso, (Tedla *et al.*,2021) apontam que registros com maior resolução temporal negativas para estimativas de fluxo mais precisas. De forma semelhante, (Brunner; Ceiw-Hec, 2021) enfatizam que a qualidade dos dados topográficos é crucial para o desempenho do modelo hidráulico.

(Pistocchi; Mazzoli, 2002) exploram a integração completa dos modelos HEC-RAS e HEC-HMS no sistema de suporte à decisão da bacia do rio Romagna, com o objetivo de prever os impactos das inundações. O estudo descreve uma metodologia utilizada para combinar dados topográficos e hidrológicos disponíveis, realizada em conjunto com modelos e produzir mapas úteis para o planejamento territorial. Além disso, destaca a estruturação do sistema, os desafios enfrentados durante o seu desenvolvimento e as principais questões relacionadas ao planejamento estratégico. O sistema busca alcançar uma atualização contínua, aproveitando os resultados das análises de projetos, que, por sua vez, fornecem novas informações para refinar os modelos de previsão.

1.6.2. Coeficiente de Manning (n)

A escolha de valores adequados para o coeficiente de Manning é crucial para garantir a precisão dos cálculos de nível d'água no HEC-RAS. O coeficiente de Manning apresenta grande variabilidade, sendo influenciado por diversos fatores, como a rugosidade da superfície, a presença de vegetação, as irregularidades e o alinhamento do canal, a limpeza e deposição, obstruções, dimensões e formato do canal, além de variáveis como nível d'água, vazão, mudanças sazonais, temperatura, material suspenso e carga de fundo (Brunner, 2020). Na tabela abaixo ilustra-se os valores em extensa compilação de n para cursos d'água e planícies de inundação fornecidas por (Chow, 1959).

Uso do solo	Coeficiente de Manning (n)
Vegetação densa	0,070
Vegetação rasteira	0,045
Solo exposto	0,035
Pastagem degradada	0,035
Afloramento rochoso	0,035

Área urbana	0,035
Cursos d'água	0,025

Tabela 1: *coeficiente de Manning*Fonte: Coelho *et al.*, (2022)

1.7. ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL USANDO O MODELO ARIMA

A modelagem hidrológica pode ser abordada sob duas perspectivas principais: (i) modelos determinísticos, que utilizam equações conceituais ou empíricas para descrever processos físicos; e (ii) modelos estocásticos, que assumem que os processos seguem leis probabilísticas (Tucci, 1998). Entre os modelos estocásticos, destacam-se aqueles baseados em séries temporais, especialmente os modelos da classe ARIMA (Autorregressivo Integrado de Médias Móveis), amplamente utilizados na análise de variáveis hidrológicas, como precipitação, vazão e evaporação. Como observado por (Bayer & Souza, 2010), esses modelos permitem identificar padrões e dependências temporais nos dados, auxiliando na descrição dos fenômenos hidrológicos e na previsão de suas variações ao longo do tempo.

A aplicabilidade dos modelos de séries temporais no estudo de variáveis ambientais tem sido amplamente discutida. (Amorim, 2012), por exemplo, utilizou modelos ARIMA para analisar a temperatura máxima em Campina Grande - PB, entre 2002 e 2010, e identificou tendências e sazonalidades. O autor ressaltou a importância de critérios estatísticos, como o BIC, na seleção do modelo mais adequado, destacando que a visualização gráfica dos dados melhora a compreensão do comportamento da variável analisada.

Por outro lado, (Freitas *et al.*, 2010) aplicaram modelos de séries temporais para investigar tendências anuais de precipitação e vazão na Bacia do Rio São Mateus, no Espírito Santo. Esse estudo reforça o potencial da modelagem estocástica na análise de padrões hidrológicos, permitindo a detecção de variações significativas ao longo do tempo. Já (Gemitzi ; Stefanopoulos, 2011) demonstraram como os modelos ARIMA podem ser utilizados para avaliar os efeitos das condições meteorológicas e das atividades humanas sobre aquíferos subterrâneos, evidenciando a utilidade dos modelos estocásticos quando há limitações na obtenção de dados diretos sobre propriedades hidráulicas e geométricas dos aquíferos.

A importância da análise de séries temporais não se restringe à hidrologia, sendo amplamente reconhecida na climatologia. (Gunda *et al.*, 2017) enfatizam que compreender a sazonalidade e as tendências das variáveis climáticas é essencial para o planejamento em diversos setores. Nesse sentido, (Wood *et al.*, 2014) apontam que modelos baseados em séries de dados empíricos permitem identificar padrões e tendências de longo prazo, integrando previsões probabilísticas que aumentam a confiabilidade das análises.

O comportamento climático apresenta variações contínuas, e as variáveis associadas podem ser analisadas como séries temporais (Agrawal *et al.*, 2012). (Antunes & Cardoso, 2015) definem essas séries como sequências de dados quantitativos organizados no tempo, enquanto, (Aguado ; Rodríguez, 2016) destaca a forte dependência entre as observações seriais. Quanto maior for a série temporal, melhor será o ajuste matemático do modelo, aumentando a confiabilidade das previsões. Corroborando essa ideia, (Sillmann *et al.*, 2017) ressaltam que modelos bem ajustados possibilitam previsões mais precisas, especialmente para eventos climáticos extremos.

Portanto, a modelagem baseada em séries temporais desempenha um papel fundamental tanto na hidrologia quanto na climatologia, permitindo análises robustas e previsões confiáveis. Enquanto os estudos hidrológicos demonstram sua aplicabilidade na análise de vazão, precipitação e impactos nos aquíferos, as pesquisas climáticas evidenciam sua relevância para compreender e prever tendências de longo prazo. A escolha do modelo adequado e a utilização de métodos estatísticos rigorosos são essenciais para garantir a precisão e a utilidade dessas análises.

1.8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, A., Kumar, V., Pandey, A. & Khan, I. (2012). An application of time series analysis for weather forecasting. *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 2(1): 2248-9622.

Aguado-Rodríguez, G. Jr., Quevedo-Nolasco, A. & Castro-Popoca, M. et al. (2016). Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA. *Agrociencia*. 50(1): 1-13.

Amorim, M. R. B. Modelagem em séries temporais aplicados a dados de temperatura máxima na cidade de Campina Grande – PB. Tese de graduação. Departamento de graduação. Departamento de Estatística do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande – PB, 2012.

ANA. Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão Hídrica Meia Ponte. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2013.

Antunes, J. L. F., Cardoso, M. R. A. (2015). Uso da análise de séries temporais em estudos epidemiológicos. *Epistemologia e Serviços da Saúde*, 24(1): 565-576.

Aquino, Afonso Rodrigues de et al. Vulnerabilidade ambiental. In: Vulnerabilidade ambiental. Blucher Open Access, 2017. p. 15-28.

Bayer, F.M.; SOUZA, A.M..(2010). Wavelets e modelos tradicionais de previsão: um estudo comparativo. *Revista Brasileira de Biometria*. v.28, n. 2, pp. 40-61.

Bonham-Carter, G.F. 1996. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Ottawa, Pergamon, 398 p.

Borges, Vinícius Silva; DE OLIVEIRA, Wellington Nunes. Análise multitemporal do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 17, n. 1, p. 79-93, 2021.

Brunner, G. W. (2020). *HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual. Version 6.0*. Hydrologic Engineering Center, Davis (CA).

Brunner, G. W. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Versão 5.0. Hydrologic Engineering Center, Davis CA, 547 p., 2016.

Bueno, Janaina Cosmedamiana Metinoski; JADOSKI, Sidnei Osmar; DE LIMA, Vanderlei Aparecido. Estudo de características climáticas da região de Guarapuava por meio de

análise de série temporal e modelagem ARIMA. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 5, p. e75953119-e75953119, 2020.

Câmara, G. 1995. Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE. www.dpi.inpe.br/teses/gilberto.

Câmara, G.; Davis, C. Introdução. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V. (Org.). *Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos Campos: INPE. p. 1-5. 2001.

Ceirr-Hec. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. ENGINEERS, U. S. A. C. o. Davis, CA, USA: Hydrologic Engineering Center (HEC) 2000.

Chow, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 680 p.

Coelho, Clívia Dias et al. modelagem hidrodinâmica de áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do rio Paraíba do sul.

Cunha, R. C.; Dupas, F. A.; Pons, N. A. D.; Tundisi, J. G. Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência Fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades. Estudo do caso da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão, São Carlos – SP. *Geociências*, v. 30, n.3, p. 399-414, jul./set. 2011.

De castro peixoto Peixoto, Josana; Prudente, Sibeles Resende; Tavares, Giovana Galvão. Percepção ambiental dos moradores: estudo de caso no Rio Meio Ponte, Região Norte, Goiânia, Goiás, Brasil. *Indagatio Didactica*, v. 5, n. 2, p. 533-542, 2013.

De Miranda, Erica Piauí Alves et al. análise da demanda por estudos de impacto de vizinhança em Goiânia, GO. *Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, v. 7, n. 2, p. 13-13, 2021.

De Miranda, Erica Piauí Alves et al. análise da demanda por estudos de impacto de vizinhança em Goiânia, GO. *Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, v. 7, n. 2, p. 13-13, 2021.

Estado De Goiás. planos de recursos hídricos das unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos do estado de Goiás afluentes ao rio paraíba Paranaíba: prognóstico da UPGRH do Rio Meio Ponte. 1.0. ed. Goiânia: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, v. 3, 2020. 188 p. Disponível em: <http://pbapgo.meioambiente.go.gov.br/wp-content/uploads/2020/09/RT-03-Progn%C3%B3stico-UPGRH-Meio-Ponte-V1.pdf>. Acesso em: Dezembro 2020.

Florenzano, T.G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos. 97p. 2002.

Freitas, R.A.P.; Douglas Lindemann, D.; Souza, L.S.; Faria, H.; Santosm.; Elesbon, A.; Casagrande, F. (2010). Análise de Séries Temporais de Vazão e Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio São Mateus. *In Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Belém, PA, 2010.

Gemitzi, A.; Stefanopoulos, K. (2011). Evaluation of the effects of climate and man intervention on ground waters and their dependent ecosystems using time series analysis. *Journal of Hydrology*. v. 403. pp. 130-140. *Goiânia e o rio Meia Ponte (1933-2020)*. 2021.

Graciosa, M. C. P. (2010). Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em Gunda, T., Bazui, J. T., Nay, J., Yeung, K. L. (2017). Impact of seasonal forecast use on agricultural income in a system with varying crop costs and returns: an empirically-grounded simulation. *Environmental Research Letters*, 12(3): 1-13.

Jacinto, Luiz Roberto de Campos. *Geoprocessamento e sensoriamento remoto como ferramentas na gestão ambiental de Unidades de Conservação: o caso da Área de Proteção Ambiental (APA) do Capivari-Monos, São Paulo-SP*. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LI, C., Sun, G., Caldwell, P., Cohen, E., Fang, Y., Zhang, Y., Oudin, L., Sanchez, G., & Meentemeyer, R. (2020). Impacts of Urbanization on Watershed Water Balances Across the Conterminous United States. *Water Resources Research*, 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR026574>.

Luciano, Francispaula. *O Programa Minha Casa Minha Vida e a questão da habitação social em Goiânia*. 2016.

Luo, X., Li, J., Zhu, S., Xu, Z., & Huo, Z. (2020). Estimating the Impacts of Urbanization in the Next 100 years on Spatial Hydrological Response. *Water Resources Management*, 34, 1673-1692. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02519-2>.

Mcgrane, S. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 2295 - 2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>.

Mendes, T. A. Avaliação da vulnerabilidade de barragens ao rompimento de pequenos açudes. 2008. 105 f. (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO.

Oudin, L., Salavati, B., Furusho-Percot, C., Ribstein, P., & Saadi, M. (2018). Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 559, 774-786. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.064>.

Pistocchi, A.; Mazzoli, P. Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. *International Environmental Modelling & Software Society - IEMSS*, v.332, p.305-310, 2002. Disponível em: <http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20uno/332_pistocchi.pdf>. Acesso em: 18 janeiro 2013.

Portis, Gabriela Tobias; Santos, Alex Mota dos; Nunes, Fabrizia Gioppo. Análise espaço temporal da alteração do uso do solo sob influência de um polo gerador de viagens em Goiânia, GO, Brasil. *Ambiente Construído*, 2020, vol. 20, p. 513-525.

Ribeiro, Fernando da Silva *et al.* Quando a cidade encontra o rio, o rio se perde:

Ribeiro, Fernando; De Fatima Oliveira, Maria; Verde, Giuliana Muniz Vila Verde. As representações depreciativas do rio Meia Ponte no jornal O Popular (Goiás, 2010-2020). *Fênix-Revista de História e Estudos Culturais*, v. 20, n. 1, p. 365-389, 2023.

Sen, Z.; Khiyami, H. A.; Al-harthy, S. G.; Al-ammawi, F. A. *et al.* Flash flood inundation map preparation for wadis in arid regions. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, n. 9, p. 3563-3572, 2012.

Shukla, S., & Gedam, S. (2018). Evaluating Hydrological Responses to Urbanization in a Tropical River Basin: A Water Resources Management Perspective. *Natural Resources Research*, 28, 327-347. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9390-7>.

Sillmann, J., Thorarinsdottir, T., Keenlyside, N. (2017). Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes*. 18: 65-74.

Silva Júnior, Luiz Pereira da. Soluções para instabilidade numérica em simulações em regime transitório no modelo HEC-RAS para canais de elevada declividade. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso.

simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Star, J. & Estes J. 1990, Geographic Information Systems: An Introduction. New Jersey, Prentice Hall.

Tedla, M. G.; Cho, Y.; JUN, K. Flood Mapping from Dam Break Due to Peak Inflow: A Coupled Rainfall–Runoff and Hydraulic Models Approach. *Hydrology*, 8, n. 2, 2021.

Tucci, C.E.M. (1998). *Modelos hidrológicos*. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre. 669 p.

Wood, S. A., Jina, A. S., Jain, M., Kristjanson, P. & Defries, R. S. (2014). Smallholder farmer cropping decisions related to climate variability across multiple regions *Global*.

CAPÍTULO 2

2.1. RESUMO

A Região Metropolitana de Goiânia (RMG) enfrenta sérios desafios ambientais e socioeconômicos devido ao crescimento urbano desordenado e à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis. O estudo destaca que a urbanização cresceu expressivamente, com um aumento de 307,83% na área urbana entre 1985 e 2022, acompanhado pela redução de 24,29% na vegetação e de 2,74% nas áreas destinadas à agropecuária. Esses dados indicam um avanço insustentável da urbanização sobre áreas anteriormente naturais ou agrícolas, intensificando as pressões ambientais. Uma análise geomorfológica aponta a predominância de pediplanos degradados na RMG, especialmente em Goiânia e Aparecida de Goiânia, que favorecem processos erosivos, assoreamentos e inundações, particularmente em áreas de fundo de vale. Além disso, o perfil geológico da região, caracterizado por rochas sedimentares e solos suscetíveis à erosão, contribui para a vulnerabilidade ambiental. O estudo de declividade revela que muitas áreas urbanizadas estão situadas em terrenos com inclinações que agravam a instabilidade do solo, aumentando os riscos de erosão e penetração. A expansão desordenada também compromete os recursos hídricos, como demonstrado pelo impacto sobre o Rio Meia Ponte, que sofre com assoreamento e poluição devido à ocupação econômica das margens e ao crescimento urbano acelerado em setores como Goiânia II. Além disso, a perda de cobertura vegetal tem limitada a capacidade de infiltração do solo, aumentando o escoamento superficial e os riscos de enchentes. Os resultados ressaltam a necessidade de planejamento urbano integrado, priorizando ações como a proteção de áreas de preservação permanente, o manejo sustentável do solo, a recomposição de vegetação nativa e a adoção de políticas públicas voltadas à sustentabilidade. Uma gestão eficiente da RMG requer a colaboração entre municípios para mitigar vulnerabilidades ambientais e harmonizar o crescimento urbano com a conservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: Região Metropolitana de Goiânia (RMG), Vulnerabilidade ambiental, Planejamento Urbano Sustentável

2.2. ABSTRACT

The Goiânia Metropolitan Region (RMG) faces serious environmental and socio-economic challenges due to disorganised urban growth and the occupation of environmentally sensitive areas. The study highlights that urbanisation has grown significantly, with an increase of 307.83% in the urban area between 1985 and 2022, accompanied by a reduction of 24.29% in vegetation and 2.74% in areas used for agriculture. These figures indicate an unsustainable advance of urbanisation over previously natural or agricultural areas, intensifying environmental pressures. A geomorphological analysis points to the predominance of degraded pediplains in the RMG, especially in Goiânia and Aparecida de Goiânia, which favour erosive processes, siltation and flooding, particularly in valley bottom areas. In addition, the geological profile of the region, characterised by sedimentary rocks and soils susceptible to erosion, contributes to environmental vulnerability. The slope study reveals that many urbanised areas are located on slopes that aggravate soil instability, increasing the risk of erosion and penetration. Disorganised expansion also compromises water resources, as demonstrated by the impact on the Meia Ponte River, which suffers from silting and pollution due to the economic occupation of its banks and accelerated urban growth in sectors such as Goiânia II. In addition, the loss of vegetation cover has limited the infiltration capacity of the soil, increasing surface run-off and the risk of flooding. The results highlight the need for integrated urban planning, prioritising actions such as the protection of permanent preservation areas, sustainable soil management, the restoration of native vegetation and the adoption of public policies aimed at sustainability. Efficient management of the RMG requires collaboration between municipalities to mitigate environmental vulnerabilities and harmonise urban growth with the conservation of natural resources.

Keywords: Goiânia Metropolitan Region (RMG), Environmental Vulnerability, Sustainable Urban Planning

2.3. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Goiânia é uma das mais importantes concentrações urbanas do Brasil, situada no estado de Goiás. Segundo (Da Costa; De Lima, 2024), os dados preliminares do Censo Demográfico de 2022 divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelaram que a Região Metropolitana de Goiânia (RMG) foi a aglomeração urbana que apresentou o maior crescimento populacional na última década, com um aumento de aproximadamente 19% em relação a população do Censo de 2010, incrementando mais de 420 mil novos habitantes e totalizando 2.613.491 habitantes em 2022.

Além do aumento populacional, os dados indicam também um crescimento significativo no número de domicílios na Região Metropolitana de Goiânia, especialmente nos municípios próximos à capital. Enquanto Goiânia teve um aumento de 35,6% no número de domicílios, outras cidades da região metropolitana mais que dobraram essa quantidade, como Abadia de Goiás com um crescimento de 197,5%, Goianira com 143,6% e Senador Canedo com 115,6% (IBGE, 2022).

A cidade de Goiânia e sua região metropolitana têm passado por intensas transformações nas últimas décadas, com um crescimento populacional acelerado e conseqüentes mudanças no uso do solo. Este crescimento tem levado a diversos desafios urbanos, como ocupação irregular, ineficiência de infraestrutura, degradação ambiental e desigualdade socioeconômica.

Segundo (Portis *et al.*, 2020), o uso do solo pode ser definido como a distribuição espacial das diferentes funções sociais da cidade, em que se destacam os usos residencial, industrial, comercial, de serviços, de lazer e institucional. Assim, a distribuição dos usos do solo sobre a área urbana determina a localização das atividades humanas, ou seja, onde a população mora, trabalha, estuda, faz compras, se diverte, etc.

O crescimento populacional em Goiânia superou as previsões iniciais de planejamento urbano. De acordo com (De Miranda, 2021), a cidade foi planejada para uma população de 50 mil habitantes, entretanto, com este crescimento, houve uso e ocupação irregular do solo, ineficiência da infraestrutura urbana, degradação ambiental e urbanística, entre outros problemas.

Estima-se que, em toda a RMG, menos de 25% ainda seja coberto por remanescentes de vegetação nativa e que parte significativa das APPs se encontra degradada. O Plano de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Goiânia (PDI-RMG), responsável pela

compilação destes dados e que mapeou as áreas de risco em todos os municípios abrangidos, evidencia a urgência da implementação de ações no sentido de recuperar essas áreas degradadas e garantir a manutenção e qualidade dos recursos naturais, (Borges, 2020).

Segundo (Lima *et al.*, 2018), na região metropolitana de Goiânia (RMG), sendo uma área central no estado constituída por 20 municípios (dentre estes a capital Goiânia), se observa, além do desenvolvimento de atividades agropecuárias e industriais, um intenso processo de urbanização, com marcantes alterações do ambiente natural.

Além dos desafios ambientais, Goiânia também enfrenta graves problemas de desigualdade socioeconômica. De acordo com (Amaral; Amaral,2019), a desigualdade socioeconômica em Goiânia tem sido evidenciada por uma série de relatórios da Organização das Nações Unidas (ONU) ao longo dos anos. Em 2008, a ONU indicou que Goiânia era uma das cidades mais desiguais na América Latina e Caribe, com coeficientes de Gini acima de 0,60. Em 2010, Goiânia apresentava a maior desigualdade na região, com índice de Gini igual a 0,65. Em 2016, os dados se mantiveram, com Goiânia apresentando alta desigualdade socioeconômica, ficando atrás apenas de Brasília e Curitiba.

A metodologia aplicada na presente pesquisa teve início a interpretação da análise multicritério de modo a integrar variáveis ambientais e sociais, permitindo uma avaliação espacial específica da vulnerabilidade, bem como uso de bases de dados consolidadas como a IBGE. A elaboração do mapa de síntese da (vulnerabilidade ambiental da RMG), teve como início a análise das altimetrias das cidades, armazenada em estrutura matricial. Na Região Metropolitana de Goiânia, os municípios de Goiânia, Aparecida de Goiânia e Senador Canedo possuem mapas altimétricos com qualidade cartográfica classe A, de acordo com as normas da cartografia nacional (Nazareno; Ferreira; Macedo, 2007). Esses mapas podem ser usados como base para a análise dos impactos e para a proposição de ações de recuperação e preservação, delimitação de zonas de risco e planejamento urbano sustentável. destacando o recorte temporal de uso e cobertura de solo de 1985 a 2022, com dados segregados em dois intervalos de resoluções, sendo de 1985 a 2015 usando 30m de resolução e de 2016 a 2022 usando 10m de resolução do Landsat.

Posteriormente, fez-se a classificação do grau de vulnerabilidade das unidades territoriais com índice de umidade topográfica, pedologia e processos erosivos.

O diferencial da presente pesquisa em relação as anteriores é em sua abordagem integrada e atualizada para analisar a relação do crescimento urbano e a vulnerabilidade

ambiental, e as ferramentas de uso e ocupação do solo na Região Metropolitana de Goiânia (RMG), utilizando dados de sensoriamento remoto e bases cartográficas ao longo de um período extenso (1985-2022).

Diante desse cenário, o presente trabalho teve por objetivo analisar os principais fatores que contribuíram para o crescimento populacional em Goiânia e seus impactos na cidade e na RMG, avaliar a distribuição do uso do solo e suas consequências para a localização das atividades humanas e para o meio ambiente e a elaboração de mapa de síntese da vulnerabilidade ambiental da RMG.

2.4. METODOLOGIA

2.4.1. Descrição da área de estudo

A Região Metropolitana de Goiânia (RMG) está situada na mesorregião do Centro Goiano, especificamente na microrregião de Goiânia. Estabelecida em 1999 pela Lei Complementar nº 27, a RMG é composta por 20 municípios (Figura 1). A área abrange 7.312,96 km² e tem uma população aproximada de 2.613.491 habitantes, representando cerca de 40% da população total do Estado de Goiás (IBGE, 2019). Dentro da RMG, encontra-se o município de Goiânia, a capital do estado, que desde 2007 é classificada pelo IBGE como uma metrópole devido à sua infraestrutura bem desenvolvida e sua significativa influência nacional.

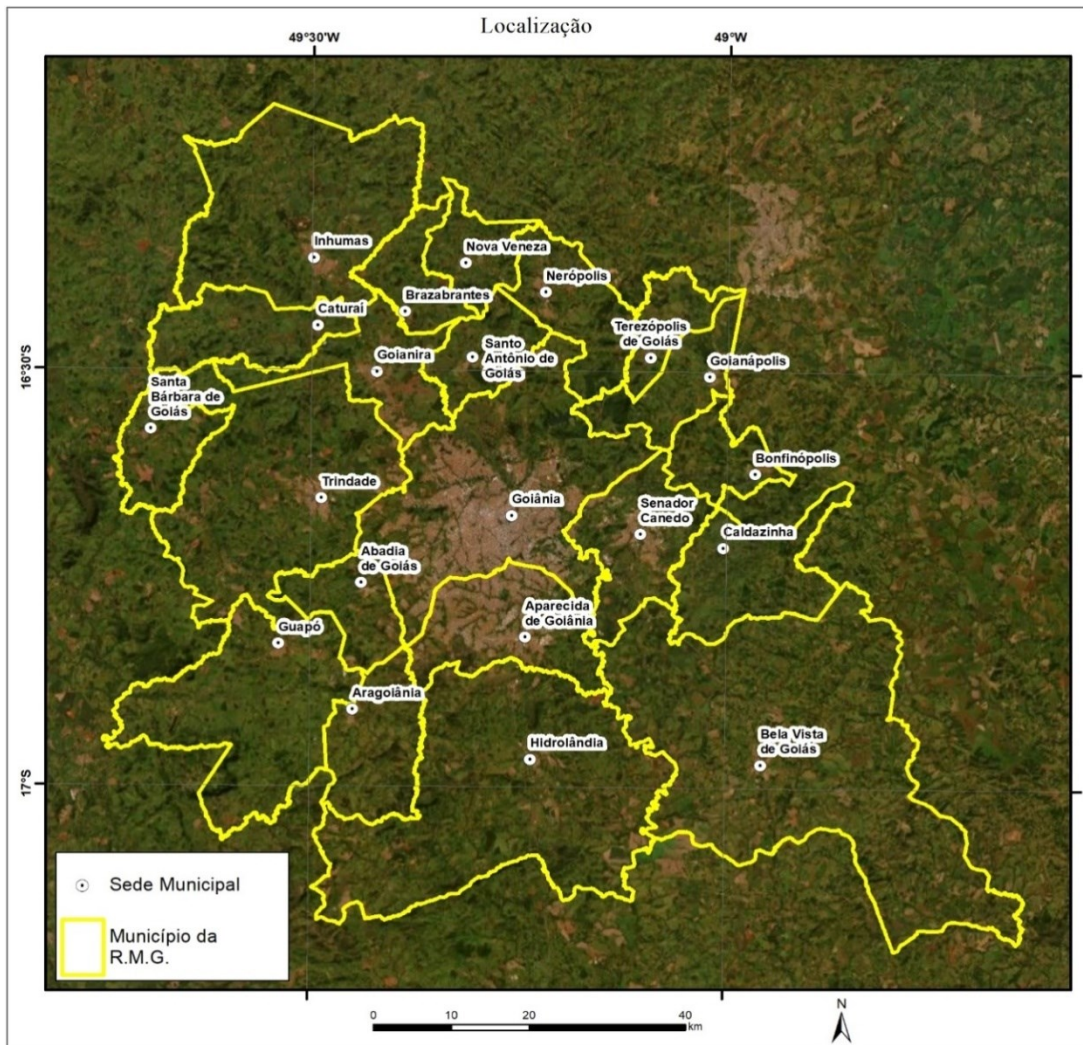


Figura 1: Região Metropolitana de Goiânia

Fonte: Ferreira, 2024

2.5. GEOPROCESSAMENTO

Diversas técnicas de geoprocessamento foram aplicadas para garantir maior precisão e consistência nos resultados obtidos. Essas técnicas incluíram o uso de ferramentas de análise espacial avançada, processamento de dados vetoriais e raster, além da integração de bases de dados georreferenciados. A abordagem permitiu uma representação detalhada e confiável dos fenômenos espaciais observados.

A metodologia deste estudo foi estruturada em várias etapas interdependentes, desenvolvidas para investigar os impactos decorrentes do uso e ocupação do solo, bem como a vulnerabilidade ambiental da Região Metropolitana de Goiânia (RMG). Essas etapas incluíram a coleta de dados ambientais, a análise multitemporal de imagens de satélite, o mapeamento de áreas críticas e a modelagem espacial para subsidiar as análises de risco.

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico e documental abrangente sobre infraestruturas e desenvolvimento, uso da terra, tipos de solo, geologia, conservação e preservação e degradação ambiental na RMG. Este levantamento incluiu artigos acadêmicos, relatórios governamentais e dados de organizações internacionais, como a ONU e o IBGE. A revisão da literatura permitiu identificar as principais tendências, desafios e soluções propostas em estudos anteriores.

Em seguida, foi realizada uma análise espacial e mapeamento das áreas de uso do solo, ocupação irregular e áreas de preservação permanente (APPs) na RMG. Utilizando técnicas de geoprocessamento e sistemas de informação geográfica (SIG), foram identificadas e mapeadas as áreas mais afetadas pela urbanização e degradação ambiental. Esses mapas podem ser usados como base para a análise dos impactos e para a proposição de ações de recuperação e preservação, destacando o recorte temporal de uso e cobertura de solo de 1985 a 2022, com dados segregados em dois intervalos de resoluções, sendo de 1985 a 2015 usando 30m de resolução e de 2016 a 2022 usando 10m de resolução do Landsat.

