



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Claudia Moura Aragão

Caracterização Hidrológica para projetos de drenagem na cidade de Assú/RN

ANGICOS

2025

Claudia Moura Aragão

Caracterização hidrológica para projetos de drenagem na cidade de Assú/RN

Trabalho Final de Graduação apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Nogueira de
Sousa Neto

ANGICOS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A659 Aragão , Claudia Moura .
c CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA PARA PROJETOS DE
 DRENAGEM NA CIDADE DE ASSÚ/RN / Claudia Moura
 Aragão . - 2025.
 71 f. : il.

 Orientador: Osvaldo Nogueira de Sousa Neto.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

 1. drenagem . 2. Assu/RN. 3. Chuvas intensas.
4. hidrologia.. 5. Urbanização. I. Neto, Osvaldo
Nogueira de Sousa, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Claudia Moura Aragão

Caracterização hidrológica para projetos de drenagem na cidade de Assú/RN

Trabalho Final de Graduação apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 05 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Osvaldo Nogueira de Sousa Neto
Presidente

Prof. Dr. Luis Henrique Gonçalves Costa
Membro Examinador

Prof. Me. Andrea Saraiva de Oliveira
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho representa mais do que a finalização de um curso; é a soma de esforços, afetos, incentivos e aprendizagem compartilhados ao longo de uma jornada que foi, ao mesmo tempo, desafiadora e transformadora.

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a direção com fé, coragem e sabedoria em cada passo desta caminhada. À minha família, meu alicerce em todos os momentos, especialmente aos meus pais, Claudio e Elismar, meus irmãos Eduardo, Marcelo e Cleyta, que sempre estiveram presentes, me apoiando com amor. A minha sobrinha Malu, que com sua alegria me inspira e ilumina meus dias.

Ao meu namorado Pedro Lucas, um dos meus maiores incentivadores, meu parceiro de vida e de sonhos. Seu apoio constante, sua paciência e seu carinho incondicional foram fundamentais nos momentos em que decidi em desistir. Obrigada por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava.

Ao meu orientador, professor Osvaldo, por sua orientação, paciência e dedicação durante todo o desenvolvimento do TFG. Sua contribuição foi fundamental para que este trabalho alcançasse o rigor técnico necessário.

Aos meus amigos Jéfferson, Andreza, Eike e Eluiza, que com carinho, compreensão e palavras de incentivo trouxeram os dias mais leves e me ajudaram a manter a esperança e o foco. Vocês foram essenciais.

Aos colegas da Empresa Júnior Consolida, que mesmo de forma indireta desenvolvi com aprendizados, troca de experiências e apoio técnico que enriqueceram este trabalho. A convivência com vocês ampliou minha visão profissional e colaborou silenciosamente com cada etapa desta jornada.

E por fim, uma dedicatória especial e póstuma à minha tia Maria Júlia. Com sua simplicidade e generosidade, esteve ao meu lado em todos os momentos importantes da minha vida. Na pequenez do seu jeito, habitou uma grandeza de amor e apoio que levo para sempre comigo. Este trabalho também é para ela.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, meu mais sincero e profundo agradecimento.

"Estudar não é consumir ideias, mas criá-las e recriá-las."

Paulo Freire.

RESUMO

A urbanização acelerada em Assú/RN, uma região semiárida, tem gerado desafios na gestão hídrica devido à ocupação do solo sem critérios técnicos de drenagem. Este estudo de TFG teve como objetivo realizar uma caracterização hidrológica das sub-bacias urbanas da cidade, utilizando parâmetros físicos, climáticos e geomorfológicos, para servir de base para o dimensionamento de sistemas de drenagem. A metodologia empregada envolveu o uso de métodos como o SCS-CN, a equação IDF (Intensidade-Duração-Frequência), análises morfométricas e modelagens em SIG, além de softwares como o HEC-HMS e HIDRO 1.4. Com a análise de dados de chuvas históricas de 1990 a 2019, o trabalho delimitou três sub-bacias urbanas e calculou os tempos de concentração e hidrogramas de projeto para diferentes períodos de retorno. Os resultados da pesquisa, que incluem a delimitação das sub-bacias e a elaboração de uma equação IDF específica para a região, demonstraram a influência do uso e da cobertura do solo na resposta hidrológica. Isso permitiu identificar áreas mais vulneráveis a inundações. O estudo conclui que dados atualizados e modelagens específicas são essenciais no planejamento urbano para a criação de estratégias técnicas que reduzam os riscos e garantam projetos hídricos eficazes em Assú.

Palavras-chave: Urbanização.hidrologia.drenagem.Assú/RN.projeto.

ABSTRACT

Accelerated urbanization in Assú/RN, a semi-arid region, has created challenges for water management due to land occupation without technical drainage criteria. This final project study aimed to perform a hydrological characterization of the city's urban sub-basins, using physical, climatic, and geomorphological parameters to serve as a basis for sizing drainage systems. The methodology employed involved methods such as SCS-CN, the IDF (Intensity-Duration-Frequency) equation, morphometric analyses, and modeling in GIS, as well as software like HEC-HMS and HIDRO 1.4. By analyzing historical rainfall data from 1990 to 2019, the study delimited three urban sub-basins and calculated concentration times and design hydrographs for different return periods. The research results, which include the delimitation of the sub-basins and the elaboration of a specific IDF equation for the region, demonstrated the influence of land use and cover on the hydrological response. This allowed for the identification of areas more vulnerable to flooding. The study concludes that updated data and specific modeling are essential for urban planning to create technical strategies that reduce risks and ensure effective water projects in Assú.

Keywords: Urbanization.hydrology.drainage.Assú/RN.projects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Relevo e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio piancó-piranhas-açu	22
Figura 2	– Classificação climática dos municípios do Rio Grande do Norte	25
Figura 3	– Curva IDF (Intensidade - Duração – Frequência).....	28
Figura 4	– Apresentação dos dados pluviométricos	27
Figura 5	– Fluxograma de execução da geração dos parâmetros para a caracterização hidrológica para projetos de drenagem	36
Figura 6	– Mapa de localização de Assu-RN	37
Figura 7	– O processo de delimitação das sub bacias dentro de Assu	40
Figura 8	– Dados morfológicos obtidos pelo HEC-HMS	41
Figura 9	– Dados obtidos pelo ARCGIS	41
Figura 10	– Dados pluviometricos Agencia Nacional de Aguas.....	43
Figura 11	– Processamento de dados no excel	44
Figura 12	– Interface do softword HIDROWEB	44
Figura 13	– Interface do Softword GAM-IDF	45
Figura 14	– Procedimento para estimar a precipitação máxima e a construção dos Hietogramas	46
Figura 15	– Cálculo da precipitação efetiva pelo método SCS	47
Figura 16	– Determinação do Hidrograma Triangular Unitário do SCS	47
Figura 17	– Determinação do Hidrograma de Projeto (Método de Convolução).....	48
Figura 18	– Delimitação das Sub- bacias de Assu-RN.....	49
Figura 19	– Representação de curva IDF de 30 anos, com os dados de 1991 até 2019	50
Figura 20	– Hidrograma 10 anos da bacia 1,1985	51
Figura 21	– Hidrograma 50 anos da bacia 1,1985	52
Figura 22	– Hidrograma 100 anos da bacia 1,1985	52
Figura 23	– Hidrograma 10 anos da bacia 1,2022	53
Figura 24	– Hidrograma 50 anos da bacia 1,2022	53
Figura 25	– Hidrograma 100 anos da bacia 1,2022	54
Figura 26	– Hidrograma 10 anos da bacia 2,1985	55

Figura 27	– Hidrograma 50 anos da bacia 2,1985	55
Figura 28	– Hidrograma 100 anos da bacia 2,1985	55
Figura 29	– Hidrograma 10 anos da bacia 2,2022	56
Figura 30	– Hidrograma 50 anos da bacia 2,2022.....	56
Figura 31	– Hidrograma 100 anos da bacia 2,2022	57
Figura 32	– Hidrograma 10 anos da bacia 3,1985	57
Figura 33	– Hidrograma 50 anos da bacia 3,1985	58
Figura 34	– Hidrograma 100 anos da bacia 3,1985	58
Figura 35	– Hidrograma 10 anos da bacia 3,2022	59
Figura 36	– Hidrograma 50 anos da bacia 3,2022	59
Figura 37	– Hidrograma 100 anos da bacia 3,2022	59
Figura 38	– O mapa de bairros atingidos pelas sub-bacias	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	– Fórmula geral de IDF.....	25
Equação 2	– Equação empírica SCS - CN	28
Equação 3	– Variações da equação SCS	28
Equação 4	– Equação de CNI	30
Equação 5	– Equação de CNII	30
Equação 6	– Equação de volume gerado por um HU.....	30
Equação 7	– Equação de Kirpich	33
Equação 8	– Equação NRCS/SCS.....	34
Equação 9	– Equação de Giandotti.....	34
Equação 10	– Equação de Ventura	34
Equação 11	– Equação de Dooley & Floyd	34
Equação 12	– Equação de Carter	34
Equação 13	– Equação de IDF para Assú	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Tipos de Solos encontrados na Região de Assú	21
Tabela 2	–	Os principais parâmetros morfométricos	50
Tabela 3	–	Valores de CN para os anos de 1985 e 2022	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ArcGIS - Arc Geographic Information System

CBH-PPA - Comitê da Bacia Hidrográfica do Piancó-Piranhas-Açu

CN - Curve Number

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CUT - Cobertura e Uso do Terreno

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

GAM-IDF - Aplicativo web de Geração Automática de Modelos IDF

HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System

HIDRO 1.4 - Software para análise estatística de chuvas

HU - Hidrograma Unitário

HUS - Hidrograma Unitário Sintético

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INSA - Instituto Nacional do Semiárido

QGIS - Quantum Geographic Information System

NRCS - Natural Resources Conservation Service (antigo SCS)

SCS-CN - Soil Conservation Service - Curve Number

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

Tc - Tempo de Concentração

USDA - United States Department of Agriculture

AMC - Antecedent Moisture Condition (Condição de Umidade Antecedente)

IDF - Intensidade - Duração – Frequência

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Objetivos.....	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2.REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.2. Aspectos hídricos e geológicos de Assú.....	18
2.3. Dados de Precipitação e Determinação de Chuvas Intensas (Equação IDF)	24
2.4. Características Morfométricas.....	31
2.5. Tempo de Concentração.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1. Área de Estudo	36
3.2. Materiais Utilizados	38
3.3. Procedimentos Metodológicos	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica	48
4.2. Análise Morfométrica	49
4.3. Estimativa de Chuvas Intensas (Equação IDF)	50
4.4. Cálculo do Tempo de Concentração.	51
4.4.2. Hidrogramas de projeto	52
4.5. Uso do Solo e Cobertura Vegetal.....	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos em regiões semiáridas exige um entendimento aprofundado das características hidrológicas locais, especialmente em áreas urbanas sujeitas a eventos extremos, como enchentes e longos períodos de estiagem. No semiárido nordestino, esses desafios se intensificam devido à irregularidade das chuvas e às limitações naturais de infiltração e armazenamento de água (Villela e Mattos, 1975). A cidade de Assú, localizada na região do Vale do Açu, no Rio Grande do Norte, representa um caso emblemático desses contrastes, combinando uma concentração urbana significativa com vulnerabilidades ambientais, principalmente associadas à drenagem deficiente e à ocupação desordenada do solo.

Estudos como os de Medeiros (2018) destacam que a urbanização acelerada de Assú ocorreu muitas vezes sem o devido planejamento territorial, o que agravou a ocorrência de alagamentos em áreas densamente povoadas, especialmente durante eventos de chuvas intensas. A falta de infraestrutura de transporte adequada e a impermeabilização progressiva do solo têm comprometido o escoamento natural das águas pluviais, aumentando os riscos hidrológicos para a população urbana e ribeirinha.

Além disso, Tucci (2008) afirma que o planejamento urbano em regiões semiáridas deve necessariamente considerar a variabilidade espacial e temporal das chuvas, bem como os parâmetros hidrológicos que influenciam a geração de escoamento, como o tempo de concentração, uso e ocupação do solo, e as propriedades dos solos locais. Contudo, a ausência de dados sistematizados e análises hidrológicas aplicadas à escala urbana dificulta o dimensionamento preciso das redes de decisão, limitando a eficácia das soluções adotadas.

A relevância deste estudo reside na possibilidade de subsidiar políticas públicas e projetos de infraestrutura hídrica urbana mais positivas, contribuindo não apenas para a redução dos riscos associados às inundações, mas também para o uso racional dos recursos hídricos em uma das regiões mais desafiadoras do país sob o ponto de vista climático e ambiental. Conforme Tucci (2009), a mitigação dos riscos de inundação deve ser integrada ao ordenamento do território e ao controle da expansão urbana, especialmente em áreas propensas aos extremos hidrológicos.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo principal caracterizar as hidrológicas da bacia urbana de Assú, fornecendo subsídios técnicos para o dimensionamento de sistemas de drenagem. Além disso, busca analisar as condições pluviométricas históricas,

estimar equações de chuvas intensas (IDF), aplicar métodos de cálculo de escoamento como o SCS-CN, e avaliar o impacto das características físicas do solo e da cobertura vegetal sobre o comportamento hidrológico da região.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

- Caracterização hidrológica de sub-bacias urbanas no município de Assú/RN.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar e caracterizar drenagem da região;
- Analisar a consistência da série de dados pluviométricos;
- Elaborar a equação da chuva intensa para a região de Assú;
- Elaborar hidrogramas de projeto com base em diferentes tempos de retorno.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A análise hidrológica é fundamental para um planejamento eficaz de sistemas de drenagem, particularmente em áreas de clima semiárido como o Vale do Açu, no Rio Grande do Norte, onde as precipitações são escassas e intensas. A dinâmica hidrológica das bacias da região é influenciada por uma variedade de elementos físicos e climáticos, sendo crucial entender a interação entre precipitação, escoamento superficial, infiltração e tempo de concentração.

2.1. Conceitos de hidrologia

O ciclo hidrológico, em escala global, corresponde a um processo contínuo de movimentação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera. Essa dinâmica é impulsionada por fatores como a radiação solar, a força gravitacional e o movimento de rotação da Terra. Embora o sistema seja considerado fechado globalmente — pois a quantidade total de água permanece constante — ele é aberto em nível regional, uma vez que a água evaporada em determinada área pode se precipitar em locais diferentes. Essa variação espacial está associada a diversos elementos, como a distribuição da vegetação, as características do solo, a intensidade da radiação solar e os deslocamentos atmosféricos. A transferência da água da superfície para a atmosfera ocorre principalmente por meio da evaporação (Da Silveira, 2001).

O ciclo hidrológico tem início com a ação da radiação solar, que aquece a superfície da Terra, incluindo corpos d'água, o solo e o ar. Esse aquecimento promove a evaporação da água presente na superfície e também a evapotranspiração, processo pelo qual a água do solo é distribuída para a atmosfera pelas plantas. O vapor d'água gerado é transportado pelas correntes de ar, sob determinadas condições atmosféricas, condensadas, originando nuvens que podem resultar em precipitações. A água que retorna à superfície pode infiltrar-se no solo ou escoar sobre ele até alcançar rios e lagos. A porção infiltrada pode saturar o solo, recarregar os aquíferos densos e alimentar o fluxo hídrico subsuperficial. (Collischonn e Dornelles, 2013).

Apesar de o ciclo hidrológico ser geralmente representado como um processo contínuo uniforme, a realidade é muito mais complexa e imprevisível. A movimentação da água nas diferentes fases do ciclo ocorre de forma irregular, variando significativamente de acordo com o tempo e o espaço. Em determinadas situações, por exemplo, podem ocorrer chuvas intensas que excedem a capacidade de absorção do solo e de escoamento dos rios, resultando em alagamentos e enchentes. Em contrapartida, há períodos em que praticamente não há ocorrência, o que pode transmitir a falsa impressão de que o ciclo natural da água foi interrompido. (Villela e Mattos, 1975)

2.2. Aspectos hídricos e geológicos de Assú

O município de Assú, localizado no Oeste Potiguar, insere-se no baixo curso da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas–Açu, sistema hídrico interestadual que abrange áreas da Paraíba e do Rio Grande do Norte, com área total de aproximadamente 43.681 km² (ANA, 2023). O Rio Piranhas, que nasce na Serra do Piancó (PB), recebe a denominação de Rio Açu ao adentrar o território potiguar, possuindo regime perene, porém fortemente condicionado pela sazonalidade climática semiárida e pelo controle de vazões exercido por reservatórios estratégicos, como a Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, localizada entre os municípios de Assú, Itajá e São Rafael, cuja capacidade total de acumulação é de cerca de 2,4 bilhões de m³ (DNOCS, 2021). Este reservatório, o maior do estado, desempenha papel fundamental no abastecimento humano e industrial, na irrigação agrícola e na regulação de cheias, configurando-se como elemento-chave para a segurança hídrica regional, em um contexto de precipitação anual média entre 500 e 700 mm e elevada evapotranspiração potencial (Medeiros et al., 2020).

A cidade de Assú está inserida na Bacia Potiguar, caracterizada por espessas sequências sedimentares de idade cretácea, além da presença de afloramentos de rochas cristalinas nas áreas mais elevadas da região” (Pfaltzgraff e Torres, 2010, p. 113).

A cidade de Assú, situada na região semiárida do Rio Grande do Norte, possui uma diversidade complexa e representativa de solos, resultante da interação entre a geologia sedimentar da Formação Açu, a topografia levemente ondulada e o clima semiárido, caracterizado por chuvas concentradas em poucos meses do ano. Entre os principais tipos de solos encontrados na região, destacam-se os Luvisolos, os Neossolos Flúvicos, e Gleissolos, os Latossolos Vermelho-Amarelos e, em menor quantidade, os Argissolos Vermelhos (Silva Neto *et al.*, 2012) e (Santos *et al.*, 2018).

Os Luvisolos Crômicos predominam em áreas com relevo mais plano, apresentando boa fertilidade natural, profundidade moderada a alta e textura argilosa, o que os torna apropriados para a agricultura e irrigação, especialmente nas áreas dedicadas à fruticultura irrigada do Vale do Açu. Os Neossolos Flúvicos, comuns nas planícies aluviais do rio Piranhas-Açu, possuem baixa evolução pedogenética e boa capacidade de retenção de água, embora sejam vulneráveis a saturação e inundações sazonais. Em contraste, os Gleissolos Sálcos, localizados nas várzeas e nas margens de corpos d’água intermitentes, são solos hidromórficos com drenagem inadequada e elevados teores de sódio trocável, o que limita seu uso agrícola intensivo (EMBRAPA, 2006; IDEMA, 2002).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos, com textura média e fertilidade natural reduzida, encontram-se em áreas de tabuleiros mais altos, enquanto os Argissolos Vermelhos aparecem em regiões com leve inclinação e variação textural entre diferentes camadas. Essa variedade de tipos de solo tem um impacto significativo no escoamento superficial, na infiltração e no comportamento hidrológico da bacia urbana de Assú, sendo crucial para determinar o uso do solo, o planejamento da drenagem e a estimativa do curve number (CN) em métodos hidrológicos como o SCS-CN (Silva *et al.*, 2020).

Na Tabela 1 pode-se observar os principais tipos de solos identificados na região de Assu, no estado do Rio Grande do Norte, incluindo suas características físicas e químicas, bem como observações sobre uso e manejo agrícola. Entre os solos listados estão Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Litólicos, Planossolos, Luvissolos Crômicos e Argissolos. As informações consideram atributos como textura, profundidade, fertilidade natural e exigências específicas de manejo. Esta classificação segue os levantamentos realizados pela EMBRAPA (1968; 1973) e pelas análises ambientais apresentadas no Caderno de Caracterização do Estado do RN, elaborado pela CODEVASF/IDE-RN (2021).

Tabela 1: Tipos de solos encontrados na Região de Assú

Tipo de solos	Características
Neossolos Quartzarênicos	Arenoso, jovens, baixa fertilidade; uso agrícola limitado;
Neossolos Litólicos	Rasos sobre rocha, baixa fertilidade; restritos à pastagem;
Planossolos	Camada compacta; precisam de drenagem para cultivo;
Luvissolos Crômicos	Argilosos, férteis; bom potencial com conservação;
Argissolos (Vermelhos e Amarelos)	Desenvolvidos, variados usos com manejo adequado.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1968, 1973) e CODEVASF/IDE-RN (2021).

A dinâmica de ocupação de Assú foi intensamente influenciada pela construção da Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, no início da década de 1980. Essa obra alterou significativamente o regime hidrológico da região, viabilizando projetos de irrigação em larga escala. Segundo Ramalho (2009), a construção da barragem promoveu a perenização

do rio a jusante, atraindo atividades agroindustriais e intensificando a pressão sobre os recursos naturais.

