



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

NÍCOLAS MARACAÍPE LIMA

**ABORDAGEM INTEGRADA PARA MITIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS EM
PALMAS-TO: ESTADO DA ARTE, ÁRVORE DECISÓRIA E APLICATIVO DE
MONITORAMENTO**

Palmas,TO

2025

Nícolas Maracaípe Lima

Abordagem integrada para mitigação de alagamentos em Palmas-TO: estado da arte, árvore decisória e aplicativo de monitoramento

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior;
Coorientadora: Prof. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende

Palmas, TO

2025

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

- L732a Lima, Nicolas Maracaípe Lima.
Abordagem integrada para mitigação de alagamentos em Palmas-to:
estado da arte, árvore decisória e aplicativo de monitoramento. / Nicolas
Maracaípe Lima Lima. – Palmas, TO, 2025.
142 f.
- Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado)
Profissional em Engenharia Ambiental, 2025.
- Orientador: Joel Carlos Zukowski Junior Junior
Coorientadora : Cláudia da Silva Aguiar Aguiar
1. Drenagem urbana. 2. Mitigação de alagamentos. 3. Revisão sistemática.
4. árvore decisória. I. Título

CDD 628

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

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nícolas Maracaípe Lima

Abordagem integrada para mitigação de alagamentos em Palmas-TO: estado da arte, árvore decisória e aplicativo de monitoramento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental foi avaliada para a obtenção do título de Mestre (a) em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 30 de setembro de 2025

Banca Examinadora:

Dr. Joel Carlos Zukowski Junior (Presidente)
Universidade Federal Do Tocantins - UFT

Dr. Aurelio Pessoa Picanço (Membro Titular Interno)
Universidade Federal Do Tocantins - UFT

Dr. Fernán Enrique Vergara Figueroa (Membro Titular Interno)
Universidade Federal Do Tocantins - UFT

Dra. Michelle Ludmila Guedes dos Santos (Membro Titular externo)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO

AGRADECIMENTOS

Tenho, por meio deste, o sincero desejo de agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha esposa, Elaine Alves Souza Maracaípe, por ser um apoio fundamental ao longo de toda minha formação, com incentivo constante, compreensão, amor e companheirismo.

À minha mãe, Maria Maracaípe, pela dedicação, esforço e amor incondicional, que sempre foram pilares essenciais na minha trajetória pessoal e acadêmica.

Ao meu irmão, Lucas Maracaípe, pelo apoio na construção desse trabalho e pela presença nos momentos importantes desta caminhada.

Aos meus orientadores, Prof^o. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior e Prof^a. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende, por toda orientação, paciência e contribuição essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus tios e padrinhos, Edina e José Alves, por todo carinho, apoio e incentivo até aqui.

E, com especial carinho, à minha filha Maria Luísa, cujo nascimento trouxe novo significado à minha vida. Sua chegada foi um sopro de esperança e força, que me encorajou a persistir mesmo nos momentos mais desafiadores.

RESUMO

O presente trabalho investiga estratégias integradas para mitigação de alagamentos em áreas urbanas de Palmas-TO, considerando os impactos decorrentes do crescimento desordenado e da impermeabilização do solo sobre a eficiência dos sistemas de drenagem. A pesquisa fundamenta-se em revisão sistemática da literatura, conduzida na plataforma Parsifal e abrangendo estudos publicados entre 2010 e 2024, que permitiu mapear o estado da arte em soluções convencionais e não convencionais de drenagem urbana, incluindo galerias, bacias de retenção, jardins de infiltração, pavimentos permeáveis e telhados verdes, além de ferramentas digitais de monitoramento. Com base nessa síntese, foi elaborada uma árvore decisória para priorização de medidas mitigadoras conforme tipologia do local afetado, infraestrutura existente e severidade do alagamento, proporcionando suporte à tomada de decisão em diferentes escalas de intervenção. Complementarmente, desenvolveu-se o aplicativo “Alagou”, construído com o framework Flutter e linguagem Dart, que permite o registro participativo de pontos de alagamento com envio de dados georreferenciados e imagens em tempo real, favorecendo a integração entre população e órgãos gestores. Os resultados indicam que a combinação de abordagens estruturais e não estruturais, aliada ao uso de tecnologias móveis e metodologias de apoio à decisão, amplia a eficácia do manejo de águas pluviais e contribui para a resiliência urbana frente a eventos extremos, oferecendo subsídios técnicos para planejamento sustentável e políticas públicas de drenagem adaptativa.

Palavras-chave: drenagem urbana; mitigação de alagamentos; revisão sistemática; árvore decisória; tecnologia participativa.

ABSTRACT

This study investigates integrated strategies for flood mitigation in urban areas of Palmas, Tocantins, considering the impacts of unplanned growth and soil impermeabilization on the efficiency of drainage systems. The research is based on a systematic literature review conducted using the Parsifal platform, covering studies published between 2010 and 2024, which mapped the state of the art in both conventional and non-conventional urban drainage solutions, including stormwater galleries, detention basins, infiltration gardens, permeable pavements, green roofs, and digital monitoring tools. From this synthesis, a decision tree was developed to prioritize mitigation measures according to the typology of the affected area, the existing infrastructure, and the severity of the flood, thus supporting decision-making processes at different intervention scales. Additionally, the “Alagou” mobile application was developed using the Flutter framework and Dart language, enabling participatory flood reporting through georeferenced data and real-time images, fostering integration between citizens and management agencies. The results highlight that combining structural and non-structural approaches with mobile technologies and decision-support methodologies enhances stormwater management efficiency and strengthens urban resilience against extreme events, providing technical insights for sustainable planning and adaptive drainage policies.

Keywords: urban drainage; flood mitigation; systematic review; decision tree; participatory technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de drenagem urbana convencional.....	23
Figura 2 - Organização de Jardim Permeável	25
Figura 3 - Trincheira de Infiltração	26
Figura 4 - Pavimento permeável	28
Figura 5 - Processo de decisão por árvore.	31
Figura 6 - Fluxo metodológico.....	34
Figura 7 - Croqui de localização de Palmas-TO.	35
Figura 8 - Análise do Crescimento Populacional Palmas-TO.	36
Figura 9 - Análise de adensamento populacional de Palmas-TO.	37
Figura 10 - Fluxo de funcionamento do ALAGOU.....	46
Figura 11 - Árvore decisória	108
Figura 12 - Tela inicial.....	110
Figura 13 - Tela de cadastro.....	111
Figura 14 - Tela de registro de informações.	112
Figura 15 - Tela de histórico	113
Figura 16 - Tela mapa de alagamentos.	114
Figura 17 - Tela de avisos	115
Figura 18 - Tela de Administrador.....	116
Figura 19 - Tela de administração do sistema.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Palavras-chave.	39
Tabela 2 - Tabela resumo de soluções	95
Tabela 3 - Estrutura de exportação de dados.	117
Tabela 4 - Base de dados e artigos utilizados em etapa de revisão sistemática. .	131

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABRH** – Associação Brasileira de Recursos Hídricos
- AHP** – *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico)
- BIOECODS** – Sistema de drenagem ecológica com condução subssuperficial
- CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- DNIT** – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DOI** – *Digital Object Identifier*
- DRL** – *Deep Reinforcement Learning* (Aprendizado por Reforço Profundo)
- DUS** – Drenagem Urbana Sustentável
- FHI** – *Flood Hazard Index* (Índice de Perigo de Inundação)
- GIS** – *Geographic Information System* (Sistema de Informações Geográficas)
- HEC-HMS** – *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*
- HEC-RAS** – *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IDF** – Intensidade–Duração–Frequência
- LID** – *Low Impact Development* (Desenvolvimento de Baixo Impacto)
- LSTM** – *Long Short-Term Memory* (tipo de rede neural recorrente)
- MLP** – *Multilayer Perceptron* (Perceptron Multicamadas)
- MPC** – *Model Predictive Control* (Controle Preditivo Baseado em Modelo)
- PICO** – *Population, Intervention, Comparison, Outcome*
- PICOC** – *Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context*
- PV** – Poço de Visita
- RANS** – *Reynolds-Averaged Navier–Stokes*
- RRI** – *Rainfall–Runoff–Inundation*
- RWHSS** – *Rainwater Harvesting Storage Systems* (Sistemas de armazenamento de água de chuva)
- SbN** – Soluções baseadas na Natureza
- SETS** – *Socio-Ecological-Technical Systems* (Sistemas socioecológicos-tecnológicos)
- SIG** – Sistema de Informações Geográficas
- SP** – São Paulo
- SUDS** – *Sustainable Urban Drainage Systems* (Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável)
- SWAT** – *Soil and Water Assessment Tool*
- SWMM** – *Storm Water Management Model*
- UN-HABITAT** – *United Nations Human Settlements Programme* (Programa das Nações Unidas para Assentamentos Humanos)
- WSUD** – *Water Sensitive Urban Design* (Desenho Urbano Sensível à Água)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Meio Ambiente e Urbanização.....	18
3.2	Cheias urbanas.....	18
3.3	Drenagem Urbana e Impacto Ambiental.....	19
3.4	Drenagem Urbana	20
3.5	Sistema Convencional.....	21
3.5.1	Guias.....	21
3.5.2	Sarjetas	21
3.5.3	Sarjetas	21
3.5.4	Bocas de Lobo	21
3.5.5	Poços de Visita	22
3.5.6	Galerias.....	22
3.6	Sistemas Não Convencionais	23
3.6.1	Jardins de Infiltração	24
3.6.2	Trincheiras	25
3.6.3	Reservatórios de detenção	26
3.6.4	Reservatórios de retenção.....	27
3.6.5	Pavimentos permeáveis	27
3.7	Relação Solo e Drenagem Urbana	28
3.7.1	Textura do solo	29
3.7.2	Densidade de solo.....	29
3.7.3	Porosidade de solo.....	29

3.7.4	Armazenamento de água no solo.....	30
3.8	Processo de revisão sistemática	30
3.8.1	Revisão Sistemática.....	30
3.9	Árvore decisória e drenagem urbana.....	31
3.10	Tecnologia e meio ambiente.....	32
3.10.1	Desenvolvimento de aplicações mobile	32
4	METODOLOGIA	34
4.1	Área de estudo	35
4.2	Revisão sistemática	37
4.2.1	PICOC	38
4.2.2	Questões de pesquisa.....	39
4.2.3	Palavras-chave e sinônimos.....	39
4.2.4	Cadeia de caracteres de pesquisa.....	40
4.2.5	Fontes	40
4.2.6	Critério de seleção	40
4.2.7	Lista de verificação de avaliação de qualidade	41
4.2.8	Formulário de extração de dados.....	42
4.2.9	Estudos Importados	42
4.3	Árvore decisória	42
4.3.1	Premissas para construção da árvore decisória	42
4.4	Aplicativo Alagou	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Revisão sistemática	47
5.1.1	Soluções de infiltração e controle na fonte	47
5.1.2	Técnicas compensatórias em espaços públicos e infraestrutura verde local	51
5.1.3	Medidas de reservação e aproveitamento de águas pluviais	55

5.1.4	SUDS, LID e soluções baseadas na natureza (SbN) – visão geral....	59
5.1.5	Planejamento, gestão e instrumentos legais e econômicos.	65
5.1.6	Diagnóstico, monitoramento e avaliação de sistemas de drenagem .	73
5.1.7	Medidas estruturais em macrodrenagem, microdrenagem e redes de esgoto	77
5.1.8	Modelagem hidrológica hidrodinâmica e previsão de cheias.....	80
5.1.9	Modelagem hidrológica e cenários climáticos para gestão de cheias	86
5.1.10	Controle em tempo real e operação de sistemas de drenagem	91
5.1.11	Avaliação de risco, vulnerabilidade e perigo de inundação	92
5.1.12	Consolidação do material levantado.....	95
5.2	Árvore decisória	106
5.3	Aplicativo Alagou	109
6	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIAS	120
	APÊNDICE	131

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tem ocorrido de maneira acelerada, condição que é nítida no mundo moderno. Agregado a esse fator, coexistem condições positivas atreladas ao valor econômico e à comodidade e praticidade dos indivíduos inseridos em uma sociedade urbanizada, mas também a relação negativa do ponto de vista ambiental e da escassez dos recursos naturais. De fato, o processo urbanístico nos proporciona uma série de facilidades e produtos que, no decorrer do tempo, tornam-se necessidades importantes, a ponto de se tornarem indispensáveis sob a ótica do ser humano urbanizado.

De acordo com o IBGE (2024), entre os anos de 2010 e 2022 a população brasileira tornou-se ainda mais urbana. Em 2022, 87,4% dos 203,1 milhões de habitantes viviam em áreas urbanas, o que representa um aumento de 16,6 milhões de pessoas em relação a 2010, enquanto a população rural caiu 4,3 milhões, chegando a 25,6 milhões. Nesse período, o crescimento da população urbana foi de 0,82% ao ano, ao passo que a população rural diminuiu 1,27% ao ano. As regiões Sudeste (94,44%) e Centro-Oeste (91,35%) apresentaram os maiores percentuais de população urbana. Pela primeira vez, todas as regiões tiveram queda na população rural, com destaque para o Norte (-11,02%) e o Centro-Oeste (-10,59%). Esses dados evidenciam o avanço do processo de urbanização no país, entendido como o aumento da participação da população urbana em relação ao total da população.

Ainda no contexto do crescimento urbano, entende-se que a urbanização intensifica a demanda por recursos naturais, levando à exploração excessiva e, muitas vezes, insustentável desses recursos. O crescimento desordenado das cidades frequentemente resulta na ocupação de áreas ambientais sensíveis, como margens de rios e zonas costeiras, contribuindo para a degradação dos ecossistemas. A poluição do ar e da água é outra consequência significativa da urbanização, afetando a saúde pública e a qualidade de vida dos habitantes urbanos.

Os espaços verdes urbanos, que desempenham um papel crucial na mitigação dos impactos ambientais, frequentemente são sacrificados em favor do desenvolvimento imobiliário. A falta de áreas verdes reduz a capacidade das cidades de absorver gás carbônico e outros poluentes, além de diminuir a infiltração de água no solo, exacerbando os problemas de escoamento das águas pluviais. A implementação de políticas públicas

que incentivem a criação e manutenção de espaços verdes é essencial para promover a sustentabilidade urbana.

A urbanização, embora traga avanços arquitetônicos e de organização das cidades, também está associada a desafios estruturantes, especialmente no que se refere ao manejo das águas pluviais e ao escoamento adequado. Problemas de infraestrutura e drenagem urbana são realidade em muitos municípios brasileiros, sobretudo naqueles que cresceram de forma desordenada e não se planejaram para eventos de chuvas intensas, resultando em prejuízos para o setor público e privado e favorecendo a ocorrência de doenças de veiculação hídrica.

Um exemplo recente dos impactos negativos decorrentes da gestão ineficiente das águas pluviais e impacto da urbanização pode ser observado no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com dados atualizados pela Defesa Civil do Rio Grande do Sul (2025), em 24 de abril de 2025, relativos às enchentes ocorridas em maio de 2024, registraram-se 184 óbitos, 25 pessoas desaparecidas, 806 feridos e mais de 2,3 milhões de pessoas afetadas. Ao todo, 478 municípios foram impactados pelo desastre, evidenciando a magnitude dos prejuízos humanos associados a eventos extremos de precipitação e à insuficiência de infraestrutura adequada para o escoamento das águas pluviais.

Entende-se até aqui que um dos impactos negativos que decorrem do processo de surgimento de novas cidades, centros urbanos e da elevação da taxa de ocupação do solo, é o favorecimento e aumento das áreas impermeabilizadas, retirando então a função originária do solo que dentre várias seria atuar como dispositivo hidráulico para infiltração das águas pluviais.

De acordo com Tucci (2003), a impermeabilização do solo que acontece em centros urbanizados está ligada diretamente com a diminuição do tempo de concentração e o aumento dos volumes escoados pela superfície, o que condiciona um elevado pico de vazão a jusante da bacia hidrográfica. Consequentemente tal aumento de vazão colabora para a saturação do sistema de drenagem urbana, onde em maioria dos casos, não são dimensionados prevendo o crescimento urbano.

Então, diante do crescimento dos centros urbanos, as cidades se veem diante da necessidade de implantar medidas mitigadoras para atenuar os impactos relacionados a enchentes e alagamentos. Essas ações envolvem, principalmente, a implantação de sistemas hidráulicos capazes de escoar as águas pluviais em tempo hábil, conduzindo-as para corpos hídricos ou sistemas de infiltração, que podem incluir poços, trincheiras, áreas verdes, entre outros dispositivos.

Para Philippi Jr. *et al.* (2005), o sistema de drenagem é composto de dois tipos de intervenções no ambiente: as medidas estruturais e as medidas não estruturais. As estruturais seriam as chamadas obras hidráulicas necessárias para um bom escoamento das águas pluviais, não estruturais correspondem a propostas com objetivos de minimizar os efeitos causados pelas águas pluviais, que não implicam em grandes obras de engenharia, as duas medidas devem se complementar. Sabendo então do leque de possibilidades e sistemas que funcionem para a drenagem urbana, o seguinte trabalho tem como ideia fundamental discutir soluções integradas para sistemas de drenagem urbana, visando a otimização de sistemas existentes, apoio em tomadas de decisão durante gestão de águas pluviais e monitoramento tecnológico aplicados para o município de Palmas Tocantins.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolver uma abordagem integrada para a mitigação de alagamentos na área urbana de Palmas-TO, combinando o estado da arte em drenagem urbana, uma árvore decisória de medidas mitigadoras e um aplicativo de monitoramento de alagamentos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Levantar o estado da arte de sistema de drenagem urbana.
- b) Indicar medidas e técnicas para mitigar os alagamentos por meio de uma árvore decisória.
- c) Elaborar aplicativo para melhoria da base de identificação de alagamentos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Meio Ambiente e Urbanização

No último século, o processo de urbanização tem se intensificado de forma acelerada, sobretudo nos países em desenvolvimento, onde a expansão econômica, a reestruturação produtiva e a migração rural-urbana resultam em crescimento urbano muitas vezes desordenado e em forte pressão sobre a infraestrutura e o meio ambiente (UN-HABITAT, 2022). Em contraste, em grande parte dos países desenvolvidos observa-se um quadro de baixo crescimento populacional ou mesmo de estagnação, associado à difusão de taxas de fecundidade persistentemente abaixo do nível de reposição, o que repercute na dinâmica demográfica e nas necessidades de planejamento urbano e de serviços (UNITED NATIONS, 2025).

Cumprido destacar que, em áreas urbanas, as cidades apresentam maior suscetibilidade a desastres ambientais, evidenciando uma probabilidade mais elevada de serem impactadas por tais eventos. Esse cenário decorre do processo de urbanização, o qual modifica as condições naturais do meio, ampliando o potencial de risco à população, sobretudo àquelas parcelas inseridas em contextos de maior vulnerabilidade socioeconômica.

3.2 Cheias urbanas

As cheias naturais são fenômenos provocados pelo excesso de escoamento superficial, gerado a partir de uma precipitação intensa. Esse processo hidrológico é cíclico, natural e benéfico ao ambiente. A presença de rios e, mais diretamente, a presença de água, sempre foi um fator fundamental no desenvolvimento das cidades e, de fato, um fator condicionante e determinante da fixação das comunidades que deram origem aos primeiros aglomerados urbanos. Entretanto, as mesmas cidades que necessitam de água sofrem hoje com o excesso de escoamentos que frequentemente se convertem em importantes inundações no ambiente construído. (MIGUEZ, Marcelo 2015)

Ainda de acordo com Marcelo 2015 O crescimento urbano aumenta a área edificada, impermeabilizando o solo e mudando hidrologia e clima locais, agravando enchentes urbanas pela maior disponibilidade de escoamentos superficiais. A remoção da vegetação natural, a impermeabilização sem controle, a redução das áreas de retenção e a ocupação de áreas marginais aos rios são ações críticas para a drenagem de uma bacia.

Em países em desenvolvimento, por deficiência de planejamento ou por insuficiência de recursos, nem sempre ocorre a implantação da infraestrutura adequada para acompanhar o crescimento da urbanização. Além disso, o próprio processo de formação de chuvas intensas convectivas pode se agravar pelo fenômeno de ilhas de calor, que se formam sobre as áreas centrais de superfícies mais urbanizadas, também agravadas pelo excesso de impermeabilização. (MIGUEZ, Marcelo 2015)

3.3 Drenagem Urbana e Impacto Ambiental

A temática é abordada por Nogueira e Nogueira (2015), os quais afirmam que o impacto ambiental resulta de uma ação ou de um conjunto de ações antrópicas que incidem sobre o meio em que o indivíduo está inserido ou, de forma mais ampla, sobre o meio ambiente. Tais ações provocam alterações na natureza em seus componentes físico, químico e biológico, podendo essas modificações assumir caráter tanto positivo quanto negativo.

De acordo com a Resolução CONAMA 001/1986 (Brasil, 1986), podemos entender que o impacto ambiental se estende qualquer e toda modificação ao meio ambiente em suas propriedades químicas, biológicas ou físicas, derivado das ações antrópicas, nada mais que ações relacionadas com o homem, direta ou indireta, que podem resultar em impactos:

- Aos ecossistemas;
- As condições estéticas do meio ambiente;
- A qualidade do ar, solo e água;
- A saúde e bem-estar da população;
- As atividades socioeconômicas.

Como já mencionado o efeito do crescimento urbanístico não planejado ocasiona inúmeros impactos a própria infraestrutura das cidades, alguns dos problemas gerados nesse âmbito são destacados por Tucci (1995):

Problemas com a captação e distribuição de água tratada, devido a poluição dos mananciais, efeito direto com as atividades humanas, relacionando aos escoamentos de águas urbanas e da agricultura, lançamento de efluentes sem tratamentos adequado, entre outros fatores que contribuem para diminuição da qualidade da água.

O uso recorrente de fossas negras como sistema básico de afastamento de esgoto das residências, implica na contaminação das águas subterrâneas durante a interação de

alagamentos e o inevitável contato de água pluvial com efluente doméstico armazenado em fossas negras.

No âmbito de coleta e de sistemas de captação de água pluvial, a urbanização contribui então para o aumento das áreas impermeáveis, retirando uma da principal função do solo, que no caso serviria como dispositivo hidráulico condutor de águas pluviais, ademais, também ocorre mudanças na topografia do terreno, alteração hidrológica da região, o que pode condicionar e favorecer o aumento de vazões de pico. Sendo assim, uma simples chuva de curta duração tem potencial para causar alagamentos e inundações.

3.4 Drenagem Urbana

Os municípios brasileiros vivem com a realidade de problemas com alagamentos, inundações e cheias ano pós ano, que são resultantes de diversos fatores, podendo destacar então: o crescimento populacional, ocupação desordenado das áreas de escoamento natural das águas pluviais e a inexistências de sistemas que contemplem dispositivos de drenagem que evite alagamentos.

O alagamento urbano se define pelo o acúmulo de águas sobre o leito dos arruamentos, ocasionado pelo escoamento superficial e falta de áreas de infiltração, o que denuncia um sistema ineficiente de drenagem. De acordo com Tucci (2003), alagamentos resultantes dos impactos da urbanização, são os fenômenos que ocorrem na drenagem urbana devido às chuvas de alto volume e ao efeito da quantidade de áreas não permeáveis, da obstrução do escoamento ou de condutos.

De acordo com Filippi Jr. et al. (2005) o sistema de drenagem deve ser moldado e pensado se limitando aos conceitos técnicos, respeitando as condições ambientais, socioeconômicas e institucionais sendo composto por uma junção física mínima com arruamento devidamente pavimentado, sarjeta com meio-fio, bocas de lobos devidamente localizadas, galerias para drenagem, constando que esses dispositivos devem estar interligados, com funcionalidade máxima e adequado, para que o sistema não apresente falhas.

Para Tucci *et al.* (2001), o conjunto que resulta no sistema de drenagem deve ser compreendido ou entendido como parte integrante da infraestrutura existente em uma localidade para que possa ser feito a coleta, o transporte e o lançamento final das águas pluviais. O mesmo é constituído por inúmeras medidas que tem o intuito de mitigar os riscos relacionados a inundações, alagamentos e ademais prejuízos, podendo do também ser dividido em micro drenagem e macrodrenagem.

3.5 Sistema Convencional

A natural trajetória do escoamento da água da chuva seria escoar pelas calhas viárias locadas no arruamento, que quando saturadas ocasionam o cobrimento total da via o que caracteriza um alagamento. De acordo com Botelho (2011), a funcionalidade de tais aparelhos é agir como um artifício que consiga realizar a captação do volume de água pluvial excedente e posteriormente direcionando-o aos corpos hídricos, que atuarão como receptores. Isso, na condição de que esse dispositivo esteja limpo, sem avarias, adequados hidraulicamente para a realidade local e locados em áreas tecnicamente corretas.

3.5.1 *Guias*

De acordo com Botelho (2011), guias são faixas limitantes entre o leito do arruamento e a calçada ou passeio, sua constituição geralmente é de aglomerado de granito ou concreto simples, podendo ser pré-moldadas ou construídas no local, popularmente são denominadas e conhecidas por meio-fio, que tem como funcionalidade servir como calha hidráulica, podendo ser de tamanhos e tipos variados dependendo do cenário e necessidade.

3.5.2 *Sarjetas*

Representam a calha coletora das águas pluviais que escoam pelas ruas, podendo ser consideradas como a faixa de limitação entre a via pública e o meio-fio (DNIT 2004, apud CARVALHO, 2010).

3.5.3 *Sarjetas*

São estruturas de orientação do escoamento instaladas nos cruzamentos das ruas, transversalmente às mesmas, com a finalidade de transferir a vazão de uma rua à outra que possua maior capacidade de escoamento (TOMAZ, 2014).

3.5.4 *Bocas de Lobo*

São dispositivos localizados nas sarjetas para a captação das águas em escoamento nelas, quando se esgota sua capacidade hidráulica. Podem ser de guia, de sarjeta ou mistas, com grelhas ou não. (AZEVEDO NETTO, 1998, p.546).

Segundo o autor, as bocas de lobo devem ser locadas em:

- Locadas dos dois lados do arruamento quando houver necessidade;
- Em cruzamentos de ruas, no montante do vértice de intersecção das sarjetas, mitigando prejuízo ao trânsito de pessoas na ocorrência de enxurradas convergentes.
- Devem ser locadas também nos pontos mais baixos para que possa captar a água;

Segundo Botelho (2011) as bocas de lobo se caracterizam como dispositivo para captação com chegada de água pluvial pela horizontal, de acordo com o autor as bocas de lobo devem apresentar rebaixamento em relação ao nível do asfalto, para facilitar a captação, sua estrutura pode ser construída de alvenaria de blocos cerâmicos ou blocos de concreto tendo como tampa de cobertura de concreto armado, além disso esse dispositivo deve estar ligado a galeria de água pluvial por meio de tubos de concreto.

Plínio Tomaz (2012) Ressalta que por motivos de segurança o tamanho máximo de abertura não deve ultrapassar os 15cm. O somatório dessa altura, Azevedo Netto et al. (1998) diz que se pode admitir o saturamento ou enchimento nos limites de 13cm em um cenário com declividade transversal da via pública de 3%.

3.5.5 *Poços de Visita*

“A função dos poços de visita (P.V) é permitir a inspeção, limpeza e desobstrução de galerias enterradas por operários que entrem nessas instalações ou por uso de equipamento mecânico” (BOTELHO, 2011, p.47).

De acordo com AZEVEDO NETO (2018) os poços de visitas se definem como locais, mais apropriadamente são câmaras visitáveis, onde por elas se torna possível a visita e acesso as galerias no intuito de realizar inspeção dos condutos e desobstrução, retirada de materiais sólidos e manutenções em geral, ademais são dispositivos que recebem as ligações dos bueiros ou bocas de lobo, também realizam a função de mudança de diâmetro, conexão e união entre redes e mudança de direção, a locação e entendimento dessas estruturas podem ser vistas na (figura 1).

3.5.6 *Galerias*

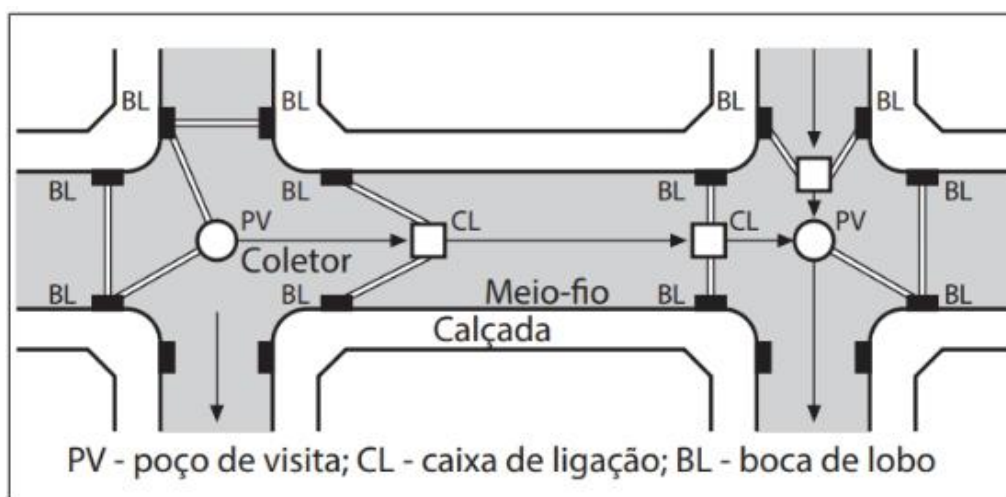
De acordo com AZEVEDO NETO (2018), a utilização do método racional para determinar as vazões de projeto para cada trecho de galeria, se compreende nas seguintes simplificações:

- O tempo de precipitação que resulta na vazão máxima é igual ao tempo de concentração;
- A intensidade constante na duração da chuva;
- As condições de infiltração da localidade não se alteram com a duração da chuva;
- Sendo livre e regime permanente o escoamento de galerias, além de uniforme.

Ainda de acordo com AZEVEDO NETO (2018), devem ser adotados alguns padrões e critérios de projeto, ou pelo contratante de serviço ou com base na experiência do projetista. Sendo os requisitos mais comuns:

- DN mínimo de tubulações em 300 mm;
- Nos condutos retangulares altura mínima fixada em $H = 0,5$ m;
- As seções circulares são dimensionadas a seção plena ($y = 0,95 \times DN$);
- As seções retangulares são dimensionadas com altura livre mínima ($0,10 \times H$);
- A velocidade mínima (0,75 m/s); • a velocidade máxima (5,0 m/s); • A declividade econômica é igual à do terreno no trecho;
- Recobrimento mínimo de 1,00 m em relação à estrutura locada; • Profundidade máxima (3,50 m) em relação ao diâmetro externo na cota de fundo.
- As dimensões internas não podem decrescer de montante para jusante;
- Nas mudanças de diâmetro as geratrizes superiores internas devem estar alinhadas.

Figura 1 - Estrutura de drenagem urbana convencional



Fonte: Azevedo Netto, 2018

3.6 Sistemas Não Convencionais

Canholi (2014) explica que as medidas não convencionais de drenagem urbana são estruturas e conceitos de projeto que ainda não são amplamente utilizados. Elas se

diferenciam do método tradicional de canalização, mas podem ser combinadas a ele para otimizar o sistema de drenagem. O autor ainda menciona que as soluções de retenção de escoamentos são formadas por estruturas que amortecem os picos de vazão ao armazenar a água de forma apropriada.

Existem dispositivos que podem ser utilizados como agentes à micro e macrodrenagem, de forma que as intervenções por obras propõem modelos sustentáveis que visam à mecânica de áreas de infiltração natural e locais de detenção. Os modelos sustentáveis nas obras de drenagem também podem servir como locais de lazer podendo ser instalados em praças, parques e áreas residenciais, além do apelo ambiental os modelos sustentáveis agregam mudanças no paisagismo do local.

Dentre as medidas não convencionais mais frequentemente adotadas, destacam-se aquelas que visam a incrementar o processo da infiltração; reter os escoamentos em reservatórios; ou retardar o fluxo nas calhas dos córregos e rios. Também se incluem as medidas destinadas a proteger as áreas baixas com sistemas de diques do tipo pôlder, e derivar os escoamentos, promovendo bypass em áreas afetadas.

De acordo com Aravena & Dussailant (2009) existem métodos de infiltração que são alternativas viáveis para solucionar problemas na drenagem urbana, esses dispositivos e métodos permitem uma abordagem descentralizada. Os métodos mencionados condicionam a redução de construção de obras com valor elevado destinado a estruturas de drenagem urbana. O atrativo de redução de custos aliados a possibilidade de infiltrar e conter a água na própria fonte geradora, alavanca a ideia de que esses dispositivos podem ser cada vez mais usados como solução de problemas, alindando o ponto de vista técnico e econômico.

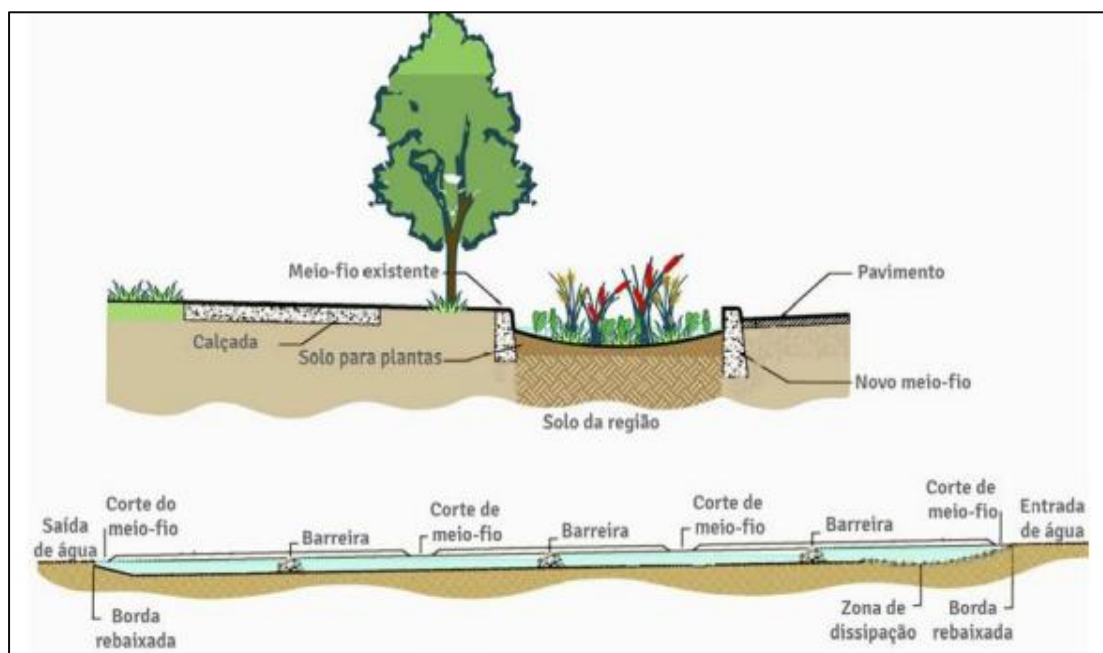
3.6.1 *Jardins de Infiltração*

As práticas de infiltração, tais como jardins de infiltração, oferecem uma abordagem potencialmente eficaz para lidar com o esgotamento das águas pluviais. Um jardim de infiltração é um jardim paisagístico localizado em uma depressão, que recebe as águas pluviais das superfícies impermeáveis em suas proximidades (ARAVENA & DUSSAILLANT, 2009).

Esse tipo de medida compensatória para drenagem urbana exemplificado na (figura 2) além de ser utilizado como dispositivo hidráulico, ainda compõem o paisagismo da localidade podendo não contribuir com a funcionalidade de infiltrar a água, mas também com a estética, o esquema desse dispositivo é constituído por uma cama de solo onde a

vegetação possa desenvolver vida e logo abaixo uma camada de rochas que facilite a percolação e infiltração, na imagem a seguir pode ser observado claramente o que foi descrito.