A resolução espacial, determinada pelo tamanho dos pixels de uma imagem, exerce influência direta na precisão de produtos, análises realizadas com base em imagens orbitais. Em geral, quanto menores forem os pixels de uma imagem, maior será o nível de detalhamento e, portanto, mais acurado será o delineamento dos objetos a serem identificados, especialmente quando se trata de elementos menores na paisagem (Serviço Florestal Brasileiro, 2021).

2.6. VULNERABILIDADE DA RMG

O mapeamento da vulnerabilidade ambiental foi realizado com base na metodologia aplicada por (Ferreira *et al.*, 2017), seguindo as etapas descritas a seguir.

Inicialmente, os dados topográficos foram preparados e integrados, utilizando mapas cartográficos detalhados e dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que foram interpolados para uma resolução espacial atmosférica de 10 metros. Esse processo aprimorou os métodos trabalhados no projeto Topodata/INPE, garantindo a compatibilidade na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) – fuso 22 Sul – e o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS-2000).

Com os dados altimétricos refinados, foi gerado um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), essencial para a proteção da rede de drenagem e o cálculo de índices hidromorfológicos. Esse modelo foi produzido por meio da técnica de interpolação ANUDEM, que aprimora a coerência hidrológica dos dados e elimina depressões espúrias, resultando em uma representação topográfica mais precisa.

A partir do MDEHC, foram obtidas indicadores ambientais relevantes para a análise de vulnerabilidade, incluindo:

- **Índice de Umidade Topográfica** : Obtido a partir da relação entre a acumulação de fluxo e a declividade do terreno, esse índice identifica áreas propensas à retenção de umidade, fundamentais para a caracterização de recarga hídrica e suscetibilidade a inundações.
- **Pedologia e Lençol Freático** : A distribuição dos tipos de solo foi refinada considerando parâmetros geomorfométricos, como declividade e posição na vertente. A profundidade do lençol freático foi estimada a partir de dados de poços cadastrados e da hidrografia regional.
- **Potencial Erosivo** : O risco de erosão foi estimado por meio da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), que leva em conta fatores como erosividade da ocorrência, erodibilidade do solo, comprimento de rampa e cobertura do solo. Para isso, imagens de satélite de alta resolução foram utilizadas na classificação da cobertura do solo, permitindo a incorporação do fator CP (uso e manejo) na pesquisa.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

(1)

Os mapas resultantes foram integrados e reclassificados para a definição das categorias de vulnerabilidade ambiental, variando de muito baixo a muito alta. A aplicação dessa metodologia possibilitou a identificação de áreas prioritárias para conservação ambiental e planejamento territorial sustentável (Ferreira *et al.*, 2017).

2.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.7.1. Uso e cobertura da terra (Mapas temporais)

Com base nos produtos cartográficos gerados, relativos às mudanças temporais de uso e cobertura do solo da Região Metropolitana de Goiânia (RMG), foi possível identificar alterações significativas nesses mapas ao longo do tempo. Essas mudanças geralmente estão associadas a atividades com finalidades econômicas ou ocupacionais.

De acordo com a Figura 2, observam-se diferentes tipos de usos do solo, tanto nativos quanto antrópicos. Embora o setor agropecuário não seja o mais influente na economia da região metropolitana, devido, por exemplo, ao alto custo da terra, ele desempenha um papel importante como dinamizador econômico para os municípios com baixa densidade econômica na RMG.

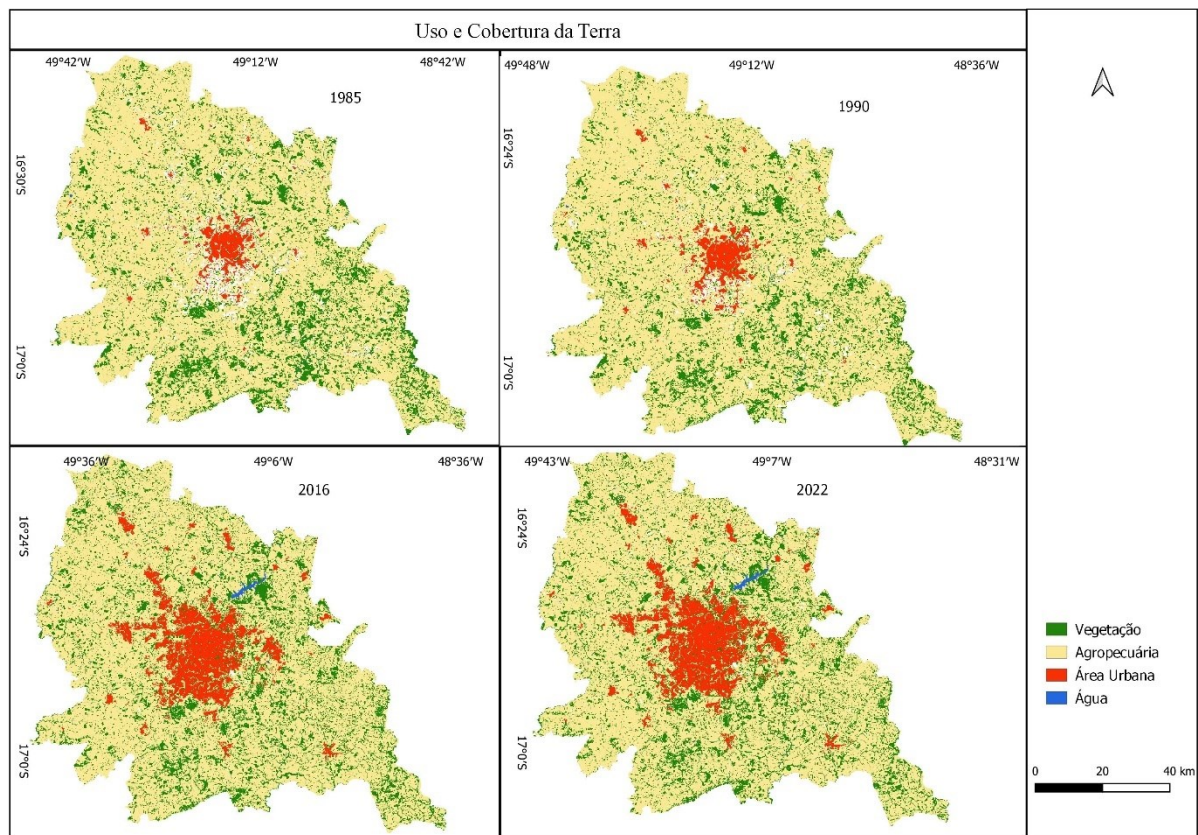


Figura 2: Comparação de uso e ocupação do solo da RMG

Fonte: Autor, 2025

Os resultados encontrados corroboram com os estudos de (Da silva; Ferreira, 2014), e (Favoretto *et al.*, 2022), que, ao analisar as principais coberturas de uso do solo na Região Metropolitana de Goiânia (RMG), enfatizam a predominância das atividades agropecuárias nesta região. No entanto, ao observar a tabela abaixo, nota-se uma variação oscilante na agropecuária. Comparando isoladamente os anos de 1985 e 2022, percebe-se um decréscimo de 2,74% nesta atividade. Da mesma forma, a vegetação também apresentou uma queda de 44,29%. Em contraste, a área urbana cresceu significativamente ao longo da série temporal, e, ao comparar os anos de 1985 e 2022, observa-se um aumento de 307,83%.

Há várias explicações para este fenômeno. Apesar de Goiânia apresentar um alto índice de Gini, acima de 0,6, dados divulgados em 2014 pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), em conjunto com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e a Fundação João Pinheiro (FJP), mostram que a RMG possui um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,769, tornando-a a sétima região metropolitana do país em qualidade de vida.

Outro fator é a conurbação, que ocorre quando as cidades individuais crescem e suas áreas urbanas se fundem, criando uma região metropolitana contínua. Este processo pode ser justificado pelas melhores condições de vida nas aglomerações maiores, levando a população a preferir residir em localidades onde possam encontrar melhor qualidade de vida. Além disso, nas cidades maiores, os imóveis se valorizam mais rapidamente, motivando a venda para aquisição de outros. Assim, a RMG apresentou a segunda maior taxa média geométrica de crescimento anual da população residente, no período entre 2010 e 2022, com um crescimento de 1,49% ao ano, ficando atrás apenas de Florianópolis (SC), que apresentou um crescimento de 2,47% (IBGE, 2022).

	1985	1990	2016	2022	(1990-1985)	(2016-1990)	(2022-2016)	(2022-1985)	(2022-1985)
Classes	Área (km ²)	Área (km ²)	Área (km ²)	Área (km ²)	Diferenças (km ²)	Diferenças (km ²)	Diferenças (km ²)	Diferenças (km ²)	Diferenças (%)
Vegetação	301,866	216,874	157,323	168,159	-84,991	-59,551	10,836	-133,707	-44,290
Agropecuária	3,890,609	4,460,339	3,753,977	3,783,880	569,730	-706,362	29,902	-106,729	-2,740
Área Urbana	168,142	215,931	631,673	685,732	47,788	415,743	54,059	517,590	307,830
Água	16,567	18,122	25,432	26,175	1,555	7,310	0,743	9,608	57,990

Tabela 2: Comparação de uso e ocupação do solo da RMG

Fonte: Autor, 2025

Também não se pode negar o aumento significativo de corpos de água na Região Metropolitana de Goiânia (RMG), com um crescimento de 57,99%, resultado semelhante ao encontrado por (Borges; Oliveira, 2021). Esse aumento foi impulsionado pelo crescimento urbano e econômico, que levou à construção de infraestruturas hídricas como barragens, reservatórios e represas, essenciais para o abastecimento de água e controle de enchentes. Além disso, a implementação de políticas públicas voltadas para a conservação e ampliação dos recursos hídricos, incluindo projetos de revitalização de rios e nascentes, também desempenhou um papel crucial. Fatores adicionais, como mudanças climáticas, também podem ter contribuído para essa expansão.

O gráfico da figura 3 destaca as variações periódicas das quatro classes de uso do solo analisadas: vegetação, agropecuária, área urbana e água. Observa-se que, ao longo do período de 1985 a 2022, essa tendência se mantém consistente ao longo do tempo, conforme ilustrado pela tabela acima, apesar de não se notar o decréscimo da vegetação assim como da agropecuária como enfatizamos antes quando comparado os anos de (1985 e 2022), na tabela 8.

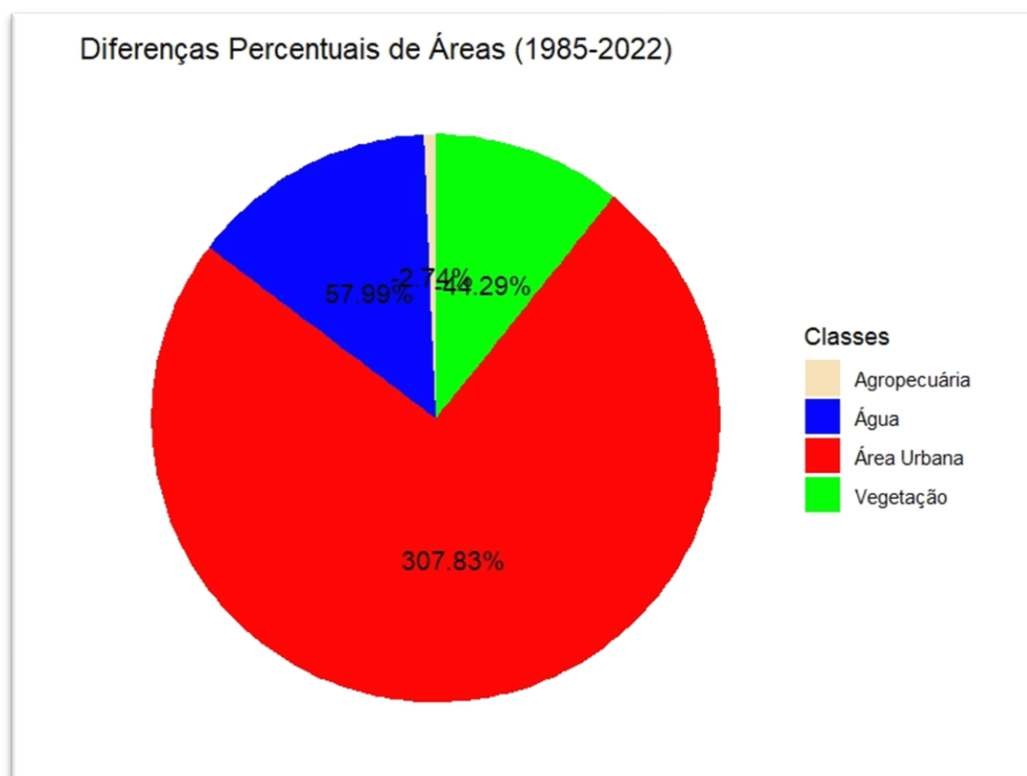


Figura 3: Comparação de uso e ocupação do solo da RMG

Fonte: Autor, 2025

A expansão urbana desordenada em Goiânia tem raízes históricas, com destaque para o "a expansão de novos parcelamentos" ocorrido na década de 1950, fomentado pela Lei Municipal nº 176, de 16 de março de 1950, e pelo Decreto nº 16, de 20 de junho de 1950. Segundo (Moysés, 2004), esse período foi marcado pela rapidez de loteamentos, nos quais os proprietários eram responsáveis apenas pela abertura de vias, enquanto as obras de infraestrutura eram necessárias para o poder público. Esse modelo urbanístico protegido em uma expansão horizontal acelerada e desorganizada, gerando sobrecarga para o poder público e comprometendo a estruturação sustentável da cidade.

O processo de urbanização foi intensificado ainda mais com os fluxos migratórios das décadas de 1960 e 1970. A construção de Brasília e a modernização agrícola no Cerrado atraíram um grande contingente populacional, transformando Goiânia em um polo centralizador de recursos e serviços (Steinberger, 2003; Arrais, 2013). Contudo, a falta de planejamento adequado levou à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis, como as margens de cursos d'água em topografias sinuosas, que, segundo (UCG,2003), são propensas a inundações, poluição e manipulação ambiental.

Na década de 1970, a aprovação da Lei Municipal nº 4.526, que restringia a criação de loteamentos sem infraestrutura urbana básica, impulsionou a expansão em direção ao sul da cidade, contribuindo para o processo de conurbação com Aparecida de Goiânia (Moraes, 1991). Ainda assim, a ocupação ocupada por áreas de fundo de vale e margens de rios apresenta-se como um desafio crítico, demonstrando a dificuldade de conciliar o crescimento urbano com a preservação ambiental.

Além disso, a modernização agrícola, iniciada a partir dos anos 1970, trouxe mudanças significativas na estrutura socioeconômica de Goiás. Como destacado por (Estevam, 2004, *apud* Dacunha *et al.*, 2015), esse processo comprovado em um intenso êxodo rural e no crescimento acelerado das áreas urbanas, especialmente na região central do estado. Goiânia se consolidou como um importante centro urbano e econômico, mas o modelo de desenvolvimento adotado ignorou as limitações ambientais, exacerbando os impactos sobre o Rio Meia Ponte e outras áreas vulneráveis.

2.7.2. Tipos de solo da RMG

As nove categorias de solos mais destacadas na RMG são: cambissolo (Ca), cambissolodistroférico (Cd), GleissoloHáplico (Hidromórfico) Eutrófico (HGPe), Latossolo Vermelho Eutroférico (Led), Latossolo Roxo Distroférico (LRd), Latossolo Vermelho Distroférico (LVd), Argissolo Vermelho Distroférico (PVd), Argissolo Vermelho Eutrófico (PVe) e Neossolo Litólico (RendzinaRd).

Esses tipos de solos possuem características específicas que influenciam a utilização da terra, a agricultura, e a necessidade de práticas de conservação e manejo sustentável na região, onde podemos destacar de acordo com a Figura 4 abaixo, o solo mais predominante da RMG é o Latossolo Vermelho Eutroférico (Led), os solos analisados por (Luiz, 2012), citado por (Luiz; Romão, 2019), considerados por ela representativos dos existentes em Goiânia, possuem estrutura formada por agregação das frações finas, principalmente da fração argila, pois esses minerais são frequentemente os agentes cimentantes dessas agregações.

Enquanto zonas mais próximas a bacia hidrográfica do Meia Ponte são mais predominantes os cambissolos (Ca) e os argissolos (PV), fato esse que corrobora com a pesquisa do (Calil, 2012).

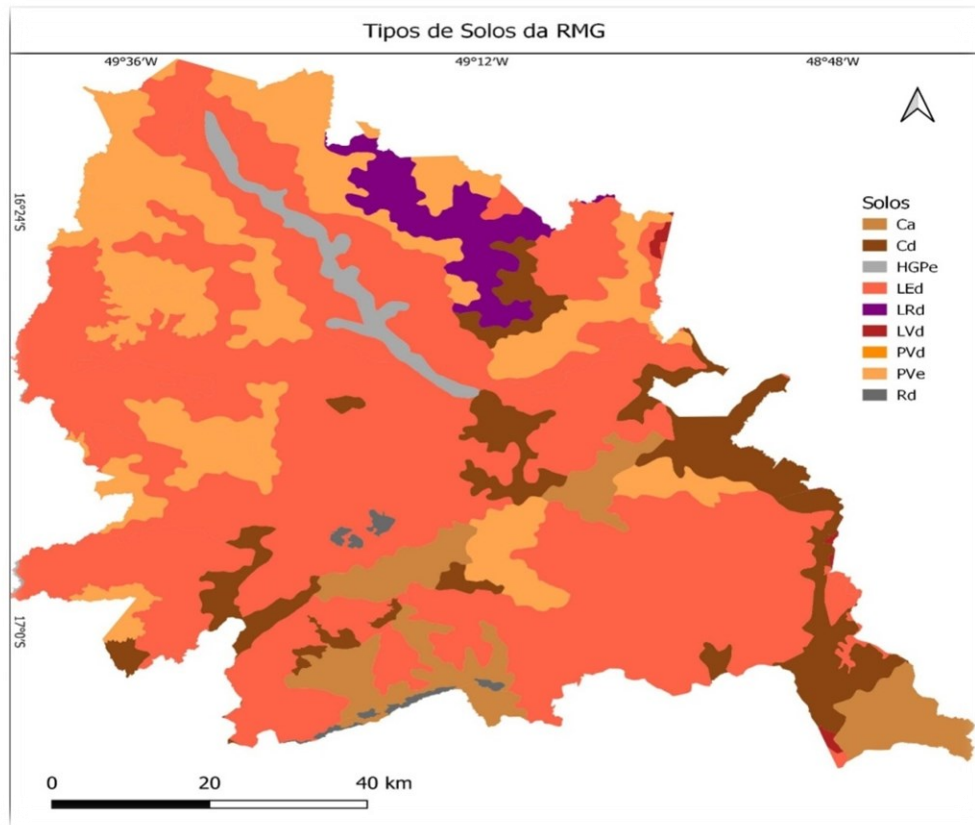


Figura 4: Tipos de Solos da RMG

Fonte: Autor, 2025

O conhecimento detalhado sobre os tipos de solo e suas distribuições é fundamental para promover o uso sustentável da terra na Região Metropolitana de Goiânia. O Latossolo Vermelho Eutroférico, por sua predominância e características favoráveis, é um recurso crucial para a agricultura e a manutenção dos ecossistemas locais. A utilização responsável desse solo pode garantir a sustentabilidade econômica e ambiental, equilibrando o desenvolvimento e a conservação dos recursos naturais para as futuras gerações.

2.7.3. Geologia

Na figura 6 abaixo, encontramos o mapa geológico, composto por 18 classes e dois complexos geológico A e B, com a predominância do complexo B.

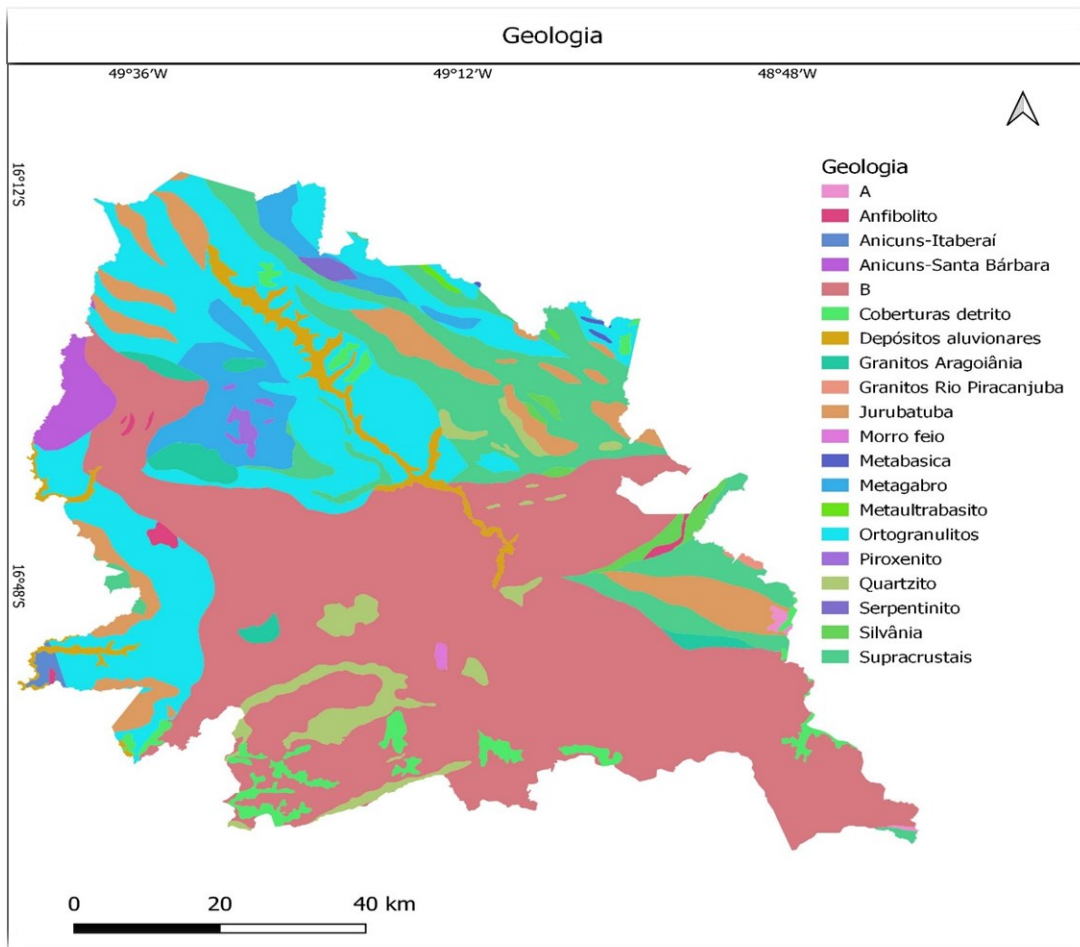


Figura 5: Geologia

Fonte: Autor, 2025

De acordo com (Dias,2015), Goiânia está localizada sobre duas unidades lito estruturais distintas, o que influencia diretamente em diversos aspectos do desenvolvimento urbano e uso do solo. A diversidade geológica presente na região metropolitana de Goiânia desempenha um papel crucial na determinação das características do solo, da topografia, e das possibilidades de uso e ocupação do terreno.

Na porção setentrional, predominam as rochas do Complexo Granulítico Anápolis-Itaçu. Essas rochas, compostas por granulitos ácidos e básicos, meta granitóides e rochas metavulcano-sedimentares associadas, datam do Arqueano-Proterozóico Inferior. Esta composição geológica confere à região características específicas que influenciam desde a estabilidade das construções até a fertilidade dos solos para uso agrícola. Granulitos e metagranitóides, por exemplo, são conhecidos por sua dureza e resistência, características que podem ser vantajosas para construções civis. No entanto, sua presença também pode representar

desafios, como a necessidade de técnicas avançadas para escavação e a possível presença de solos menos férteis, o que exige práticas agrícolas específicas para garantir a produtividade.

Já na porção meridional, as rochas do grupo Araxá-Sul de Goiás, compostas por micaxistos e quartzitos, que datam do Mesoproterozóico, apresentam outra gama de influências sobre o uso do solo. Os micaxistos e quartzitos são rochas metamórficas que, devido à sua composição mineralógica, podem afetar a permeabilidade do solo e sua capacidade de retenção de água. Estas características são fundamentais para o planejamento urbano e agrícola, pois influenciam a disponibilidade de recursos hídricos e a estabilidade dos terrenos. Quartzitos, em particular, são bastante resistentes à erosão, o que pode ser vantajoso para a preservação de áreas naturais e a manutenção de cursos d'água.

Adicionalmente, a presença de depósitos aluvionares associados aos leitos dos principais canais de drenagem que cortam a área, conforme mencionado por (Campos *et al.*, 2003), adiciona uma camada de complexidade ao cenário geológico da região. Estes depósitos são formados pela deposição de sedimentos transportados pela água, o que pode resultar em solos altamente férteis e adequados para a agricultura. No entanto, a ocupação desses terrenos exige cuidados específicos para evitar problemas como enchentes e erosão.

A compreensão detalhada dessas unidades litoestruturais e suas implicações é essencial para o planejamento e gestão do uso do solo na região metropolitana de Goiânia. As características geológicas influenciam desde a viabilidade de projetos de construção até a adequação de práticas agrícolas e a gestão dos recursos hídricos. Portanto, a integração do conhecimento geológico no planejamento urbano pode contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável da região, promovendo um equilíbrio entre o crescimento urbano, a preservação ambiental e a utilização eficiente dos recursos naturais.

2.7.4. Declividade

A declividade do terreno desempenha um papel crucial na determinação das vulnerabilidades geomorfológicas, uma vez que influencia diretamente os processos erosivos, a infiltração de água e a estabilidade dos solos. A síntese cartográfica apresentou evidência de cinco classes de declividade, variando de 0% a mais de 130%. Cada classe reflete diferentes possibilidades de uso e limitações do território.

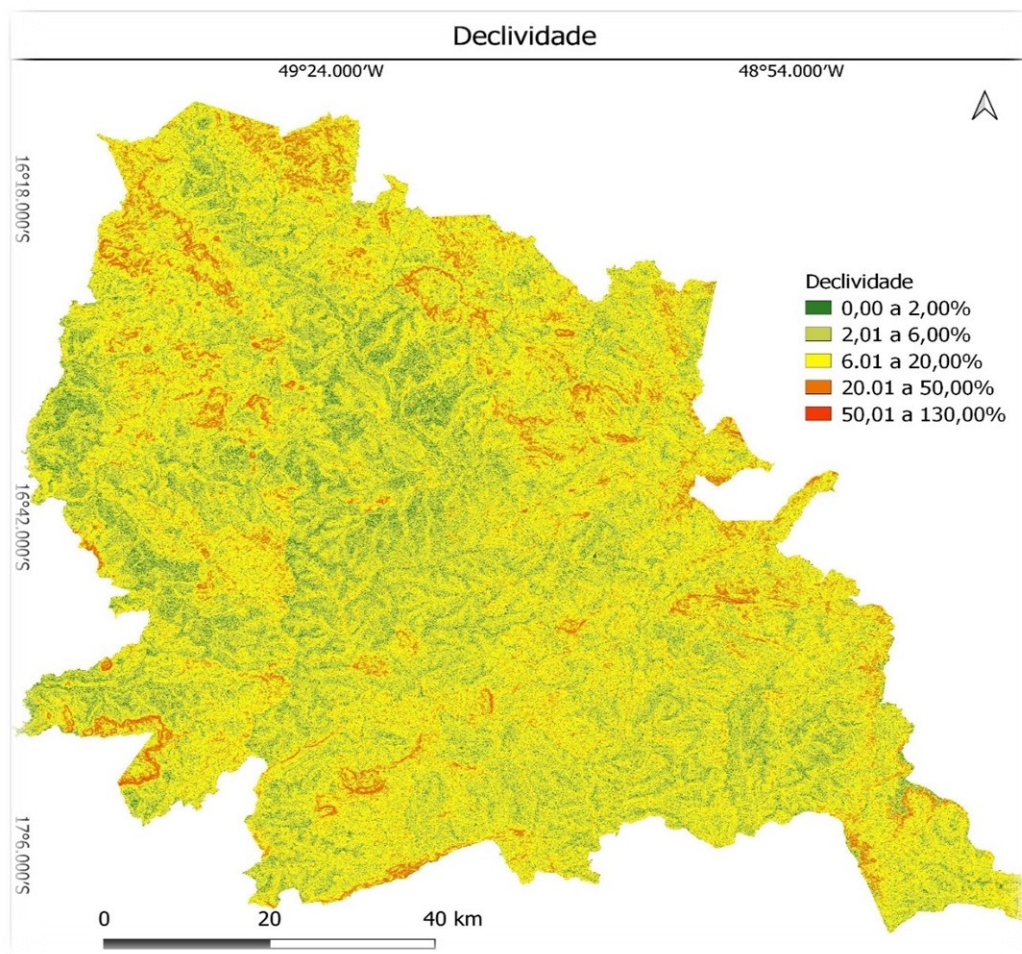


Figura 6: Declividade

Fonte: Autor, 2025

Região Metropolitana de Goiânia (RMG) revela importantes variações geomorfológicas que influenciam diretamente a ocupação e a vulnerabilidade ambiental. Áreas com declividades entre 0% e 2%, como nos municípios de Goianira e Santo Antônio de Goiás, apresentam superfícies relativamente planas e barreiras naturais, sendo frequentemente consideradas para a expansão urbana e agropecuária. Apesar da baixa vulnerabilidade geomorfológica (índice 1 na classificação), essas áreas não estão isentas de impactos ambientais. A compactação do solo e a impermeabilização, comuns em zonas urbanizadas, podem intensificar o escoamento superficial e aumentar os riscos de enchentes, como apontado por (Ross, 1994), que enfatiza a necessidade de manejo adequado mesmo em áreas de baixa declividade.