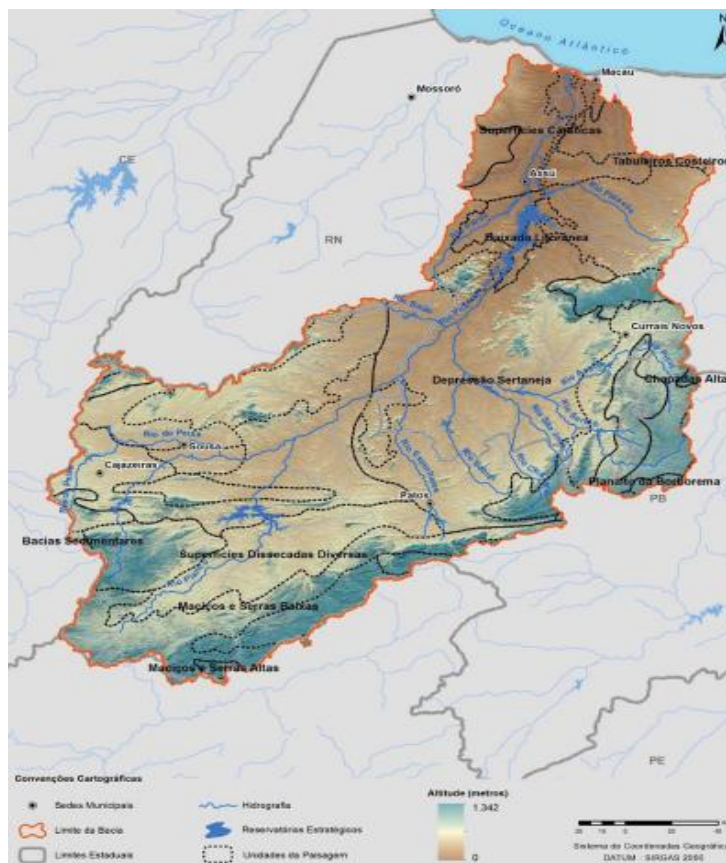
Historicamente, a ocupação se deu nas planícies fluviais, em áreas naturalmente suscetíveis a inundações. Conforme DNOCS (2012), “a sistemática de ocupação territorial margeando o curso dos rios principais formam os núcleos das cidades contemporâneas, hoje vulneráveis em face da ocorrência de eventos extremos de Assú e cidade vizinhas”.

A caracterização morfométrica dessas bacias é fundamental para a compreensão dos processos hidrológicos, permitindo o cálculo de parâmetros como área de drenagem, densidade de drenagem, fator de forma e coeficiente de compacidade. Tais parâmetros influenciam diretamente na geração de escoamento e na velocidade de propagação das ondas de cheia (Chow *et al.*, 1994) e (Mota *et al.*, 2017).

Geologicamente, o Baixo-Açu está inserido na Bacia Potiguar, composta por formações sedimentares recentes, como arenitos e calcários do Grupo Barreiras, altamente porosos e favoráveis à infiltração. Tais formações abrigam os aquíferos Açu e Jandaíra, que, conforme a CPRM (2006), representam as maiores reservas subterrâneas do estado e podem contribuir diretamente para a vazão do rio Piranhas-Açu em determinados trechos.

O mapa (figura 1) é a relação com relevo e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Piranhas-açu, o mapa representa o segmento da bacia hídrica e com a altimetria do relevo da região que está situado.

Figura 1 - Relevo e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio piancó-piranhas-açu



Fonte: Agência Nacional de Águas - ANA (2018)

Entretanto, a vulnerabilidade geológica está associada ao risco de contaminação por agrotóxicos e esgotos, dado que os calcários são altamente permeáveis. A retirada da vegetação ciliar acentuou a instabilidade das margens e o assoreamento dos canais, o que contribuiu para o alargamento do leito e agravamento das inundações, conforme Tucci (2009), que destaca a impossibilidade de eliminar completamente os riscos, mas a necessidade de mitigá-los por meio do ordenamento territorial.

2.2.1. Clima e Regime Pluviométrico

A bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, uma grande bacia hídrica que atravessa os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, estende-se por uma vasta área de aproximadamente 43.682 km². Desse total, uma porção significativa, cerca de 60%, encontra-se em solo paraibano, enquanto os 40% permanecem pertencentes ao território potiguar (CBH-PPA, 2022). Sua abrangência territorial é notável, englobando um total de 147 municípios, o que se consolida como um pilar estratégico fundamental para o abastecimento humano, tanto direto quanto indireto, e para a multiplicidade de usos da água na desafiadora região semiárida do Nordeste brasileiro (ANA, 2015).

A espinha dorsal do sistema fluvial, a rede de transporte principal, tem seu berço na imponente Serra do Piancó, no estado da Paraíba. Inicialmente, este curso d'água é conhecido como rio Piranhas, desdobrando seu curso até encontrar o complexo de reservatórios de Coremas–Mãe d'Água. A partir deste ponto crucial, o rio assume a denominação de rio Piranhas–Açu, prosseguindo sua jornada até desaguar majestosamente no Oceano Atlântico, precisamente no município de Macau, no Rio Grande do Norte (CBH-PPA, 2022).

O clima que molda a bacia é caracterizado como semiárido, classificado sob o sistema de Köppen-Geiger como BSh. Este clima impõe um regime pluviométrico específico, com a maior parte das precipitações técnicas nos meses de fevereiro a maio, seguido por longos e intensos períodos de estiagem que se estendem pelo restante do ano. Dados do Instituto Nacional do Semiárido (INSA, 2016) indicam que as médias anuais de opções variam entre 400 mm e 800 mm, podendo atingir até 900 mm em áreas de maior altitude na Paraíba. No setor norte da bacia, que abrange o Rio Grande do Norte, as chuvas tendem a oscilar entre 450 mm e 600 mm anualmente (INSA, 2016; ANA, 2015).

Uma análise aprofundada dos dados pluviométricos, conduzida por Ferreira et al. (2018), revelou uma média histórica regional de variação de 247 mm/ano no período de 1970 a 2015. Esta média, no entanto, é marcada por uma acentuada variabilidade tanto entre os anos (interanual) quanto entre as diferentes localidades (espacial). A mesma pesquisa segmentou a bacia em quatro sub-regiões, identificando padrões de comportamento da chuva e constatando a ocorrência de eventos extremos, com precipitações que superaram 49 mm a 54 mm em um único dia, em intervalos de retorno de aproximadamente 10 anos (Ferreira *et al.*, 2018).

Do ponto de vista hídrico, a bacia hidrográfica do Piranhas-Açu enfrenta um cenário de déficit hídrico previsto. Este desequilíbrio é agravado pelas elevadas taxas de evaporação, que superam significativamente a quantidade de água que retorna ao sistema. O Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS, 2020) aponta que a evaporação média anual na região pode atingir a marca de 2.300 mm, enquanto a evapotranspiração potencial, que representa a perda de água do solo e das plantas para a atmosfera, varia entre 1.620 mm e 1.780 mm, dependendo da metodologia de cálculo empregada, como os modelos de Hargreaves e Penman-Monteith.

Para mitigar esse desequilíbrio hídrico, a bacia está equipada com uma infraestrutura robusta de grandes reservatórios de regularização. Dentre eles, destacam-se dois empreendimentos de grande porte:

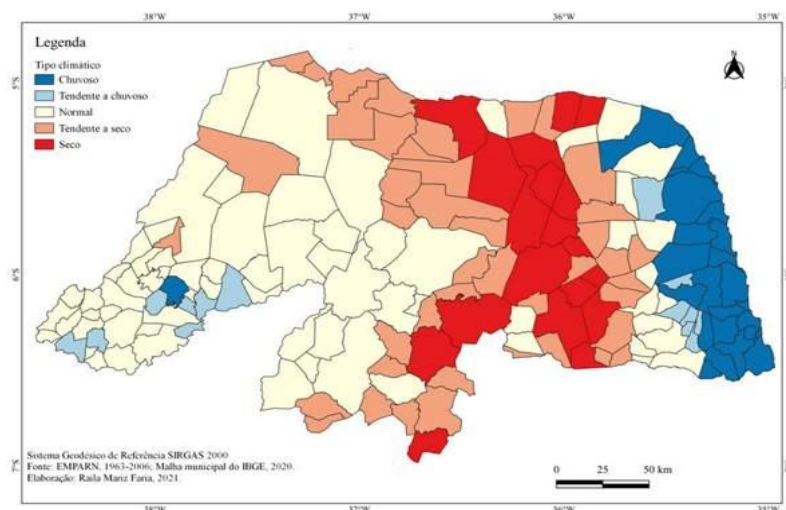
- **Coremas–Mãe d'Água** : Localizado no estado da Paraíba, este sistema possui uma capacidade de armazenamento impressionante de aproximadamente 1,36 bilhão de metros cúbicos (m³).
- **Armando Ribeiro Gonçalves** : Situado no Rio Grande do Norte, este reservatório contém um volume útil de 2,4 bilhões de metros cúbicos (m³) (DNOCS, 2020; ANA, 2015).

A conjugação desses dois grandes reservatórios, que formam o que é conhecido como Sistema Curema–Açu, desempenha um papel vital na regulação do fluxo do rio. Eles garantem a oferta contínua de água e, crucialmente, permitem a perenização de trechos do leito fluvial, especialmente na porção mais baixa da bacia, garantindo a disponibilidade hídrica onde ela é mais escassa (CBH-PPA, 2022).

Em suma, a bacia do rio Piranhas–Açu se configura como uma unidade hidrológica de extrema relevância no contexto do semiárido nordestino. Sua importância transcende a sua expressiva dimensão territorial, consolidando-se como um elemento estratégico indispensável para o abastecimento humano e para a gestão e o controle da variabilidade hídrica inerente a esta região semiárida.

Segundo o mapa (figura 2) elaborado por Luna lucena et al. (2024), com base em dados da EMPARN entre 1963 e 2016, o município de Assú apresenta clima classificado como "normal", estando inserido em uma faixa de transição entre áreas mais úmidas e áreas semiáridas.

Figura 2 - Classificação climática dos municípios do Rio Grande do Norte



Fonte: Luna Lucena *et al.* (2024), Revista Geográfica De América Central..

Os dados pluviométricos e as informações relacionadas à situação hídrica das sub-bacias do rio Piranhas-Açu foram obtidos a partir dos bancos de dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA).

2.3. Dados de Precipitação e Determinação de Chuvas Intensas (Equação IDF)

A previsão de chuvas intensas é crucial para o planejamento de sistemas de escoamento. A fórmula IDF (Intensidade - Duração - Frequência) é um instrumento tradicional usado para ilustrar a conexão entre a intensidade da chuva, seu período de duração e o período de retorno correlato. Sua forma geral pela equação 1:

$$i = \frac{a}{(t+b)^c} \quad (1)$$

onde:

- i é a intensidade da chuva (mm/h);
- t é a duração (min);
- a , b , e c são parâmetros empíricos obtidos a partir de dados pluviométricos históricos.

A área do Vale do Açu possui séries temporais com defeitos e flutuações, necessitando de um tratamento estatístico metucioso para a criação das curvas IDF. Essas curvas são essenciais para estabelecer fluxos de projeto e estabelecer estratégias de controle do escoamento superficial em zonas urbanas e rurais (Souza *et al.*, 2018).

2.3.1. Elaboração de uma equação IDF

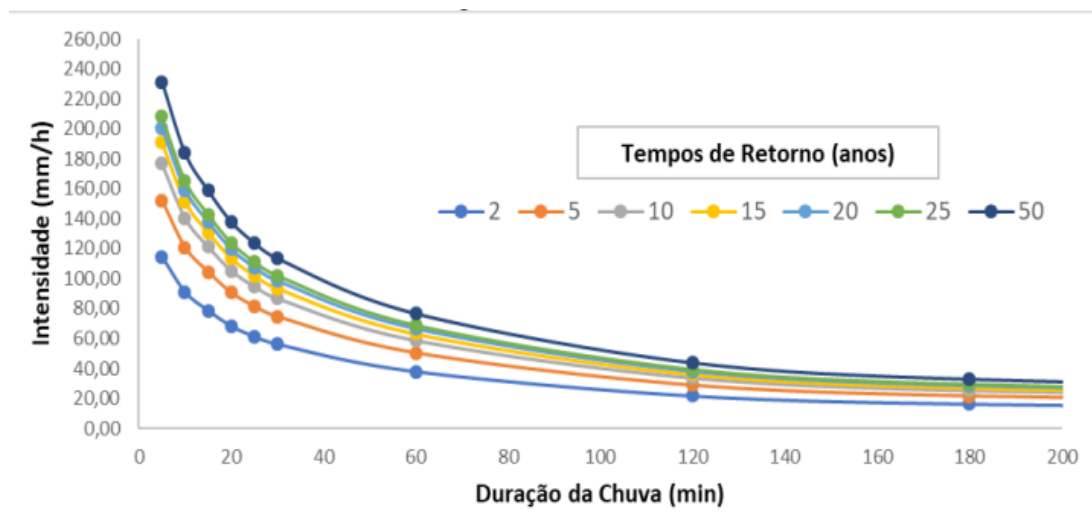
Para a elaboração da equação IDF é necessário de um estudo de dados pluviométricos da região, isso coletando dados de estações pluviométricas. Construção da equação IDF começa com a coleta de dados históricos de precipitação, representando os eventos pluviométricos máximos em uma série temporal anual. Idealmente, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2009), utiliza-se um período mínimo de dados contínuos de 20 a 30 anos. Esses dados devem abranger vários períodos, como 5, 10, 15, 30, 60 minutos, 1, 2, 6 e 24 horas, dependendo da frequência de amostragem da estação. Uma vez coletados, os dados são organizados e verificados quanto à consistência para identificar erros, omissões ou valores atípicos que devem ser corrigidos ou removidos para evitar a degradação dos resultados estatísticos.

A etapa seguinte consiste na análise de frequência estatística, na qual se ajusta uma distribuição de probabilidade adequada aos eventos máximos anuais de chuva para cada duração considerada. A distribuição de Gumbel é frequentemente adotada, pois apresenta bom desempenho na modelagem de eventos extremos (Chow *et al.*, 1994), embora outras distribuições como Log-Normal, Weibull ou Pearson Tipo III possam ser utilizadas dependendo das características da série. A partir desse ajuste, estimam-se os valores de precipitação esperados para diferentes períodos de retorno (T), geralmente de 2 a 100 anos, que correspondem à probabilidade de ocorrência de determinado evento em um ano qualquer.

Os parâmetros da equação variam com o período de retorno e são obtidos com o auxílio de métodos computacionais, como o ajuste por mínimos quadrados ou modelos de otimização. Para alguns estudos, também se utiliza a versão logarítmica da equação IDF para melhor ajuste em escalas longas de tempo. A validação da equação é uma etapa crucial, que envolve comparar os valores estimados com os observados e analisar o erro médio, o coeficiente de determinação (R^2) e outros indicadores estatísticos de desempenho (MOTA *et al.*, 2017).

A equação IDF possibilita a elaboração de curvas IDF como a figura 3 mostra, que sintetizam graficamente o comportamento das chuvas extremas para diferentes durações e frequências. Essas curvas representam um dos insumos mais importantes em projetos hidrológicos, pois permitem dimensionar obras considerando a magnitude das chuvas esperadas para cada situação. Contudo, é importante ressaltar que as equações IDF são válidas apenas para a área onde os dados foram coletados e para o período em que o regime pluviométrico foi analisado. Com o avanço das mudanças climáticas, torna-se cada vez mais necessário revisar e atualizar essas equações com base em séries recentes e ampliar os estudos para modelagem de chuvas sob cenários futuros (Santos *et al.*, 2020).

Figura 3 - Curva IDF (Intensidade - Duração – Frequência)



Fonte: LANA, 2018, p. 15.

2.3.2. Escoamento Superficial e Métodos de Estimativa.

A ocorrência de escoamento superficial acontece quando a quantidade de chuva ultrapassa a capacidade de infiltração do solo. Para sua mensuração, existem várias técnicas disponíveis, com destaque o Natural Resources Conservation Service NRCS (antigo SCS – Soil Conservation Service).

O método SCS-CN é comumente empregado para estimar o escoamento direto de eventos de precipitação. Desenvolvido pelo USDA na década de 1950 e descrito no Manual de Engenharia Nacional – Parte 630 (USDA, 2004), é baseado em uma equação 2 é empírica que relaciona a precipitação efetiva à geração de escoamento:

$$Q = \frac{((P - 0,2S)^2)}{(P + 0,8S)} \quad (2)$$

Aplicação da equação 4 é quando $P > 0,2S$, caso contrário $Q = 0$ e:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Onde:

- Q: escoamento direto (mm);
- P: precipitação total (mm);
- S: armazenamento potencial máximo (mm);
- CN: Curve Number.

Esse método é amplamente aplicado em regiões com dados limitados e permite análises integradas com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para avaliação espacial do escoamento (TUCCI, 2008).

2.3.3. Estimativa do Valor CN

O CN (Número de Curva) adimensional varia de 30 (infiltração muito alta) a 100 (impermeável), dependendo de três elementos chave: (i) Grupo de solo geográfico (A, B, C ou D); (ii) Uso e cobertura do solo; (iii) Conteúdo de umidade antecedente (USDA-SCS 1986; Rawls e Brakensiek 1985).

O método do Curve Number (CN), desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS) dos Estados Unidos, atualmente conhecido como Natural Resources Conservation Service (NRCS), é uma das técnicas mais amplamente utilizadas para estimar o escoamento direto da chuva. Trata-se de um modelo empírico simples que estima o volume de escoamento com base nas propriedades físicas do solo, no uso e cobertura da terra e nas condições anteriores de umidade (USDA, 1972; TUCCI, 2008). O CN é um índice adimensional que varia de 30 a 100, representando a capacidade de uma superfície em gerar escoamento:

- Valores baixos (30–60) indicam alta capacidade de infiltração, geralmente associados a solos arenosos, vegetação natural e áreas permeáveis;
- Valores intermediários (60–85) refletem situações mistas, como agricultura e pastagens em solos medianamente permeáveis;
- Valores elevados (acima de 85) indicam superfícies com baixo potencial de infiltração, como áreas urbanas pavimentadas ou solos argilosos compactados.

Para a determinação do CN requer a integração de três variáveis principais:

- Primeira etapa: Grupo Hidrológico do Solo (GHS), onde os solos são classificados em quatro grupos com base em sua taxa de infiltração: Grupo A: solos com alta permeabilidade (areia profunda e bem drenada); Grupo B: solos com infiltração moderada (franco-arenoso); Grupo C: solos com baixa infiltração (franco-argiloso); Grupo D: solos muito pouco permeáveis (argilosos, compactos ou rasos). Essa classificação é baseada em mapas pedológicos ou bancos de dados como SoilGrids, IBGE ou Embrapa (Oliveira *et al.*, 2015).

- Segunda etapa: Uso e Cobertura da Terra (CUT), o uso da terra influencia diretamente o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Por exemplo, áreas com vegetação nativa normalmente apresentam maior infiltração e menor escoamento superficial, enquanto áreas urbanas com superfícies impermeáveis (asfalto, concreto) apresentam maior escoamento superficial. O mapeamento pode ser feito por meio de sensoriamento remoto, imagens de satélite ou banco de dados.
- Terceira etapa: Condição Inicial de Umidade (AMC) Refere-se à quantidade de água presente no solo antes da ocorrência de chuvas. São utilizadas três categorias: AMCI: solo seco; AMC II: condição média do solo (padrão para projetos); AMC III: solo úmido ou saturado. Se necessário, o valor de CN pode ser ajustado para AMC I ou III com base no valor de CN obtido para a AMC II, utilizando as fórmulas propostas pelo próprio SCS (USDA, 1972) na equação 5 e 6:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 \cdot CN_{II}} \quad (5)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573 \cdot CN_{II}} \quad (6)$$

Aplicações em SIG e Modelagem Hidrológica no método CN é amplamente utilizado em modelagem hidrológica espacial utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A sobreposição de mapas de solo e uso da terra permite a geração de mapas CN espaciais, facilitando a análise hidrológica de grandes áreas e a tomada de decisões em projetos de melhoramento, conservação do solo e planejamento urbano (Oliveira *et al.*, 2015, Peixoto e Pereira Neto, 2021).

2.3.4. Hidrograma Unitário e Hidrograma Unitário Sintético

O Hidrograma Unitário (HU) é um dos principais instrumentos utilizados na hidrologia para a modelagem do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica. Segundo Chow, Maidment e Mays (1988), o HU representa a resposta da bacia ao lançamento instantâneo e uniforme de uma chuva efetiva de 1 mm de altura durante um intervalo de tempo fixo. Sua construção permite prever como uma bacia responderá a eventos de precipitação, sendo amplamente utilizado em simulações de cheias, dimensionamento de estruturas hidráulicas e planejamento urbano.

O HU baseia-se em três princípios fundamentais: proporcionalidade, superposição e uniformidade espacial da chuva. Ele permite a decomposição de eventos de chuva complexos em pulsos menores, modelando o escoamento através da soma ponderada de múltiplos hidrogramas unitários. De acordo com Tucci (2004), essa técnica é particularmente útil em regiões com dados limitados e permite a aplicação de modelos determinísticos com base empírica. Para a equação 7 e a simplificada para o volume gerado por um HU:

$$V = \frac{(A \times I)}{1000} \quad (7)$$

Onde: V = volume (m³), A = área da bacia (km²), 1 mm = precipitação efetiva.

