UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NA FAIXA 1-2 NORTE EM BRASÍLIA/DF

ISABELLE MONTEIRO TOUSSAINT

ORIENTADOR: ARTHUR TAVARES SCHLEICHER

COORIENTADORA: MARIA ELISA LEITE COSTA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL 2

BRASÍLIA/DF: ABRIL/2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NA FAIXA 1-2 NORTE EM BRASÍLIA/DF

ISABELLE MONTEIRO TOUSSAINT

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

_____

ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, MSc. (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)

_____

MARIA ELISA LEITE COSTA, PHD (ANA)
(COORIENTADORA)

_____

LEONARDO ZANDONADI MOURA, MSc. (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

BRUNO ESTEVES TÁVORA, PHD (MPDFT)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 10 DE ABRIL DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

TOUSSAINT, ISABELLE MONTEIRO
ESTUDO DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NA FAIXA 1-2 NORTE EM BRASÍLIA/DF. [Distrito Federal] 2023.

xv, 79 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2023)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem Urbana	2. Alagamentos
3. Modelagem	4. PCSWMM
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TOUSSAINT, I.M. (2023). *Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na Faixa 1-2 Norte em Brasília/DF*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Isabelle Monteiro Toussaint
TÍTULO: Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na Faixa 1-2 Norte em Brasília/DF.
GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Isabelle Monteiro Toussaint
isabellemtoussaint@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me abençoar, cuidar e proteger, estando comigo e me ajudando em todos os momentos da vida.

Aos meus pais, Aylis e Ivan, por investirem na minha educação e proporcionarem oportunidades maravilhosas. Ao meu irmão André por toda cumplicidade e por sempre deixar os momentos mais leves. Agradeço aos três por todo amor, apoio, ajuda e incentivo mesmo nos momentos mais difíceis, sem eles nada seria possível.

Aos meus avós e ao restante da minha família por mesmo de longe torcerem e se alegrarem com cada conquista.

Às minhas amigas Bianca e Júlia por todos os momentos compartilhados nesses anos de graduação e por sempre estenderem a mão quando precisei. O suporte dado por elas e a união formada tornaram com que essa etapa fosse mais leve, comemorando juntas cada obstáculo superado.

À minha amiga Gabriela por me ajudar a rodar as simulações no PCSWMM e por ter paciência ao tirar cada dúvida que eu tinha.

Ao meu orientador e professor, Arthur Schleicher, pelos ensinamentos ao longo dos semestres e pela disponibilidade e paciência ao ajudar com esse trabalho. E à Maria Elisa, por ter aceitado ser minha coorientadora e pelos conselhos pertinentes durante a realização dessa monografia.

Aos professores da Universidade de Brasília, por todo conhecimento que puderam me passar durante a graduação, e a todos os funcionários que contribuíram para minha formação de alguma maneira, desde as escolas em que estudei até à UnB.

À CHI Water por conceder a licença de pesquisa do PCSWMM, sendo possível a realização das modelagens do trabalho.

RESUMO

O manejo inadequado de águas pluviais causa diversas consequências negativas no saneamento básico no Brasil. Essas dificuldades são cada vez mais recorrentes por conta do alto nível de urbanização que vem ocorrendo nos últimos tempos associado às mudanças climáticas. Ao substituir a vegetação natural do solo para impermeabilização de áreas urbanas, há uma redução da infiltração e um aumento do escoamento superficial, o que propicia a formação dos alagamentos mais a jusante das bacias. Para mitigar esse tipo de transtorno, são implementadas redes de micro e macrodrenagem, conhecidas também como drenagem convencional. Além disso, têm-se técnicas que visam controlar a água pluvial na fonte do escoamento, por meio da infiltração e amortecimento dos volumes de água escoado, sendo chamadas de medidas compensatórias da drenagem sustentável. No Distrito Federal, problemas relacionados à água da chuva são evidenciados por meio de alagamentos em muitas áreas. A Faixa 1-2 Norte, local de estudo do presente trabalho, fica localizada na Asa Norte, região na qual possui pontos que sofrem de alagamentos recorrentes. Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento da rede de drenagem atual na sub-bacia do Iate e a efetividade da galeria de reforço, proposta pelo Programa Drenar-DF, como medida de intervenção na área analisada. As avaliações foram realizadas pelo programa PCSWMM por meio de simulações hidráulico-hidrológicas para chuvas de projeto com tempos de retorno de 1, 2, 5 e 10 anos. A partir dos resultados obtidos, notou-se que a rede de drenagem atual da Faixa 1-2 Norte está subdimensionada, uma vez que na simulação com tempo de retorno de 1 ano, há sobrecarga de 8,06% dos poços de visita da rede. Para chuvas mais intensas, como ocorre na modelagem com tempo de retorno de 10 anos, 64,13% dos poços de visitas são alagados e permanecem nessa situação por um tempo médio de 9 min. A galeria de reforço sugerida pelo programa Drenar mostrou ser capaz de reduzir alguns dos problemas encontrados na rede de drenagem na região, diminuindo por exemplo o tempo médio de alagamento dos PVs. No entanto, tal galeria não é efetiva na eliminação total dos extravasamentos presentes, mostrando que tais obstáculos enfrentados não serão resolvidos apenas com essa medida, mesmo em chuvas mais amenas.

Palavras-chave: escoamento superficial, drenagem urbana, alagamentos, PCSWMM.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 3

2.1 OBJETIVO GERAL 3

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

3.1 ÁGUAS URBANAS E ESCOAMENTO SUPERFICIAL 4

3.1.1 Impactos da Urbanização 4

3.1.2 Gestão e Planejamento Urbano 8

3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM 9

3.2.1 Drenagem Convencional 11

3.2.2 Drenagem Sustentável 15

3.3 GESTÃO E PLANEJAMENTO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM NO DF 25

3.4 MODELOS COMPUTACIONAIS 27

3.4.1 SWMM 29

3.5 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 32

3.5.1 Projeto Drenar-DF 35

3.6 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 36

4 METODOLOGIA 39

4.1 ETAPAS DA METODOLOGIA 39

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 39

4.2.1 Hidrografia 40

4.2.2 Relevo 41

4.2.3 Tipo de Solo e seu Uso e Ocupação 43

4.2.4 Clima 45
4.2.5 Drenagem Urbana 46
4.3 CHUVA DE PROJETO 48
4.4 DESCRIÇÃO DE CENÁRIOS 50
4.5 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA NO PCSWMM 52
4.5.1 Divisão da área 52
4.5.2 Simulação na Modelagem 1D 53
4.5.3 Simulação na Modelagem 2D 53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 54
5.1 SIMULAÇÃO NA MODELAGEM 1D 54
5.2 SIMULAÇÃO NA MODELAGEM 2D 65
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Evolução da população urbana entre 1950 – 2070 (ONU, 2022, modificado) . 5

Figura 3.2 – Porcentagem da população brasileira que vive em área urbana, por Região (IBGE, 2015) 5

Figura 3.3 – Características do balanço hídrico em uma bacia urbana (OECD, 1986 apud Tucci e Mendes, 2006) 6

Figura 3.4 – Hidrograma de uma bacia natural e de uma bacia urbanizada (Tucci; 2005) ... 7

Figura 3.5 – Sistema clássico de microdrenagem (Baptista et al., 2005 apud Barbosa Junior, 2019) 12

Figura 3.6 – Configurações de sistemas unitários e separadores de águas pluviais e esgotos sanitários (Adasa, 2018) 14

Figura 3.7 – Esquema operacional dos serviços de saneamento e os impactos sobre o sistema de drenagem (Adasa, 2018) 15

Figura 3.8 – Tipologia de técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais (Righetto, 2009) 18

Figura 3.9 – Telhado verde 19

Figura 3.10 – Microrreservatório 20

Figura 3.11 – Poço de infiltração 21

Figura 3.12 –Trincheira de infiltração 22

Figura 3.13 – Vala de infiltração 23

Figura 3.14 – Pavimento permeável 24

Figura 3.15 – Bacias de detenção e retenção 25

Figura 3.16 – Situação da rede de drenagem no DF (SINESP/Novacap apud GDF, 2017, modificado) 27

Figura 3.17 – Fluxograma explicativo dos módulos do SWMM (Rossman e Huber, 2016 apud Barbosa Junior, 2019) 31

Figura 3.18 – Risco de alagamento no DF (GDF, 2017) 33

Figura 3.19 – Localização das bacias de contribuição do Projeto Drenar-DF (IPHAN, 2015) 35

Figura 3.20 – Alagamentos em áreas da Faixa 1-2 Norte (Metrópoles, 2021) 37

Figura 3.21 – Intervenções propostas no ano de 2015 pelo Projeto Drenar-DF na Faixa 1-2 Norte (IPHAN,2015) 38

Figura 3.22 – Intervenções propostas no ano de 2021 pelo Projeto Drenar-DF na Faixa 1-2 Norte (IPHAN,2015) 38

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas a serem concluídas na metodologia 39

Figura 4.2 – Delimitação da Faixa 1-2 Norte 40

Figura 4.3 – Hidrografia da área de estudo 41

Figura 4.4 – Hipsometria da área de estudo 42

Figura 4.5 – Declividade da área de estudo 42

Figura 4.6 – Pedologia da área de estudo 44

Figura 4.7 – Uso e Ocupação da área de estudo 44

Figura 4.8 – Precipitação na área de estudo 46

Figura 4.9 – Sistema de macrodrenagem na área de estudo (Terracap, 2021) 47

Figura 4.10 – Rede de drenagem na área de estudo – Cenário Base 48

Figura 4.11 – Curvas IDF de Brasília recomendada pelo PDDU para diferentes valores de TR 49

Figura 4.12 – Rede de drenagem na área + galeria de reforço proposta pelo Programa Drenar-DF 51

Figura 4.13 – Perfil principal da galeria de reforço proposta pelo Programa Drenar-DF ... 51

Figura 4.14 – Área de estudo dividida em sub-bacias 52

Figura 5.1 – Perfil dos mesmos condutos em simulações de chuvas diferentes para ambos os cenários 57

Figura 5.2 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 2 anos – Cenário Base 59

Figura 5.3 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 10 anos – Cenário Base 60

Figura 5.4 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 2 anos – Cenário Drenar-DF 61

Figura 5.5 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF 61

Figura 5.6 – Perfis de diferentes condutos e PVs que permanecem alagados no Cenário Drenar-DF em TR 10 anos 62

Figura 5.7 – Velocidade máxima da água nos condutos em TR 10 anos – Cenário Base... 64

Figura 5.8 – Velocidade máxima da água nos condutos em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF 64

Figura 5.9 – Célula que apresentou maior altura da lâmina d'água acumulada em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF 66

Figura 5.10 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 2 anos – Cenário Base 67

Figura 5.11 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 2 anos – Cenário Drenar-DF 67