As áreas com declividades entre 2,01% e 6% incluem terrenos suavemente planejados, como os encontrados em Trindade, Goianira e partes de Nerópolis. Esses locais são frequentemente ocupados por atividades agrícolas mecanizadas e por expansão residencial. No

entanto, a ausência de cobertura vegetal, associada ao uso inadequado do solo, torna essas áreas vulneráveis à erosão e compactação. Solos arenosos ou mal geridos são particularmente suscetíveis à manipulação, conforme observado por (Crepani *et al.*, 1996), que destaca a importância da integração de práticas conservacionistas nesses cenários para mitigar os impactos da pressão antrópica.

Já nas áreas com declividades entre 20,01% e 50%, presentes em municípios como Senador Canedo, Aparecida de Goiânia e porções periféricas de Goiânia, predominam encostas íngremes e relevos dissecados, com elevada suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa. Essas áreas, geralmente coincidentes com pediplanos retocados ou dissecados, possuem vulnerabilidade elevada (índice 2,5-3) e uso restrito devido aos custos elevados de engenharia e aos riscos ambientais associados. A ocupação desordenada nessas regiões, ainda que limitada, acarreta desafios significativos para a sustentabilidade ambiental. (Souza; Cols, 2020) enfatizam que o crescimento urbano em áreas de alta declividade intensifica a gestão do solo, reforçando a necessidade de políticas públicas para preservar a integridade ambiental dessas localidades.

O uso inadequado do solo em áreas de declividades moderadas a altas, como práticas agrícolas intensivas sem manejo conservador, agrava os riscos ambientais e geomorfológicos na RMG. Por outro lado, nas áreas de baixa declividade, onde o potencial de ocupação é maior, é essencial garantir que a urbanização e a expansão agropecuária sejam acompanhadas de medidas que minimizem os impactos ambientais, como o controle de impermeabilização e a adoção de sistemas de drenagem eficientes.

A abordagem de análise da declividade destaca a interdependência entre características geomorfológicas e uso do solo, evidenciando como os diferentes graus de influência a vulnerabilidade ambiental e os desafios de ocupação. Estudos como os de (Medeiros, 2023), que integram fatores geomorfológicos e pedológicos, reforçam a importância de práticas de manejo sustentável para prevenir degradações irreversíveis. Dessa forma, o planejamento territorial deve priorizar a conservação ambiental em áreas críticas, ao mesmo tempo em que promove um uso mais racional e responsável dos recursos disponíveis.

2.7.5. Vulnerabilidade ambiental

Em anexo abaixo encontramos a Figura 7, uma representação cartográfica da vulnerabilidade da RMG divididas em 5 classes.

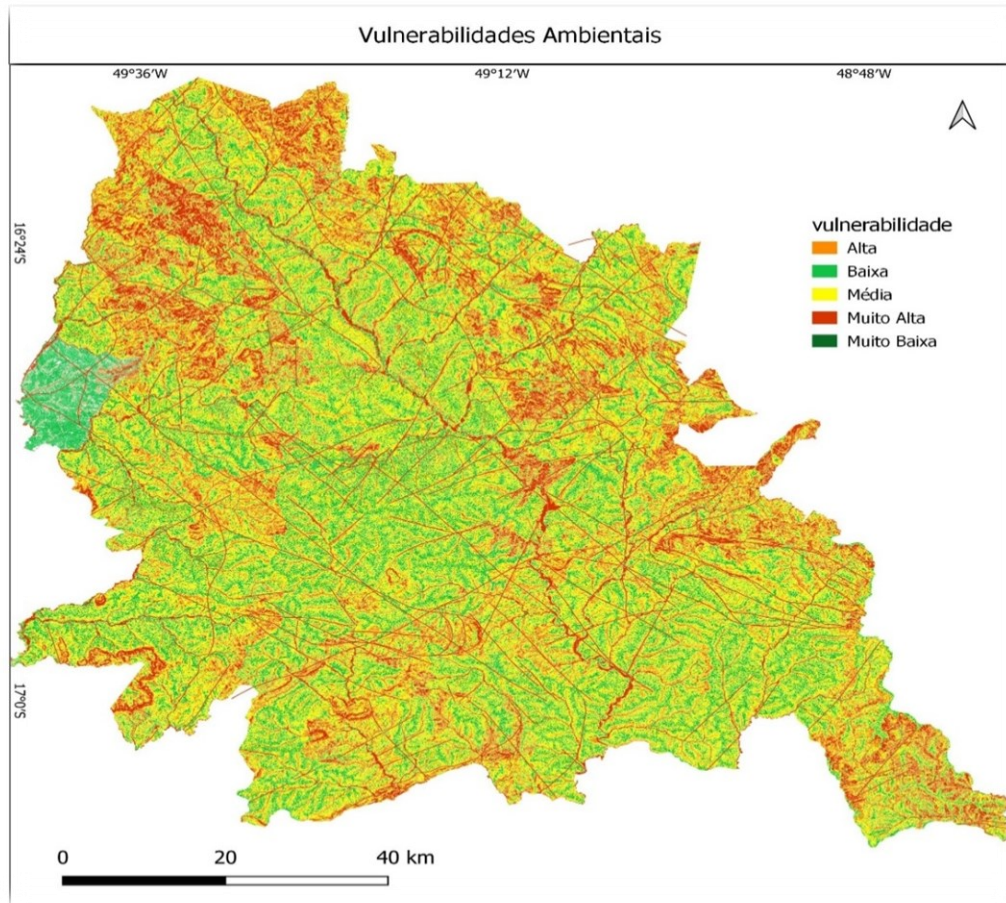


Figura 7: Vulnerabilidades Ambientais

Fonte:(Ferreira *et al.*, 2017) adaptada por Autor, 2025

A vulnerabilidade ambiental da Região Metropolitana de Goiânia (RMG) resulta de uma complexa interação entre fatores geomorfológicos, pedológicos e o uso do solo, configurando variações significativas em diferentes municípios da região. As áreas mais vulneráveis concentram-se em encostas íngremes e terrenos dissecados, especialmente em localidades como Senador Canedo, Aparecida de Goiânia e algumas zonas periféricas de Goiânia. Nesses locais, a combinação de declividades acentuadas, que variam entre 20,01% e 50%, e solos de alta sensibilidade, como os Latossolos Vermelhos Eutroféricos, Cambissolos e Argissolos, apontados para o aumento da fragilidade. A presença de rochas do Complexo Granulítico, micaxistos e quartzitos amplificam a diversidade geomorfológica e, conseqüentemente, a suscetibilidade a processos erosivos e alagamentos. A ocupação desordenada, marcada por

atividades agrícolas mecanizadas e expansão residencial em áreas desprovidas de cobertura vegetal, agrava ainda mais essa vulnerabilidade, com consequências de manipulação do solo e instabilidade ambiental.

Por outro lado, áreas com alta vulnerabilidade, presentes em municípios como Trindade, Goianira e partes de Nerópolis, também apresentam relevo dissecado, mas com declividades moderadas entre 6% e 20%. Nessas regiões, o uso inadequado do solo, como a agricultura mecanizada sem adoção de práticas conservacionistas, é um dos principais fatores que intensificam os processos erosivos. A compactação do solo, resultado de práticas agrícolas intensivas, reduz a infiltração de água e aumenta o escoamento superficial, tornando essas áreas mais propensas à manipulação.

As áreas de vulnerabilidade média caracterizam-se por suaves ondulações e solos moderadamente prejudiciais, predominando em municípios como Hidrolândia e Abadia de Goiás. Nessas localidades, a transição entre usos urbanos e rurais, associada à ausência de manejo adequado, torna essas áreas expostas a processos erosivos de intensidade moderada. O crescimento desordenado e a ausência de planejamento ambiental planejado para o agravamento dos riscos ambientais, especialmente em zonas de interface entre os espaços urbanos e rurais.

Nas regiões de baixa e muito baixa vulnerabilidade, como em Goianira, Santo Antônio de Goiás e áreas de várzeas, predominam terrenos planos com declividades inferiores a 2%. Estas áreas possuem solos coesos, muitas vezes protegidos por cobertura vegetal, e apresentam usos do solo mais sustentáveis, seja para fins agropecuários ou urbanos. A presença de práticas conservadoras limita significativamente os riscos ambientais nessas regiões, conferindo-lhes maior estabilidade.

A análise das vulnerabilidades ambientais na RMG dialoga com estudos consolidados na literatura científica. (Ross, 1994) destaca que declividades superiores a 20% têm elevado potencial erosivo, corroborando a identificação de áreas críticas nos mapas analisados. A abordagem da descrição cartográfica de (Crepaniet *al.*, 1996), que integra declividade, tipo de solo e uso do solo como indicadores-chave, é compatível com os métodos aplicados nesta análise. (Souza; Cols, 2020) evidenciam que o crescimento urbano desordenado é um fator predominante no aumento da vulnerabilidade ambiental, especialmente em regiões de alta declividade, enquanto (Medeiros, 2023) destaca a importância de práticas de manejo

conservacionista, como terraços e reflorestamento, em áreas ocupadas por atividades agrícolas e pecuárias.

A vulnerabilidade ambiental da RMG reflete um cenário de intensa pressão antrópica e necessidade de manejo sustentável.

A análise dos resultados sobre a vulnerabilidade ambiental na Região Metropolitana de Goiânia (RMG) revela um quadro complexo e preocupante, conforme evidenciado por diversos estudos. Segundo os dados apresentados, a maior parte da RMG é classificada com vulnerabilidades variando de muito baixas a muito altas, o que destaca a sensibilidade dessas áreas a impactos severos, tanto de origem antropogénica quanto relacionados às mudanças climáticas.

Um dos estudos (Ferreira *et al.*, 2017) indica que as áreas com baixa vulnerabilidade ambiental na RMG são aquelas predominantemente ocupadas por usos do solo voltados para atividades econômicas e urbanas. Isso sugere que a falta de preservação ambiental nessas regiões resulta na ausência de vegetação nativa significativa, aumentando sua vulnerabilidade a eventos extremos e degradação ambiental.

Outra pesquisa (Hora *et al.*, 2022) aborda a vulnerabilidade ambiental e segurança hídrica na RMG, destacando a situação das áreas próximas aos mananciais de água. Essas áreas, essenciais para o abastecimento público, sofrem significativa degradação devido à expansão urbana e agropecuária desordenada, comprometendo as Áreas de Proteção Permanente (APP) dos cursos d'água e colocando em risco a qualidade e disponibilidade de água na região.

Além disso, (Lima *et al.*, 2022) enfatizam a alta fragmentação dos remanescentes de vegetação na RMG. A manutenção e conservação desses remanescentes são cruciais para mitigar a vulnerabilidade ambiental da região, sendo o reflorestamento das áreas vulneráveis e das APP uma recomendação fundamental para restaurar a integridade ecológica e promover a resiliência frente aos impactos ambientais.

Em síntese, os estudos convergem para a necessidade urgente de abordagens proativas e integradas para a gestão ambiental na RMG. Isso inclui políticas que visem a conservação dos recursos naturais, o controle do uso do solo, a proteção das áreas de mananciais e a promoção de práticas sustentáveis que minimizem os impactos das atividades humanas sobre o ambiente. A implementação dessas medidas não apenas protegerá a biodiversidade local e os serviços

ecossistêmicos, mas também contribuirá para a segurança hídrica e a qualidade de vida das populações urbanas e rurais da região metropolitana.

2.8. CONCLUSÃO

A análise proposta nesta pesquisa buscou avaliar o uso e cobertura da terra e a vulnerabilidade ambiental da Região Metropolitana de Goiânia (RMG). A partir de estudos realizados por diversos pesquisadores, da legislação vigente, e com o auxílio de produtos de sensoriamento remoto e bases cartográficas, foi possível realizar uma análise espacial detalhada da região.

A Região Metropolitana de Goiânia (RMG) apresenta vulnerabilidades ambientais significativas, resultantes da interação entre suas características geomorfológicas e a pressão do crescimento urbano e industrial. Municípios como Goiânia e Aparecida de Goiânia, marcados por pediplanos degradados, estão particularmente expostos a processos de inundações e erosões, agravados pela impermeabilização do solo decorrente da expansão urbana desordenada. Além disso, áreas industriais como Senador Canedo enfrentam sérios problemas de contaminação hídrica, principalmente das águas subterrâneas, devido às atividades petroquímicas. Outros municípios, como Trindade e Nerópolis, sofrem com o desmatamento intenso e a manipulação do solo e dos corpos d'água, influenciados pelo avanço urbano e agrícola.

Os impactos ambientais na RMG evidenciam que o uso e cobertura do solo são fatores críticos para a sustentabilidade regional. Estudos apontam que uma urbanização insustentável intensifica os riscos geomorfológicos naturais, comprometendo não apenas a qualidade de vida da população, mas também os recursos hídricos e os ecossistemas locais. Goiânia, como maior centro urbano da região, sofre com pressão populacional que afeta diretamente áreas de preservação permanente e compromete a gestão dos recursos naturais.

Dessa forma, os resultados da pesquisa reforçam a necessidade de intervenções estruturais e não estruturais, como o manejo sustentável do solo, a preservação de áreas nativas e a criação de unidades de conservação, especialmente em áreas críticas, como Aparecida de Goiânia. A compartimentação geomorfológica surge como ferramenta essencial para identificar áreas de maior vulnerabilidade e priorizar ações de mitigação. Além disso, a colaboração intermunicipal e o fortalecimento de políticas ambientais são indispensáveis para combater os efeitos da urbanização e industrialização desordenadas.

Portanto, a RMG exige um planejamento urbano sustentável e ações coordenadas entre os municípios para equilibrar o desenvolvimento socioeconômico e a preservação ambiental,

garantindo a resiliência da região frente aos desafios de impostos por suas características geomorfológicas e pelo modelo atual de ocupação do solo.

2.9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral, Ernesto Friedrich de Lima; Amaral, Camilo Vladimir de Lima. Estruturas invisíveis de segregação na Região Metropolitana de Goiânia. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 36, p. e0089, 2019.

Arrais, Tadeu A. *A produção do território goiano: economia, urbanização, metropolização*. Goiânia: Ed. UFG, 2013.

Borges, Elcileni De Melo; Barreira, Celene Cunha Monteiro; Marques Da Costa, Eduarda. Habitação Social e desenvolvimento urbano sustentável: o caso da região metropolitana de Goiânia. *GeoUERJ*, 2017, no 30, p. 122-144.

Borges, Fábio Miguel Da Silva. avaliação de planos de recuperação de áreas degradadas em áreas de preservação permanente na região metropolitana de Goiânia, Goiás, Brasil. 2020

Brasil, Joildes; Ferreira, Manuel Eduardo; Cardoso, Murilo Raphael Dias. Avaliação das áreas de preservação permanente da região metropolitana de Goiânia a partir da análise legal e de sistema de informação geográfica. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, 2020, no 45.

Brasil. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei no 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 18 out 2012.

Calil, Pérola M., et al. Caracterização geomorfométrica e aproveitamento apenas da Bacia Hidrográfica do Alto Meia Ponte, Goiás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2012, vol. 16, pág. 433-442.

Campos, J. E. G.; Rodrigues, A. P.; Almeida, L.; Resende, L.; Magalhães, L. Chaul, Nasr N. Fayad. *A construção de Goiânia e a transferência da capital*. 2ª ed. Goiânia: Ed. da UFG, 1999.

Crepani, E., Medeiros, J.D., Hernandez Filho, P., Florenzano, T.G., Duarte, V., Barbosa, C.C.F., Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. INPE, São José dos Campos, (2001).

Crispim, D. C., Araújo, J. V. G., & Ferreira, N. C. (2015). proposição de mapa de vulnerabilidade de águas subterrâneas para município de senador canedo-go, usando metodologia god. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28342>

Da Costa Cabral, Gabriel; De Lima, Leandro Oliveira. o solo urbano e o mercado imobiliário: apontamentos sobre o ajuste espacial e a integração do espaço na região metropolitana de goiânia.: urbansoilandthe real estatemarket: notes onthespatialadjustmentandintegrationofspace in themetropolitanregionofgoiânia. *Boletim Goiano de Geografia*, 2024, vol. 44, no 1.

Da Costa, Silva marques. habitação social e desenvolvimento urbano sustentável: o caso da região metropolitana de Goiânia1. 2017.

Da Cunha, Débora Ferreira; De Melo Borges, Elcileni. Urbanização acelerada: risco para o abastecimento de água na Região Metropolitana de Goiânia. *Geo UERJ*, n. 26, p. 226-244, 2015.

Da Silva, Marcos Vinícius Alexandre; Ferreira, Nilson Clementino. Avaliação da ocupação e uso de terras em bacias hidrográficas da Região Metropolitana de Goiânia/GO (2010. *Ateliê Geográfico*, 2014, vol. 8, no 2, p. 150-167.

Da Silva, Rodrigo Gomes et alet al. análise comparativa de mapeamentos do uso e cobertura a partir de imagens landsat-8 e sentinel-2 através do algoritmo randomforest na plataforma google earthengine. *Revista Tamoios*, v. 19, n. 2, p. 61-79, 2023.

De Miranda, Erica Piaui Alves et alet al. análise da demanda por estudos de impacto de vizinhança em goiânia, go. *Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, v. 7, n. 2, p. 13-13, 2021.

De Oliveira Borges, Raphael; Das Neves, Cleuber Barbosa; De Castro, Selma Simões. Delimitação de áreas de preservação permanente determinadas pelo relevo: aplicação da legislação ambiental em duas microbacias hidrográficas no estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2011.

Dias, Marcel Bordin Galvão. Depósitos tecnogênicos na região noroeste de Goiânia (GO). 2015.

Estevam, Luís. *O tempo da transformação: estrutura e dinâmica da formação econômica de Goiás*. 2ª ed. Goiânia: Editora da UCG, 2004.

F.; SÁ, M. A. M. Diagnóstico Hidrogeológico da Região de Goiânia. Goiânia:

Favoretto, Joildes Brasil; Favoretto, Natalle Bosi; Ferreira, Manuel Eduardo. O Código Florestal E A Sua Flexibilização Em Áreas De Preservação: O Caso Da Região Metropolitana De Goiânia, Goiás. *Caminhos de Geografia Uberlândia-MG*, 2022, vol. 23, no 89, p. 340-251.

Goiânia, 2008. Disponível em http://www.goiania.go.gov.br/download/amma/relatorio_Plano_Diretor.pdf

[Goiânia, cidade jardim harmonia entre o urbano e a natureza. Goiânia, 02 de Novembro de 2023. Disponível em :https://www.parquemetroolitano.goiania.br/](http://www.parquemetroolitano.goiania.br/)

Goiás. Lei nº 18.104, de 18 de Julho de 2013. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, institui a Nova Política Florestal do Estado de Goiás e dá outras providências. Goiânia, Assembleia Legislativa do Estado de Goiás, 2013. < http://www.gabinetecivil.go.gov.br/pagina_leis.php?id=10899>.

Hora, Karla Emmanuela R.; Ferreira, Gislene Auxiliadora. Agricultura urbana e periurbana na Região Metropolitana de Goiânia. *urbana e direito à cidade*.

http://www.goiania.go.gov.br/download/legislacao/PLANO_DIRETOR_DO_MUNICIPIO_DE_GOIANIA_2007.pdf

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Censo 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>

IBGE –Instituto Brasileiro De Geografia E estatística. Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil Escala 1: 250.0000. Rio de Janeiro: IBGE, (2018).

Instituto de Desenvolvimento Tecnológico do Centro Oeste. Goiânia, março de 2008. Disponível em:http://www.goiania.go.gov.br/download/aprovnet/Carta_Risco/Relatorio_Carta_Risco_IA.pdf.

Lacorte, I. M.; Almeida, M. R. R. Impactos ambientais em áreas de preservação permanente de centros urbanos: o caso da bacia do córrego liso em Uberlândia. *Enciclopédia Biosfera*, v. 11, n. 22, p. 1464- 1475, 2015.

Lima, Gabriella Santos Arruda de; Ferreira, Nilson Clementino; Ferreira, Manuel Eduardo. Qualidade da paisagem e perdas de solo frente à simulação de cenários ambientais no Cerrado, Brasil. *Sociedade & Natureza*, 2022, vol. 32, p. 407-419.

Lima, GSA de; Ferreira, Nilson Clementino; Ferreira, Manuel Eduardo. Modelagem da perda superficial de solo para cenários de agricultura e pastagem na região metropolitana de Goiânia. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 70, n. 4, p. 1510-1536, 2018.

Luciano, Francispaula. O Programa Minha Casa Minha Vida e a questão da habitação social em Goiânia. 2016.

Luiz, Gislaine Cristina; Romão, P. A. Interação solo-atmosfera e processos de inundação e alagamentos na cidade de Goiânia-GO. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2019, vol. 12, no 05, p. 1891-1903.

Martins Júnior, Osmar Pires. Arborização Urbana & Qualidade de Vida: classificação de espaços livres e áreas verdes. Goiânia: Kelps/UCG, 2007.

Martins, Maria Aparecida Neves; Silva, M. M. A construção da barragem João Leite e os reflexos nas áreas de abrangência do reservatório. Anais IV ConGea. Salvador-BA, 2013.

Medeiros, R.B. et al. Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Buriticupu, Maranhão-Brasil (2023).

Moraes, Sérgio de. O Empreendedor Imobiliário e o Estado: O Processo de Expansão de Goiânia em Direção Sul (1975-1985). Brasília: Universidade De Brasília. (Dissertação De Mestrado), 1991.

Moysés, A; Silva E. R; Borges, E. M; Ribeiro, M G. Da formação urbana ao empreendedorismo imobiliário: a nova face da metrópole goianiense. *Mercator – Revista de Geografia da UFC*; Ano 06, nº 12. Fortaleza – Ceará. 2007.

Moysés, Aristides. Goiânia, metrópole não planejada. Goiânia: Editora da UCG. 2004.

Nazareno, N. R. X. ; Ferreira, N. C. ; Macedo, F. C. . Avaliação da Exatidão Cartográfica da Ortofoto Digital do Município de Goiânia - GO. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente - SP. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Presidente Prudente - SP: UNESP – Departamento de Engenharia Cartográfica, 2007. v. 1. p. 1-8.

Novaes, Rafaela Duarte, et al. Avaliação das áreas de preservação permanente–APPS presentes nos cursos d’água e nas nascentes da bacia de captação do rio meia ponte–BCRMP Estado de Goiás. 2023.

PDIG/2000. Antecedentes Históricos. Goiânia. 1992.

Portis, Gabriela Tobias; Santos, Alex Mota dos; Nunes, Fabrizia Gioppo. Análise espaço temporal da alteração do uso do solo sob influência de um polo gerador de viagens em Goiânia, GO, Brasil. *Ambiente Construído*, 2020, vol. 20, p. 513-525.

Prefeitura de Goiânia. Plano Diretor de Arborização de Goiânia – PDAU. Agência Municipal de Meio Ambiente – AMMA.

Prefeitura de Goiânia. Plano Diretor Municipal, 2007. Disponível em: Prefeitura de Goiânia. Revisão e detalhamento da Carta de Risco e planejamento do meio físico do município de Goiânia.

Prefeitura de Goiânia. Zoneamento Ecológico Econômico do Município de Goiânia. Instituto de Desenvolvimento

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). 2010. Consultado em 19 de Novembro de 2014.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). 2013. Consultado em 27 de Novembro de 2014.

Ross, JLS (1994). *Geomorfologia: ambiente e planejamento*. São Paulo: Contexto.

Santos, AR, Silva, EV, & Oliveira, JP (2018). Vulnerabilidade ambiental em áreas de pediplanos no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(2), 321-335.

Silva, AM, & Carvalho, NO (2010). Impactos da urbanização nas características hidrológicas e morfométricas de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(4), 73-85.

Silva, Hariel Gleik, et al. Mapeamento da Vulnerabilidade Ambiental da Região Metropolitana de Goiânia Nilson Clementino Ferreira Ana Caroline Rodrigues Cassiano de Sousa 2 Erick Fellype Rodrigues da Silva 3. Superintendência de Geologia e Mineração, 2003. 107 p.

Silva, Hariel Gleik; Teixeira, Isabela Rodrigues. Mapeamento da Vulnerabilidade Ambiental da Região Metropolitana de Goiânia Nilson Clementino Ferreira Ana Caroline Rodrigues Cassiano de Sousa 2 Erick Fellype Rodrigues da Silva 3.

Spörl, Christiane; Ross, Jurandyr Luciano Sanches. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. GEOUSP-Espaço e Tempo, v. 15, p. 39-49, 2004.

Tecnológico do Centro Oeste e Secretaria Municipal de Planejamento. Goiânia, 2008. Disponível em: <http://www.goiania.go.gov.br/shtml/seplam/dados/zee.shtml>.

Tucci, CEM (2001). *Gestão de águas pluviais urbanas*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

UCG, Universidade Católica de Goiás. *Agenda 21 Goiânia*. ARCA, 2003.

CAPÍTULO 3

3.1. RESUMO

Este trabalho aborda uma análise abrangente da chuva máxima anual acumulada na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte (BHMP), cobrindo o período de 1990 a 2023. Os valores variaram de aproximadamente 600 mm a 1.700 mm, com flutuações inter anuais e estabilização em períodos específicos. A análise estatística revelou que a série temporal é estacionária, como evidenciado pelo teste KPSS (valor de 0,35873 e p-valor de 0,09494) e pela análise de resíduos, que indicaram comportamento de ruído branco. Entre os modelos avaliados, o ARIMA(1,1,1) apresentou o menor valor do AIC (461.0275), evidenciando sua adequação para previsões climáticas, que sugerem chuvas médias anuais de 1.000 a 1.200 mm no horizonte de 2024 a 2033.

A pesquisa também analisou as manchas de inundação associadas a diferentes tempos de retorno (10, 50, 100 e 500 anos), evidenciando que o aumento do tempo de retorno resulta em maior extensão das áreas alagadas, com profundidades de 8 a 12 metros em seções críticas. Isso destaca os impactos do crescimento urbano em áreas próximas aos corpos d'água. Adicionalmente, os perfis de velocidade ao longo do canal mostraram variações de até 7 m/s em um trecho de 25 km, refletindo a dinâmica hidrodinâmica da bacia.

A calibração e validação de modelos hidrológicos também foram analisadas. Na validação dos níveis de água, os resultados apresentaram um MAE (erro médio absoluto) de 4.077, um NSE (Coeficiente de Nash-Sutcliffe) de 0,509 e um R^2 (Coeficiente de determinação) de 0,875, indicando uma concordância moderada com os dados observados. Já para a vazão, apesar do elevado R^2 (0,952), o baixo NSE (0,014) e o viés positivo MBE (Erro relativo médio) apontaram limitações na representação de variações locais e precisão geral.

A análise da suscetibilidade à inundação revelou áreas de risco variável na região metropolitana de Goiânia, destacando zonas de alto risco próximas a regiões urbanizadas, onde medidas preventivas são essenciais. O crescimento desordenado, identificado por meio de mapeamentos como o MapBiomas (2020), agravou a vulnerabilidade da bacia, reduzindo sua capacidade de escoar volumes significativos de água. A degradação ambiental, impulsionada pela captação irregular e lançamento de efluentes, aumenta o impacto potencial das inundações, ameaçando a segurança pública e a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Séries temporais; ARIMA; precipitação máxima acumulada; bacia do rio Meia Ponte; estacionaridade; manchas de inundação; suscetibilidade a inundações; calibração hidrológica.

3.2. ABSTRACT

This work deals with a comprehensive analysis of the maximum annual accumulated rainfall in the Meia Ponte river basin (BHMP), covering the period from 1990 to 2023. The values ranged from approximately 600 mm to 1,700 mm, with inter-annual fluctuations and stabilization in specific periods. Statistical analysis revealed that the time series is stationary, as evidenced by the KPSS test (value of 0.35873 and p-value of 0.09494) and by residual analysis, which indicated white noise behavior. Among the models evaluated, ARIMA(1,1,1) had the lowest AIC value (461.0275), demonstrating its suitability for climate forecasts, which suggest average annual rainfall of 1,000 to 1,200 mm over the 2024 to 2033 horizon.