Em situações em que não há registros de chuvas e vazões, utiliza-se o Hidrograma Unitário Sintético (HUS), que simula a resposta hidrológica da bacia com base em parâmetros físicos. O método mais utilizado é o do Soil Conservation Service (SCS), que estima o HU a partir de equações empíricas associadas ao tempo de concentração, tempo de retardo e área da bacia (USDA, 1986).

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), o hidrograma unitário é construído a partir de três hipóteses básicas: a linearidade, a invariância temporal e a chuva uniforme. A hipótese da linearidade estabelece que a vazão direta é proporcional à magnitude da chuva efetiva. Assim, se uma chuva de 1 mm gera um certo hidrograma, uma chuva de 2 mm produzirá um hidrograma com o dobro da vazão em todos os instantes. A invariância temporal supõe que a forma do hidrograma permanece constante independentemente do momento em que a chuva ocorre, enquanto a uniformidade espacial considera que a chuva efetiva é distribuída igualmente sobre toda a área da bacia.

Ainda segundo os autores, "o hidrograma unitário representa a 'assinatura' da bacia hidrográfica, isto é, sua resposta característica a um impulso de chuva" (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013, p. 144). Tal abordagem permite prever, com razoável precisão, o comportamento da bacia sob diferentes cenários de precipitação, desde que respeitadas as premissas do modelo.

A utilidade prática do hidrograma unitário está em sua capacidade de permitir a simulação do hidrograma de escoamento direto gerado por chuvas com intensidades variadas, por meio da superposição temporal de múltiplos hidrogramas unitários, processo conhecido

como convolução. Assim, é possível modelar respostas complexas da bacia a eventos de chuva com duração e intensidade diferentes.

Conforme enfatizado por Collischonn e Dornelles (2013), o método do hidrograma unitário continua sendo uma das abordagens mais utilizadas no dimensionamento de estruturas hidráulicas, como galerias pluviais, canais de drenagem e bacias de retenção, dada sua simplicidade operacional e aplicabilidade em diferentes escalas.

A modelagem hidrológica em regiões caracterizadas pela escassez de dados observacionais exige o emprego de métodos alternativos que permitam estimar a resposta da bacia de maneira eficiente. Nesse cenário, o hidrograma unitário sintético se destaca como uma solução prática. Este tipo de hidrograma é gerado artificialmente com base em características morfométricas da bacia, dispensando a necessidade de séries históricas de vazão com dados observados.

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), o hidrograma unitário sintético mostra-se especialmente útil para bacias que não contam com monitoramento hidrológico, sendo desenvolvido a partir de modelos empíricos fundamentados na análise de múltiplas bacias com informações disponíveis. Esses modelos partem do princípio de que parâmetros do hidrograma, como o tempo até o pico, duração e formato, possuem correlação com variáveis físicas da bacia, tais como área, comprimento do talvegue, declividade média e coeficiente de forma.

Entre os formatos mais difundidos de hidrogramas sintéticos, o hidrograma unitário triangular, proposto pelo Soil Conservation Service (SCS) dos Estados Unidos, está entre os mais utilizados. Esse modelo simplifica os cálculos hidrológicos ao assumir uma forma triangular para o hidrograma, com subida linear até o pico e descida linear até o fim do escoamento. Apesar de sua simplicidade, essa abordagem é amplamente adotada devido à facilidade de aplicação e à compatibilidade com métodos como o SCS-CN, que calculam a chuva efetiva. Collischonn e Dornelles (2013) destacam a relevância do hidrograma unitário triangular como um recurso prático para estudos preliminares de drenagem urbana e projetos hidrológicos, sua natureza operacional e caráter conservador sendo pontos fortes.

Por sua aplicabilidade, essa abordagem tem se mostrado particularmente viável em bacias pequenas e regiões semiáridas, como no Nordeste brasileiro, onde a resposta hidrológica ao evento de chuva ocorre de forma mais uniforme e concentrada no tempo.

2.4. Características Morfométricas

A análise morfométrica das bacias hidrográficas é uma etapa crucial na simulação de escoamentos superficiais, pois permite a compreensão dos fatores físicos que influenciam o comportamento hidrológico de uma região. Segundo Tucci (2004), os parâmetros morfométricos são a base da modelagem hidrológica porque refletem a geometria, relevância, forma e densidade da rede de drenagem, diretamente a resposta da bacia aos eventos de precipitação. As principais características morfométricas utilizadas nas simulações de escoamento são:

- Área da bacia (A): é a área que contribui para o escoamento, medida em km^2 ou ha. denota a superioridade da contribuição para a enundação, expressa em km^2 ou ha. É um dos parâmetros mais importantes porque afeta diretamente a quantidade de água que flui. (Tucci, 2004).
- Perímetro da bacia (P): define os limites da bacia e é usado no cálculo do índice de compacidade, que mostra o grau de circularidade da bacia.
- Comprimento do curso principal (L): é o comprimento do talvegue principal, entre o ponto mais alto e o exutório. É relacionado com a quantidade de tempo que leva para acumular e o formato da bacia.
- Declividade média (S): afeta a velocidade do fluxo de superfície. Bacias com maiores declividades têm respostas mais rápidas e mais capacidade de transporte de sedimentos.
- Densidade de drenagem (Dd): razão entre o comprimento total dos canais de drenagem e a área da bacia (km/km^2). Segundo Villela e Mattos (1975), valores elevados significam melhor drenagem, o que geralmente solos com pouca passagem de água e morros íngremes.
- Fator de forma (Rf): a razão entre a largura média e o comprimento da bacia. Indica o potencial para que o fluxo se torne mais concentrado bacias que são mais longas tendem a ter escoamentos menos concentrados do que bacias que são mais circulares (Chow *et al.*, 1988).
- Índice de compacidade (Kc): mostra o grau de circularidade ao relacionar o perímetro e a área da bacia. Resultador próximos de 1 significam que as bacias tem formato circular, sendo mais propensas a apresentar fluxos concentrados e picos acentuados.

Esses parâmetros são geralmente obtidos por meio de ferramentas de geoprocessamento e modelos digitais de elevação (MDE). Sua análise permite definir parâmetros para modelos

hidrológicos, como o método SCS-CN, e estimar características com taxas de pico de fluxo, e tempos de concentração e volume de fluxo. Portanto é necessário caracterizar os dados morfométricos para prever como as bacias se comportam durante eventos extremos e planejar intervenções de controle de inundações.

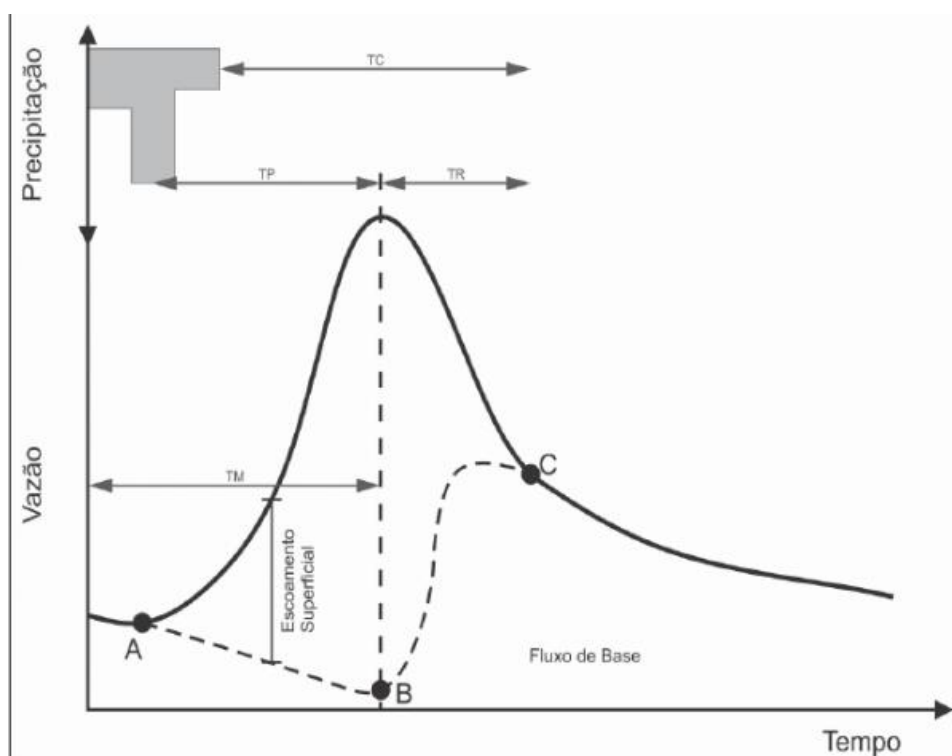
2.5. Tempo de Concentração

O tempo de concentração (T_c) é o período necessário para que uma gota de água percorra a maior distância possível dentro de uma bacia hidrográfica, desde o ponto mais remoto até o exutório, após o início da precipitação. Em outras palavras, é o período necessário para que toda a bacia contribua para o escoamento no ponto de saída (Chow, Maidment e Mays, 1988).

Segundo Tucci (2008), o T_c é um dos parâmetros mais importantes na hidrologia aplicada, pois ele condiciona a forma do hidrograma de escoamento e, conseqüentemente, a vazão de pico e o volume escoado. Sua estimativa deve considerar a topografia, cobertura do solo, extensão da bacia e características do escoamento superficial e subterrâneo

O tempo de concentração é um fator crucial na determinação da duração da precipitação em projetos de cálculos de escoamento superficial, sendo especialmente relevante em abordagens como a pesquisa racional e o modelo SCS-CN. Uma estimativa precisa do T_c favorece a escolha correta da intensidade da chuva, evitando tanto o subdimensionamento, que pode resultar em alagamentos, quanto o superdimensionamento, que pode aumentar os custos das obras de forma desnecessária (Villela e Mattos, 1975;Tucci, 2008). A figura 4 é gráfico ilustra um hidrograma típico, destacando o tempo de concentração (T_c) como o intervalo entre o início da precipitação e o momento em que toda a área da bacia contribui para o escoamento na seção de controle.

Figura 4 - Hidrograma com Indicação do Tempo de Concentração (T_c)



Fonte: Fonte: Gonçalves, R. D.; Engelbrecht, B.; Chang, H. K. (2016).

Além disso, o T_c influencia o tempo de resposta da bacia hidrográfica, sendo essencial para prever o momento de ocorrência da vazão de pico. Em áreas urbanas, onde o escoamento é mais rápido devido à impermeabilização do solo, o T_c tende a ser menor, o que exige maior precisão na sua estimativa (Costa, *et al.*, 2021).

De acordo com Tucci (2004), as equações empíricas são ferramentas importantes quando se busca simplicidade e agilidade em análises hidrológicas preliminares, sobretudo em contextos onde os dados topográficos e de uso do solo são limitados. Contudo, sua aplicação exige discernimento técnico, uma vez que foram desenvolvidas com base em observações locais e podem não se ajustar a todas as realidades territoriais.

A fórmula de Kirpich é uma das mais clássicas na hidrologia, formulada a partir de medições em pequenas bacias rurais com características naturais, nos Estados Unidos. Segundo Viessman e Lewis (2003), a equação tende a superestimar o escoamento em bacias urbanas ou muito planas, pois não leva em conta a rugosidade superficial nem o grau de impermeabilização.

I. A equação 8 é a de Kirpich (1940):

$$Tc = 0,195 \times \frac{L^{0,77}}{So^{0,385}} \quad (8)$$

onde:

- Tc é o tempo de concentração (min),
- L é o comprimento do curso d'água principal (km),
- So é a declividade média do terreno (m/m).

II. A equação 9 é a de NRCS/SCS (1986):

$$Tc = 0,0195 \times \frac{(L^{0,77})}{(S^{0,385})} \quad (9)$$

III. A equação 10 é a Giandotti (1934):

$$Tc = \frac{(4 \times A \times 1,5 \times L)}{(25,3 \times \sqrt{H})} \quad (10)$$

IV. A equação 11 é de Ventura (1986):

$$Tc = 0,087 \times \left(\frac{L}{\sqrt{H}}\right)^{1,2} \quad (11)$$

V. A equação 12 é Dooley & Floyd (1948):

$$Tc = 0,8 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,467} \quad (12)$$

VI. A equação 13 é a de Carter (1961):

$$Tc = 5,862 \frac{L^{0,6}}{So^{0,3}} \quad (13)$$

A seleção da pesquisa mais deve levar em consideração as características fisiográficas da bacia hidrográfica. A fórmula de Kirpich, por exemplo, tende a superestimar o tempo de concentração (Tc) em bacias urbanas ou com escoamento superficial rápido, sendo mais adequada para bacias naturais e de menor dimensão (PEREIRA et al., 2019). Em contrapartida, a descoberta do Serviço de Conservação do Solo/Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (SCS/NRCS) permite a inclusão de variáveis como o tipo de solo e a cobertura do terreno, tornando-se particularmente útil em simulações de condução urbana (Martins et al., 2020).

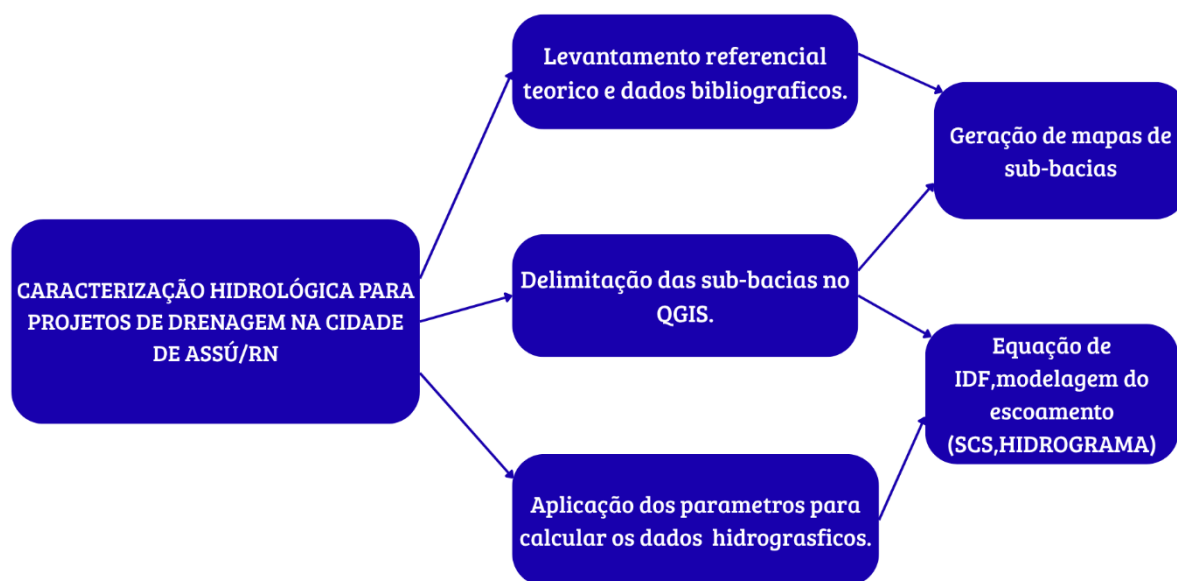
A solução de Carter apresenta um bom equilíbrio entre simplicidade e precisão, sendo adaptada com sucesso ao contexto brasileiro por meio da substituição das unidades imperiais por métricas. Estudos indicam que o fator 1,44 pode variar conforme o grau de urbanização da bacia, possibilitando ajustes calibrados em função do comportamento hidrológico observado (Silva *et al.*, 2021).

No cenário de Assu, caracterizado por áreas de topografia suavemente ondulada e falta de canais claramente delineados em algumas sub-bacias, a previsão do tempo de concentração necessita de dados altimétricos exatos e uma análise morfométrica minuciosa, de preferência com o auxílio de modelos digitais de elevação (MDE) e instrumentos de geoprocessamento (Mota *et al.*, 2017) e (Moura *et al.*, 2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos objetivos propostos neste trabalho, foram definidas as seguintes etapas apresentadas no fluxograma (Figura 5).

Figura 5: Fluxograma de execução da geração dos parâmetros para a caracterização hidrológica para projetos de drenagem.



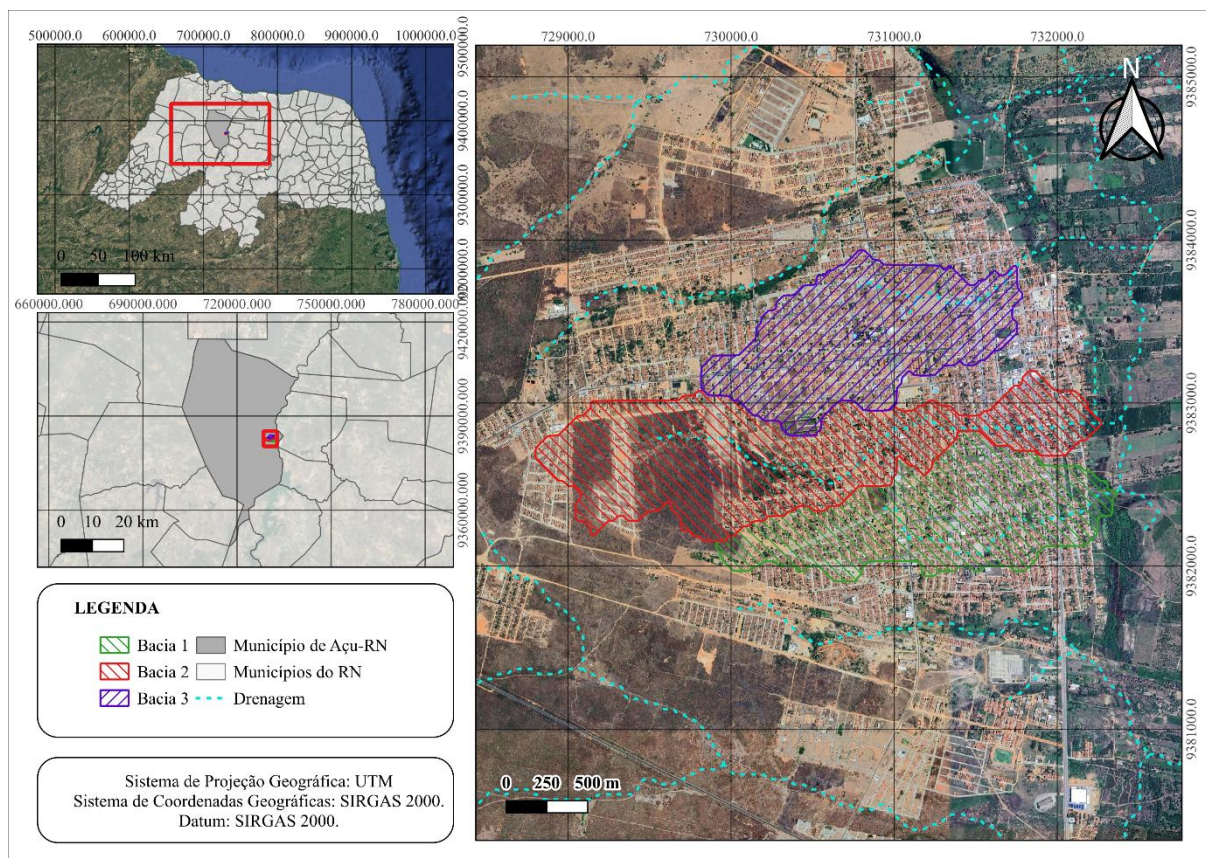
Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

3.1. Área de Estudo

A pesquisa foi realizada na cidade Assu, situada na margem inferior do rio Piranhas-Açu, no estado do Rio Grande do Norte. É a principal cidade da região do vale do Açu, pois esta área é notável pela sua relevância estratégica para o progresso socioeconômico do estado. (Medeiros, 2018).

A área em foco corresponde a cidade de Assu, situado no baixo curso do rio Piranhas-Açu, no estado do Rio Grande do Norte. O município apresenta expressiva vulnerabilidade a inundações, com histórico de alagamentos severos em anos como 2008 e 2009, regiões centrais da cidade, onde fica localizado a área principal de comércio e histórica da cidade. O mapa (Figura 6) abaixo mostra a localização da cidade em relação a sua situação no estado.

Figura 6: Mapa de localização de Assu-RN:



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) a cidade de Assu abrange uma área superior a 1.303,442 km², caracterizada por uma topografia predominantemente plana a levemente ondulada e solos do tipo areno-argiloso. A existência do rio Piranhas-Açu, o principal rio da região, aliada à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, proporciona à região um grande potencial hídrico, permitindo a prática da agricultura em uma área situada no semiárido do Nordeste.

A bacia do rio Piranhas-Açu possui uma grande complexidade geomorfológica, sendo influenciada tanto por cursos de água perenes quanto intermitentes. De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2006), a parte inferior da bacia, que inclui o Assu, é formada por formações sedimentares da Bacia Potiguar, que favorecem a existência de aquíferos como o Açú e o Jandaíra, essenciais para o abastecimento local e a irrigação.