Figura 5.12 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 10 anos – Cenário Base 68

Figura 5.13 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF..... 68

Figura 5.14 – Escoamento superficial no setor 1 em TR 10 anos – Cenário Base..... 69

Figura 5.15 – Escoamento superficial no setor 1 em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF 70

Figura 5.16 – Escoamento superficial no setor 2 em TR 10 anos – Cenário Base..... 70

Figura 5.17 – Escoamento superficial no setor 2 em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF 71

Figura 5.18 – Escoamento superficial no setor 3 em TR 10 anos – Cenário Base 71

Figura 5.19 – Escoamento superficial no setor 3 em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Picos das precipitações calculadas..... 50

Tabela 5.1 – Características da rede de drenagem em ambos os cenários 54

Tabela 5.2 – Vazão de saída da rede drenagem para as chuvas analisadas..... 54

Tabela 5.3 – Dados sobre o comportamento da rede de drenagem nas simulações das quatro chuvas em ambos os cenários..... 55

Tabela 5.4 – Porcentagem de PVs que alagam por determinado período 58

Tabela 5.5 – Porcentagem de PVs que se sobrecarregam por determinado período..... 58

Tabela 5.6 – Porcentagem de condutos que apresentam velocidade máxima entre os intervalos determinados..... 63

Tabela 5.7 – Dados sobre o comportamento do escoamento superficial nas simulações das chuvas de TR 2 e 10 anos, em ambos os cenários..... 65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (4.1)..... 48

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
Adasa	Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
BMPs	*Best Management Practices*
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CHI	*Computational Hydraulics International Water*
CN	Curva-Número
Curva IDF	Curva Intensidade-Duração-Frequência
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
GAP's	Galerias de Águas Pluviais
GDF	Governo do Distrito Federal
ha	Hectares
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Km	Quilômetros
Km^2	Quilômetros quadrados
L	Litros
LID	*Low Impact Development*
LIUDD	*Low Impact Urban Design and Development*
m	Metros
m^2	Metros quadrados
m^3	Metros cúbicos
m^3/s	Metros cúbicos por segundo
MDE	Modelo Digital de Elevação
Novacap	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
ONU	Organização das Nações Unidas
PCSWMM	*Personal Computer Storm Water Management Model*
PDDU	Plano Diretor de Drenagem Urbana

PDDU-DF	Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal
PV	Poço de visita
RA	Região Administrativa
s	Segundos
SCS	*Soil Conservation Service*
SUDS	*Sustainable Urban Drainage Systems*
SWMM	*Storm Water Management Model*
USACE	*U.S.Army Corps of Engineers*
USEPA	*United States Enviromental Protection Agency*
WSUD	*Water Sensitive Urban Design*

1 INTRODUÇÃO

Impactos ambientais causados pela crescente urbanização são cada vez mais perceptíveis em diversos países. Problemas como alagamentos e enchentes de diversas escalas afetam muitos conglomerados urbanos, uma vez que a substituição de vegetação natural por áreas impermeáveis desequilibra o ciclo hidrológico. A expansão das cidades aumenta o volume de água e a velocidade do escoamento superficial, dado que a capacidade de infiltração diminui à medida que a impermeabilização aumenta. A canalização e a redução da rugosidade também têm papel importante no aumento de volume d'água escoado superficialmente (Tucci e Mendes, 2006).

Desse modo, se faz necessário ter uma gestão e um planejamento urbano eficaz, visando compatibilizar os sistemas de drenagem com a minimização dos impactos mencionados anteriormente. A drenagem urbana brasileira, de um modo geral, busca remover as águas pluviais por meio da solução convencional, a qual transporta rapidamente a água da chuva através de canais direcionados a corpos hídricos à jusante (Souza, 2013).

Posto isso, o sistema de drenagem mais utilizado no Brasil é focado em solucionar problemas pontuais e, ao olhar a situação por meio de uma perspectiva mais abrangente, percebe-se que tais problemas são apenas transferidos para outra área da bacia hidrográfica (GDF, 2009).

Dessa forma, medidas que apliquem a sustentabilidade no serviço de drenagem se fazem necessárias, visto que priorizam o manejo e o controle das águas pluviais no próprio local em que a precipitação ocorre. Essas medidas podem ser chamadas de técnicas compensatórias e têm o intuito de diminuir a vazão encaminhada à rede de drenagem no período da chuva, seja por meio de uma retenção temporária ou aumentando as áreas permeáveis para que a água infiltre no solo.

Para planejar e analisar os problemas enfrentados na drenagem urbana, assim como a eficácia da implementação de técnicas compensatórias, podem ser utilizados modelos computacionais que simulam diferentes alternativas, tanto no contexto hidráulico quanto no hidrológico de determinado lugar. Visto que um dos objetivos das simulações é a prevenção de riscos futuros, faz-se com que seja fundamental a aquisição de dados coerentes com realidade, sejam eles relacionados às características físicas da região ou à dinâmica sofrida pela água no sistema de drenagem.

No Distrito Federal (DF), o sistema de drenagem urbano da Faixa 1-2 Norte, situada no bairro Asa Norte, possui diversos pontos críticos na questão de manejo e controle adequado das águas pluviais, o que provocou a necessidade de um projeto que atue na rede de drenagem existente e reduza os alagamentos gerados no período chuvoso. O Governo do Distrito Federal (GDF) propôs um projeto baseado em uma drenagem convencional, que visa a resolução dos problemas de alagamentos e enxurradas na área, conhecido como Projeto Drenar – DF.

Nesse contexto, este documento teve a finalidade de avaliar o sistema de drenagem já existente na Faixa 1-2 Norte e o projeto novo proposto para o local. Os diferentes cenários foram estudados e analisados por meio de simulações hidráulico-hidrológicas por meio do modelo computacional *Storm Water Management Model* (SWMM).

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 consiste na presente introdução. O Capítulo 2 apresenta os objetivos a serem alcançados com o estudo. O Capítulo 3 se refere à fundamentação teórica e à revisão bibliográfica, contendo conceitos e elementos relevantes para compreensão do tema. O Capítulo 4 contextualiza a situação da área de estudo e aborda a metodologia adotada para alcançar os resultados do segundo capítulo. O Capítulo 5 expõe os resultados obtidos por meio das simulações no *Personal Computer Storm Water Management Model* (PCSWMM), onde foi discutido tanto a situação da rede de drenagem atual na área de estudo quanto a proposta do Programa Drenar-DF. E por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões acerca do estudo feito na região e recomendações para futuros trabalhos no local e para outros trabalhos do mesmo escopo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar por meio de simulação hidráulica – hidrológica a rede de drenagem existente na Faixa1-2 da Asa Norte e a efetividade do "Projeto Executivo de Readequação de Drenagem da Faixa 1-2 Norte", proposto como solução do manejo de águas pluviais na sub-bacia do Iate Clube.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a rede de drenagem atual da Faixa 1-2 Norte a partir de simulações hidráulico-hidrológicas;

- Verificar o comportamento dos alagamentos e do escoamento superficial na área composta pela Faixa1-2 Norte através de simulações em 2D com chuvas de diferentes tempos de retorno;

- Avaliar a influência e os efeitos das medidas projetadas pelo Projeto Drenar-DF na área de estudo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUAS URBANAS E ESCOAMENTO SUPERFICIAL

3.1.1 Impactos da Urbanização

Impulsionada pelo fim da Segunda Guerra Mundial e pelo desenvolvimento da Guerra Fria no século XX, a industrialização impactou diretamente todos os setores que compõem uma sociedade, desde os econômicos e políticos aos ambientais e sociais. Posto isso, com a economia mudando de cenário, o êxodo rural se fez presente em diferentes países, o que ampliou de forma drástica a urbanização nesses lugares.

Em 1950, as áreas rurais ocupavam o primeiro lugar quando o assunto era onde as pessoas viviam, seguido pelas cidades pequenas com menor densidade e, por último, o terceiro lugar era ocupado pelas cidades maiores. Com o rápido crescimento da população mundial, em 1990 a ordem foi invertida, estando a maior parte das pessoas vivendo em cidades grandes e a menor parte em áreas rurais. No ano de 2020, 49% da população mundial viviam em cidades grandes, enquanto 29% estavam em cidades pequenas e 22% nas áreas rurais (ONU, 2022).

Durante a pandemia do vírus COVID-19, que teve seu início em 2020, o ritmo da urbanização foi desacelerado. Contudo, no ano de 2021, 56% do total global de habitantes eram encontrados em áreas urbanas, apontando que mais da metade da população do planeta havia se tornado urbana. Isso posto, a partir de estudos estatísticos, projeções apontam que até 2050 tal número sofrerá um acréscimo de 12% (ONU, 2022).

A Figura 3.1 apresenta os dados da Organização das Nações Unidas (ONU) da evolução da população urbana entre os anos de 1950 e 2070.

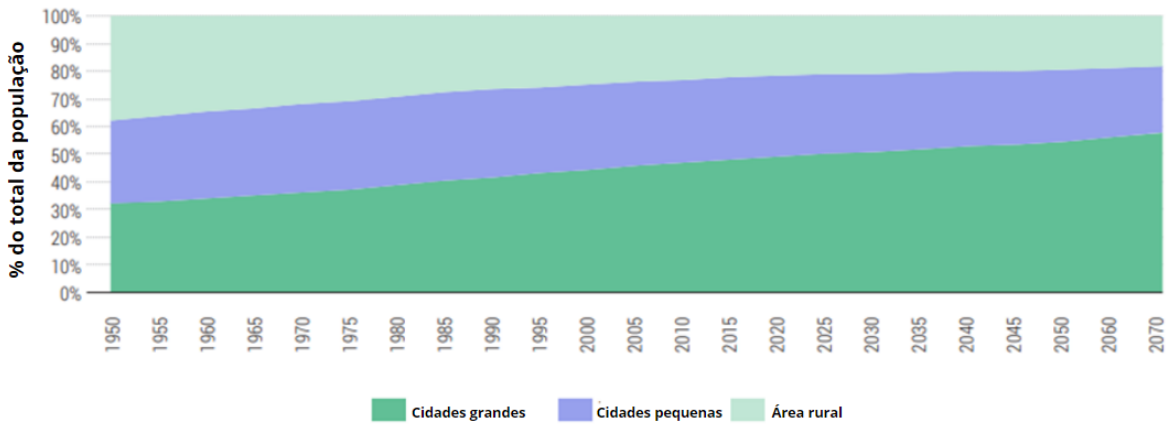


Figura 3.1 – Evolução da população urbana entre 1950 – 2070 (ONU, 2022, modificado)

No Brasil, a urbanização foi intensificada nas décadas de 1970 e 1980, devido a maiores oportunidades de trabalho nas cidades (IBGE, 2022). Tal processo, por ter ocorrido em grande escala, provocou o fenômeno da metropolização, descrito pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como a ocupação urbana que ultrapassa os limites das cidades.