The research also analyzed the flood spots associated with different return times (10, 50, 100 and 500 years), showing that increasing the return time results in a greater extent of flooded areas, with depths of 8 to 12 metres in critical sections. This highlights the impacts of urban growth in areas close to water bodies. Additionally, velocity profiles along the channel showed variations of up to 7 m/s over a 25 km stretch, reflecting the basin's hydrodynamic dynamics.

The calibration and validation of hydrological models were also analyzed. In the validation of water levels, the results showed an MAE of 4.077, an NSE of 0.509 and an R^2 of 0.875, indicating moderate agreement with the observed data. As for flow, despite the high R^2 (0.952), the low NSE (0.014) and positive bias (MBE) pointed to limitations in the representation of local variations and overall accuracy.

The flood susceptibility analysis revealed areas of varying risk in the Goiânia metropolitan region, highlighting high-risk zones close to urbanised regions, where preventative measures are essential. Disorganised growth, identified through mapping such as MapBiomas (2020), has aggravated the basin's vulnerability, reducing its capacity to drain significant volumes of water. Environmental degradation, driven by irregular abstraction and effluent discharge, increases the potential impact of flooding, threatening public safety and environmental sustainability.

Keywords: Time series; ARIMA; maximum accumulated rainfall; Meia Ponte river basin; stationarity; flood patches; flood susceptibility; hydrological calibration.

3.3. INTRODUÇÃO

O Rio Meia Ponte faz parte do complexo hidrográfico da Bacia hidrográfica do Rio Paraná, localizando-se na porção norte do Rio Paranaíba. A (BHMP) é considerada a mais importante do estado de Goiás, pois nela reside 48% da população goiana. Sua nascente está localizada na Serra dos Brandões no município de Itauçu, e sua foz na usina hidrelétrica de Cachoeira Dourada, no rio Paranaíba, percorrendo cerca de 471 km. A bacia hidrográfica do rio Meia Ponte é formada por cerca de 85 mananciais, sendo que na sua maior parte apresenta algum tipo de degradação (Dos santos, *et al*,2023).

Apesar da bacia ser considerada uma das mais importantes do estado de Goiás, devido a sua importância no abastecimento público, uso para agricultura, pastagem, paisagismo e de demais utilidades , nos últimos anos têm-se verificado com grandes e massivos problemas ambientais, dentre os quais destacam-se: elevada poluição, ocupações antrópicas, lançamentos diários de esgotos e resíduos sólidos, fragmentação da paisagem, diminuição da vegetação nativa, entre outros vários usos e conflitos ambientais que entrelaçam a BHMP.

De acordo com a (ASCOM/UFG ,2015), pesquisadores investigaram a relação entre eventos pluviométricos e as áreas mais suscetíveis a alagamentos e inundações na capital goiana durante as chuvas intensas de outubro de 2015. Utilizando registros da Defesa Civil dos anos de 2008 a 2012, juntamente com dados pluviométricos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e pelo Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (Simehgo), a pesquisa revelou que a região central de Goiânia é especialmente propensa a alagamentos.

Além disso, o estudo destacou que áreas próximas do Rio Meia Ponte, onde diversos córregos da cidade desembocam, também enfrentam alagamentos frequentes. Essa vulnerabilidade é agravada pela redução na capacidade de infiltração do solo, resultando da impermeabilização e da canalização interna dos sistemas de drenagem.

Segundo a pesquisadora, a cidade de Goiânia já sentia os efeitos das chuvas em alagamentos, mesmo mediante episódios de baixa intensidade, com consequências cada vez maiores para a população.

Tais fatores impõem a possibilidade de estudar e compreender essa bacia no ponto de vista ambiental na temática de suscetibilidade a inundações urbanas, de modo a minimizar seus problemas e propiciar informações que auxiliem na produção de um banco de dados efetivo.

- Segundo (Medeiros *et al*, 2023), esse tipo de ferramenta auxilia no melhor aproveitamento do espaço geográfico, pois indica quais as áreas mais vulneráveis não só aos processos naturais, mas principalmente, as ações antrópicas, permitindo apontar as potencialidades dos ambientes de maneira sistemática e indicando as restrições de utilização nessas bacias. Diante da situação descrita, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a inundação urbana na bacia hidrográfica do Meia Ponte.

3.4. METODOLOGIA

3.4.1. Descrição da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte está localizada na região centro-sul do estado de Goiás. Estão inseridos nela 39 municípios, e pode ser considerada a principal bacia hidrográfica goiana, por concentrar, em apenas 4,2% do território do estado, aproximadamente 40% de sua população, incluindo a Região Metropolitana de Goiânia e importantes municípios, pólos industriais e agroindustriais, que utilizam as suas águas para diversas atividades (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2021).

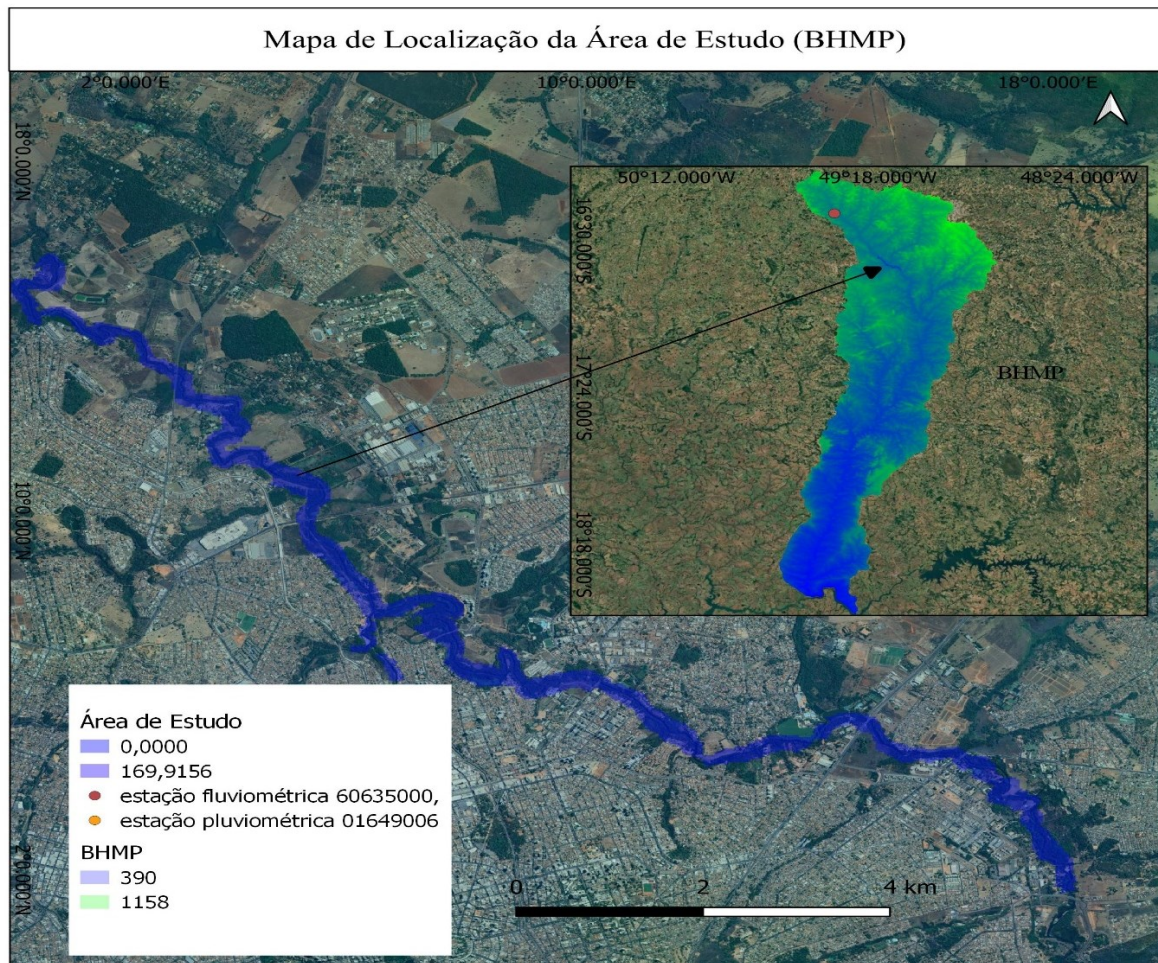


Figura 8: Localização e limites da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte e destaque do Alto Rio Meia Ponte.

Fonte: Autor, 2025

O estado de Goiás que possui uma área de 340.111,783 km² está localizado na região Centro-Oeste do Brasil. Possui uma situação bastante privilegiada em termos de

potencialidades econômicas pela sua proximidade aos mercados consumidores, ocupando uma posição de destaque no contexto nacional no que diz respeito a sua agropecuária. A região de estudo compreende a área de drenagem da estação fluviométrica denominada Montante de Goiânia (código da Agência Nacional de Águas: 60635000), localizada na subbacia do Alto Meia Ponte (BRASIL, 2012). Nesse local realizam-se as medições de descarga líquida (vazão) do rio Meia Ponte. A estação pertencente à Rede Hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA) e é operada pela Superintendência de Goiânia (SUREG-GO) da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil (CPRM/SGB).

3.4.2. Clima e vegetação

O clima da região é do tipo tropical húmido, caracterizando-se com duas estações bem definidas: a seca, que ocorre entre os meses de abril a setembro; e a chuvosa, que ocorre entre os meses de outubro a março. Segundo dados da Secretaria Estadual de Planejamento, a temperatura máxima varia de 29° a 31° e a mínima varia entre 17° a 18°. A umidade relativa do ar fica entre 68 a 70% (Veiga *et al*, 2013).

3.4.3. Fluxograma resumo das etapas da pesquisa

A pesquisa contém quatro etapas (figura 9). A primeira etapa foi dedicada ao levantamento de trabalhos científicos, com a escolha da palavra-chave pertinentes ao objeto de pesquisa, no sistema de busca da base de dados *Scopus* da *Elsevier*. A escolha das palavras-chave baseia-se no objetivo de alcançar o maior número possível de trabalhos que envolvam componentes de mancha de inundação.

Para atingir objetivos deste trabalho será adaptada uma linha metodológica que consistirá em consultas bibliográficas e pesquisas na internet de modo a facilitar a compreensão geral sobre dados relevantes relacionados com o tema, levantamentos de dados relativos a BHMP, influência das precipitações e a suscetibilidade a inundação da BHMP. Neste contexto o fluxograma mostra numa forma resumida todas as fases das actividades metodológicas do tema em estudo (Figura 9).

A primeira etapa da pesquisa fez-se o levantamento da literatura sobre a Bacia Hidrográfica do Meia Ponte (BHMP) para o estado de Goiás, depois abordou-se sobre a segunda etapa que é sobre as series temporais, onde se estudou a estacionaridade da precipitação

efetiva da bacia, tendências e os resíduos, e subsequente abordou-se sobre a terceira etapa que se tratou de manchas de inundações, olhando para as possíveis mudanças considerando os tempos de retornos (T_r : 10,50,100 e 500 anos), com base nessas informações fez-se a álgebra dos mapas para a avaliação da suscetibilidade a inundações urbana na BHMP.

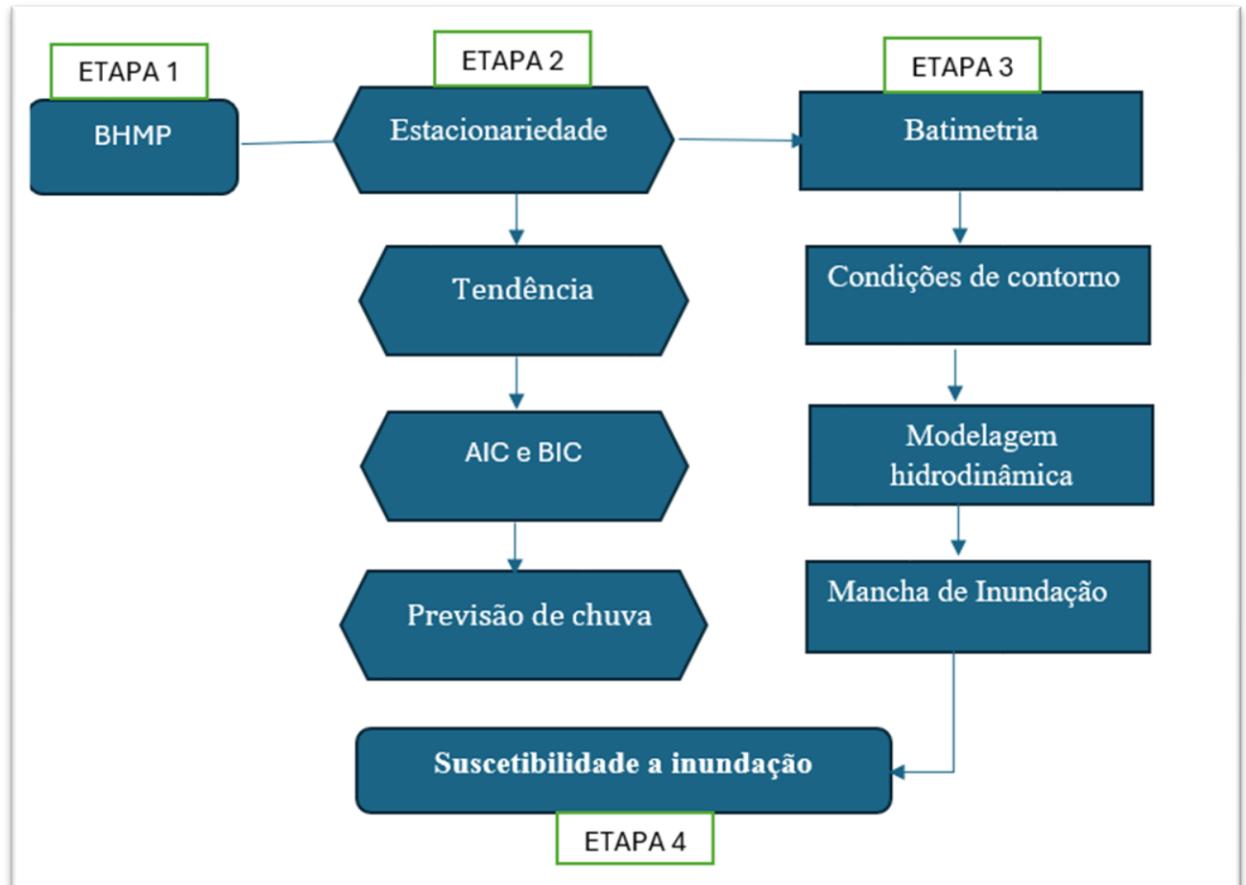


Figura 9: Fluxograma

Fonte: Autor,2025

Palavras-chaves: Suscetibilidade a inundações, Series temporais, Sazonalidade, Macha de inundação.

Base de dados: Scopus, Web ofScience, Periódico CAPES, Scielo, Dissertações e Artigos.

3.5. ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL USANDO O MODELO ARIMA

Quanto aos estudos das séries temporais foi usada a estação pluviométrica 01649006, que se encontra instalada próxima da bacia hidrográfica do Meia Ponte, disponibilizada no

Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), portal hidroweb da ANA. As séries temporais das chuvas foram testadas para a determinação da tendência, sazonalidade e resíduos, baseando-se na fórmula (1) abaixo.

$$Y_t = f(T_t, S_t, \varepsilon_t) \quad (2)$$

onde: Y_t é o valor da série temporal; T_t é a componente Tendência no período t ; S_t é a componente Sazonalidade no período t ; ε_t é a componente de Erro ou Ruído aleatório no período t .

Para a determinação da decomposição da série usou-se a fórmula 3 e 4:

- O Modelo de Decomposição Aditivo considera que a série temporal é resultante da soma das componentes:

$$Y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

- O Modelo de Decomposição Multiplicativo considera que a série temporal é resultante do produto das componentes:

$$Y_t = T_t \times S_t \times \varepsilon_t \quad (4)$$

Se a sazonalidade varia com a tendência o modelo multiplicativo é o mais adequado.

3.5.1. Teste de estacionariedade

De acordo com (Arêdes ; Pereira, 2008, *apud* Albuquerque, 2018), um método básico para avaliar a estacionariedade em séries temporais envolve o cálculo dos coeficientes de autocorrelação e autocorrelação parcial, os quais possibilitam a construção dos respectivos correlogramas: a Função de Autocorrelação (FAC) e a Função de Autocorrelação Parcial (FACP). Esses correlogramas fornecem uma análise gráfica das defasagens e delimitam um intervalo de confiança para os coeficientes, no qual as estatísticas da FAC e da FACP devem se manter dentro do seguinte intervalo:

$$IC(95\%) = 0 \pm 1,96 \times \left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \quad (5)$$

Onde: n representa o tamanho da amostra, e 1,96 corresponde ao quantil de 0,025 na distribuição normal padrão.

O teste de Dickey-Fuller, por sua vez, utiliza o seguinte modelo:

$$Y_t = \rho Y_{t-1} + \mu t; (1) \quad (6) \quad -1 \leq \rho \leq 1 \quad t=1,2,\dots,N,$$

em que Y_t é a série temporal sendo analisada, ρ é o coeficiente associado ao termo defasado Y_{t-1} , e μt é um termo de erro aleatório com distribuição normal.

Para aplicar o teste, a equação original é reescrita em termos das diferenças entre os valores consecutivos:

$$Y_t - Y_{t-1} = \rho Y_{t-1} - Y_{t-1} + \mu t = (\rho - 1)Y_{t-1} + \mu t \quad (7)$$

Assim, o modelo na forma ajustada pode ser expresso como:

$$\Delta Y_t = \delta Y_{t-1} + \mu t \quad (8)$$

Onde $\delta = \rho - 1$ e Δ é o primeiro operador de diferença.

3.5.2. Testes de tendência

O teste sequencial de Mann-Kendall, proposto por (Sneyers, 1975), é um método estatístico não paramétrico que avalia a estabilidade de uma série temporal. Ele assume que os valores da série ocorrem de forma independente e que a distribuição de probabilidade permanece constante ao longo do tempo, caracterizando uma série aleatória simples (Pinheiro *et al.*, 2013).

O teste é aplicado a uma série temporal Y_i composta por N termos, onde $1 \leq i \leq N$. O procedimento envolve a soma $t_n = \sum_{i=1}^N m_i$, que é obtida considerando o número de termos m_i da série associados ao valor Y_i , para os quais os termos precedentes ($j < i$) são menores que ($Y_j < Y_i$). Para séries temporais com um grande número de observações (N), sob a hipótese nula de ausência de tendência (H_0), o valor de t_n segue uma distribuição normal, cuja média e variância são definidas por:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (9) \quad \text{var}(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \quad (10)$$

A significância estatística de t_n em relação à hipótese nula é avaliada por meio de um teste bilateral. A hipótese nula pode ser rejeitada quando a estatística $U(t_n)$, calculada pela fórmula abaixo, assume valores altos:

$$U(t_n) = \frac{t_n - E(t_n)}{\sqrt{\text{var}(t_n)}} \quad (11)$$

3.5.3. Teste de sazonalidade

O teste de Kruskal-Wallis (Marôco, 2011), baseia-se em uma amostra extraída de uma população, que é subdividida em $K > 4$ grupos de tamanhos n_j , que podem ser desiguais. Nesse caso, K representa o número de anos e n_j as observações da série temporal.

A hipótese nula (H_0) assume a inexistência de sazonalidade na série, sendo avaliada por meio da seguinte estatística:

$$T_1 = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1), \quad (12)$$

onde N é o total de observações, R_j é a soma das classificações no grupo j , e n_j é o tamanho do grupo j .

A hipótese nula é rejeitada se T_1 for maior ou igual ao valor crítico T_{1c} , que satisfaz $P(T_1 > T_{1c}) = \alpha$, sendo α o nível de significância adotado para o teste.

Para o uso dos dados da estação pluviométrica, os dados tiveram que passar por um processo de tratamento visto que existiam muitos dados nulos ou errôneos, foi usado o modelo ARIMA para a análise da serie temporal da chuva. O ARIMA foi a escolha ideal para a presente pesquisa devido a sua simplicidade, facilidade de ajuste para séries temporais não estacionárias, e a capacidade de capturar dependências temporais (autocorrelações).

Para realizar o diagnóstico do modelo, aplicou-se o teste de Ljung-Box (Ljung, 1978), que permite verificar a presença de brilho nos erros por meio da autocorrelação residual. Esse teste estatístico considera como hipótese nula que os resíduos sejam ruído branco. Assim, ao aceitar a hipótese nula, ou seja, quando o p-valor resultante do teste estatístico for superior ao nível de significância α , conclui-se que o modelo está ajustado.

Além disso, a combinação de previsão robusta com fácil interpretação faz com que o ARIMA seja uma opção mais viável em comparação com modelos mais complexos e computacionalmente exigentes (Bayer *et al*, 2012). Outros modelos, como os modelos de suavização exponencial (ex.: Holt-Winters), são mais adequados para séries temporais com padrões de sazonalidade e tendência mais consistentes ao longo do tempo, mas podem não funcionar tão bem com dados tão variáveis quanto os de precipitação, onde os picos e variações podem ser muito pronunciados, enquanto o ARIMA é projetado especificamente para lidar com séries temporais que podem não ser estacionárias inicialmente.

A diferenciação, que é parte da metodologia ARIMA, torna a série estacionária removendo tendências ou sazonalidade de longo prazo, o que é crucial para séries de precipitação, que frequentemente exibem essas características (Bayer *et al.*, 2012).

3.5.4. Critérios de seleção do modelo

A aplicação dos critérios de seleção de modelos, como o AIC (Critério de Informação de Akaike) e o BIC (Critério de Informação Bayesiano), tem como objetivo identificar o modelo que melhor representa a realidade entre os modelos ajustados para explicar o fenômeno em estudo.

Esses critérios avaliam o equilíbrio entre a qualidade do ajuste do modelo aos dados e sua complexidade. Enquanto o AIC prioriza modelos com melhor ajuste, mesmo que sejam mais complexos, o BIC adiciona uma penalização mais forte para modelos com muitos parâmetros, favorecendo aqueles mais simples e parcimoniosos.

Em ambos os casos, o modelo ideal é aquele que apresenta o menor valor de AIC ou BIC, indicando um bom ajuste aos dados com complexidade suficiente, sem excesso de parâmetros desnecessários. Essa abordagem é fundamental para evitar problemas como overfitting, onde o modelo se ajusta demais aos dados de treinamento, comprometendo sua capacidade de generalização para novos dados. (Sillmann *et al.*, 2017).

3.5.5. Critérios de informação de Akaike – AIC

Em 1974, Akaike demonstrou que, de forma assintótica, o viés pode ser representado por p , onde p é o número de parâmetros estimados no modelo. Com base nisso, ele propôs o critério de informação que leva seu nome, definido pela fórmula:

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2p \quad (13)$$

Aqui, $\log L(\hat{\theta})$ representa o logaritmo da função de verossimilhança avaliada nos estimadores dos parâmetros do modelo, e o termo $2p$ é uma penalização para evitar a superestimação do ajuste, (Sillmann *et al.*, 2017).

3.5.6. Critérios de informação Bayesiano (BIC)

O Critério de Informação Bayesiano (BIC), introduzido por Schwarz em 1978, é definido pela seguinte fórmula:

$$\text{BIC} = -2 \log f(x_n | \theta) + p \log n \quad (14)$$

Nessa equação, $f(x_n | \theta)$ representa o modelo escolhido, p indica a quantidade de parâmetros a serem estimados, e n corresponde ao tamanho da amostra ou o número de observações. O BIC combina a qualidade do ajuste do modelo com uma penalização baseada no número de parâmetros e no tamanho da amostra, incentivando modelos mais parcimoniosos, (Sillmann *et al.*, 2017).

Os cálculos e ajustes indispensáveis para este estudo foram realizados com o auxílio do *Software Livre R* (2023), versão 4.3.0. Entre os diversos pacotes disponíveis no R, destacam-se os pacotes *previsionio*.

3.6. LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO (BATIMETRIA)

Para a aquisição dos dados para a propagação da mancha de inundação fez-se um levantamento topo batimétrico no intuito de efetuar as medições das profundidades e se ter o perfil ou morfologia do rio Meia Ponte e as suas secções. O levantamento de dados em campo foi feito de Janeiro de 2024 a outubro do mesmo ano, em forma faseada.

Para o levantamento batimétrico foram utilizados um conjunto de dados discriminados a baixo.

Uma embarcação de pequeno porte como suporte para navegabilidade e manobras nos trechos em que o sistema por navegação por satélite o (ADCPSONTEK M9), não conseguia navegar por obstruções, anexo 01. O ADCPSONTEK M9 é um perfilador hidro acústico de corrente capaz de calcular a velocidade e a profundidade do rio no local. A partir desses dados foi feita a batimetria. O equipamento consiste em um sistema de GPS, capaz de desconsiderar a movimentação do barco.

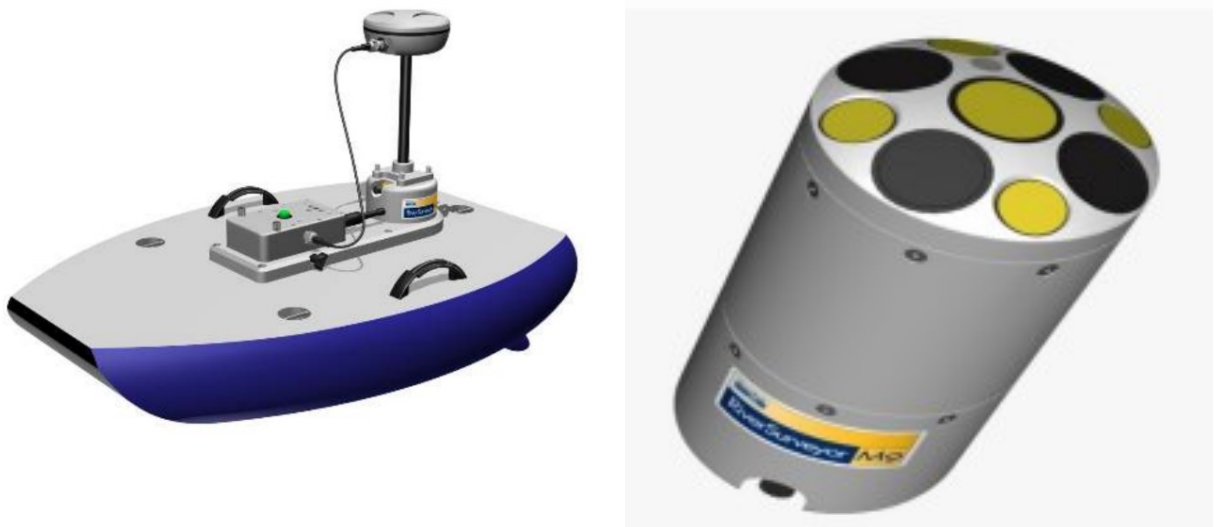


Figura 10:ADCPSONTEK M9

Fonte: PDDU-GO, 2024

O **GPS Y1 GNSSReceiver**, é um receptor GNSS (Global Navigation Satellite System), que utiliza sistemas de navegação via satélite para fornecer informações precisas de posicionamento geoespacial, a figura abaixo ilustra a montagem do equipamento.