Figura 2 - Organização de Jardim Permeável



Fonte: Portland's Bureau of Environmental Services, 2003

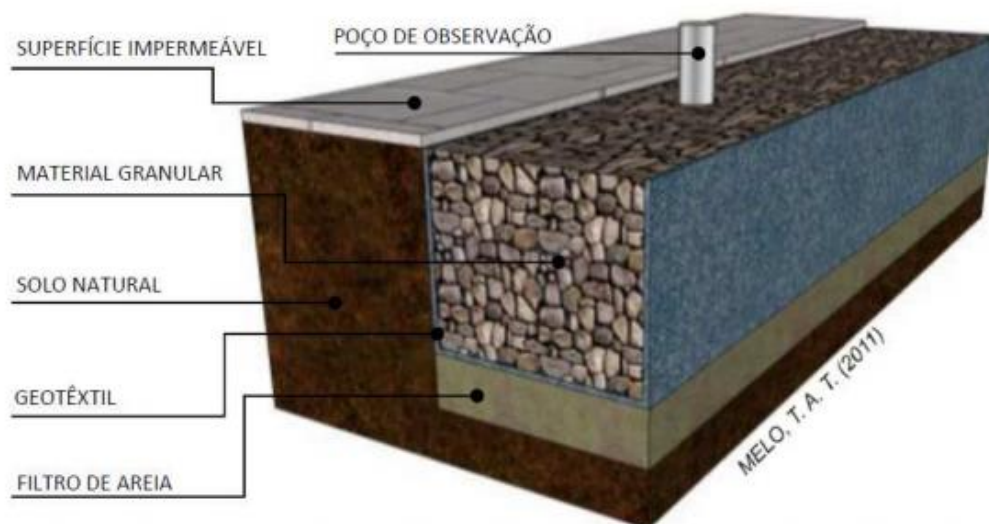
3.6.2 Trincheiras

De acordo com Silva (2007), as trincheiras de infiltração são dispositivos que realizam a drenagem cujas dimensões se determinam pelo comprimento, sendo a largura e a profundidade delimitações com representatividade menor. São dispositivos que podem ser designados até mesmo para a infiltração de grandes volumes de água pluvial, onde suas dimensões poderão ser definidas através das características do solo local e da intensidade pluviométrica.

As trincheiras têm como objetivo absorver a água superficial das vias e fazer a infiltração no solo, de modo que são obras compensatórias, mais baratas e que a instalação é rápida. As trincheiras nada mais são do que uma lacuna (buraco) feita no solo, recoberto com a manta geotêxtil que irá filtrar parcialmente partículas de material disposto nas vias e sarjetas, e toda a trincheira é preenchida de rocha com granulação alta para que haja porosidade entre as pedras servindo de caminho hídrico.

Na (figura 3) abaixo pode-se ver o esquema ilustrado do funcionamento e locação de uma trincheira de infiltração, o processo parte do princípio onde a água pluvial entra pelos tubos coletores, posteriormente se destina para as camadas da trincheira.

Figura 3 - Trincheira de Infiltração



Fonte: Adaptado Melo, 2011

3.6.3 Reservatórios de retenção

Segundo Fendrich (2002), existem relatos de bacias de retenção desde os tempos da Babilônia até os modernos, quando começaram a ser usadas na França, em 1971. No Brasil, os primeiros reservatórios implantados foram os de retenção, em Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais, sendo os da Pampulha e Santa Lúcia até hoje funcionais (BAPTISTA *et al.*, 2005). Vários outros exemplos podem ser encontrados principalmente em cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre, dentre outras cidades brasileiras, uma vez que seu uso é, atualmente, razoavelmente difundido.

As bacias de retenção são reservatórios de armazenamento de curtos períodos que reduzem as vazões de pico dos hidrogramas das cheias, aumentando o seu tempo de base. Geralmente elas não reduzem o volume do escoamento direto, apenas redistribuem as vazões ao longo de um tempo maior, formando assim um volume útil temporário, com parte do escoamento direto. Esse volume corresponde à área compreendida entre os hidrogramas afluente e efluente da bacia. (MIGUEZ, Marcelo Gomes).

3.6.4 *Reservatórios de retenção*

As bacias de retenção são reservatórios construídos de forma a reter o escoamento superficial de cheias urbanas, possuindo um lago permanente (volume morto). Em uma bacia de retenção, o escoamento superficial de cada evento chuvoso é detido e tratado no reservatório, através da sedimentação e dos mecanismos de decomposição biológica. O lago permanente tem a função de permitir uma deposição adicional e um tratamento biológico nos intervalos entre eventos de precipitação (CGSD, 2000), além de evitar a ressuspensão dos sedimentos depositados. Acima do nível do lago permanente, pode ser alocada área para o controle quantitativo das cheias urbanas (AMEC, 2001). (MIGUEZ, Marcelo Gomes).

3.6.5 *Pavimentos permeáveis*

De acordo com Urbonas e Stahre, (1993) a utilização de pavimentos permeáveis e porosos condiciona uma superfície que permite a percolação, por entre seus vazios, sendo que no primeiro momento tem com funcionalidade de reservação ou sendo mais apropriado utilizando o termo de detenção da água pluvial, logo em seguida a água precipitada tende a infiltrar de fato ao longo de determinado período de tempo.

Ainda segundo Urbonas e Stahre (1993) o pavimento permeável pode ser construído ou constituído de diversos materiais, desde que ofereça resistência mecânica e permita escoamento hidráulico, podendo ser vazado, bloco de concreto, áreas com gramíneas ou preenchido por material granular como areia ou rochas de maior granulometria.

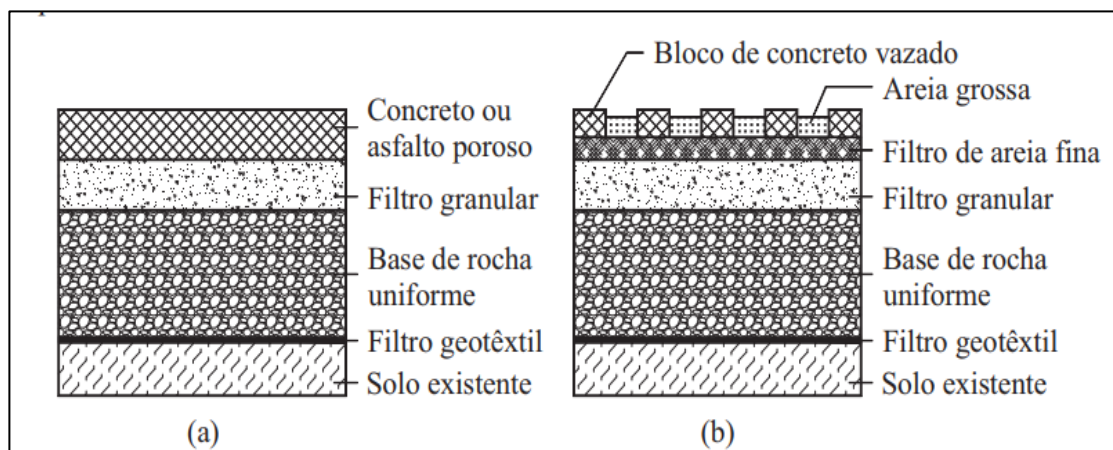
Os revestimentos permeáveis são uma alternativa ao uso de superficiais impermeáveis tradicionais, como asfalto e concreto, utilizadas em calçadas, estacionamentos, quadras esportivas e até mesmo no interior dos lotes. Como essas superfícies ocupam grande parte das áreas urbanas, o uso de pavimentos permeáveis faz com que sirvam para a infiltração da água das chuvas e, conseqüentemente, atuem na diminuição das enchentes.

Para evitar migração de partículas finas e, conseqüentemente, colmatação, são utilizados geotexteis no limite com o solo (DUARTE, 2003). A capacidade de armazenamento dos pavimentos porosos é determinada pela profundidade do reservatório de pedras subterrâneo (MIGUEZ, Marcelo Gomes).

O princípio geral dos pavimentos permeáveis é simplesmente recolher, tratar e permitir a livre infiltração de qualquer escoamento superficial, em apoio à recarga dos aquíferos. Em comparação aos sistemas tradicionais de drenagem, a retenção de águas pluviais e sua infiltração é um processo barato, eficaz, sustentável e é apropriado para áreas urbanas, como é de exemplo do modelo na (figura 4).

Além disso, os pavimentos permeáveis apresentam vários benefícios como a redução do escoamento superficial, a recarga das águas subterrâneas, a economia de água através da reciclagem e a prevenção da poluição. Embora os pavimentos permeáveis sejam adequados para uma grande variedade de edifícios residenciais, comerciais e aplicações industriais, o seu uso ainda é pouco frequente (SCHOLZ & GRABOWLECKI, 2007).

Figura 4 - Pavimento permeável



Fonte: Urbonas e Stahre, 1993

Esse tipo de medida compensatória para drenagem urbana além de ser utilizado como dispositivo hidráulico, ainda compõe o paisagismo da localidade podendo contribuir com a funcionalidade de infiltrar a água, e com a estética, o esquema desse dispositivo é constituído por uma cama de solo onde a vegetação possa desenvolver vida e logo abaixo uma camada de rochas que facilite a percolação e infiltração.

3.7 Relação Solo e Drenagem Urbana

De acordo com Bezerra (2006, p.16), o solo se constitui basicamente por estruturas sólidas, partes líquidas e gasosas sendo de origem mineral ou orgânica, sua área abrange a maior parte da superfície continentais do planeta terra. Sua estrutura é denominada por camadas classificadas de horizontes, estando sempre sujeita a transformações realizadas

por processos como adição, remoção e translação da natureza das composições químicas, físicas e biológicas.

Um dos fatores que contribui para o alagamento dos centros urbanos é de fato o aumento das áreas construídas, ou seja, não permeáveis, esse fator está agregado a constituição de porosidade dos materiais de construção, o que difere da constituição do solo, onde possivelmente se adaptaria melhor as condições de chuvas intensas do que por exemplo um bloco de concreto ou camada de pavimento asfáltico.

3.7.1 *Textura do solo*

O solo é um constituído de diversos materiais, é pode conter variação de tamanho dos grãos de acordo com Meurer (2012, p.21), a textura do solo é constituída por partículas de areia, silte e argila, os principais processos de reações que ocorre no solo, está associado à textura, pois através dela pode-se identificar a quantidade da superfície no quais as reações devem ocorrer, e influenciando outras propriedades do solo.

3.7.2 *Densidade de solo*

A densidade do solo também pode ser chamada por outros nomes, como densidade global e densidade aparente, e a mesma se encontra bastante impactada pelo manejo do homem, que são as ações antrópicas (ANDRADE *et al.* 1998).

3.7.3 *Porosidade de solo*

A porosidade de um solo está referida a quantidade de poros (expressos em porcentagem) que estão presentes no solo, esses poros são os que não estão preenchidos por componentes sólidos (minerais). Os solos que são considerados de menores porosidades são de texturas arenosas, devido suas partículas serem predominantemente grandes, tem a tendência de forma a disposição piramidal. Já os solos que tem maiores porosidades são os formados por terras de textura fina, pois as partículas não se arranjam de maneira tão compactada, sendo classificado como um solo argiloso, que tem maior contribuição para a formação de novos agregados que aumentam a porosidade do mesmo. Somente solos que são ricos em matéria orgânica apresentam maiores porosidades entre 60 e 80%, e os solos arenosos tem uma média de 35 a 50% de porosidade, e os argilosos em torno de 40 a 60% (RABELO, 2000).

3.7.4 *Armazenamento de água no solo*

Água e solo tem interações desde o início dos tempos isso é um fato consolidado, contribuindo para a continuidade de inúmeros processos tais como a distribuição de nutrientes no solo, a manutenção da vida pertencente ao solo consequentemente as também dependentes do mesmo. De acordo com Braga (2008), a água se trata de um recurso natural que pode ser utilizada para diversos fins, sendo sua principal função manter a manutenção e viabilizar a existência da vida nos seres humanos e outros organismos além de ser o sistema principal para a manutenção e vivência dos ecossistemas. Podemos ainda mencionar fatores correlacionados em caráter econômico, como a geração de emprego através de empresas de saneamento básico, agronegócio, indústria e entre outros.

Segundo os estudos de Pinto *et al.* (2008), A infiltração do solo, acontece por meio da percolação, ou da entrada das águas nas camadas de solo mais próximas da área de superfície contribuinte. A gravidade é a determinante que favorece essa infiltração, a água precipitada tende a preencher o vazio das camadas do solo, até o momento de chegada a uma camada suporte, através disso ocorre a formação de água no solo, até atingir uma certa capacidade de armazenamento de água.

3.8 Processo de revisão sistemática

3.8.1 *Revisão Sistemática*

A catalogação de forma sistemática da literatura é um importante marco para compreender como nosso objeto de estudo tem sido abordado em âmbito nacional ou internacional. Por revisão sistemática, é possível entendemos aqui, a investigação que se baseia em "dados da literatura sobre um tema específico", conforme afirmam Sampaio e Mancini (2007, p. 84), que apresenta, entre suas várias vantagens, a possibilidade de levantar espectros de maior relevância para o estudo, de forma detalhada e confiável, na bibliografia disponível. As revisões examinam "um conjunto mais restrito de estudos, pois possuem objetivos bastante específicos e focam em aprofundar os conhecimentos já existentes em um determinado tema, como a comparação entre a eficácia de diferentes métodos" (KLOCK, 2018).

É importante deixar claro que a qualidade dessa abordagem dependerá da origem dos dados e de sua consistência, uma vez que, como em qualquer outra técnica de pesquisa, exige rigor e análise crítica em relação ao material coletado (CONFORTO; AMARAL;

SILVA, 2011). Nesse contexto, trata-se de um método que propõe certos procedimentos e/ou modelos que são adequados a cada área do conhecimento, ao tema em questão ou aos recursos disponíveis para sua execução. Como afirma Klock (2018), esse tipo de pesquisa deve seguir rigorosamente os passos de um protocolo previamente definido, o que exige a formulação de diretrizes de busca bem claras, tornando o processo mais viável e simplificado.

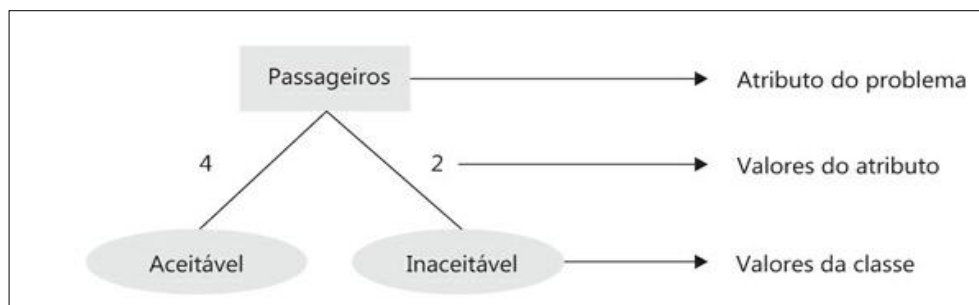
3.9 Árvore decisória e drenagem urbana

Conforme Canholi (2014), a utilização do método de árvore de decisão é fortemente sugerida como uma ferramenta valiosa e eficaz para aprimorar a análise da viabilidade econômica especificamente em projetos relacionados à drenagem urbana.

De acordo com Castro e Ferrari (2016), uma árvore de decisão é uma estrutura hierárquica em formato de árvore, onde os nós internos representam testes sobre atributos, os ramos indicam os resultados desses testes, e os nós folha correspondem a classes ou suas distribuições. O nó superior da estrutura é denominado nó raiz, e cada percurso da raiz até um nó folha estabelece uma regra de classificação, a estrutura está demonstrada na (figura 5).

Castro e Ferrari (2016) ressaltam que as árvores de decisão são vantajosas por serem geralmente concisas, de fácil visualização e compreensão. A facilidade em explicar as classificações propostas é outro ponto positivo, pois basta seguir o caminho na árvore para entender o motivo da classificação de um objeto em determinada categoria. Os autores explicam que modelos que permitem a explicitação do raciocínio por trás de cada resposta são conhecidos como caixa branca.

Figura 5 - Processo de decisão por árvore.



Fonte: Castro e Ferrari, 2016

Para Han e Kamber (2000), a indução de árvores de decisão é o processo de construir essas árvores utilizando conjuntos de dados de treinamento que já possuem

rótulos de classe. Eles explicam que uma árvore de decisão funciona como um fluxograma: cada nó interno (aquele que não é uma folha) realiza um teste em um atributo específico, cada ramo que se origina desse nó indica um possível resultado desse teste, e cada nó folha (ou terminal) é onde se encontra o resultado final da classificação, ou seja, o rótulo da classe. O ponto de partida de toda a árvore é o nó raiz, localizado no topo.

3.10 Tecnologia e meio ambiente

Em uma pesquisa que analisou o período de 2016 a 2020, Lima *et al.* (2020) identificaram 119 aplicativos com finalidade ambiental, o que demonstra a alta relevância que o tema adquiriu. Segundo os autores, a crescente necessidade de soluções práticas para os impactos no meio ambiente, aliada à popularização de tecnologias como smartphones e tablets, impulsionou a criação dessas ferramentas. Esse aumento no desenvolvimento de aplicativos reflete uma preocupação cada vez maior com as demandas ambientais nas últimas décadas.

Lima *et al.* (2020) argumentam que, diante da ampla utilização de tecnologias pela sociedade, é fundamental que as empresas do setor tecnológico desenvolvam ferramentas voltadas para a área ambiental. A análise dos dados revelou que essa atenção já é uma realidade, evidenciada pelo aumento no número de aplicativos criados, com destaque para o ano de 2019. A demanda por essas soluções tecnológicas rápidas e eficazes está em consonância com o desenvolvimento social, que busca respostas para os problemas gerados pelo consumo e produção em larga escala.

De acordo com Morais *et al.* (2022), o século XXI é marcado por uma expansão acelerada da comunicação móvel. A difusão dos smartphones impulsionou a computação móvel, criando novas possibilidades para a tecnologia da informação e permitindo que os usuários, por meio de dispositivos portáteis, acessem uma vasta gama de conteúdos na internet a qualquer instante. Os autores ainda destacam que os aplicativos, disponíveis nas lojas das principais plataformas, são o principal meio de acesso a esse universo de informações.

3.10.1 Desenvolvimento de aplicações mobile

De acordo com Teixeira *et al.* (2024), a compreensão dos fundamentos e das ferramentas para o desenvolvimento de aplicativos móveis transcende a simples aquisição

de conhecimento técnico, representando uma oportunidade para os indivíduos se inserirem e participarem ativamente de uma sociedade em contínua transformação tecnológica.

Conforme explicam Teixeira *et al.* (2024), o Flutter, desenvolvido pelo Google, é um framework que otimiza a criação de aplicativos para dispositivos móveis, web e desktops por meio de uma base de código única. A linguagem de programação utilizada é a Dart, que possui sintaxe semelhante à de linguagens como C e Java, sendo de tipagem opcional e multiparadigma com foco na orientação a objetos. Os autores ressaltam que a Dart, apesar de ter sido criada em 2011 com o intuito de substituir o JavaScript, não obteve sucesso em seu lançamento inicial devido à hesitação da comunidade de desenvolvedores em fragmentar as plataformas web e à desconfiança gerada por projetos descontinuados anteriormente pela Google.

Morais *et al.* (2022) explicam que um framework de desenvolvimento móvel é concebido para auxiliar na criação de aplicativos. Ele funciona como uma biblioteca de software que oferece a estrutura fundamental para o desenvolvimento de aplicações em um ambiente específico.

Conforme Moraes *et al.* (2022), o Flutter é um exemplo de framework que possibilita o desenvolvimento de aplicativos nativos para os sistemas Android e iOS, que são os mais populares atualmente. Para isso, utiliza a linguagem de programação Dart, desenvolvida pelo Google, que é orientada a objetos, com sintaxe semelhante à da linguagem C e projetada para a criação de aplicações web e móveis. Portanto, o domínio da linguagem Dart é um pré-requisito para os desenvolvedores que pretendem utilizar o framework Flutter.

4 METODOLOGIA

O processo e produção dessa peça técnica se balizou por 3 principais caminhos. A saber:

- I. **Levantamento:** Construção de revisão sistemática com ajuda da plataforma Parsifal, juntamente com um protocolo de busca, onde foram delimitadas palavras-chave, roteiros e locais de busca onde estão hospedados materiais correlacionados a drenagem urbana, desafios e manejo de águas pluviais.
- II. **Árvore decisória:** Com a base de informações e artigos construídas na etapa de levantamento do estado da arte, foi possível estruturar rotas de decisões que premissa cenários e soluções.
- III. **Melhoria na identificação dos pontos de alagamentos:** Por meio do desenvolvimento mobile, elaborou-se uma aplicação de interface intuitiva onde o principal agente fomentador de dados é a própria população, que diante das ocorrências de pontos de alagamento irão informar através do aplicativo construído enviando uma foto com geolocalização, contribuindo assim para identificação dos pontos em tempo real.

Podendo ser observado em forma de fluxo de trabalho na (figura 6).

Figura 6 - Fluxo metodológico



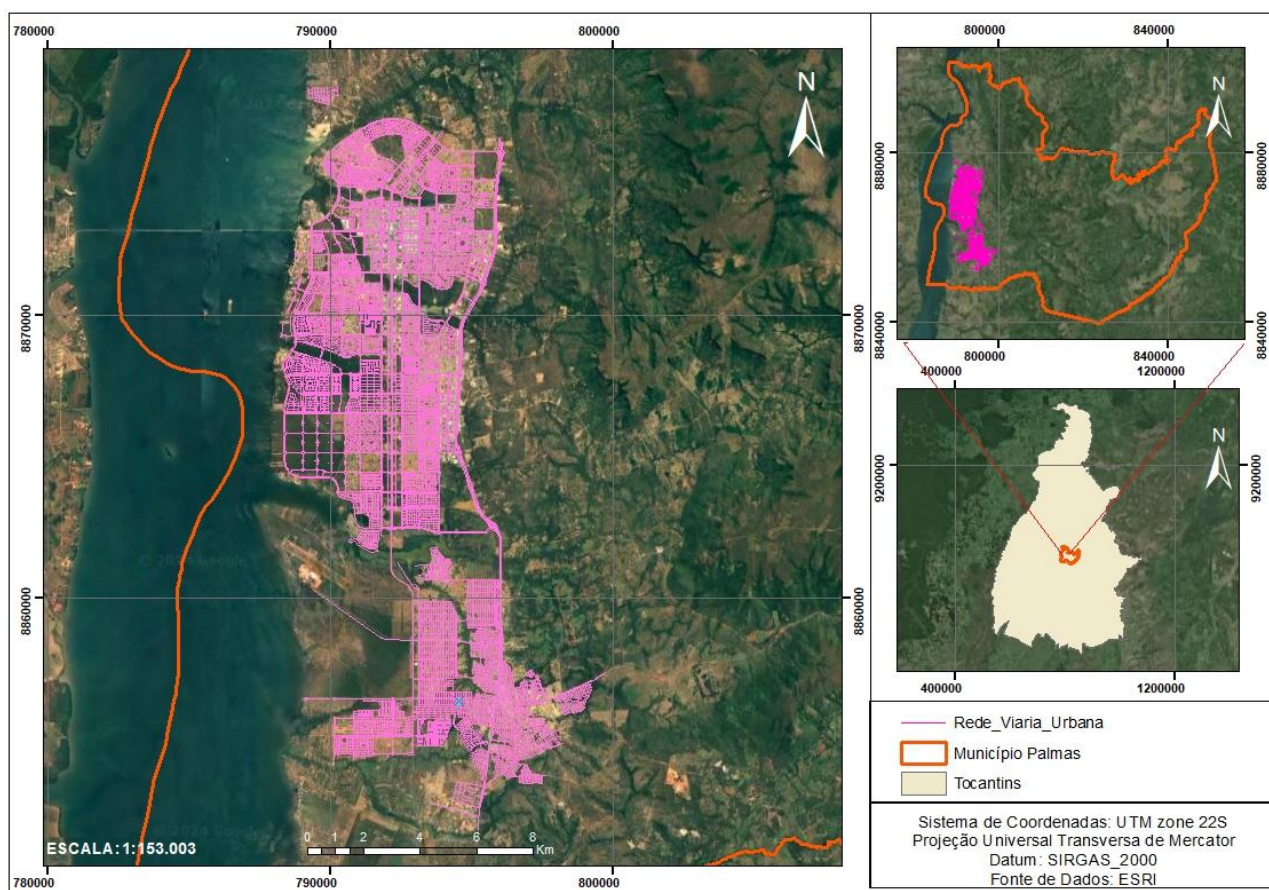
Fonte: Autor 2025

4.1 Área de estudo

Localizada na Mesorregião Oriental do Estado, Palmas (Figura 7) teve seu nome escolhido em homenagem à Comarca de São João da Palma (atual município de Paranã), sede do primeiro movimento separatista da região, instalada em 1809 na barra do Rio Palma com o Rio Paranã. Outro fator que influenciou o nome foi a grande quantidade de palmeiras na região (SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO DO TOCANTINS, 2021).

Somente um ano depois, com o desmembramento do Estado do Tocantins do Estado de Goiás pela Constituição de 1988, é que Palmas finalmente começou a surgir. A última capital brasileira planejada desfruta de uma posição privilegiada, funcionando como um elo entre a região Norte e o restante do País. A cidade é localizada no coração do Brasil e é cercada pelas serras do Carmo, Lajeado e pelo rio Tocantins. (SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO DO TOCANTINS, 2021)

Figura 7 - Croqui de localização de Palmas-TO.



Fonte: Autor, 2025

De acordo com os dados do IBGE a população de Palmas teve um crescimento significativo ao longo das últimas três décadas, passando de 24.334 habitantes em 1991

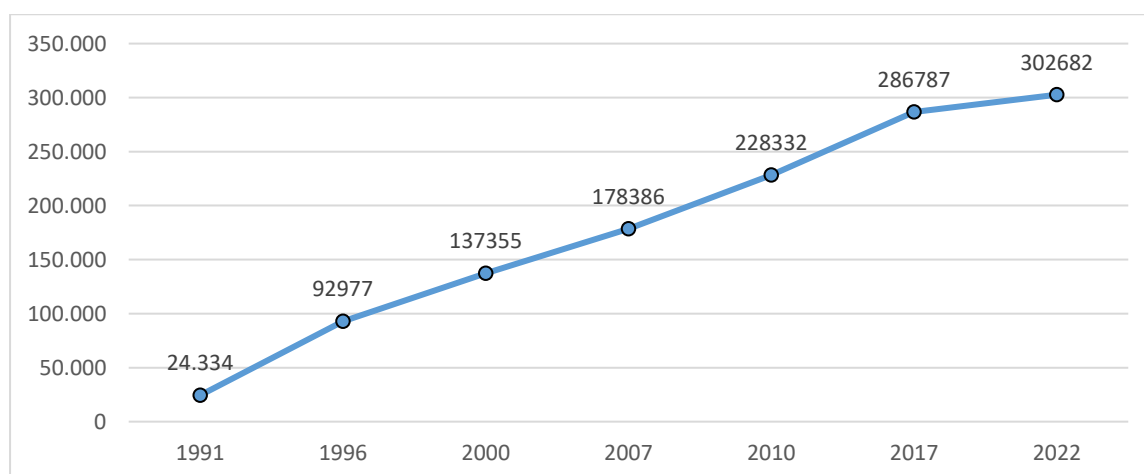
para 302.682 em 2022. Esse crescimento inicial foi impulsionado por diversos fatores, incluindo políticas de desenvolvimento urbano e investimentos em infraestrutura.

Nos anos seguintes, embora a taxa de crescimento tenha desacelerado, ainda foi substancial. Entre 1996 e 2010, a população continuou a crescer, passando de 92.977 para 228.332 habitantes. Esse período viu um aumento constante, com taxas de crescimento variando de 28% a quase 48% em diferentes intervalos de tempo.

No entanto, entre 2017 e 2022, a taxa de crescimento populacional diminuiu significativamente para 5,54%, com a população aumentando de 286.787 para 302.682. Este declínio na taxa de crescimento percentual pode indicar um amadurecimento da cidade e uma estabilização no ritmo de crescimento populacional. Apesar disso, o aumento real de 74.360 pessoas desde o último Censo em 2010 demonstra que Palmas continua a crescer, embora em um ritmo mais lento, refletindo mudanças nas dinâmicas de desenvolvimento urbano e socioeconômico da região.

Essa análise pode ser visualizada através do gráfico abaixo na (Figura 8).

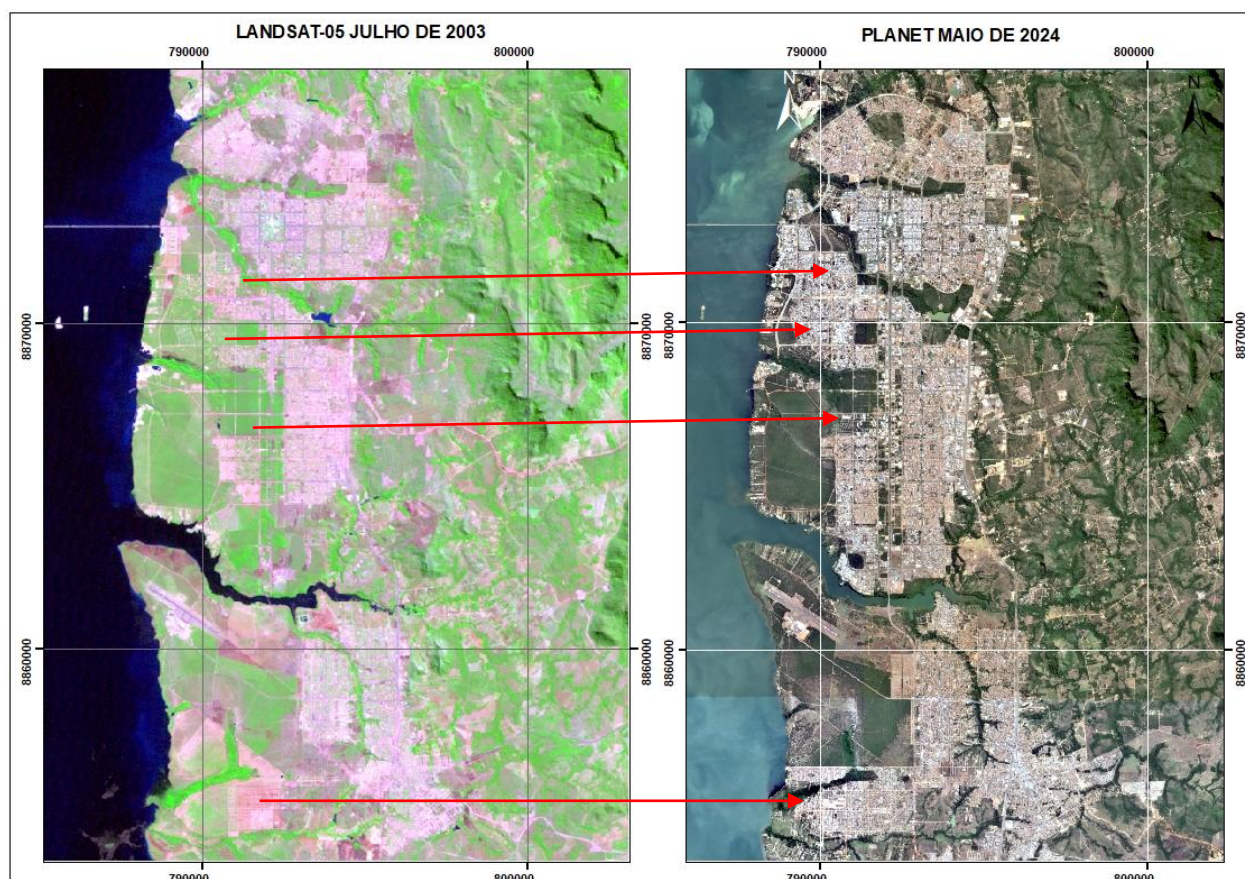
Figura 8 - Análise do Crescimento Populacional Palmas-TO.



Fonte: Autor, 2025

Não somente a quantidade de pessoas em Palmas-TO tem sido aumentada significativamente, mas também o uso e ocupação do solo. Percebe-se que na imagem abaixo, há uma diferenciação do volume de edificações entre os períodos de 2003 e 2024, é possível verificar que houve também durante esse período a construção de infraestrutura viária, e edificações para diversos fins, contribuindo para o aumento de áreas impermeabilizadas. Na (Figura 9) é possível identificar a diferença do uso e ocupação do solo, e das camadas vegetais disponíveis em ambas as imagens.

Figura 9 - Análise de adensamento populacional de Palmas-TO.



Fonte: Autor, 2025

4.2 Revisão sistemática

Para conseguir atingir o objetivo (A), será realizada uma revisão sistemática utilizando o Parsifal começando com a definição clara da pergunta de pesquisa, frequentemente estruturada no formato PICO (População, Intervenção, Comparação, Resultados). A seguir, desenvolve-se um protocolo detalhado que inclui os critérios de inclusão e exclusão dos estudos, fontes de dados, estratégia de busca, e métodos para coleta e avaliação de dados. Este protocolo garante a transparência e a replicabilidade da revisão.

A busca de literatura é conduzida em bases de dados selecionadas como utilizando palavras de busca específicas. O Parsifal facilita a importação dos resultados dessas buscas, a remoção de duplicatas, e a triagem inicial dos estudos por meio da leitura dos títulos e resumos. Estudos relevantes são então avaliados na íntegra e dados pertinentes são extraídos utilizando formulários predefinidos na plataforma.

Os dados extraídos são analisados e sintetizados, podendo resultar em uma meta-análise ou em uma síntese narrativa, dependendo da natureza dos dados. A qualidade dos estudos é avaliada utilizando ferramentas como o Cochrane Risk of Bias Tool. Finalmente,

os resultados são interpretados e discutidos em relação à pergunta de pesquisa original, e relatados de maneira clara e detalhada.

Dos passos a seguir construídos com o Parsifal

- Definição da Pergunta de Pesquisa: Identificação clara e precisa do problema de pesquisa a ser investigado.
- Desenvolvimento do Protocolo: Criação de um plano detalhado que inclui critérios de inclusão e exclusão, fontes de dados, e estratégias de busca.
- Condução da Busca de Literatura: Busca nas bases de dados selecionadas utilizando strings de busca específicas.
- Importação e Remoção de Duplicatas: Importação dos resultados para o Parsifal e eliminação de duplicatas.
- Triagem de Estudos: Leitura dos títulos e resumos para determinar a relevância dos estudos.
- Avaliação Completa dos Textos: Leitura completa dos textos selecionados para uma análise mais detalhada.
- Extração de Dados dos Estudos: Coleta de dados relevantes dos estudos incluídos.
- Avaliação da Qualidade dos Estudos: Uso de ferramentas específicas para avaliar a qualidade dos estudos.
- Síntese e Análise dos Dados: Análise dos dados coletados, podendo incluir meta-análise ou síntese narrativa.
- Interpretação e Discussão dos Resultados: Interpretação dos resultados e discussão de suas implicações.
- Relato dos Resultados: Redação e apresentação dos resultados de forma clara e estruturada.

4.2.1 *PICOC*

Population: Áreas urbanas sujeitas a alagamentos.

Intervention: Medidas estruturais (infraestrutura cinza e verde), Medidas não estruturais (planejamento, políticas públicas, conscientização), Ferramentas digitais e sistemas de monitoramento.

Comparison: Não identificado

Outcome: Levantamento do estado da arte em soluções integradas, Identificação de técnicas e medidas eficazes para mitigação, Subsídios para desenvolver árvore decisória e aplicativo de monitoramento.