No entanto, a ocupação de Assu se deu, em grande medida, de maneira desordenada, com a expansão de zonas agrícolas e urbanas sobre as planícies fluviais. Este processo

aumentou a vulnerabilidade socioambiental, particularmente em face de eventos extremos de hidroclima, como as inundações históricas de 1985, 2004, 2008 e 2009, que resultaram em danos consideráveis à infraestrutura urbana, à produção agrícola e à população ribeirinha (Costa, 2015) e (Medeiros, 2018).

3.2. Materiais Utilizados

A elaboração deste trabalho envolveu o uso de diversas ferramentas técnicas e computacionais, essenciais para a coleta, tratamento, análise e visualização dos dados hidrológicos e geoespaciais da região de Assú/RN. A seguir, são descritas as principais ferramentas e suas respectivas finalidades:

- Microsoft Excel: Utilizado para organização e tratamento preliminar das séries históricas de precipitação. Foi empregado na tabulação dos dados diários e mensais, cálculo das precipitações totais anuais, seleção dos eventos máximos e preparação das tabelas de entrada para análises estatísticas.
- *Software* HIDRO 1.4: Ferramenta desenvolvida para análise de frequência de eventos extremos. Foi utilizada para o ajuste de distribuições estatísticas (como Gumbel, Log-Normal e Pearson Tipo III) às chuvas máximas anuais e para a geração das equações IDF (Intensidade $\times$ Duração $\times$ Frequência).
- QGIS (versão 3.34.8): Software de geoprocessamento gratuito e de código aberto. Foi utilizado para: delimitação de sub-bacias hidrográficas na área urbana de Assú, geração de mapas temáticos (uso e cobertura do solo, altimetria, rede de drenagem), extração de parâmetros morfométricos com base em Modelos Digitais de Elevação (MDE) e integração com dados vetoriais (shapefiles) de hidrografia e relevo;
- *OpenTopoMap* / SRTM: Fontes de Modelos Digitais de Elevação (MDE) utilizados para analisar relevo, declividade, direção e acúmulo de fluxo. Serviram de base para a definição automática da rede de drenagem e delimitação das bacias contribuintes no SIG;
- *Google Earth Pro*: A ferramenta foi utilizada para inspeção visual da área de estudo, localização de elementos urbanos relevantes (ruas, canais, áreas de inundação) e validação das feições geradas no QGIS.
- Plataformas Institucionais de Dados Hidrometeorológicos: Foram acessadas para coleta de séries históricas confiáveis:

- EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN): dados pluviométricos regionais;
 - ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico): estações fluviométricas e pluviométricas;
 - INMET (Instituto Nacional de Meteorologia): Normas climatológicas e precipitações diárias.
- ArcGIS: Complementarmente ao QGIS, o ArcGIS foi utilizado em algumas etapas específicas da análise hidrológica (como a geração de curvas de nível e extração de áreas de contribuição), aproveitando suas ferramentas de hidrologia integradas ao Spatial Analyst.
 - GAM-IDF: Linguagem utilizada em testes exploratórios para plotar gráficos de distribuição de chuvas e validação dos resultados da equação IDF.

3.3. Procedimentos Metodológicos

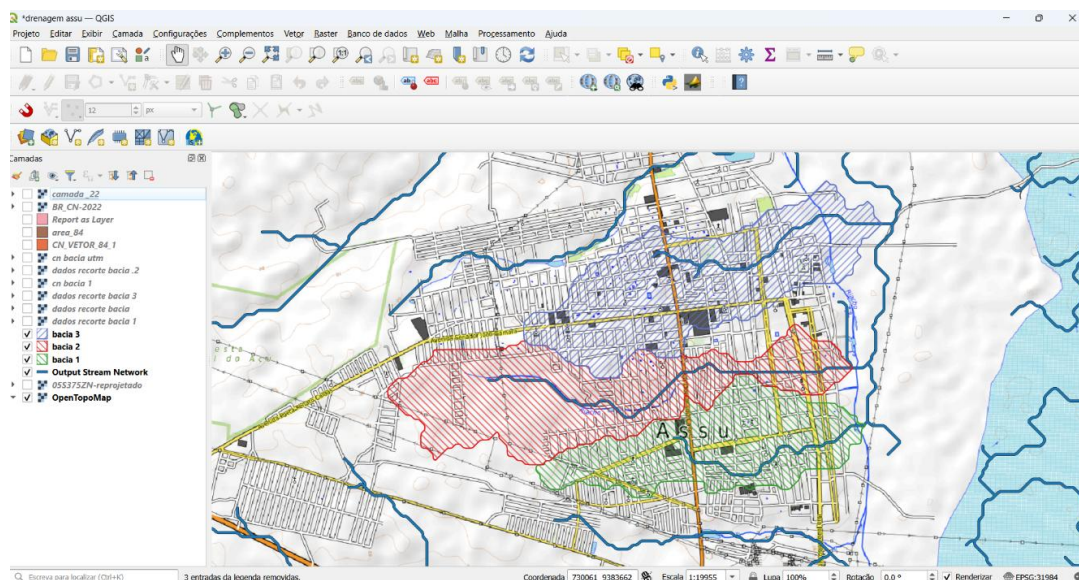
3.3.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica

A delimitação das bacias de contribuição relacionadas aos locais de alagamentos na cidade de Assú-RN, foi realizada com base no modelo de elevação obtido do OpenTopoMap, que é um serviço de mapas gratuito fundamentado em informações do SRTM e outros modelos de relevo. Essa base possui uma resolução adequada para investigações hidrológicas em nível local e foi incorporada ao sistema de geoprocessamento do QGIS, utilizando ferramentas de hidrologia do ARCGIS. Utilizando o modelo de elevação foi possível elaborar camadas de direção de fluxo, acúmulo de fluxo e rede de drenagem, possibilitando a identificação automática das áreas com potencial de contribuição hídrica (bacias hidrográficas) para determinados pontos da área urbana que apresentem históricos ou risco de inundações.

A figura 7, mostra como foi realizado o processo de delimitação das sub-bacias da área urbana de Assú, o processo da delimitação das sub-bacias foi realizada a partir da extração da rede de drenagem ordenada (Stream Network with Order) utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) no ArcGIS. Em seguida, procedeu-se à delimitação das bacias hidrográficas por meio da ferramenta Watershed Basin Delineation. Para a análise do uso do solo e cálculo do Curve Number, utilizou-se o Global Curve Number. Por fim, foram extraídos os dados morfométricos por meio da análise morphometric analysis, visando a caracterização hidrológica

das sub-bacias da região urbana de Assú. É notório destacar vários problemas relacionados a falha nas drenagem desses locais.

Figura 7: Delimitação das Sub-bacias na área Urbana de Assú .



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

3.3.2. Análise Morfométrica

A avaliação morfométrica é crucial para entender a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas, particularmente em áreas propensas a inundações, como é o caso do município de Assú, no Rio Grande do Norte. De acordo com Villela e Mattos (1975), fatores morfométricos como área, perímetro, densidade de drenagem, inclinação e compacidade têm um impacto direto no tempo de reação da bacia a eventos extremos de precipitação.

Os parâmetros morfológicos das três sub-bacias em estudo foram obtidos por meio de uma análise detalhada utilizando as ferramentas de geoprocessamento ARCGIS e o software de modelagem hidrológica HEC (Hydrologic Engineering Center). A aplicação do ARCGIS permitiu a manipulação e a visualização de dados espaciais, possibilitando a remoção de informações essenciais sobre a configuração geográfica das sub-bacias, incluindo variáveis como área, perímetro, comprimento dos rios e declividade.

A utilização do HEC complementou esta análise ao fornecer um ambiente para modelagem hidrológica, permitindo a simulação do comportamento das sub-bacias sob diferentes condições hidrológicas. Os dados necessários para essa análise foram obtidos a partir do MDT da bacia rio Piranhas açu. Essa abordagem integrada não apenas garantiu uma avaliação precisa dos parâmetros morfológicos das sub-bacias, mas também possibilitou uma compreensão mais aprofundada dos processos hidrológicos que afetam as regiões detectadas.

A utilização conjunta do ARCGIS e do HEC mostra, portanto, uma estratégia eficaz para a caracterização morfológica e para o planejamento da gestão hídrica nas bacias hidrográficas. A figura abaixo apresenta informações detalhadas sobre as características morfológicas de sub bacias, incluindo dados como comprimento do fluxo, orientação e densidade de drenagem.

Figura 8: Dados morfológicos obtidos pelo HEC.

Subbasin	Longest Flowpath Length (KM)	Longest Flowpath Slope (M/M)	Centroidal Flowpath Length (KM)	Centroidal Flowpath Slope (M/M)	10-85 Flowpath Length (KM)	10-85 Flowpath Slope (M/M)	Basin Slope (M/M)	Basin Relief (M)	Relief Ratio	Elongation Ratio	Drainage Density (KM/KM ²)
Subbasin-1	2,66683	0,01812	1,36982	0,01792	2,00012	0,01757	0,03209	47,90460	0,01796	0,44652	0,25379

Fonte: HEC adaptado pela pesquisadora (2025).

Figura 9 : Dados morfológicos obtidos pelo ARCGIS.

	Parameter	Value	Unit	Interpretation
1	Basin Area (A)	1,2224	km ²	Small basin
2	Basin Length (Lb)	2,4774	km	Basin length
3	Basin Width (B)	0,4934	km	Basin width
4	Circularity Ratio (Rc)	0,3909		Strongly elongated shape
5	Compactness Coefficient of Gravelius (Kc)	1,5995		Oval-oblong shape
6	Compensated Channel Slope	0,0196	m/m	Calculated compensated channel slope using linear regres...
7	Compensated Channel Slope (%)	1,9624	%	Gentle compensated slope
8	Constant of Channel Maintenance (C)	0,6801	km ² /km	Moderate constant of channel maintenance
9	Drainage Density (Dd)	1,4704	km/km ²	Moderate drainage texture
10	Elongation Ratio (Re)	0,5036		Oval shape
11	End Elevation (Main Channel)	25,3535	m a.s.l.	Elevation at the end of the main channel
12	Form Factor (Ff)	0,1992		Elongated shape, low susceptibility to flash floods
13	Horton's Form Factor	0,1992		Elongated basin shape
14	Length of Overland Flow (Lo)	0,34	km	Moderate overland flow length
15	Main Channel Slope (Endpoints)	1,7715	%	Gentle slope
16	Maximum Elevation	82,3583	m a.s.l.	Maximum elevation of the basin
17	Mean Elevation	49,9422	m a.s.l.	Average elevation of the basin
18	Mean slope of the Basin (degrees)	1,8937	degrees	Gently sloping
19	Mean slope of the Basin (percent)	3,3063	%	Gently sloping
20	Minimum Elevation	24,8686	m a.s.l.	Minimum elevation of the basin
21	Perimeter (P)	6,2689	km	Basin perimeter
22	Relief (H)	57,4897	m	Low relief, indicating flat terrain
23	Ruggedness Number (Rn)	0,0845		Extremely low ruggedness
24	Schumm's Elongation Ratio	0,5036		Elongated basin

Fonte: ARCGIS adaptado pela pesquisadora (2025).

3.3.3. Uso do Solo e Cobertura Vegetal

Os processos hidrológicos são fortemente influenciados pelo uso e pela cobertura do solo, especialmente em relação à infiltração de água no solo, ao escoamento superficial e à produção de fluxos máximos. Áreas com vegetação abundante costumam ter maior capacidade de retenção de água, ao passo que áreas urbanas ou agrícolas intensivas tendem a intensificar a impermeabilização, resultando em maior escoamento (Tucci, 2008) e (Silva *et al.*, 2019).

No Vale do Açu, observa-se uma substituição progressiva da vegetação nativa por áreas agrícolas, sobretudo voltadas à fruticultura irrigada e à pecuária. Esse processo tem resultado em mudanças na resposta hidrológica das bacias, ampliando os riscos de enchentes localizadas e de processos erosivos (Ferreira *et al.*, 2021).

A avaliação e classificação do uso do solo são essenciais para a definição do número de curva (CN), utilizado no método SCS para estimativa de escoamento, e devem ser constantemente atualizadas com dados geoespaciais recentes (Mendes e Araújo, 2015).

3.3.4. Estimativa de Chuvas Intensas (Equação IDF)

O trabalho utilizou dados de precipitação de três estações localizadas no município de Assú-RN, abrangendo o período de 1990 a 2019, totalizando 30 anos de observações. As séries históricas foram obtidas a partir dos bancos de dados da EMPARN, ANA (Agência Nacional de Águas) e do INMET. Os dados foram organizados em planilhas e tratados estatisticamente para a seleção das chuvas máximas anuais em diferentes durações (15 min a 24 h), servindo de base para a elaboração da equação IDF.

Consultando a plataforma da EMPARN e ANA, para ter acesso a dados atualizados das estações pluviométricas. A figura 10, mostra onde encontrar os dados:

Figura 10: O banco de dados pluviométricos da Agência Nacional de águas.

Selecionar	Código	Nome Estação	Tipo Estação	baixar txt	baixar csv	baixar mdb
☐	1360009	CGH MARGARIDA JUSANTE	Pluviométrica			
☐	437041	TELEPLU - GROSSOS	Pluviométrica			
☐	437042	TELEPLU - TIBAU	Pluviométrica			
☐	535007	UFFRN	Pluviométrica			
☐	535008	NATAL	Pluviométrica			
☐	535013	SÃO PAULO DO POTENGI	Pluviométrica			
☐	535014	SÃO PEDRO	Pluviométrica			
☐	535017	JOÃO CAMARA (BAIXA VERDE)	Pluviométrica			
☐	535034	NATAL (AUGUSTO SEVERO) (SBNT)	Pluviométrica			
☐	535038	FAZENDA POTENJI	Pluviométrica			

Fonte: Agência Nacional de Águas - ANA (2025).

Com os valores de precipitação obtidos, calcula-se a intensidade média dividindo a altura da chuva pela sua duração. Esses pares de dados (intensidade $\times$ duração $\times$ frequência) são então utilizados para ajustar a equação empírica do tipo IDF, representada na Equação 1. A seleção das estações pluviométricas considerou a extensão temporal das séries, a continuidade dos registros e a proximidade geográfica com a área de estudo, buscando-se garantir a representatividade dos dados para a análise hidrológica local (Tucci, 2002).

Inicialmente, os dados brutos foram organizados e tratados no ambiente do software Microsoft Excel, o qual foi utilizado para a filtragem de inconsistências, preenchimento de falhas (quando permitido metodologicamente), cálculo das precipitações anuais máximas e estruturação das tabelas de entrada para posterior modelagem estatística, como mostra na figura 11. O Excel é amplamente empregado em estudos hidrológicos pela sua flexibilidade no manuseio de grandes volumes de dados, além de permitir a automação de processos por meio de fórmulas e gráficos (Cunha, 2010).

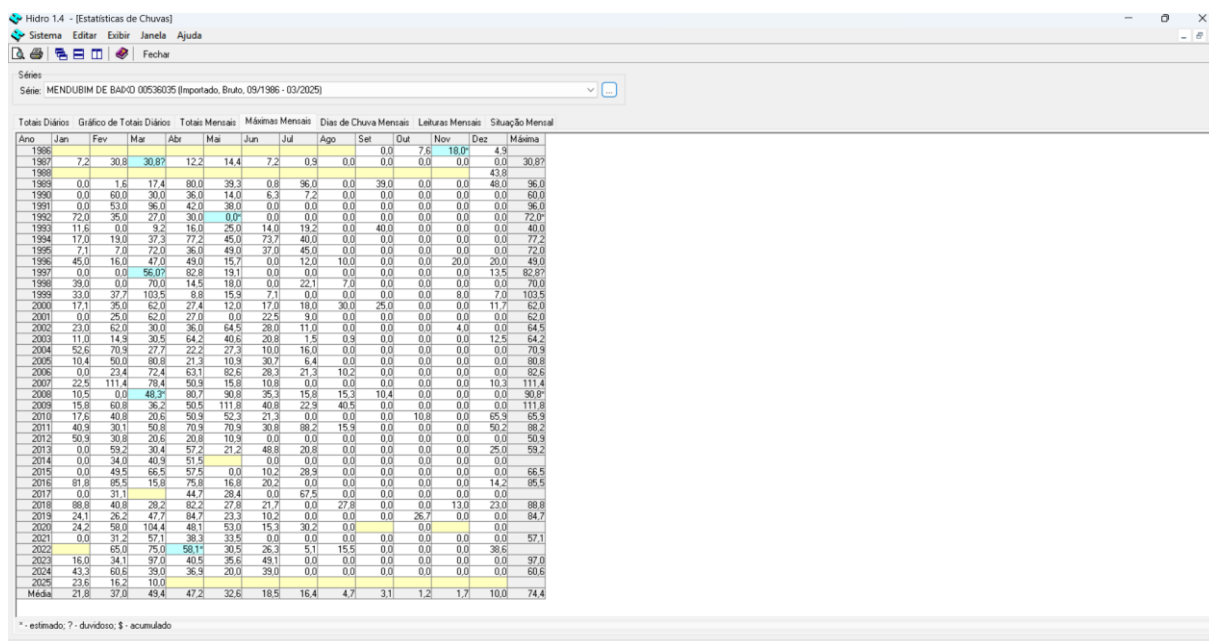
Figura 11: Organização dos dados de precipitação no Microsoft Excel

Estação	Período	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4	Valor 5	Valor 6	Valor 7	Valor 8	Valor 9	Valor 10	Valor 11	Valor 12	Valor 13	Valor 14	Valor 15	Valor 16	Valor 17	Valor 18	Valor 19	Valor 20	Valor 21	Valor 22	Valor 23	Valor 24	Valor 25	Valor 26	Valor 27	Valor 28	Valor 29	Valor 30	Valor 31	Valor 32	Valor 33	Valor 34	Valor 35	Valor 36	Valor 37	Valor 38	Valor 39	Valor 40	Valor 41	Valor 42	Valor 43	Valor 44	Valor 45	Valor 46	Valor 47	Valor 48	Valor 49	Valor 50	Valor 51	Valor 52	Valor 53	Valor 54	Valor 55	Valor 56	Valor 57	Valor 58	Valor 59	Valor 60	Valor 61	Valor 62	Valor 63	Valor 64	Valor 65	Valor 66	Valor 67	Valor 68	Valor 69	Valor 70	Valor 71	Valor 72	Valor 73	Valor 74	Valor 75	Valor 76	Valor 77	Valor 78	Valor 79	Valor 80	Valor 81	Valor 82	Valor 83	Valor 84	Valor 85	Valor 86	Valor 87	Valor 88	Valor 89	Valor 90	Valor 91	Valor 92	Valor 93	Valor 94	Valor 95	Valor 96	Valor 97	Valor 98	Valor 99	Valor 100
CGH MARGARIDA JUSANTE	1970-1979	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600	3700	3800	3900	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000	5100	5200	5300	5400	5500	5600	5700	5800	5900	6000	6100	6200	6300	6400	6500	6600	6700	6800	6900	7000	7100	7200	7300	7400	7500	7600	7700	7800	7900	8000	8100	8200	8300	8400	8500	8600	8700	8800	8900	9000	9100	9200	9300	9400	9500	9600	9700	9800	9900	10000

Fonte: Adaptado pela pesquisadora (2025).

Com os dados organizados, procedeu-se à análise estatística das séries de máximas anuais utilizando o programa HIDRO, que na figura 12 mostra o desenvolvido para fins de análise de frequência de eventos hidrológicos extremos. O software permite o ajuste de distribuições de probabilidade como Gumbel, Log-Normal e Pearson Tipo III, além de fornecer parâmetros para o cálculo de equações intensidade-duração-frequência (IDF), essenciais para o dimensionamento de obras de drenagem urbana (Oliveira e Lopes, 2015).

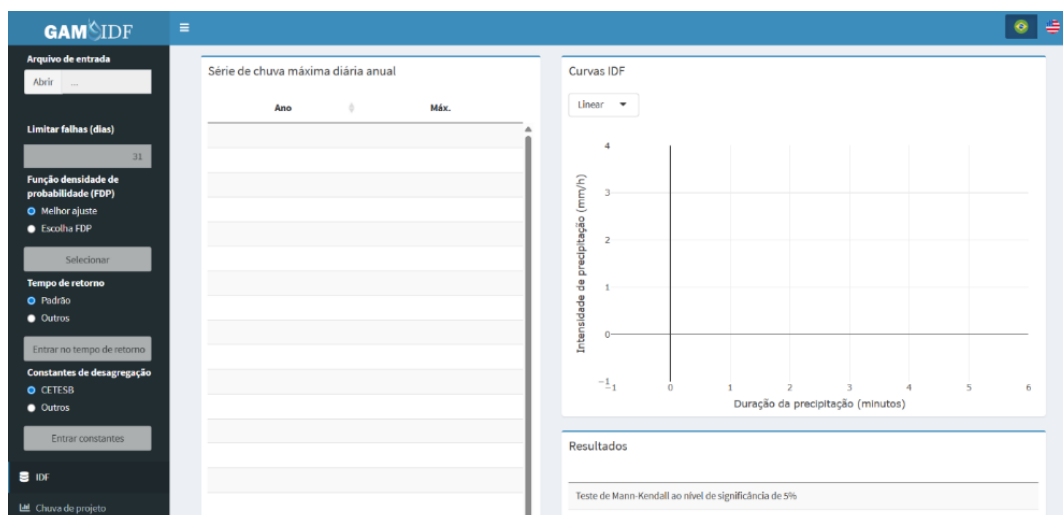
Figura 12: Interface do software HIDRO.