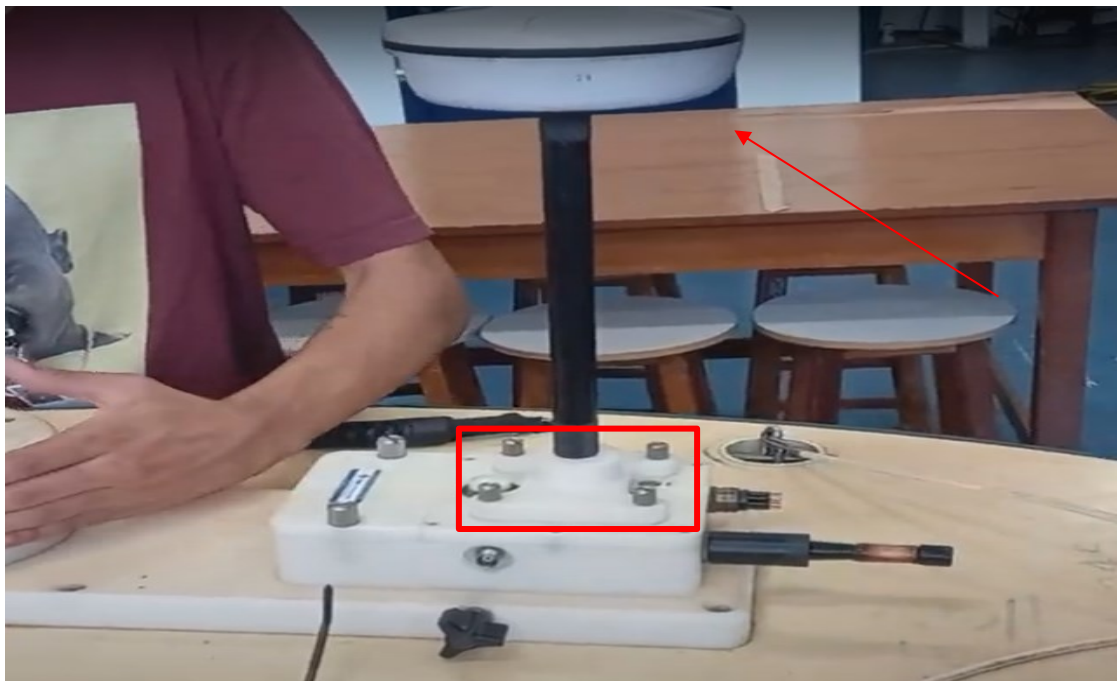


Figura 11: GPS Y1 GNSSReceiver

Fonte: PDDU-GO, 2024

O ADCP é operado via *Bluetooth* pelo celular, o App utilizado “RiverSurveyor”

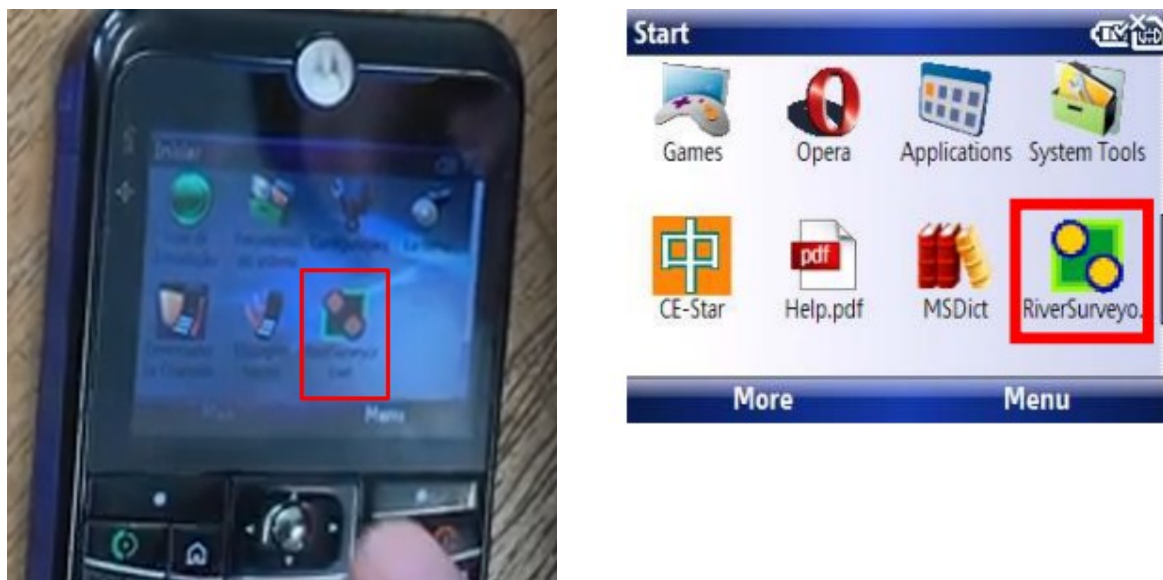


Figura 12:RiverSurveyo

Fonte: PDDU-GO, 2024

3.7. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO

3.7.1. Regime não permanente

Para o modelo de simulação hidrodinâmica, fez-se a propagação da mancha de inundação utilizando o HEC-RAS 6.5 (*Hydrologic Engineers Corps – RiverAnalysis System*). O modelo se baseia na resolução das equações de Saint-Venant uni ou bidimensionais, considerando regimes permanentes ou não permanentes (dinâmicos), onde após a propagação da mancha de inundação considerando os tempos de retornos de (10,50,100 e 500 anos). Com base nessas vazões foram inseridas no Hec-ras, em modelagem hidrodinâmica no regime não permanente (1D), foram feitos os mapas de inundação com a sobreposição da imagem do google hybrid, foi possível avaliar a mancha de inundação geradas sobre as áreas habitadas.

Com os dados da série histórica, inseriu-se o diagrama de entrada no HEC-RAS 6.5, esses dados foram obtidos pelo plugin da ANA, no Qgis 10.16, dados disponibilizados pela

hidroweb no formato de TXT. As vazões máximas anuais foram determinadas pela distribuição de Gumbel, onde se obteve a média, o desvio padrão e as vazões considerando os TR (tempo de retorno, 10, 50, 100 e 500 anos).

Cálculo da vazão associado a tempo de retorno ou a probabilidade:

$$x = \bar{x} - s \cdot \left(0.45 + 0.7797 \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR-1} \right) \right] \right) \quad (15)$$

Onde: x é a vazão associada ao tempo de retorno; \bar{x} é a média; s é o desvio padrão amostral; TR é o tempo de retorno.

Como dados de entrada foram os dados de vazões de (1947-2024) para condições de contorno, coeficiente de rugosidade de Manning, onde inicialmente se adotou 0,035 para as margens e 0,08 para o leito, mas depois modificou-se para a estabilidade do modelo usando 0,025 para leito assim como para margens, segundo abordagem de (Júnior,2018), no seu trabalho de pesquisa sobre instabilidades numéricas dentro do hec-ras, usou-se o modelo digital de terreno (MDT), onde depois de trabalhado no Qgis foi inserido no hec-ras, tempo de simulação, declividades e dimensionalidade.

Para a simulação hidrodinâmica do trecho da bacia em estudo, a condição de contorno na entrada foi definida por hidrogramas de vazão máxima, obtida a partir da análise de distribuições probabilísticas. Já na saída, utilizou-se a profundidade normal como condição de contorno, com base na declividade média do talvegue natural no trecho de jusante, estimada em aproximadamente 0,002 m/m.

As simulações foram realizadas para vazões associadas a tempos de retorno de 10, 50, 100 e 500 anos. O módulo de escoamento não permanente do HEC-RAS foi empregado, mas considerando vazões constantes ao longo do tempo. O intervalo computacional foi de 1 minuto, de forma a satisfazer as classificações de Courant (USACE, 2016).

3.7.2. Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

Para avaliar o desempenho do modelo utilizado nesta pesquisa, foram aplicados quatro critérios durante o processo de calibração e validação, com foco nos dados de vazão e nível de água. Os critérios adotados foram: o Erro Médio Absoluto (MAE), o Erro Relativo Médio (MBE), o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e, por último, o Coeficiente de Determinação (R^2).

➤ Erro Médio Absoluto (MAE)

Mede a magnitude média dos erros entre os valores simulados e observados. Calcula a média dos valores absolutos das diferenças entre os dados medidos e os simulados, ignorando o sinal do erro.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - S_i| \quad (16)$$

Onde M_i são os valores medidos, S_i os valores simulados e n o número de observações. Um valor menor de MAE indica um modelo mais preciso, com erros médios pequenos. (Freitas *et al.*, 2020) destacam que o MAE é uma métrica direta e útil para avaliar a precisão geral de modelos hidrológicos.

➤ Erro Relativo Médio (MBE)

Mede o viés médio do modelo, indicando se o modelo tem uma tendência a superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) os dados observados.

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - M_i| \quad (17)$$

MBE > 0: O modelo tende a superestimar.

MBE < 0: O modelo tende a subestimar.

MBE = 0: O modelo não apresenta viés.

Onde M_i são os valores medidos, S_i os valores simulados e n o número de observações. Segundo (Moriasi *et al.*, 2007), o MBE é útil para identificar tendências sistemáticas em modelos hidrológicos.

➤ Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)

Avalia a capacidade do modelo de prever valores em relação à média dos dados observados. É uma métrica padrão em modelagem hidrológica.

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (18)$$

NSE > 0.75: Desempenho "muito bom" ou "excelente."

$0.36 < NSE \leq 0.75$: Desempenho "satisfatório" ou "aceitável."

$NSE \leq 0.36$: Desempenho "insatisfatório" ou "requer melhorias."

Onde Y_i^{obs} são os valores medidos, Y_i^{sim} os valores simulados e n o número de observações. (Moriassi *et al.*, 2007) recomendam NSE como uma métrica essencial para modelos hidrológicos, com valores acima de 0.65 indicando desempenho satisfatório.

➤ Coeficiente de Determinação (R^2).

$$R^2 = \left(\frac{Cov(M,S)}{\sigma_M \cdot \sigma_S} \right)^2 \quad (19)$$

$R^2 = 1$: Correlação perfeita entre medidos e simulados.

$R^2 > 0.7$: Alta correlação.

$R^2 = 0$: Nenhuma correlação.

$R^2 < 0$: Relação inversa.

Onde $Cov(M,S)$ é a covariância entre os dados medidos e simulados, e σ_M , σ_S são os desvios padrão dos dados medidos e simulados, respectivamente. R^2 é frequentemente utilizado em estudos hidrológicos, como em (Gupta *et al.*, 2009), para verificar a qualidade do ajuste entre os valores simulados e observados.

3.8. SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO

Para avaliação da suscetibilidade a inundações da área em estudo, adotou-se primeiramente as vazões máximas obtidas pelos tempos de retorno TR (10,50,100 e 500) anos, encontradas pela distribuição probabilísticas de Gumbel como se fez referência anteriormente, depois fez-se um quadro com classes de suscetibilidade adotando metodologia abordada por (Coelho,2022), conforme notamos abaixo:

TR (Anos)	Distribuição Probabilística	Vazão (m ³ /s)	Suscetibilidade de Inundação
10	Gumbel	461.4043	Muito alto
50	Gumbel	590.2903	Alto
100	Gumbel	644.7776	Moderado
500	Gumbel	770.6893	Baixo

Quadro 2: Classes de suscetibilidade

Fonte: (COELHO,2022,) adaptada por (Autor, 2025)

Com auxílio das ferramentas do SIG, estudou-se as possíveis áreas suscetíveis a inundação numa porção a montante do rio Meia Ponte. Para isso, foram utilizados os resultados gerados no HEC-RAS, que forneceram informações sobre manchas de velocidade versus profundidade. Como resultado, foi produzida uma cartografia de suscetibilidade a inundações.

É importante destacar que todo o processo de modelagem desenvolvido nesta pesquisa foi acompanhado por trabalho de campo. Esse acompanhamento foi essencial para validar e ajustar as configurações do modelo, como o coeficiente de Manning. O objetivo foi garantir que os resultados do modelo se aproximassem das condições reais, por meio da comparação com os dados encontrados no campo, como níveis de água, vazões e velocidades, assim como uma avaliação holística das áreas degradadas da BHMP.

3.9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e explicados os resultados obtidos a partir da análise da série temporal da chuva máxima anual acumulada na Bacia Hidrográfica do Meia Ponte (BHMP). A análise tem como objetivo identificar o comportamento e a previsão das chuvas na região, verificando possíveis tendências, variabilidades e fatores que podem influenciar o regime hidrológico da bacia.

Os dados utilizados referem-se ao período de 1990 a 2023, e foram extraídos de registros pluviométricos devidamente processados. O gráfico apresentado na Figura 13 ilustra a série temporal da chuva máxima anual acumulada, sendo este o ponto de partida para a análise das características temporais, como a presença ou ausência de tendências, padrões de variabilidade e implicações hidrológicas.

Além do estudo da série temporal, este capítulo aborda a forma integrada das manchas de inundação que ocorrem na área de estudo, fornecendo uma visão mais abrangente sobre os processos hidrológicos associados às enchentes que frequentemente afetam a região. Essa análise busca não apenas identificar os períodos de maior risco, mas também compreender a caracterização das áreas suscetíveis a inundações dentro do BHMP. A combinação dessas análises, série temporal das chuvas, manchas de inundação e suscetibilidade, visa fornecer subsídios técnicos para o planejamento estratégico e a gestão integrada dos recursos hídricos, fortalecendo as medidas de prevenção e mitigação de impactos negativos sobre a população e os ecossistemas locais.

3.9.1. Análise da série temporal

A Figura 13 apresenta a série temporal da chuva máxima anual acumulada na BHMP para o período de 1990 a 2023. Observe-se que os valores de variação máxima acumulada variam entre aproximadamente 600 mm e 1.700 mm, com flutuações inter anuais evidentes.

Uma análise preliminar dos gráficos sugere que, embora a série não apresente sazonalidade devido à escalada anual dos dados, existem períodos de maior e menor intensidade de ocorrência. Destaca-se, por exemplo, o aumento significativo observado próximo ao ano de 2000, seguido por uma diminuição e posterior estabilização na última década.

Além disso, a análise estatística da série indicou que esta é estacionária, o que implica que o comportamento das chuvas não apresenta uma tendência significativa ao longo do período analisado. Isso sugere que as flutuações observadas podem estar associadas a fatores climáticos naturais ou eventos extremos pontuais.

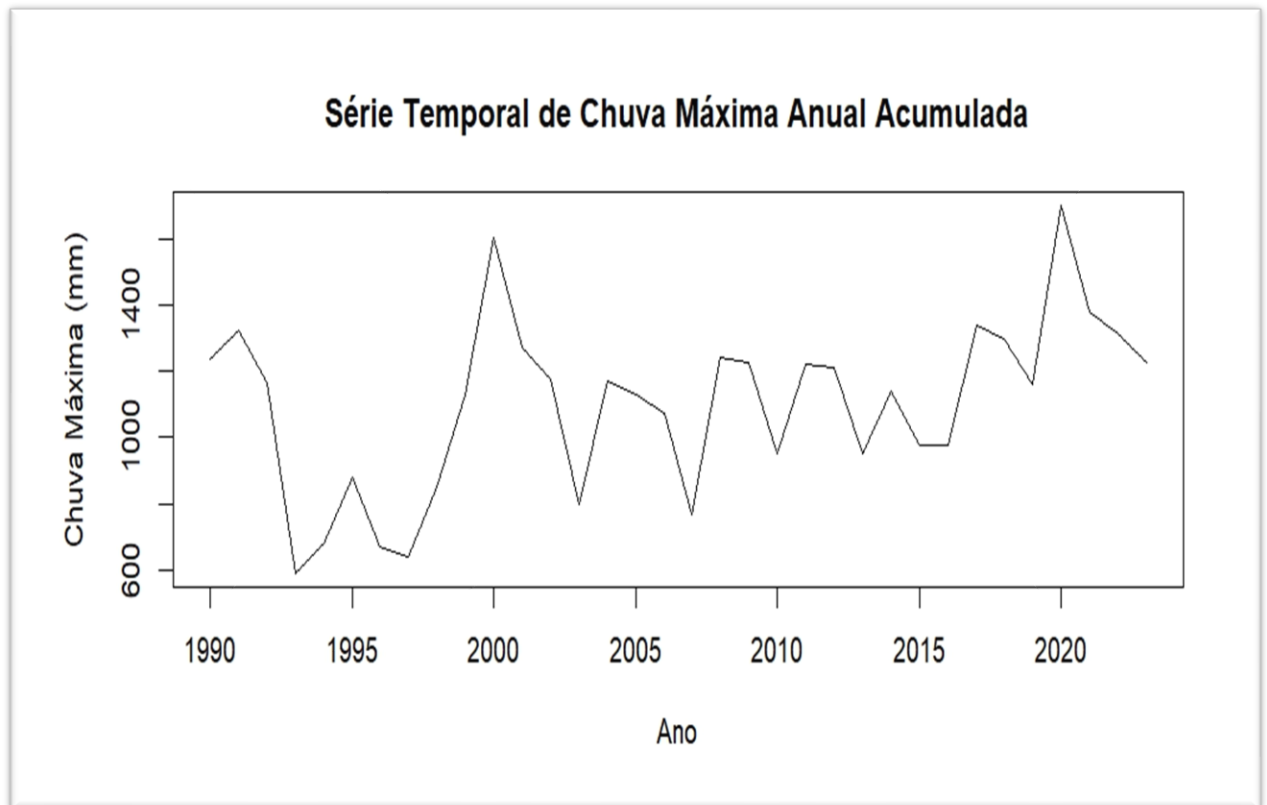


Figura 13:Série Temporal da chuva

Fonte: Autor,2025

Graficamente, observa-se um aumento nos volumes de chuva ao longo dos anos na região em estudo. No início da série histórica, o menor valor acumulado de precipitação foi registrado em 1993, com 590,3 mm, enquanto o maior valor foi registrado em 2020, com 1.700 mm de chuva acumulada. Apesar dessas variações, os gráficos não indicam uma tendência de sazonalidade, o que sugere que as flutuações anuais podem ser atribuídas a eventos extremos ou variações climáticas naturais.

Os resultados encontrados são corroborados por pesquisas anteriores, como a de (Furtado *et al.*, 2023), que analisaram a série histórica de 1990 a 2019 e constataram que os volumes anuais acumulados na Bacia Hidrográfica da Meia Ponte (BHMP) variaram, entre 1.200 e 1.400 mm, abrangendo toda a extensão da bacia. Esses dados estão alinhados com os

estudos de (Silva *et al.*, 2006) e (Cardoso *et al.*, 2014), que também relatou variações semelhantes nos volumes anuais acumulados de chuva na região.

Por outro lado, os valores de exploração obtidos em períodos específicos, como os meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro de 2005, divergem parcialmente das estimativas desta pesquisa que deu 1130.30mm. Segundo (Rego; Barros, 2014), a chuva acumulada nesses meses foi de 526 mm, o que pode ser explicado por diferentes fatores, como a escolha de estações pluviométricas específicas, metodologias de análise, ou mesmo pela localização geográfica dentro da área do BHMP. Tais discrepâncias reforçam a importância de considerar a representatividade espacial e temporal dos dados pluviométricos ao realizar análises hidrológicas

3.9.2. Decomposição da série de chuva

Em análise abaixo encontramos os gráficos da decomposição da série de chuva, composto por três gráficos, nomeadamente gráficos de chuva máxima anual acumulada, tendência e resíduo ou ruído branco, tendo em conta que a série não apresenta, um padrão sazonal ou cíclico claro, corroborando os resultados do teste KPSS que deu 0,35873 sendo um valor moderado mas fortificado com pvalor 0,09494, valor acima do nível de significância indicando estacionamento da série.

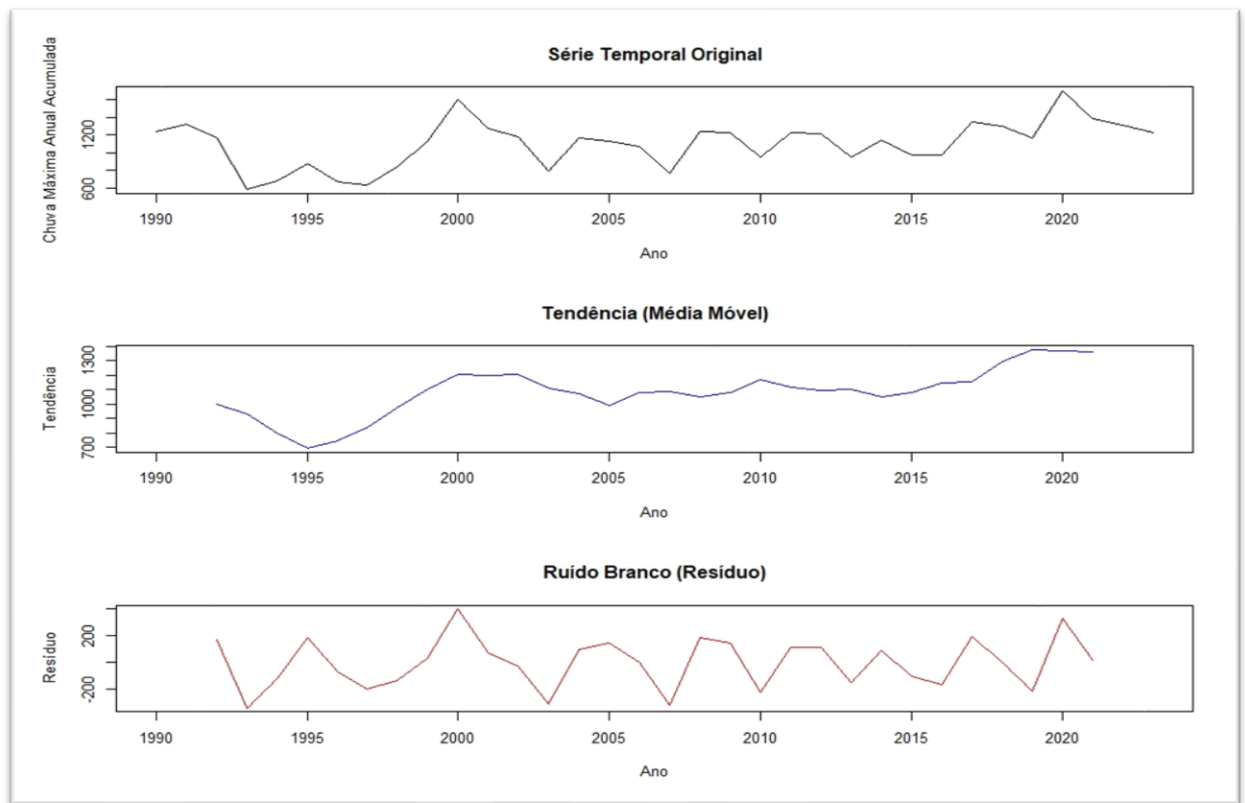


Figura 14: Decomposição da serie

Fonte: Autor,2025

O gráfico da série temporal original já foi abordado anteriormente, indicando flutuações estacionárias normais, o gráfico de tendência utiliza uma média móvel de 5 anos para suavizar as variações e destacar os movimentos gerais da série. Entre 1990 e 2000, a tendência mostra um aumento gradual nos volumes de transações, seguido de uma estabilização relativa até 2010. Após 2010, observa-se um nível de crescimento nos valores de chuva acumulada, culminando em uma estabilização em níveis elevados próximos ao final da série (2020–2023).

O terceiro gráfico apresenta os resíduos, que são obtidos subtraindo a tendência da série original. Os resíduos oscilaram ao redor de zero, diminuindo que a maior parte da variabilidade da série foi capturada pela média móvel (tendência). A ausência de padrões claros nos resíduos sugere que a série é bem ajustada pela tendência e não apresenta sazonalidade nem ciclos estruturados. A análise dos resíduos também corroborou os resultados dos testes estatísticos (KPSS, Ljung-Box), que indicaram que os resíduos se comportaram como ruído branco.

3.9.3. Seleção de modelos para previsão

Olhando para a tabela abaixo verificamos a variabilidade de modelos ordenadas em ordem decrescente do número de AIC assim como BIC.

```
> print(aic_bic)
```

	Modelo	AIC	BIC
11	ARIMA(1,1,1)	461.0275	465.5170
6	ARIMA(0,1,2)	461.3106	465.8001
5	ARIMA(0,1,1)	462.8551	465.8481
12	ARIMA(1,1,2)	462.9249	468.9110
17	ARIMA(2,1,1)	462.9567	468.9427
16	ARIMA(2,1,0)	464.1236	468.6131
4	ARIMA(0,1,0)	464.4605	465.9570
10	ARIMA(1,1,0)	464.5790	467.5720
18	ARIMA(2,1,2)	464.9792	472.4617
7	ARIMA(1,0,0)	471.5613	476.1403
2	ARIMA(0,0,1)	472.3026	476.8817
8	ARIMA(1,0,1)	473.4779	479.5833
13	ARIMA(2,0,0)	473.5003	479.6057
3	ARIMA(0,0,2)	473.7377	479.8431
9	ARIMA(1,0,2)	475.4158	483.0476
14	ARIMA(2,0,1)	475.4207	483.0525
15	ARIMA(2,0,2)	477.3865	486.5446
1	ARIMA(0,0,0)	477.9337	480.9864

Tabela 3: Modelos de previsão

Fonte: Autor,2025

Ao analisar os resultados apresentados na tabela, observamos que o modelo ARIMA(1,1,1) (modelo 11) apresenta o menor valor do Critério de Informação de Akaike (AIC), igual a 461.0275, bem como um valor de BIC de 465.5170. De acordo com Akaike (1974), o AIC é projetado para avaliar a qualidade relativa de modelos estatísticos para um determinado conjunto de dados, penalizando modelos mais complexos que possuem mais parâmetros. Dessa forma, o menor valor de AIC indica o modelo que melhor equilibra o ajuste aos dados e a simplicidade estrutural.

O modelo ARIMA(1,1,1) também possui um BIC relativamente baixo em comparação aos demais modelos. O Critério de Informação Bayesiano (BIC), proposto por Schwarz (1978), adiciona uma penalização mais severa para o número de parâmetros em relação ao AIC, sendo mais conservador na seleção de modelos mais complexos. Nesse contexto, a escolha do modelo ARIMA(1,1,1) é corroborada, pois apresenta valores baixos em ambos os critérios.

Além disso, é importante notar que, segundo (Burnham; Anderson, 2002), a diferença de AIC entre os modelos candidatos pode ser utilizada para quantificar a força de evidência em favor do modelo com menor AIC. Uma diferença superior a 10 geralmente indica forte evidência de que o modelo com o menor AIC é o mais adequado. Na tabela apresentada, a diferença entre o AIC do modelo ARIMA(1,1,1) e os outros modelos é significativa, reforçando a escolha.

Portanto, com base nos critérios de seleção AIC e BIC, concluímos que o modelo ARIMA(1,1,1) é o mais adequado para previsão de chuva. Esse modelo pode ser utilizado com confiança para capturar os padrões históricos e projetar valores futuros, garantindo um bom equilíbrio entre precisão e simplicidade.

3.9.4. Previsão da chuva máxima anual acumulada

Em análise abaixo constatamos um gráfico de previsão de chuva máxima acumulada relativa a 10 anos de previsão, ou seja, de 2024 a 2033, com padrões variáveis de precipitação, nos volumes máximos de chuva anual acumulados, com valores mínimos em torno de 590 mm (1993) e máximos próximos de 1.700 mm (2020), com uma estabilização de 2012 a 2016 com volumes acumulados de 1200mm. Isso foi confirmado pelo teste KPSS, que indicou que a série é estacionária ao nível de significância utilizada. Essa estacionariedade sugere que as flutuações estão mais associadas a variações climáticas do que a mudanças sistemáticas ao longo do tempo. Depois notamos uma tendência crescente das chuvas.

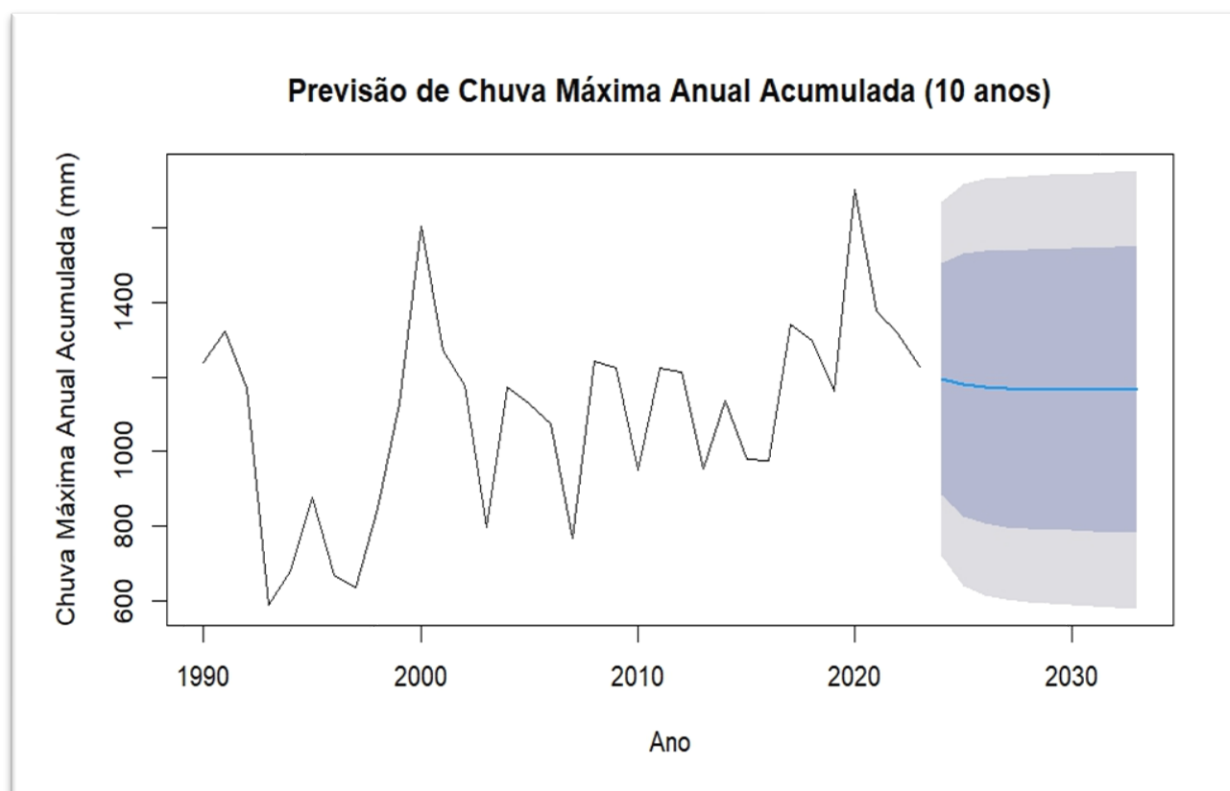


Figura 15: Previsão da chuva

Fonte: Autor,2025

O gráfico apresenta a previsão para os próximos 10 anos (2024–2033), representada pela linha azul central, enquanto as áreas sombreadas (em cinza e azul) indicam os intervalos de confiança para as projeções, faixa clara (intervalo de 95% de confiança) e faixa escura (intervalo de 80% de confiança), a previsão sugere uma manutenção dos valores médios de chuva máxima anual acumulada em torno de 1.000 mm a 1.200 mm, com flutuações dentro dos intervalos esperados. O modelo reflete a estacionariedade da série e assume que não ocorrerão mudanças significativas nos padrões climáticos na região.