Context: Cidade de Palmas-TO como referência, considerando experiências nacionais e internacionais publicadas nos últimos 15 anos.

4.2.2 *Questões de pesquisa*

Quais são as principais soluções, técnicas e abordagens integradas utilizadas para reduzir alagamentos em áreas urbanas, conforme descrito na literatura científica recente?

Quais são os métodos e critérios adotados para seleção e priorização de medidas de drenagem urbana (ex.: árvore decisória, indicadores, critérios multicritério)?

Quais ferramentas tecnológicas ou sistemas de monitoramento têm sido desenvolvidos e aplicados para identificar e gerenciar ocorrências de alagamentos em cidades?

Quais são as barreiras (técnicas, institucionais, financeiras ou sociais) relatadas na literatura para a implementação de soluções integradas de drenagem urbana e monitoramento de alagamentos?

Quais lacunas de pesquisa são apontadas pelos estudos recentes quanto ao uso combinado de infraestrutura verde, cinza e ferramentas digitais para mitigação de alagamentos?

4.2.3 *Palavras-chave e sinônimos*

Tabela 1- Palavras-chave.

Palavra-chave	Sinônimos
Soluções integradas	Soluções baseadas na natureza, sistemas de drenagem urbana sustentáveis
Drenagem Urbana	drenagem urbana, sistemas de drenagem
Inundações urbanas	Alagamentos, Inundações, pluvial flooding, urban inundation
Planeamento urbano	Sistemas de Apoio à Decisão, Árvore de Decisão, Governança da Água Urbana

4.2.4 *Cadeia de caracteres de pesquisa*

- ("drenagem urbana" OU "gestão de águas pluviais" OU "águas pluviais urbanas" OU "gestão urbana da água") e ("inundação urbana" OU "inundação urbana" OU "inundação pluvial" OU "risco de inundação");
- ("soluções integradas" OU "abordagem integrada" OU "soluções baseadas na natureza" OU "SUDS" OU "LID" OU "infraestrutura verde")
E("ferramentas de monitoramento" OU "sensoriamento remoto" OU "GIS" OU "aplicativo móvel" OU "ferramentas digitais").

4.2.5 *Fontes*

Periódicos CAPES (<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez6.periodicos.capes.gov.br/>)
 Sciencedirect (<https://www.sciencedirect.com/>)

4.2.6 *Critério de seleção*

Critério de inclusão:

Estudos originais, revisões sistemáticas, revisões narrativas, dissertações e relatórios técnicos que abordem soluções de drenagem urbana, monitoramento ou mitigação de alagamentos.

Estudos que tratam de dispositivos auxiliares a drenagem urbana

Estudos que tratam de drenagem sustentável

Estudos que tratam de drenagem urbana

Estudos que tratam de soluções de alagamentos

Estudos que tratem de sistemas de drenagem urbana, técnicas de mitigação de alagamentos, monitoramento e tecnologias associadas, com foco em soluções integradas.

Publicações dos últimos 15 anos

Critério de exclusão:

Artigos de opinião, editoriais, notícias, resumos de eventos sem texto completo, trabalhos não revisados por pares.

Artigos duplicados em diferentes bases, considerar somente uma versão.

Estudos anteriores a 2000

Estudos duplicados

Estudos em qualquer idioma que não seja inglês ou português

Estudos focados exclusivamente em áreas rurais, zonas costeiras marinhas ou ambientes naturais sem interferência urbana.

Estudos fora do escopo (Drenagem Urbana ou Drenagem sustentável)

Estudos que não abordem drenagem urbana, alagamentos, monitoramento ou soluções integradas para esses problemas.

Estudos sobre ausência de saneamento

Estudos sobre saúde ambiental

Estudos sobre solos

Literatura cinza (manuais, relatórios, dissertação, trabalhos de conclusão de curso, teses)

4.2.7 *Lista de verificação de avaliação de qualidade*

Perguntas:

Os autores descrevem as limitações do estudo?

O estudo realizou algum experimento para alcançar os objetivos?

O objetivo da pesquisa está claramente descrito?

O estudo utilizou alguma cidade como exemplo de problemas com drenagem urbana?

Apresentam metodologia clara e adequada?

Descrevem as soluções e intervenções de forma detalhada?

A metodologia utilizada para avaliar as soluções de drenagem urbana está bem descrita e adequada?

As intervenções ou soluções propostas são detalhadas de forma suficiente para reprodução?

O contexto urbano (localização, características da área) é descrito adequadamente?

O estudo apresenta dados e análises que suportam as conclusões sobre a eficácia das soluções?

Respostas:

Sim

Parcialmente

Não

4.2.8 *Formulário de extração de dados*

Objetivo do estudo;

Autores;

Data de publicação;

País de Publicação;

Descrição das Soluções de Drenagem Urbana

Aspectos da drenagem urbana

Desafios relacionado a enchentes e planejamento urbano

Tecnologias e ferramentas utilizadas

4.2.9 *Estudos Importados*

Periódicos CAPES: 101

Sciencedirect: 125

4.3 **Árvore decisória**

4.3.1 *Premissas para construção da árvore decisória*

4.3.1.1 Identificação do local de ocorrência

Visa determinar o ponto exato onde ocorre o alagamento, pois a tipologia do local impacta diretamente a escolha das medidas mitigadoras e o grau de intervenção necessário. A classificação do local segue três categorias principais:

I. Alagamento em Lote/Edificação

- **Residencial:** Áreas destinadas a moradia, que geralmente apresentam menor área impermeável individual, mas que podem se somar em áreas com alta densidade populacional. Nestes casos, técnicas como reservatórios de lote e jardins de chuva são priorizadas para mitigar a contribuição do escoamento gerado.
- **Comercial/Institucional:** Ambientes com grandes áreas impermeáveis (estacionamentos, telhados extensos), onde soluções como pavimentos permeáveis e telhados verdes apresentam maior efetividade e compatibilidade com o uso do espaço.

II. Alagamento em Via

- Rua local pavimentada: Trechos onde o escoamento superficial é intensificado pela impermeabilização. São indicadas medidas como bacias de retenção em pontos críticos e biovaletas ao longo do meio-fio.
- Rua local não pavimentada: Vias de solo exposto, suscetíveis à erosão e formação de valetas. Podem demandar valas de infiltração ou microbacias de contenção para controle de sedimentos e infiltração.
- Avenida/arterial: Corredores de tráfego intenso e largas seções viárias, com escoamento rápido e maior risco de inundações setoriais ou generalizadas. Demandam infraestrutura robusta de macrodrenagem associada a dispositivos de controle difuso, como lagoas de retenção.

III. Alagamento em Estacionamento ou praças públicas

- Aberto (superfície): Áreas expostas com grande contribuição de escoamento, onde se recomendam pavimentos permeáveis ou jardins de chuva lineares.
- Coberto (subterrâneo): Espaços com acesso limitado e risco de danos estruturais, exigindo medidas preventivas como bombas de recalque automáticas e barreiras físicas associadas a sistemas de alerta.

4.3.1.2 Diagnóstico da infraestrutura existente

Avaliar a presença e a capacidade do sistema de macrodrenagem que atende à área analisada. Essa verificação direciona a tomada de decisão, pois define se será necessário reforçar a macroestrutura existente ou implantar dispositivos locais para compensar sua ausência.

Existe sistema de macrodrenagem?

- Sim: Quando identificado um sistema já implantado (bueiros, galerias, canais), deve-se avaliar:
 - Capacidade hidráulica: Verificar se o dimensionamento suporta os eventos críticos atuais (frequência e intensidade de chuvas).
 - Condições de manutenção: Identificar entupimentos, assoreamentos ou falhas estruturais que reduzem a eficiência do sistema.

- Integração com medidas compensatórias: Mesmo com macrodrenagem, técnicas como telhados verdes e reservatórios podem reduzir a sobrecarga do sistema.
- Não: Em áreas sem macrodrenagem estruturada:
- Priorizar microdispositivos e soluções baseadas na natureza (SbN), como biovaletas, jardins de chuva e trincheiras de infiltração.
- Considerar implantação futura de sistemas maiores, mas adotar inicialmente medidas descentralizadas e de rápida execução.

4.3.1.3 Classificação do alagamento

Este nível classifica o grau e a abrangência do alagamento para adequar a escala da resposta. A severidade do impacto define se a intervenção será pontual, setorial ou sistêmica.

- Pontual
Alagamentos localizados em pontos críticos específicos, geralmente causados por: Impermeabilização isolada (ex.: calçada ou pátio).
Entupimento de bocas de lobo ou falhas de manutenção.
- Setorial
Alagamentos que afetam ruas ou quarteirões inteiros, caracterizando déficit local da rede de drenagem.
- Generalizado
Envolve avenidas e áreas extensas da bacia hidrográfica.

4.4 Aplicativo Alagou

A arquitetura do aplicativo Alagou foi construída utilizando a linguagem de programação Dart, por meio do framework Flutter, ambos desenvolvidos pelo Google. Essa escolha se deu pela capacidade do Flutter de oferecer uma base de código única para múltiplas plataformas, como dispositivos móveis, web e desktop, o que favorece a eficiência no desenvolvimento e manutenção do aplicativo. De acordo com Moraes et al. (2022), o Flutter permite a criação de aplicativos móveis nativos para Android e iOS utilizando Dart, uma linguagem orientada a objetos com sintaxe inspirada em C, projetada para aplicações móveis e web. Essa abordagem proporcionou maior agilidade no desenvolvimento, facilitando a integração entre as funcionalidades do sistema e sua interface com o usuário.

Segundo Teixeira et al. (2024), Dart é uma linguagem tipada e multiparadigma, com recursos modernos como generics, funções de alta ordem e mixins, o que contribui para a modularidade e reutilização do código. Além disso, o Flutter oferece uma rica biblioteca de componentes visuais, o que torna mais intuitiva a construção da interface gráfica e permite uma experiência mais fluida para o usuário. Assim, a escolha dessa arquitetura foi fundamental para garantir desempenho, escalabilidade e portabilidade ao aplicativo ALAGOU, além de acompanhar as tendências atuais no desenvolvimento de soluções tecnológicas móveis.

O aplicativo ALAGOU visando facilitar a comunicação e o gerenciamento de informações relacionadas a eventos de alagamento, através de um sistema de acesso hierárquico. A jornada do usuário inicia-se na tela de login, onde usuários cadastrados podem acessar suas contas. Para novos usuários, o sistema direciona para a tela de cadastro, que requer a inserção de informações essenciais como nome completo, email, cpf, senha e cidade, garantindo a identificação e localização dos usuários na plataforma. Após a autenticação, o sistema identifica o tipo de usuário, direcionando-o para as funcionalidades e permissões correspondentes.

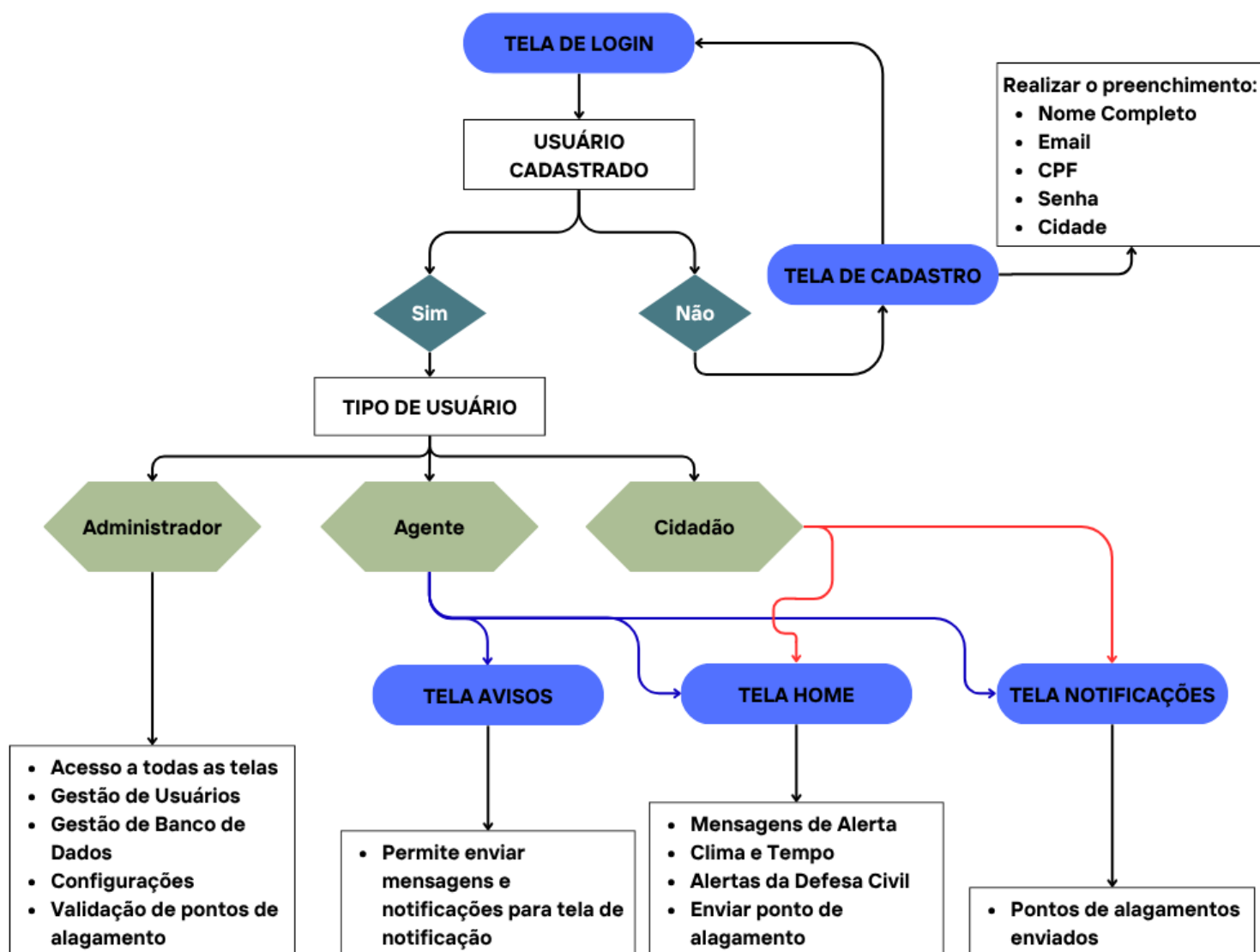
A estrutura de permissões do aplicativo é dividida em três perfis distintos, cada um com um conjunto específico de funcionalidades. O administrador detém o mais alto nível de privilégios, possuindo acesso irrestrito a todas as telas do aplicativo. Suas responsabilidades abrangem a gestão completa do sistema, incluindo a gestão de usuários, permitindo adicionar, remover ou modificar perfis; a gestão de banco de dados, para manipulação e supervisão das informações armazenadas; o controle sobre as configurações gerais do aplicativo; e a crucial validação de pontos de alagamento, assegurando a veracidade dos dados reportados antes de sua disseminação oficial.

O perfil do agente é destinado para as forças de segurança pública, e atua como um elo intermediário na comunicação, com foco na disseminação de informações. Este usuário tem acesso à tela avisos, uma funcionalidade exclusiva que permite o envio de mensagens e notificações diretamente para a tela de notificação dos demais usuários. Essa capacidade é fundamental para a rápida comunicação de alertas, atualizações sobre a situação de alagamentos ou quaisquer outras informações relevantes para a comunidade, estabelecendo um canal direto e eficiente para a gestão de crises.

Por fim, o cidadão representa o usuário final e a principal fonte de dados em campo. Seu acesso é focado na recepção de informações e na contribuição ativa para o monitoramento de alagamentos. Na tela home, o cidadão recebe mensagens de alerta,

informações sobre clima e tempo, e alertas da defesa civil, mantendo-se informado sobre as condições de risco. Além disso, uma funcionalidade vital para a colaboração é a capacidade de enviar pontos de alagamento, permitindo que o cidadão reporte incidentes em tempo real. A tela notificações, por sua vez, exibe os pontos de alagamentos enviados pelo próprio usuário, além de todas as mensagens e notificações recebidas dos agentes, completando o ciclo de comunicação e engajamento comunitário na gestão de riscos.

Figura 10 - Fluxo de funcionamento do ALAGOU.



Fonte: Autor, 2025

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Revisão sistemática

Durante o processo de revisão sistemática, foi realizada a busca de artigos e material técnico dos últimos 15 anos sobre drenagem urbana, gestão de águas pluviais, medidas compensatórias e técnicas de controle de enchentes. Ao final do processo de triagem e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 66 artigos para compor a base de análise deste trabalho. A seguir, apresentam-se trechos e técnicas levantadas a partir desses estudos, enquanto a lista completa de todos os trabalhos filtrados é apresentada em apêndice.

5.1.1 *Soluções de infiltração e controle na fonte*

5.1.1.1 Taxa de permeabilidade mínima como instrumento de controle na fonte

Segundo Gorniack (2014), uma das soluções estruturantes para mitigação dos problemas de escoamento superficial e, por consequência, de alagamentos na bacia do rio Itapocu consistiu na definição de uma Taxa de Permeabilidade Mínima (TPM) para os lotes urbanos, a partir de um método próprio de dimensionamento. O autor propôs uma equação que relaciona a família padrão adotada pelo IBGE (quatro habitantes), o índice de área verde recomendado por habitante (12 m²/hab) e a área do lote padrão mínimo (240 m²), resultando em um percentual mínimo de área permeável a ser garantido em cada parcela urbana.

De acordo o autor essa metodologia foi aplicada, por exemplo, ao município de Joinville, conduzindo à adoção de 20% de permeabilidade mínima em sua legislação urbanística. Tal solução está diretamente alinhada às diretrizes da pesquisa, que tinham como objetivo analisar a aplicação dos princípios da Drenagem Urbana Sustentável (DUS) na escala municipal, propor um método de cálculo da taxa de permeabilidade e, assim, introduzir um novo modo de gestão do escoamento pluvial baseado no controle na fonte, reduzindo volumes escoados e picos de vazão que contribuem para alagamentos em áreas urbanizadas.

5.1.1.2 Jardins drenantes como medida compensatória no lote

Conforme Gorniack (2014), outra tecnologia adotada como solução para o controle de alagamentos na bacia do Itapocu foi a implantação de medidas compensatórias de infiltração no nível do lote, consolidadas no conceito de “jardins drenantes”. A partir da terceira diretriz do estudo, o autor examinou alternativas de drenagem que permitissem reter e infiltrar a água de chuva diretamente na propriedade, em consonância com os princípios da DUS.

Gorniack (2014) relata que os jardins drenantes foram incorporados à regulamentação municipal de Joinville, por meio de decreto específico, como um novo *modus operandi* para o controle do escoamento superficial, funcionando como áreas verdes técnicas capazes de aumentar a infiltração, reduzir o volume de escoamento lançado à rede pública e atenuar a frequência e a intensidade de alagamentos. Essa solução decorre explicitamente do objetivo central da dissertação de harmonizar o ambiente construído e o meio natural, ao substituir a lógica exclusivamente canalizada da drenagem por dispositivos de base verde que distribuem o controle de vazões entre os diversos lotes urbanos.

5.1.1.3 Poços de infiltração dimensionados com eventos de chuva característicos

Segundo Gonçalves e Teixeira (2021), a solução de mitigação dos impactos do escoamento superficial avaliada no estudo consiste no uso de poços de infiltração em lotes urbanos, cujo desempenho hidrológico é analisado a partir de eventos de chuva característicos (ECC). Os autores adaptam a metodologia de ECC para a realidade de São Carlos, extraindo de uma longa série histórica 770 eventos pluviométricos, classificados em seis faixas de intensidade com base em percentis, por meio de rotina desenvolvida em Visual Basic for Applications. Em seguida, aplicam esses eventos a um poço de infiltração dimensionado conforme o Código de Obras municipal (mínimo de 5 L de volume por metro quadrado impermeabilizado), implantado no campus da UFSCar para receber o escoamento de uma área de 287,5 m², simulando o balanço hídrico pelo modelo de Green-Ampt modificado e equações de reservação.

O trabalho de Gonçalves e Teixeira (2021), indicam que o poço é capaz de infiltrar integralmente os volumes gerados por eventos até o 75º percentil, e que, mesmo em chuvas mais severas, há redução significativa do extravasamento, evidenciando o potencial dessa

tecnologia como medida compensatória de drenagem urbana sustentável para redução de cheias.

5.1.1.4 Área verde mínima em loteamentos como medida de controle de escoamento

Silveira, Oliveira e Schuch (2020), traz dentre seus estudos que a solução proposta para mitigar os impactos hidrológicos decorrentes da implantação de loteamentos urbanos consiste na definição e exigência de um percentual mínimo de área verde, adotado em 25% da área total loteada, como critério para que o empreendimento seja considerado sustentável quanto ao ciclo hidrológico local.

Os autores aplicam o método Delphi com especialistas para quantificar esse parâmetro e, em seguida, verificam sua viabilidade em um estudo de caso no loteamento Portal da Colina, em São José (SC), onde a área verde inicialmente projetada (20,32%) é ampliada para 25,33% por meio da conversão de áreas de jardim em áreas verdes e da transformação de lotes, especialmente em setores declivosos, em espaços vegetados comuns.

Ainda de acordo Silveira, Oliveira e Schuch (2020), essa redistribuição espacial resulta em aumento significativo da área permeável, redução do escoamento superficial e maior retenção da água de chuva dentro dos limites do loteamento, aproximando o balanço hídrico pós-ocupação das condições prévias de uso do solo.

5.1.1.5 Telhados verdes

Conforme Canabrava Neto et al. (2021), o telhado verde é apresentado como medida de drenagem urbana capaz de reter parte significativa do escoamento superficial gerado nas coberturas das edificações, reduzindo a sobrecarga nas redes convencionais e contribuindo para a mitigação de inundações em áreas densamente impermeabilizadas. Os autores descrevem o telhado verde como um sistema em camadas, envolvendo membrana impermeabilizante, barreira de raízes, camada drenante, filtro, substrato e vegetação, cujo desempenho hidrológico varia conforme fatores externos (clima, estações do ano) e internos (espessura e composição do substrato, tipo de vegetação, inclinação e idade da cobertura).

A partir de estudos compilados, o trabalho de Canabrava Neto et al. (2021), aponta que essas coberturas podem reduzir de forma expressiva o volume anual de escoamento e atrasar o pico de descarga, além de melhorar a qualidade da água armazenada para eventual

reaproveitamento, o que reforça o papel desse dispositivo como parte de estratégias de controle na fonte do escoamento pluvial.

Em complemento, os autores analisam legislações estaduais e municipais que estimulam sua adoção, como leis que reconhecem o telhado verde como área equivalente à permeável ou o vinculam a incentivos fiscais do tipo IPTU Verde, indicando que a combinação entre desempenho hidrológico e instrumentos de incentivo normativo reforça o potencial dessa solução para apoiar a drenagem urbana.

Canabrava Neto et al. (2021), ao concluir que as coberturas verdes contribuem para a retenção de águas pluviais, a redução do escoamento superficial e a compensação da perda de áreas permeáveis em centros adensados, ainda que necessitem ser articuladas a outras medidas de manejo de águas pluviais.

5.1.1.6 Pavimentos permeáveis com agregado reciclado para mitigar empoçamentos urbanos

Akhtar et al. (2025) tratam o alagamento de vias e áreas de estacionamento como consequência da impermeabilização e analisam o uso de pavimento asfáltico poroso com agregado graúdo reciclado como medida de drenagem em superfície. O estudo produz nove misturas de asfalto poroso, variando as proporções de agregados reciclados de concreto nas frações de 19,0 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, e avalia para cada traço a estabilidade Marshall, a deformação de fluxo e a permeabilidade em ensaio de carga hidráulica decrescente.

Os estudos de Akhtar et al. (2025), relata que os traços ensaiados, a mistura denominada PAP-6, com proporção 1:1:0,5 entre as frações, apresenta estabilidade em torno de 9,33 kN, deformação próxima de 4,1 mm e coeficiente de permeabilidade da ordem de $1,49 \times 10^{-3}$ m/s, conciliando capacidade de suporte para tráfego leve com drenagem eficiente da água infiltrada.

Com base nesses resultados, os autores indicam que a aplicação do pavimento poroso em estacionamentos, rotatórias e faixas laterais pode reduzir lâminas de água superficiais, favorecer a recarga do aquífero raso e contribuir para o controle de empoçamentos, associando o desempenho hidráulico ao aproveitamento de resíduos de concreto.

5.1.2 *Técnicas compensatórias em espaços públicos e infraestrutura verde local*

5.1.2.1 Trincheiras de infiltração combinadas à drenagem convencional

Segundo França e Cauduro (2019), a solução proposta para mitigação dos alagamentos na avenida estudada em Criciúma consistiu na adoção de um sistema de drenagem sustentável combinado, integrando trincheiras de infiltração ao sistema convencional existente de sarjetas e bocas de lobo. Após o diagnóstico hidráulico, que evidenciou déficit de bocas de lobo, sarjetas rasas, trechos com declividade longitudinal nula e conseqüente extravasamento em diversos pontos da via, os autores dimensionaram trincheiras quadradas de um metro de lado por um metro de profundidade, distribuídas ao longo da avenida, podendo ser executadas de forma linear contínua na menor cota ou espaçadas em cada trecho.

França e Cauduro (2019) ressaltam que a incorporação dessas estruturas permitiu captar parte significativa do deflúvio superficial diretamente no solo, reduzir as vazões escoadas pelas sarjetas, diminuir a frequência de extravasamentos (de dezesseis para três pontos críticos) e atenuar a velocidade do escoamento pluvial, sem necessidade de substituição integral da rede existente.

5.1.2.2 Biovaletas e infraestrutura socioecológica em projetos de expansão urbana

Conserva et al. (2019) analisam o Trecho 2 da Etapa 1 do Setor Habitacional Taquari, na Serrinha do Paranoá em Brasília-DF, propondo como solução para os impactos de escoamento superficial a reconfiguração do projeto de expansão urbana com base em infraestrutura socioecológica, tendo as biovaletas como elemento central do sistema de drenagem.

No estudo de Conserva et al. (2019), em contraste com o cenário originalmente previsto pela administração pública, assentado em urbanização convencional com elevada impermeabilização, galerias e bacias de detenção lançando diretamente no Lago Paranoá, é estruturado um terceiro cenário projetual em que valas vegetadas acompanham o traçado das vias e as curvas de nível, promovendo maior infiltração, aumento do tempo de concentração e redução da velocidade do escoamento.

A partir de cálculos pelo Método Racional e de simulações hidrológicas no modelo SWMM, Conserva et al. (2019) verificam que a urbanização conforme o projeto tradicional acarretaria aumento da vazão máxima de escoamento da ordem de 167% em relação à

situação pré-desenvolvimento, enquanto a implantação das biovaletas permite reduzir essa vazão, em comparação ao cenário urbanizado sem tais dispositivos, em até 97%, com alterações mínimas nas demais parcelas do ciclo hidrológico.

5.1.2.3 Integração de sistemas de espaços livres com pavimentos permeáveis, bacias de retenção e jardins de chuva

Battemarco et al. (2018) estudam a Praça Xavier de Brito e seu entorno na bacia do Canal do Mangue, no Rio de Janeiro, e propõem como resposta aos alagamentos a reorganização do sistema de espaços livres ao longo do rio Maracanã, associando-o à implantação de drenagem urbana sustentável. Nesse sentido, Battemarco et al. (2018) buscam articular o desenho urbano e a infraestrutura verde para enfrentar recorrentes problemas de inundação em área densamente ocupada.

Com base no diagnóstico das manchas de inundação e das fragilidades de calçadas, praças e margens do rio, Battemarco et al. (2018) definem um percurso-piloto de aproximadamente 2,2 km entre as praças Professor Pinheiro Guimarães e Lamartine Babo e sugerem um conjunto de medidas distribuídas: substituição de pavimentos convencionais por pavimentos permeáveis em calçadas, estacionamentos e áreas internas das praças; criação de bacias de retenção por meio do rebaixamento da área destinada aos cães, dos canteiros de fundo e do chafariz na Praça Xavier de Brito, bem como do rebaixamento da área interna da Praça São Charbel; implantação de jardins de chuva em canteiros e calçadas mais largas, configurados como sistemas de biorretenção; retirada de obstáculos físicos que dificultam a comunicação entre o leito canalizado e a planície adjacente; e qualificação dos espaços de permanência para pedestres, ampliando calçadas e mobiliário urbano.

A eficácia dessas intervenções foi avaliada por Battemarco et al. (2018) com o modelo hidrodinâmico MODCEL, que indicou pequena redução média das lâminas de alagamento ao longo do percurso (cerca de 4 cm) para evento de 25 anos, reforçando a necessidade de replicar medidas semelhantes em toda a bacia para ganhos mais expressivos. Essa proposta de articular espaços livres e dispositivos de retenção e infiltração, conforme discutem Battemarco et al. (2018).

5.1.2.4 Infraestrutura verde em espaços livres públicos de centros históricos tombados

Segundo Medeiros e Afonso (2017), a solução proposta para reduzir alagamentos no centro histórico tombado de Laguna–SC baseia-se na adaptação dos espaços livres públicos existentes para desempenharem função de infraestrutura verde, articulados em uma rede que acompanha os talwegues naturais da microbacia.

Medeiros e Afonso (2017) realizam, inicialmente, o mapeamento e a classificação ambiental, funcional, estética e histórico-cultural de praças, largos, calçadões e trechos de orla, com apoio de SIG e análise hipsométrica, identificando os eixos preferenciais de escoamento entre a cadeia de morros e a lagoa Santo Antônio dos Anjos.

A partir desse diagnóstico, Medeiros e Afonso (2017) estruturam quatro eixos de intervenção, Largo do Rosário, Largo da Carioca, Largo da Matriz e Receptor Docas, nos quais se propõe a inserção de jardins de chuva, canteiros pluviais, biovaletas, valas britadas e cisternas para aproveitamento de água de telhados, sempre respeitando as restrições de tombamento e a preservação de jardins históricos, como a Praça Vidal Ramos. Esses dispositivos são distribuídos de modo a ampliar as áreas permeáveis, aumentar infiltração, percolação e evapotranspiração, diminuir a vazão das enxurradas que alcançam o casario e conduzir a água de forma mais compatível com a geomorfologia pré-existente, sem demandar grandes obras de canalização.

5.1.2.5 Jardins de chuva e trincheiras de infiltração em áreas verdes públicas

Oliveira et al. (2020) analisam a sub-bacia do Iate Clube, no Plano Piloto de Brasília, e adotam como encaminhamento para a redução de alagamentos a inserção de trincheiras de infiltração e jardins de chuva em áreas públicas com predominância de vegetação, tratadas como complemento ao sistema convencional de drenagem já existente.

Com base em mapas de uso e ocupação do solo elaborados em ambiente CAD e de parâmetros constantes no Manual de Drenagem da Adasa, Oliveira et al. (2020) selecionam canteiros, faixas verdes e espaços livres ao longo da bacia e dimensionam trincheiras preenchidas com agregado graúdo e jardins de chuva rasos, posicionados em pontos com maior densidade arbórea e possibilidade de formação de concavidades para retenção temporária da água.

Esses dispositivos são então inseridos por Oliveira et al. (2020) em um modelo hidrológico-hidráulico construído no PCSWMM, utilizando o método SCS para geração

de escoamento superficial e propagação por onda dinâmica, com tempo de retorno de 10 anos e calibração prévia da bacia.

Os resultados obtidos por Oliveira et al. (2020) indicam que o conjunto de medidas não altera de forma sensível o hidrograma no exutório da rede, dado o porte relativamente reduzido das estruturas em relação à área contribuinte, mas promove redução significativa do escoamento superficial não captado pela drenagem, diminuindo o volume que permanece escoando em superfície e, portanto, a tendência de formação de pontos de alagamento.

Em etapa posterior, Oliveira et al. (2020) demonstram a possibilidade de associar essas mesmas trincheiras e jardins de chuva a um desenho urbano para o canteiro central do Eixão Norte, integrando infiltração, paisagem e uso recreativo.

5.1.2.6 Swales ecológicas com condução subsuperficial em sistema bioecológico de drenagem

Segundo Lai et al. (2024), o controle de cheias locais em um lote de 2,8 ha em Larut Matang, na Malásia, foi estruturado por meio de um arranjo bioecológico de drenagem (BIOECODS) que combina swales ecológicas em superfície com módulos de condução subsuperficial, articulados a lagoas de detenção, áreas de retenção e wetlands artificiais.

Lai et al. (2024) descrevem que as swales gramadas foram construídas com declividade longitudinal suave (1:500) e equipadas com módulos vazados envoltos em geotêxtil e circundados por areia de rio, de modo que a água das chuvas infiltra pela camada permeável e é armazenada e conduzida no volume subsuperficial antes de alcançar a lagoa a jusante.

Para avaliar e aperfeiçoar esse arranjo, Lai et al. (2024) desenvolveram, no InfoWorks SD, um modelo que representa de forma integrada o escoamento de superfície e o fluxo no conduíte enterrado, calibrado e validado com séries de chuva-vazão obtidas em cinco estações de monitoramento, com erros médios de pico inferiores a 5% nos principais exutórios.

A partir de diferentes cenários, Lai et al. (2024) identificaram que módulos com altura de 0,45 m representam um compromisso adequado entre capacidade de armazenamento e condução, proporção de escoamento subsuperficial e economia de implantação: acima desse valor, o aumento da fração de fluxo no conduíte torna-se pouco significativo.

As simulações de Lai et al. (2024) indicam que, com essa configuração, o sistema consegue atenuar em mais de 60% a vazão de pico na saída principal, prolongando o tempo de escoamento e favorecendo a infiltração e a melhoria da qualidade da água ao longo do trajeto. Esse resultado, segundo Lai et al. (2024), está em consonância com o objetivo declarado do trabalho, que é modelar e analisar o desempenho conjunto da swale e do conduíte subsuperficial para definir o dimensionamento ótimo do sistema BIOECODS, tendo em vista a redução de escoamentos de pico e de alagamentos em áreas urbanizadas.

5.1.3 *Medidas de reservação e aproveitamento de águas pluviais*

5.1.3.1 Sistema de captação e armazenamento de água de chuva em praça pública

Segundo Tobias et al. (2023), a solução proposta para atenuar o escoamento superficial e contribuir indiretamente para a redução de alagamentos na Praça Dogello Goss, em Concórdia–SC, consistiu no dimensionamento de um sistema de aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis, configurado como técnica compensatória de drenagem.

Tobias et al. (2023) quantificaram inicialmente o volume de escoamento gerado na praça a partir de dados pluviométricos de 2018 e do Método Racional, demonstrando que precipitações superiores a 5 mm h^{-1} já produzem cerca de 63 m^3 de escoamento na área impermeável, volume passível de ser captado e armazenado.

Em seguida, Tobias et al. (2023) estimaram a demanda de água para rega de jardins e gramados e para lavagem de calçadas, obtendo um consumo semanal de $14,6 \text{ m}^3$, e dimensionaram uma cisterna com volume útil de 30 m^3 , associada a um sistema de pré-tratamento composto por descarte inicial da chuva e filtro de brita e areia, garantindo ao menos 15 dias de abastecimento para esses usos.

As simulações de Tobias et al. (2023) indicaram que, mesmo em meses de menor precipitação, seria possível suprir integralmente a demanda não potável da praça com água pluvial, reduzindo em média 8% do volume de escoamento proveniente das superfícies impermeáveis, com variação entre 3% e 20% ao longo do ano.

5.1.3.2 Metodologia multicritério aplicada a cenários com bacias de detenção e microrreservatórios

Mendonça e Souza (2019) tratam o enfrentamento dos problemas de inundações urbanas por meio do desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de desempenho de sistemas de drenagem, baseada em análise multiobjetivo e multicritério, que permite comparar soluções clássicas e medidas de controle na fonte.