A distribuição de pessoas nas áreas urbanas e rurais do país não é proporcional à distribuição mundial apresentada em parágrafos anteriores. Tal afirmação se deve pelo fato de que, no ano de 2015, 84,72% da população brasileira residiam em cidades, enquanto 15,28% viviam no campo (IBGE, 2015). A divisão da população urbana nas regiões do Brasil em 2015 pode ser visualizada na Figura 3.2.

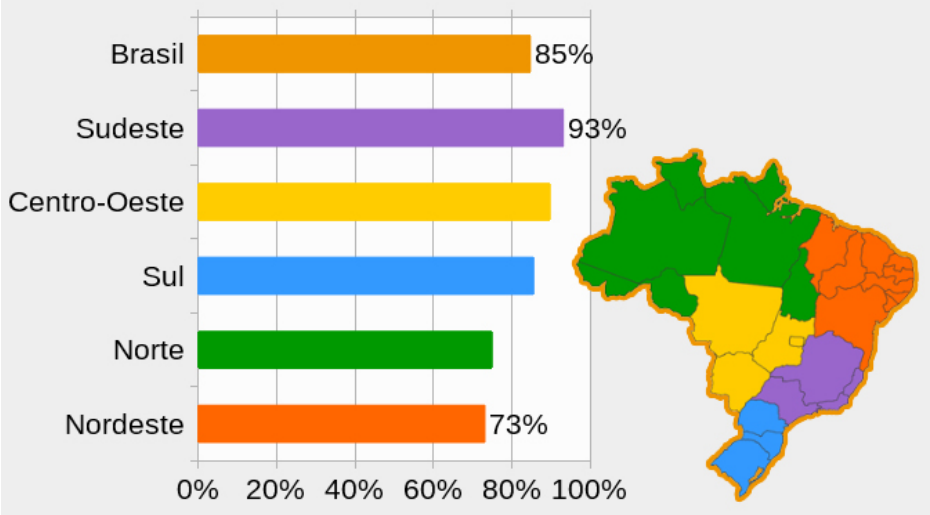


Figura 3.2 – Porcentagem da população brasileira que vive em área urbana, por Região (IBGE, 2015)

À vista disso, com o crescimento populacional urbano demandando cada vez mais espaço, zonas periféricas e ocupações irregulares passam a ser parte da realidade urbana. Pela falta de controle e planejamento em tais áreas, a exploração ambiental tornou-se cada vez mais nítida, com a disputa pelos recursos naturais e perda de parte da biodiversidade, a urbanização provoca intensos impactos no meio ambiente.

A retirada da vegetação natural para ampliação das áreas urbanas prejudica a infiltração da água da chuva e, por consequência, o seu escoamento sub-superficial. Com a substituição de áreas verdes permeáveis por áreas pavimentavas, que impedem a precipitação de penetrar no solo, alagamentos e enchentes começam a integrar parte dos problemas relacionados à infraestrutura de drenagem.

Tucci e Mendes (2006) mencionam quatro principais alterações que o desenvolvimento urbano provoca no ciclo hidrológico:

1. Redução da infiltração no solo;
2. Aumento do volume e do escoamento superficial, devido a impermeabilização do solo e da construção de condutos pluviais. Dessa forma, tanto o tempo de deslocamento quanto a vazão máxima são alterados;
3. Rebaixamento do lençol freático e consequente redução do escoamento de base, visto que a quantidade de água da chuva que entra nos aquíferos diminui;
4. Redução da evapotranspiração, uma vez que há diminuição de cobertura vegetal.

A Figura 3.3 apresenta o impacto que o balanço hídrico sofre quando a vegetação é substituída por superfície impermeável.

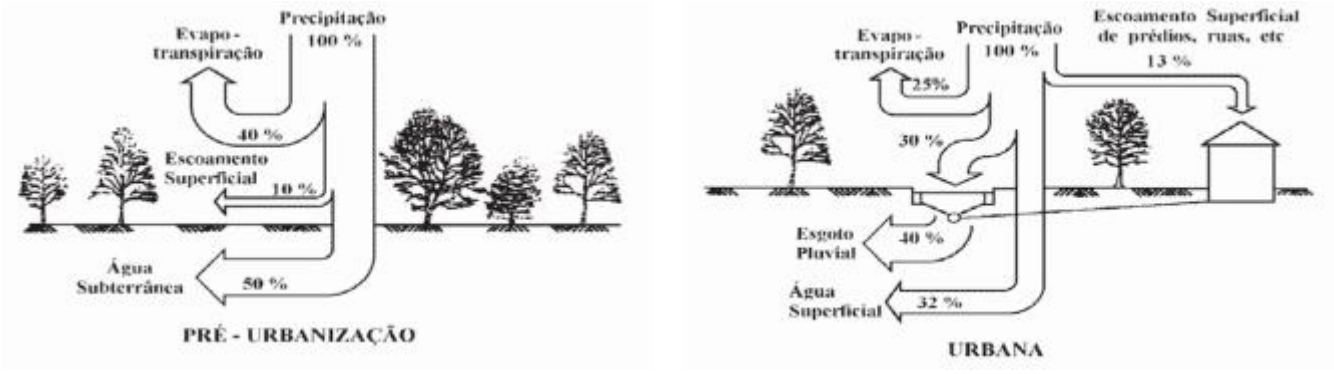


Figura 3.3 – Características do balanço hídrico em uma bacia urbana (OECD, 1986 *apud* Tucci e Mendes, 2006)

Outros impactos causados pela urbanização são o aumento da erosão, em virtude do aumento da energia da velocidade do escoamento superficial, e a deterioração da qualidade da água, em razão dos poluentes transportados por: sedimentos, resíduos sólidos da população e contaminação aérea da produção industrial e das emissões do transporte urbano. Como diversas vezes a água está poluída pela falta de tratamento do esgoto sanitário que é despejado no corpo hídrico, os efeitos causados embora sejam detectados, carregam a dificuldade de identificar as suas fontes de poluição, dessa forma, são chamados de poluição difusa (Tucci, 2016).

Com o auxílio de um hidrograma, a Figura 3.4 traz uma análise dos efeitos hidrológicos em uma bacia. Dessa maneira, é possível perceber que quando a bacia não possui as condições naturais originais, a vazão de águas pluviais aumenta, consideravelmente, em um menor período de tempo. Com um maior volume de água sendo direcionado ao escoamento superficial, uma vez que as superfícies impermeáveis não permitem infiltração, percebe-se que há o risco de que grandes enchentes aconteçam em regiões urbanizadas.

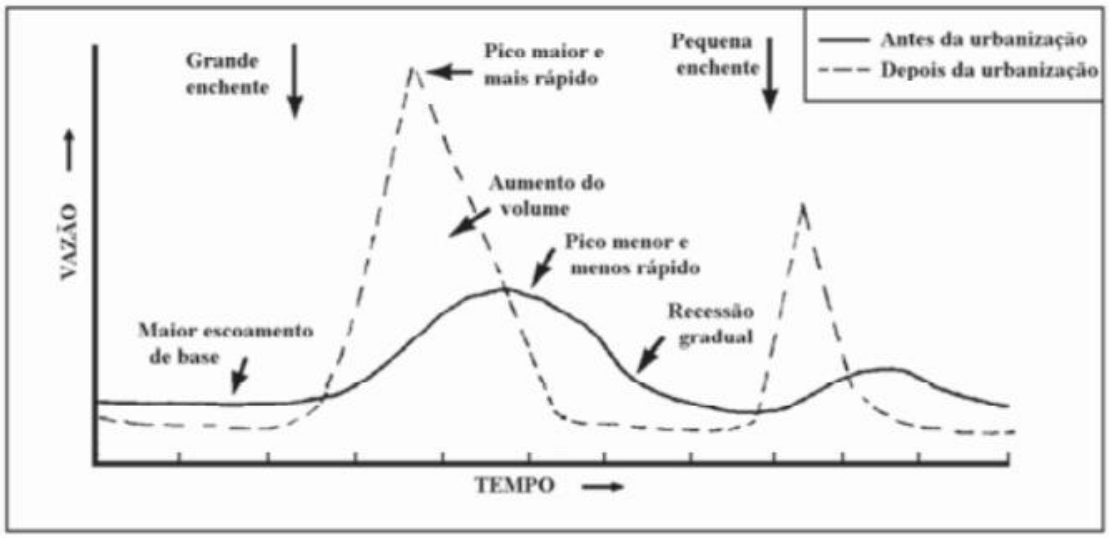


Figura 3.4 – Hidrograma de uma bacia natural e de uma bacia urbanizada (Tucci; 2005)

Isso posto, é possível dizer que os efeitos finais da diminuição da infiltração e do aumento do escoamento superficial (causados pela urbanização do meio ambiente) são o aumento de cheias, degradação da qualidade da água, áreas degradadas com erosão e deposição de resíduos, proliferação de doenças e rios urbanos secos na estiagem devido a redução da recarga dos aquíferos (Tucci, 2016).

3.1.2 Gestão e Planejamento Urbano

Com o intuito de evitar os problemas ambientais que são causados pela urbanização, é de extrema importância que os conglomerados urbanos possuam planejamento e gestão ambiental, de modo que haja ordem e controle para que as pessoas possam conviver em harmonia nas áreas urbanas, sem impactar de forma drástica o meio ambiente.

De acordo com Righetto (2009) a ordenação do espaço urbano se faz por meio da aplicação eficaz das legislações federais, estaduais e municipais. O autor ainda salienta que o Plano Diretor Urbano faz parte de uma destas legislações, sendo um conjunto de procedimentos, regulamentações e leis que ordenam localmente os espaços urbanos no Brasil.

Hoffmann *et al.* (2011) resumem plano diretor como algo que busca melhorias na qualidade de vida das pessoas e na criação de uma área urbana, desenvolvendo uma estrutura e um espaço apropriado, o que também pode ser definido como planejamento urbano de uma cidade.

A Lei Nº 10.257 (Brasil, 2001) estabelece a obrigação de um plano diretor para todas as cidades com mais de vinte mil habitantes e cidades integrantes de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas.

Contudo, não há um bom planejamento urbano se a questão ambiental não é considerada. A gestão ambiental está voltada principalmente para estudos relacionados à qualidade de vida, preservação e conservação dos recursos naturais, que estão afetados pela poluição do ar e dos rios (Hoffmann *et al.*, 2011).

A Lei Nº 14.026 (Brasil, 2020), cita que a drenagem e o manejo das águas pluviais urbanas pertencem aos serviços públicos do saneamento básico. Esses dois serviços são retratados como sistemas constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes.

Essa Lei também estabelece que planos de saneamento básico devem ser elaborados. Nessa linha, é necessário que o plano diretor tenha uma vertente de estudo e planejamento voltada à drenagem urbana.