Os gráficos reforçam a hipótese de que, nos próximos anos, os volumes máximos de chuva anual acumulados deverão permanecer dentro da faixa histórica, com variações esperadas devido a eventos extremos. Contudo, as declarações de confiança amplas nas projeções futuras (principalmente após 2027) evidenciam a incerteza associada à previsão de longo prazo, o que é comum em séries temporárias estacionárias.

3.9.5. Mancha de inundação

A identificação e delimitação das áreas suscetíveis a inundações são fundamentais para o planejamento territorial e a mitigação de riscos socioambientais. Na bacia do rio Meia Ponte, a ocupação urbana em áreas vulneráveis, aliada a fatores geomorfológicos e hidrológicos, intensifica os impactos das cheias. Compreender a extensão e a profundidade da mancha de inundação permite avaliar os riscos associados às inundações, auxiliando na formulação de estratégias para reduzir danos à infraestrutura, ao meio ambiente e à população.

A Figura 16 ilustra a mancha de inundação resultante da modelagem hidrodinâmica aplicada à bacia do Meia Ponte. Essa representação cartográfica é essencial para subsidiar políticas públicas e ações de adaptação às dinâmicas hidrológicas da região.



Figura 16:mancha de Inundação

Fonte: Autor, 2025

Afigura 17 abaixo ilustra as profundidades em função dos tempos de retorno.

TR 10

TR50

TR100

TR500

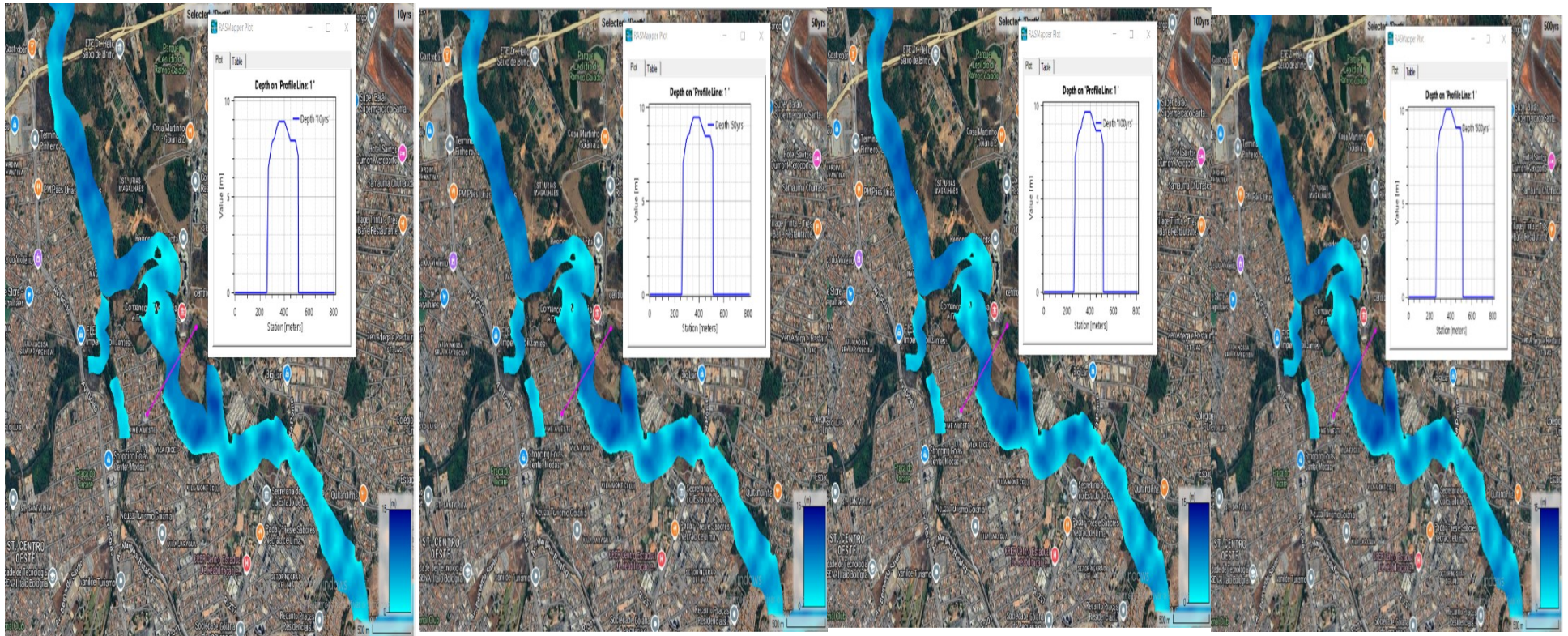


Figura 17: Profundidade na secção transversal com tempo de retorno

Fonte: Autor, 2025

A análise dos resultados mostra de forma clara as áreas de maior suscetibilidade a inundações a montante do rio Meia Ponte, especialmente em torno das áreas urbanas. As simulações hidrodinâmicas, sobrepostas aos dados do Google Earth, oferecem uma visualização detalhada das zonas propensas a alagamentos, com contornos azuis representando o leito do rio e a possível expansão das águas durante eventos extremos.

Um dos pontos mais importantes é a variação das manchas de inundação conforme o tempo de retorno dos eventos. A pesquisa demonstra que, com o aumento do tempo de retorno (10, 50, 100 e 500 anos), há um crescimento significativo na extensão das áreas alagadas, com profundidades que variam entre 8 e 10 metros, particularmente na primeira secção analisada. Este padrão é comum em regiões urbanizadas próximas a corpos d'água, como é o caso da bacia do Meia Ponte, onde o crescimento urbano tende a agravar os impactos das inundações.

Comparações com outros estudos, como o de (Calazans, 2024) sobre o rio Maquiné, revelam semelhanças na extensão das áreas inundadas, apesar de pequenas diferenças de morfologia entre as bacias. O estudo de (Coelho *et al.*, 2022) sobre a bacia do rio Paraíba do Sul também aponta um comportamento parecido. Entretanto, no caso do Paraíba do Sul, a mancha de inundação para os tempos de retorno de 10 e 500 anos é muito semelhante, o que sugere que a planície de inundação é atingida mais cedo, enquanto a profundidade continua a aumentar sem expandir significativamente a área afetada. Isso mostra que as características geomorfológicas e topográficas de cada bacia desempenham um papel crucial na dinâmica das inundações.

Ao relacionar essas descobertas do rio Meia Ponte, percebemos que, embora o padrão de expansão da mancha de inundação siga a tendência esperada (maiores tempos de retorno resultam em inundações mais amplas), a variação de profundidade entre as secções é um fator diferencial. Em algumas secções, as profundidades ultrapassam 10 metros, o que pode estar relacionado à morfologia particular da bacia e à urbanização intensa da região metropolitana de Goiânia, que, ao impermeabilizar o solo, dificulta a drenagem natural e exacerba os efeitos das chuvas intensas.

Estudos como o de (Calazans, 2024) reforçam a importância de considerar a especificidade de cada bacia hidrográfica. No caso do Meia Ponte, a urbanização acelerada combinada com a variabilidade climática e morfológica da bacia torna a gestão das águas pluviais um desafio ainda maior. Por isso, os modelos hidrodinâmicos e

estatísticos, como o Hec-Ras e o ARIMA. São ferramentas essenciais para prever e mitigar os impactos das inundações nas áreas urbanas vulneráveis.

A implicação desses resultados para o planejamento urbano em Goiânia e nas cidades vizinhas é clara, políticas de mitigação de inundações, como a criação de áreas de retenção de água, zoneamento adequado e melhoria da infraestrutura de drenagem, são urgentes. Esse tipo de análise deve ser constantemente atualizado para garantir a segurança da população e minimizar os impactos das mudanças climáticas, que tendem a intensificar a frequência e a magnitude dos eventos extremos.

Assim como as maiores profundidades foram observadas no canal principal, as maiores velocidades de fluxo também ocorreram nessa região conforme os mapas abaixo, o que é consistente com os achados de pesquisas anteriores. A velocidade da água ao longo do rio varia conforme a profundidade em diferentes pontos. No canto superior direito, os gráficos exibem a relação entre a velocidade e o terreno.

As cores variam de azul a vermelho, conforme a legenda no canto inferior direito, que indica a velocidade do fluxo em metros por segundo (m/s). O azul representa as áreas de menor velocidade (próximas a 0 m/s), enquanto o vermelho indica as áreas de maior velocidade (acima de 5 m/s). Essa variação de cores ao longo do curso do rio permite identificar onde o fluxo de água é mais rápido ou mais lento, dependendo da topografia e da geometria do canal.

3.9.6. Velocidade na secção transversal com tempos de retorno

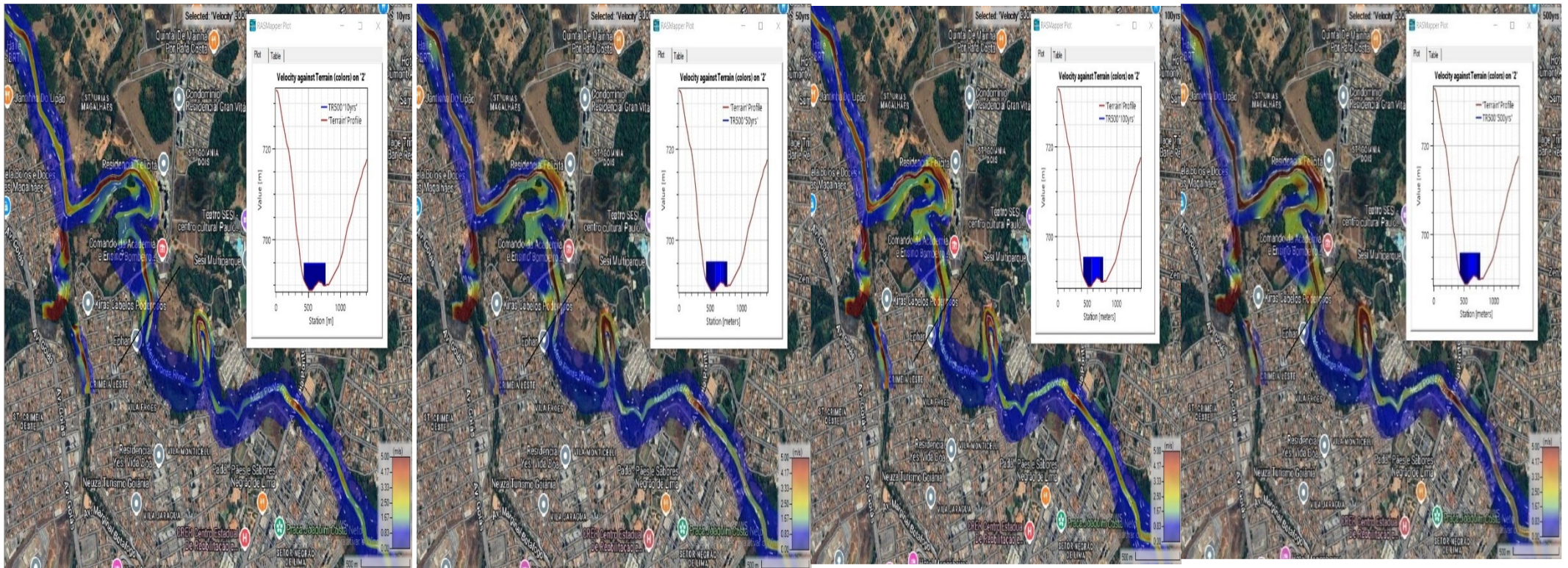


Figura 18: velocidades na secção transversal

Fonte: Autor, 2025

A linha vermelha no gráfico ilustra o perfil do terreno, revelando uma típica curva de vale que representa a topografia do canal fluvial. A parte inferior do gráfico, com barras azuis, mostra a distribuição da velocidade da água na seção transversal, relacionada a eventos de cheia com tempos de retorno de 10, 50, 100 e 500 anos.

Abaixo, são apresentados os gráficos da relação à elevação da superfície da água. As curvas representam a variação da elevação ao longo de uma seção do rio para diferentes tempos de retorno (10, 50, 100 e 500 anos), permitindo identificar áreas onde a profundidade da água muda rapidamente. Essas variações podem ser causadas por obstáculos no canal, como mudanças bruscas de profundidade, pontes ou outras estruturas que influenciam o comportamento hidráulico local. Em função dos diferentes tempos de retorno, a superfície da água se altera, refletindo o impacto desses obstáculos.

O eixo horizontal do gráfico representa a distância ao longo da seção transversal (denominada estação), que varia entre 0 e 800 metros. Já o eixo vertical mostra a elevação da superfície da água, em metros, com valores que se encontram na faixa de 715 metros. A curva vermelha representa a elevação da superfície da água para eventos de cheia, indicando as variações nos tempos de retorno e como isso influencia a dinâmica da inundação na região.

3.9.7. Elevação da superfície da água na secção transversal

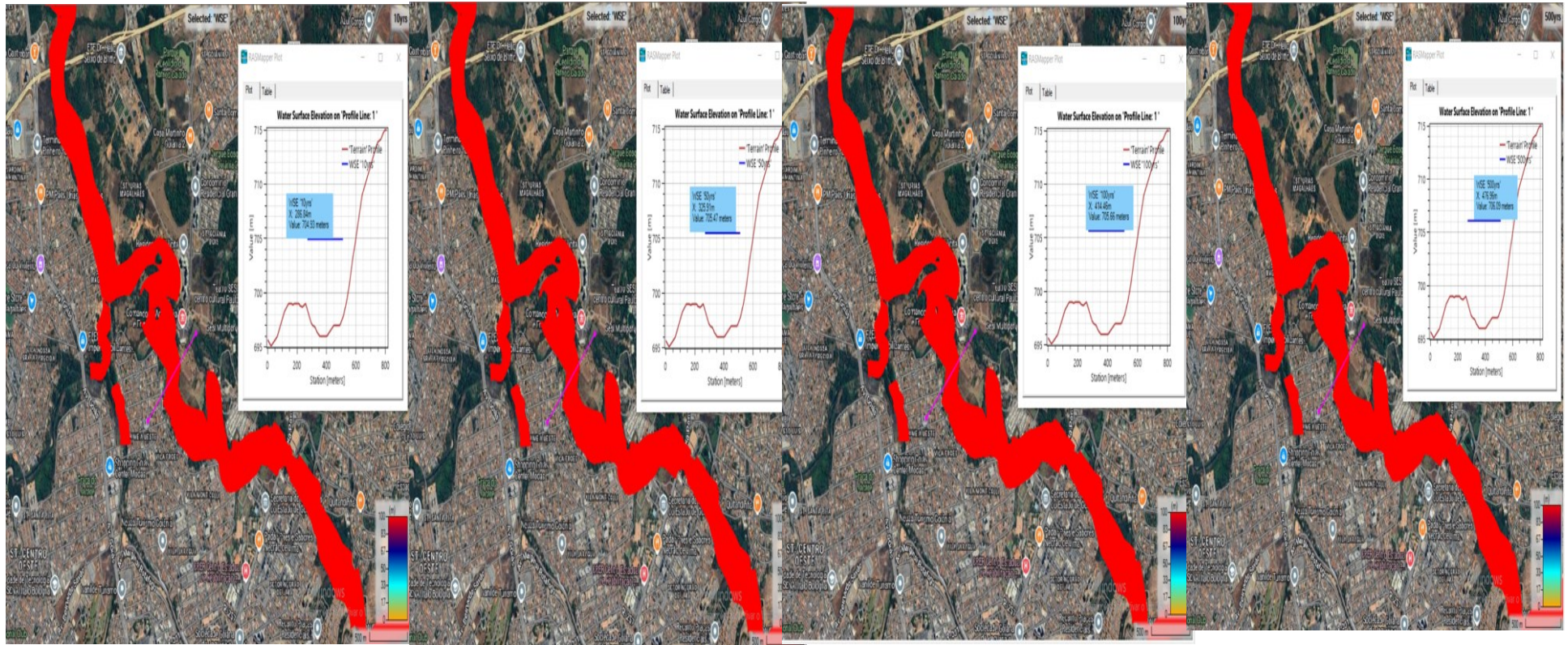


Figura 19: Elevação da superfície da água na secção transversal

Fonte: Autor, 2025

3.9.8. Representação dos gráficos da mancha de inundação

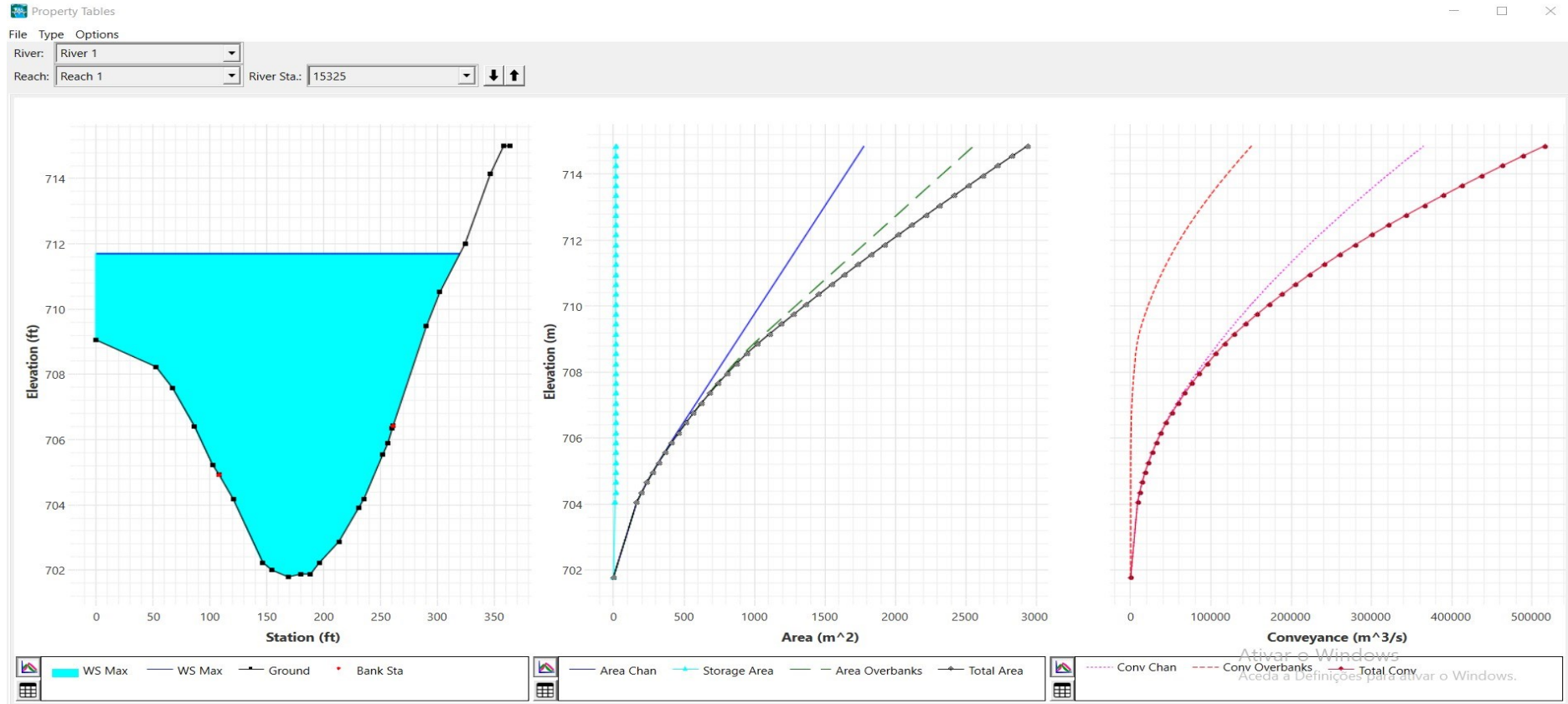


Figura 20: perfil de elevação

Fonte: Autor, 2025

Os gráficos anteriores estão divididos em três partes, cada uma fornecendo uma visão detalhada da estrutura e capacidade do canal analisado.

Perfil Transversal do Canal (gráfico à esquerda), este gráfico ilustra a forma do leito do rio e as variações de elevação em diferentes pontos ao longo da seção transversal. A área preenchida em azul representa o nível máximo de água alcançado na seção, enquanto a linha preta retrata o terreno. O gráfico mostra que o canal tem uma largura total de até 106,68 metros (variando de 0 a 350 pés no eixo X), incluindo tanto o canal principal quanto as margens (overbanks). No eixo Y, a elevação do terreno varia de 213,97 a 217,32 metros, destacando o perfil e o desnível do canal.

Área Molhada do Canal (gráfico central), este conjunto de gráficos mostra a área molhada, ou seja, a superfície em contato com a água. No eixo X, temos a área molhada do canal (em metros quadrados), variando de 0 a aproximadamente 3000 m². No eixo Y, a elevação do terreno vai de 702 a 714 metros, consistente com os valores do gráfico anterior. A linha azul sólida indica a área molhada do canal principal, enquanto as linhas pontilhadas mostram as áreas das margens e a área total. Quando o nível da água atinge cerca de 712 metros, a área total (linha pontilhada preta) chega a aproximadamente 2000 m², com a maior parte dessa área sendo ocupada pelo canal principal. À medida que a água sobe e se aproxima das margens, a área molhada aumenta mais lentamente, o que indica que as margens têm menor contribuição para o fluxo até que sejam completamente submersas.

Capacidade de Condução (gráfico à direita), o último conjunto de gráficos retrata a capacidade de condução do canal, ou seja, a capacidade de transportar água, medida em metros cúbicos por segundo (m³/s). No eixo X, a condução varia de 0 a aproximadamente 500.000 m³/s, enquanto o eixo Y, assim como nos outros gráficos, apresenta elevações de 702 a 714 metros. As diferentes curvas mostram a capacidade de condução do canal principal (linha vermelha sólida), das margens (linha rosa pontilhada) e a capacidade total (linha vermelha pontilhada). Em um nível d'água de aproximadamente 712 metros, a capacidade total de condução se aproxima de 300.000 m³/s, com o canal principal sendo responsável pela maior parte dessa condução. À medida que a água atinge as margens, a condução nas áreas de overbanks começa a contribuir, mas de maneira menos significativa.

Esses gráficos oferecem uma visão clara de como o canal responde a diferentes níveis de água, destacando a importância do canal principal na condução de grandes

volumes de água e como a área molhada e a capacidade de condução aumentam com o nível da água. Abaixo, também estão disponíveis os gráficos de perfis de velocidade para o canal principal, que complementam essas análises.

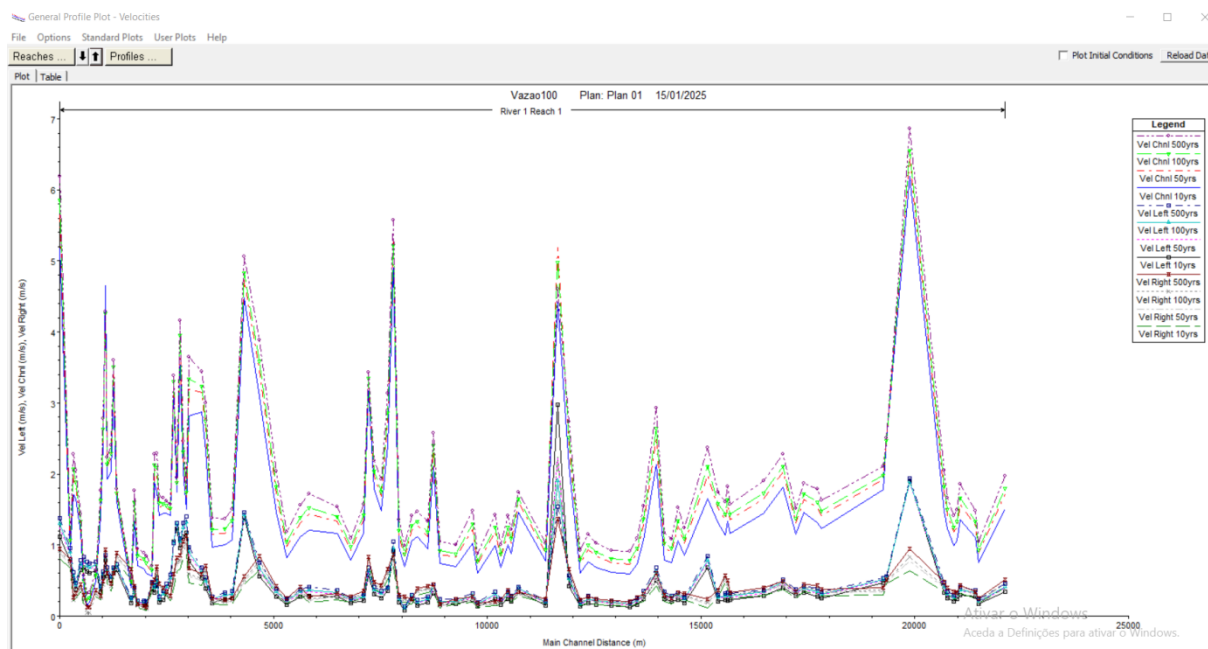


Figura 21: velocidade do canal longitudinal

Fonte: Autor, 2025

Os gráficos acima fornecem uma análise detalhada sobre o comportamento da velocidade da água ao longo de um canal principal, com base em simulações hidrodinâmicas.

Perfil de Velocidade ao Longo do Canal: O gráfico inicial ilustra a distribuição de velocidades ao longo de aproximadamente 25 km do canal. No eixo X, temos a distância ao longo do canal principal, variando de 0 a 25.000 metros, enquanto o eixo Y exibe a velocidade da água no canal principal em metros por segundo, com valores variando de 0 a cerca de 7 m/s.

Três perfis de velocidade são representados:

- **Linha Azul (LeftInitialProfile):** Perfil de velocidade à esquerda do canal.
- **Linha Verde (ChnlInitialProfile):** Perfil de velocidade no centro do canal.
- **Linha Preta (RightInitialProfile):** Perfil de velocidade à direita do canal.

Cada linha corresponde a velocidades médias para diferentes (centro do canal, margem esquerda e margem direita) e tempos de retorno (10, 50, 100 e 500 anos).

Essas linhas refletem as variações de velocidade ao longo das diferentes seções transversais (esquerda, centro e direita) do canal. Observa-se que a velocidade no centro do canal tende a ser maior do que nas laterais em todos tempos de retorno, devido à maior profundidade ou menos resistência ao fluxo no centro. Quanto maior for o tempo de retorno, apresenta maiores velocidades no canal. As velocidades alcançam picos de até 7 m/s em algumas regiões, indicando trechos onde a água acelera, possivelmente em função de estreitamentos do canal, mudanças de profundidade ou inclinações mais acentuadas do leito do rio. Isso sugere que as mudanças na morfologia do canal têm um impacto significativo na distribuição das velocidades.