Mendonça e Souza (2019) estruturam dezesseis critérios distribuídos em seis dimensões de avaliação (legal, econômica, social, ambiental, práticas sustentáveis e técnica) e utilizam os métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS para enquadrar sistemas de drenagem em categorias de desempenho que variam de “muito ruim” a “ótimo”.

Essa metodologia é aplicada por Mendonça e Souza (2019) a três cenários de uma área já urbanizada em Goiânia: um sistema convencional com rede separadora que resulta em vazão de jusante de 4.784 L/s, superior à condição de pré-urbanização (2.725 L/s); um cenário com duas bacias de detenção implantadas em áreas públicas (rótula das avenidas 85 e T-63 e praça T-25), que reduzem a vazão a 2.607 L/s; e um cenário com microrreservatórios na saída de cada lote, que leva a vazão de jusante a 2.466 L/s, também inferior à situação original da bacia.

Os resultados de Mendonça e Souza (2019) mostram que o sistema apenas com rede convencional apresenta desempenho global classificado entre “regular” e “bom”, enquanto os cenários com bacias de detenção e microrreservatórios alcançam desempenho “muito bom” ou “ótimo”, com avanços nas dimensões ambiental, de práticas sustentáveis e técnica.

5.1.3.3 Aproveitamento de água de chuva em edificações residenciais

Ortiz et al. (2022) analisam o aproveitamento de água de chuva em residências de Assunção como uma medida capaz de, ao mesmo tempo, complementar o abastecimento e reduzir o volume de escoamento conduzido às redes pluviais e às vias públicas.

Para isso, Ortiz et al. (2022) simulam sistemas domésticos de captação em coberturas, reservação em tanques de 2.000, 5.000 e 10.000 L e uso da água acumulada em aplicações que não exigem padrão potável, como descargas sanitárias, lavagem de roupas e usos gerais, utilizando dados de chuva medidos minuto a minuto e padrões mensais e diários de consumo hídrico.

A partir de um balanço volumétrico em regime dinâmico, Ortiz et al. (2022) estimam frações de água de chuva efetivamente aproveitadas, razões entre volume colhido

e demanda para usos não potáveis e períodos de retorno do investimento, mostrando que, nas condições tarifárias atuais de Assunção, o retorno financeiro é pouco atrativo para o usuário individual, mas que uma parcela expressiva da chuva incidente nas coberturas deixa de ser encaminhada imediatamente à drenagem urbana.

Com base nesses resultados, Ortiz et al. (2022) argumentam que, em cidades com redes pluviais precárias e ocorrência recorrente de enxurradas e alagamentos, o poder público pode considerar incentivos econômicos ou exigências normativas para difundir o aproveitamento de água de chuva em edificações, justamente por seu potencial de aliviar a carga de escoamento nas redes e atenuar problemas de inundação.

5.1.3.4 Sistemas de captação e armazenamento de água de chuva em áreas rurais

García-Avila et al. (2023) apresentam os sistemas de captação e armazenamento de água de chuva (RWHSS) como arranjo capaz de, simultaneamente, ampliar a oferta hídrica em áreas rurais com escassez e reduzir o volume de escoamento que chegaria aos corpos d'água e às redes de drenagem, contribuindo para mitigar problemas de alagamentos locais. Em revisão sistemática conduzida segundo o protocolo PRISMA, os autores selecionam quinze estudos publicados entre 2012 e 2022 e mostram que os RWHSS destinados ao uso doméstico se organizam, em essência, em quatro componentes: superfície de captação (telhados e pátios), calhas, tubulações de condução e reservatórios de armazenamento, podendo ser complementados por dispositivos como desvio de primeira chuva, filtros de malha, extravasores e sistemas de bombeamento.

A síntese evidencia que a escolha dos materiais de cobertura e das cisternas (com destaque para telhados metálicos galvanizados e reservatórios de concreto ou polipropileno) influencia diretamente a qualidade da água armazenada, exigindo atenção a parâmetros como pH, turbidez, E. coli, chumbo, nitratos e metais em geral, em relação aos limites da OMS.

Ao mesmo tempo, os trabalhos revisados apontam benefícios econômicos (redução de custos de perfuração de poços profundos e do consumo da rede pública), sanitários (menor exposição a águas subterrâneas ou superficiais contaminadas por arsênio e esgoto) e operacionais (diminuição do tempo gasto na coleta de água), além de destacar que a interceptação da chuva nos telhados e seu armazenamento nas cisternas reduz o escoamento superficial enviado diretamente às ruas e dispositivos de drenagem, o que tende a atenuar o risco de cheias repentinas em comunidades suscetíveis.

Assim, a medida discutida no artigo não se limita a suprir a demanda doméstica em áreas de escassez, mas é apresentada como componente de estratégias de manejo que, ao reter parte da precipitação no nível da edificação, podem auxiliar na redução de escoamentos concentrados e, por consequência, de episódios de alagamento, em consonância com o objetivo declarado de analisar o estado da arte dos RWSS e suas implicações técnicas, sanitárias e sociais em zonas rurais.

5.1.3.5 Captação em coberturas e redução da conectividade hidrológica urbana

Lu et al. (2025) avaliam a captação de água de chuva em coberturas como medida de desenvolvimento de baixo impacto capaz de reduzir a conexão entre áreas geradoras de escoamento e a rede de drenagem, atenuando alagamentos em uma cidade de clima semiárido.

Tomando Hamadan como estudo de caso, Lu et al. (2025) utilizam o índice de conectividade de Borselli para representar o grau de ligação hidrológica entre trechos a montante e a jusante da bacia urbana e calculam esse indicador em dois cenários: situação atual, sem sistemas de captação em telhados, e situação simulada com adoção de reservatórios de telhado e desvio de parte do volume precipitado para armazenamento e uso não potável.

Os resultados de Lu et al. (2025) indicam que, na ausência da medida, prevalecem classes de conectividade alta e muito alta em porções centrais e setentrionais, favorecendo a rápida concentração do escoamento; com a inclusão da captação em coberturas, a área classificada como de conectividade muito alta e alta se reduz para aproximadamente 11,4% e 20,4%, enquanto aumentam as faixas de conectividade moderada, baixa e muito baixa, indicando maior dispersão do fluxo gerado.

A interpretação apresentada por Lu et al. (2025) é que a interceptação da chuva em coberturas, combinada ao armazenamento em reservatórios e ao uso controlado desse volume, pode ser planejada para diminuir a ligação direta entre superfícies impermeáveis e canais de drenagem, aliviando a carga sobre a rede e reduzindo a tendência a cheias localizadas.

5.1.4 *SUDS, LID e soluções baseadas na natureza (SbN) – visão geral*

5.1.4.1 Sistemas sustentáveis de drenagem urbana (SUDS) e dispositivos de controle na fonte

Agostinho e Poletto (2012) discutem o emprego de sistemas sustentáveis de drenagem urbana, agrupados sob o conceito de SUDS, como conjunto de medidas destinadas a reduzir enchentes, aumentar a infiltração da água de chuva no solo e atenuar processos erosivos em bacias hidrográficas urbanas.

Agostinho e Poletto (2012) descrevem dispositivos que atuam principalmente no controle na fonte do escoamento, como pavimentos permeáveis e semipermeáveis, reservatórios de detenção e retenção, trincheiras, valas e poços de infiltração, telhados verdes e faixas gramadas, detalhando suas características hidráulicas, condições de implantação, custos e necessidades de manutenção.

Esses dispositivos, conforme Agostinho e Poletto (2012), são apresentados como complementares à drenagem convencional, permitindo retardar, armazenar ou infiltrar parte significativa do volume gerado nas áreas impermeáveis, com efeito direto na redução dos picos de vazão e na diminuição da frequência de inundações a jusante, além de favorecer a recarga de aquíferos e a melhoria do ambiente urbano por meio de usos paisagísticos e de lazer.

5.1.4.2 Evolução do manejo das águas pluviais urbanas e soluções baseadas na natureza

Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) descrevem o enfrentamento dos alagamentos urbanos como resultado de um processo evolutivo do manejo das águas pluviais, que parte da drenagem tradicional, passa pela drenagem urbana sustentável e alcança propostas em sintonia com a natureza.

Na primeira etapa, associada ao paradigma higienista, Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) apontam que predominou o afastamento rápido das águas por meio de obras estruturais convencionais, o que elevou picos de cheias, reduziu o tempo de concentração e agravou inundações em áreas urbanas densamente impermeabilizadas.

Em seguida, na fase denominada drenagem urbana sustentável, Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) indicam que são incorporadas medidas de controle na fonte, com incentivo à infiltração e à retenção em reservatórios, valas e outras estruturas

distribuídas na bacia, buscando recompor parcialmente o ciclo hidrológico ao reduzir o escoamento superficial e retardar o pico de vazão, em linha com experiências internacionais como LID, BMP, WSUD e SUDS.

Por fim, Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) discutem um estágio recente em que o manejo das águas pluviais passa a ser pensado em estreita articulação com os ecossistemas, por meio de soluções baseadas na natureza que integram infraestruturas cinzas e verdes, valorizam várzeas, solos, vegetação e cursos d'água, e associam controle de cheias à melhoria da qualidade ambiental e à saúde pública.

5.1.4.3 Soluções baseadas na natureza e governança da drenagem urbana

Campos (2021) discute o enfrentamento dos alagamentos em bacias metropolizadas a partir da incorporação de soluções baseadas na natureza na drenagem urbana e da reestruturação dos arranjos de gestão que decidem sobre essas intervenções.

Campos (2021) aborda a infraestrutura verde – como jardins de chuva, biovaletas, canteiros pluviais, alagados construídos e demais dispositivos distribuídos e conectados em rede – como alternativa complementar à drenagem convencional, voltada a reduzir o escoamento superficial, controlar a poluição difusa e aumentar a capacidade de acomodação das águas pluviais nas cidades de São Paulo e Cidade do México.

Ao mesmo tempo, Campos (2021) enfatiza que a efetivação dessas medidas depende da inclusão das SbN em planos nacionais e locais de adaptação às mudanças climáticas, em políticas de recursos hídricos e em instrumentos urbanísticos, bem como do uso de espaços colegiados, como o Comitê de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e o Consejo de Cuenca del Valle de México, para articular diferentes níveis de governo, usuários e sociedade civil em processos de cocriação e governança colaborativa voltados à drenagem urbana.

5.1.4.4 Soluções baseadas na natureza e arranjos colegiados de bacia

Campos (2021) trata o enfrentamento dos alagamentos em bacias metropolizadas a partir da adoção de soluções baseadas na natureza na drenagem urbana, articuladas com novos arranjos de planejamento e gestão.

Campos (2021) descreve a infraestrutura verde, como alagados construídos, jardins de chuva, canteiros pluviais e biovaletas, como conjunto de intervenções distribuídas e conectadas em rede, voltadas a reduzir o escoamento superficial, controlar a poluição

difusa, ampliar a área filtrante e melhorar a acomodação das águas pluviais em São Paulo e na Cidade do México.

Essa abordagem, segundo Campos (2021), é associada à inclusão das SbN em planos nacionais e locais de adaptação às mudanças climáticas, em políticas de recursos hídricos e em iniciativas municipais como quotas ambientais, planos de saneamento e planos de ação climática, bem como à criação de instrumentos orientadores para implantação de infraestrutura verde em cidades mexicanas.

Ao mesmo tempo, Campos (2021) argumenta que a consolidação dessas medidas depende do uso de colegiados de bacia, como o Comitê de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e o Consejo de Cuenca del Valle de México como espaços para integrar diferentes níveis de governo, usuários e sociedade civil em processos de cocriação e governança colaborativa, capazes de incorporar SbN nas decisões sobre drenagem urbana e resposta a eventos extremos.

Essa combinação entre soluções físicas baseadas na natureza e reorganização institucional é apresentada, por Campos (2021), em coerência com os objetivos do trabalho, que incluem refletir sobre a assimilação das SbN na América Latina, identificar entraves à sua adoção pelo poder público e analisar o potencial desses colegiados para apoiar o controle de inundações em ambientes urbanos complexos.

5.1.4.5 Infraestrutura verde e cenários espaço-econômicos para controle de cheias

Lipper et al. (2025) analisam a resposta para reduzir alagamentos e extravasamentos de esgoto combinado na bacia de Ecully, na área metropolitana de Lyon, por meio da elaboração de cenários espaço-econômicos comparando arranjos descentralizados de infraestrutura verde com soluções centralizadas e alternativas cinzas.

Lipper et al. (2025) desenvolvem rotinas automáticas baseadas em dados geospaciais abertos para identificar, em cada quadra urbana, áreas abertas conectadas com potencial para implantação de jardins de chuva, células de biorretenção e dispositivos de infiltração, dimensionando esses elementos para reter o escoamento gerado por diferentes chuvas de projeto e, assim, aliviar a carga sobre o sistema de esgoto combinado.

Em paralelo, Lipper et al. (2025) avaliam cenários com wetlands construídos na saída dos extravasores e com bacias de detenção convencionais, estimando custos de implantação e operação para cada combinação.

Os resultados de Lippera et al. (2025) indicam que a distribuição criteriosa de medidas descentralizadas em quadras com maior potencial de retenção permite reduzir extravasamentos, enquanto um arranjo com wetland centralizado apresenta menor custo global para determinados eventos de projeto, o que evidencia a importância de combinar soluções distribuídas e centralizadas na adaptação da drenagem urbana.

5.1.4.6 LID com suporte de IoT e aprendizado de máquina para manejo de águas pluviais

Essamlali, Nhaila e El Khaili (2024) examinam o controle de alagamentos em Bouznika, Marrocos, por meio da combinação de práticas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) com monitoramento em tempo real e uso de aprendizado de máquina, inseridos em um plano urbano em expansão.

No estudo de Essamlali, Nhaila e El Khaili (2024), utiliza-se o SWMM para simular cenários de chuva gerados a partir de curvas IDF obtidas com distribuição de Gumbel e avaliam-se, em termos de redução de escoamento e melhoria de qualidade da água por unidade de área, diferentes arranjos como telhados verdes, pavimentos permeáveis, bacias de biorretenção, jardins de chuva e valas vegetadas, implementados em sub-bacias definidas a partir de modelo digital de elevação e do plano diretor de ocupação.

A análise de Essamlali, Nhaila e El Khaili (2024) destaca quais tipos de LID apresentam maior eficiência relativa para o contexto local, considerando a distribuição de usos do solo e a variabilidade de chuvas intensas, e aponta que a interceptação, o armazenamento e a infiltração na fonte podem aliviar sensivelmente a carga sobre a drenagem convencional.

Em etapa propositiva, Essamlali, Nhaila e El Khaili (2024) delineiam uma arquitetura em que sensores de baixo custo monitoram chuva, níveis d'água, umidade do solo e parâmetros de qualidade, transmitindo dados a uma central onde modelos de aprendizado de máquina auxiliam na previsão de escoamentos, na operação de reservatórios e no direcionamento de manutenção dos dispositivos LID.

5.1.4.7 Nature-based solutions e conceito de cidade-esponja em megacidades costeiras

Soni et al. (2025) abordam os alagamentos recorrentes em Karachi pela adoção do conceito de cidade-esponja como diretriz para reorganizar o manejo de águas pluviais, tomando como referência experiências de cidades da China e da Arábia Saudita.

Em uma revisão de escopo, Soni et al. (2025) analisam estudos de caso que articulam jardins de chuva, parques multifuncionais, superfícies permeáveis, telhados e fachadas verdes, valas vegetadas e zonas úmidas urbanas para interceptar, infiltrar e armazenar o escoamento na fonte, reduzindo o volume encaminhado à drenagem convencional.

Em complemento, Soni et al. (2025) trabalham dados de modelo digital de elevação e de uso e cobertura do solo de Karachi com imagens Landsat de 1990 e 2024, evidenciando a expansão de áreas impermeáveis e a perda de superfícies verdes, especialmente em setores baixos próximos ao litoral, onde o risco de inundação se concentra.

A partir da combinação entre diagnóstico espacial e lições extraídas das cidades-esponja estudadas, Soni et al. (2025) apontam conjuntos de medidas compatíveis com a realidade local – requalificação de parques como áreas de retenção temporária, implantação de pavimentos permeáveis em vias secundárias e estacionamentos, e uso de telhados verdes em novos empreendimentos –, discutindo ao mesmo tempo obstáculos institucionais, financeiros e de governança para sua adoção.

5.1.4.8 Infraestrutura azul-verde e respostas a inundações compostas em cidades costeiras chinesas

Chan et al. (2024) analisam as inundações compostas que resultam da combinação de chuva intensa, maré elevada e aumento gradual do nível do mar em cidades costeiras chinesas, entendendo o enfrentamento desses eventos como produto de um arranjo que reúne infraestrutura azul-verde, obras de contenção e sistemas de alerta e resposta rápida.

Com base em documentos governamentais e registros de imprensa, Chan et al. (2024) mostram que, na última década, governo central e autoridades municipais passaram a investir em redes de parques inundáveis, canais rehabilitados, lagos urbanos e dispositivos dispersos de retenção associados ao programa de cidades-esponja, complementados por

diques, muros de proteção, comportas e estações de bombeamento em trechos mais expostos.

Em paralelo, Chan et al. (2024) destacam o uso ampliado de serviços de informação hidrometeorológica por meio de aplicativos, painéis públicos e avisos antecipados que divulgam previsões de chuva, maré e marés de tempestade, permitindo que moradores e agentes públicos adotem medidas prévias de autoproteção, restrição de circulação e operação de equipamentos.

Ao discutir esse conjunto de respostas e a necessidade de aprofundar a integração entre soluções baseadas na natureza, obras hidráulicas e comunicação em tempo quase real, Chan et al. (2024) atendem ao objetivo de sintetizar fontes, impactos, desafios e medidas adotadas em cidades costeiras chinesas, extraíndo lições para a construção de estratégias de resiliência a eventos de inundação composta.

5.1.4.9 Alocação espacial otimizada de infraestrutura azul-verde

Hou et al. (2025) tratam a implantação de infraestrutura azul-verde como um problema de alocação espacial em que é necessário compatibilizar desempenho hidrológico, qualificação paisagística e custos ao planejar o controle de cheias em escala de bacia urbana.

Para isso, Hou et al. (2025) desenvolvem um arranjo de otimização multiobjetivo que combina um modelo hidrológico baseado em autômatos celulares, responsável por simular o escoamento superficial em grade regular, com o algoritmo genético NSGA-II, encarregado de buscar combinações de elementos azul-verdes – como espaços verdes rebaixados, jardins de chuva, lagoas de retenção e áreas úmidas – que melhorem o comportamento da bacia sob uma chuva com período de retorno de 20 anos.

Aplicado à bacia do rio Heping, em Nanjing, o método de Hou et al. (2025) gera soluções que elevam a área ocupada por corpos d'água e estruturas de drenagem verde e reduzem a superfície impermeável, resultando em incremento de cerca de 27,55% no desempenho hidrológico e em redução em torno de 26,59% no custo de ciclo de vida em relação a configurações de referência.

Hou et al. (2025) destacam que a simulação em nível de célula permite posicionar os elementos de infraestrutura azul-verde em locais mais sensíveis do ponto de vista da geração e da propagação do escoamento, oferecendo ao planejador um conjunto de alternativas que equilibra controle de cheias, qualidade paisagística e viabilidade econômica.

Essa proposta corresponde, segundo Hou et al. (2025), ao objetivo do trabalho, que é construir um procedimento de apoio à decisão para definir a distribuição de infraestrutura azul-verde em áreas urbanas, fortalecendo a gestão de águas pluviais e a resiliência a alagamentos.

5.1.5 *Planejamento, gestão e instrumentos legais e econômicos.*

5.1.5.1 Abordagem integrada de drenagem urbana sustentável

Segundo Cordeiro et al. (2020), a principal resposta técnico-institucional discutida para enfrentar alagamentos associados à urbanização é a mudança do paradigma de drenagem convencional, baseada em coletar e conduzir rapidamente a água por galerias, canais e bombas, para uma abordagem integrada de gestão das águas urbanas, que mantenha a água na bacia o maior tempo possível e se apoie em ecossistemas naturais.

Cordeiro et al. (2020) destacam que essa transição se materializa em sistemas de drenagem urbana sustentável, conhecidos internacionalmente como BMP, SUDS, LID e WSUD, os quais priorizam a detenção, a infiltração e a redução da velocidade do escoamento por meio de técnicas compensatórias como valas e trincheiras de infiltração, lagoas de detenção, telhados verdes, reservatórios de acumulação e pavimentos permeáveis, articulando benefícios hidráulicos, de qualidade da água e de saúde pública.

Essa maneira de planejamento integrado é apresentada por Cordeiro et al. (2020) como caminho para reduzir volumes escoados, mitigar inundações e controlar a poluição carregadas pelas águas pluviais, em contraste com sistemas subdimensionados e sujeitos a ligações clandestinas de esgoto, que ampliam riscos de doenças e degradação ambiental.

5.1.5.2 Planejamento e regulação integrada dos sistemas de drenagem urbana

Machado et al. (2022) indicam que a principal forma de enfrentar os alagamentos nos municípios mineiros da bacia do rio Mucuri não reside em uma obra pontual de drenagem, mas no fortalecimento do planejamento urbano e da regulação específica dos sistemas de águas pluviais.

A partir da análise dos planos diretores municipais, do Plano Estadual de Saneamento Básico e dos marcos normativos nacionais, Machado et al. (2022) evidenciam que a drenagem pluvial é tratada de modo secundário, sem diretrizes claras para a gestão de cheias, o que contribui para a recorrência de inundações em áreas urbanas.

Como alternativa, Machado et al. (2022) defendem a elaboração e implementação de planos municipais de drenagem e manejo de águas pluviais articulados à gestão da bacia hidrográfica, a incorporação de critérios de ocupação do solo que considerem áreas de risco e várzeas, bem como a combinação de medidas estruturais (obras de micro e macrodrenagem, controle de erosão, recuperação de margens e canais) com medidas estruturantes, como instrumentos legais, fiscalização e programas de educação ambiental.

5.1.5.3 Gestão da drenagem urbana orientada à sustentabilidade

Segundo Souza (2013), a medida central discutida para enfrentar alagamentos no contexto brasileiro não é um dispositivo isolado de drenagem, mas a mudança do próprio modelo de gestão, substituindo a lógica tradicional de maximizar a eficiência hidráulica dos condutos – baseada em canalizações, retificações e ampliação de seções para “pegar e largar depressa” a água de chuva – por uma abordagem sustentável de manejo de águas pluviais, focada na bacia hidrográfica, na gestão da demanda e na compensação dos efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico.

Souza (2013) enfatiza que essa transição envolve a incorporação de técnicas compensatórias (reservatórios de detenção, dispositivos de infiltração, pavimentos permeáveis, telhados verdes, biorretenção, entre outros), o uso de instrumentos legais como o Programa 1138 e a Lei nº 11.445/2007, a integração entre planos diretores, planos municipais de saneamento e políticas de uso do solo, bem como o fortalecimento técnico-institucional dos municípios, com monitoramento quali-quantitativo, modelagem hidrológica, desenvolvimento de indicadores de risco e participação social na concepção das soluções.

Essa reorganização do sistema de drenagem – que passa a ser concebido não apenas para transportar vazões, mas para reduzir picos, melhorar a qualidade da água, valorizar cursos d’água urbanos e aumentar a resiliência frente a eventos extremos – corresponde diretamente, segundo Souza (2013), ao objetivo do artigo, que é discutir os limites da abordagem tradicional, apresentar os avanços da pesquisa nacional em drenagem urbana e apontar os desafios para a efetiva implantação de práticas e técnicas sustentáveis como eixo estruturante do controle de alagamentos no Brasil.

5.1.5.4 Planejamento e otimização dos sistemas de drenagem urbana

De acordo com Rodrigues, Rodrigues e Rodrigues (2022), a resposta aos problemas de alagamento nas cidades brasileiras está associada a um conjunto articulado de ações de planejamento e melhoria das redes de micro e macrodrenagem, e não a intervenções pontuais isoladas.

Com base na revisão narrativa de legislação, manuais técnicos e estudos de caso, Rodrigues, Rodrigues e Rodrigues (2022) apontam que a Lei nº 11.445/2007 e seus desdobramentos impõem a necessidade de tratar a drenagem pluvial como componente do saneamento básico, o que exige planos específicos de manejo das águas de chuva em cada município, incluindo diagnóstico das áreas de risco, definição de diretrizes para o uso do solo e dimensionamento adequado das redes de escoamento (BRASIL, 2007; TUCCI, 2009; TUCCI, 2016).

Nesse contexto, Rodrigues, Rodrigues e Rodrigues (2022) indicam medidas estruturais, como a correção e ampliação de sistemas de microdrenagem (sarjetas, bocas de lobo, galerias) e macrodrenagem (canais abertos, túneis, dissipadores de energia), bem como medidas não estruturais, como planos diretores de drenagem, instrumentos de regulação e fiscalização e incentivo à adoção de critérios de permeabilidade e de controle de lançamentos nos novos empreendimentos (LEGLER, 2012; PAULA et al., 2017; OTTONI et al., 2018).

Na conclusão, Rodrigues, Rodrigues e Rodrigues (2022) ressaltam que a otimização das redes existentes e a implantação de sistemas de drenagem em pontos críticos devem ser priorizadas para reduzir o volume de escoamento superficial, minimizar alagamentos recorrentes e melhorar as condições de saúde e mobilidade urbana, objetivo que está diretamente alinhado à proposta do trabalho de reunir e sistematizar soluções possíveis para a falta de drenagem urbana nas cidades brasileiras.

5.1.5.5 Gestão municipal da drenagem urbana e planos de manejo de águas pluviais

Conforme Tasca et al. (2017), o encaminhamento dado no estudo para a redução de alagamentos e inundações na bacia do rio Itajaí-Açu está associado ao fortalecimento da gestão municipal da drenagem urbana, com ênfase na elaboração e implementação de planos específicos de saneamento e de manejo de águas pluviais.

Tasca et al. (2017) verificam que grande parte dos municípios pesquisados não possui Plano Municipal de Saneamento nem Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais, que a drenagem costuma ficar subordinada ao setor de obras e que as ações são predominantemente corretivas, concentradas em canalizações, intervenções emergenciais e manutenção esporádica de galerias, bocas de lobo e margens de rios.

Em resposta a esse quadro, Tasca et al. (2017) apontam como medidas necessárias a elaboração de planos que incorporem diagnóstico de áreas de risco, definição de rotinas de limpeza e desassoreamento, fiscalização de ligações clandestinas de esgoto na rede pluvial, qualificação técnica dos responsáveis e integração entre municípios de uma mesma bacia, de forma a tratar a drenagem como componente do saneamento e instrumento de prevenção de desastres hidrológicos.

Essa proposta de reorganização da gestão, apoiada em planejamento, manutenção sistemática e controle de usos do solo, está diretamente vinculada ao objetivo da pesquisa de Tasca et al. (2017), que foi analisar como os municípios da bacia tratam a drenagem urbana e em que medida esse tratamento contribui para a ocorrência de inundações, enxurradas e alagamentos.

5.1.5.6 Plano diretor municipal e drenagem urbana

Silva e Hora (2013) tratam o controle de alagamentos a partir da incorporação da drenagem urbana nos planos diretores de Belo Horizonte, Porto Alegre e Goiânia, entendendo que parte da resposta ao problema deve ser construída na própria legislação urbanística.

Em Porto Alegre, Silva e Hora (2013) destacam que o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental estabelece percentuais mínimos de área livre permeável em função da taxa de ocupação do lote, admite a adoção de medidas compensatórias como telhados e terraços vegetados, pisos semipermeáveis e canteiros vegetados nos passeios, e prevê a possibilidade de reservatórios de retenção em zonas com maior criticidade de drenagem, além de proibir o parcelamento de terrenos alagadiços antes da garantia de escoamento adequado e da proteção contra cheias.

Em Goiânia, Silva e Hora (2013) observam que o plano define um índice mínimo de permeabilidade de 15% para todos os lotes da Macrozona Construída, exigindo ao menos 5% de solo natural vegetado e permitindo complementar esse índice com caixas de recarga do lençol freático, ao mesmo tempo em que estrutura um programa de drenagem

com ações de cadastro da microdrenagem, implantação de plano diretor de drenagem, complemento de redes, manutenção sistemática de galerias, implantação de bacias de contenção e atividades de educação ambiental voltadas ao desentupimento de bocas de lobo.

Em Belo Horizonte, Silva e Hora (2013) indicam que, embora não sejam fixados percentuais de área permeável, o plano diretor prevê diretrizes para tratamento de fundos de vale com menor interferência no meio físico, elaboração de diagnóstico e cadastro completo da drenagem, contenção da expansão de superfícies impermeáveis, monitoramento da macrodrenagem e elaboração de um plano diretor específico de drenagem para as bacias dos ribeirões Arrudas e Onça.

5.1.5.7 Medidas de adaptação da drenagem urbana às mudanças climáticas

Silva Junior et al. (2020) analisam o contexto de vulnerabilidade do Recife às chuvas intensas combinadas com a influência das marés e mostram que a resposta do poder público tem se concentrado na formulação de instrumentos de gestão que orientam intervenções na drenagem urbana, com foco na adaptação às mudanças climáticas.

No âmbito estadual, Silva Junior et al. (2020) destacam normas que preveem ações recorrentes de alargamento e desassoreamento de calhas de rios costeiros, associadas à implantação de reservatórios ao longo da faixa litorânea para retenção temporária das águas pluviais, com o objetivo de reduzir os alagamentos em áreas sujeitas à elevação do nível do mar.

No plano municipal, Silva Junior et al. (2020) indicam que a Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas passou a exigir medidas que diminuem o escoamento direto dos lotes para a rede de drenagem, como o aumento da permeabilidade, a ampliação da infiltração no solo e o uso de soluções que promovam a contenção, o retardo, a captação ou o reaproveitamento das águas de chuva na própria parcela urbana.

Nesse contexto, Silva Junior et al. (2020) destacam que a Lei municipal nº 18.112/2015 estabelece a obrigatoriedade de coberturas vegetadas em determinadas edificações e a construção de reservatórios de retardo ou acúmulo em lotes acima de 500 m² com elevada impermeabilização, configurando uma estratégia normativa para reduzir picos de vazão na rede pública e, conseqüentemente, os episódios de alagamento.

Os autores deixam claro que o propósito do estudo de Silva Junior et al. (2020) foi justamente diagnosticar essas iniciativas e discutir em que medida elas contribuem para a adaptação da infraestrutura de drenagem da cidade, mais do que propor novos dimensionamentos específicos, evidenciando uma abordagem centrada no planejamento e na revisão crítica dos instrumentos existentes.

5.1.5.8 Gestão da drenagem urbana na bacia do rio Itajaí-Açu

Segundo Tasca et al. (2018), o enfrentamento dos alagamentos na bacia do rio Itajaí-Açu está ligado menos a uma obra específica e mais ao modo como os municípios organizam a gestão da drenagem urbana.

Com base em questionários aplicados em 27 cidades em 2012 e comparados a levantamento semelhante realizado em 1998, Tasca et al. (2018) mostram que a drenagem permanece, em geral, vinculada às secretarias de obras, com intervenções pontuais, pouca manutenção de galerias e desassoreamento de rios, escassez de recursos dedicados, ausência de equipes técnicas especializadas e reduzida elaboração de Planos Diretores de Drenagem Urbana.

A pesquisa de Tasca et al. (2018) indica ainda que muitos gestores não percebem a falta desse plano como problema e que ações integradas entre municípios da mesma bacia são raras, apesar da forte recorrência de desastres hidrológicos na região.

Diante desse diagnóstico, Tasca et al. (2018) apontam como encaminhamento a necessidade de qualificar a gestão municipal, por meio da adoção de planos específicos de drenagem articulados aos planos de saneamento básico, da definição de rotinas sistemáticas de operação e manutenção, da integração com esgotamento sanitário e resíduos sólidos e do fortalecimento institucional das equipes responsáveis.

5.1.5.9 Análise integrada de risco de alagamentos com projeções climáticas

Segundo Yang et al. (2024), o encaminhamento dado ao problema de alagamentos urbanos em Dresden consistiu em construir um arranjo integrado que combina projeções de mudanças climáticas com modelagem hidrológica e hidráulica de longo prazo, permitindo estimar a evolução futura da precipitação, do escoamento superficial e do volume extravasado na rede de drenagem.

Yang et al. (2024) avaliam diferentes modelos globais de circulação (CMIP6) com base em correlação linear e informação mútua, selecionam aquele que melhor reproduz a

série observada e realizam o rebaixamento de escala das projeções por métodos estatísticos, adotando um procedimento kNN-based analog capaz de reduzir a superestimação dos picos de chuva.

Em seguida, Yang et al. (2024) incorporam as séries corrigidas em um modelo SWMM calibrado e validado para o sistema de drenagem de aproximadamente 13 km² do centro de Dresden, simulando continuamente o período de 2025 a 2100 sob dois cenários de emissão (SSP1–2.6 e SSP5–8.5) e avaliando a variabilidade anual de precipitação, escoamento gerado nos sub-bacias e volumes de extravasamento nos nós da rede.

A análise de frequência de Yang et al. (2024), baseada na distribuição de Gumbel para valores diários extremos, permite estimar como chuvas, vazões e lâminas de alagamento associadas a diferentes períodos de retorno tendem a se intensificar nas próximas décadas.

A partir desses resultados, Yang et al. (2024) discutem que o planejamento da drenagem deve considerar tanto o aumento gradual de precipitação e escoamento quanto a maior incerteza e severidade de eventos de curta duração, indicando a necessidade de rever padrões de projeto (períodos de retorno de condutos e reservatórios) e de combinar soluções baseadas na natureza com a infraestrutura existente para ampliar a capacidade de retenção e reduzir picos de vazão.

5.1.5.10 Avaliação integrada de risco e vulnerabilidade em perspectiva SETS

De acordo com Singh et al. (2025), o encaminhamento dado ao problema de alagamentos em Atlanta consistiu na construção e aplicação de um quadro de avaliação de risco que combina, de forma integrada, a probabilidade de ocorrência de cheias com indicadores de vulnerabilidade social, ecológica, técnica e institucional.

Partindo de mapas de perigo de inundação e de bases de dados sobre infraestrutura, uso do solo, características ambientais e condições socioeconômicas, Singh et al. (2025) estruturam um índice de vulnerabilidade em quatro dimensões e o combinam com a probabilidade de inundação para mapear áreas de risco elevado na cidade.

O estudo de Singh et al. (2025) mostra que setores com maior chance de ocorrência de cheias tendem a coincidir com bairros que apresentam fragilidades sociais (baixa renda, menor capacidade de resposta), déficits técnicos (infraestrutura de drenagem e de serviços com desempenho reduzido), pressões ecológicas (baixa cobertura vegetal, alteração de

cursos d'água) e limitações institucionais (planejamento e governança menos estruturados), o que reforça a necessidade de ações articuladas entre esses campos.

5.1.5.11 Estratégias integradas de adaptação urbana frente às inundações

Dharmarathne et al. (2024) abordam o enfrentamento das inundações urbanas induzidas pelo clima por meio de uma revisão ampla que articula evidências estatísticas, estudos de caso hidrológicos, vulnerabilidades de infraestrutura e propostas de adaptação.

Dharmarathne et al. (2024) mostram, com base em séries históricas e em análises de precipitação extrema em diferentes regiões, que a frequência e a intensidade de eventos de chuva intensa vêm se alterando, superando capacidades de drenagem dimensionadas a partir de padrões pretéritos e reforçando a relação entre mudanças climáticas e cheias em áreas urbanizadas.

A partir dessa base, Dharmarathne et al. (2024) discutem medidas de adaptação que incluem o reforço da drenagem convencional, a incorporação de infraestrutura verde (telhados vegetados, pavimentos permeáveis, wetlands urbanos), o redesenho de vias e sistemas de transporte em cotas menos suscetíveis, a proteção de equipamentos críticos e a participação comunitária em estratégias de preparação e resposta.