Assim sendo, foi criado um instrumento essencial chamado de Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU), que tem como objetivo o planejamento da distribuição do escoamento superficial no espaço urbano em função da ocupação e da evolução da infraestrutura de drenagem, visando minimizar ou mesmo eliminar prejuízos econômicos e ambientais (Righetto, 2009).

O PDDU de Porto Alegre (PMPA, 2005) explica que a principal meta de um plano de drenagem urbana e manejo de águas pluviais é criar mecanismos de gestão para a bacia hidrográfica, o zoneamento urbano e as estruturas de macro e microdrenagem. Tal gestão deve estar baseada em um planejamento prévio que pretenda evitar perdas econômicas e melhorar as condições de saneamento e da qualidade do meio ambiente da cidade.

Adicionalmente, a Lei Nº 12.608 (Brasil, 2012) estabelece que o plano diretor dos municípios incluídos no cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos, deverá conter medidas de drenagem urbana necessárias à prevenção e à mitigação de impactos de desastres.

Tucci (2012) afirma que poucas cidades do Brasil desenvolveram um plano diretor com uma visão sustentável, que evitasse a transferência de impactos e com medidas não estruturais de longo prazo. Muitos dos planejamentos apresentados pelas cidades são insuficientes na área de ecologia e meio ambiente, principalmente em relação às cidades grandes em desenvolvimento. Dessa forma, os municípios brasileiros estão cada vez mais dispondo de seus planos diretores para terem base no planejamento ambiental e no desenvolvimento adequado da qualidade de vida das pessoas (Hoffmann *et al.*, 2011).

3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM

Tendo em vista a necessidade de um planejamento urbano adequado e uma gestão ambiental que integra diversas análises, a fim de prevenir impactos da urbanização no meio ambiente e na saúde das pessoas, ao se tratar do manejo de águas pluviais é imprescindível que sistemas de drenagem sejam implementados de forma compatível com a demanda exigida.

O histórico desses sistemas na sociedade revela que, apesar de adversidades, a evolução do saneamento básico proporcionou a quebra de diversas barreiras relacionadas à transtornos causados pela água da chuva. O avanço da tecnologia ao decorrer do século XX fez com que

o sistema de saneamento se dividisse em determinadas fases ao longo das épocas. Tucci (2012) separa tais sistemas em quatro fases de desenvolvimento, sendo:

1. Pré-higienista: Observada até o início do século XX, tinha como uma das suas principais características o esgoto despejado em fossas ou nos canais de drenagem urbana, uma vez que não havia nenhum tipo de coleta ou de tratamento para eles. O abastecimento de água era realizado através da fonte mais próxima das moradias, geralmente vindo de poços ou rios. As consequências dessa fase giram em torno de inundações, doenças e epidemias que resultavam em grandes mortalidades.

2. Higienista: Desenrolou-se no início do século XX até um pouco antes de 1970. Caracterizada pela mudança no transporte de esgoto e de escoamento pluvial, implementou a canalização para afastá-los das pessoas que circulavam pelas cidades. Contudo, apesar da melhora na condução dos dejetos e das águas, o que reduziu o número de doenças, percebeu-se que a contaminação dos rios aumentou, impactando diretamente na deterioração das fontes de água. As inundações também se intensificaram.

3. Corretiva: A terceira fase se deu durante as décadas de 1970 e 1990, iniciando a etapa de tratamento dos esgotos domésticos e industriais, bem como a execução de amortecimentos do escoamento da chuva. Os rios que foram contaminados nas fases anteriores começaram a ser recuperados, mas a poluição difusa continuou a não ser controlada. Alguns outros impactos ambientais foram percebidos na época, devido a implementação de mais obras hidráulicas.

4. Desenvolvimento sustentável: Após a década de 1990, com tratamento terciário dos efluentes e com a conciliação das obras de drenagem pluvial com os recursos naturais do meio, essa fase é definida por novos desenvolvimentos que preservam o ecossistema. Com uma consciência ambiental associada à proteção e conservação, algumas consequências do desenvolvimento sustentável são a redução das inundações e a melhoria na qualidade de vida.

Percebe-se que a virada de uma fase para outra é marcada, principalmente, pela evolução de como é realizado o transporte e o tratamento das águas. Para isso, obras de engenharia são implementadas visando amenizar e corrigir as consequências negativas avaliadas em cada

período. No quesito de reduzir o risco de enchentes, Tucci e Bertoni (2003) denominam estas obras como medidas estruturais, que podem ser tanto extensivas quanto intensivas. Os autores definem que medidas extensivas procuram alterar a relação entre a precipitação e a vazão, agindo na própria bacia. A alteração da cobertura vegetal do solo é um exemplo de medida extensiva, visto que reduz e retarda os picos de enchentes, ao passo que a erosão da bacia também é controlada. Já as medidas intensivas são definidas como aquelas que agem no rio, podendo ser dos tipos que aceleram, retardam ou desviam o escoamento. Esses tipos podem ser representados respectivamente por construção de diques, bacias de amortecimento e obras canalização.

Os sistemas de drenagem também podem ser classificados a partir da magnitude da precipitação e da própria rede. Sendo assim, são divididos em três subsistemas como: controle na fonte, microdrenagem e macrodrenagem. O controle na fonte é definido pela instalação de dispositivos de infiltração no local onde o escoamento pluvial se inicia, em geral nos lotes privados e em espaços públicos próximos às cabeceiras das bacias hidrográficas. A microdrenagem, projetada para atender precipitação de risco moderado, é composta principalmente pelo sistema de condutos pluviais ou canais que drenam o sistema viário. Já a macrodrenagem, que envolve áreas maiores, é formada por sistemas coletores que recebem a vazão de diferentes sistemas de microdrenagem e devem ser planejadas para atender precipitação superiores, que causam potenciais riscos humanos e materiais (Tucci; Bertoni, 2003; Adasa, 2018).

3.2.1 Drenagem Convencional

A drenagem urbana mais encontrada nas cidades brasileiras segue o princípio higienista, isto é, tem como objetivo principal conduzir as águas pluviais para fora dos conglomerados por meio de estruturas de micro e macrodrenagem (Souza, 2013). Esse tipo de drenagem é denominado como convencional ou tradicional.

Baptista *et al.* (2007) descreve a drenagem convencional como “sistemas clássicos de drenagem”, onde sarjetas, bocas-de-lobo, tubulações de ligação, galerias e poços de visita (PV) fazem parte dos principais dispositivos utilizados para o manejo das águas. Os autores ainda explicitam que a forma tradicional de conduzir a precipitação, apesar de ser adaptada aos termos quantitativos da geração de escoamento superficial, não é favorável aos termos qualitativos, uma vez que não possui mecanismos que permitem a redução dos efeitos da

poluição das águas dentro das cidades. A Figura 3.5 apresenta a infraestrutura básica da microdrenagem em um sistema tradicional sistema de drenagem.

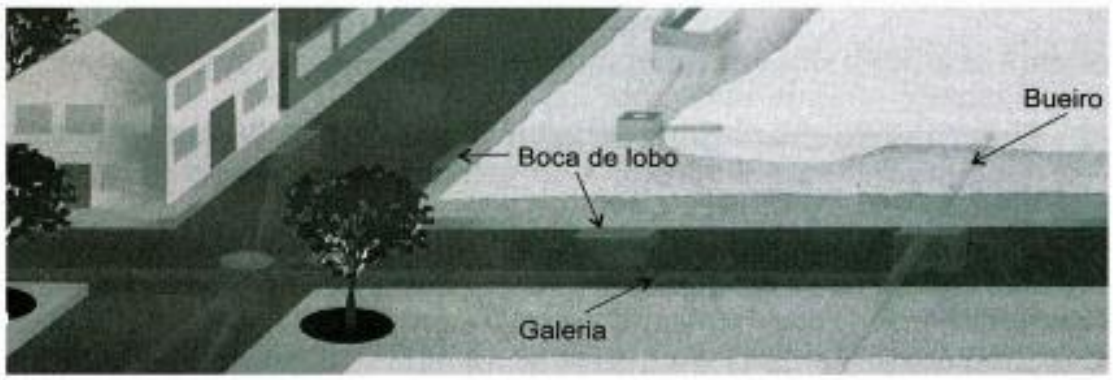


Figura 3.5 – Sistema clássico de microdrenagem (Baptista *et al*., 2005 *apud* Barbosa Junior, 2019)

Assim, o sistema tradicional é uma solução para problemas pontuais na localização da origem do escoamento, mas se mostra ineficiente quando o conjunto da bacia hidrográfica é considerado, visto que não identifica os impactos que tal solução pode gerar quando a água é simplesmente transferida para jusante (GDF, 2009).

Sabendo que o sistema de drenagem é um dos serviços do saneamento urbano, a possibilidade de integrá-lo com a coleta de esgotamento sanitário é praticada em muitos países, o que contribui de forma intensa à degradação dos corpos hídricos receptores. A solução mais adequada para manejar as águas deve ser escolhida a partir de uma análise técnica, econômica e ambiental integrada (Adasa, 2018).

De acordo com o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal (2018), as configurações dos sistemas clássicos de drenagem são divididas entre sistemas unitários e separadores, os quais são descritos abaixo:

A. Sistema separador absoluto convencional: a água da chuva é coletada e lançada de forma direta no curso d'água. Nesse tipo de sistema não há contato entre a água pluvial e o esgoto, uma vez que o último é coletado e transportado em uma rede separada, que será encaminhada a uma estação de tratamento. É o sistema comumente utilizado no Brasil.

B. Sistema separador convencional com sistema de repartição de águas pluviais: a vazão de base e uma parcela da precipitação que escoa pelas Galerias de Águas Pluviais (GAP's) são direcionadas para o tratamento. Essa configuração é utilizada quando se detecta uma alta poluição difusa nas GAP's por conta de lançamentos de esgotos não identificados.

C. Sistema separador convencional com sistema de repartição e reservatório de águas pluviais: este tipo de sistema se diferencia do tipo B por possuir um reservatório que armazena temporariamente uma parcela da água da chuva, para um posterior lançamento na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Tanto a vazão de base quanto as águas poluídas na primeira chuva podem ser tratadas antes do lançamento nos cursos d'água receptores. Desse modo, esta configuração permite que um volume maior da precipitação seja tratado, não havendo a necessidade de se aumentar muito a capacidade do sistema de tratamento.

D. Sistema unitário: a coleta e o transporte de esgotos e águas pluviais é realizada pelo mesmo conduto, onde são implementados extravasares que permitem o alívio da rede coletora em ocisões de chuvas intensas.

E. Rede coletora unitária com reservatórios de acumulação das águas de primeira chuva: tem o funcionamento similar ao descrito no tipo C, tendo o princípio de que esgotos e águas pluviais são coletados e transportados pelos mesmos condutos, mas uma parcela das águas pluviais é armazenada temporariamente, até ser encaminhada para tratamento.