3.9.9. Validação de nível de água

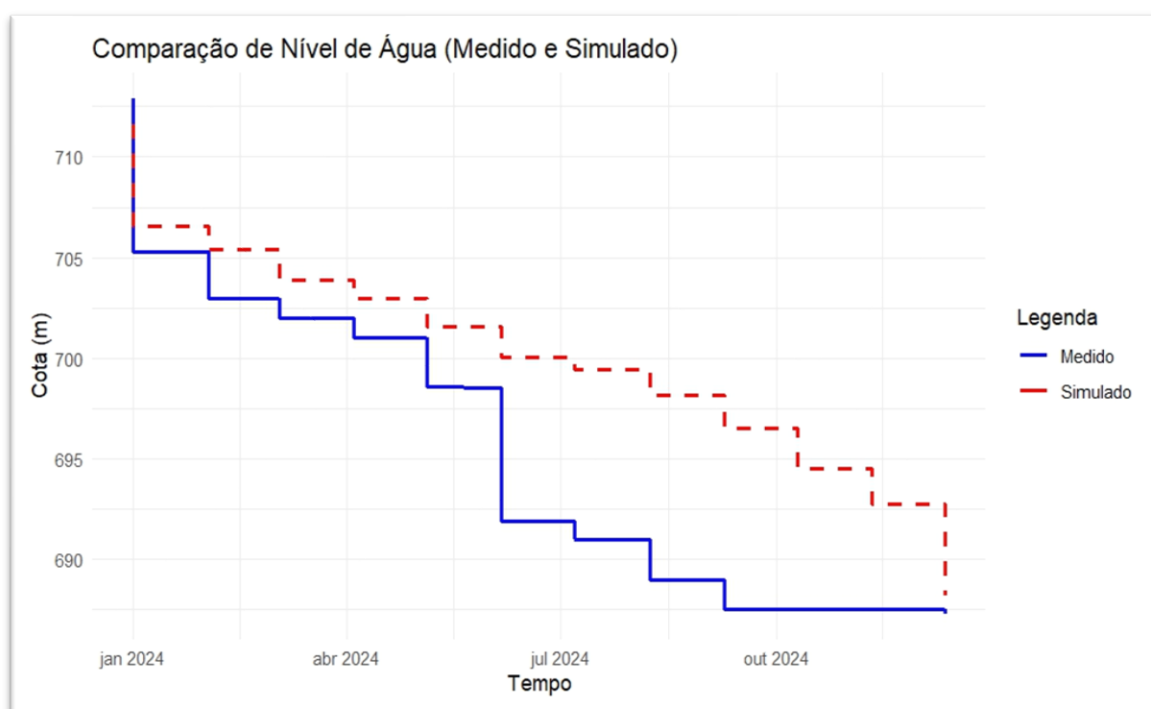


Figura 22: velocidade do canal longitudinal

Fonte: Autor, 2025

Para comparação de dados de nível de água da simulação e da medição foram baseados em cálculos de algumas métricas estatísticas como: Erro médio absoluto (MAE), Erro

relativo médio (MBE), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e Coeficiente de determinação (R^2).

Observando as flutuações dos gráficos de nível de água ao longo dos meses abrangidos pela coleta de dados de campo, percebe-se uma discrepância entre os valores medidos e os simulados no HEC-RAS. Em alguns trechos, o modelo simula níveis de água diminuindo superiores aos valores medidos, diminuindo uma superestimação das cotas simuladas.

Apesar dessas diferenças, os resultados indicam uma boa aproximação à realidade, conforme demonstrado pelas estatísticas. O MAE, que avalia a magnitude média dos erros entre os valores coletados e simulados, foi de 4.077, o que indica uma precisão aceitável. Já o MBE, que aponta a tendência do modelo, revelou um nível de superestimação, com um valor de 4.011. O NSE, que varia de menos infinito a 1, apresentou um valor de 0,509. Esse resultado, dentro do intervalo aceitável de $0,36 < NSE \leq 0,75$, reflete uma concordância moderada entre os dados medidos e simulados. Por fim, o R^2 alcançou 0,875, evidenciando um forte brilho entre os valores simulados e apresentados. Esses resultados confirmam que, embora existam diferenças pontuais, o modelo apresentou um desempenho consistente e confiável.

3.9.10. Validação da vazão

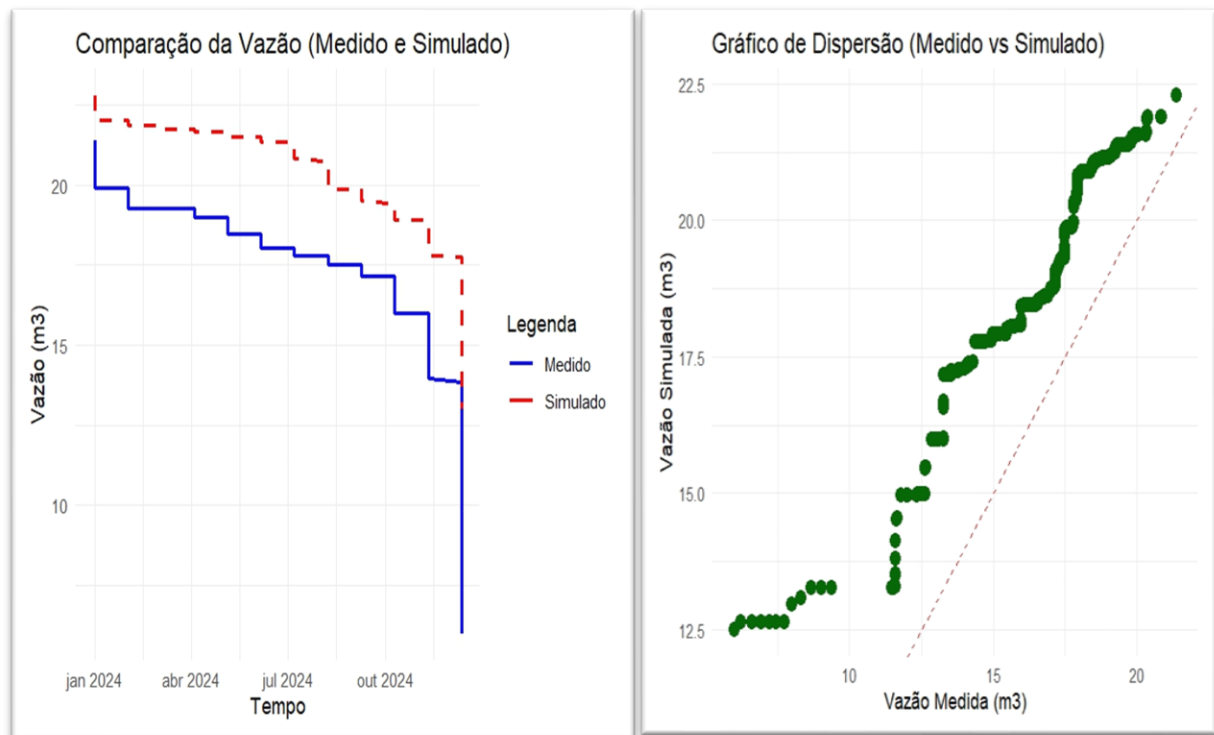


Figura 23: Validação de dados da vazão

Fonte: Autor, 2025

O Erro Médio Absoluto (MAE) representa a média das diferenças absolutas entre os valores simulados e medidos. No caso apresentado, um valor de 2.247 m³/s indica que, em média, o modelo apresenta um desvio de 2.247 unidades em relação aos dados observados. Embora o MAE não seja uma métrica padronizada, pois depende da escala dos dados, esse valor sugere a existência de discrepâncias significativas no desempenho do modelo.

O Erro Relativo Médio (MBE) avalia a visão do modelo, identificando se ele tende a superestimar ou subestimar os valores medidos. Um MBE positivo de 2.247 indica que o modelo, em média, superestimou os valores de vazão distribuídos. Esse resultado reflete uma tendência sistemática do modelo em produção de estimativas superiores às reais.

O Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) varia de $-\infty$ a 1, sendo que os valores próximos a 1 indicam uma boa concordância entre os dados simulados e medidos. No entanto, um NSE de 0,014, muito próximo de zero, sugere que o modelo possui um

desempenho ruim em capturar a variabilidade dos dados medidos. Segundo (Moriassi *et al.*, 2007), valores de NSE entre 0,0 e 0,5 são considerados pouco predominantes em validações hidrológicas.

O Coeficiente de Determinação (R^2) mede a proporção da variabilidade dos dados medidos explicada pelo modelo. Um R^2 de 0,952 indica um alto brilho linear entre os valores medidos e simulados. Entretanto, essa métrica está disponível apenas o ajuste linear e não reflete diretamente a precisão do modelo, que é mais bem representada por NSE e MAE. O valor elevado de R^2 sugere que os padrões gerais dos dados foram capturados, mas pode haver desvios significativos em detalhes específicos, como apontam o MAE e a NSE.

No gráfico de comparação de vazões, observa-se que a curva simulada está consistentemente acima da curva medida, confirmando a visão positiva indicada pela MBE. As discrepâncias são especialmente notáveis em determinados períodos, como evidenciado pelo valor do MAE. No gráfico de dispersão, apesar do alto R^2 (0,952), verifica-se que nem todos os pontos seguem detalhadamente a linha de paridade ideal (linha 1:1), evidenciando a existência de desvios sistemáticos, como superestimação em vazões mais baixas ou mais altas.

Embora o modelo tenha apresentado um forte brilho linear ($R^2 = 0,952$), sua precisão geral é questionável devido ao baixo NSE (0,014) e ao viés positivo (MBE). Isso indica que, apesar de captar bem a tendência geral, o modelo não conseguiu reproduzir com fidelidade detalhes específicos ou variações locais nos dados avaliados.

3.9.11. Hidrograma de nível de água e vazão

Os gráficos abaixo ilustram o hidrograma de nível de água e vazão, os hidrogramas mostram as variações da elevação da superfície da água (linha azul) e da vazão (linha verde) ao longo de 8 dias, de 19 a 27 de junho de 2023. O eixo X representa esse período de tempo, enquanto o eixo Y à esquerda apresenta a elevação da superfície da água, e o eixo Y à direita indica a vazão (em m^3/s) e no centro tem uma régua com valores da cota e da vazão do dia 23 de junho de 2023. No dia 19 de junho, a elevação é alta, em torno de 711,5 metros, mas vai sofrendo uma queda até dia 21 de junho, onde estabiliza atingindo cerca de 709 metros.

Depois desse ponto, a elevação volta a cair até dia 27 de junho. A linha verde que representa a vazão mostra um comportamento similar a elevação da água, com flutuações rápidas e cíclicas ao longo do tempo, típicas de eventos de chuva ou de rápidas mudanças nas condições do rio. A vazão atinge seu valor máximo de 49,2 m³/s em 19 de junho, seguido de uma queda acentuada, que acompanha a diminuição da elevação da superfície da água.

Essas análises sugerem que as variações de vazão e elevação da água são fortemente influenciadas por fatores climáticos e morfológicos. As mudanças abruptas podem estar relacionadas a eventos como chuvas intensas, enquanto as diferenças de velocidade ao longo do canal indicam que o fluxo de água é muito dinâmico e depende da topografia local.

O gráfico final oferece uma visão clara sobre como o canal responde a essas condições, fornecendo informações valiosas para o gerenciamento de recursos hídricos e a mitigação de inundações.

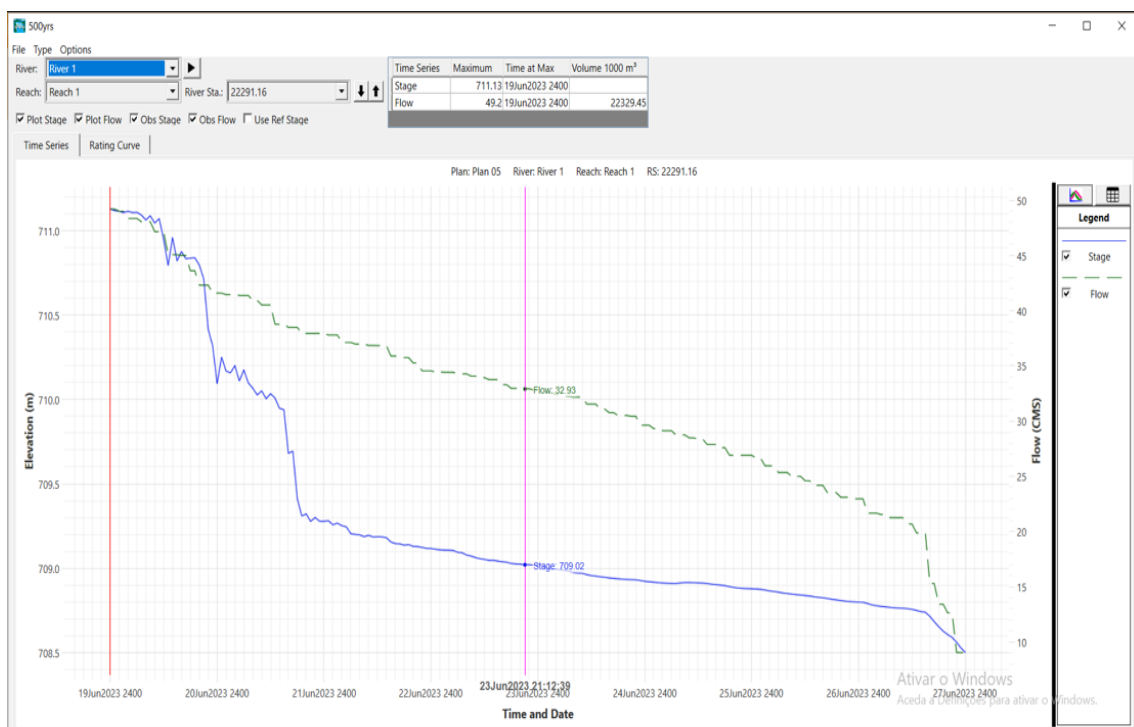


Figura 24: elevação e vazão do canal longitudinal

Fonte: Autor, 2025

Durante esse período, houve uma queda rápida na elevação da água, de 711,5 metros para cerca de 708,5 metros, acompanhada por picos de vazão que também diminuíram abruptamente. Esse comportamento pode estar relacionado a um evento transitório, como o rápido escoamento após uma cheia, ou talvez o fim de um período de alta vazão, causado por uma precipitação significativa ou uma liberação controlada de água. Após essa queda inicial, a elevação da água se estabiliza em torno de 709 metros por vários dias até estar abaixo de 708,5 metros, e a vazão segue a mesma tendência de queda, chegando a atingir menos de 10 m³/s.

O volume total de escoamento registrado durante esse intervalo foi de 22.329,45 m³, indicando que uma quantidade considerável de água passou por essa seção do rio. O comportamento observado nos gráficos sugere um ciclo hidrológico típico de cenários dinâmicos, como inundações temporárias seguidas por escoamentos rápidos. Esses padrões são comuns em áreas onde eventos de precipitação intensa causam picos de vazão e subsequente estabilização à medida que o excesso de água é drenado.

Esse tipo de análise é crucial para entender como a bacia hidrográfica responde a eventos extremos e para planejar medidas de controle e mitigação de enchentes. A variação rápida da elevação e da vazão também indica que o rio está sujeito a flutuações significativas, o que reforça a importância de monitoramento contínuo para gerenciar adequadamente os riscos de inundação.

3.10. AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO

A análise cartográfica da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte revela uma variação significativa da suscetibilidade a inundações na região metropolitana de Goiânia. O mapa destaca desde áreas de baixo risco até regiões altamente vulneráveis, o que reflete a complexa interação entre a geografia da bacia e os fatores antrópicos que a afetam.

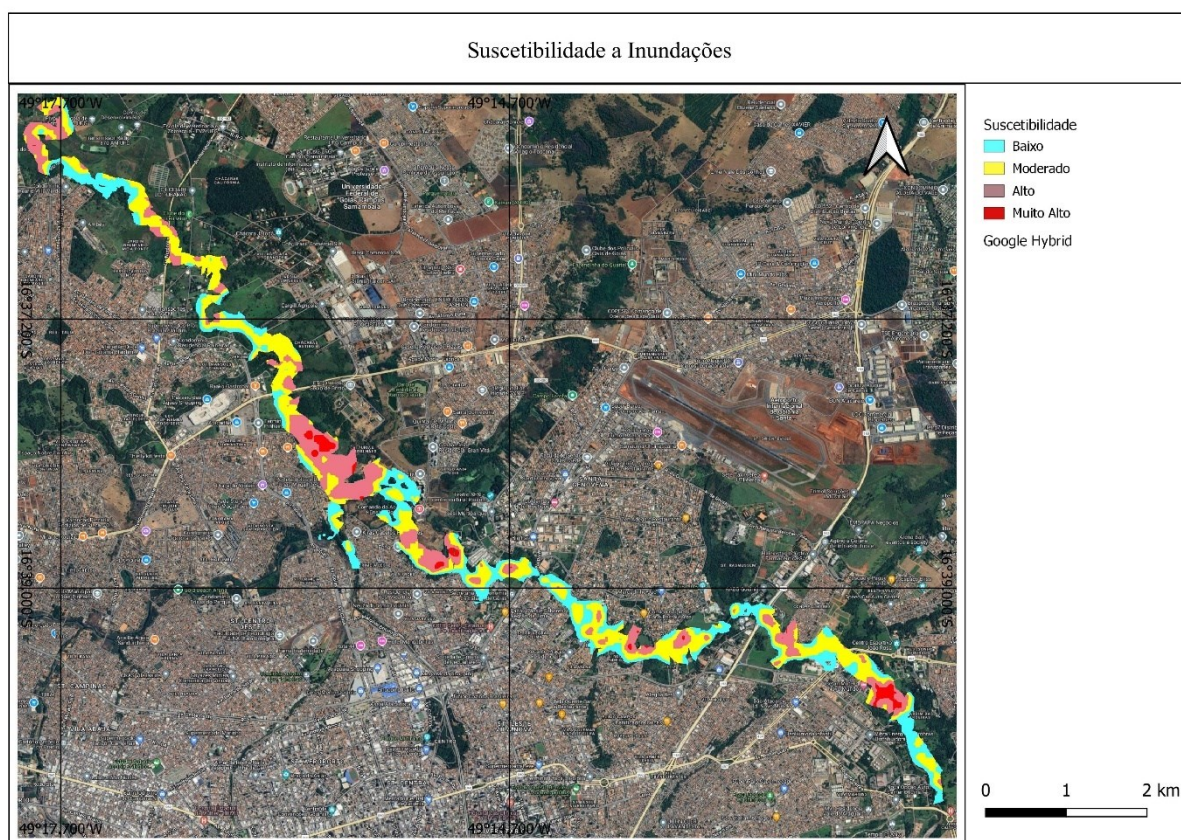


Figura 25: Suscetibilidade a inundações

Fonte: Autor, 2025

A ocupação desordenada das áreas próximas à bacia hidrográfica do rio Meia Ponte representa uma ameaça significativa à sua degradação. Esse risco é potencializado pela predominância de Cambissolos e Argissolos, que, além de possuírem características favoráveis à atividade agrícola, apresentam suscetibilidade à inundações. Como consequência, essa dinâmica pode gerar impactos ambientais e sociais, colocando em risco as comunidades situadas no entorno da bacia.

As áreas de baixo risco, representadas em azul, são menos propensas a inundações, indicando regiões onde o relevo e as condições naturais oferecem proteção contra eventos de cheias. No entanto, as áreas em amarelo e castanho, que indicam risco moderado e alto, respectivamente, mostram que uma parte considerável da bacia está exposta a enchentes, especialmente durante períodos de chuva intensa. Por fim, as áreas em vermelho, que representam o risco mais elevado, destacam zonas de extrema vulnerabilidade, onde medidas preventivas são essenciais para minimizar os danos a propriedades, infraestrutura e, principalmente, proteger a população.

O que torna essa representação cartográfica especialmente preocupante é a proximidade de áreas urbanizadas com zonas de alta suscetibilidade a inundações. Essa sobreposição implica um risco direto de prejuízos materiais e ameaça à segurança pública durante eventos de cheia. O crescimento desordenado em torno da bacia, como indicado pela classificação de uso do solo (MapBiomass-Brasil, 2020), agrava ainda mais essa situação.

Quase metade da área estudada já é dominada por atividades humanas, como pecuária e descarte irregular de resíduos, o que não só aumenta a pressão sobre o meio ambiente, mas também compromete a capacidade da bacia de absorver e escoar grandes volumes de água durante as chuvas.

A "Carta das Águas do Rio Meia Ponte" (2023) reforça essas observações ao destacar que o crescimento antrópico desordenado, especialmente em áreas urbanizadas, vem exacerbando a vulnerabilidade da bacia. Atividades como captação irregular de água e lançamento de efluentes são comuns, contribuindo para a degradação ambiental. Em caso de uma inundação, essas regiões não só enfrentariam um alto risco de danos materiais, mas também poderiam sofrer com a contaminação de água e solo, gerando um impacto ambiental significativo.

Portanto, além da necessidade de medidas imediatas de mitigação em áreas de maior risco, essa análise destaca a importância de um planejamento urbano mais eficiente e uma gestão integrada dos recursos hídricos. A expansão desordenada deve ser controlada, e a infraestrutura de drenagem deve ser adequadamente dimensionada para lidar com os desafios de uma bacia hidrográfica sob crescente pressão antrópica.

Os estudos sobre ocorrências de alagamentos e inundações nos anos de 2006 e 2010, feito por (Rego; Barros, 2014), constata que os setores mais afetados são, entre os setores com maior número de ocorrências até 2005 estão o Bueno, Jardim Guanabara II e Jardim América,

cada um com 9 registros, seguidos de Urias Magalhães com 8, o Pedro Ludovico com 7, e os setores Campinas e Jardim Goiás com 6 ocorrências cada. Setores como Jardim Guanabara, Novo Mundo, Santa Genoveva e Vila São José registaram 5 ocorrências. Esses dados revelam que até 2005, a maior concentração desses eventos ocorria nas regiões sul e central do município, especialmente nos setores Bueno e Vila Roriz.

Entre 2006 e 2010, essas áreas continuaram sendo as mais afetadas, com destaque para os setores Bueno e Jardim América na região sul, e o Urias Magalhães na área central. Nesse período, a região norte, representada pelo Jardim Guanabara II, também passou a ter maior incidência. (Nascimento; Oliveira, 2010) apontam que durante as décadas de 1980 e 1990, essas regiões passaram por um intenso processo de verticalização, ficando extremamente consolidadas em 2010.

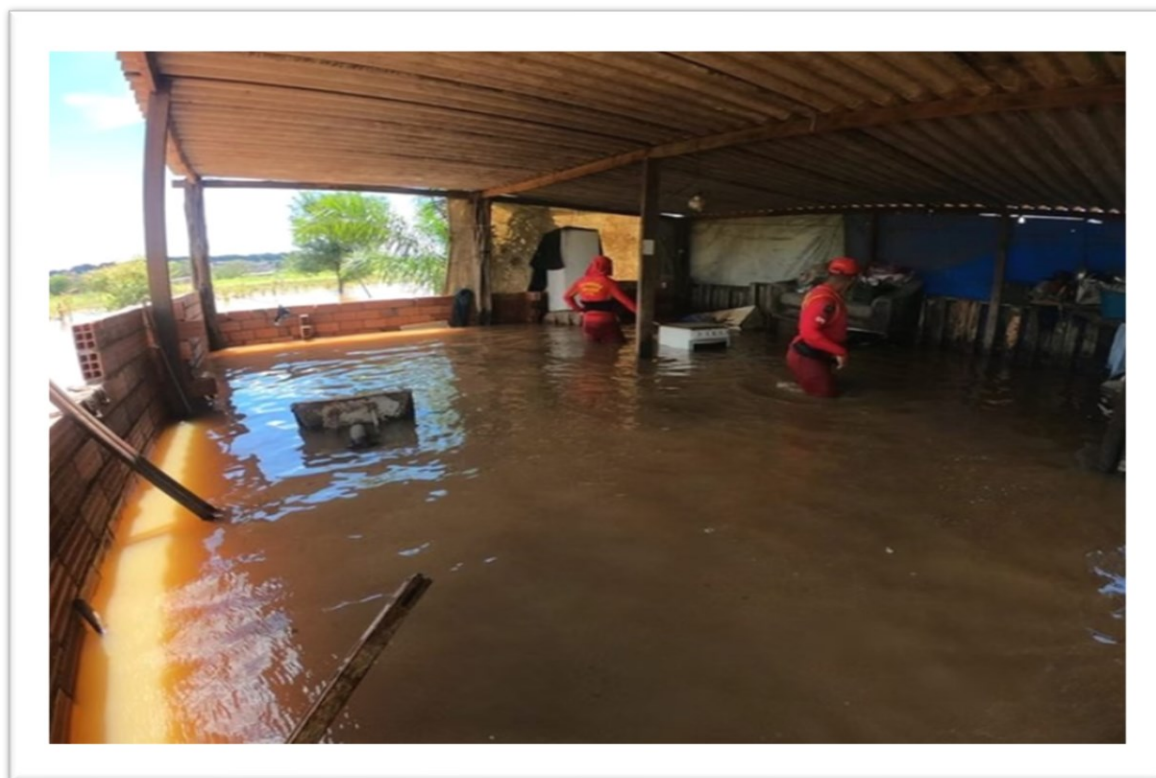


Figura 26: Inundação de residência

Fonte: Laura Braga, 2022

A suscetibilidade à inundação também foi analisada visualmente por meio do mapa de vulnerabilidade ambiental. O objetivo dessa avaliação foi verificar o grau de correspondência entre as áreas vulneráveis, identificadas no mapa elaborado com dados de resolução espacial de 30 metros, e as regiões suscetíveis a inundações. Para essa análise, foram considerados os tempos de retorno de 10, 50, 100 e 500 anos.

Na figura 27 é possível observar o mapa de tempo de retorno de 10 anos, sobre o mapa de vulnerabilidade ambiental.

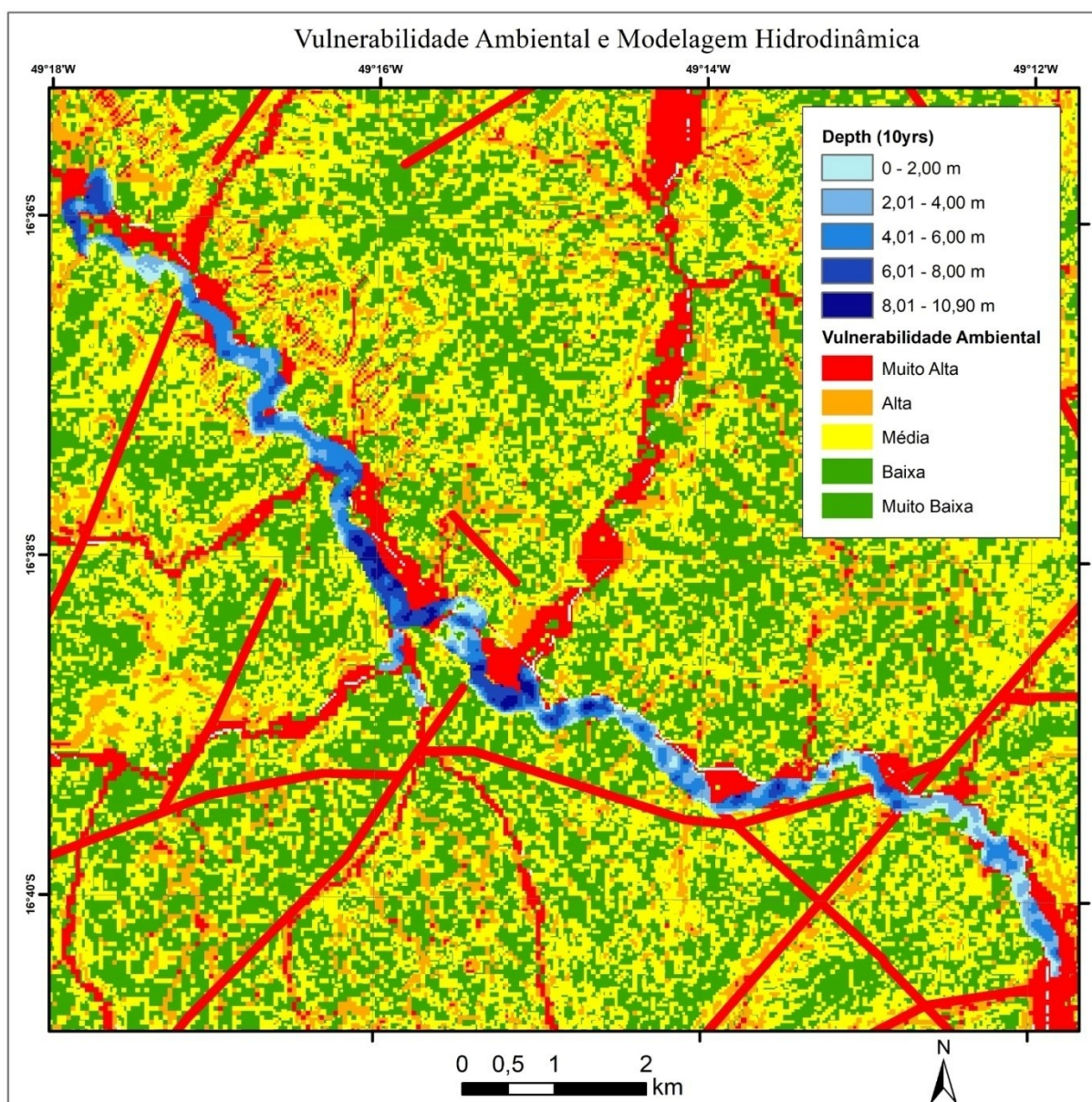


Figura 27: Susceptibilidade a inundação (tempo de retorno 10 anos) e vulnerabilidade ambiental

Fonte: Ferreira, 2025

Na figura 28 é possível observar o mapa de tempo de retorno de 50 anos, sobre o mapa de vulnerabilidade ambiental.