Fonte: Software Hidro adaptado pela pesquisadora (2025).

O uso combinado do Excel e do HIDRO possibilitou um processamento preciso e eficiente das séries temporais de precipitação, assegurando a qualidade e a coerência dos resultados utilizados nas etapas subsequentes de análise hidrológica e modelagem. A partir desses dados foi lançado os valores de máxima anuais de precipitações do ano de 1990 até 2019, no GAM-IDF (Figura 13), para assim ter como resultado a curva IDF e a equação de estudo. A figura abaixo mostra a interface do aplicativo, e como foi o processamento dos dados lançados.

Figura 13: Interface do aplicativo GAM-IDF



Fonte: Adaptado pela pesquisadora (2025).

3.3.5. Cálculo do Tempo de Concentração

Com base nas informações morfométricas obtidas por meio da avaliação da topografia e geometria das sub-bacias escolhidas, foi viável calcular o tempo de concentração para cada área de contribuição. Esse parâmetro é crucial na modelagem hidrológica, pois indica o tempo requerido para que toda a água da precipitação que cai sobre a bacia chegue ao ponto de saída, afetando diretamente a forma e o pico do hidrograma de escoamento.

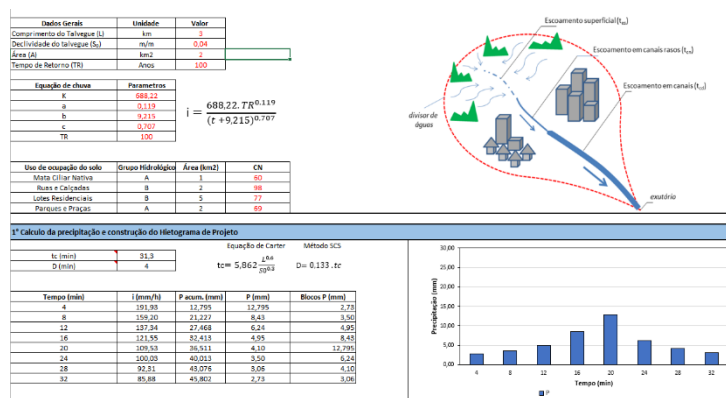
O procedimento foi segmentado em quatro fases fundamentais:

- Estimativa da Precipitação Máxima e Construção dos Hietogramas:

A princípio, foram estimadas as intensidades máximas para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, utilizando as equações IDF (Intensidade – Duração – Frequência) adequadamente ajustadas para a área em análise. As equações IDF serviram para calcular as intensidades médias correspondentes a várias durações, sendo essas intensidades ajustadas com base nos tempos de concentração que haviam sido previamente determinados.

Com essas intensidades, foram criados hietogramas sintéticos para cada sub-bacia, ilustrando a distribuição temporal das precipitações com base em eventos críticos. A figura 14 mostra como foi realizado esse procedimento.

Figura 14 : Procedimento para estimar a precipitação máxima e a construção dos Hietogramas.



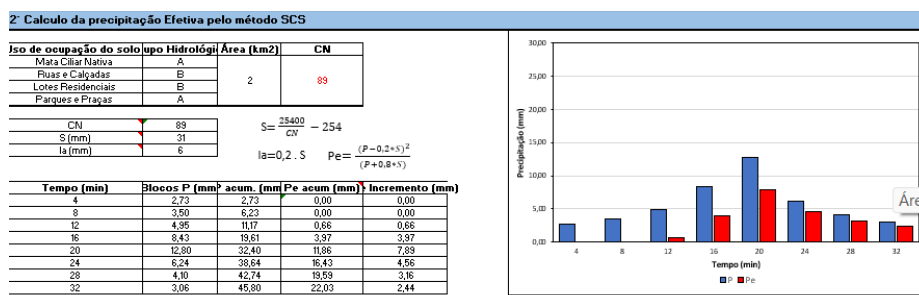
Fonte: Adaptado pela pesquisadora (2025).

- Cálculo da Precipitação Efetiva (Método SCS e Fórmula de Carter)

Após a coleta dos dados de precipitação, foi importante identificar a proporção eficaz que provoca o escoamento superficial imediato. Para isso, foi adotada a técnica sugerida pelo Soil Conservation Service (SCS), que considera o parâmetro Curve Number (CN), baseado nas características do solo e na utilização e cobertura deste na sub-bacia.

A Fórmula de Carter foi utilizada para modificar a concepção inicial, possibilitando aprimorar o projeto da implementação. Esse dado serviu como insumo para o modelo hidrológico, refletindo a parte da precipitação que realmente influencia o escoamento superficial. A figura 15 mostra como foi feito todo o processo explicado acima:

Figura 15: Cálculo da precipitação efetiva pelo método SCS.



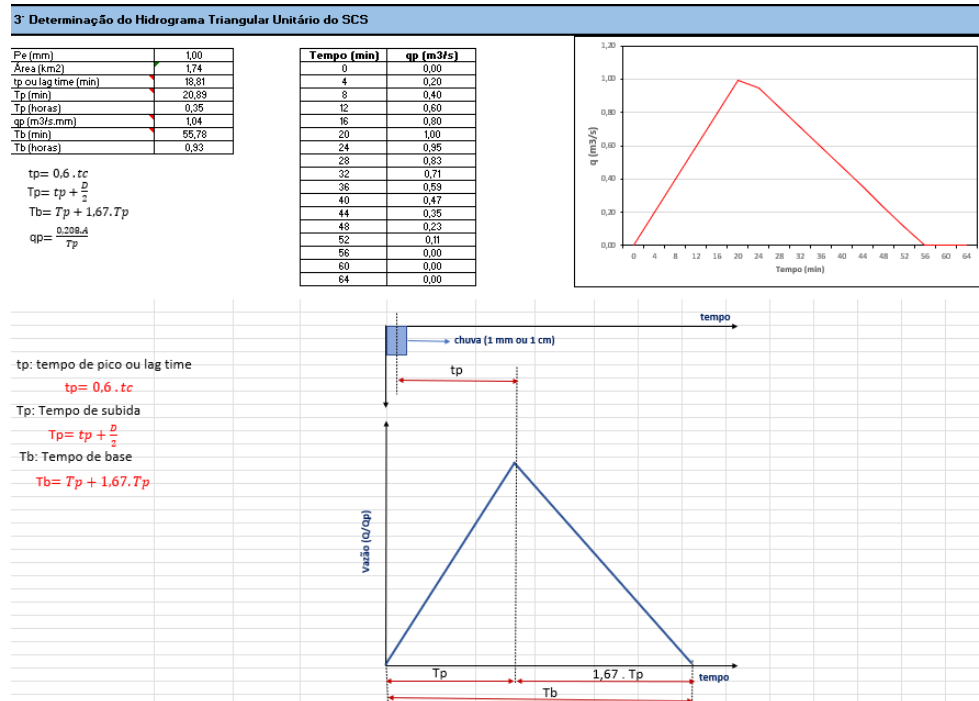
Fonte: Adaptado pela pesquisadora (2025).

- Determinação do Hidrograma Unitário Triangular.

Com base nos parâmetros hidrológicos anteriores, foi gerado o hidrograma unitário triangular proposto pelo SCS. Este modelo simplificado é utilizado para representar a resposta hidrológica de uma bacia a um centímetro de ocorrência eficaz, permitindo definir de forma aproximada o pico de vazão e o tempo base do escoamento. Os parâmetros do hidrograma foram obtidos com base na pesquisa empírica de pico de vazão do SCS e no tempo de concentração

já estimado, respeitando a forma triangular convencional de distribuição. Na figura 16 detalha como foi feito:

Figura 16: Determinação do Hidrograma Triangular Unitário do SCS.



Fonte: Adaptado pela pesquisadora (2025).

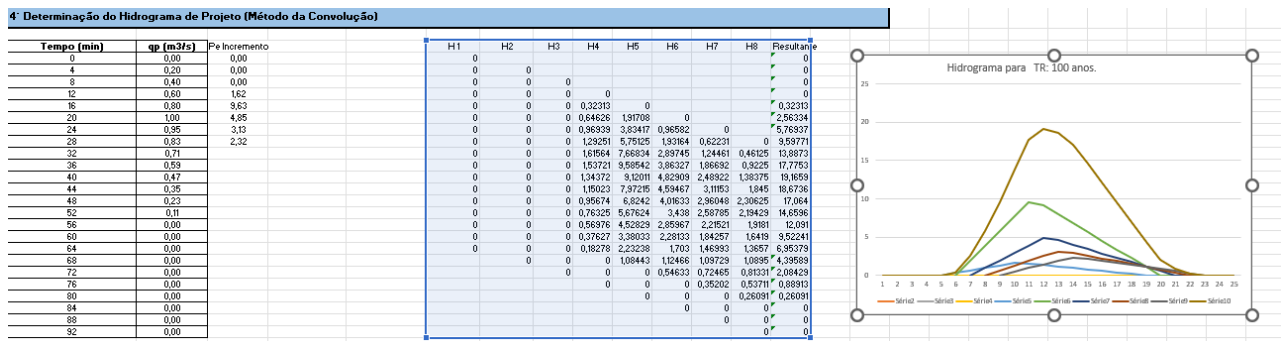
- Construção do Hidrograma de Projeto (Método de Convolução)

Por fim, utilizando o princípio da convolução hidrológica, foi possível transformar a implementação efetiva distribuída no tempo em um hidrograma de projeto completo, que representa o escoamento superficial gerado por um evento crítico de chuva. Esse processo envolve uma sobreposição de hidrogramas unitários sucessivos proporcionalmente à distribuição da chuva efetiva ao longo do tempo.

O hidrograma de projeto resultante permite a análise da resposta hidrológica da bacia para diferentes cenários de chuvas intensas, sendo uma ferramenta fundamental para o dimensionamento de obras de drenagem e controle de cheias.

A figura 17, detalha como foi realizado a parte final, para obtenção dos hidrogramas de projeto, para cada período 10,50 e 100 anos, com CN obtidos pela média deles, do ano de 1985 e de 2022.

Figura 17: Determinação do Hidrograma de Projeto (Método de Convolução)



Fonte: Adaptado pela pesquisadora (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

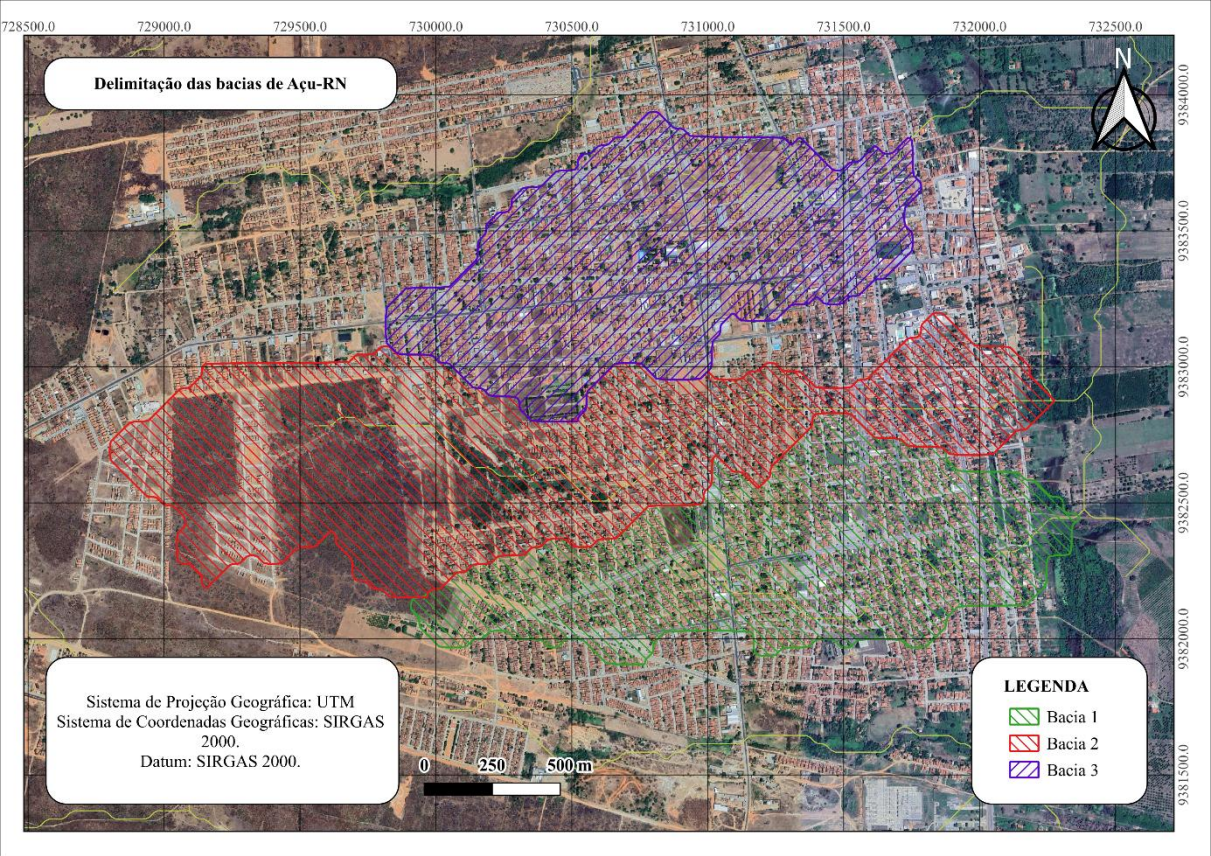
4.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica

Com as informações coletadas e georreferenciadas, foi possível delimitar as sub-bacias que cortam a cidade de Assu-RN. Foram delimitadas 3 sub-bacias:

- Bacia 1: área de 1,22 km²
- Bacia 2: área de 2,22 km²
- Bacia 3: área de 1,74 km²

O mapa (figura 18) abaixo mostra como ficou a delimitação das sub-bacias.

Figura 18: Delimitação das Sub- bacias de Assu-RN.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

4.2. Análise Morfométrica

A caracterização morfométrica das sub-bacias é uma etapa fundamental para a compreensão do comportamento hidrológico de uma determinada área de drenagem, sendo indispensável na elaboração de projetos de manejo de águas pluviais, dimensionamento de estruturas hidráulicas e avaliação de riscos hidrológicos. Parâmetros como comprimento do escoamento, declividades, razão de alongamento e densidade de dependência estão diretamente relacionados ao tempo de concentração, à resposta hidrológica da bacia e à geração de escoamento superficial.

Nesse sentido, a análise morfométrica foi conduzida com base em dados extraídos das ferramentas ArcGIS e HEC-HMS, que possibilitaram a delimitação precisa das bacias e a quantificação dos atributos físicos de cada sub-bacia. A tabela 2 a seguir apresenta, de formato sistematizado, os principais parâmetros morfométricos encontrados, os quais especificamente a base para as análises subsequentes, incluindo o cálculo do tempo de concentração e a simulação do hidrograma de projeto.

Tabela 2: Os principais parâmetros morfométricos.

Parâmetro	Unidade	Subbacia 1	Subbacia 2	Subbacia 3
Área da bacia (A)	km ²	1,22	2,22	1,74
Comprimento do talvegue principal (L)	km	2,66	3,28	3,27
Declividade do talvegue (S)	m/m	0,01554	0,01709	0,01709
Declividade média da bacia (Smed)	m/m	0,0376	0,03267	0,03267
Relevo total da bacia (H)	m	67,6	58,14	58,14
Densidade de drenagem (Dd)	km/km ²	0,02946	0,77534	0,77534

Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Ao analisar as três sub bacias mostra diferenças notáveis no comportamento hidrológico entre elas, afetando diretamente a reação ao fluxo superficial. A Sub Bacia 2 possui a maior superfície de drenagem (2,22 km²) e um dos mais extensos comprimentos de talvegue (3,28 km). Isso, aliado à sua alta densidade de drenagem (0,77534 km/km²), sugere uma infraestrutura hídrica bem estruturada e uma propensão para a rápida concentração do fluxo, aumentando o perigo de inundações em situações extremas de chuva.

A Sub Bacia 3 apresenta similaridades em termos de densidade de drenagem e relevo total (58,14 m), no entanto, possui uma área menor (1,74 km²), o que pode levar a volumes absolutos de escoamento menores, porém com uma dinâmica similar. Em contrapartida, a Sub Bacia 1, mesmo possuindo uma área menor (1,22 km²), apresenta a maior declividade média da bacia (0,0376 m/m) e a maior amplitude altimétrica (67,6 m). Isso indica um fluxo mais veloz e de maior energia, aumentando o perigo de processos erosivos. No entanto, a densidade de escoamento é extremamente reduzida (0,02946 km/km²), o que pode prejudicar a eficácia da drenagem natural e favorecer o acúmulo de água em certas áreas.

4.3. Estimativa de Chuvas Intensas (Equação IDF)

A descoberta do IDF utilizada neste trabalho foi ajustada com base em dados históricos da região da bacia do Piranhas–Açu, e apresentação da forma da equação 14 é :

$$i = \frac{688,22 \cdot TR^{0,119}}{(t + 9,215)^{0,707}} \quad (14)$$

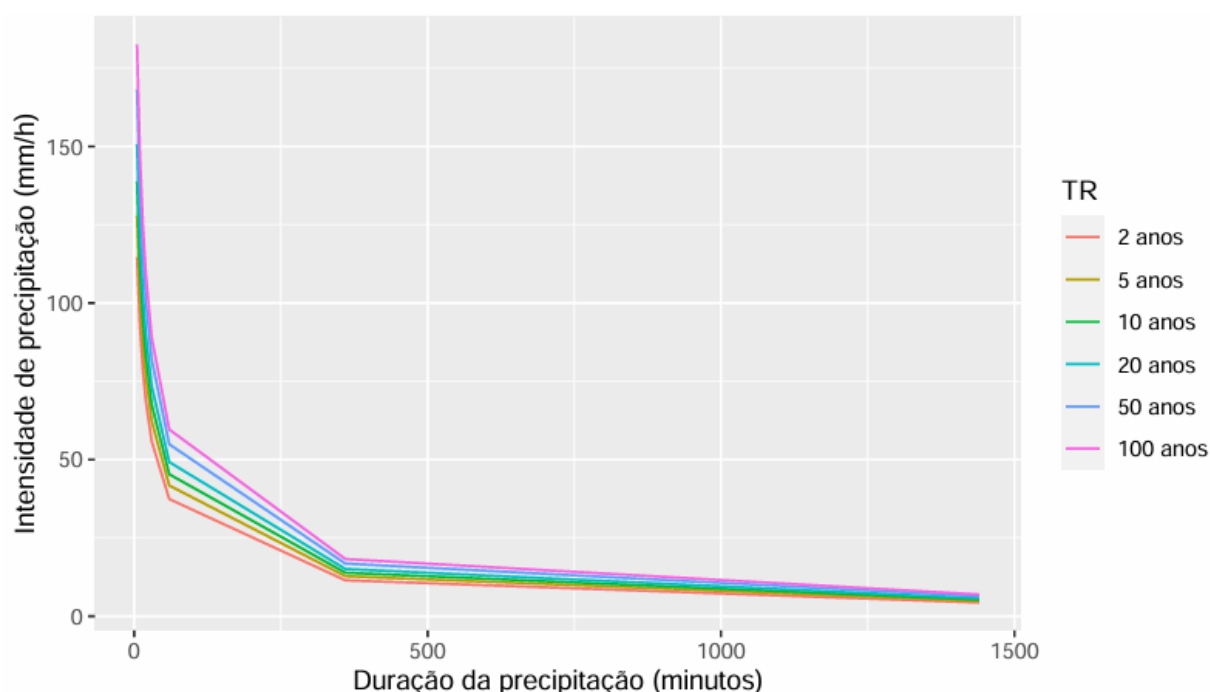
Os parâmetros da equação são:

- K: 688,22
- a: 0,119
- b: 9,215
- c: 0,707.

Essa descoberta foi empregada para estimar as intensidades de ocorrência correspondentes aos tempos de concentração de cada sub-bacia, considerando períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos. Os valores obtidos foram aplicados tanto na estimativa das vazões máximas, via pesquisa racional, quanto na geração de hietogramas para alimentação do modelo hidrológico HEC-HMS, permitindo a simulação dos hidrogramas de projeto. A figura 19, e a aplicação da equação de IDF, com os valores de máximas de chuvas durante 30 anos, entre os anos de 1991 até 2019.

Imagem 19: Representação de curva IDF de 30 anos, com os dados de 1991 até 2019.

Curvas IDF



Fonte: CAM IDF adaptado pela pesquisadora (2025).