F. Sistema separador com tratamento das águas pluviais: tanto as águas pluviais quanto o esgotamento sanitário sofrem tratamento antes de serem lançados nos corpos hídricos, mas são coletados e transportados por condutos separados. É um sistema utilizado para reduzir de forma considerável a poluição hídrica.

A Figura 3.6 ilustra as configurações de sistemas de drenagem, separadores e unitários, de acordo com a respectiva ordem descrita acima.

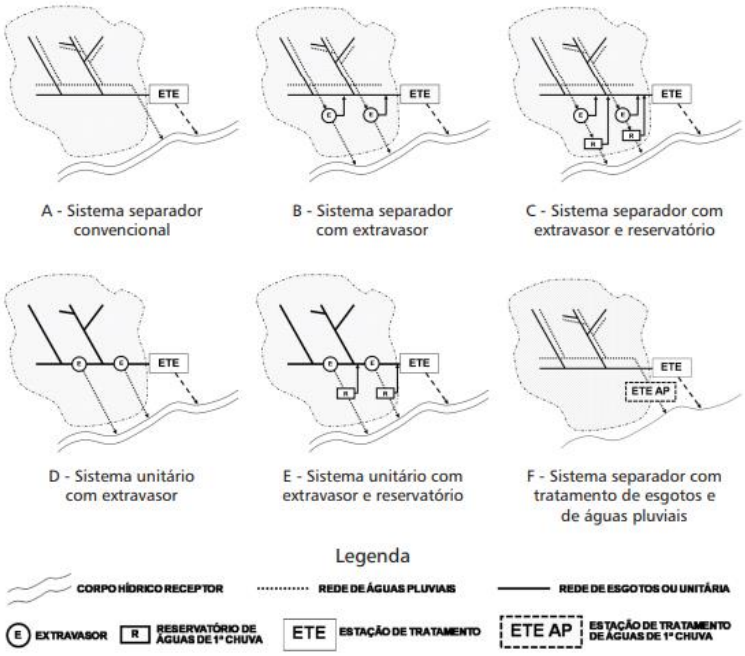


Figura 3.6 – Configurações de sistemas unitários e separadores de águas pluviais e esgotos sanitários (Adasa, 2018)

As vantagens do sistema separador absoluto se agrupam no maior controle da qualidade da água, devido ao manejo adequado, e na prevenção de que haja volumes além da capacidade de uma estação de tratamento (Tucci, 2005). As desvantagens desse sistema giram em tornam de ligações clandestinas e inadequadas das redes esgoto nas redes de águas pluviais, posto que muitas pessoas poupam o custo do tratamento, uma vez que o efluente não é encaminhado à ETE pela rede sanitária. Dessa forma, com o deságue da rede de drenagem diretamente no corpo receptor, muitas vezes a qualidade da água do corpo hídrico decai, pois além da poluição difusa existente também é adicionada a poluição causada pelas ligações ilegais da rede de esgoto.

A Figura 3.7 mostra como uma gestão inadequada dos outros serviços de saneamento podem impactar nos sistemas de drenagem que operam com separação absoluta, o que consequentemente repercute na qualidade do corpo hídrico receptor.

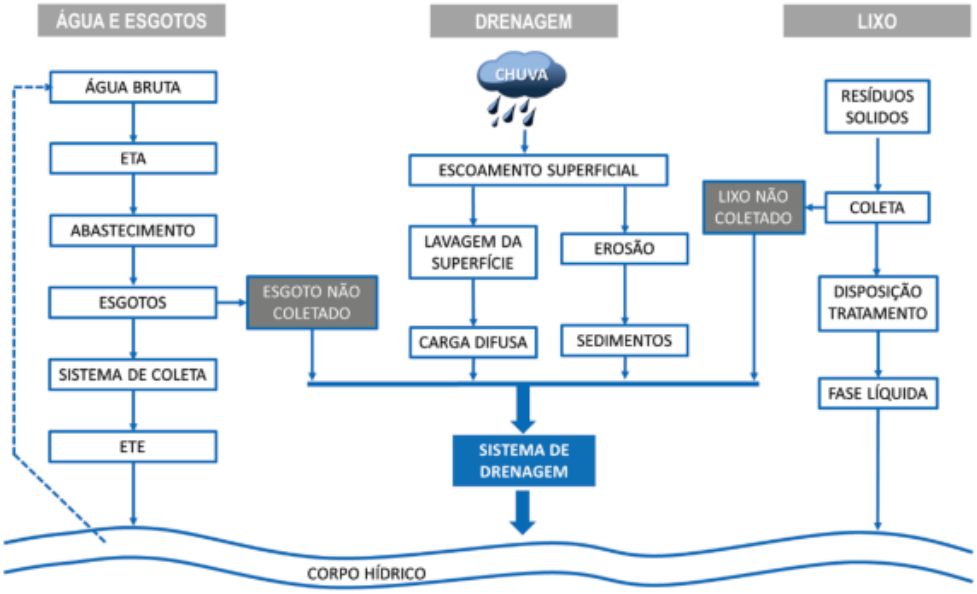


Figura 3.7 – Esquema operacional dos serviços de saneamento e os impactos sobre o sistema de drenagem (Adasa, 2018)

Assim sendo, os sistemas clássicos usados no Brasil demonstram certas limitações, o que faz com que seja necessário a implementação de soluções que controlem as inundações de forma eficiente, ao passo que a preservação ambiental e a qualidade das águas também entrem no contexto do processo (Tavanti e Barbassa, 2010).

3.2.2 Drenagem Sustentável

Com o passar dos tempos, mesmo com um sistema de drenagem que conduz a água da chuva até um curso hídrico, o que permite que não haja alagamentos na área impermeável de centros urbanos, ficou perceptível que o meio ambiente estava sofrendo alterações drásticas. Essas alterações na maioria das vezes são muito difíceis de se reverter, tanto por questões técnicas quanto por custos econômicos, o que acaba interferindo na vida de todas as pessoas do globo.

Isto posto, o conceito de sustentabilidade começou a ser integrado em diversas áreas da ciência e da engenharia, uma vez que é fundamental o equilíbrio entre as questões sociais, econômicas e ambientais. Pompêo (2000) ressalta que a concepção de sustentabilidade atrelada à drenagem urbana insere uma nova forma de direcionar ações, baseada no reconhecimento da complexidade das relações entre os ecossistemas naturais, o sistema urbano artificial e a sociedade. O autor menciona ser essencial reconceitualizar termos

técnicos e gerenciais, visto que uma nova postura de drenagem e controle de cheias em áreas urbanas é exigida.

Assim, no sentido contrário do sistema convencional de drenagem, que tem como objetivo a realocação rápida das águas pluviais por meio de dispositivos de coleta e transporte, surge a drenagem sustentável, que visa o controle do escoamento superficial o mais próximo da região onde a precipitação atinge o solo. (Lourenço, 2014).

Com a drenagem sustentável substituindo o modelo higienista, soluções alternativas, compensatórias ou ambientais, trabalham em harmonia com as estruturas tradicionais, para compensar sistematicamente os efeitos da urbanização em geral, tanto nos termos qualitativos quanto quantitativos (Silva, 2007).

Com o princípio da drenagem sustentável, as novas abordagens que surgiram nas últimas décadas no quesito de manejo das águas pluviais, se aproximam da sustentabilidade e têm sido analisadas, sob diferentes denominações: *Low Impact Development* (LID), nos Estados Unidos da América (EUA) e Canadá; *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), no Reino Unido; *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), na Austrália; e *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD), na Nova Zelândia (Poleto, 2011). A denominação *Best Management Practices* (BMPs) também é encontrada na literatura como uma vertente da drenagem sustentável.

Fletcher *et al.* (2015) detalham a evolução e a aplicação dessas terminologias em torno da drenagem urbana, apesar de se diferenciarem sutilmente em apenas alguns aspectos. O esclarecimento dado pelos autores e resumido por Silveira (2018) a partir de cada denominação é:

- LID (*Low Impact Development*): ideia que surgiu na década de 70, mas foi desenvolvida entre os anos de 1980 e 1990. Foi consolidada na primeira década do século XXI pela legislação nos EUA, Canadá e Nova Zelândia (onde é referida como LIUDD, *Low Impact Urban Design and Development*). Através de medidas locais/pontuais integradas em uma paisagem "funcional hidrológica", a ideologia básica da denominação LID tem como meta manter ou restabelecer o balanço hidrológico de pré-ocupação.

- BMPs (*Best Management Practices*): esta terminologia surgiu há muitas décadas para identificar práticas, estruturais ou não, que sejam úteis à área da agricultura nos EUA para conservação de solos. Nos anos 1980/90, a expressão BMPs foi adaptada para a drenagem urbana, no Canadá e EUA. Nesse caso, o intuito de se trabalhar com tal denominação na drenagem gira em torno de que um repertório de práticas estruturais e não estruturais seja estabelecido, com o objetivo de controlar a poluição pluvial e os sedimentos que são carregados;

- WSUD (*Water Sensitive Urban Design*): solução de planejamento urbano que nasceu na Austrália durante os anos 90, onde a drenagem urbana é uma área importante. A base da definição denominada de WSUD é minimizar os impactos hidrológicos da urbanização por meio do planejamento urbano na escala de bacia, sendo a drenagem urbana uma ferramenta setorial focada no controle de cheias, no manejo fluvial/pluvial e na qualidade da água;

- SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*): expressão materializada em 2000, na Grã-Bretanha. Essa ideologia analisa e reúne diversas tecnologias e técnicas de drenagem mais sustentáveis. Tem como objetivo principal estabelecer uma sequência de práticas e tecnologias que trabalhem de forma paralela, buscando soluções mais sustentáveis que as convencionais.

Dessa forma, mesmo com variadas denominações, a ideologia de drenagem sustentável se espalhou por todo o mundo. Com isso, tecnologias baseadas na concepção de sustentabilidade, por serem diferentes dos dispositivos clássicos de drenagem, começaram a ser implementadas e conhecidas popularmente como técnicas compensatórias.