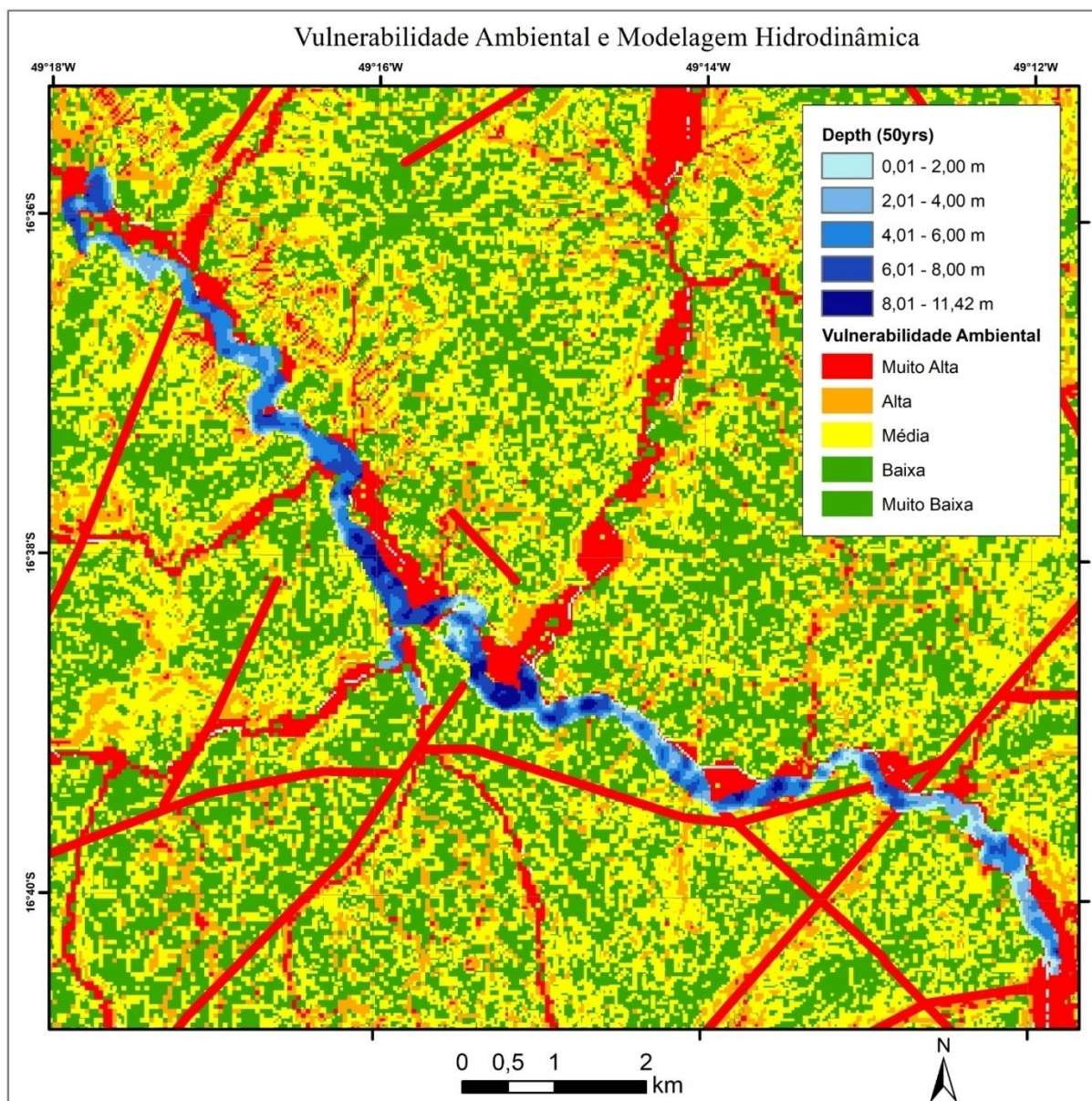


Figura 28:: Susceptibilidade a inundação (tempo de retorno 50 anos) e vulnerabilidade ambiental

Fonte: Ferreira, 2025

Na figura 29 é possível observar o mapa de tempo de retorno de 100 anos, sobre o mapa de vulnerabilidade ambiental.

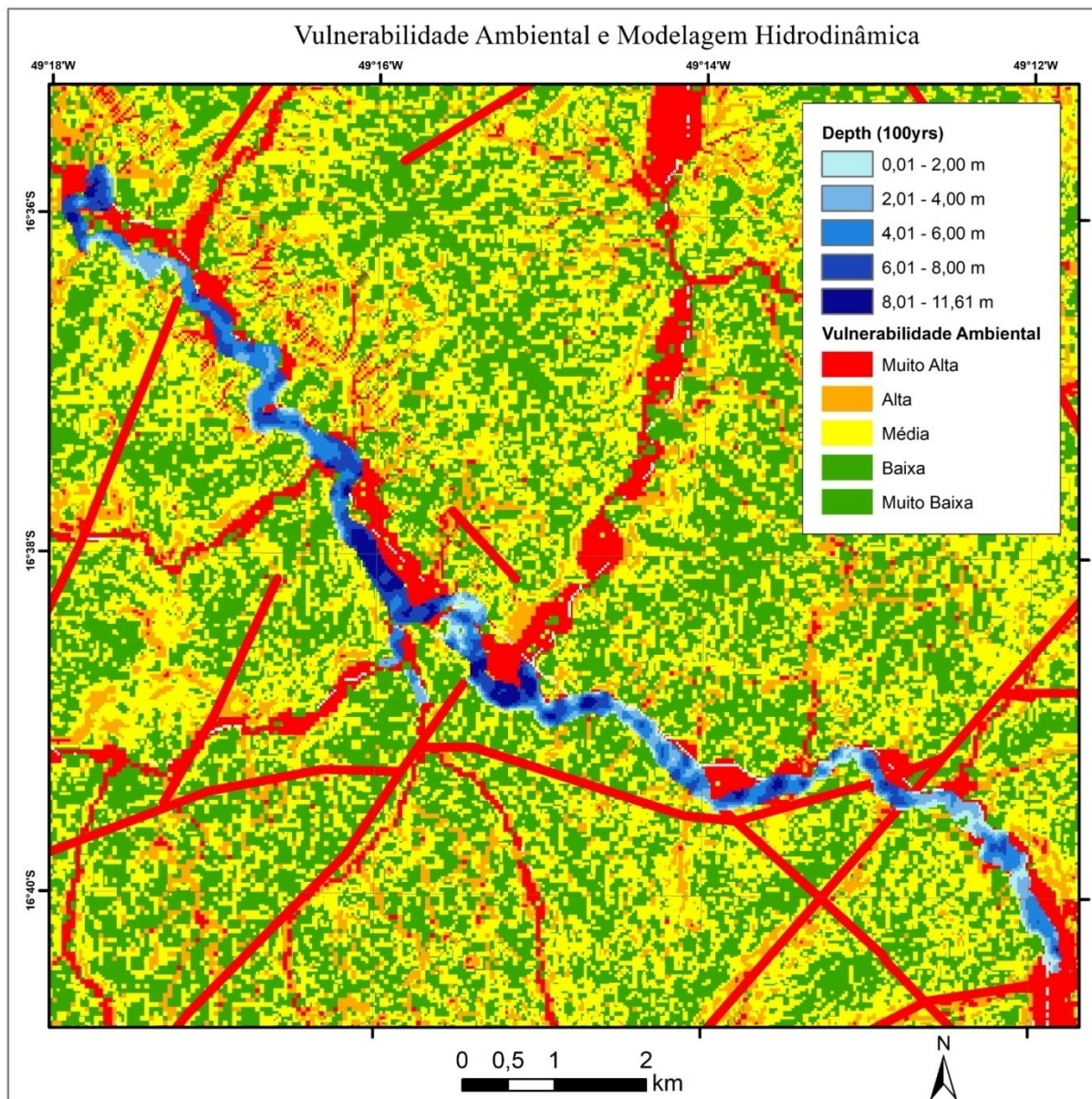


Figura29 : Suscetibilidade a inundação (tempo de retorno 100 anos) e vulnerabilidade ambiental

Fonte: Ferreira, 2025

Na figura 30   possível observar o mapa de tempo de retorno de 500 anos, sobre o mapa de vulnerabilidade ambiental.

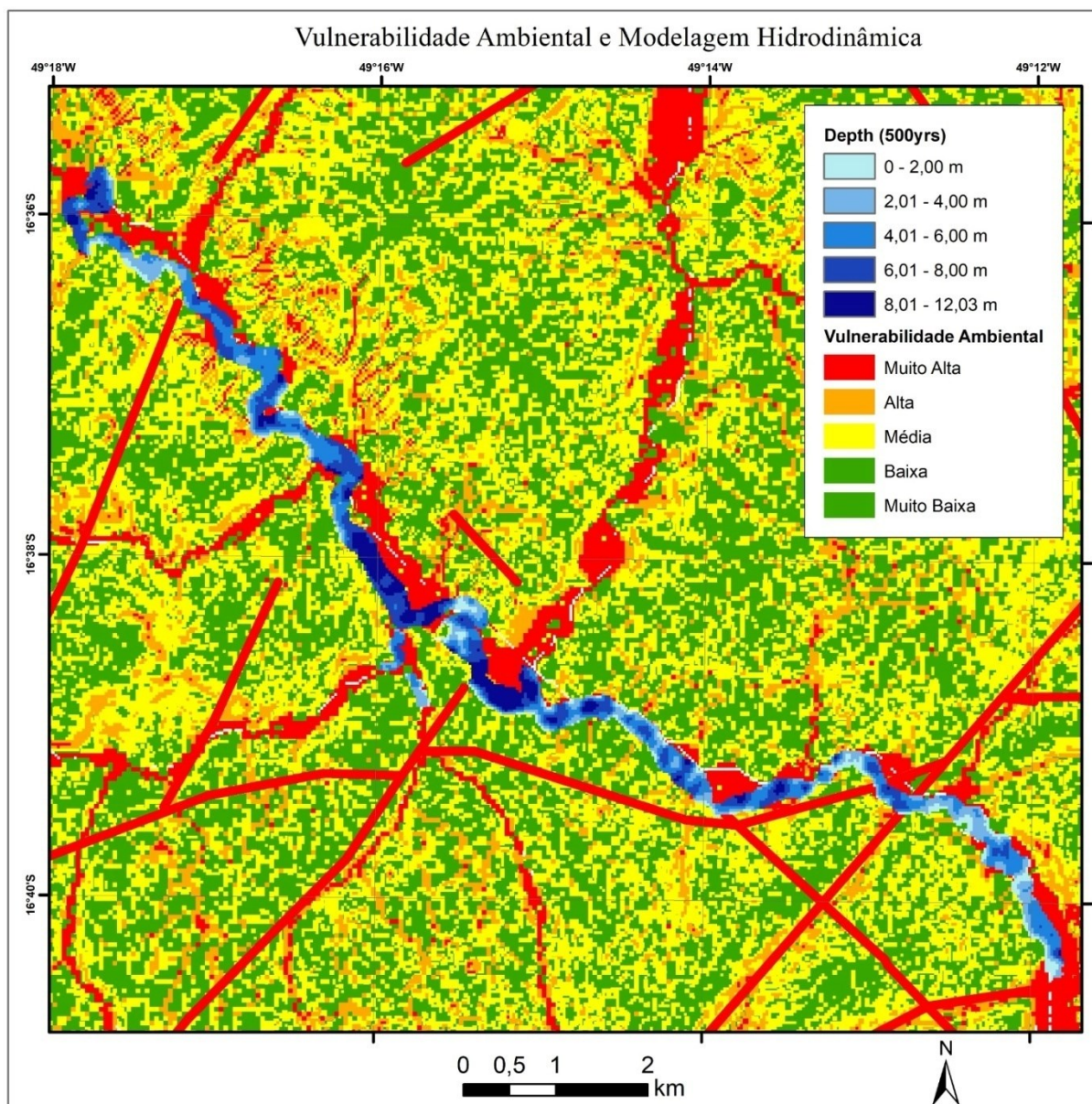


Figura 24: Suscetibilidade a inundações (tempo de retorno 500 anos) e vulnerabilidade ambiental

Fonte: Ferreira, 2025

Os mapas de suscetibilidade a inundações e de vulnerabilidade ambiental foram produzidos com dados geográficos com níveis de detalhamentos distintos. Enquanto o mapa de vulnerabilidade ambiental possui detalhamento de 30 metros, o dado da modelagem hidrodinâmica possui detalhamento centimétrico. Essa diferença de detalhamento espacial pode ser um dos motivos dos deslocamentos observados nos mapas. No entanto, para avaliações rápidas regionais o mapeamento de vulnerabilidade ambiental, que pode ser elaborado com dados disponíveis gratuitamente, em pouco tempo, pode ser utilizado principalmente em zoneamentos e planejamentos ambientais. Evitando dessa forma, que áreas suscetíveis as inundações sejam ocupadas.

3.11. CONCLUSÃO

As análises realizadas na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte evidenciam a complexidade dos desafios relacionados às inundações na região. O aumento modesto das chuvas, identificado nas séries temporais, foi corroborado pela modelagem ARIMA, que forneceu uma base estatística sólida para compreender as dinâmicas hidrológicas. A modelagem hidrodinâmica destacou áreas com diferentes graus de suscetibilidade a alagamentos, indicando profundidades que podem impactar severamente a infraestrutura local.

Além disso, a cartografia da suscetibilidade à inundação mostrou a vulnerabilidade de áreas urbanas, enfatizando a necessidade de intervenções proativas e estratégias de planejamento urbano. A integração de dados hidrológicos, modelagem e uso do solo é fundamental para o desenvolvimento de políticas eficazes e sustentáveis, garantindo a resiliência da região frente a eventos extremos e contribuindo para a proteção da população e do meio ambiente.

3.12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, A., Kumar, V., Pandey, A. & Khan, I. (2012). An application of time series analysis for weather forecasting. *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 2(1): 2248-9622.

Agrícola, São Paulo, v. 55, n. 1, p. 63–76, 2008.

Aguado-Rodríguez, G. Jr., Quevedo-Nolasco, A. & Castro-Popoca, M. et al. (2016). Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA. *Agrociencia*. 50(1): 1-13.

Akaike, H. A Bayesian of the minimum AIC procedure. *Annals of the Institute of*

Akaike, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control.*, Boston, v.19, n.6, p.716-723, Dec. 1974.

Albuquerque, Rosendo Chagas de et al. *Modelagem em séries temporais: aplicação em dados de precipitação na região do sertão de Pernambuco-Brasil*. 2018.

Aalmeida, José Wandemberg Rodrigues. *Previsão do preço do milho para o Estado do Ceará*. 2018.

Amaral, Ana Karolyna Nunes; Rosa, Lucas Espíndola; Formiga, Klebber Teodomiro Martins. *Estudo do transporte de sedimentos em suspensão ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte–GO*. *Ateliê Geográfico*, v. 15, n. 2, p. 94-113, 2021.

Amorim, M. R. B. *Modelagem em séries temporais aplicados a dados de temperatura máxima na cidade de Campina Grande – PB*. Tese de graduação. Departamento de Estatística do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande – PB, 2012.

Antunes, J. L. F., Cardoso, M. R. A. (2015). Uso da análise de séries temporais em estudos epidemiológicos. *Epistemologia e Serviços da Saúde*, 24(1): 565-576.

Arêdes, AF de; Pereira, Matheus Wemerson Gomes. Potencialidade da utilização de modelos de séries temporais na previsão do preço do trigo no Estado do Paraná. *Revista de Economia Agrícola*, v. 55, n. 1, p. 63-76, 2008.

Automatic Control, v.19, n.6, p.716-723, 1974.

Bayer, Débora Missio; castro, Nilza Maria dos Reis; Bayer, Fernando Mariano. Modelagem e previsão de vazões médias mensais do rio Potiribu utilizando modelos de séries temporais. *Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 17, n. 2 (abr./jun. 2012), p. 229-239, 2012.*

Borges, Vinícius Silva; De Oliveira, Wellington Nunes. Análise multitemporal do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 17, n. 1, p. 79-93, 2021.

Bueno, Janaina Cosme damiana Metinoski; Jadoski, Sidnei Osmar; De Lima, Vanderlei Aparecido. Estudo de características climáticas da região de Guarapuava por meio de análise de série temporal e modelagem ARIMA. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 5, p. e75953119-e75953119, 2020.

Burnham, KP; Anderson, DR *Seleção de modelo e inferência multimodelo: uma abordagem prática da teoria da informação* . 2ª ed. Nova York: Springer-Verlag, 2002.

Calazans, Daphne Becker. Mapeamento e quantificação de risco de inundação no município de Maquiné, RS. 2024.

Cardoso, Murilo Raphael Dias; Marcuzzo, Francisco Fernando Noronha; BARROS, Juliana Ramalho. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. *ACTA Geográfica, Boa Vista*, v.8, p.40-55, 2014.

Ceiwr-Hec. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. ENGINEERS, U. S. A. C. o. Davis, CA, USA: Hydrologic Engineering Center (HEC) 2000.

Coelho, Clívia Dias et al. *modelagem hidrodinâmica de áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do rio Paraíba Do Sul*. de l'OrganisationMétéorologiqueMondiale, 1975.

Dos Santos, K.M et al. Carta das Águas do rio Meia Ponte. Câmara Municipal de Goiânia, 2023.

Freitas, MA, et al. (2020). "Avaliação do desempenho de modelos hidrológicos na previsão de vazões." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* .

Furtado, Adriano César, et al. Fragilidade ambiental da alta bacia hidrográfica do rio Meia Ponte (Goiás) e conflitos pelo uso da água. 2023.

Gupta, HV, Kling, H., Yilmaz, KK, & Martinez, GF (2009). "Decomposição do erro quadrático médio e critérios de desempenho NSE: Implicações para melhorar a modelagem hidrológica." *Journal of Hydrology* .

<https://secom.ufg.br/n/85782-pesquisa-identifica-principais-pontos-de-alagamento-e-inundacao-em-goiania>

<https://www.metropoles.com/brasil/enchente-no-rio-meia-ponte-alaga-residencias-em-goiania-veja-video>.

Ljung, G.M.; Box, G.E.P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, London, v.65, p.297-303, 1978.

Mapbiomas Brasil | Coleções Mapbiomas. Disponível em: em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acesso

Marôco, J. Análise estatística com o SPSSStatistics. [S.l.]: ReportNumber, Lda,

Medeiros, R.B. et al. Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Buriticupu, Maranhão-Brasil (2023).

Moriasi, DN, Arnold, JG, Van Liew, MW, Bingner, RL, Harmel, RD, & Veith, TL (2007). "Diretrizes de avaliação de modelos para quantificação sistemática de precisão em simulações de bacias hidrográficas." *Transações da ASABE* .

Nascimento, D. T. F.; Oliveira, I, J. de. Mapeamento do Crescimento Urbano de Goiânia-GO:1986 a 2010. In: seminário nacional das metrópolis,2010, Goiânia. Anais. Goiânia, 2010.

Rego, Thalyta Lopes; Barros, Juliana Ramalho. Alagamentos e inundações em Goiânia: uma análise a partir da imprensa local e dos registros da defesa civil. *Formação (Online)*, 2014, vol. 1, no 21.

Samad, Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Caracterização da Bacia do Meia Ponte. Goiânia. (2021).

Santos, Danniella Carvalho dos et al. Climatologia da pluviosidade na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. 2016.

Schwarz, G. Estimating the dimensional of a model. *Annals of Statistics*, Hayward, v.6, n.2, p.461-464, Mar. 1978.

Semiárido. Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas, INSA, UFRB. 2012.

Silva Júnior, Luiz Pereira da. *Soluções para instabilidade numérica em simulações em regime transitório no modelo HEC-RAS para canais de elevada declividade*. 2018. Tesis de Licenciatura.

Silva, Silvando Carlos da *et al et al*. Caracterização Climática do Estado de Goiás. Goiânia-Goiás: Governo de Goiás/Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração, 2006.

Sneyers, R. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Genève: Organisation Météorologique Mondiale, 1975. 192 p. (OMM Note Technique, 143).

Sneyers, R. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. [S.l.]: Secrétariat Statistical Mathematics, v.30, n.1 p.9-14, 1978.

Usace – Us Army Corps of Engineers. (2021) HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 6.0.

Veiga, A. *et al et al*. Caracterização hidromorfológica da bacia do rio Meia Ponte. Caminhos de geografia, v. 14, n. 46, p. 126-138, 2013.

Nascimento, Diego Tarley Ferreira; De Oliveira, Ivanilton José. análise da evolução do fenômeno de ilhas de calor no município de goiânia-GO (1986-2010). *Boletim goiano de geografia*, 2011, vol. 31, no 2, p. 113-127.

CAPÍTULO 4

4.1. CONCLUSÃO GERAL

Uma análise sobre o uso e ocupação individual na Região Metropolitana de Goiânia revela um panorama complexo, onde o rápido crescimento urbano, especialmente em áreas conurbadas, tem gerado pressão sobre os recursos naturais, levando à perda de cobertura vegetal nativa e à manipulação de áreas ambientalmente sensíveis, como as bacias hidrográficas e Áreas de Preservação Permanente (APPs). As transformações ocorridas entre 1985 e 2022, como a expressiva redução da vegetação nativa e o aumento substancial da urbanização, demonstram a necessidade urgente de políticas de planejamento e gestão territorial mais eficazes.

A vulnerabilidade ambiental da região está fortemente associada à ocupação desordenada, o que impacta diretamente os recursos hídricos e a biodiversidade. Nesse sentido, a preservação de áreas de Cerrado e a proteção dos mananciais são ações essenciais para mitigar os efeitos negativos da urbanização e garantir a sustentabilidade ambiental. A implementação de um desenvolvimento sustentável na RMG requer o equilíbrio entre as atividades econômicas, como a agropecuária, e a conservação ambiental, sobretudo em áreas de grande relevância ecológica.

Conclui-se, portanto, que o futuro sustentável da RMG depende de uma ação coordenada entre o poder público, a sociedade civil e o setor privado, com a adoção de práticas sustentáveis, a criação de políticas ambientais rigorosas e a promoção de um modelo de ocupação do solo que considera tanto as necessidades de desenvolvimento quanto a preservação dos recursos naturais.

ANEXOS



Anexo nº 1: Barco usado para levantamento batimétrico



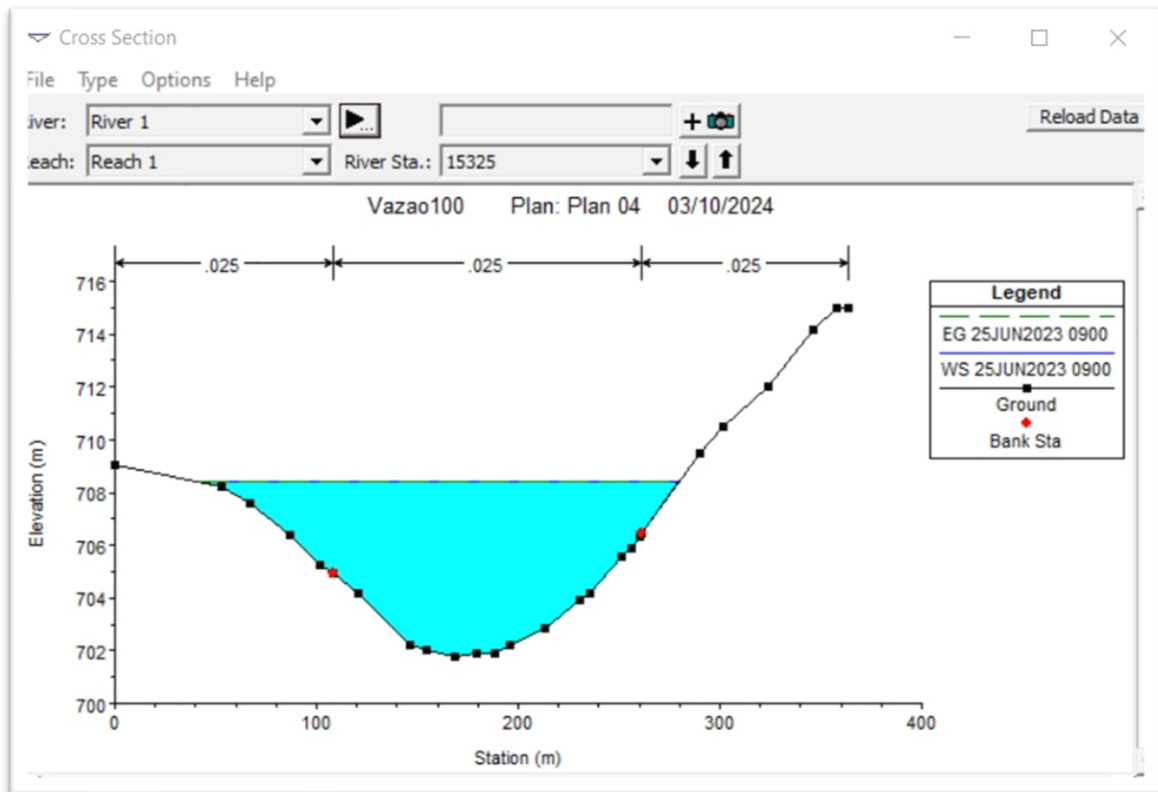
Anexo nº2: Bacia hidrográfica do Meia Ponte.



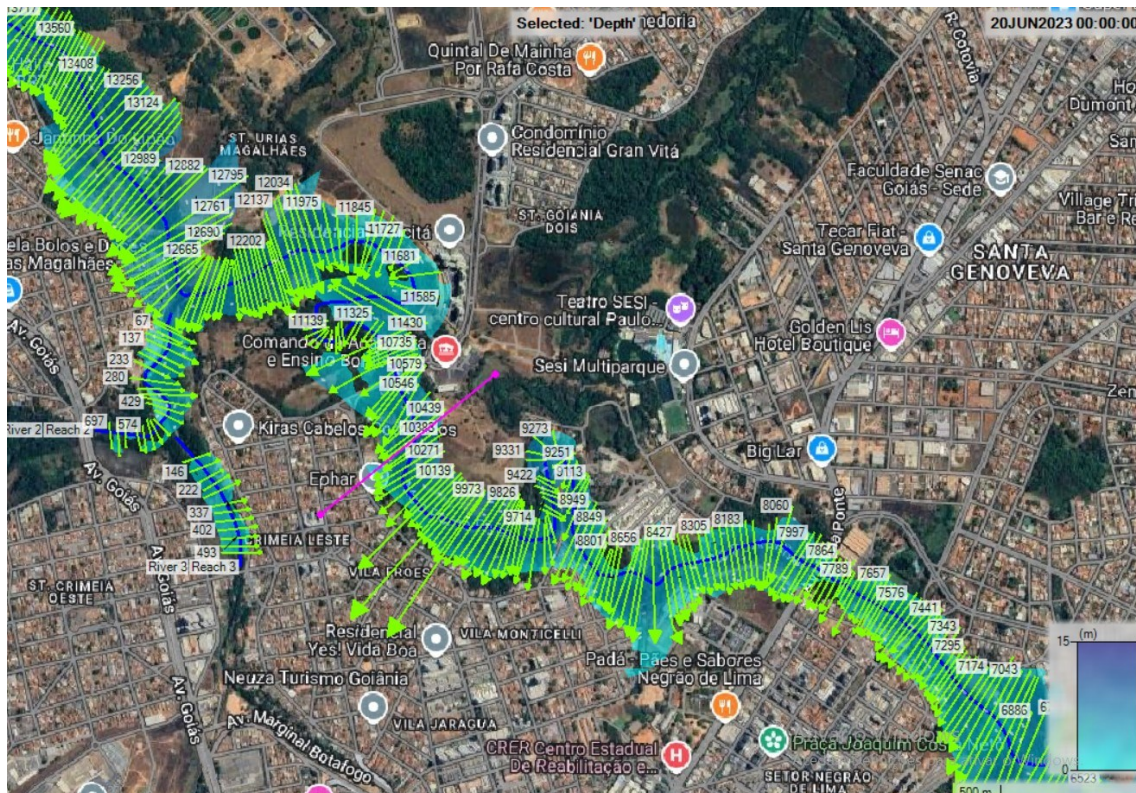
Anexo nº3: Matéria de construção civil em volta da bacia



Anexo nº4: Acesso a uma das margens da bacia



Anexo nº7: Elevação do nível da água numa secção do rio



Anexo nº 8: Batimetria

KPSS Test for Level Stationarity

```
data: chuva.ts
KPSS Level = 0.35873, Truncation lag parameter = 3, p-value = 0.09494
```

Anexo nº9: Teste KPSS

```
Series: chuva.ts.diff
ARIMA(1,1,1)

Coefficients:
      ar1      ma1
    0.4672 -0.9380
s.e. 0.2021 0.1261

sigma^2 = 58510: log likelihood = -227.51
AIC=461.03  AICc=461.86  BIC=465.52

Training set error measures:
              ME      RMSE      MAE      MPE      MAPE      MASE      ACF1
Training set 20.5379 230.9708 167.513 -2.679885 16.85953 0.7798559 0.002933699
```

Anexo nº10: Avaliação do modelo na base de AIC e BIC