4.4. Cálculo do Tempo de Concentração.

4.4.1. Curve Number (CN)

O Curve Number (CN) tem sido mostrado um instrumento prático e amplamente aceito para estimar o escoamento superficial a partir de eventos de ocorrência, principalmente em regiões com escassez de dados observacionais. Segundo Tucci (2005), o método SCS, do qual o CN faz parte, permite representar de maneira simplificada, porém robusta, a resposta hidrológica de uma bacia, considerando características do solo, uso e cobertura do solo. No contexto da presente da pesquisa, os valores de CN foram utilizados para calcular a eficácia nas sub-bacias delimitadas, que se localizam dentro da zona urbana da cidade de Assú.

Tabela 3: Valores de CN para os anos de 1985 e 2022.

VALORES DE CN	ANO 1985	ANO 2022
Sub-bacia 1	77	88
Sub-bacia 2	78	89
Sub-bacia 3	78	88

Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

A comparação dos valores médios do CN entre os anos de 1985 e 2022 reforça a importância desse índice como ferramenta de diagnóstico hidrológico. Como destacado por Chow et al. (1888), alterações nos valores de CN ao longo do tempo evidenciaram mudanças nos padrões de uso da terra que afetaram diretamente o escoamento. O aumento dos valores arrecadados em 2022, maiores que o de 1985, sugere uma redução da capacidade de infiltração do solo, reduzidos devido aos processos de urbanização e degradação ambiental.

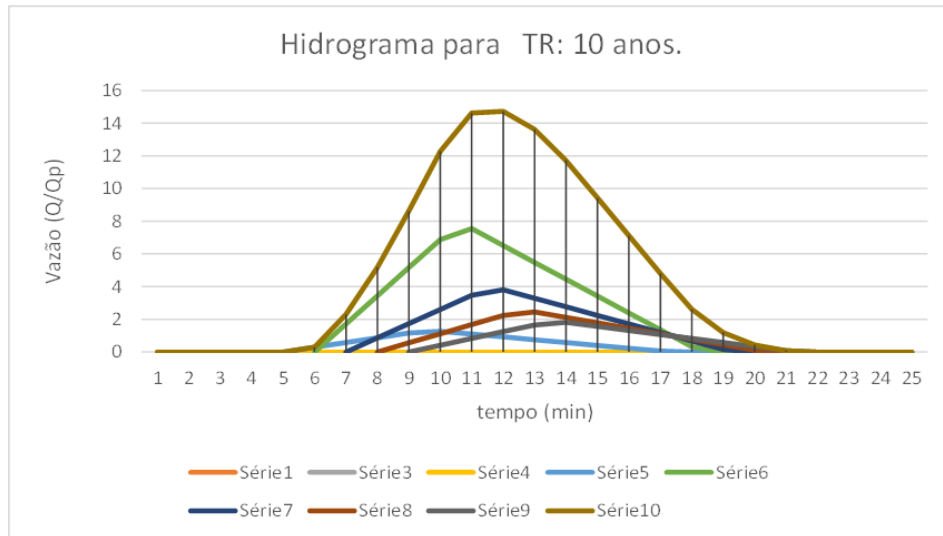
4.4.2. Hidrogramas de projeto

Com relação aos hidrogramas, foram gerados 3 hidrogramas de projeto para cada período de anos, pois foi feita a análise para 10,50 e 100 anos, para os CN de 1985 e 2022. Para evidências, como é importante a análise e diagnósticos hidrológico, para execução de projetos de drenagem.

4.4.2.1. Hidrogramas da Sub-bacia 1:

- Ano 1985:

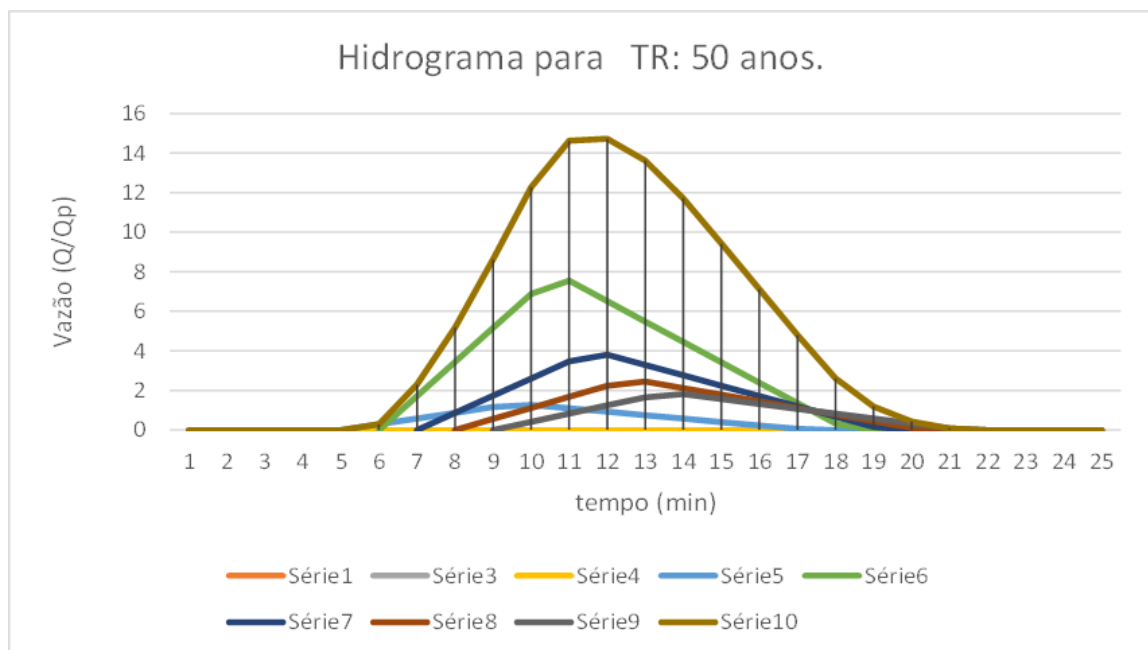
Figura 20 - Hidrograma 10 anos da sub-bacia 1,1985



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

O hidrograma (figura 20), revela que a sub-bacia 1, com área de 1,22 km² e CN 85, apresenta uma resposta rápida à precipitação, alcançando o pico de vazão em aproximadamente 12 minutos. A elevada vazão e o curto tempo de concentração apontam para uma baixa capacidade de infiltração, característica comum em regiões urbanizadas. Esses fatores destacam a importância de sistemas de drenagem adequadamente projetados para prevenir problemas como alagamentos.

Figura 21 - Hidrograma 50 anos da sub-bacia 1,1985

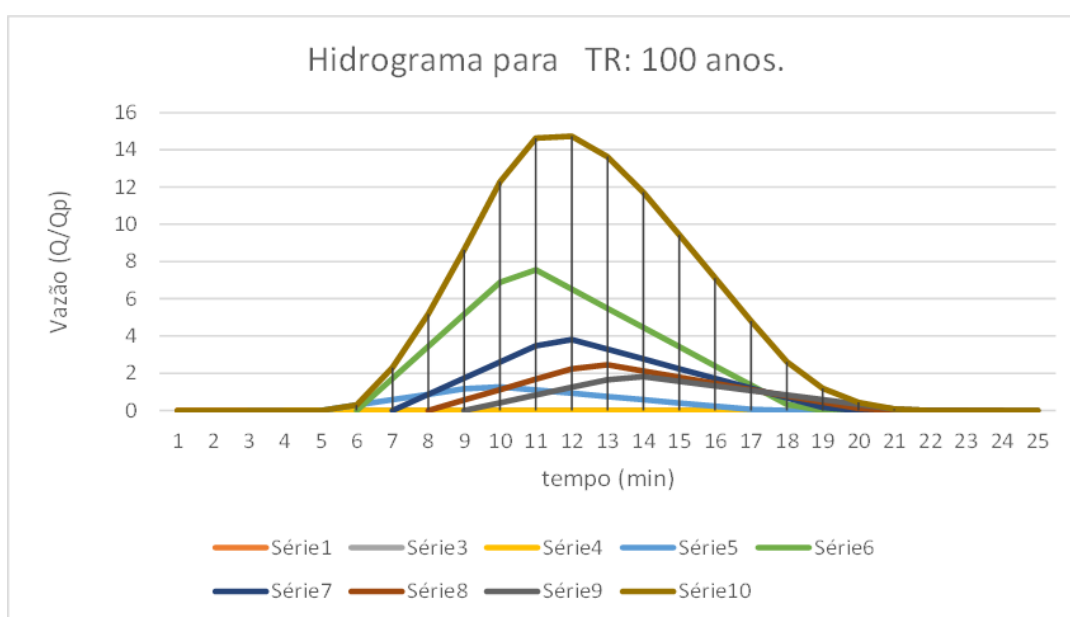


Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Com um Tempo de Recorrência (TR) de 50 anos, o hidrograma (figura 21) mantém tanto a forma, quanto o tempo de pico observados no TR de 10 anos, mostrando, entretanto, um aumento sutil na espessura das áreas sob a curva. Esse comportamento indica um volume total maior de escoamento, apesar de o pico relativo (Q/Q_p) permanecer próximo de 15. As características incluem um pico constante em torno de 15 Q/Q_p e uma base ligeiramente mais ampla, com início e fim similares (de 7 a 21 minutos).

Além disso, os volumes das séries individuais, desde Série 1 até Série 10, aumentaram proporcionalmente ao incremento da precipitação, evidenciando que a transição do TR de 10 para 50 anos, embora não altere o tempo de resposta nem o pico normalizado, provoca uma elevação do volume escoado. Isso representa um cenário mais crítico para a infraestrutura existente e demanda maior capacidade de retenção ou condução.

Figura 22- Hidrograma 100 anos da sub-bacia 1,1985

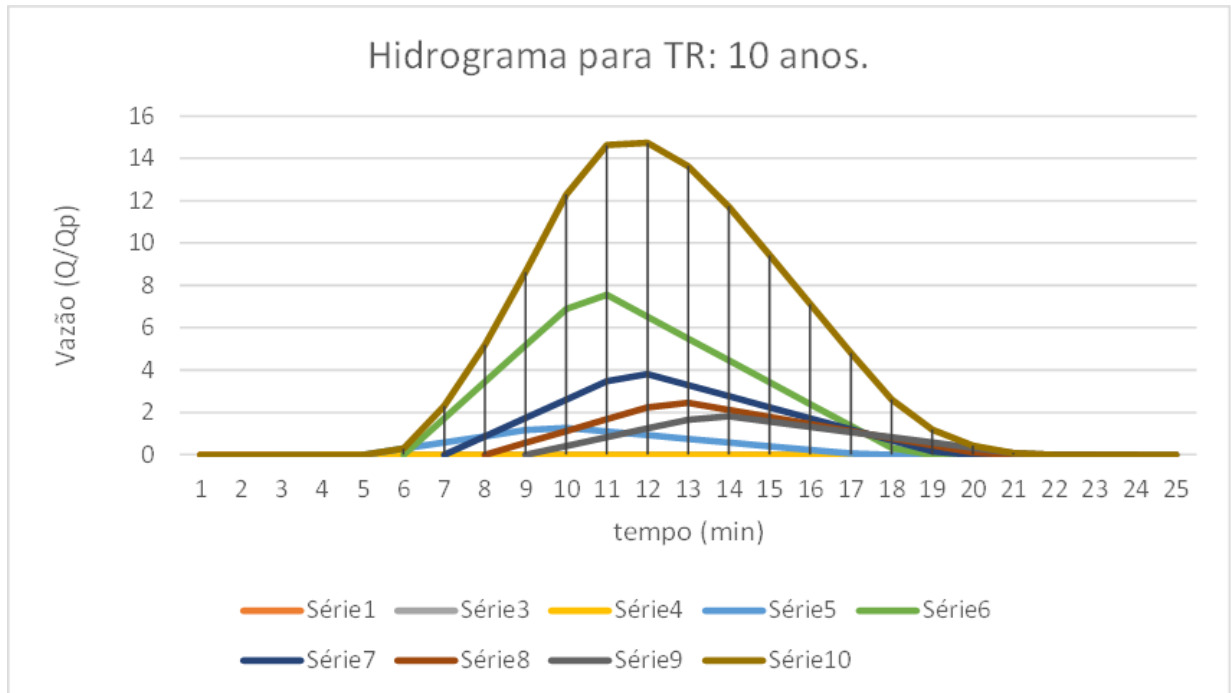


Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

O hidrograma (figura 22) correspondente ao Tempo de Recorrência (TR) de 100 anos mantém a mesma estrutura e o tempo de pico em cerca de 11 minutos (aproximadamente 15 Q/Q_p), observado nos cenários anteriores. No entanto, distingue-se por apresentar a maior área sob a curva, evidenciando o maior volume total de escoamento. Essa estabilidade na forma e no pico, reforça que as alterações percebidas estão essencialmente relacionadas ao volume, com a contribuição individual de cada série de escoamento tornando-se mais significativa.

- Ano 2022.

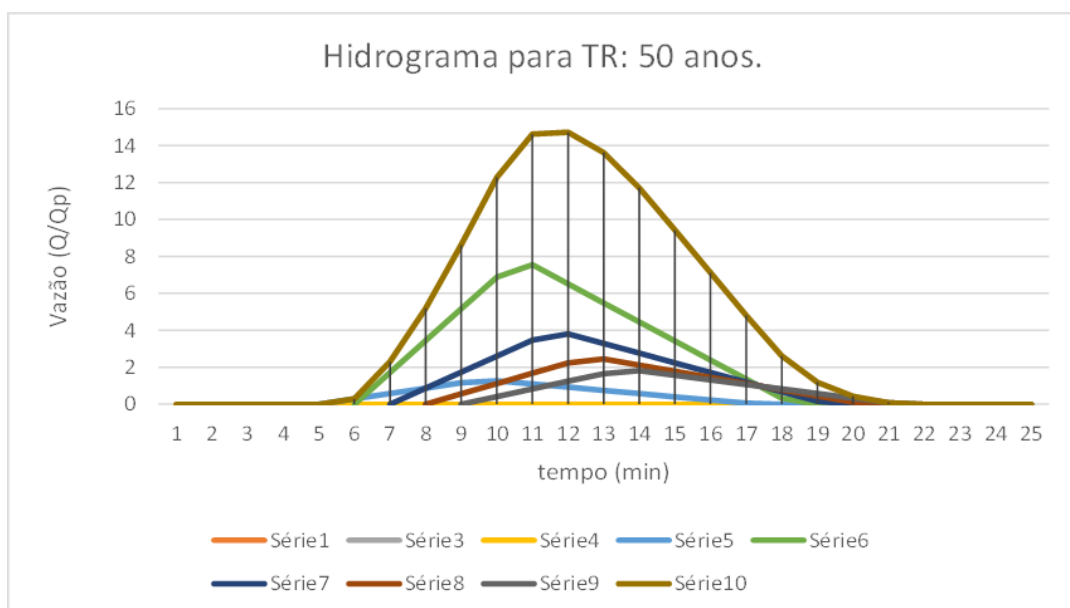
Figura 23- Hidrograma 10 anos da sub-bacia 1,2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Este hidrograma (Figura 23), ilustra a resposta da sub-bacia 1 a um evento de chuva de menor intensidade, com uma probabilidade de 10% de ocorrer anualmente. Com uma área de 1,77 km² e um CN de 89, a bacia apresenta uma predisposição para gerar um escoamento superficial acelerado. O pico de vazão, em torno de 10,05 m³/s, resulta da interação entre a área de contribuição e a intensidade da chuva correspondente a um período de retorno de 10 anos.

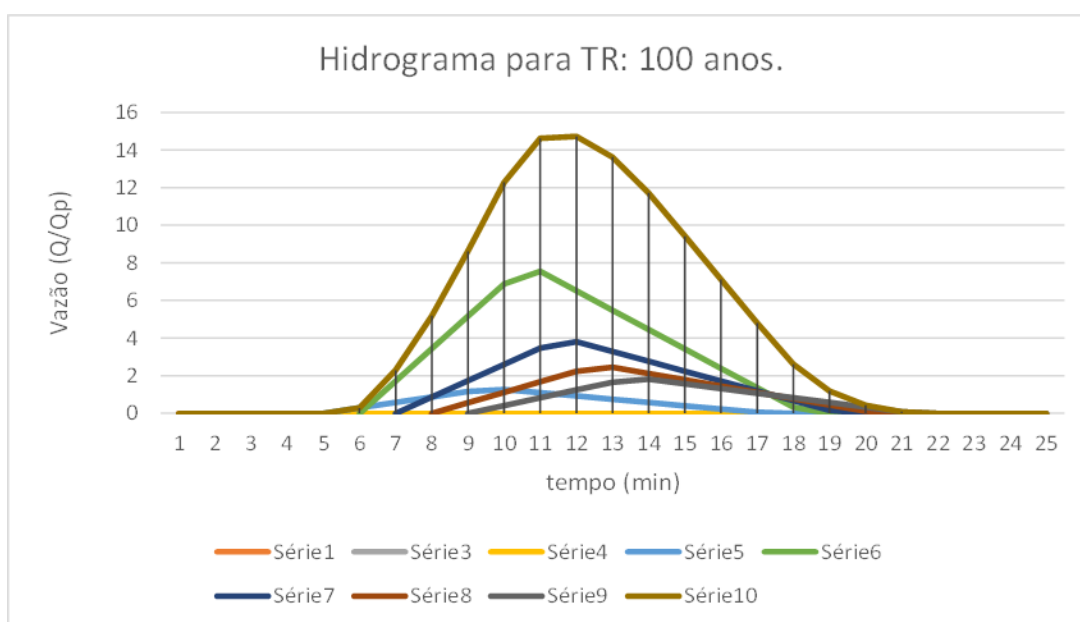
Figura 24 - Hidrograma 50 anos da sub-bacia 1,2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Este hidrograma (figura 24), representa a resposta da sub-bacia 1 a um evento de chuva mais severo, com uma chance de 2% de ocorrer anualmente. A vazão de pico neste gráfico é significativamente maior do que a do Gráfico 1, principalmente por causa do tempo de retorno maior. Mesmo que o CN seja o mesmo (89), a maior intensidade da chuva para um TR de 50 anos resulta em um volume maior de escoamento e, conseqüentemente, em um pico de vazão mais elevado, em 12 min, aproximadamente 15 m³/s.

Figura 25 - Hidrograma 100 anos da sub-bacia 1, 2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

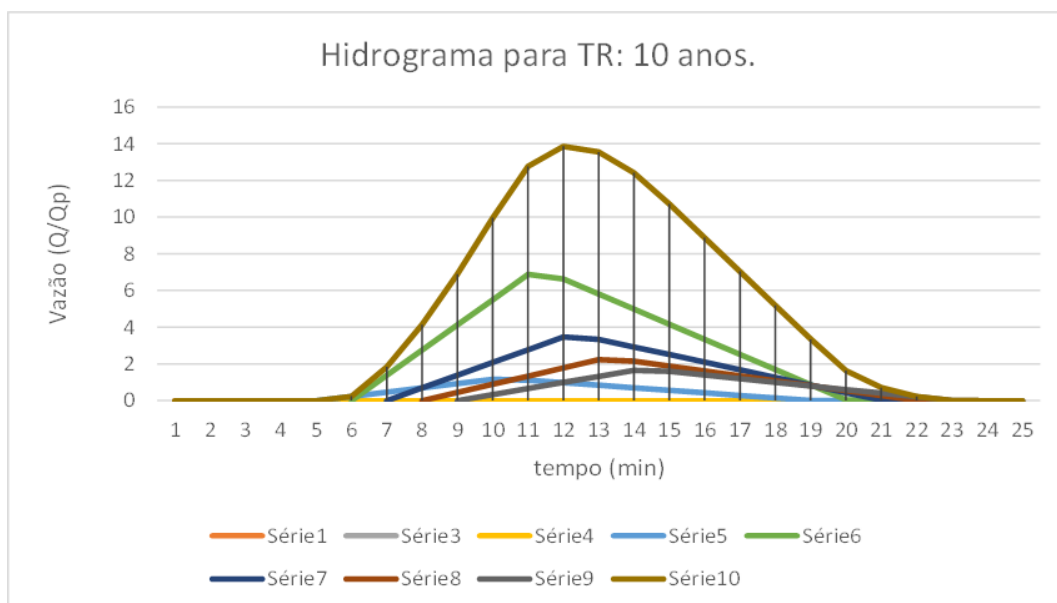
Na sub-bacia 1, podemos perceber que houve uma queda significativa nas vazões de pico dos hidrogramas entre 1985 e 2022, em todos os períodos de retorno considerados (10, 50 e 100 anos).

Essa diminuição provavelmente está relacionada à redução nos valores do Curve Number ao longo do tempo, o que indica uma possível mudança na cobertura do solo. Segundo Tucci (2005), valores menores de CN indicam que o solo tem maior capacidade de reter água, o que diminui o escoamento direto e suaviza as vazões máximas. Essa mudança ao longo do tempo fica mais evidente no período de retorno de 100 anos, onde a diferença entre os picos é mais marcada, sugerindo que, mesmo em eventos extremos, a bacia passou a responder de forma mais moderada.