Campos e Cubas (2019) declaram que as técnicas compensatórias começaram a ser executadas no Brasil a partir da década de 90, com a finalidade de que os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos fossem minimizados, ao mesmo tempo que a qualidade de vida e a preservação ambiental fossem beneficiadas. Righetto (2009) esquematiza, de acordo com a Figura 3.8, os exemplos de técnicas compensatórias:

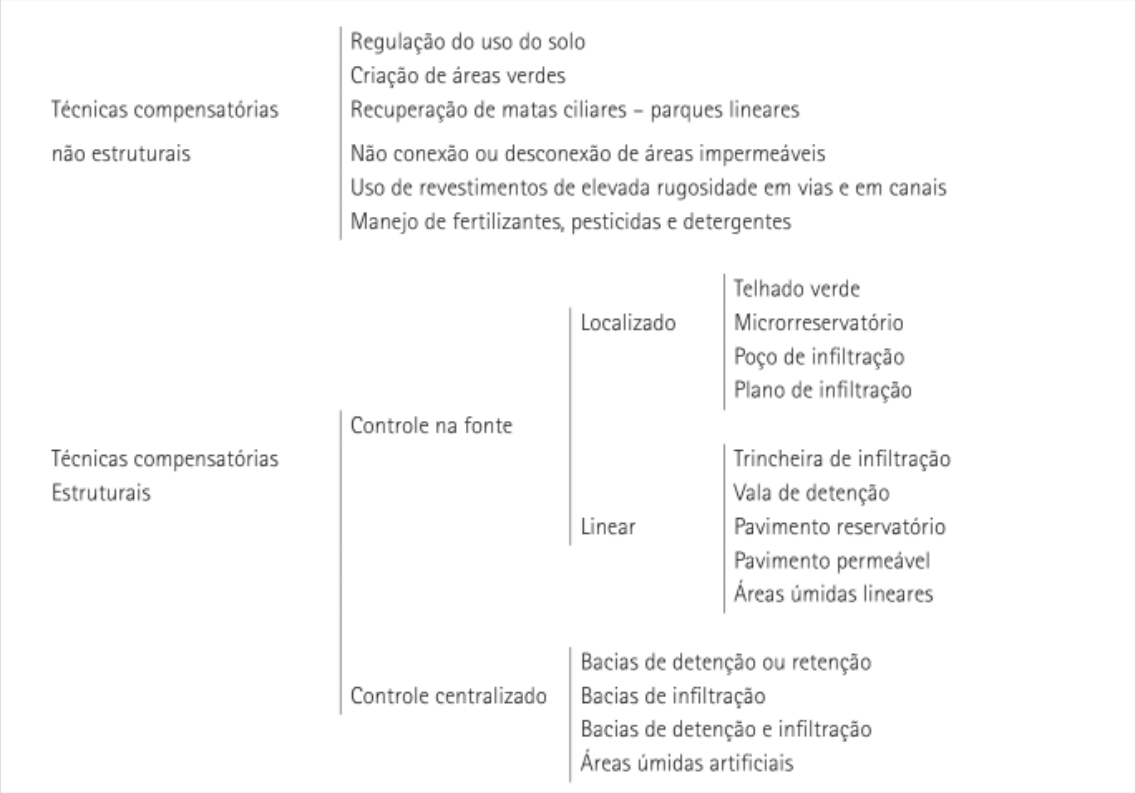


Figura 3.8 – Tipologia de técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais (Righetto, 2009)

Algumas técnicas compensatórias estruturais serão aprofundadas a seguir.

3.2.2.1 Telhado Verde

O telhado verde é uma medida de controle de escoamento na fonte que auxilia principalmente áreas mais densas. Seu funcionamento ocorre a partir da instalação sucessiva de algumas camadas de diferentes materiais, que atuam em conjunto para reduzir o escoamento no topo de edifícios urbanos. Alguns dos materiais essenciais para um telhado verde são: manta impermeabilizante, sistema de drenagem, camada de solo e cobertura de vegetação. A estrutura dessa técnica compensatória pode ser visualizada na Figura 3.9.

Righetto (2009) informa que o telhado verde possui grande eficiência na retenção de chuvas intensas e de curta duração, podendo reter até 70% da chuva durante a estação seca. Por trabalhar pelo mecanismo da evapotranspiração, visto que possui plantas na sua infraestrutura, também é utilizado para proporcionar melhorias térmicas.

Essa medida de controle também possui algumas desvantagens, sendo uma delas a necessidade de manutenção quando não está chovendo, posto que a vegetação precisa ser conservada para funcionamentos adequados na época de chuva.



Estrutura do telhado verde (Leite, 2019 *apud* Almeida, 2020)



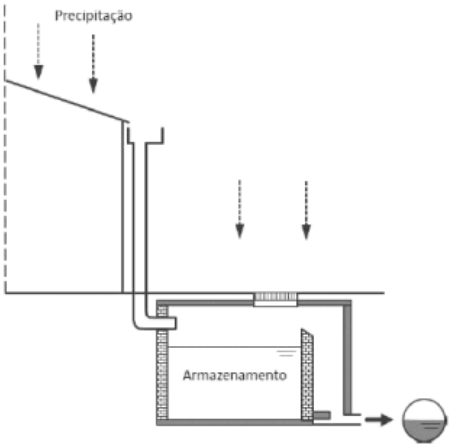
Implantação de telhado verde (Casa Abril, 2020)

Figura 3.9 – Telhado verde

3.2.2.2 Microrreservatório

Os microrreservatórios têm objetivo de armazenar temporariamente uma parcela da água pluvial, que precipita nas áreas impermeáveis como telhados ou estacionamentos, para posteriormente descarregarem a água quando a vazão no sistema de drenagem urbano estiver menor que a encontrada na hora da chuva. Por serem estruturas simples, podem ser feitos de diversos materiais, mas geralmente são encontrados de PVC ou concreto.

De acordo com Loganathan *et al.* (1985, *apud* Agra 2001) os microrreservatórios permitem aumentar o tempo de concentração, atenuando o pico dos hidrogramas de saída e possibilitando a recuperação da capacidade de amortecimento que foi prejudicada por conta da impermeabilização urbana. A Figura 3.10 mostra o funcionamento de um microrreservatório.



Funcionamento de um microrreservatório (Tominaga, 2013 *apud* Ribeiro, 2014)

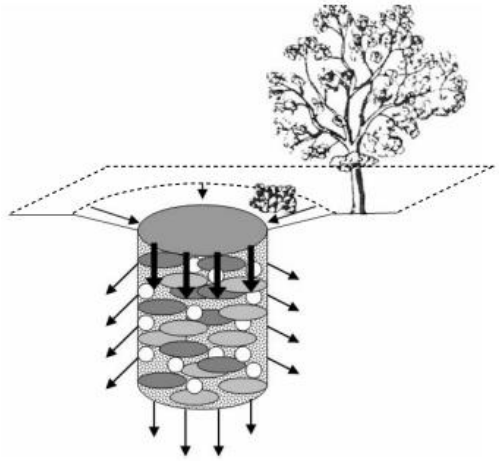


Croqui de um microrreservátorio residencial (Drumond, 2012)

Figura 3.10 – Microrreservatório

3.2.2.3 Poço de infiltração

Os poços de infiltração são escavações locais que atuam com o objetivo de acumular a água da chuva para infiltrá-la diretamente no solo de forma lenta. São estruturas verticais e pontuais, que possibilitam a infiltração radial através de materiais permeáveis. São utilizados para armazenar e infiltrar menores volumes de água, sendo que em alguns países também são destinados para recarregar aquíferos, buscando um reequilíbrio do ciclo hidrológico (Silva, 2007; Agostinho e Poleto, 2012). A Figura 3.11 ilustra a direção percorrida pelo escoamento nos poços de infiltração.



Direção do escoamento em um poço de infiltração (Silva, 2007)



Implantação de um poço de infiltração (Ribeiro, 2014)

Figura 3.11 – Poço de infiltração

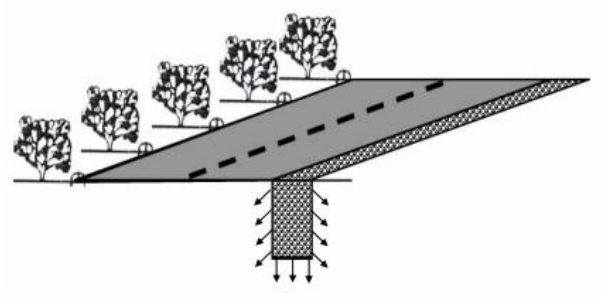
3.2.2.4 Trincheira de infiltração

Segundo Melo *et al.* (2016) e alguns outros autores mencionados por eles, as trincheiras de infiltração são projetadas ao longo de superfícies impermeáveis e têm a função de amortecer os volumes superficiais, promovendo um armazenamento e uma posterior infiltração da água da chuva no solo. Como exposto na Figura 3.8, são um tipo de técnica compensatória linear, a qual a dimensão de comprimento é superior às de largura e profundidade. Almeida (2020) enfatiza que a característica linear de uma trincheira aumenta o potencial de infiltração, uma vez que está relacionado ao seu comprimento, levando a bons resultados quando há maior área de contato.

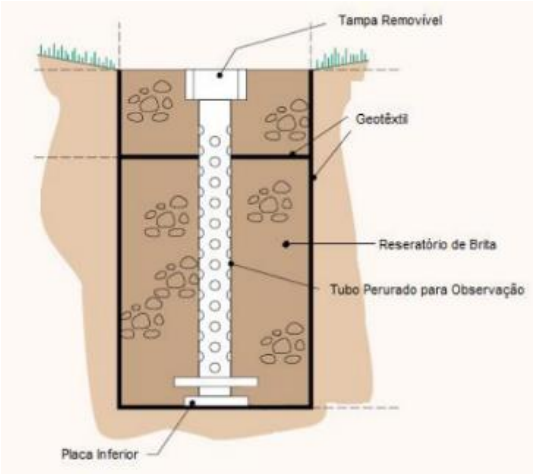
As trincheiras de infiltração são preenchidas com material granular para proporcionar que a água permeie no seu interior. Além disso, possuem uma manta geotêxtil tanto entre o solo e este material quanto entre a superfície e a trincheira, com o objetivo de impedir a presença de elementos contaminantes e de evitar que partículas sólidas que comprometem o funcionamento do dispositivo se depositem (Nunes *et al.*, 2017).

Algumas das vantagens de se implementar uma trincheira de infiltração listadas por Lourenço (2014) são: a redução do escoamento superficial, principalmente o que é gerado através de chuvas frequentes e de pequena intensidade, e a redução do risco de inundação devido à possibilidade de armazenamento e infiltração das águas pluviais. Assim como os

poços de infiltração, as trincheiras também promovem a recarga dos aquíferos. A Figura 3.12 esboça uma trincheira de infiltração.