O trabalho de Dharmarathne et al. (2024) também destaca o papel de ferramentas de monitoramento remoto, modelos preditivos e sistemas de alerta na antecipação de cheias, bem como a necessidade de políticas que considerem desigualdades socioeconômicas e a maior exposição de grupos vulneráveis.

5.1.5.12 Avaliação de resiliência urbana às inundações em dimensões espacial, de engenharia e de gestão

Li et al. (2024) abordam o enfrentamento de inundações urbanas a partir da construção de um modelo de avaliação da resiliência a cheias que organiza, em um único quadro, fatores espaciais, de engenharia e de gestão, com o propósito de orientar intervenções em cidades chinesas à luz do conceito de “cidade resiliente”.

Os autores propõem, em Li et al. (2024), um conjunto de indicadores que retratam, na dimensão espacial, a configuração do sistema de controle de cheias e drenagem, a preservação de áreas de várzea e a integração entre componentes verdes, cinzas e azuis; na dimensão de engenharia, a capacidade de rios e lagos urbanos, a estrutura da

macrodrenagem, a eficiência da micro e da minidrenagem em captar e conduzir o escoamento; e, na dimensão de gestão, a existência de planos de emergência, sistemas de alerta, protocolos de defesa civil e mecanismos de coordenação institucional.

Para ponderar esses indicadores, Li et al. (2024) utilizam o método CRITIC, que leva em conta simultaneamente a variabilidade dos dados e a correlação entre variáveis, produzindo pesos objetivos para compor um índice de resiliência a inundações.

Ao aplicar a estrutura proposta e discutir os gargalos identificados em cada dimensão, Li et al. (2024) atendem ao objetivo de desenvolver um modelo de avaliação que conecte de forma mais estreita os fatores de resiliência ao processo de ocorrência de desastres, oferecendo referência para reorganizar o padrão espacial, aprimorar as infraestruturas de drenagem e fortalecer os arranjos de gestão voltados à prevenção, resposta e recuperação frente a eventos de cheia.

5.1.6 *Diagnóstico, monitoramento e avaliação de sistemas de drenagem*

5.1.6.1 Diagnóstico integrado de várzeas, precipitação e marés como suporte ao controle de alagamentos

Pontes et al. (2017) não propõem uma obra específica de drenagem como solução direta para os alagamentos em Belém, mas estruturam como principal “tecnologia” de enfrentamento do problema um diagnóstico integrado das áreas de várzea, articulando análise morfométrica das bacias, espacialização dos pontos de alagamento e avaliação conjunta de séries históricas de precipitação e de marés.

Pontes et al. (2017) delimitam 11 bacias hidrográficas urbanas, calculam parâmetros como densidade de drenagem, coeficiente de manutenção, gradiente dos canais e índice de forma e relacionam esses indicadores à distribuição espacial das ocorrências de alagamentos, evidenciando que as bacias mais canalizadas, com menor densidade de drenagem e maiores coeficientes de manutenção, concentram os pontos críticos, ao contrário das bacias que preservam cobertura vegetal e condições mais próximas do regime natural.

Em paralelo, Pontes et al. (2017) classificam a precipitação diária por quantis, identificam o comportamento sazonal de chuvas acima de 20 mm e analisam, para o ano de 2012, a coincidência entre eventos chuvosos e marés altas, demonstrando que a

combinação de volumes relativamente modestos de chuva com níveis elevados do rio já é suficiente para desencadear alagamentos em cotas entre 5 e 10 m.

Ao explicitar a forma como impermeabilização, canalização e ocupação de várzeas amplificam os efeitos da chuva e das marés, Pontes et al. (2017) mostram que o estudo oferece uma base técnica para o ordenamento territorial, o mapeamento de áreas de risco e o dimensionamento mais adequado da infraestrutura de drenagem, atendendo diretamente ao objetivo declarado de caracterizar a dinâmica das áreas de várzea de Belém em função da relação entre variação da precipitação e formação de pontos de alagamento.

5.1.6.2 Monitoramento quali-quantitativo do escoamento pluvial como suporte ao controle de alagamentos

Campana e Bernardes (2010) não propõem uma obra específica de drenagem como solução direta para os alagamentos em Brasília, mas estruturam como principal tecnologia de enfrentamento a implantação de um programa de monitoramento quali-quantitativo do escoamento pluvial urbano na rede de drenagem.

Motivados pela importância de conhecer a carga de lavagem do escoamento superficial e sua relação com o uso e ocupação do solo para o projeto de medidas estruturais e não estruturais de controle, Campana e Bernardes (2010) acompanharam eventos de chuva em uma bacia urbana da cidade, medindo vazão e parâmetros de qualidade da água em três subáreas com ocupações distintas (residencial, comercial e oficinas mecânicas) e em dois pontos de controle na cabeceira e na saída da bacia.

Esse arranjo permitiu a Campana e Bernardes (2010) quantificar a contribuição de diferentes superfícies impermeáveis e identificar o fenômeno da “primeira fração” do escoamento, em que cerca de 20% do volume transporta aproximadamente 85% da carga total de poluentes, evidenciando o momento mais crítico para o dimensionamento de dispositivos de retenção e tratamento.

Ao demonstrar que o desconhecimento quase absoluto da qualidade do escoamento pluvial urbano impede a adoção de medidas mais eficazes de controle, Campana e Bernardes (2010) tratam o monitoramento sistemático como ferramenta operacional para modernizar os sistemas de drenagem, subsidiar o planejamento de bacias de detenção, ações de fiscalização de ligações clandestinas de esgoto e estratégias de mitigação de inundações em áreas urbanas.

5.1.6.3 Metodologias de diagnóstico e avaliação dos sistemas de drenagem urbana

Segundo Teixeira et al. (2020), o enfrentamento de problemas como alagamentos em áreas urbanas passa, antes de qualquer intervenção física, por um diagnóstico consistente e por processos de avaliação que permitam compreender o desempenho real dos sistemas de drenagem.

Teixeira et al. (2020) conduzem uma revisão de metodologias aplicáveis à caracterização e à avaliação desses sistemas, destacando desde procedimentos mais simples, como levantamento bibliográfico, visitas de campo e registro fotográfico para identificação de pontos de alagamento e falhas de micro e macrodrenagem, até abordagens estruturadas de classificação do serviço por meio de formulários que enquadram a drenagem em categorias de desempenho (péssimo, insuficiente, regular, bom e ótimo).

A revisão de Teixeira et al. (2020) abrange ainda o uso de listas escalares de Avaliação de Impacto Ambiental voltadas à drenagem, capazes de hierarquizar problemas como alagamentos frequentes, processos erosivos, poluição de praias e canalização de cursos d'água, bem como métodos de apoio à decisão multicritério, a exemplo do ELECTRE III, ELECTRE-TRI, TOPSIS, Programação por Compromisso e indicadores de fragilidade do sistema, que combinam critérios legais, econômicos, ambientais, sociais, de sustentabilidade e de desempenho técnico na comparação de cenários e alternativas de manejo das águas pluviais.

Ao evidenciar que não existe um único método aplicável a todas as realidades e que, em muitos casos, é recomendável combinar diferentes procedimentos em um mesmo estudo, Teixeira et al. (2020) cumprem o objetivo de sistematizar metodologias de diagnóstico e avaliação de sistemas de drenagem urbana, oferecendo um repertório que pode orientar o planejamento de ações de manutenção, a definição de prioridades de intervenção e a escolha de soluções mais adequadas para reduzir alagamentos e seus impactos.

5.1.6.4 Conceito de déficit em drenagem como base para o controle de alagamentos

Segundo Souza, Moraes e Borja (2013), o encaminhamento dos problemas de alagamento nas cidades deve partir da revisão do próprio conceito de déficit em drenagem e manejo de águas pluviais, deixando de associá-lo apenas à falta ou insuficiência de redes

e canalizações e passando a considerar um conjunto mais amplo de fatores ligados ao funcionamento dos sistemas e à forma de urbanização.

Souza, Moraes e Borja (2013) desenvolvem uma proposta de definição de déficit ancorada em diferentes dimensões: déficit de informação, ligado à ausência de cadastro confiável das bacias contribuintes, das redes existentes, do uso e ocupação do solo e de indicadores socioambientais que expressem o risco associado aos eventos de chuva; déficit qualitativo, relacionado à baixa qualidade da água escoada, carregando sedimentos, resíduos sólidos e esgotos, o que reduz a capacidade hidráulica das redes e reforça a tendência de canalizar e cobrir cursos d'água.

Na sequência, Souza, Moraes e Borja (2013) tratam do déficit dito tecnológico, associado à permanência de soluções baseadas quase exclusivamente em canalizações e grandes estruturas de condução, sem uso disseminado de medidas compensatórias e de controle na fonte; do déficit técnico-institucional, que envolve a fragilidade das estruturas municipais, a visão da drenagem como simples acessório do sistema viário e a dificuldade de integrar planos diretores, políticas de saneamento e de uso do solo; e do déficit de cobertura, entendido não apenas como ausência de rede, mas como insuficiência de um conjunto de dispositivos que deveria incluir micro e macrodrenagem, bacias de retenção e retenção, dispositivos de infiltração, pavimentos permeáveis, parques lineares e medidas no nível do lote.

Por fim, Souza, Moraes e Borja (2013) abordam o déficit de concepção e comunicação, associado à elaboração de soluções apenas em ambiente técnico, à baixa participação social e à rejeição de medidas de adaptação não estruturais ou estruturantes.

5.1.6.5 Análise climatológica e urbanização como base para o controle de alagamentos

Dias, Valente e Fernandes (2020) tratam o problema dos alagamentos em Belém a partir de uma abordagem diagnóstica, que relaciona a evolução da urbanização, as variáveis climatológicas e a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña para subsidiar o planejamento urbano.

Dias, Valente e Fernandes (2020) recompõem uma série histórica de 1970 a 2010, utilizando dados da estação climatológica de Belém e imagens de satélite para mapear a expansão da malha urbana, a redução de áreas verdes e a ocupação de zonas alagáveis, e

aplicam os testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall e Spearman às séries de precipitação, temperatura, umidade, insolação e evaporação.

Os resultados de Dias, Valente e Fernandes (2020) indicam tendência de aumento da precipitação e da temperatura, associada à diminuição da umidade e da evaporação, em um contexto de crescimento urbano da ordem de 85% e perda significativa de cobertura vegetal, o que se traduz em maior número de pontos de alagamento e piora do conforto térmico.

Ao demonstrar que os eventos de La Niña e El Niño modulam os extremos de chuva, mas que o aquecimento observado está mais ligado à urbanização e às mudanças climáticas globais, Dias, Valente e Fernandes (2020) reforçam que a intensificação de alagamentos decorre da combinação entre clima, ocupação desordenada e drenagem precária.

Dessa forma, a contribuição de Dias, Valente e Fernandes (2020) consiste em oferecer uma base quantitativa para que o poder público incorpore variáveis climáticas e padrões de urbanização em políticas de uso do solo e em intervenções de drenagem, o que está em consonância com o objetivo declarado do trabalho de correlacionar variáveis climatológicas, urbanização e fenômenos climáticos, chamando atenção para a necessidade de planejamento urbano que considere esses fatores na prevenção de alagamentos.

5.1.7 *Medidas estruturais em macrodrenagem, microdrenagem e redes de esgoto*

5.1.7.1 *Macrodrenagem com bueiros inteligentes e medidas de manejo na bacia urbana*

Teixeira e Araújo (2023) propõem para o bairro Cidade Nova, em Ilhéus, um conjunto de ações voltadas à redução dos alagamentos recorrentes, com destaque para a implantação de um sistema de macrodrenagem associado a bueiros inteligentes e medidas de manejo na bacia de contribuição.

Teixeira e Araújo (2023) indicam a necessidade de instalar, nos cruzamentos das avenidas Canavieiras e Manoel Dórea, estruturas de grande vazão (diâmetros superiores a 2 m) capazes de receber as águas que descem do Morro do Pacheco e do Alto da Conquista, conduzindo-as até a zona de máxima preamar na borda marítima da Avenida Soares Lopes, com possibilidade de apoio por bombeamento em eventos de chuvas mais intensas.

Em complemento, Teixeira e Araújo (2023) defendem a adoção de bueiros inteligentes com caixas metálicas ou em fibra de vidro para reter resíduos sólidos antes da entrada na rede, associados a rotinas permanentes de limpeza e manutenção, o transplante de árvores cujas raízes e folhagem têm provocado obstruções (como as amendoeiras) e campanhas de conscientização sobre o descarte adequado de resíduos.

Por fim, Teixeira e Araújo (2023) recomendam o atendimento às normas da ABNT relativas a redes coletoras de esgoto e interceptores, de modo a separar escoamento pluvial e efluentes sanitários na faixa costeira.

Esse conjunto de medidas é apresentado por Teixeira e Araújo (2023) como desdobramento direto do objetivo do trabalho, que consistiu em avaliar os impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem do bairro Cidade Nova e, a partir desse diagnóstico, sugerir intervenções sustentáveis para minimizar os impactos ambientais e aprimorar a gestão municipal da drenagem e do manejo de águas pluviais.

5.1.7.2 Modelagem, planejamento e gestão de sistema de drenagem urbana consolidada

Monteiro e Mendes (2020) analisam o sistema de drenagem do setor Serra Dourada 3ª Etapa, em Aparecida de Goiânia, com o objetivo explícito de diagnosticar as causas dos alagamentos e indicar ajustes que pudessem subsidiar ações corretivas na infraestrutura existente.

A partir da verificação das vazões geradas nas sub-bacias, da capacidade de escoamento das bocas de lobo e do comportamento hidráulico das galerias, Monteiro e Mendes (2020) verificam que tanto a quantidade de dispositivos de captação quanto os diâmetros das tubulações estavam abaixo do necessário para os cenários de projeto adotados.

Como encaminhamento, Monteiro e Mendes (2020) propõem o redimensionamento das bocas de lobo, com aumento do comprimento de soleira e consequente elevação da capacidade de escoamento, e a revisão dos diâmetros das galerias entre os poços de visita, inclusive com a adoção de trechos duplos a jusante, de forma a compatibilizar a vazão afluente com a capacidade de condução das tubulações.

Na sequência, Monteiro e Mendes (2020) ponderam sobre as dificuldades práticas de implantar essas intervenções em área já consolidada e sugerem medidas menos invasivas, como a execução de poços de infiltração em pontos geradores, o amortecimento

da descarga proveniente do shopping Aparecida, a criação de novos pontos de lançamento em área a jusante e a implantação de rede complementar em setores adjacentes para reduzir a área contribuinte.

5.1.7.3 Modelagem de rede de esgoto e aumento da capacidade de escoamento

Segundo Mohammed et al. (2021), a resposta ao aumento de extravasamentos na rede de esgoto sanitário do bairro Al-Shuhada, em Samawah, foi estruturada em duas frentes: a modelagem do sistema com o SWMM para avaliar o efeito de eventos de chuva associados às mudanças climáticas e a proposição de adequações físicas na rede para reduzir o volume de alagamentos.

Mohammed et al. (2021) calibraram e validaram o modelo com dados de vazão medida em regime de tempo seco e de chuva, obtendo ajuste considerado satisfatório, e passaram a simular o comportamento da rede sob diferentes períodos de retorno (2, 5, 10 e 25 anos), tratando o sistema sanitário como se fosse combinado devido ao ingresso de águas pluviais por infiltração, frestas e ligações irregulares.

As simulações de Mohammed et al. (2021) mostraram que, em condições de esgoto doméstico apenas, não havia extravasamentos, mas que, com a entrada de escoamento de superfície, o volume de inundação e o número de poços de visita alagados aumentavam significativamente, chegando, no cenário de 25 anos, a cerca de 8.868 m³ de esgoto extravasado e 68 poços de visita em situação de alagamento, o que corresponde a aproximadamente 24% das estruturas avaliadas.

Diante desse diagnóstico, Mohammed et al. (2021) propuseram a inclusão de duas novas linhas de esgoto, com comprimentos de 100 m e 200 m e diâmetros de 500 mm e 315 mm, respectivamente, conectadas aos trechos mais sobrecarregados, além de reforçar a necessidade de manutenção sistemática da rede, com substituição de tampas danificadas, eliminação de aberturas indevidas e redução de infiltrações.

Novas simulações realizadas por Mohammed et al. (2021) indicaram que a combinação entre redistribuição de vazões com as duas linhas adicionais e ações de manutenção reduziu o pico de vazão na rede em até cerca de 74%, o volume total de extravasamento em torno de 70% e diminuiu a proporção de poços de visita alagados para aproximadamente 13% no cenário de 25 anos, mantendo a maior parte das estruturas sem ocorrência de inundação mesmo sob chuvas mais intensas.

5.1.7.4 Coordenação espacial de cheias em projeto de controle de inundações em Suzhou

Xu et al. (2024) analisam o controle de inundações em Suzhou a partir do chamado Large Encirclement Flood Control Project (LEFCP), um conjunto de diques e estruturas hidráulicas que circunda a área urbana central e altera a distribuição espacial das cheias entre o interior e o entorno do sistema.

Xu et al. (2024) desenvolvem um modelo distribuído acoplado hidrológico–hidráulico, apoiado em técnicas de SIG e em dados detalhados de rede de rios e canais, para simular a resposta da bacia sob diferentes frequências de chuva obtidas pelo método peaks-over-threshold associado à distribuição de Pareto generalizada.

As simulações de Xu et al. (2024) mostram que o LEFCP reduz significativamente os níveis d'água e amplia a margem de segurança em estações situadas dentro da área protegida, mas provoca aumento da duração e da altura das lâminas de cheia em estações localizadas a jusante, evidenciando a transferência de parte do volume para zonas periféricas.

Diante desse quadro, Xu et al. (2024) testam sete esquemas de operação para as onze estruturas de controle do projeto, modificando regras de abertura de comportas e de bombeamento, e identificam combinações que mantêm a segurança da área interna ao mesmo tempo em que reduzem o tempo em que o nível d'água nos trechos externos permanece acima da cota de atenção.

5.1.8 *Modelagem hidrológica hidrodinâmica e previsão de cheias*

5.1.8.1 Modelagem hidrológica computacional como apoio à seleção de técnicas mitigadoras

Rangel et al. (2021) analisam a mitigação de inundações em áreas urbanas a partir da ótica da modelagem matemática e computacional, tratando a modelagem hidrológica como a principal maneira de suporte à escolha de soluções estruturais e não estruturais.

Rangel et al. (2021) resgatam o histórico e as diferentes classificações de modelos hidrológicos, enfatizando sua aplicação à simulação chuva–vazão em bacias urbanas e à avaliação de cenários com técnicas de baixo impacto, como pavimentos permeáveis, telhados verdes, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e sistemas de biorretenção.

Com base em uma revisão sistemática em bases internacionais e no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, Rangel et al. (2021) mostram que a maior parte das pesquisas utiliza o modelo SWMM, muitas vezes associado a outros softwares ou métodos de apoio à decisão, para comparar o desempenho hidráulico de alternativas de LID frente à drenagem convencional, em diferentes escalas (edifício, trecho urbano, bacia).

Essa abordagem, centrada na simulação de cenários de implantação de técnicas mitigadoras e na análise de indicadores como volume de escoamento, pico de vazão e cargas de poluentes, está diretamente alinhada ao objetivo do trabalho de Rangel et al. (2021), que é responder de que forma propostas de mitigação de inundações em áreas urbanas vêm sendo avaliadas por ferramentas de modelagem matemática ou computacional, além de identificar lacunas na transformação desses estudos em ferramentas computacionais permanentes de apoio à decisão.

5.1.8.2 Sistema de previsão de alagamentos com modelo hidrológico e SIG

Santos e Rocha (2013) tratam como principal solução para o problema de alagamentos em Belém o desenvolvimento e teste de um sistema de previsão de alagamento e inundação em bacias urbanas, estruturado a partir de um modelo hidrológico acoplado a um banco de dados geográfico.

Santos e Rocha (2013) integram, no modelo, características físicas da bacia (modelo digital de elevação, uso e ocupação do solo, coeficiente de escoamento superficial, tempo de concentração e vazão do canal principal), a variação do nível de maré do rio Guamá e informações meteorológicas de intensidade e duração da chuva, inclusive com uso de previsões de curto prazo (“nowcasting”) obtidas por radar meteorológico.

A área de estudo é discretizada, em Santos e Rocha (2013), em células regulares de 5 m x 5 m, permitindo simular, para diferentes cenários de chuva e condições de maré, a extensão das áreas sujeitas a alagamento e inundação e gerar mapas de alerta com identificação das edificações e vias mais vulneráveis.

O sistema operacionaliza, conforme Santos e Rocha (2013), o cálculo do volume escoado, da vazão de pico e da cota de alagamento em cada célula, possibilitando avaliar a sensibilidade da bacia à variação da intensidade da precipitação e da capacidade de escoamento do canal.

Essa solução tecnológica é um sistema de suporte à decisão para emissão de alertas de curto prazo e responde diretamente ao objetivo do trabalho de Santos e Rocha (2013), que consistiu em desenvolver e testar um modelo hidrológico integrado a um SIG, capaz de prever a ocorrência de alagamentos em bacias urbanas de Belém e subsidiar a gestão de risco e o planejamento de intervenções na drenagem.

5.1.8.3 Modelagem hidrodinâmica tridimensional de trecho fluvial urbano (formulação 1)

De acordo com De la Cruz-Avila et al. (2025), a medida adotada para tratar o problema de cheias no rio Santa Catarina, intensificadas pela passagem da tempestade tropical Alberto, consistiu na construção de um esquema numérico tridimensional para previsão do escoamento em um trecho urbano do rio, com base nas equações de RANS não estacionárias acopladas ao método Volume of Fluid para representar a interface ar-água.

Nesse enquadramento, De la Cruz-Avila et al. (2025) definem como objetivo principal simular o escoamento de alta densidade observado após o evento de chuva extrema, avaliando como a maior densidade da água turva altera parâmetros hidrodinâmicos como campos de velocidade, características de turbulência e distribuição de pressões ao longo da seção estudada.

Entre os objetivos específicos, De la Cruz-Avila et al. (2025) incluem a validação das simulações com dados de velocidade obtidos por análise de vídeos, a análise detalhada de propriedades como energia cinética turbulenta, viscosidades turbulenta e efetiva e intensidade de turbulência, e o estabelecimento de um quadro comparativo do desempenho de quatro modelos de turbulência (Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ padrão, $k-\epsilon$ realizável e $k-\omega$ padrão) sob condições de cheias, de forma a identificar configurações numéricas adequadas para representar o comportamento do rio em eventos extremos.

Os autores destacam, em De la Cruz-Avila et al. (2025), que esse arranjo de modelagem, ao combinar malha refinada, análise de sensibilidade e comparação sistemática de modelos turbulentos, é proposto explicitamente como subsídio à gestão de riscos, pois permite compreender a distribuição espacial de velocidades e tensões em cenários de descarga anormal, oferecendo base técnica para aperfeiçoar o planejamento e o dimensionamento de infraestruturas ribeirinhas em áreas urbanas vulneráveis a inundações.

5.1.8.4 Modelagem hidrodinâmica tridimensional de trecho fluvial urbano (formulação 2)

De acordo com De la Cruz-Avila et al. (2025), o encaminhamento dado ao problema das cheias no rio Santa Catarina, intensificadas pela passagem da tempestade tropical Alberto, foi a construção de um esquema numérico tridimensional para previsão do escoamento em um trecho urbano do rio, baseado nas equações de Reynolds médias no tempo (RANS) associadas ao método Volume of Fluid para representação da interface ar-água.

O estudo de De la Cruz-Avila et al. (2025) aplica esse arranjo de modelagem a um segmento de aproximadamente 733 m do canal, considerando escoamentos de alta densidade que simulam a turbidez observada após o evento de chuva extrema, e utiliza dados batimétricos, de descarga e de geometria do leito para compor o domínio computacional.

São comparados, em De la Cruz-Avila et al. (2025), sob as mesmas condições de contorno e malha, quatro modelos de turbulência (Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ padrão, $k-\epsilon$ realizável e $k-\omega$ padrão), avaliando-se a distribuição espacial de velocidade, energia cinética turbulenta, viscosidades turbulenta e efetiva e intensidade de turbulência, bem como a resposta de pressão ao longo da seção estudada.

As simulações são validadas, segundo De la Cruz-Avila et al. (2025), com velocidades extraídas de registros em vídeo do evento, permitindo verificar a capacidade de cada modelo em reproduzir o comportamento hidrodinâmico do trecho sob descargas anormais.

Os autores destacam que essa abordagem de De la Cruz-Avila et al. (2025) não pretende propor uma obra específica de controle de inundações, mas fornecer um instrumento de previsão que apoie a análise de riscos e o planejamento de intervenções em infraestruturas ribeirinhas em áreas urbanas sujeitas a eventos extremos.

Essa formulação está diretamente alinhada ao objetivo do trabalho de De la Cruz-Avila et al. (2025), que é aplicar as equações RANS não permanentes combinadas ao método VoF para simular o escoamento tridimensional em condição de alta densidade e estabelecer um quadro comparativo do desempenho de diferentes modelos de turbulência na representação de parâmetros hidrodinâmicos relevantes para a gestão de cheias no rio Santa Catarina.

5.1.8.5 Abordagem de transferência de evento extremo e avaliação de risco de inundação

De acordo com Aslantas et al. (2024), a medida adotada para quantificar os impactos de cheias no rio Mulde consistiu em desenvolver e aplicar uma abordagem de transferência de um evento extremo observado em outra bacia, combinando modelagem hidrológica, hidrodinâmica e cálculo de danos econômicos.

Aslantas et al. (2024) tomam como referência a enchente de julho de 2021 no vale do rio Ahr e transferem as séries de precipitação e demais variáveis meteorológicas registradas em oito estações para postos de clima com altitudes semelhantes no alto curso do rio Mulde, na Saxônia.

A partir de um modelo hidrológico distribuído previamente calibrado e validado com as cheias de 2002 e 2013 (WaSiM-ETH), Aslantas et al. (2024) simulam três cenários de resposta da bacia, cujo pico de vazão no posto de Golzern supera em cerca de 11,7% o valor observado em 2002.

Em seguida, os hidrogramas gerados por Aslantas et al. (2024) alimentam o modelo hidrodinâmico LISFLOOD-FP, que produz mapas de inundação para o município de Bennewitz, incluindo profundidade máxima da lâmina d'água, extensão da área alagada e cotas de nível d'água, os quais são comparados com marcas históricas de cheia de 2002.

A vulnerabilidade física é estimada, em Aslantas et al. (2024), por meio de funções profundidade–dano aplicadas ao estoque construído, combinando danos de construção e de inventário em 767 edificações, o que resulta em danos médios da ordem de 36 milhões de euros para os três cenários; esses valores são integrados a informações de frequência para compor curvas dano–probabilidade que expressam o risco de inundação futuro caso um evento semelhante ao do vale do Ahr ocorra na bacia do Mulde.

Essa sequência de etapas – transferência do evento, simulação hidrológica e hidrodinâmica, mapeamento de exposição e avaliação monetária dos danos – está diretamente alinhada ao objetivo do estudo de Aslantas et al. (2024), que é desenvolver um procedimento de transferência entre bacias semelhantes para avaliar a resposta em termos de vazão e prejuízos e, assim, apoiar o planejamento de medidas de redução de riscos de inundação.

5.1.8.6 Análise de frequência de cheias com séries de duração parcial e escolha de limiar

De acordo com Eslamian, Sabzevari e Farizi (2025), a solução proposta para apoiar o controle de alagamentos consistiu em aprimorar a estimação das vazões de projeto por meio de uma análise de sensibilidade entre séries de duração parcial e a série de máximos anuais, variando sistematicamente o limiar adotado no modelo de picos acima de um determinado valor.

Eslamian, Sabzevari e Farizi (2025) utilizaram registros de vazão de 15 estações fluviométricas na bacia do Karkheh, com séries de 63 anos, e compararam limiares equivalentes a N , $1,6N$, $2N$, $3N$ e $6N$ eventos, tomando a série de máximos anuais como referência, para períodos de retorno entre 10 e 200 anos.

A partir do ajuste de diferentes distribuições estatísticas no software *FREQ* e da seleção do melhor ajuste por testes de aderência, Eslamian, Sabzevari e Farizi (2025) demonstraram que o aumento do número de eventos considerados na série parcial tende a reduzir as vazões estimadas, sobretudo em bacias de maior área e altitude, enquanto em bacias menores os resultados podem apresentar comportamento não monotônico.

5.1.8.7 Modelagem explicável para planejamento de drenagem urbana

Segundo Infant et al. (2025), o encaminhamento discutido para redução de alagamentos em áreas urbanas baseia-se no uso de modelos numéricos explicáveis aplicados ao gerenciamento integrado de sistemas de água, incluindo a drenagem.

Infant et al. (2025) reúnem exemplos em que modelos de previsão de escoamento e de cheias, alimentados por séries históricas de chuva, vazão e dados de sensores em tempo quase real, são empregados para apontar quais variáveis – como intensidade e duração da precipitação, uso e cobertura do solo, relevo e capacidade hidráulica de tubulações e canais, mais contribuem para a formação de inundações, permitindo mapear trechos de rede e bacias com maior probabilidade de extravasamento.

O trabalho de Infant et al. (2025) mostra que essa capacidade de identificar fatores determinantes, associada à simulação de cenários de eventos extremos e de mudanças climáticas, vem sendo usada para avaliar se os sistemas existentes suportam volumes futuros e para comparar alternativas de intervenção, como redefinição de diâmetros de

condutos, implantação ou ampliação de bacias de retenção, adoção de pavimentos permeáveis e coberturas vegetadas em áreas críticas.

Ao enfatizar que a explicação dos resultados desses modelos facilita a aceitação por órgãos gestores e comunidades e fortalece seu uso em sistemas de alerta, em planos de adaptação e no planejamento de obras de drenagem mais resilientes, Infant et al. (2025) atendem ao objetivo declarado de examinar como abordagens de modelagem interpretável podem apoiar a operação de sistemas urbanos de água e a gestão de riscos associados a inundações e alagamentos.

5.1.9 *Modelagem hidrológica e cenários climáticos para gestão de cheias*

Segundo AlZaatiti et al. (2025), o encaminhamento dado ao problema de inundações na bacia do rio Abou Ali consiste na construção de um arranjo de modelagem que integra projeções climáticas de modelos globais com um modelo hidrológico–hidrodinâmico de cheia, de modo a antecipar padrões futuros de alagamento e apoiar o planejamento de medidas de adaptação.

AlZaatiti et al. (2025) utilizam três modelos climáticos do CMIP6 (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR e MIROC6), sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, procedendo ao rebaixamento de escala e à correção de vieses por meio da ferramenta CMhyd, para tornar as séries de precipitação compatíveis com a aplicação hidrológica.

Com base em dados CHIRPS de chuva, modelo digital de elevação HydroSHEDS, informações de uso e cobertura da terra e grupos hidrológicos de solo, AlZaatiti et al. (2025) configuram o modelo Rainfall-Runoff-Inundation (RRI), calibrado e validado com o evento de cheia de fevereiro de 2018, obtendo coeficientes de eficiência de Nash–Sutcliffe e de determinação considerados satisfatórios nas três estações fluviométricas avaliadas.

A partir daí, AlZaatiti et al. (2025) simulam cenários futuros de precipitação extrema, selecionando picos diários projetados para meados e final do século, o que permite estimar a evolução da área inundada e da profundidade máxima de alagamento: a lâmina de cheia passa de 6,5 m para 14,7 m e a área inundada aumenta de 8,78 km² para 26,05 km², com destaque para zonas urbanas e agrícolas em Tripoli, Abou Samra, Zgharta e Kousba.

AlZaatiti et al. (2025) discutem que, mesmo com tendência de redução da precipitação média anual em parte dos modelos, a maior concentração de chuvas intensas

em curtos períodos eleva o risco de inundação e exige atenção a obras de drenagem, ocupação do solo e sistemas de alerta.

Dessa forma, o uso combinado de projeções climáticas corrigidas, modelo RRI e mapas de inundação é apresentado por AlZaatiti et al. (2025) em coerência com o objetivo do estudo, que é avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre o risco de cheias na bacia do Abou Ali e fornecer subsídios técnicos para estratégias de adaptação e gestão de cheias em Tripoli e municípios a montante.

5.1.9.1 Modelagem chuva–vazão integrada com modelos físicos e de IA explicáveis

Asadi et al. (2024) tratam o aperfeiçoamento da previsão de vazões na bacia de cabeceiras do rio Tejo, na Espanha, como uma medida necessária para apoiar o gerenciamento de recursos hídricos e a avaliação de risco de cheias, estruturando o estudo na comparação e combinação de modelos físicos e de aprendizado de máquina.

Asadi et al. (2024) calibram o modelo hidrológico fisicamente baseado SWAT+ para quatro sub-bacias com estações fluviométricas, utilizando séries diárias de 1985 a 2020, dados de precipitação e temperatura, modelo digital de elevação, uso e cobertura do solo e mapas de solo, e avaliam o desempenho com indicadores como NSE, RMSE, MAE, PBIAS e KGE.

Em paralelo, Asadi et al. (2024) desenvolvem três modelos baseados em inteligência artificial (SVR, FFNN e LSTM) para simulação chuva–vazão, alimentados por combinações de vazões defasadas e precipitação diária, após análise de correlação entre $Q(t)$ e valores antecedentes de Q e P ; as séries são normalizadas e o período de 1990 a 2005 é usado para treinamento, com 2006 a 2020 reservado à validação, o que permite comparar a capacidade preditiva dos diferentes arranjos.

Na etapa seguinte, Asadi et al. (2024) constroem modelos de conjunto (ensemble) em dois cenários: no primeiro, a entrada do ensemble é composta apenas pelas saídas dos três modelos de IA; no segundo, acrescenta-se também a vazão simulada pelo SWAT+, de modo a integrar respostas físicas e estatísticas na estimativa final de escoamento.

Os resultados de Asadi et al. (2024) mostram que o ensemble melhora os valores de NSE em relação aos modelos individuais – com ganhos da ordem de 5 a 9% na fase de validação – e reduz erros médios e viés, indicando maior aderência às vazões observadas,

o que é relevante para a definição de vazões de referência em contextos de operação de reservatórios e análise de cheias.

Por fim, Asadi et al. (2024) aplicam o método SHAP para interpretar a contribuição de cada modelo no ensemble, verificando que as previsões do FFNN tendem a exercer maior peso na composição da vazão final, enquanto a influência do SWAT+ varia entre as estações, sendo mais marcada naquelas onde o modelo físico apresenta melhor ajuste.

5.1.9.2 Atualização de curvas IDF para dimensionamento de drenagem

De Zoysa et al. (2024) tratam a redução de riscos de alagamento em Sri Lanka a partir da atualização das chuvas de projeto usadas no dimensionamento de estruturas de drenagem, por meio do desenvolvimento de novas curvas intensidade–duração–frequência (IDF) baseadas em dados de satélite combinados com registros de postos pluviométricos.

De Zoysa et al. (2024) avaliam o desempenho de três produtos de precipitação por satélite (IMERG, TRMM-3B42 e PERSIANN-CDR) frente a observações em superfície, para o período de 1990 a 2019, e elaboram cinquenta conjuntos de curvas IDF específicos para diferentes localidades do país, comparando-os com curvas regionais elaboradas há mais de três décadas.

Os autores mostram, em De Zoysa et al. (2024), que os produtos de satélite apresentam vieses significativos em algumas regiões e durações, mas que, quando avaliados criticamente e associados a dados de chuva medidos, permitem construir curvas IDF mais detalhadas, capazes de refletir mudanças recentes nos padrões de intensidade e duração das tempestades.