4.4.2.2. Hidrogramas da Sub-bacia 2:

- Ano 1985:

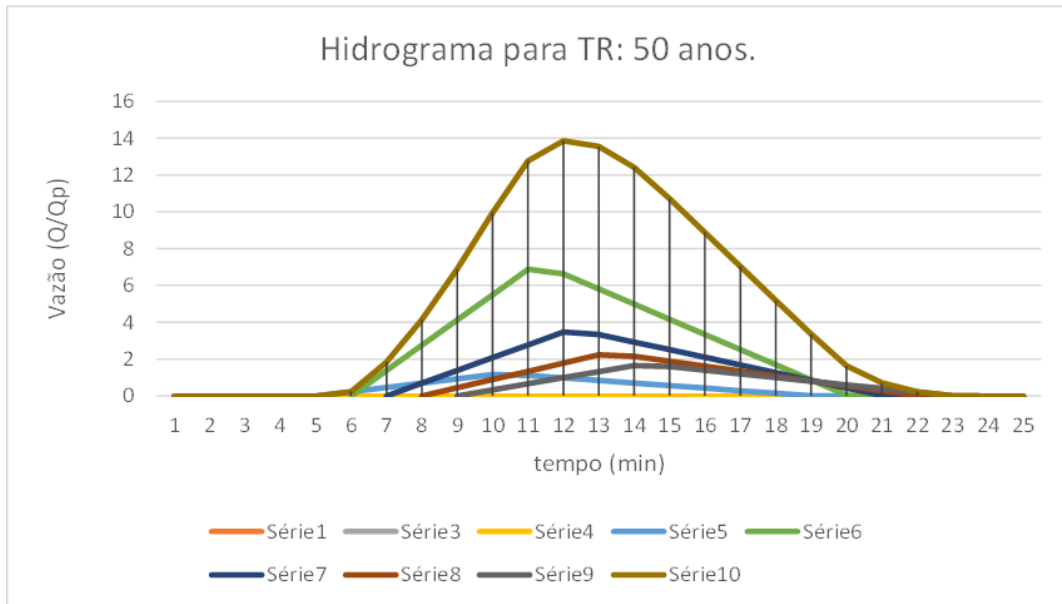
Figura 26 - Hidrograma 10 anos da sub-bacia 2,1985.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Este Hidrograma (figura 26), representa a resposta da sub-bacia 2 para um evento de chuva com um tempo de retorno (TR) de 10 anos. O CN de 77 indica um cenário de uso do solo de 1985, com moderada impermeabilidade, provavelmente uma área com urbanização inicial. A análise hidrológica aponta para uma vazão de pico de aproximadamente 8,5m³/s.

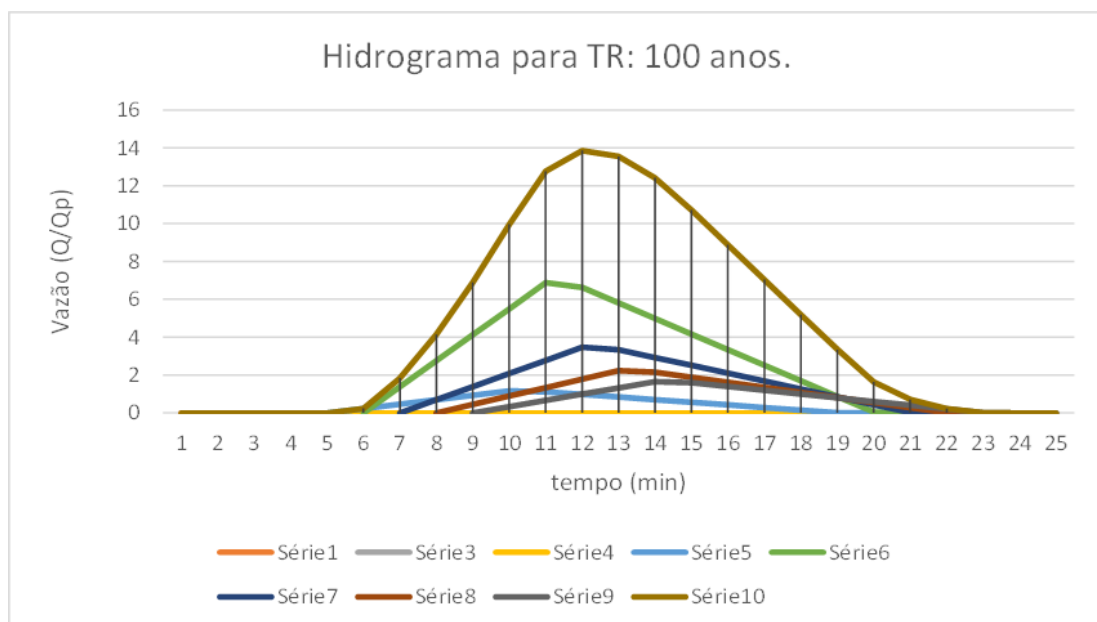
Figura 27 - Hidrograma 50 anos da sub-bacia 2,1985.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025)

Este hidrograma (figura 27), mostra a resposta da sub-bacia 1 para um evento de chuva severo, com tempo de retorno (TR) de 50 anos. O CN de 77 reflete o uso do solo de 1985, com um nível de impermeabilidade moderado. A análise hidrológica aponta uma vazão de pico de aproximadamente $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$, que ocorre em cerca de 140 minutos.

Figura 28 - Hidrograma 100 anos da sub-bacia 2, 1985.



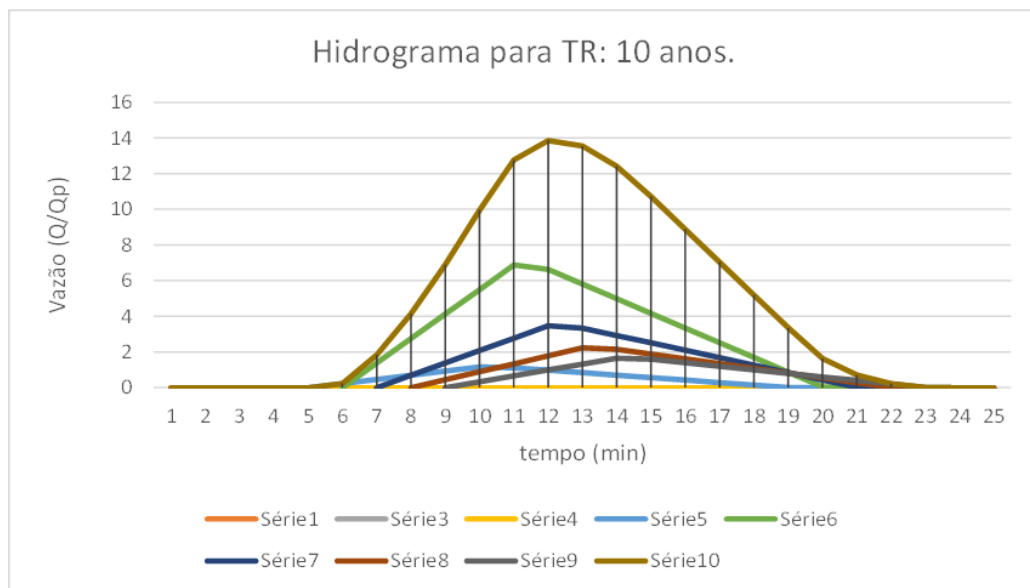
Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Este hidrograma (figura 28), ilustra a resposta da Sub-Bacia 2 a um evento de chuva extremo, com uma probabilidade de 1% de ocorrer em qualquer ano. A curva ascendente do

hidrograma mostra um aumento rápido da vazão, atingindo um pico de aproximadamente 11,5m³/s em cerca de 140 minutos. Após esse ponto, a curva descendente demonstra a diminuição gradual da vazão até retornar aos níveis iniciais. O hidrograma reflete a dinâmica do escoamento superficial da bacia sob uma condição de chuva severa, baseada em um CN de 77 que caracteriza a ocupação do solo de 1985.

- Ano 2022:

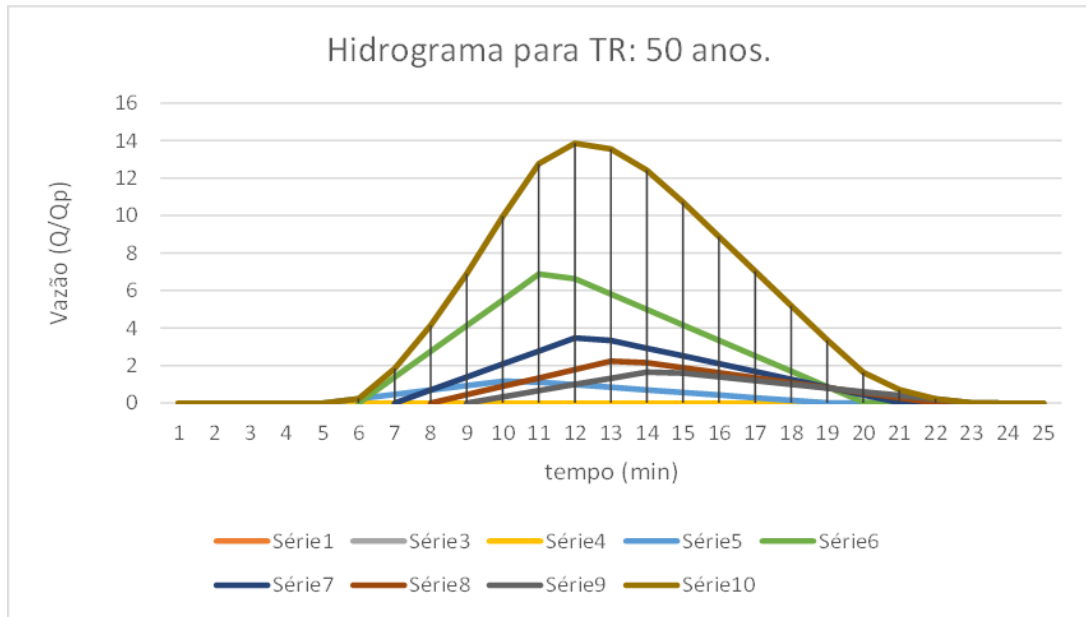
Figura 29- Hidrograma 10 anos da sub-bacia 2,2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

A análise hidrológica (figura 29), mostra uma vazão de pico de aproximadamente 10,1m³/s, que ocorre em cerca de 140 minutos. Comparado a um cenário menos urbanizado, este hidrograma demonstra como o aumento da impermeabilidade (CN) gera um pico de vazão maior, mesmo para eventos de chuva menos extremos.

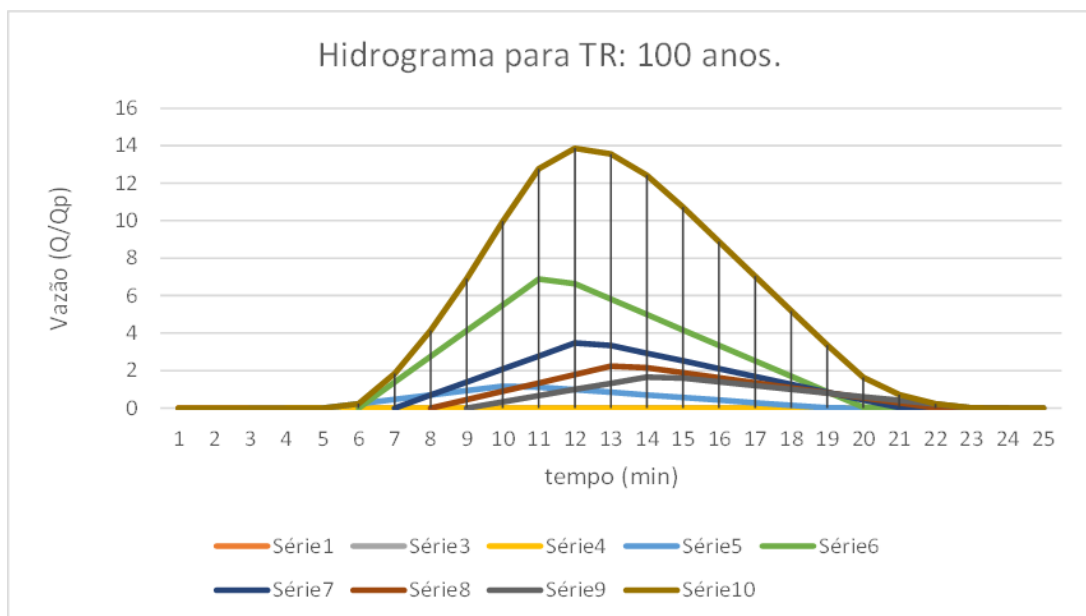
Figura 30 - Hidrograma 50 anos da sub-bacia 2,2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Ao analisar o hidrograma (figura 30), fazendo uma comparação com o hidrograma de 10 anos, este cenário apresentaria uma vazão de pico significativamente maior que 10,1m³/s, mas o tempo de pico se manteria em cerca de 140 minutos. Isso demonstra o impacto da intensidade da chuva (TR) na vazão, enquanto a dinâmica de tempo da bacia (tempo de pico) é mais estável.

Figura 31 - Hidrograma 100 anos da sub-bacia 2,2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

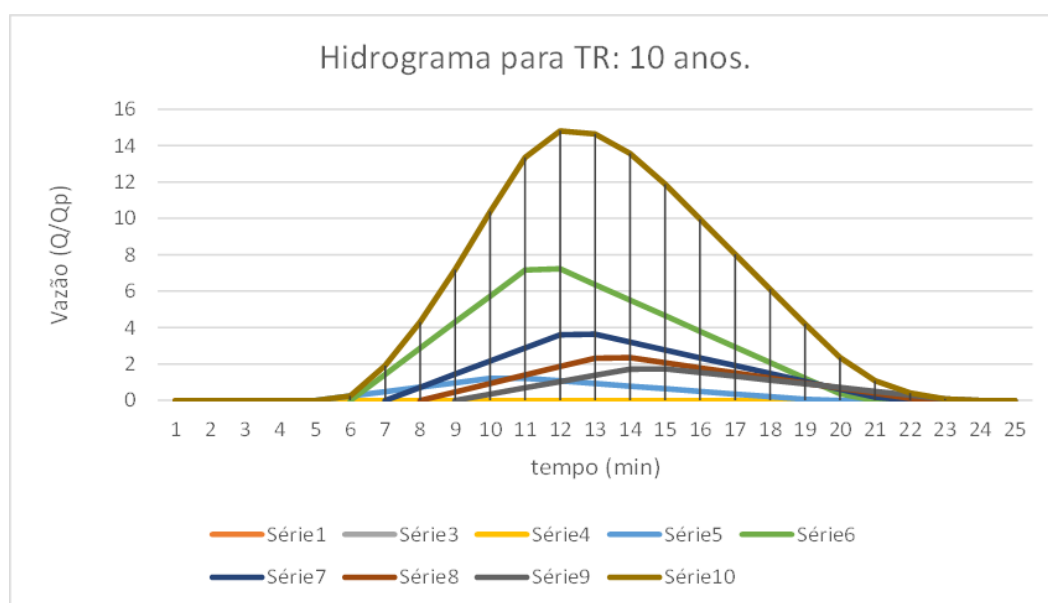
A sub-bacia 2 apresenta um comportamento intermediário. Nos hidrogramas de 1985, as vazões de pico são levemente superiores às de 2022, o que está ligado à alteração no valor de CN, devido ao uso e ocupação do solo, pois a mesma se encontra na zona mais urbanizada da cidade.

Com relação a sub-bacia 1 é refletindo alterações menos expressivas nas condições de uso e cobertura do solo. A densidade de drenagem relativamente baixa da sub-bacia 2, associada ao seu relevo moderado, pode ter favorecido um escoamento mais distribuído no tempo, contribuindo para hidrogramas mais suaves. Segundo Chow et al. (1994), essa suavização está relacionada ao maior tempo de concentração e à morfologia da bacia, que afetam diretamente a forma do hidrograma.

4.4.2.3. Hidrogramas da Sub-bacia 3:

- Ano 1985

Figura 32: Hidrograma de 10 anos da sub-bacia 3, 1985.

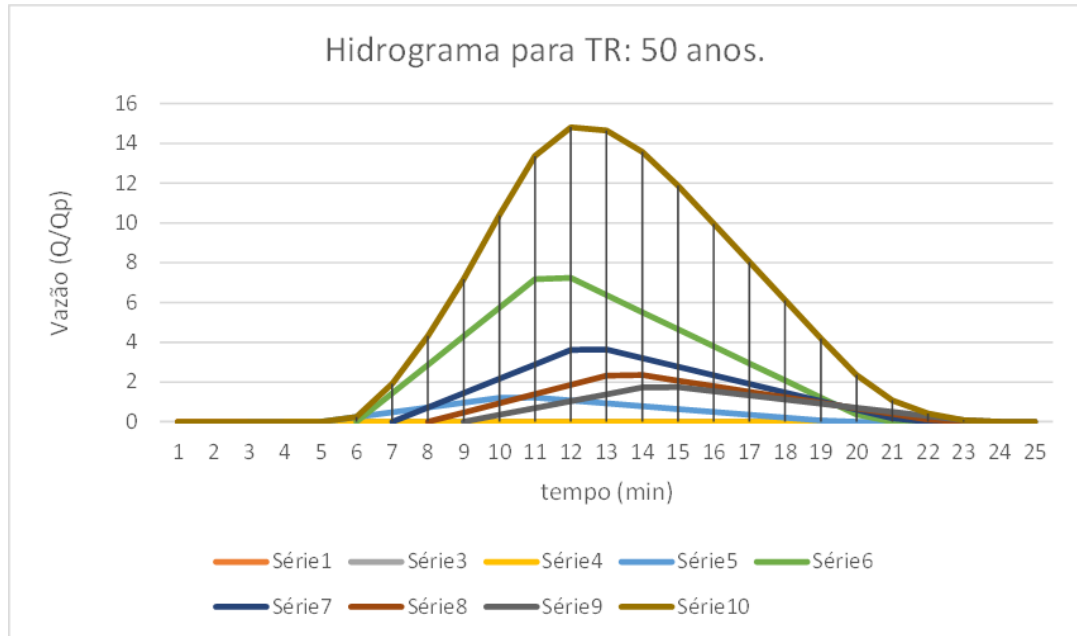


Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Para um evento de chuva de intensidade moderada com TR 10 anos em 1985, como mostra no hidrograma acima (figura 32), a Sub-Bacia 3, com 1,74 km² e talvegue de 3,27 km, e um CN 78 (indicando sua ocupação na época), apresentou um pico de vazão de escoamento superficial de 8,0 m³/s, que ocorreu 150 minutos após o início da chuva. Essa vazão é relativamente baixa em comparação a outras bacias estudadas, e o tempo de pico mais

prolongado sugere uma resposta hidrológica mais lenta, influenciada por suas características físicas.

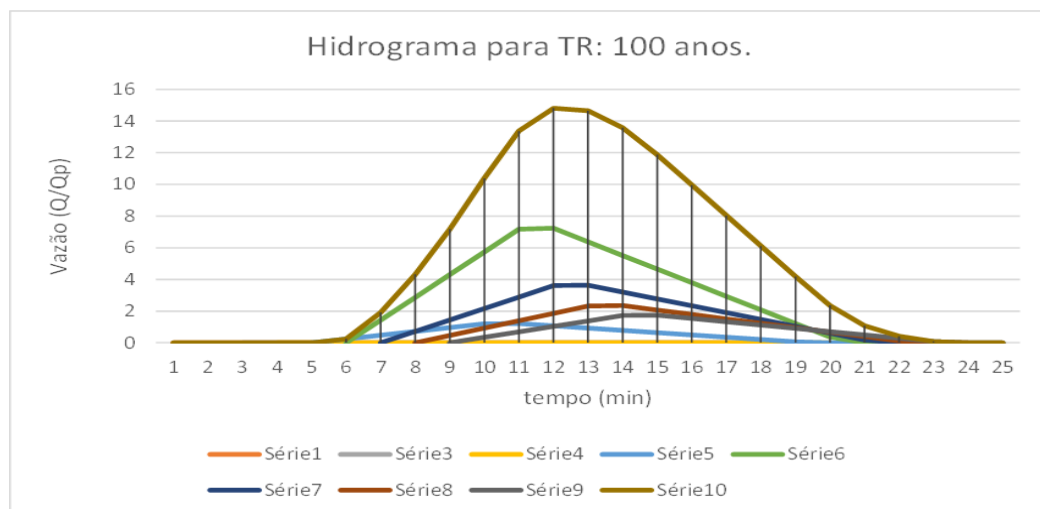
Figura 33: Hidrograma de 50 anos da sub-bacia 3,1985



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025)

Para esse tempo de retorno é apresentado no hidrograma (figura 33), podemos destacar uma vazão de pico seria substancialmente maior que $8,0\text{m}^3/\text{s}$, com o tempo de pico permanecendo em 150 minutos, isso destacando o quanto a relação entre a permeabilização e o escoamento, em locais mais urbanizados.