Direção do escoamento em uma trincheira de infiltração (Silva, 2007)

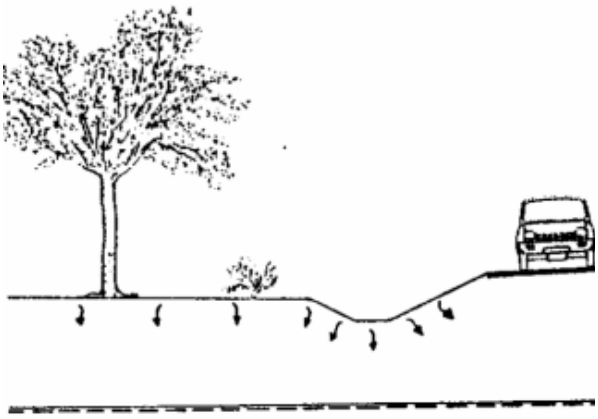


Seção de uma trincheira de infiltração (Minnesota (s.d.) *apud* Lourenço, 2014)

Figura 3.12 –Trincheira de infiltração

3.2.2.5 Vala de infiltração

As valas de infiltração são medidas compensatórias que geralmente são executadas próximo às ruas, estradas, estacionamentos e conjuntos habitacionais. São constituídas por simples depressões escavadas no solo, que recolhem, armazenam e transportam as águas pluviais em uma menor velocidade que áreas impermeáveis. As valas favorecem a infiltração pois, assim como as trincheiras, têm a característica de serem lineares, além de terem uma cobertura vegetal (Silva, 2007; Lourenço, 2014). A Figura 3.13 apresenta uma vala de infiltração.



Direção do escoamento em uma vala de infiltração (Urbonas e Stahre, 1993 *apud* Silva, 2007)



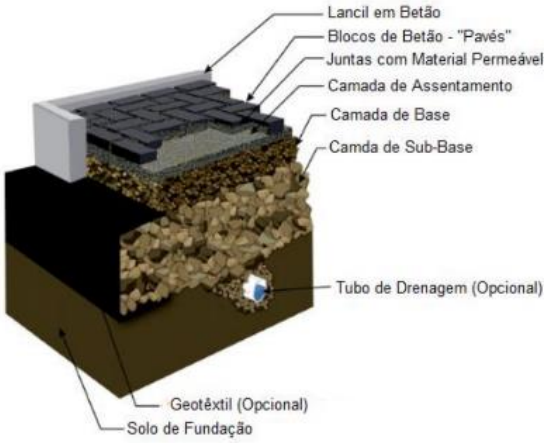
Implantação de uma vala de infiltração (RainWays, (s.d.) *apud* Lourenço, 2014)

Figura 3.13 – Vala de infiltração

3.2.2.6 Pavimento permeável

É uma técnica compensatória utilizada para reduzir as quantidades de áreas impermeáveis, visto que se diferenciam dos pavimentos tradicionais pois permitem a infiltração no solo e/ou o armazenamento das águas pluviais. Como normalmente são projetados para suportar cargas dinâmicas de veículos leves, são adequados para implementação em estacionamentos, calçadões, praças, quadras de esportes e até mesmo vias com menor tráfego (Righetto, 2009; Agostinho e Poleto, 2012).

Vasco (2016, *apud* Almeida, 2020) explica que alguns pavimentos permeáveis podem remover poluentes através das camadas constituintes do pavimento, realizando o tratamento do efluente em consequência dos processos filtração, adsorção, biodegradação e sedimentação. Na literatura em geral, a filtração é o processo de tratamento mais encontrado nessa medida compensatória. A estrutura do pavimento permeável pode ser visualizada na Figura 3.14.



Secção transversal típica de pavimento permeável (STORMWATER CENTER, s.d. *apud* Lourenço, 2014)



Implementação de pavimento permeável (Ferreira, 2000 *apud* Lourenço, 2014)

Figura 3.14 – Pavimento permeável

3.2.2.7 Bacia de detenção/retenção

As bacias de detenção/retenção pertencem ao grupo de técnica compensatória de controle centralizado, como destacado na Figura 3.8. Com a capacidade de controlar os volumes que chegam à rede de drenagem através do armazenamento temporário de água pluvial, tais bacias têm a funcionalidade de reduzir o risco de inundações, visto que escoam vazões mais baixas por um maior período (Almeida, 2020).

A bacia de detenção é projetada para funcionar “em série” com a rede de drenagem, tendo uma estimativa de 24h para ser esvaziada completamente, lançando de forma gradual o volume capturado. Apesar de serem dispositivos que amortecem a vazão máxima lançada no corpo receptor, não são muito eficientes na remoção de partículas sólidas ou substâncias poluentes, por conta do curto tempo em que a água fica detida na bacia. Por outro lado, a bacia de retenção proporciona uma certa melhoria na qualidade da água, uma vez que possui uma alta capacidade de reter o volume escoado e gerado na bacia, mantendo uma lâmina d’água permanente ou que é reduzida por infiltração ao longo do tempo (Righetto, 2009).

Righetto (2009) também menciona que são encontradas bacias de detenção com estruturas capazes de reter a água por até 48h após a chuva. Essas estruturas se localizam na saída da bacia e proporcionam uma retenção das águas pluviais por um período um pouco maior, o

que faz com que haja depósito de matéria sólida e de poluentes, melhorando a qualidade da água que é direcionada à rede de drenagem.

A Figura 3.15 indica alguns exemplos onde as bacias de detenção e retenção foram implementadas.



Bacia de detenção integrada à área urbana (Woods-ballard et al., 2015 *apud* Almeida, 2020)



Bacia de retenção a seco (Susdrain, 2012 *apud* Lourenço, 2014)

Figura 3.15 – Bacias de detenção e retenção

3.3 GESTÃO E PLANEJAMENTO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM NO DF

A legislação nacional determina que a gestão do saneamento deve seguir quatro eixos: o planejamento, a prestação dos serviços, a regulação e a fiscalização. Como referido no Item 3.1.2 do presente trabalho, o serviço de drenagem faz parte do saneamento público urbano e, no caso do Distrito Federal, a prestação destes serviços e do manejo de águas pluviais urbanas é de responsabilidade da empresa pública Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (Novacap). A função de regular e fiscalizar foi delegada a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa), conforme a Lei nº 4.285/2008 (Adasa, 2022).

Com o objetivo de controlar os impactos causados pela urbanização no DF, ao mesmo tempo que são desenvolvidos novos padrões sustentáveis para a drenagem urbana, o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (PDDU-DF) foi elaborado. Este Plano foi consolidado nos anos de 2008 e 2009, tendo como base princípios, objetivos, metas e estratégias que definem a política de drenagem urbana para o Distrito Federal (GDF, 2009).

Além disso, visando auxiliar e estabelecer os procedimentos gerais para que as outorgas de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal possam ser requeridas e obtidas, a Resolução Nº 09/2011 da Adasa foi instituída. Critérios quantitativos e qualitativos para a gestão das águas pluviais no DF são amparados por tal Resolução.

Para facilitar o planejamento e a operação dos serviços de drenagem, no ano de 2018, a Adasa produziu o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal. Apresentando parâmetros para estudos de concepção e projetos de sistemas de drenagem inseridos em uma visão integrada do manejo das águas pluviais, o Manual indica diretrizes para que a drenagem urbana possa ser expandida paralelamente ao crescimento populacional. A adequação de sistemas já existentes em áreas urbanizadas, mas que estão sujeitas a alagamentos e inundações, também se faz presente no Manual.

Dessa forma, seguindo as diretrizes e normas estabelecidas pelo PDDU-DF e pela Resolução N° 09/2011, o Manual de Drenagem do Distrito Federal defende que em casos de impermeabilização do solo que promovem a necessidade de lançar águas pluviais em um corpo hídrico superficial, a outorga limita termos nos quesitos de quantidade e qualidade dessas águas. Assim, é especificado que:

- Considerando chuvas com tempo de recorrência de 10 anos, a vazão máxima de lançamento é de até 24,4 L/(s.ha);

- O lançamento das águas pluviais deve manter a qualidade da água do corpo hídrico receptor. Isto posto, a poluição difusa gerada no empreendimento deve ser retida em um reservatório de qualidade, fazendo com que a concentração de poluentes na água a ser lançada seja reduzida.

No entanto, mesmo com diversos instrumentos para a planejamento e execução de sistemas de drenagem, mais de 50% da população do DF não possui uma completa implementação desse serviço (GDF, 2017). A Figura 3.16 apresenta como está a situação dos sistemas de drenagem que estão distribuídos no Distrito Federal.

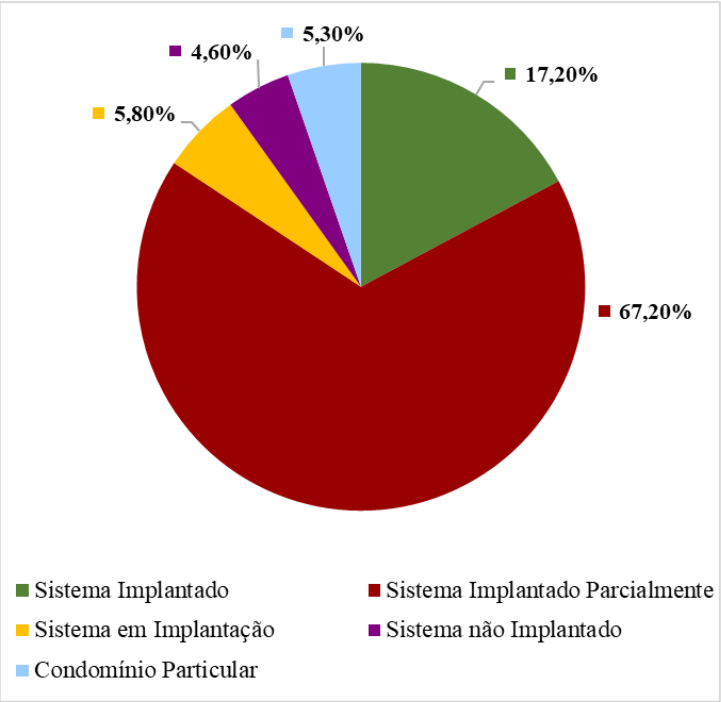


Figura 3.16 – Situação da rede de drenagem no DF (SINESP/Novacap *apud* GDF, 2017, modificado)

Dessa maneira, de acordo com os dados apresentados na Figura 3.16, é possível perceber que a parcela da população do DF que possui um sistema de drenagem que foi totalmente implementado não chega nem a 20%. Posto isto, para que inundações, alagamentos, proliferação de doenças de cunho hídrico e diversos outros problemas que são gerados pela impermeabilização do solo sejam controlados e minimizados, é fundamental que os sistemas parcialmente implementados sejam finalizados por completo. Também é essencial que o sistema de drenagem atenda a parcela de 4,6% da população que não possui tal serviço, proporcionando uma melhor qualidade de vida a todas as pessoas da região.

3.4 MODELOS COMPUTACIONAIS

Para que projetos de sistemas de drenagem sejam compatíveis com as necessidades reais, modelos computacionais são utilizados para auxiliar na simulação de cenários, o que possibilita solucionar alternativas para as demandas dos processos que envolvem as águas pluviais. Dessa forma, ao passo que os impactos da urbanização na gestão de drenagem urbana se tornam mais complexos, é imprescindível que o planejamento e a concepção dos projetos trabalhem com instrumentos que consideram variadas perspectivas, levando em conta principalmente mudanças antrópicas nos meios físicos naturais.