Essa atualização é apresentada por De Zoysa et al. (2024) como condição para revisar critérios de projeto de drenagem urbana e rural, uma vez que curvas antigas tendem a subestimar intensidades associadas a eventos extremos atuais.

5.1.9.3 Síntese de modelos chuva–vazão para mitigação de cheias urbanas

Nanda et al. (2025) tratam a mitigação de cheias urbanas a partir de uma análise bibliométrica que reúne quase duas décadas de publicações sobre modelagem chuva–vazão aplicada ao controle de inundações, destacando como diferentes tipos de modelos vêm sendo usados para apoiar o planejamento da drenagem.

O estudo de Nanda et al. (2025) mostra a permanência de esquemas amplamente difundidos, como SWMM e HEC–HMS, ao lado da incorporação progressiva de modelos baseados em dados, de sistemas de informação geográfica e de abordagens que integram medidas de baixo impacto, como coberturas vegetadas, pavimentos permeáveis e dispositivos de biorretenção.

Nanda et al. (2025) identificam lacunas importantes, como a pouca avaliação do desempenho de medidas distribuídas ao longo de períodos longos, a dificuldade de incluir dados em tempo quase real e de representar mudanças dinâmicas de uso do solo e de infraestrutura, o que limita a capacidade de muitos modelos em lidar com a variabilidade climática recente.

Ao organizar a produção científica por tipos de modelos, países, periódicos e palavras-chave, Nanda et al. (2025) oferecem um panorama das ferramentas de simulação disponíveis para estudar cheias urbanas e apontam a necessidade de arranjos que combinem representações hidrológicas tradicionais, análise espacial detalhada e avaliação de medidas de controle distribuídas.

Essa síntese está alinhada ao objetivo do artigo de Nanda et al. (2025), que é mapear tendências e lacunas da modelagem chuva–vazão voltada à mitigação de enchentes urbanas, indicando caminhos para aprimorar a avaliação de medidas estruturais e não estruturais em cenários de urbanização e clima em mudança.

5.1.9.4 Critérios de risco de enxurradas baseados em radar e características topográficas

Sung et al. (2025) encaminham o problema de enxurradas rápidas em bacias urbanas e de pequenas montanhas por meio da definição de equações de critérios de risco que permitem emitir alertas com uma hora de antecedência, inclusive em áreas sem medição fluviométrica.

Sung et al. (2025) utilizam uma rede nacional de radares de chuva de dupla polarização, associada ao algoritmo MAPLE para previsão de curto prazo, e partem de 342 registros de desastres anteriores para calcular chuvas limiars (marginal rainfall) em diferentes durações, entre 30 e 180 minutos.

A partir dessas séries, Sung et al. (2025) relacionam a chuva limiar com parâmetros de escoamento ligados às características físicas das bacias, como impermeabilização, declividade, densidade de condutos e calhas e capacidade de bombeamento, construindo

um nomograma que permite transferir os critérios de risco de áreas medidas para regiões não monitoradas.

O sistema de Sung et al. (2025) gera três níveis de alerta – atenção, aviso e crítico – com base nas previsões de chuva dos radares em grade de 250 m e passo de 10 minutos, e a avaliação de quatro anos de eventos mostrou acerto elevado na identificação de situações de risco (POD em torno de 0,706).

Essa formulação responde diretamente ao objetivo do estudo de Sung et al. (2025), que é validar equações padronizadas de critérios de risco de enxurradas e demonstrar sua aplicação para fortalecer a preparação e a resposta a inundações súbitas em bacias pequenas e urbanizadas, mesmo na ausência de séries históricas locais de vazão.

5.1.9.5 Modelagem probabilística de impactos de alagamentos em sistemas de distribuição de energia

Afzal et al. (2025) tratam os alagamentos súbitos em áreas urbanas como fator de falha para subestações de distribuição e propõem um arranjo de modelagem probabilística para localizar extravasamentos e estimar danos em redes de energia, evitando a dependência exclusiva de modelos bidimensionais de escoamento com alto custo computacional.

Em uma malha regular, Afzal et al. (2025) utilizam a técnica de Monte Carlo para gerar múltiplas realizações de cenários de chuva, umidade do solo e curvatura do terreno, identificando células com maior probabilidade de transbordamento.

A partir desses pontos, Afzal et al. (2025) empregam um esquema de aprendizado por reforço para seguir o caminho preferencial das lâminas d'água até as subestações mais vulneráveis, indicando quais equipamentos tendem a ser alcançados em cada simulação.

Os autores, Afzal et al. (2025) desenvolvem um modelo de fragilidade específico para subestações internas, ajustado às condições construtivas e de operação observadas na Malásia, de modo a relacionar profundidade de inundação e probabilidade de falha, em lugar de curvas derivadas de ventos extremos ou de padrões de outros países.

O conjunto desse procedimento é aplicado por Afzal et al. (2025) a sistemas IEEE de 33 barras e a uma rede real de 23 barras, incluindo validação em um setor urbano, com a finalidade explícita de oferecer aos operadores de distribuição um instrumento de avaliação rápida de risco que oriente decisões preventivas frente a enchentes repentinas e apoie o aumento da resiliência da infraestrutura crítica.

5.1.10 *Controle em tempo real e operação de sistemas de drenagem*

5.1.10.1 Controle em tempo real de redes de drenagem com redes LSTM

Pei et al. (2025) tratam a redução de extravasamentos em redes de esgoto combinado por meio da aplicação de controle em tempo real baseado em redes neurais recorrentes do tipo LSTM, treinadas por neuro-evolução, em uma rede de referência de drenagem urbana (Astlingen).

A partir de simulações dinâmicas, Pei et al. (2025) comparam políticas de controle formuladas com perceptrons multicamadas e com LSTM, alimentadas por um vetor de 33 variáveis de estado (níveis em tanques, nós de rede e dados de chuva), e mostram que as políticas LSTM passam a reduzir o volume de extravasamento de esgoto e de descargas em corpos d'água sensíveis em cerca de 9,8%–10,1% em relação ao sistema passivo, superando os ganhos obtidos com o arranjo baseado em MLP, que ficam entre 7,0% e 9,0% para o período de 2000 a 2009.

Em seguida, Pei et al. (2025) avaliam o papel da memória interna da LSTM, demonstrando que a inicialização nula e a ausência de atualização de estados ocultos levam a aumentos de 10%–21% no volume de extravasamento, o que evidencia a relevância da componente temporal nas decisões de operação.

Por fim, Pei et al. (2025) testam configurações em que apenas o nível de um reservatório é utilizado como variável de entrada e verificam que ainda é possível obter melhoria expressiva de desempenho, o que abre espaço para esquemas de monitoramento com menos sensores.

Essa sequência de análises cumpre o objetivo do trabalho de Pei et al. (2025), que é investigar o uso de LSTM como núcleo de políticas de controle, comparar seu desempenho com MLP e examinar a contribuição da memória e da simplificação do vetor de estado para o manejo em tempo real de sistemas de drenagem sujeitos a inundações e extravasamentos.

5.1.10.2 Controle em tempo real de redes de drenagem com aprendizado por reforço profundo

Huang et al. (2025) tratam a redução de alagamentos e extravasamentos em sistemas urbanos de drenagem por meio da aplicação de controle em tempo real baseado

em aprendizado por reforço profundo multiagente, comparando seu desempenho com estratégias usuais de controle por regras (RBC) e por controle preditivo baseado em modelo (MPC).

A partir de dados de um sistema de drenagem em Suzhou e de 31 eventos reais de chuva, Huang et al. (2025) treinam agentes de deep reinforcement learning que operam bombas e estruturas com base em estados hidrodinâmicos do sistema, considerando simultaneamente objetivos ambientais (risco de alagamento e de extravasamento), econômicos (consumo de energia) e operacionais (número de partidas de bombas).

As simulações de Huang et al. (2025) mostram que, em média, o arranjo baseado em aprendizado por reforço reduz o indicador de risco de alagamento entre 15,1% e 43,5% em relação a RBC e MPC, ao custo de maior consumo de energia e maior número de acionamentos de bombas, o que evidencia uma troca entre proteção hidráulica e esforço operacional.

O estudo de Huang et al. (2025) também demonstra que o tempo de decisão por passo de controle é da ordem de 1 s (cerca de 0,3% do intervalo de 5 min), aproximadamente 199 vezes menor que o de estratégias MPC avaliadas, e que a abordagem apresenta maior robustez a incertezas de previsão de chuva (erros de até 20%) e melhor adaptabilidade a variações de padrão e intensidade de eventos.

5.1.11 *Avaliação de risco, vulnerabilidade e perigo de inundação*

5.1.11.1 Mapeamento de vulnerabilidade costeira como ferramenta de gestão de alagamentos

Lins-de-Barros e Muehe (2010) tratam a principal “tecnologia” de enfrentamento das inundações costeiras na Região dos Lagos como uma metodologia de avaliação local de vulnerabilidade e risco, estruturada a partir da integração de dados físico-ambientais e socioeconômicos na escala de setores censitários urbanos.

Lins-de-Barros e Muehe (2010) combinaram informações sobre morfodinâmica praial, evidências de erosão costeira, exposição à transposição de ondas (overwash), registros de alagamentos da Defesa Civil e características altimétricas da faixa costeira com a base censitária do IBGE, corrigida e ajustada em ambiente SIG, de modo a classificar trechos de litoral e setores urbanos quanto à suscetibilidade a transposição, erosão e alagamentos, bem como quanto ao risco de contaminação do lençol freático e deficiência de abastecimento de água.

A partir desse cruzamento espacial, Lins-de-Barros e Muehe (2010) estimaram que mais de 143 mil pessoas vivem em setores vulneráveis, sendo cerca de 79 mil em áreas efetivamente sujeitas a alagamentos ou transposição e aproximadamente 14 mil em setores com elevadíssima precariedade sanitária e uso intenso de poços, dos quais 1,5 mil residem justamente nas áreas mais vulneráveis à inundação.

5.1.11.2 Modelagem e mapeamento de risco de inundação em microbacias

Jodhani et al. (2024) tratam o problema das enchentes recorrentes na bacia do rio Rel, em Gujarat, por meio da elaboração de mapas de risco de inundação em escala de microbacias, integrando observações da Terra, técnicas de SIG, Google Earth Engine e análise multicritério AHP.

Jodhani et al. (2024) dividem a bacia em 52 microbacias e calculam, para cada uma, um índice de perigo de inundação a partir de cinco indicadores físicos – tipo de solo, altitude, declividade, acumulação de fluxo e chuva – e um índice de vulnerabilidade com base em uso e cobertura da terra, distância até hospitais e densidade populacional, todos convertidos em planos de informação contínuos e ponderados pelo AHP.

A combinação desses índices resulta, em Jodhani et al. (2024), em um mapa de risco que classifica as microbacias em faixas de muito baixo a muito alto risco, mostrando que 20 delas se enquadram nas categorias alta e muito alta, somando cerca de 213 km², enquanto as demais se distribuem entre risco muito baixo, baixo e moderado.

A partir desse enquadramento, Jodhani et al. (2024) identificam vilas mais expostas, discutem a necessidade de arranjos institucionais entre Gujarat e Rajasthan, de aprimoramento da rede de monitoramento (chuva e nível d'água), de revisão de práticas de mineração de areia e de uso de aplicativos para alerta e evacuação, propondo essas ações como desdobramentos de planejamento para redução de danos futuros.

5.1.11.3 Avaliação probabilística de perdas econômicas por extravasamento de diques

Farid et al. (2025) propõem que a mitigação dos impactos de cheias em comunidades ribeirinhas sujeitas a extravasamento de diques seja apoiada por uma avaliação probabilística de risco que quantifique, de forma setorial, as perdas econômicas associadas a diferentes cenários de inundação.

Para a vila de Citeureup, na bacia do rio Cikapundung, Farid et al. (2025) desenvolvem uma sequência que inclui análise de frequência de chuvas para diferentes

períodos de retorno, simulação hidrológica com hidrogramas de projeto e modelagem bidimensional de inundação em HEC-RAS, obtendo mapas de profundidade e extensão das lâminas d'água para eventos de 10, 25 e 100 anos.

Esses resultados são combinados, em Farid et al. (2025), com funções profundidade–dano e custos de reposição específicos para setores residencial, agrícola e industrial, permitindo estimar perdas monetárias em cada cenário e construir curvas de risco que relacionam dano esperado e probabilidade de excedência.

A abordagem de Farid et al. (2025) evidencia que eventos com maior período de retorno resultam em alagamentos mais extensos e perdas mais elevadas, além de indicar quais setores concentram maior risco econômico e, portanto, exigem prioridade em medidas de reforço de diques, realocação, seguros ou adaptação da ocupação.

5.1.11.4 Avaliação de perigo de cheia em estuário com índice de ameaça

De acordo com Isma et al. (2024), o encaminhamento dado ao problema de alagamentos recorrentes em Kuala Langsa consistiu em construir, para a escala de vila, um índice de perigo de inundação (Flood Hazard Index – FHI) baseado na interação entre cheias de maré e vazões de cheia a montante, apoiado em modelagem hidrológica e hidráulica acoplada.

Isma et al. (2024) delimitam a bacia do rio Langsa a partir de modelo digital de elevação, caracterizam uso e cobertura do solo, grupos hidrológicos de solo e parâmetros de curvas CN, e utilizam o HEC-HMS para simular hidrogramas de cheia com diferentes períodos de retorno, enquanto o HEC-RAS 1D/2D é empregado para representar a propagação de marés de sizígia (HWS, MSL e LWS) desde a foz até o interior do estuário.

A partir de cenários que combinam maré de sizígia com descargas de projeto (Q_2 , Q_{25} e Q_{50}), Isma et al. (2024) obtêm mapas de profundidade, duração, frequência e área inundada, que são sintetizados em um FHI por meio de pesos derivados de normas indonésias (0,35 para profundidade, 0,25 para duração, 0,20 para frequência e 0,20 para área).

Os resultados de Isma et al. (2024) indicam que, sob Q_{50} , a extensão e a gravidade das inundações se ampliam, com aumento das classes de perigo baixo, médio e alto e concentração de valores elevados em zonas de viveiros, áreas de manguezal e setores residenciais sobre várzeas, o que reforça a vulnerabilidade da vila às marés de lua cheia combinadas com cheias fluviais.

Isma et al. (2024) articulam o FHI a um índice de risco que incorpora vulnerabilidade e capacidade local, propondo que esse arranjo sirva de base para definir estratégias de adaptação e medidas de mitigação em Kuala Langsa.

5.1.12 *Consolidação do material levantado*

5.1.12.1 Tabela resumo

A base construída a partir da revisão de literatura é composta por 66 soluções de drenagem urbana, gestão de águas pluviais e medidas de controle de enchentes, cada uma descrita quanto ao tipo de solução, contexto de aplicação. Desse conjunto, 51 soluções (cerca de 77,3%) foram efetivamente aplicadas em alguma cidade, enquanto 15 (22,7%) correspondem a estudos de caráter mais teórico ou de simulação.

Do ponto de vista temporal, os trabalhos analisados abrangem o período de 2004 a 2025, com média aproximada de 2020 e mediana em 2022, indicando forte concentração em pesquisas recentes. Quando agrupados em faixas, observa-se que 1 trabalho (1,5%) está entre 2004–2009, 9 (13,6%) entre 2010–2014, outros 9 (13,6%) entre 2015–2019 e a maior parte, 47 trabalhos (71,2%), situa-se entre 2020–2025. Assim, 84,8% das soluções são provenientes de estudos publicados a partir de 2015, evidenciando que a base reflete predominantemente o estado da arte mais atual em drenagem urbana e medidas compensatórias.

Em termos espaciais e de autoria, nota-se a recorrência de alguns contextos urbanos e pesquisadores. Cidades como Joinville–SC (bacia do rio Itapocu), Belém–PA, São Paulo–SP e Cidade do México e os municípios da bacia do rio Itajaí–Açu–SC aparecem em mais de um estudo, demonstrando que determinados territórios têm sido laboratórios importantes para a experimentação de soluções de drenagem. De modo semelhante, autores como Gorniack, Teixeira, Souza, Tasca e Campos aparecem em mais de uma publicação, indicando núcleos de pesquisa com produção continuada na temática. Esses resultados sugerem que, embora a base seja diversificada, há polos de concentração de conhecimento que contribuem de forma relevante para a consolidação das soluções analisadas.

Tabela 2 - Tabela resumo de soluções

Tipo de solução	Cidade onde foi aplicada	Ano do trabalho	Autor	Tipo de estudo	Foi aplicado a uma cidade?
Taxa de permeabilidade mínima em lotes urbanos (controle na fonte)	Joinville–SC (bacia do rio Itapocu)	2014	Gorniack	Estudo aplicado com proposta normativa	Sim

Jardins drenantes em lotes urbanos	Joinville–SC (bacia do rio Itapocu)	2014	Gorniack	Estudo aplicado / proposta de dispositivo no lote	Sim
Trincheiras de infiltração combinadas à drenagem convencional	Criciúma–SC (avenida urbana)	2019	França	Estudo de caso com dimensionamento e simulação	Sim
Poços de infiltração em lotes urbanos	São Carlos–SP (campus UFSCar)	2021	Gonçalves	Estudo aplicado com simulação de desempenho	Sim
Percentual mínimo de área verde em loteamentos	São José–SC (loteamento Portal da Colina)	2020	Silveira	Estudo de caso com reconfiguração espacial	Sim
Biovaletas e infraestrutura socioecológica em expansão urbana	Brasília–DF (Setor Habitacional Taquari)	2019	Conserva	Cenários de projeto com simulação SWMM	Sim
Modelagem hidrológica computacional para seleção de técnicas mitigadoras	Diversas bacias urbanas (revisão)	2021	Rangel	Teórico / revisão sistemática de modelos	Não
Aproveitamento de água de chuva em praça pública (cisterna)	Concórdia–SC (Praça Dogello Goss)	2023	Tobias	Estudo de caso com dimensionamento de sistema	Sim
Diagnóstico integrado de várzeas, precipitação e marés	Belém–PA (11 bacias urbanas)	2017	Pontes	Diagnóstico aplicado com análise espacial e séries históricas	Sim
Abordagem integrada de drenagem urbana sustentável (DUS/LID/SUDS/WSUD)	Diversas cidades (análise cienciométrica)	2020	Cordeiro	Teórico / revisão cienciométrica	Não
Planejamento e regulação integrada dos sistemas de drenagem urbana	Municípios da bacia do rio Mucuri–MG	2022	Machado	Diagnóstico institucional e proposição de alternativas	Sim
Monitoramento quali-quantitativo do escoamento pluvial urbano	Brasília–DF (bacia urbana monitorada)	2010	Campana	Executado em campo (monitoramento de vazão e qualidade)	Sim
Sistema de previsão de alagamentos com modelo hidrológico e SIG	Belém–PA	2013	Santos	Desenvolvimento e teste de sistema de previsão	Sim
Mapeamento de vulnerabilidade costeira a alagamentos	Região dos Lagos–RJ (setores censitários urbanos)	2010	Lins-de-Barros	Estudo aplicado de vulnerabilidade costeira	Sim

Gestão da drenagem urbana orientada à sustentabilidade	Brasil (escala nacional, exemplos diversos)	2013	Souza	Ensaio conceitual / revisão com exemplos	Não
Planejamento e otimização de redes de micro e macrodrenagem	Cidades brasileiras diversas (revisão de casos)	2022	Rodrigues	Revisão narrativa de legislação, manuais e casos	Sim
Metodologias de diagnóstico e avaliação de sistemas de drenagem urbana	Não se aplica (métodos genéricos)	2020	Teixeira	Teórico / revisão metodológica	Não
Macrodrenagem com bueiros inteligentes e manejo na bacia urbana	Ilhéus–BA (bairro Cidade Nova)	2023	Teixeira	Estudo de caso com propostas de obra e gestão	Sim
Conceito ampliado de déficit em drenagem urbana	Não se aplica (conceito geral)	2013	Souza	Teórico / sistematização conceitual	Não
Sistemas sustentáveis de drenagem (SUDS) e dispositivos de controle na fonte	Não se aplica (revisão de dispositivos)	2012	Agostinho	Teórico / revisão de soluções	Não
Integração de espaços livres com pavimentos permeáveis, bacias e jardins de chuva	Rio de Janeiro–RJ (Praça Xavier de Brito e entorno do Canal do Mangue)	2018	Battemarco	Estudo de caso com simulação hidrodinâmica	Sim
Evolução do manejo de águas pluviais e soluções baseadas na natureza	Diversas cidades (revisão histórica)	2019	Christofidis	Teórico / revisão de paradigmas	Não
Gestão municipal da drenagem urbana e planos de manejo	Municípios da bacia do rio Itajaí-Açu–SC	2017	Tasca	Diagnóstico por questionários e análise comparativa	Sim
Infraestrutura verde em espaços livres de centro histórico tombado	Laguna–SC (centro histórico)	2017	Medeiros	Proposta de projeto de infraestrutura verde	Sim
Metodologia multicritério com bacias de retenção e microrreservatórios	Goiânia–GO (área urbanizada)	2019	Mendonça	Estudo de caso com avaliação multicritério	Sim
Modelagem, planejamento e ajustes em sistema de microdrenagem	Aparecida de Goiânia–GO (Setor Serra Dourada 3ª Etapa)	2020	Monteiro	Diagnóstico e simulação com propostas de intervenção	Sim

Incorporação da drenagem urbana nos planos diretores municipais	Belo Horizonte–MG, Porto Alegre–RS, Goiânia–GO	2013	Silva	Estudo comparativo de planos diretores	Sim
Soluções baseadas na natureza e governança da drenagem urbana	São Paulo–SP e Cidade do México	2021	Campos	Análise institucional e de políticas públicas	Sim
Medidas de adaptação da drenagem urbana às mudanças climáticas	Recife–PE	2020	Silva Junior	Análise de instrumentos legais e políticas	Sim
Telhados verdes como medida de drenagem urbana	Diversas cidades (síntese de estudos)	2021	Canabrava Neto	Revisão e análise de desempenho	Sim
Soluções baseadas na natureza e arranjos colegiados de bacia	São Paulo–SP e Cidade do México	2021	Campos	Estudo institucional sobre comitês de bacia e SbN	Sim
Jardins de chuva e trincheiras de infiltração em áreas verdes públicas	Brasília–DF (sub-bacia do Iate Clube)	2020	Oliveira	Modelagem PCSWMM em estudo de caso urbano	Sim
Análise climatológica e urbanização como base para controle de alagamentos	Belém–PA	2020	Dias	Análise de séries climáticas e expansão urbana	Sim
Gestão da drenagem urbana na bacia do rio Itajaí-Açu	Municípios da bacia do rio Itajaí-Açu–SC	2018	Tasca	Diagnóstico da gestão municipal (1998–2012)	Sim
Aproveitamento de água de chuva em edificações residenciais	Assunção (Paraguai)	2022	Ortiz	Simulação de sistemas domésticos de APAC	Sim
Modelagem hidrodinâmica tridimensional de trecho fluvial urbano	Trecho urbano do rio Santa Catarina (México)	2025	De la Cruz-Avila	Modelagem numérica 3D com comparação de modelos de turbulência	Sim
Transferência de evento extremo e avaliação de risco de inundação	Bacia do rio Mulde / município de Bennewitz (Alemanha)	2024	Aslantas	Modelagem hidrológica–hidrodinâmica e cálculo de danos	Sim
Análise de frequência de cheias com séries de duração parcial	Bacia do rio Karkheh (Irã, 15 estações)	2025	Eslamian	Análise estatística de vazões extremas	Não
Modelagem de rede de esgoto e aumento da capacidade de escoamento	Samawah (bairro Al-Shuhada) – Iraque	2021	Mohammed	Modelagem SWMM e proposição de reforços de rede	Sim

Modelagem explicável para planejamento de drenagem urbana	Diversas cidades (exemplos em sistemas urbanos de água)	2025	Infant	Síntese de aplicações de modelos explicáveis	Não
Modelagem e mapeamento de risco de inundação em microbacias	Bacia do rio Rel – Gujarat (Índia)	2024	Jodhani	Modelagem SIG + AHP em 52 microbacias	Sim
Sistemas de captação e armazenamento de água de chuva em áreas rurais	Diversas localidades rurais (revisão sistemática)	2023	García-Avila	Revisão sistemática de RWHSS	Não
Modelagem hidrológica e cenários climáticos para gestão de cheias	Bacia do rio Abou Ali – Líbano (Tripoli e entorno)	2025	AlZaatiti	Modelagem RRI integrada a projeções climáticas	Sim
Análise integrada de risco de alagamentos com projeções climáticas	Dresden – Alemanha	2024	Yang	Modelagem SWMM contínua com clima futuro	Sim
Modelagem chuva–vazão integrada com modelos físicos e IA explicáveis	Bacia de cabeceiras do rio Tejo – Espanha	2024	Asadi	Modelagem SWAT+ e modelos de IA / ensembles	Não
Avaliação integrada de risco e vulnerabilidade em perspectiva SETS	Atlanta – EUA	2025	Singh	Construção de índice SETS aplicado à cidade	Sim
Infraestrutura verde e cenários espaço-econômicos para controle de cheias	Bacia de Ecully – Metrôpole de Lyon (França)	2025	Lipperera	Planejamento de cenários de infraestrutura verde/cinza	Sim
Atualização de curvas IDF para dimensionamento de drenagem	Diversas localidades de Sri Lanka	2024	De Zoysa	Construção de curvas IDF com dados de satélite	Sim
Estratégias integradas de adaptação urbana frente às inundações	Diversas cidades (revisão de casos e evidências)	2024	Dharmarathne	Revisão ampla sobre clima e inundações urbanas	Não
Avaliação probabilística de perdas econômicas por extravasamento de diques	Vila de Citeureup – Indonésia	2025	Farid	Modelagem 2D HEC-RAS e análise de risco econômico	Sim
Síntese de modelos chuva–vazão para mitigação de cheias urbanas	Diversas cidades (análise bibliométrica)	2025	Nanda	Revisão bibliométrica de modelos chuva–vazão	Não

Critérios de risco de enxurradas baseados em radar e topografia	Bacias urbanas e de montanha na Coreia do Sul	2025	Sung	Desenvolvimento e validação de sistema de alerta por radar	Sim
Controle em tempo real de redes de drenagem com redes LSTM	Rede de referência de drenagem urbana (Astlingen)	2025	Pei	Simulações de controle em tempo real com LSTM	Não
Avaliação de resiliência urbana às inundações (dimensões espacial, engenharia e gestão)	Cidades chinesas (caso de aplicação)	2024	Li	Desenvolvimento e aplicação de índice de resiliência	Sim
LID com suporte de IoT e aprendizado de máquina para manejo de águas pluviais	Bouznika – Marrocos	2024	Essamlali	Modelagem SWMM e proposta de arquitetura IoT	Sim
Coordenação espacial de cheias em projeto de controle de inundações em Suzhou	Suzhou – China	2024	Xu	Modelo acoplado hidrológico–hidráulico e cenários de operação	Sim
Modelagem probabilística de impactos de alagamentos em sistemas de distribuição de energia	Setores urbanos na Malásia (rede de 23 barras)	2025	Afzal	Modelagem probabilística e de fragilidade de subestações	Sim
Nature-based solutions e conceito de cidade-esponja em megacidades costeiras	Karachi – Paquistão (referências a cidades chinesas e sauditas)	2025	Soni	Revisão de escopo com diagnóstico espacial	Sim
Infraestrutura azul-verde e respostas a inundações compostas em cidades costeiras chinesas	Cidades costeiras chinesas (diversas)	2024	Chan	Síntese de casos, políticas e sistemas de alerta	Sim
Pavimentos permeáveis com agregado reciclado para mitigar empoçamentos urbanos	Não se aplica (estudo laboratorial com aplicação proposta)	2025	Akhtar	Ensaio experimental de misturas de asfalto poroso	Não
Captação em coberturas e redução da conectividade hidrológica urbana	Hamadan – Irã (cidade semiárida)	2025	Lu	Modelagem de conectividade hidrológica urbana	Sim
Alocação espacial otimizada de infraestrutura azul-verde	Nanjing – China (bacia do rio Heping)	2025	Hou	Otimização multiobjetivo com autômatos celulares	Sim
Avaliação de perigo de cheia em estuário com índice de ameaça (FHI)	Kuala Langsa / Langsa – Aceh (Indonésia)	2024	Isma	Modelagem HEC-HMS/HEC-RAS 1D/2D com construção de FHI	Sim

Controle em tempo real de redes de drenagem com aprendizado por reforço profundo multiagente	Suzhou – China (sistema urbano de drenagem)	2025	Huang	Simulações de controle em tempo real com DRL multiagente	Sim
Swales ecológicas com condução subsuperficial em sistema BIOECODS	Larut Matang – Malásia (lote de 2,8 ha)	2024	Lai	Sistema construído e monitorado em campo	Sim

5.1.12.2 Síntese e avaliação das soluções

5.1.12.2.1 Índices de permeabilidade e controle na fonte por norma urbanística

Como Gorniack (2014) apontou no estudo para Joinville (SC), a exigência de taxa mínima de permeabilidade em cada lote pode ser implantada apenas com mudança de legislação e revisão dos processos de aprovação, sem obras complexas. Silveira, Oliveira e Schuch (2020) mostraram em São José (SC) que elevar a área verde do loteamento Portal da Colina para 25,33% aumentou a retenção e aproximou o balanço hídrico das condições pré-urbanização.

Em Belo Horizonte, Porto Alegre e Goiânia, Silva e Hora (2013) indicaram que índices de permeabilidade, restrições a parcelamentos em áreas alagáveis e programas de drenagem são incorporáveis diretamente aos planos diretores.

Em Recife, Silva Junior et al. (2020) registraram que a exigência de telhados verdes e reservatórios de retardo em lotes acima de 500 m² passou a tratar a reservação como obrigação de projeto. A viabilidade técnica é alta, mas o risco principal é virar critério apenas formal, sem fiscalização nem garantia de desempenho real.

5.1.12.2.2 Dispositivos locais de infiltração e biorretenção

França e Cauduro (2019) mostraram em Criciúma (SC) que trincheiras de infiltração associadas à drenagem convencional reduziram fortemente pontos de extravasamento com intervenção relativamente simples em sarjetas e calçadas.

Em São Carlos (SP), Gonçalves e Teixeira (2021) verificaram que poços de infiltração instalados em lote da UFSCar infiltraram completamente chuvas até o 75º percentil, atenuando extravasamentos em eventos mais intensos.

Oliveira et al. (2020) simularam, para Brasília (DF), jardins de chuva e trincheiras em áreas verdes públicas, reduzindo o volume que permanece escoando em superfície,

ainda que com efeito discreto no exutório. Conserva et al. (2019) detalharam, no Setor Habitacional Taquari em Brasília, biovaletas ao longo das vias, com grande redução de vazões de pico frente ao projeto convencional.

Em Laguna (SC), Medeiros e Afonso (2017) e, na Malásia, Lai et al. (2024) mostraram que biovaletas, valas britadas e swales ecológicas com condução subsuperficial podem ser executadas com escavação rasa, agregados e vegetação, desde que haja plano de manutenção para evitar colmatação e obstruções.

5.1.12.2.3 Infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza em escala de bairro ou bacia

Battamarco et al. (2018) apontaram para a bacia do Canal do Mangue, no Rio de Janeiro (RJ), que pavimentos permeáveis, bacias de retenção em praças e jardins de chuva ao longo do rio reduziram lâminas de alagamento, ainda que modestamente, exigindo replicação em toda a bacia. Medeiros e Afonso (2017) mostraram no centro histórico de Laguna (SC) que reorganizar praças e largos como infraestrutura verde ao longo dos talvegues diminui a energia das enxurradas que atingem o casario. Campos (2021) discutiu, para São Paulo e Cidade do México, redes de jardins de chuva, canteiros pluviais e alagados construídos como complemento à drenagem cinza, condicionadas à sua inserção em planos de adaptação climática e políticas de recursos hídricos. Soni et al. (2025) avaliaram Karachi sob o conceito de cidade-esponja, sugerindo parques multifuncionais e superfícies permeáveis em áreas baixas como resposta às inundações recorrentes. Em Nanjing, Hou et al. (2025) mostraram que posicionar lagoas de retenção e áreas úmidas com apoio de modelo hidrológico e otimização reduz picos de cheias com menor custo global, desde que haja coordenação entre planejamento urbano e operação.

5.1.12.2.4 Reservatórios, bacias de retenção e obras de macrodrenagem

Mendonça e Souza (2019) evidenciaram em Goiânia (GO) que cenários com bacias de retenção em áreas públicas e microrreservatórios em lotes reduziram as vazões de jusante abaixo da condição pré-urbanização, com tecnologia comum de reservatórios enterrados ou a céu aberto. Em Aparecida de Goiânia (GO), Monteiro e Mendes (2020) propuseram redimensionar bocas de lobo e galerias, além de criar novos pontos de lançamento, mostrando que o reforço da micro e macrodrenagem é tecnicamente viável, embora difícil em área consolidada. Teixeira e Araújo (2023) sugeriram, para Ilhéus (BA), grandes estruturas de macrodrenagem associadas a bueiros inteligentes e rotinas de

limpeza, apoiadas em diâmetros superiores a 2 m e eventual bombeamento. Xu et al. (2024) mostraram em Suzhou que o cinturão de diques reduziu o risco no centro urbano, mas aumentou cheias em áreas externas, exigindo esquemas de operação mais equilibrados. O principal passivo dessas soluções é o custo de implantação e a possibilidade de transferir o risco para jusante se o sistema não for planejado em escala de bacia.

5.1.12.2.5 Gestão, planos setoriais e instrumentos legais

Cordeiro et al. (2020) mostraram que a literatura recente convergiu para a drenagem urbana sustentável como mudança de paradigma, combinando técnicas compensatórias com marcos legais e planejamento integrado. Tucci (2004) apontou, para cidades como Porto Alegre (RS), que limites de vazão de saída de empreendimentos e exigência de reservatórios in loco são elementos centrais de uma política sustentável de inundações urbanas. Machado et al. (2022) analisaram municípios da bacia do rio Mucuri (MG) e identificaram que a ausência de planos de drenagem específicos e a baixa prioridade das águas pluviais contribuem para alagamentos recorrentes. Tasca et al. (2017, 2018) mostraram, na bacia do Itajaí-Açu (SC), que a drenagem segue subordinada a obras e com pouca manutenção, defendendo planos diretores de drenagem articulados ao saneamento. Em Recife, Silva Junior et al. (2020) destacaram normas estaduais e municipais voltadas à adaptação climática, com foco em reservatórios litorâneos, alargamento de calhas e aumento de permeabilidade em nível de lote. A viabilidade é alta, mas depende de capacidade técnica e continuidade institucional.

5.1.12.2.6 Diagnóstico, monitoramento e análise de vulnerabilidade

Campana e Bernardes (2010) mostraram em Brasília (DF) que o monitoramento quali-quantitativo do escoamento pluvial permite identificar a “primeira fração” de carga poluente, informação direta para dimensionar reservatórios e dispositivos de tratamento. Pontes et al. (2017) mapearam várzeas, pontos de alagamento e séries de chuva e maré em Belém (PA), demonstrando que canalização e ocupação de várzeas amplificam eventos relativamente modestos. Dias, Valente e Fernandes (2020) correlacionaram a expansão urbana e tendências de precipitação em Belém, reforçando a combinação entre urbanização e clima como causa da intensificação de alagamentos. Lins-de-Barros e Muehe (2010) integraram dados físico-ambientais e socioeconômicos na Região dos Lagos (RJ) para mapear vulnerabilidade intramunicipal a inundações costeiras. Em Gujarat, Jodhani et al. (2024) mapearam o risco de inundação em 52 microbacias do rio Rel, enquanto Isma et al.