Figura 34: Hidrograma de 100 anos da sub-bacia 3,1985

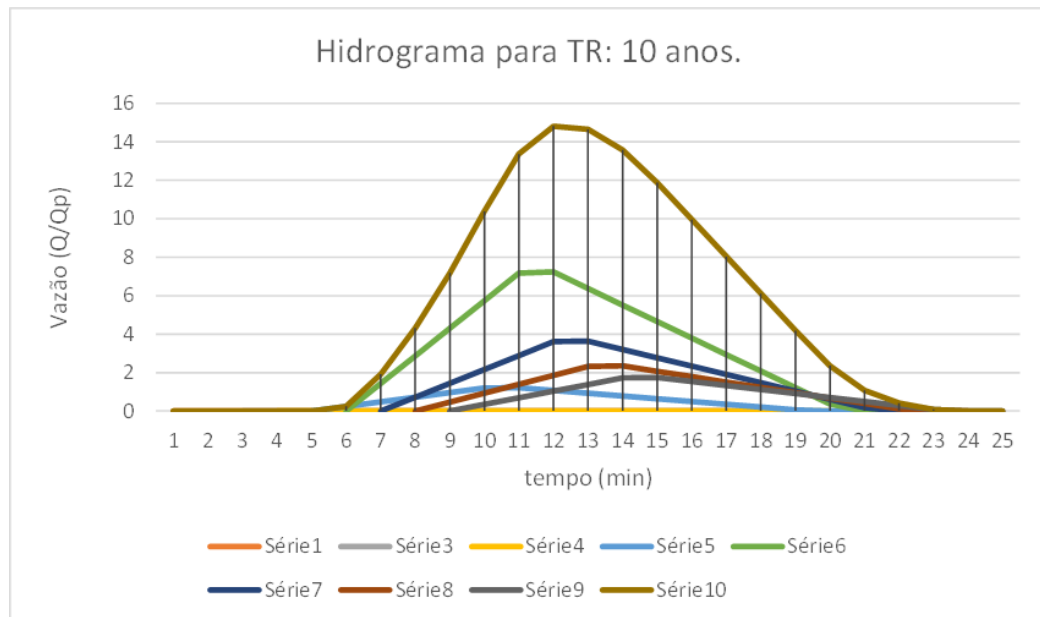


Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

Ao analisar o hidrograma (figura 34), indica que a vazão de pico seria significativamente maior que $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão para o TR de 10 anos) devido à intensidade da chuva de 100 anos. No entanto, o tempo de pico permaneceria em cerca de 150 minutos, pois é uma característica intrínseca da bacia. Isso demonstra que o aumento do TR leva a um aumento acentuado da vazão de pico, sem alterar o tempo de resposta da bacia.

- Ano 2022:

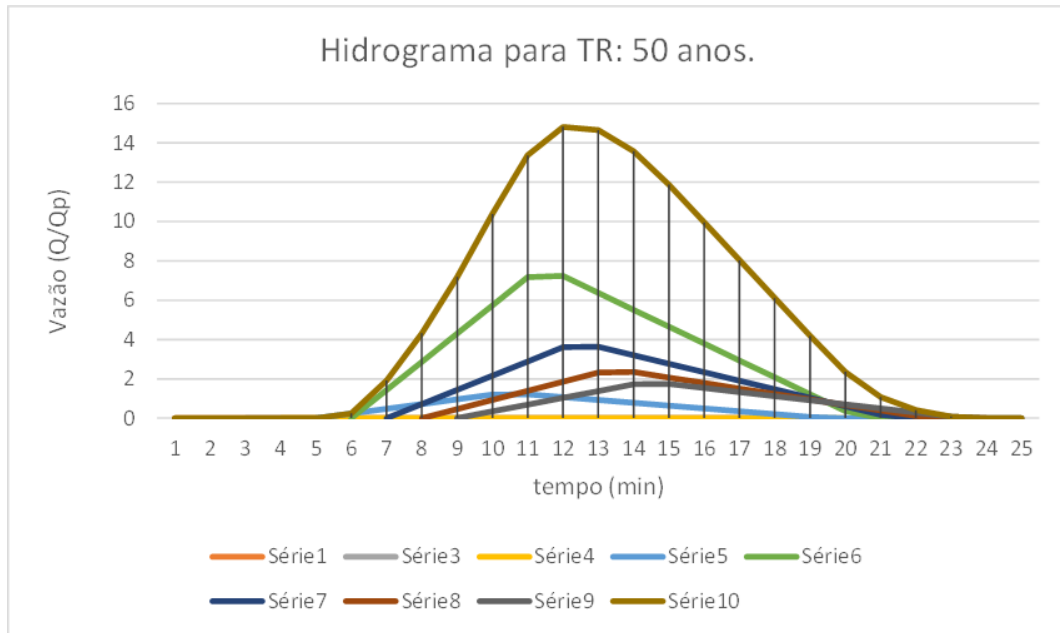
Figura 35: Hidrograma de 10 anos da sub-bacia 3, 2022.



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

A análise do hidrograma (figura 35), revela que a vazão de pico atinge aproximadamente $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$, ocorrendo em cerca de 150 minutos. O aumento do CN, de 78 em 1985 para 89 em 2022, causou um significativo acréscimo na vazão de pico, mesmo em eventos de chuva moderados, evidenciando claramente o impacto da impermeabilização do solo no aumento do risco inerente de inundações.

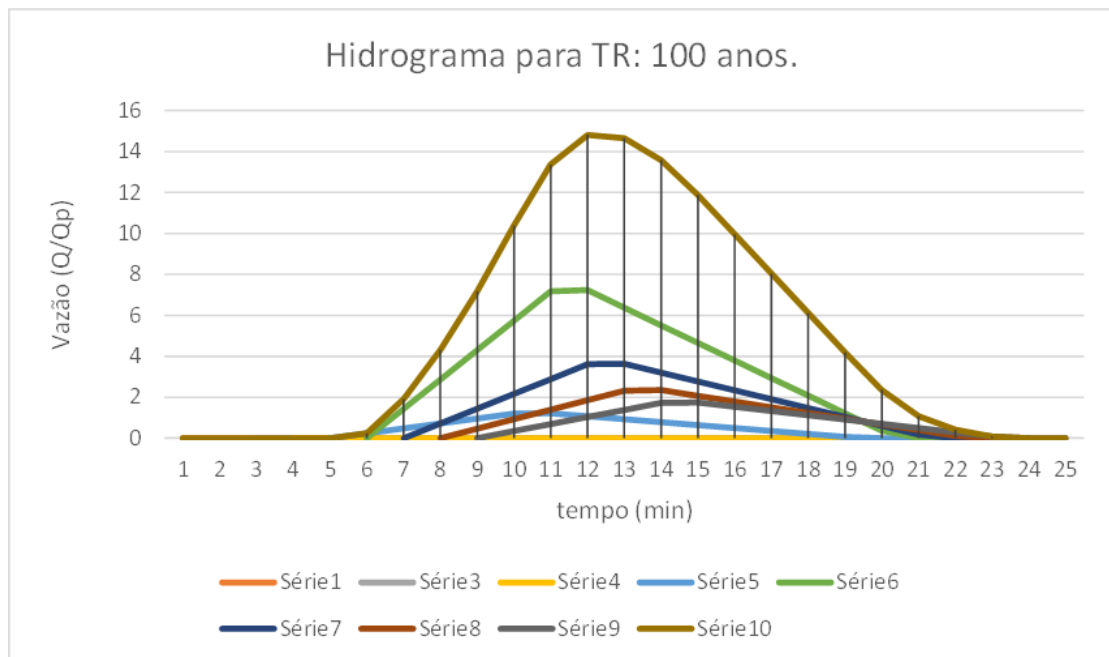
Figura 36: Hidrograma de 50 anos da sub-bacia 3, 2022.



Fonte: Elaborada pela pesquisadora (2025).

Ao analisar o hidrograma, percebe-se que a vazão de pico seria substancialmente superior a $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente ao pico do cenário de 10 anos. Contudo, o tempo de pico permanece próximo a 150 minutos, uma característica associada às condições de estiagem e seca da bacia. Esse comportamento evidencia que o aumento do tempo de retorno em uma bacia urbanizada provoca um aumento expressivo na vazão de pico.

Figura 37: Hidrograma de 100 anos da sub-bacia 3,2022.



Fonte: Elaborada pela pesquisadora (2025).

Na sub-bacia 3, observa-se um padrão contrário ao das outras bacias. Os hidrogramas de 2022 mostram um aumento nas vazões de pico, especialmente para os períodos de retorno de 10 e 50 anos, quando comparados a 1985. Esse aumento segue a elevação do Curve Number ao longo do tempo, o que existe a degradação do solo, crescimento urbano e maior utilização humana da área.

Conforme indica Tucci (2005), uma elevação no CN está ligada a uma redução na infiltração e a um aumento do escoamento superficial, resultando em hidrogramas com maior magnitude e um tempo de resposta mais rápido. A densidade elevada de drenagem da bacia também influencia esse comportamento mais concentrado e intenso do hidrograma, destacando a necessidade de implementar medidas de mitigação para controlar enchentes.

4.5. Uso do Solo e Cobertura Vegetal

O mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal mostra mudanças significativas entre 1985 e 2022 nas três sub-bacias que foram estudadas. No ano de 1985, predominavam regiões com cobertura natural, incluindo vegetação nativa e solo pouco compactado, o que indicava uma capacidade maior de infiltração e, por consequência, valores reduzidos de Curve Number. Essa situação é compatível com os hidrogramas desse período, que apresentaram picos de vazão menores e tempos de resposta mais longos.

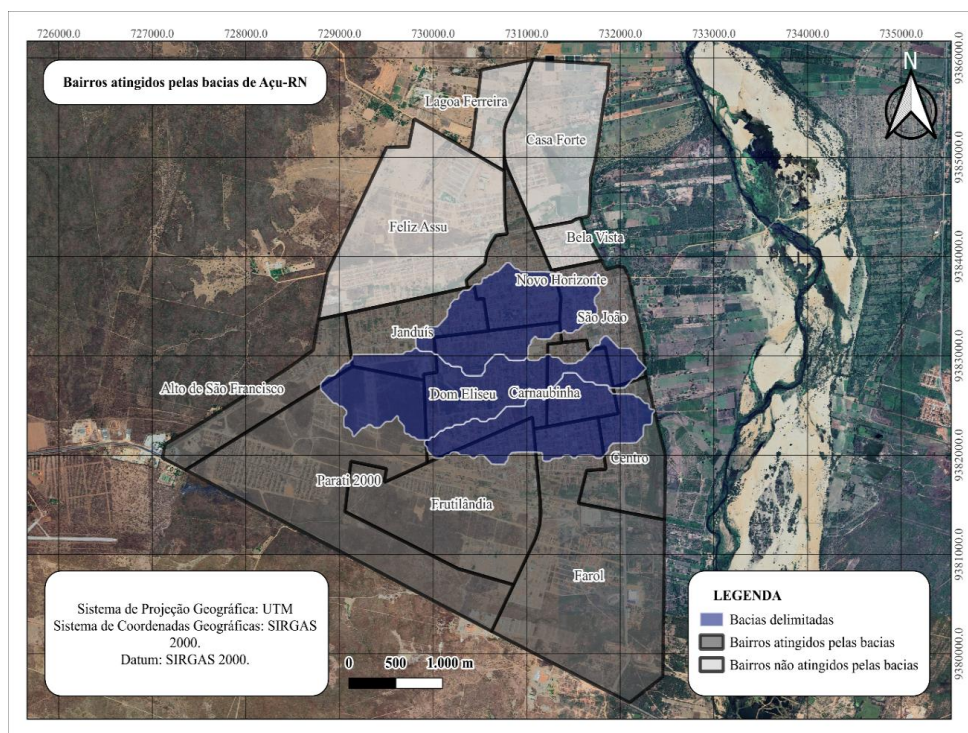
Por outro lado, em 2022, houve um aumento notável de áreas urbanizadas, com ênfase na transformação de vegetação em superfícies destinadas a práticas agrícolas intensivas ou urbanização dispersa. Essa alteração no uso do solo causou um acréscimo nos valores médios de Curve Number, especialmente nas sub-bacias 2 e 3, resultando em um aumento do escoamento superficial. Os Hidrogramas deste ano corroboram essa tendência, mostrando picos de vazão superiores e um tempo de concentração reduzido.

Tal relação é teoricamente apoiada por Tucci (2005) e SCS (1986), que afirmam que a utilização da terra afeta diretamente a resposta hidrológica da bacia, sendo crucial para o planejamento de obras de drenagem urbana. O mapa de uso e ocupação com relação a bairros aonde as sub-bacias estão localizados (figura 33), mostram exatamente a relação de infiltração, pois se trata dos bairros mais urbanizados, com calçamentos, asfalto e alto nível de construções.

Assim, o mapeamento do uso do solo e da cobertura vegetal desempenha um papel fundamental na análise hidrológica integrada, permitindo relacionar as mudanças espaciais com as variações temporais nos parâmetros hidrológicos, o que impacta diretamente a elaboração

dos hidrogramas de projeto e a tomada de decisões técnicas para o controle de inundações e a preservação ambiental.

Figura 38: O mapa de bairros atingidos pelas sub-bacias



Fonte: Elaborado pela pesquisadora (2025).

A presente pesquisa promoveu uma caracterização hidrológica detalhada de três sub-bacias localizadas na área urbana do município de Assu/RN, com o objetivo de embasar tecnicamente intervenções voltadas à drenagem urbana. A investigação se estruturou a partir da integração de dados climáticos, morfométricos, pedológicos e de uso e ocupação do solo, utilizando metodologias como o método de SCS-CN e a Equação de Chuvas Intensas (IDF).

Os resultados obtidos evidenciam que a urbanização desordenada tem provocado alterações significativas na dinâmica hidrológica local, sobretudo na capacidade de infiltração do solo e no aumento do escoamento superficial. A análise temporal revelou mudanças expressivas nos valores do Curve Number (CN), que passaram a refletir uma maior impermeabilização do solo nas sub-bacias analisadas, elevando, consequentemente, as vazões de pico em eventos extremos de precipitação.

A modelagem dos hidrogramas de projeto indicou uma variação notável entre as sub-bacias ao longo do período analisado (1985–2022). A sub-bacia 2 apresentou o maior aumento absoluto da vazão de pico, passando de 7,06 m³/s em 1985 para 10,40 m³/s em 2022, o que corresponde a um acréscimo de aproximadamente 47,32%. Em contraposição, a sub-bacia 1 registrou uma redução da vazão de pico, de 3,42 m³/s para 2,40 m³/s (queda de cerca de

29,82%), resultado que pode estar relacionado a menor densidade de construções urbanas. Já a sub-bacia 3 apresentou um crescimento expressivo, de 6,78 m³/s para 9,27 m³/s, equivalente a um aumento de 36,74%.

Esses resultados demonstram que a resposta hidrológica das bacias é fortemente condicionada pelas transformações no uso e cobertura do solo, refletidas na variação do CN médio. As bacias com maior incremento do CN ,indicando maior impermeabilização,foram justamente aquelas que apresentaram os maiores aumentos nas vazões de pico, intensificando os riscos associados a alagamentos e sobrecarga do sistema de drenagem urbana.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada dos parâmetros morfológicos, climáticos e hidrológicos permitiu não apenas quantificar as alterações hidrodinâmicas ocorridas nas sub-bacias urbanas de Assú, mas também identificar áreas prioritárias para a implementação de soluções técnicas.

A caracterização hidrológica das três sub-bacias urbanas de Assú-RN permitiu identificar que a cidade apresenta vulnerabilidade elevada a eventos de chuva intensa, com histórico de alagamentos severos em anos como 1985, 2008 e 2009. As análises indicaram valores de Curve Number (CN) elevados, especialmente para o ano de 2022, valor de CN de 89, o que evidencia elevada impermeabilização e baixa capacidade de infiltração do solo em áreas urbanizadas. A equação IDF elaborada para o município, a partir de séries históricas de 1991 a 2019, mostrou que eventos de curta duração e alta intensidade, como chuvas de 10 minutos com intensidades acima de 140 mm/h para períodos de retorno de 50 a 100 anos, representam riscos significativos para o sistema urbano. Os hidrogramas de projeto revelaram tempos de concentração curtos, entre 16 e 27 minutos, o que confirma a rápida resposta das bacias e o potencial para picos de vazão elevados.

No contexto analisado, o sistema de drenagem pluvial da cidade é praticamente inexistente, restringindo-se a poucos canais e galerias insuficientes para conduzir as vazões estimadas. Diante disso, as estruturas saneamento básico e demais medidas não estruturais assumem papel estratégico, pois têm como objetivo principal favorecer a infiltração, retardar o escoamento superficial e promover o manejo sustentável das águas pluviais. Intervenções como pavimentos permeáveis, jardins de chuva, bacias de retenção e recuperação de áreas verdes podem reduzir a magnitude dos picos de vazão e mitigar alagamentos, especialmente quando associadas a obras de drenagem convencionais.

O município de Assú carece de uma gestão territorial que incorpore critérios hidrológicos e ambientais nas decisões de uso do solo. Os modelos desenvolvidos neste estudo oferecem parâmetros técnicos consistentes para o dimensionamento de projetos de drenagem, promovendo maior eficiência no controle de cheias e maior resiliência urbana frente aos eventos extremos de precipitação, que tendem a se intensificar com as mudanças no regime hidrológico atuais.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA.** Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023. Brasília: ANA, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA.** Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu: Resumo Executivo. Brasília: ANA, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA.** Hidroweb. Brasília: ANA, 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA.** Dados de séries históricas de variações da Estação Mendubim de Baixo. Brasília: ANA, 2023.
- CARTER, R. W.** Magnitude and frequency of floods in suburban areas. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1543-B, 1961.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W.** Hidrologia aplicada. Porto Alegre: McGraw-Hill, 1988.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F.** Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2013.
- COSTA, A. M. C. da.** Inundações e vulnerabilidade socioambiental: uma análise das áreas de risco no Vale do Açu/RN. Natal: UFRN, 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia).
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil.** Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM, 2006.
- CBH-PPA – Comitê da Bacia Hidrográfica do Piancó–Piranhas–Açu.** Caracterização da Bacia Hidrográfica. 2022.
- DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas.** Relatório Técnico: Diagnóstico Hidroclimático do Semiárido. Fortaleza: DNOCS, 2012.
- DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas.** Relatório Técnico do Sistema Curema-Açu. Fortaleza: DNOCS, 2020.
- EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte.** Banco de Dados Meteorológicos. 2025.
- ESTADOS UNIDOS. Corpo de Engenheiros do Exército.** HEC-HMS: Sistema de Modelagem Hidrológica, Manual do Usuário – Versão 4.13. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2023.
- ESRI.** ArcGIS Desktop: versão 10.8 [software]. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2020.
- FERREIRA, M. A.** Mudanças no uso da terra e impactos hidrológicos no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, n. 2, 2021.

FERREIRA, I. C. P. et al. Análise Espacial da Variabilidade da Precipitação na Bacia do Rio Piranhas–Açu. 2018.

GIANDOTTI, M. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Mem. dell. Ass. Idr. It.*, n. 9, 1934.

GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B.; CHANG, H. K. Análise hidrológica de séries históricas da Bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1981–2010. Brasília: INMET, 2012.

KIRPICH, Z. P. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, v. 10, n. 6, 1940.

LANA, L. H. Equação de chuvas intensas para Indaial – Santa Catarina. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

LUNA LUCENA, R.; MONTEIRO, F.; MARIZ FARIA, R.; SANTIAGO REIS, J. Análise Espacial das Chuvas no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, 2024, 1(72).

MENDES, R. M.; ARAÚJO, J. C. Determinação do número de curva (CN) por sensoriamento remoto e SIG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 4, 2015.

MEDEIROS, M. D. Eventos hidro climáticos extremos e vulnerabilidade socioambiental a inundações no Baixo-Açu – RN. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018. Tese (Doutorado em Geografia).

MENDONÇA, F. A.; RODRIGUES, D. B. B. GAM-IDF: Aplicativo para ajuste de curvas IDF utilizando modelos baseados na distribuição Gama. 2025.

MOTA, S. F. S. et al. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas no semiárido potiguar. *Revista Geama*, 3(1), 2017, 34–43.

NETO, M. C. F.; SOUSA, D. B.; CAVALCANTE, Y. A. (EDS.). Aplicação de geotecnologias na gestão de recursos hídricos no semiárido nordestino. *Revista GeoNordeste*, 31(2), 2020, 90–102.

OLIVEIRA, L. R. ET AL. (ED.). Análise espacial da vulnerabilidade à escassez hídrica em bacias do semiárido. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23(4), 2018.

OLIVEIRA, G. Q.; LOPES, J. E. G. Estatística aplicada à engenharia civil com foco em recursos hídricos. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

PFALTZGRAFF, P. A. dos S.; TORRES, F. S. de M. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro: CPRM, 2010.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Hidrologia aplicada. 2. ed. Viçosa: UFV, 2007.

SILVA, T. J. ET AL. (ED.). Impactos do uso do solo no escoamento superficial em microbacias hidrográficas. *Revista Ambiente & Água*, 14, 2019.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia / Ciência e aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2008.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

TUCCI, C. E. M. Gestão de riscos de inundação urbana. *Revista USP*, n. 83, 2009, 50–67.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55 (TR-55), 1986.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.