(2024) construíram, para Kuala Langsa (Indonésia), um índice de perigo de inundação em estuário com base em modelagem acoplada. Farid et al. (2025) quantificaram perdas econômicas por extravasamento de diques em Citeureup, na Indonésia, produzindo curvas de risco por setor. Essas abordagens exigem dados e capacidade analítica, mas orientam com precisão onde intervir e que setores priorizar.

5.1.12.2.7 Modelagem hidrológica, hidrodinâmica e chuva–vazão

Rangel et al. (2021) mostraram, em revisão, que modelos como SWMM dominam a avaliação de técnicas de baixo impacto em diferentes escalas urbanas. De la Cruz-Avila et al. (2025) desenvolveram, para o rio Santa Catarina, um modelo tridimensional baseado em RANS e Volume of Fluid para cheias urbanas, permitindo analisar campos de velocidade e pressão após a tempestade tropical Alberto. Aslantas et al. (2024) transferiram o evento extremo do vale do rio Ahr para o rio Mulde, combinando modelagem hidrológica, hidrodinâmica e cálculo de danos na cidade de Bennewitz. Eslamian, Sabzevari e Farizi (2025) investigaram, na bacia do Karkheh, o efeito de diferentes limiares em séries de duração parcial sobre vazões de projeto. AlZaatiti et al. (2025) integraram projeções climáticas do CMIP6 ao modelo RRI para avaliar futuras cheias na bacia do Abou Ali, enquanto Yang et al. (2024) combinaram projeções regionalizadas ao SWMM para estimar evolução de extravasamentos no sistema de Dresden. Asadi et al. (2024) compararam SWAT+ e modelos de IA na cabeceira do rio Tejo, e De Zoysa et al. (2024) propuseram novas curvas IDF para Sri Lanka com base em dados de satélite e postos.

Esses trabalhos aumentam a confiabilidade de vazões de projeto e mapas de inundação, mas exigem calibração cuidadosa e leitura crítica das incertezas.

5.1.12.2.8 Alerta precoce, controle em tempo real e uso intensivo de dados

Santos e Rocha (2013) desenvolveram para Belém (PA) um sistema de previsão de alagamentos com modelo hidrológico acoplado a SIG e nowcasting por radar, gerando mapas de alerta em grade de 5 m. Sung et al. (2025) propuseram na Coreia do Sul critérios de risco de enxurradas baseados em radar de dupla polarização e características das bacias, com alertas com cerca de uma hora de antecedência em áreas sem medição de vazão. Pei et al. (2025) mostraram em Astlingen que políticas de controle em tempo real baseadas em redes LSTM reduziram extravasamentos em redes de esgoto combinado frente a estratégias passivas e MLP. Em Suzhou, Huang et al. (2025) aplicaram aprendizado por reforço

profundo multiagente para operar bombas e estruturas de drenagem, reduzindo o risco de alagamento em vários cenários de chuva. Em Bouznika (Marrocos), Essamlali, Nhaila e El Khaili (2024) propuseram integrar dispositivos LID a sensores de baixo custo e modelos de aprendizado de máquina para operação e manutenção. Afzal et al. (2025) combinaram Monte Carlo e reforço para localizar extravasamentos que ameaçam subestações na Malásia.

Essas soluções são mais complexas, mas agregam valor quando há redes de monitoramento e equipes aptas a operar sistemas de controle em tempo quase real.

5.1.12.2.9 Sínteses conceituais e estratégias de adaptação às cheias urbanas

Agostinho e Poletto (2012) sistematizaram os dispositivos de SUDS como conjunto de medidas de controle na fonte capazes de reduzir enchentes em bacias urbanas. Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) descreveram a evolução do manejo das águas pluviais no Brasil, do afastamento rápido para soluções em sintonia com a natureza, articulando infraestrutura cinza e verde. Souza (2013) defendeu reposicionar a drenagem urbana dentro da gestão do saneamento e recursos hídricos, com ênfase em compensação dos efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico. Dharmarathne et al. (2024) resumiram, em perspectiva internacional, as evidências de que mudanças climáticas aumentam frequência e intensidade de chuvas intensas, recomendando reforço da drenagem, infraestrutura verde e revisão de padrões de projeto. Chan et al. (2024) analisaram cidades costeiras chinesas com redes de parques inundáveis, diques e sistemas de alerta para inundações compostas, enquanto Soni et al. (2025) avaliaram a aplicação do conceito de cidade-esponja em Karachi. Esses trabalhos funcionam como referências de direção estratégica para acomodar intervenções físicas, instrumentos legais e políticas de adaptação.

5.1.12.2.10 Pavimentos permeáveis e sistemas de captação de água de chuva

Akhtar et al. (2025) desenvolveram misturas de asfalto poroso com agregado reciclado de concreto para aplicações em estacionamentos e vias de tráfego leve, indicando permeabilidades adequadas e reaproveitamento de resíduos. Tobias et al. (2023) dimensionaram uma cisterna de 30 m³ para a Praça Dogello Goss em Concórdia (SC), mostrando que o aproveitamento de água de chuva atendeu demandas não potáveis e reduziu parte do escoamento superficial. Ortiz et al. (2022) simularam sistemas residenciais de captação em telhados em Assunção, concluindo que o retorno econômico é limitado,

mas a redução da carga sobre a drenagem justifica incentivos públicos. García-Avila et al. (2023) revisaram sistemas de captação de água de chuva em áreas rurais, destacando simultaneamente ganhos de segurança hídrica e diminuição do escoamento direto às redes. Lu et al. (2025) mostraram em Hamadan que reservatórios de telhado reduzem significativamente a conectividade hidrológica urbana, atenuando a formação de cheias rápidas.

Essas soluções são tecnicamente simples e escaláveis, desde que a qualidade da água, a manutenção dos reservatórios e o descarte de excedentes sejam tratados de forma adequada.

5.2 Árvore decisória

A construção da árvore decisória foi fundamentada em um conjunto de premissas técnicas que visam organizar e hierarquizar as informações necessárias para a escolha das soluções mais adequadas frente aos cenários de alagamento identificados. Inicialmente, o processo parte da identificação do local de ocorrência, etapa que busca definir precisamente o ponto impactado e sua tipologia, uma vez que cada categoria de área – lote/edificação, via ou estacionamento – demanda medidas específicas de mitigação. Essa classificação permite associar as características de uso e ocupação do solo, como grau de impermeabilização e fluxo de pessoas e veículos, às estratégias mais eficazes para redução do escoamento superficial e controle das inundações.

Na sequência, realiza-se o diagnóstico da infraestrutura existente, etapa crucial para compreender as condições do sistema de macrodrenagem da área analisada. Nessa fase, verifica-se não apenas a existência de bueiros, galerias e canais, mas também a sua capacidade hidráulica frente aos eventos críticos e o estado de manutenção. Essa análise possibilita determinar se é viável aproveitar e reforçar a estrutura já instalada ou se será necessária a implantação de dispositivos locais e descentralizados. Em áreas carentes de sistemas estruturados, as soluções priorizam técnicas compensatórias e baseadas na natureza, capazes de fornecer respostas rápidas e de menor custo, sem comprometer futuras ampliações da rede principal.

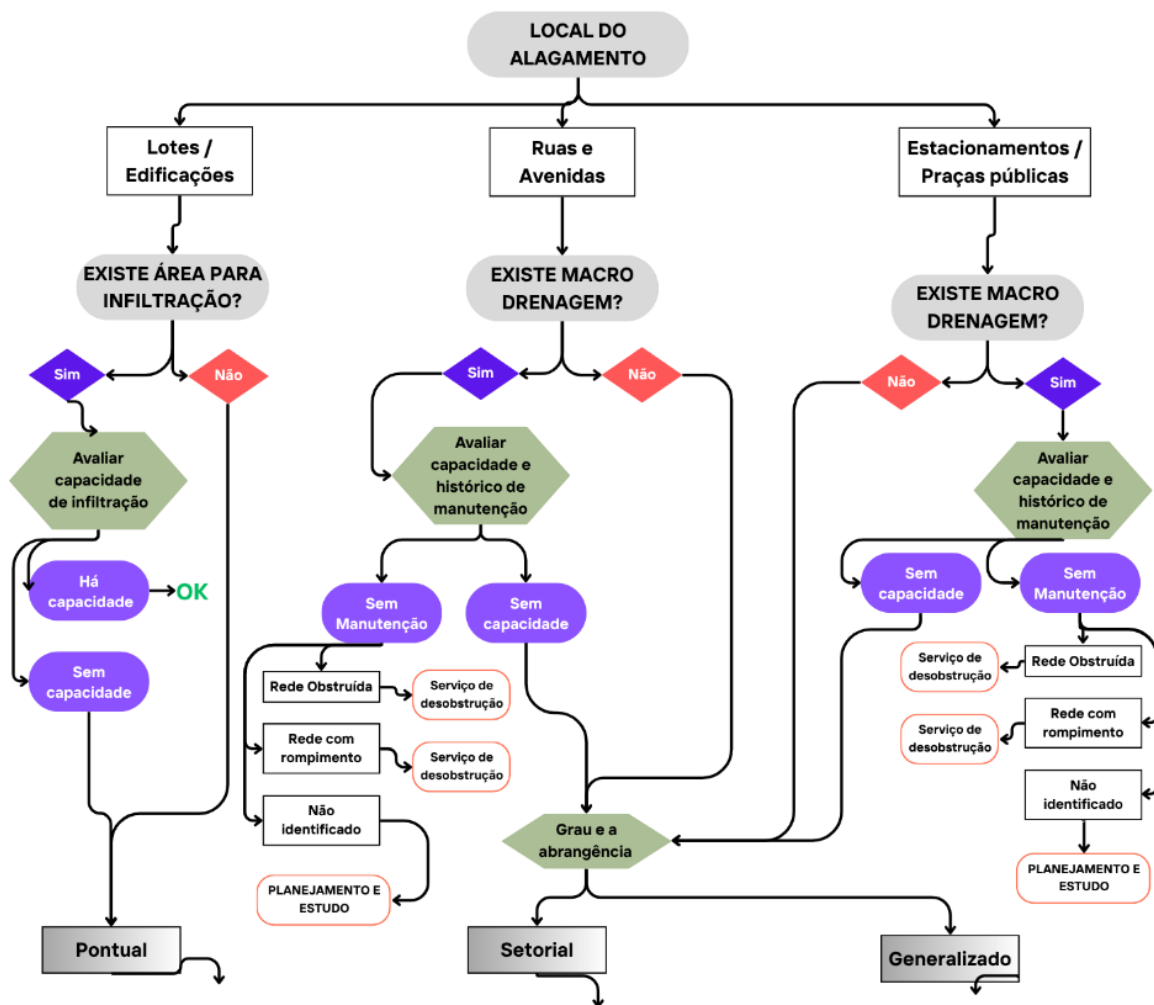
O próximo nível aborda a classificação do alagamento quanto à sua severidade e abrangência. Essa etapa distingue se a situação é pontual, afetando áreas restritas, setorial, atingindo quarteirões ou ruas inteiras, ou generalizada, quando compromete avenidas e grandes porções da bacia hidrográfica. A categorização é essencial para dimensionar a escala das intervenções necessárias, permitindo definir se a resposta será de caráter

localizado, com foco em manutenção e pequenas obras, ou se demandará soluções sistêmicas de maior porte, como reservatórios e lagoas de retenção.

Por fim, a consolidação dessas três etapas, identificação, diagnóstico e classificação, estrutura uma árvore decisória fundamentada na revisão sistemática, capaz de orientar de forma lógica e sequencial as escolhas de engenharia. Essa ferramenta não apenas facilita a priorização de investimentos e a seleção de técnicas adequadas, mas também oferece suporte à gestão integrada das ações de drenagem, permitindo adaptações conforme novas informações ou mudanças no padrão de ocupação e precipitação.

Na (figura 11), é possível verificar o fluxo de trabalho e a rota de decisão, que têm como ponto final técnicas para mitigação de alagamentos, de acordo com suas características originárias.

Figura 11 - Árvore decisória



- Jardins de chuva (Reis & Ilha, 2014; Melo et al., 2014).
- Pavimentos permeáveis (Silva & Cabral, 2014; Garrido Neto et al., 2019).
- Telhados verdes (Vieira et al., 2015).
- Reservatórios de lote (Dorlivete, 2020).
- Trincheiras de infiltração e poços (Gestão da Drenagem Urbana, 2011).

ITENS PARA AVALIAR ANTES DA IMPLANTAÇÃO

- Pavimentação (pavimentada / não pavimentada).
- Permeabilidade (alta / baixa).
- Topografia (plana / declivosa).
- Zona urbana (residencial / comercial).
- Custo de Implantação
- Duração de alagamento sobre a via.

- Bacias de detenção e retenção (Campana et al., 2007; Canholi, 2015).
- Biovaletas e canteiros pluviais (Campos, 2021).
- Valas de infiltração e microbacias de contenção (Tucci et al., 1995).

- Ampliação/requalificação de galerias pluviais (Gesec, 2023).
- Bueiros inteligentes e monitoramento em tempo real (Gesec, 2023).
- Lagoas de retenção associadas a parques urbanos (Campos, 2021).
- Planos Diretores de Drenagem Urbana (PDDU) (Mayarafa, 2019).
- Modelagem hidrológica para cenários futuros (Cruz & Tucci, 2008; Jambo, 2017).
- Educação ambiental e controle do uso do solo (Tucci et al., 1995).
- Drenagem sensível à água (WSUD) (Jambo, 2017).

5.3 Aplicativo Alagou

Como parte da abordagem integrada proposta neste trabalho, foi desenvolvido o aplicativo móvel ALAGOU, com o objetivo de aprimorar a identificação, o registro e o monitoramento de pontos de alagamento em áreas urbanas. A ferramenta foi concebida como um canal de comunicação direta entre a população, os órgãos de segurança pública e a gestão municipal, permitindo a coleta de informações em tempo quase real e a formação de uma base de dados georreferenciada sobre eventos de alagamento. Dessa forma, o aplicativo contribui para reduzir a subnotificação de ocorrências, qualificar o diagnóstico das áreas críticas e apoiar a priorização de intervenções em drenagem urbana.

A estrutura do ALAGOU organiza-se em diferentes perfis de uso e conjuntos de telas, voltados a funções específicas no fluxo de informação. Para o cidadão, o aplicativo disponibiliza módulos de cadastro e login, registro de ocorrências com envio de fotos e localização, consulta a histórico de envios e visualização de um mapa com os pontos de alagamento já reportados. Para os agentes vinculados a órgãos de segurança pública, há uma interface dedicada à emissão de avisos e alertas à população. Já o administrador do sistema dispõe de um ambiente próprio para validação das informações recebidas, acompanhamento dos registros e extração do banco de dados consolidado.

As Figuras 12 a 19 apresentam, de forma sequencial, as principais telas do aplicativo e suas funcionalidades associadas, contemplando o fluxo desde o acesso inicial do usuário até a etapa de administração e gestão dos dados. A partir dessas interfaces, é possível compreender como o ALAGOU operacionaliza, na prática, a proposta de monitoramento participativo dos alagamentos, transformando os relatos da população em informações sistematizadas que podem subsidiar o planejamento da drenagem urbana, a elaboração de mapas temáticos e a construção de indicadores de monitoramento do risco hidrológico.

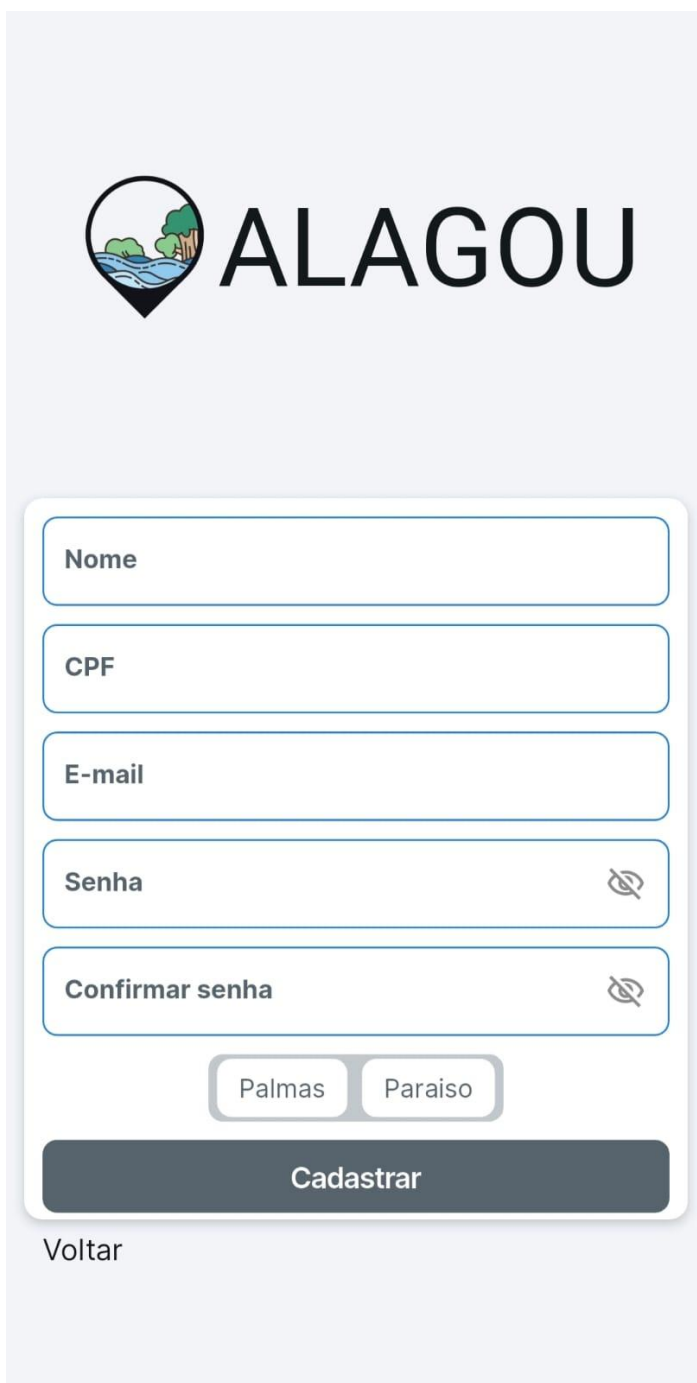
Figura 12 - Tela inicial



A tela inicial do sistema ALAGOU apresenta o logotipo da marca no topo esquerdo, seguido pelo nome 'ALAGOU' em uma fonte grande e preta. Abaixo, há um formulário de login contendo dois campos de entrada: 'E-mail' e 'Senha'. O campo de senha possui um ícone de olho desativado para alternar a visibilidade. Um botão 'Entrar' em um fundo escuro está posicionado abaixo dos campos. Na base direita do formulário, há um link 'Criar uma conta'.

Tela de login: Permite o login do usuário preenchendo informações cadastradas, caso seja o primeiro acesso é possível criar uma conta através dessa primeira tela, sendo direcionado para tela de cadastro ao clicar em criar uma conta.

Figura 13 - Tela de cadastro



A tela de cadastro do sistema ALAGOU apresenta o seguinte layout:

- Logo do sistema ALAGOU, com um ícone de paisagem (montanhas, rio e árvores) dentro de um círculo.
- Formulário de cadastro com os seguintes campos de entrada:
 - Nome
 - CPF
 - E-mail
 - Senha (com ícone de olho desativado para ocultar o texto)
 - Confirmar senha (com ícone de olho desativado para ocultar o texto)
- Seleção de cidade com botões para "Palmas" e "Paraiso".
- Botão principal "Cadastrar" em um fundo escuro.
- Botão "Voltar" localizado abaixo do formulário.

Tela de cadastro: Permite o cadastro do usuário preenchendo informações como cadastro de pessoa física, e-mail, senha e cidades o qual irá reportar as informações de alagamento.

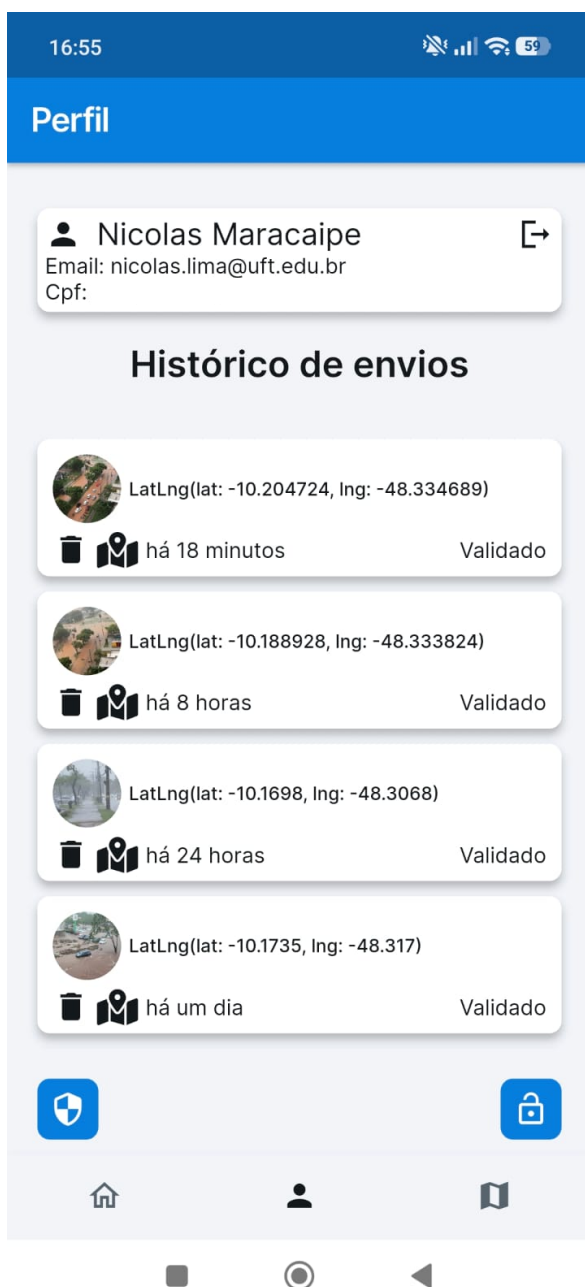
Figura 14 - Tela de registro de informações.



Tela de envio / registro de fotos: Permite o ao usuário inserir foto do ponto de alagamento, além de visualizar alertas emitidos por órgãos de segurança pública e a previsão do clima e tempo para o dia.

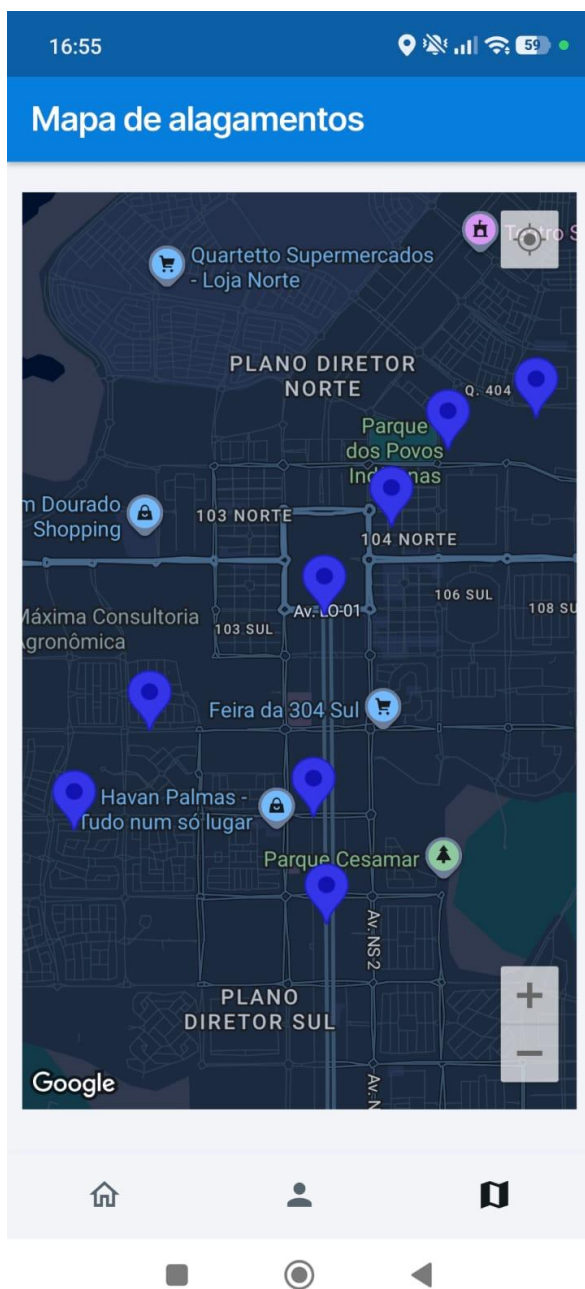
É possível ainda nessa tela, clicar nos ícones abaixo e ser redirecionado para visão mapa e históricos de envios.

Figura 15 - Tela de histórico



Tela de histórico: O usuário consegue visualizar todos os pontos enviados por ele, e verificar se sua informação foi validada ou não pelo administrador do sistema.

Figura 16 - Tela mapa de alagamentos.



Tela visualização do Mapa: Permite ao usuário verificar pontos de alagamentos na sua cidade e traçar nova rota ou evitar ir de encontro com zonas alagadas.

Fonte: Autor, 2025

Figura 17 - Tela de avisos



Fonte: Autor, 2025

Tela de Avisos: Permite o ao usuário tipo AGENTE, que pode ser qualquer colaborador das formas de segurança pública em informar a população de ocorrências de alagamentos localidades da cidade.

Figura 18 - Tela de Administrador



Tela Administrador: Permite o usuário verificar e validar os pontos de alagamentos enviados pela população.

Fonte: Autor, 2025

Figura 19 - Tela de administração do sistema.

The screenshot shows a web interface for system administration. At the top, there is a search filter dropdown menu with the text 'Coleção' and a list of options: '/coordenadas', '/Users', '/avisos', and '/coordenadas'. Below the dropdown is a 'Limite' field set to '100' and a button 'Adicionar à consulta'. The main area displays 'Resultados da consulta' with a table of data. The table has columns: 'document ID', 'aprovado', 'coordenada', 'cpf', 'created_at', 'foto', 'iduser', and 'nome'. There are five rows of data, each representing a user record with their coordinates, CPF, creation date, photo URL, user ID, and name.

document ID	aprovado	coordenada	cpf	created_at	foto	iduser	nome
wwlGeVulRA6z7LJ	true	[10.1737926° S, 48.8878894° W]	098.144.481-41	30 de junho de 2025 às 09:36:34 UTC-3	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/aula2-362e9.firebaseio.com/app/o/users%2F30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2%2Fuploads%2F1751286988486027.jpg?alt=media&token=468b673e-04e1-40a4-bbe1-755e8806480f	TbAdw7LDwdbfQE0zg1h5vsqGG.JH2	Luanna Silva Sousa
CefBYMVMK03LzYI	true	[10.1737743° S, 48.8879221° W]	05035576175	30 de junho de 2025 às 08:50:46 UTC-3	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/aula2-362e9.firebaseio.com/app/o/users%2F30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2%2Fuploads%2F1751284240359124.jpg?alt=media&token=09df66d6-9205-402a-8acf-6e8b0c64126e	30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2	Lucas maracaipe
0dSmJeiO4qcLKM1	false	[10.1737914° S, 48.8879584° W]	05035576175	30 de junho de 2025 às 09:40:34 UTC-3	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/aula2-362e9.firebaseio.com/app/o/users%2F30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2%2Fuploads%2F1751287228903404.jpg?alt=media&token=d0f3a9f7-17a8-48b9-807b-aaee9398068c	30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2	Lucas maracaipe
fdlewrLwbwinf1kh	true	[10.1738466° S, 48.8879178° W]	05035576175	30 de junho de 2025 às 10:00:09 UTC-3	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/aula2-362e9.firebaseio.com/app/o/users%2F30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2%2Fuploads%2F1751288403598389.jpg?alt=media&token=93777072-ad31-4d0c-933e-0ef939fcb8e8	30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2	Lucas maracaipe
FTEPm5JCIHyepbR	true	[10.1713828° S, 48.9032734° W]	05035576175	30 de junho de 2025 às 03:40:12 UTC-3	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/aula2-362e9.firebaseio.com/app/o/users%2F30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2%2Fuploads%2F1751265608493847.jpg?alt=media&token=7895926c-599d-46cf-815e-4418b0badaf	30nirtWAOUQscxXEYNUiPFBMrv2	Lucas maracaipe

Fonte: Autor, 2025

Por meio da interface de administração do aplicativo, torna-se viável a extração integral do banco de dados, alimentado diretamente pelos usuários. As informações obtidas configuram-se como insumos fundamentais para a formulação de planos de ação, definição de critérios de priorização territorial — com suporte na elaboração de mapas temáticos e na quantificação de ocorrências por localidade —, bem como para a construção de indicadores de monitoramento. A tabela exportada contém, entre outros campos, as coordenadas geográficas, identificação do registro, nome e CPF do usuário, além do link para a imagem submetida. A estrutura da referida tabela é apresentada a seguir.

Tabela 3 - Estrutura de exportação de dados.

Document ID	aprovado	coordenada	cpf	created_at	foto	iduser	nome
Identificação do documento	SIM ou Não	[10.1714457° S, 48.9032199° W]	"xxx35576xxx"	Data de criação do objeto	Link foto	Id do usuário	Nome do usuário

Fonte: Autor, 2025

6 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida propôs uma abordagem integrada para mitigação de alagamentos urbanos em Palmas-TO, articulando mapeamento sistemático do estado da arte, elaboração de modelo decisório e aplicação de ferramenta tecnológica para monitoramento de ocorrências. A análise evidenciou que o aumento das áreas impermeabilizadas e a ausência de dimensionamento prévio compatível com o crescimento populacional têm sido determinantes na sobrecarga dos sistemas de macrodrenagem existentes, configurando um cenário de recorrência de alagamentos em áreas críticas do município.

O mapeamento conduzido pela revisão sistemática possibilitou identificar um conjunto de dispositivos e soluções não convencionais que, quando aplicados de forma combinada com a infraestrutura tradicional, apresentam potencial para reorganizar o balanço hidrológico urbano. Técnicas como trincheiras de infiltração, reservatórios de lote, jardins de chuva e pavimentos permeáveis foram caracterizadas quanto aos mecanismos de retenção e infiltração, tempos de resposta e adequação a diferentes tipologias de uso e ocupação do solo. Observou-se que a eficiência hidráulica dessas medidas depende da interação entre parâmetros edáficos, topográficos e pluviométricos, reforçando a necessidade de integração entre diagnóstico hidrológico e planejamento urbano.

A estruturação da árvore decisória consolidou critérios técnicos e espaciais para orientar a escolha das medidas mitigadoras, considerando variáveis como tipo de local afetado, severidade do evento e existência de sistemas de drenagem pré-instalados. Este instrumento organiza de forma hierarquizada os caminhos de decisão, permitindo a avaliação objetiva de alternativas e a priorização de intervenções em função da escala do impacto e da capacidade de resposta da rede existente. A adoção desse modelo, quando incorporada a planos diretores de drenagem, pode contribuir para reduzir incertezas no processo decisório e otimizar recursos destinados às ações corretivas e preventivas.

O desenvolvimento do aplicativo ALAGOU demonstrou a viabilidade técnica do uso de tecnologias móveis para captação e transmissão de dados georreferenciados em tempo real. A arquitetura baseada no framework Flutter e linguagem Dart viabilizou integração multiplataforma e baixo custo de manutenção, ao mesmo tempo em que permitiu o delineamento de diferentes níveis de acesso e validação das informações. Cabe ressaltar que o aplicativo se encontra em versão beta, característica que demanda monitoramento e

ajustes contínuos. Aplicativos possuem natureza dinâmica, e o uso diário por diferentes perfis de usuários tem potencial para revelar necessidades operacionais e funcionais que subsidiem avanços gradativos da ferramenta e incorporação de melhorias futuras.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do aplicativo de forma contínua e intensiva, de modo que a base de dados oriunda das interações com usuários possa subsidiar ajustes e aprimoramentos no modelo decisório e no planejamento sistêmico da drenagem urbana. A utilização prolongada do sistema permitirá observar padrões de comportamento hidrológico, validar cenários simulados e incorporar feedbacks operacionais para otimização das estratégias de mitigação.

Os resultados indicam que a combinação entre soluções estruturais convencionais, medidas compensatórias descentralizadas e ferramentas de monitoramento participativo constitui uma alternativa técnica consistente para mitigação de alagamentos urbanos. A aplicação desta abordagem em Palmas-TO reforça a importância de integrar diagnóstico ambiental, modelagem hidráulica e tecnologias de informação no planejamento da drenagem urbana, possibilitando maior eficiência na alocação de recursos e na gestão dos riscos hidrológicos associados à urbanização.

Em síntese, os principais resultados advindos desta pesquisa concentram-se na sistematização e disponibilização de dados referentes aos pontos de alagamento, obtidos por meio da participação ativa da população no processo de coleta. Tais informações constituem insumos essenciais para a construção de indicadores e para a definição de critérios de priorização das áreas que demandam intervenções, as quais foram delineadas a partir da árvore decisória e das evidências obtidas na revisão sistemática. Ademais, a análise espacial desses dados possibilitará a elaboração de mapas de calor e outras cartas-imagem, proporcionando uma compreensão acurada da distribuição e da intensidade dos eventos de alagamento e contribuindo para o embasamento técnico das estratégias de mitigação propostas.

REFERÊNCIAS

AFZAL, Suhail et al. Modeling impact of urban flash floods on power distribution system using Monte Carlo technique and reinforcement learning. **Ain Shams Engineering Journal**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447925000668>. Acesso em: 04 jan. 2024.

AGOSTINHO, Mariele de Souza Parra; POLETO, Cristiano. SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA: DISPOSITIVOS. **Holos Environment**, 2012.

AKHTAR, Mohammad Nadeem et al. Porous asphalt pavement design by incorporating recycled coarse aggregate for sustainable urban drainage: An experimental study. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024019947>. Acesso em: 07 jan. 2024.

ALZAATITI, Fouadi; HALWANI, Jalal; SOLIMAN, Mohamed R. Climate change impacts on flood risks in the Abou Ali River Basin, Lebanon: A hydrological modeling approach. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025002725>. Acesso em: 23 jan. 2024.

ARAVENA, J. E.; DUSSAILLANT, A. Storm-Water Infiltration and Focused Recharge Modeling With Finite-Volume Two-Dimensional Richards Equation: application to an experimental rain garden. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 12, p. 1073-1080, 2009.

ASADI, Sara et al. Comparison and integration of physical and interpretable AI-driven models for rainfall-runoff simulation. **Results in Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024013033>. Acesso em: 21 jan. 2024.

ASLANTAS, Betul et al. Flood risk assessment for Mulde River catchment transferring data from an observed meteorological flood event. **Results in Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024012842>. Acesso em: 29 jan. 2024.

BATTEMARCO, Bruna Peres et al. Sistemas de espaços livres e drenagem urbana. **Paisagem e Ambiente**, 2018.

BEZERRA, José Francisco. **Solo: substrato da vida**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2006. Disponível em: http://www2.uefs.br/geotropicos/solo_substrato_da_vida_22917.pdf. Acesso em: 11 fev. 2024.

BEZERRA, Maria do Carmo de Lima et al. Simulação de técnicas de infraestrutura verde de drenagem urbana para captação do escoamento superficial. **Revista Tecnologia e**

Sociedade, 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/9430>. Acesso em: 03 fev. 2024.

BOTELHO, Manuel Henrique Campos. **Águas de chuva: engenharia das águas pluviais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

CAMPANA, Néstor; BERNARDES, Ricardo Silveira. Qualidade do escoamento na rede de drenagem pluvial urbana: a situação de Brasília-DF. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 2010. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Sumarios/76/0b2b3597c0d3c254050c7d89c31846ee_0a5d6e2acf06f843969561a739c2796b.pdf. Acesso em: 25 fev. 2024.

CAMPOS, V. N. O. Soluções baseadas na natureza e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluídas em ambientes rígidos. **Revista LABVERDE**, v. 11, n. 1, e189314, 2021. DOI: 10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189314.

CAMPOS, Valéria Nagy de Oliveira. Soluções baseadas na natureza (SbN) e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluídas em ambientes rígidos. **Revista LABVERDE**, v. 11, n. 1, e189314, 2021. DOI: 10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189314. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/189314/178434>. Acesso em: 04 fev. 2024.

CANHOLI, Aluísio P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751813/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CARNEIRO RANGEL, Larissa et al. Levantamento das abordagens de modelagem matemática ou modelagem computacional para o estudo e avaliação de mitigação de inundações em áreas urbanas. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, 2021. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/16316/14563>. Acesso em: 02 mar. 2024.

CARVALHO, Karollyne Oliveira de. **Drenagem pluvial urbana convencional x sustentável: estudo de caso nos bairros Baraúna e Centenário – Feira de Santana – Bahia**.

CASTRO, Leandro Nunes de; FERRARI, Daniel Gomes. **Introdução à mineração de dados: conceitos básicos, algoritmos e aplicações**. São Paulo: Saraiva, 2016.

CAUDURO, Flávia; FRANÇA, Eduardo Fregulia. RESUMO DE TCC: O desenvolvimento da drenagem sustentável de uma avenida. **Mix Sustentável**, 2019. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3732/2881>. Acesso em: 06 mar. 2024.

CHRISTOFIDIS, Demétrios et al. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/sdeb/2019.v43nspe3/94-108/>. Acesso em: 13 fev. 2024.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**, 8., 2011, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre, 2011. p. 1-12.

CONSERVA, Catia Dos Santos et al. Olhares sobre a drenagem em Brasília: expansão urbana e infraestrutura socioecológica na Serrinha do Paranoá, DF. **Mix Sustentável**, 2019. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3547/2726>. Acesso em: 03 mar. 2024.

CORDEIRO, Juni et al. Sistemas de drenagem urbana e o saneamento: uma análise cienciométrica. **Research Society and Development**, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/9616/8598>. Acesso em: 27 fev. 2024.

CRUZ, M.; TUCCI, C. E. M. Avaliação de cenários de planejamento na drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 27-39, 2008.

CRUZ-ÁVILA, Mauricio {De la} et al. Numerical three-dimensional forecasting of a river section under abnormal discharge conditions due to a tropical storm: A case study on Santa Catarina River, México. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025011429>. Acesso em: 30 jan. 2024.

DECINA, M.; BRANDÃO, L. Aplicação de modelos hidrológicos no planejamento urbano. **Caderno de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 205-214, 2016.

DEFESA CIVIL (Rio Grande do Sul). **Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 24/4**. Porto Alegre: Portal do Estado do Rio Grande do Sul, 25 abr. 2025. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-24-4>. Acesso em: 11 jun. 2025.

DHARMARATHNE, Gangani et al. Adapting cities to the surge: A comprehensive review of climate-induced urban flooding. **Results in Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024003773>. Acesso em: 18 jan. 2024.

DIAS, Luanna Costa et al. Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil. **Research Society and Development**, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/6790/6083>. Acesso em: 02 fev. 2024.

DORLIVETE. Drenagem urbana e controle de inundações: estudo de caso em Teresina. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, e213997102, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.7102.

ESLAMIAN, Saeid; SABZEVARI, Yaser; FARIZI, Elnaz. Sensitivity analysis of flood frequency on choice of data threshold limit. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025020006>. Acesso em: 28 jan. 2024.

ESSAMLALI, Ismail; NHAILA, Hasna; EL KHAILI, Mohamed. A new architecture of Low Impact Development (LID)-based stormwater management system through Internet of Things (IoT) and Machine Learning integration. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424003360>. Acesso em: 13 jan. 2024.

FARID, Mohammad et al. Probabilistic urban flood risk assessment of multi-sectoral economic losses due to levee overtopping. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025023321>. Acesso em: 19 jan. 2024.

FERREIRA SILVA, J. A. Modelagem hidrológica aplicada ao WSUD no planejamento urbano. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 160-172, 2018.

GARCÍA-ÁVILA, Fernando et al. Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas. **Results in Engineering**, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023002803>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GARRIDO NETO, J. et al. **Título do artigo**. [S.l.]: [s.n.], [ano]. Disponível em: . Acesso em: 4 ago. 2025.

GESEC. Gestão municipal de drenagem e manejo de águas pluviais: avaliação dos impactos decorrentes da urbanização na Cidade Nova, Ilhéus-BA. **Revista Gestão e Secretariado**, São Paulo, v. 14, n. 6, p. 9968-9997, 2023.

GESTÃO DA DRENAGEM URBANA DA FORMULAÇÃO À IMPLEMENTAÇÃO. **REGA – Revista de Gestão Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 5-18, jan./jun. 2011.

GONÇALVES, Luan Serafim Mendes; TEIXEIRA, Bernardo Arantes do Nascimento. Eventos de chuva característicos: metodologia adaptada e aplicada a poços de infiltração na cidade de São Carlos–SP. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 2021. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Sumarios/223/8473f4f605588d1e37b511f2dc2d0ee0_7d9be79daba3ab0041c44cb0a70e408a.pdf. Acesso em: 05 mar. 2024.

GORNIAK, Adilson; MARIMON, Maria Paula Casagrande. RESUMO DE DISSERTAÇÃO: avaliação de método de controle do escoamento superficial para a

drenagem urbana sustentável na bacia do Rio Itapocu/SC. **Mix Sustentável**, 2020. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3771/3150>. Acesso em: 07 mar. 2024.

HAN, J.; KAMBER, M. **Data mining: concepts and techniques**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2000.

HOU, Qinghe et al. A cellular automata coupled multi-objective optimization framework for blue-green infrastructure spatial allocation. **Water Research X**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589914725000866>. Acesso em: 09 jan. 2024.

HUANG, Zhenyu et al. Dimensions of superiority: How deep reinforcement learning excels in urban drainage system real-time control. **Water Research X**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S258991472500012X>. Acesso em: 02 jan. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2022: 87 % da população brasileira vive em áreas urbanas**. Agência de Notícias IBGE, Rio de Janeiro, 14 nov. 2024. Disponível em: <...>. Acesso em: 11 jun. 2025.

INFANT, Shofia Saghya et al. Explainable artificial intelligence for sustainable urban water systems engineering. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302500430X>. Acesso em: 26 jan. 2024.

ISMA, Faiz et al. Flood hazard assessment in Kuala Langsa village, Langsa city, Aceh Province-Indonesia. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266601642400255X>. Acesso em: 01 jan. 2024.

JAMBO, C. R. Urbanismo sensível à água: fundamentos e aplicações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 45-59, 2017.

JODHANI, Keval H. et al. Unravelling flood risk in the Rel River watershed, Gujarat using coupled earth observations, multi criteria decision making and Google Earth Engine. **Results in Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024010910>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KLOCK, A. C. T. Mapeamentos e revisões sistemáticos da literatura: um guia teórico e prático. **Revista Cadernos de Informática**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/2vL2ubJ>. Acesso em: 10 fev. 2024.

LAI, Sai Hin et al. Optimal design of subsurface conveyance system based bio-ecological drainage system simulation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824000473>. Acesso em: 03 jan. 2024.

LIMA, A. Z. da S.; CARNEIRO, C. R. de O.; FURTADO, L. G. et al. Tecnologia e meio ambiente: levantamento de aplicativos móveis voltados a temas ambientais. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 68090–68105, set. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n9-299. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/16564>. Acesso em: 16 jun. 2025.

LI, Junqi et al. Urban spatial, engineering and management resilience capacity enhancement from a flood safety perspective. **Water-Energy Nexus**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588912524000122>. Acesso em: 12 jan. 2024.

LINS-DE-BARROS, Flavia Moraes; MUEHE, Dieter. Avaliação local da vulnerabilidade e riscos de inundação na zona costeira da Região dos Lagos, Rio de Janeiro. **Quaternary and Environmental Geosciences**, 2010. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/14106/13837>. Acesso em: 22 fev. 2024.

LIPPERA, Maria Chiara et al. Spatial-economic scenarios to increase resilience to urban flooding. **Water Research X**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589914724000744>. Acesso em: 16 jan. 2024.

LU, Quang-Oai et al. Evaluating the impact of roof rainwater harvesting on hydrological connectivity and urban flood mitigation. **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025001100>. Acesso em: 08 jan. 2024.

MACHADO, Silvestre Sales et al. Planejamento e regulação dos sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas em municípios mineiros da bacia hidrográfica do Rio Mucuri. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 2023. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/3184/880>. Acesso em: 26 fev. 2024.

MATUS, C. **Política, planejamento e governo**. Brasília: IPEA, 1989.

MAYARAFÁ, A. L. Planejamento de drenagem urbana e percepção dos gestores municipais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 642-653, 2019.

MEDEIROS, Claudione Fernandes de; AFONSO, Sônia. Espaços livres públicos: utilização de infraestrutura verde para otimizar a drenagem urbana nos centros históricos tombados. **Paisagem e Ambiente**, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/paam/article/view/111593/135150>. Acesso em: 11 fev. 2024.

MELO, R. et al. **Título do artigo**. [S.l.]: [s.n.], [ano]. Disponível em: . Acesso em: 4 ago. 2025.

MELO, T. A. T. **Jardim de chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. 2011. Dissertação (Mestrado em [Área de Concentração, a ser completado]) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MENDONÇA, Eduardo Concesso; SOUZA, Marco Antônio Almeida de. Uma metodologia multiobjetivo e multicritério para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem urbana. **Ingeniería del agua**, 2019. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/1e61646f-0c97-4901-ab6a-fbc4a91829a3/download>. Acesso em: 10 fev. 2024.

MEURER. **Fundamentação de química do solo: introdução ao estudo dos solos**. Porto Alegre: Evangraf, 2012.

MIGUEZ, Marcelo. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. [S.l.]: Grupo GEN, 2015. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155695/>. Acesso em: 9 mai. 2024.

MOHAMMED, Maryam Hassan; ZWAIN, Haider M.; HASSAN, Waqed Hamed. Modeling the impacts of climate change and flooding on sanitary sewage system using SWMM simulation: A case study. **Results in Engineering**, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123021001080>. Acesso em: 27 jan. 2024.

MONTEIRO, P. R.; MENDES, Thiago Augusto. Avaliação e diagnóstico de sistema de drenagem urbana consolidado. **Research Society and Development**, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/download/6516/6067>. Acesso em: 09 fev. 2024.

MORAIS, Myllena Silva de F. et al. **Fundamentos de desenvolvimento mobile**. Porto Alegre: SAGAH, 2022. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556903057/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

NANDA, Abd Rakhim et al. A bibliometric analysis of trends in rainfall-runoff modeling techniques for urban flood mitigation (2005–2024). **Results in Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025010035>. Acesso em: 20 jan. 2024.

NETO, Ethel Geraldo Canabrava et al. Telhado verde: alternativa sustentável para a drenagem do escoamento superficial. **MIX Sustentável**, 2021. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4338/3581>. Acesso em: 05 fev. 2024.

NOGUEIRA; NOGUEIRA. **Ciências ambientais para engenharia: definição e classificação de impactos ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ORTIZ, Sebastián; BARROS BARRETO, Paula de; CASTIER, Marcelo. Rainwater harvesting for domestic applications: The case of Asunción, Paraguay. **Results in Engineering**, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022003085>. Acesso em: 31 jan. 2024.

PEI, Shengwei et al. Leveraging LSTM-based neuro-evolution for enhanced real-time control in urban drainage systems. **Water Research X**, 2025. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589914725000520>. Acesso em: 11 jan. 2024.

PHILIPPI Jr., A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri: Manoele, 2005. (Coleção Ambiental; 2).

PONTES, Maissa Ludymilla Carvalho et al. Dinâmica das áreas de várzea do município de Belém/PA e a influência da precipitação pluviométrica na formação de pontos alagamentos / Dynamics of lowland areas in the city of Belém/PA and the influence of rainfall in the flooding points formation. **Caderno de Geografia**, 2017. Disponível em: <https://observatoriodageografia.uepg.br/files/original/a6da40a4d6dd4553055340f848e0de0e8a16304e.pdf>. Acesso em: 29 fev. 2024.

REIS, W.; ILHA, P. **Título do artigo**. [S.l.]: [s.n.], [ano]. Disponível em. Acesso em: 4 ago. 2025.

RODRIGUES, Nathalia Moreira et al. A falta de drenagem urbana nas cidades brasileiras. **Research Society and Development**, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/download/29652/25494/337947>. Acesso em: 20 fev. 2024.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007. Disponível em: <https://bit.ly/2rsTbJa>. Acesso em: 25 ago. 2024.

SANTOS, Flávio Augusto Altieri dos; ROCHA, Edson José Paulino da. Alagamento e inundação em áreas urbanas. Estudo de caso: Cidade de Belém. **Revista Geoamazonia**, 2013. Disponível em: https://periodicos.ufpa.br/index.php/geoamazonia/article/download/12352/pdf_8. Acesso em: 23 fev. 2024.

SILVA, Flaviana Gomes Alves Da et al. Análise temporal da ocupação do espaço urbano em área de vulnerabilidade física e ambiental: estudo de caso no bairro da Macaxeira, Recife-PE. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 2023. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/3219/914>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SILVA, Gerani F. N.; HORA, Karla Emmanuela Ribeiro. O plano diretor municipal e sua interface com a drenagem urbana. **Revista LABVERDE**, 2013. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/81090/84734>. Acesso em: 08 fev. 2024.

SILVA, Marcos Antônio Barbosa da et al. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 2020. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/3025/482483731>. Acesso em: 06 fev. 2024.

SILVEIRA, Samuel João da; OLIVEIRA, Francisco Henrique de; SCHUCH, Fernanda Simoni. Minimum green area in sustainable allotments according to the hydrologic cycle. **Arquiteturarevista**, 2020. Disponível em:

<https://revistas.unisinos.br/index.php/arquitetura/article/view/arq.2020.161.02/60747464>. Acesso em: 04 mar. 2024.

SINGH, Prerna et al. Case study of flood risk and vulnerability in the city of Atlanta – A social, economic, technical, and institutional perspective. **Resilient Cities and Structures**, 2025. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772741625000092>. Acesso em: 15 jan. 2024.

SONI, Lubaina et al. Challenges and considerations of applying nature-based solutions for future mega-cities: Implications for Karachi as a Sponge City. **Human Settlements and Sustainability**, 2025. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S3050607725000030>. Acesso em: 05 jan. 2024.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges de. Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, 2013. Disponível em:

<https://scholar.google.com/scholar?q=GEST%C3%83O%20DA%20DRENAGEM%20URBANA%20NO%20BRASIL%3A%20DESAFIOS%20PARA%20A%20SUSTENTABILIDADE%20Vladimir%20Caramori>. Acesso em: 21 fev. 2024.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges de; MORAES, Luiz Roberto Santos; BORJA, Patrícia Campos. Déficit na drenagem urbana: buscando o entendimento e contribuindo para a definição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7213/6416>. Acesso em: 16 fev. 2024.

SUNG, JangYong et al. Method for setting flash flood risk criteria in unmeasured areas using the relationship between flood damage risk occurrence characteristics according to topographical characteristics. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798825004726>. Acesso em: 10 jan. 2024.

TASCA, Fabiane Andressa et al. O papel da drenagem urbana na prevenção de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Itajaí Açu. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2017. Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44036/23287>. Acesso em: 12 fev. 2024.

TASCA, Fabiane Andressa; POMPÊO, César Augusto; FINOTTI, Alexandra Rodrigues. Evolução da gestão da drenagem urbana na bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, 2018. Disponível em:

<https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/10240/pdf>. Acesso em: 01 fev. 2024.

TEIXEIRA, Geovane da Silva et al. Metodologias para caracterização e avaliação de sistemas de drenagem urbana: uma revisão. **Research Society and Development**, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/3063/2216>. Acesso em: 19 fev. 2024.

TEIXEIRA, Giovany Frossard et al. **Fundamentos de Flutter e Dart para desenvolvimento de apps móveis**. Vitória: Edifes, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4670>. Acesso em: 15 jun. 2025.

TEIXEIRA, Niel Nascimento; ARAÚJO, Alisson Victor Souza. Gestão municipal de drenagem e manejo de águas pluviais: avaliação dos impactos decorrentes da urbanização na Cidade Nova, Ilhéus-BA. **Revista de Gestão e Secretariado**, 2023. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2351/1264>. Acesso em: 17 fev. 2024.

TOBIAS, Michele et al. Análise do aproveitamento de água da chuva para fins não potáveis em praça municipal de Concórdia, Santa Catarina. **GeSec: Revista de Gestão e Secretariado**, 2023. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/1954/979>. Acesso em: 01 mar. 2024.

TOCANTINS (Estado). **Palmas: a última capital planejada do século XX**. [S.l.]: [s.n.], [2024]. Disponível em: <https://www.to.gov.br/secom/noticias/palmas-a-ultima-capital-planejada-do-seculo-xx/32ns8z0jgh7p>. Acesso em: 30 jun. 2024.

TUCCI, C. E. M. et al. Princípios e diretrizes para a drenagem urbana moderna. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. p. 277-347.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do impacto da urbanização. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. p. 277-347.

TUCCI, Carlos E. M. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 2004. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Revistas/162/22980ad19886ea6a2524272a099d90c5_985d8c7bb44cfaead3b9bf79178164c8.pdf. Acesso em: 18 fev. 2024.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão das inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2005.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/SfqYWrhrvtxkxybFsjYQtx7v/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 fev. 2024.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. In: TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap. 2, p. 11-44.

UN-HABITAT. **World cities report 2022: envisaging the future of cities** [recurso eletrônico]. Nairobi: UN-Habitat, 2022. Disponível em: <https://unhabitat.org/wcr>. Acesso em: 25 nov. 2025. PreventionWeb

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **World fertility 2024** [recurso eletrônico]. New York: United Nations, 2025. Disponível

em:

https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/un_desa_pd_2025_wfr_2024_final.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.

URBONAS, B.; STAHRÉ, P. **Storm water best management practices and detention**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

VILLANUEVA, Adolfo et al. Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 2011. Disponível em: <https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=888>. Acesso em: 07 fev. 2024.

YANG, Wenyu et al. Integrated risk analysis for urban flooding under changing climates. **Results in Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302401497X>. Acesso em: 22 jan. 2024.

ZOYSA, Sanjana De et al. Development of intensity-duration-frequency curves for Sri Lanka using satellite-based precipitation products – Understanding environmental conditions and concerns. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424001075>. Acesso em: 17 jan. 2024.

APÊNDICE

Tabela 4 - Base de dados e artigos utilizados em etapa de revisão sistemática.

Título	Autor	Local de publicação	Ano	Local de Busca
Flood hazard assessment in Kuala Langsa village, Langsa city, Aceh Province-Indonesia	Faiz Isma and M.S. Badri Kusuma and E Oktariyanto Nugroho and M Bagus Adityawan	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	2024	Scienccdirect
Dimensions of superiority: How deep reinforcement learning excels in urban drainage system real-time control	Zhenyu Huang and Yiming Wang and Xin Dong	Water Research X	2025	Scienccdirect
Optimal Design of Subsurface Conveyance System Based Bio-Ecological Drainage System Simulation	Sai Hin Lai and Ren Jie Chin and Eugene Zhen Xiang Soo and Lloyd Ling and Hamed Benisi Ghadim	KSCE Journal of Civil Engineering	2024	Scienccdirect
Modeling impact of urban flash floods on power distribution system using Monte Carlo technique and reinforcement learning	Suhail Afzal and Hazlie Mokhlis and Hazlee Azil Illias and Abdullah Akram Bajwa and Hasmaini Mohamad and Nurulafiqah Nadzirah Mansor and Lilik Jamilatul Awaln and A.K. Ramasamy	Ain Shams Engineering Journal	2025	Scienccdirect
Challenges and considerations of applying nature-based solutions for future mega-cities: Implications for Karachi as a Sponge City	Lubaina Soni and Asifa Iqbal and Faseeha Waheed and Ayesha Agha Shah and Naji Akbar	Human Settlements and Sustainability	2025	Scienccdirect
Compound flood effects, challenges and solutions: Lessons toward climate-resilient Chinese coastal cities	Faith Ka Shun Chan and Xiaohui Lu and Jianfeng Li and Yangchen Lai and Ming Luo and Yongqin David Chen and Donghai Wang and Nan Li and Wei-Qiang Chen and Yong-Guan Zhu and Hing Kai Chan	Ocean & Coastal Management	2024	Scienccdirect
Porous asphalt pavement design by incorporating recycled coarse aggregate for sustainable urban drainage: An experimental study	Mohammad Nadeem Akhtar and Omar Albatayneh and Jan Nisar Akhtar and Suhana Koting	Results in Engineering	2025	Scienccdirect
Evaluating the impact of roof rainwater harvesting on hydrological connectivity and urban flood mitigation	Quang-Oai Lu and Reza Bahramloo and Jesús Rodrigo-Comino and Jun Wang and Ali Talebi and Quynh Thi Phuong Tran and Afshin Ghahramani and Mehdi Sepehri	Results in Engineering	2025	Scienccdirect
A cellular automata coupled multi-objective optimization framework for blue-green infrastructure spatial allocation	Qinghe Hou and Hanwen Xu and Mingkun Xie and Pingjia Luo and Yuning Cheng	Water Research X	2025	Scienccdirect
Method for setting flash flood risk criteria in unmeasured areas using the relationship between flood damage risk occurrence characteristics according to topographical characteristics	JangYong Sung and Seokhwan Hwang and Jungsoo Yoon and Narae Kang and Hyun Deok Kim	KSCE Journal of Civil Engineering	2025	Scienccdirect
Leveraging LSTM-based neuro-evolution for enhanced real-time control in urban drainage systems	Shengwei Pei and Lan Hoang and David Butler and Guangtao Fu	Water Research X	2025	Scienccdirect
Urban spatial, engineering and management resilience capacity	Junqi Li and Yue Zou and Jing Li and Shuai Si	Water-Energy Nexus	2024	Scienccdirect

enhancement from a flood safety perspective

A new architecture of Low Impact Development (LID)-based stormwater management system through Internet of Things (IoT) and Machine Learning integration	Ismail Essamlali and Hasna Nhaila and Mohamed {El Khaili}	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	2024	Sciedirect
Spatial diversion and coordination of flood water for an urban flood control project in Suzhou, China	Yu Xu and You-peng Xu and Qiang Wang and Yue-feng Wang and Chao Gao	Water Science and Engineering	2024	Sciedirect
Case study of flood risk and vulnerability in the city of Atlanta – A social, economic, technical, and institutional perspective	Perna Singh and Adjo Amekudzi-Kennedy and Baabak Ashuri and Ty Parrillo and Derek Rizzi and Russell Clark and Brian Woodall and Heejun Chang	Resilient Cities and Structures	2025	Sciedirect
Spatial-economic scenarios to increase resilience to urban flooding	Maria Chiara Lippera and Ganbaatar Khurelbaatar and Daneish Despot and Gislain Lipeme Kouyi and Anacleto Rizzo and Jan Friesen	Water Research X	2025	Sciedirect
Development of intensity-duration-frequency curves for Sri Lanka using satellite-based precipitation products – Understanding environmental conditions and concerns	Sanjana De Zoysa and Jeewanthi Sirisena and Helani Perera and Shalinda Fernando and Miyuru Gunathilake and Upaka Rathnayake	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	2024	Sciedirect
Adapting cities to the surge: A comprehensive review of climate-induced urban flooding	Gangani Dharmarathne and A.O. Waduge and Madhusa Bogahawaththa and Upaka Rathnayake and D.P.P. Meddage	Results in Engineering	2024	Sciedirect
Probabilistic urban flood risk assessment of multi-sectoral economic losses due to levee overtopping	Mohammad Farid and Nadira Tsamara Dewi and Mohammad Bagus Adityawan and Eka Oktariyanto Nugroho and Abdul Kadir Alhamid and Ahmad Nur Wahid and Yeremia Immanuel Sihombing	Results in Engineering	2025	Sciedirect
A bibliometric analysis of trends in rainfall-runoff modeling techniques for urban flood mitigation (2005–2024)	Abd Rakhim Nanda and Nurnawaty and Amrullah Mansida and Hartono Bancong	Results in Engineering	2025	Sciedirect
Comparison and integration of physical and interpretable AI-driven models for rainfall-runoff simulation	Sara Asadi and Patricia Jimeno-Sáez and Adrián López-Ballesteros and Javier Senent-Aparicio	Results in Engineering	2024	Sciedirect
Integrated risk analysis for urban flooding under changing climates	Wenyu Yang and Ziyong Zhao and Liping Pan and Ruifei Li and Shixue Wu and Pei Hua and Haijun Wang and Britta Schmalz and Peter Krebs and Jin Zhang	Results in Engineering	2024	Sciedirect
Climate change impacts on flood risks in the Abou Ali River Basin, Lebanon: A hydrological modeling approach	Fouadi AlZaatiti and Jalal Halwani and Mohamed R. Soliman	Results in Engineering	2025	Sciedirect
Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas	Fernando García-Ávila and Marcelo Guanoquiza-Suárez and Joseline Guzmán-Galarza and Rita Cabello-Torres and Lorgio Valdiviezo-Gonzales	Results in Engineering	2023	Sciedirect
Unravelling flood risk in the Rel River watershed, Gujarat using coupled earth observations, multi criteria decision making and Google Earth Engine	Keval H. Jodhani and Dhruvesh Patel and N. Madhavan and Nitesh Gupta and Sudhir Kumar Singh and Upaka Rathnayake	Results in Engineering	2024	Sciedirect
Explainable artificial intelligence for sustainable urban water systems engineering	Shofia Saghya Infant and Sundaram Vickram and A Saravanan and C M	Results in Engineering	2025	Sciedirect

{Mathan Muthu} and Devarajan
Yuarajan

Modeling the impacts of climate change and flooding on sanitary sewage system using SWMM simulation: A case study	Maryam Hassan Mohammed and Haider M. Zwain and Waqed Hammed Hassan	Results in Engineering	2021	Sciencedirect
Sensitivity analysis of flood frequency on choice of data threshold limit	Saeid Eslamian and Yaser Sabzevari and Elnaz Farizi	Results in Engineering	2025	Sciencedirect
Flood risk assessment for Mulde River catchment transferring data from an observed meteorological flood event	Betul Aslantas and Verena Maleska and Laura V. Alvarez and Sherifdeen Olamilekan Babalola	Results in Engineering	2024	Sciencedirect
Numerical three-dimensional forecasting of a river section under abnormal discharge conditions due to a tropical storm: A case study on Santa Catarina River, México	Mauricio {De la Cruz-Ávila} and Francisco J. Castillo-Guerrero and Hector Barrios-Pina and Rosanna Bonasia	Results in Engineering	2025	Sciencedirect
Rainwater harvesting for domestic applications: The case of Asunción, Paraguay	Sebastián Ortiz and Paula {de Barros Barreto} and Marcelo Castier	Results in Engineering	2022	Sciencedirect
Evolução da Gestão da Drenagem Urbana na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu	Fabiane Andressa Tasca, César Augusto Pompêo, Alexandra Rodrigues Finotti	Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade	2018	CAPES Periodicos
Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil	Luanna Costa Dias, A. Valente, Lindemberg Lima Fernandes	Research Society and Development	2020	CAPES Periodicos
Simulação de técnicas de infraestrutura verde de drenagem urbana para captação do escoamento superficial	Maria do Carmo de Lima Bezerra, Aline da Nóbrega Oliveira, Maria Elisa Leite Costa, Sérgio Koide	Revista Tecnologia e Sociedade	2020	CAPES Periodicos
Soluções baseadas na natureza (SbN) e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluídas em ambientes rígidos	Valéria Nagy de Oliveira Campos	Revista LABVERDE	2021	CAPES Periodicos
TELHADO VERDE: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A DRENAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	Ethel Geraldo Canabrava Neto, Aleska Kaufmann Almeida, Izabel Rodrigues Leite, José Antonio Guarienti, Isabel Kaufmann de Almeida	MIX Sustentável	2021	CAPES Periodicos
Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE	Marcos Antônio Barbosa da Silva, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, G. C. Neto, Pedro Oliveira da Silva, Carlos Maurício Fonseca Guerra, Simone Rosa da Silva	Journal of Environmental Analysis and Progress	2020	CAPES Periodicos
Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação	Adolfo Villanueva, Rutinéia Tassi, Daniel Allasia, DANIELA BEMFICA, CARLOS TUCCI	Revista de Gestão de Água da América Latina	2011	CAPES Periodicos
O PLANO DIRETOR MUNICIPAL E SUA INTERFACE COM A DRENAGEM URBANA	Gerani F. N. Silva, Karla Emmanuela Ribeiro Hora	Revista LABVERDE	2013	CAPES Periodicos
Avaliação e diagnóstico de sistema de drenagem urbana consolidado	P.R. Monteiro, Thiago Augusto Mendes	Research Society and Development	2020	CAPES Periodicos

Uma metodologia multiobjetivo e multicritério para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem urbana	Eduardo Concesso Mendonça, Marco Antônio Almeida de Souza	Ingeniería del agua	2019	CAPES Periodicos
Espaços livres públicos: utilização de infraestrutura verde para otimizar a drenagem urbana nos centros históricos tombados	Claudione Fernandes de Medeiros, Sônia Afonso	Paisagem e Ambiente	2017	CAPES Periodicos
O PAPEL DA DRENAGEM URBANA NA PREVENÇÃO DE DESASTRES HIDROLÓGICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ AÇU	Fabiane Andressa Tasca, Alexandra Rodrigues Finotti, César Augusto Pompêo, Roberto Fabris Goerl	Revista Brasileira de Cartografia	2017	CAPES Periodicos
A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza	Demétrios Christofidis, Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes Assumpção, Débora Cynamon Kligerman	Saúde em Debate	2019	CAPES Periodicos
Sistemas de espaços livres e drenagem urbana	Bruna Peres Battemarco, Lilian Marie Tenório Yamamoto, Aline Pires Veról, Andréa Queiroz Rêgo, Virgínia Maria Nogueira de Vasconcellos, Marcelo Gomes Miguez	Paisagem e Ambiente	2018	CAPES Periodicos
SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA: DISPOSITIVOS	Mariele de Souza Parra Agostinho, Cristiano Poletto	Holos Environment	2012	CAPES Periodicos
DÉFICIT NA DRENAGEM URBANA: BUSCANDO O ENTENDIMENTO E CONTRIBUINDO PARA A DEFINIÇÃO	Vladimir Caramori Borges de Souza, Luiz Roberto Santos Moraes, Patrícia Campos Borja	Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais	2013	CAPES Periodicos
Gestão municipal de drenagem e manejo de águas pluviais: avaliação dos impactos decorrentes da urbanização na Cidade Nova, Ilhéus-BA	Niel Nascimento Teixeira, Alisson Victor Souza Araújo	Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)	2023	CAPES Periodicos
Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil	CARLOS TUCCI	Revista de Gestão de Água da América Latina	2004	CAPES Periodicos
Metodologias para Caracterização e Avaliação de Sistemas de Drenagem urbana: uma revisão	Geovane da Silva Teixeira, Rodrigo Silvano Silva Rodrigues, Diêgo Lima Crispim, Lindemberg Lima Fernandes, Germana Menescal Bittencourt	Research Society and Development	2020	CAPES Periodicos
A falta de drenagem urbana nas cidades brasileiras	Nathalia Moreira Rodrigues, Carlos Eduardo Ferreira Rodrigues, Camila Ribeiro Rodrigues	Research Society and Development	2022	CAPES Periodicos
GESTÃO DA DRENAGEM URBANA NO BRASIL: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE	Vladimir Caramori Borges de Souza	Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais	2013	CAPES Periodicos
Avaliação local da vulnerabilidade e riscos de inundação na zona costeira da Região dos Lagos, Rio de Janeiro	Flavia Moraes Lins-de-Barros, Dieter Muehe	Quaternary and Environmental Geosciences	2010	CAPES Periodicos
Alagamento e Inundação em Áreas Urbanas. Estudo de Caso: Cidade de Belém	Flávio Augusto Altieri dos Santos, Edson José Paulino da Rocha	Revista Geoamazônia	2013	CAPES Periodicos
ANÁLISE TEMPORAL DA OCUPAÇÃO DO ESPAÇO URBANO EM ÁREA DE VULNERABILIDADE FÍSICA E AMBIENTAL: ESTUDO DE	Flaviana Gomes Alves Da Silva, Kalinny Patrícia Vaz Lafayette, Rayane Gabriella Pereira da Silva Silva	Revista de Gestão Social e Ambiental	2023	CAPES Periodicos

CASO NO BAIRRO DA MACAXEIRA, RECIFE-PE				
Qualidade do escoamento na rede de drenagem pluvial urbana: a situação de Brasília-DF	Néstor Campana, Ricardo Silveira Bernardes	Revista de Gestão de Água da América Latina	2010	CAPES Periodicos
PLANEJAMENTO E REGULAÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS EM MUNICÍPIOS MINEIROS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUCURI	Silvestre Sales Machado, Ciro Meneses Santos, Márcio Coutinho de Souza, João César de Souza Ferreira	Revista de Gestão Social e Ambiental	2023	CAPES Periodicos
Sistemas de drenagem urbana e o saneamento: uma análise cienciométrica Dinâmica das áreas de várzea do município de Belém/PA e a influência da precipitação pluviométrica na formação de pontos alagamentos / Dynamics of lowland areas in the city of Belém/PA and the influence of rainfall in the flooding points formation	Juni Cordeiro, Fábio Henrique Silva, Felipe Angelo Neves Campera, Flávio Luiz Costa	Research Society and Development	2020	CAPES Periodicos
Análise do aproveitamento de água da chuva para fins não potáveis em praça municipal de concórdia, Santa Catarina	Tobias, Michele and Zini, Patrícia Aparecida and Mores, Rúbia and Schuck, Aline	GeSec : Revista de Gestão e Secretariado	2023	CAPES Periodicos
Levantamento das abordagens de modelagem matemática ou modelagem computacional para o estudo e avaliação de mitigação de inundações em áreas urbanas	Carneiro Rangel, Larissa and Lugon Junior, Jader and Rambaldi Telles, Wagner and Vasconcelos Silva, Simone and José da Silva Neto, Antônio	Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego	2021	CAPES Periodicos
Olhares sobre a Drenagem em Brasília: Expansão Urbana e Infraestrutura SOCIOecológica na Serrinha do Paranoá, DF	Conserva, Catia Dos Santos and Andrade, Liza Maria Souza de and Sant'Ana, Daniel and Carvalho, Daniela Junqueira and Costa, Maria Elisa Leite and Koide, Sergio	Mix sustentável	2019	CAPES Periodicos
MINIMUM GREEN AREA IN SUSTAINABLE ALLOTMENTS ACCORDING TO THE HYDROLOGIC CYCLE	Samuel João da Silveira and de Oliveira, Francisco Henrique and Fernanda Simoni Schuch	Arquiteturarevista	2020	CAPES Periodicos
Eventos de Chuva Característicos: metodologia adaptada e aplicada a poços de infiltração na cidade de São Carlos-SP	Luan Serafim Mendes Gonçalves and Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira	Revista de Gestão de Água da América Latina	2021	CAPES Periodicos
RESUMO DE TCC: O DESENVOLVIMENTO DA DRENAGEM SUSTENTÁVEL DE UMA AVENIDA	Cauduro, Flávia and França, Eduardo Fregulia	Mix sustentável	2019	CAPES Periodicos
RESUMO DE DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE MÉTODO DE CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA A DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL NA BACIA DO RIO ITAPOCU/SC	Gorniack, Adilson and Marimon, Maria Paula Casagrande	Mix sustentável	2020	CAPES Periodicos