Com o objetivo de prevenir riscos, os modelos computacionais de drenagem urbana têm o intuito de representar a interação de processos como o escoamento superficial, a intercepção e a infiltração com a rede de drenagem de águas pluviais. Assim, associando modelos tipo chuva-vazão com modelos de propagação de escoamentos em galerias ou canais, a simulação computacional garante uma maior segurança no manejo de águas da chuva (Righetto, 2009).

De acordo com Moreira (2005), Macedo (2010) e Filho *et al.* (2012), os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos como:

- Conforme o tipo de variável (estocástico ou determinístico): É estocástico quando possui pelo menos uma das variáveis envolvidas apresentando comportamento aleatório. É determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída.

- Conforme o tipo de relação entre as variáveis (empíricos ou conceituais): É empírico quando utiliza relações baseadas em análises estáticas a partir de observações, ou seja, ajustam os valores calculados através de funções que não têm relação com os processos físicos envolvidos. É conceitual quando tenta descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado, utilizando função que consideram formulações físicas parametrizáveis e/ou empíricas, o que leva a ter pelo menos um parâmetro realmente calibrado.

- Conforme a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos): É discreto quando considera que o fenômeno é representado por um evento, não sendo contínuo no tempo. É continuo quando busca representar longos períodos de série, variando continuamente.

- Conforme a existência ou não de relações espaciais (concentrado ou distribuídos): É concentrado quando considera que os parâmetros não variam no espaço, independente da região que estão inseridos na área de estudo, utilizando somente o tempo como variável. É distribuído quando as variáveis dependem tanto do tempo quanto do espaço.

- Conforme a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos): É dinâmico quando os parâmetros podem variar no tempo e estacionário quando não considera essa variação temporal.

Além disso, Tucci (1998, *apud* Volken, 2018) divide os modelos computacionais utilizados para avaliação da drenagem em: hidrológicos, hidráulicos e hidrológico-hidráulico.

- Modelos hidrológicos: têm o intuito de representar os hidrogramas gerados por chuvas críticas e suas consequências, de modo que consideram a bacia e as galerias de macrodrenagem que geram escoamento no seu interior, bem como levam em conta as perdas iniciais, a infiltração e o escoamento superficial.

- Modelos hidráulicos: utilizados para a simulação do escoamento da água em condutos e canais com seção variada. Podem gerar linhas de inundação, além de avaliar a qualidade da água, segundo parâmetros variados.

- Modelos hidrológico-hidráulicos: são chamados de modelos integrados e têm como característica a simulação de galerias sob pressão, sendo mais utilizados quando a rede de drenagem possui grande área. Pode avaliar a qualidade da água e gerar linhas de inundação segundo o modelo digital de terreno.

3.4.1 SWMM

Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Enviromental Protection Agency – USEPA*) entre os anos de 1969 e 1971, o modelo computacional *Storm Water Management Model* (SWMM) tem sido aprimorado periodicamente para simular cenários na área de drenagem, trabalhando tanto com processos hidrológicos quanto com processos hidráulicos e de qualidade da água. O programa que utiliza tal modelo é conhecido como *Personal Computer Storm Water Management Model* (PCSWMM).

Seguindo a linha de modelagem hidrológica, o modelo SWMM opera de forma dinâmica uma simulação chuva-vazão na bacia (por evento ou a longo prazo) e calcula a evaporação e a infiltração da água nas camadas não saturadas do solo. Na modelagem hidráulica, por seu turno, o SWMM utiliza ondas cinemáticas e dinâmicas para propagar fluxo na rede de drenagem se fazem presente, assim como a modelagem de reservatórios de detenção e

estações de bombeamento. No quesito de qualidade da água, o SWMM consegue simular o acúmulo e a remoção de cargas poluentes na bacia, bem como a propagação e a redução dos contaminantes na rede de a partir de simulação de processos de tratamento (Righetto, 2009).

O modelo computacional apresentado neste tópico pode ser dividido em quatro compartimentos de acordo com Rossman (2016), como esquematizado na Figura 3.17, sendo eles:

- O compartimento atmosfera: tem como responsabilidade a geração de precipitação e o depósito de poluentes na superfície terrestre;

- O compartimento da superfície: recebe precipitação da atmosfera e atua no ciclo hidrológico representando a evaporação (água volta para a atmosfera), a infiltração (água adentra as camadas de solo), o escoamento superficial e o carregamento de poluentes para o compartimento de transporte;

- Compartimento subterrâneo: recebe infiltração da superfície e transfere uma parcela desse fluxo de entrada para o compartimento de transporte;

- Compartimento de transporte: recebe água do escoamento superficial ou do interfluxo de águas subterrâneas. É constituído por canais, tubulações, bombas, reguladores de vazão, estações armazenadoras ou de tratamento.

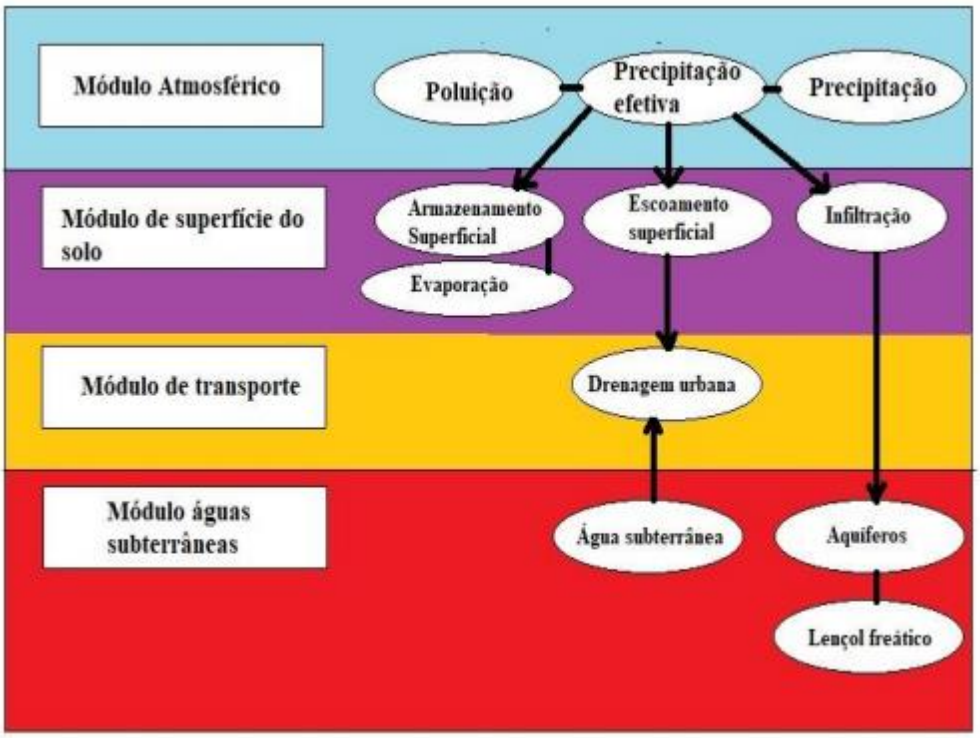


Figura 3.17 – Fluxograma explicativo dos módulos do SWMM (Rossman e Huber, 2016 *apud* Barbosa Junior, 2019)

Além de auxiliar no planejamento e na concepção de sistemas de drenagem convencionais, o SWMM também permite a introdução de elementos que fazem parte da drenagem sustentável, como as técnicas compensatórias expostas no Item 3.2.2. Souza (2014) menciona que o modelo consegue simular cinco diferentes tipos dessas técnicas, sendo: células de bioretenção, pavimento poroso, trincheira de infiltração, cisternas e valas vegetadas, que podem ser combinadas numa mesma sub-bacia.

Conforme Righetto (2009), a utilização do SWMM serve para dimensionar sistemas de drenagem urbana, controlar alagamentos, avaliar o uso de sistemas de detenção de cheias e proteção da qualidade das águas, analisar o efeito de medidas compensatórias em determinada região, avaliar a alteração da qualidade da água devido a carreamento de poluentes e verificar se há entradas de esgoto e de outras fontes pontuais externas ao sistema de águas pluviais, dentre alguns outros objetivos que podem ser atingidos com a utilização do modelo.

No Distrito Federal, alguns autores como Costa (2013), Souza (2014) e Cambraia (2020), aplicaram o modelo computacional SWMM na área de estudo do presente trabalho, que será detalhada no próximo capítulo.

Costa (2013) teve como objetivo monitorar de maneira quali-quantitativa as águas de drenagem urbana em duas sub-bacias na Bacia do Lago Paranoá. Com a utilização do SWMM, percebeu que o programa responde de modo satisfatório aos fenômenos nas galerias de drenagem pluvial a partir de uma simulação chuva-vazão, conseguindo representar os fenômenos hidráulicos e hidrológicos que ocorrem na área de estudo. No quesito de cargas de poluentes, o autor declara que mais estudos necessitam ser elaborados para a aplicação do modelo, contudo, quando se é trabalhado com vazões calibradas, foi possível notar uma boa resposta na simulação das cargas de Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Souza (2014) monitorou a quantidade e qualidade das águas de drenagem urbana das sub-bacias urbanas do Iate Clube e do Centro Olímpico. Também simulou processos hidrológicos e de poluição difusa na sub-bacia do Iate Clube, além de ter analisado cenários de implantação de bacias de detenção. O autor menciona que o modelo SWMM permitiu avaliar as variações de vazão e de qualidade da água, obtendo como resultado a alternativa de que a implementação de bacias de detenção na área auxilia a desafogar a rede de drenagem sobrecarregada e a melhorar a qualidade da água pluvial.

Cambraia (2020) utilizou o modelo computacional SWMM para avaliar o funcionamento do sistema de drenagem da sub-bacia do Iate Clube por meio da simulação de diferentes cenários. Com isso concluiu que a implementação de técnicas compensatórias na área minimiza o transbordamento de água nos poços de visita no período de chuva, assim como reduz o pico de vazão de saída do sistema de drenagem.

3.5 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

No Distrito Federal são registrados transtornos relacionados a uma má gestão de águas pluviais anualmente, dado que diversas áreas da região sofrem alagamentos no período de chuva. O PDDU-DF lista os seguintes motivos como as causas que provocam os impactos negativos na rede de drenagem:

- Parte das regiões administrativas, não possuem sistema de microdrenagem, o que faz com que haja concentração do escoamento nas áreas de maior declividade aumentando o risco de ocorrência de alagamento nas ruas;

- O sistema de transporte da cidade é frágil, uma vez que o tempo de retorno de projeto adotado na época em que foi projetado era de 5 anos, considerado um valor baixo para avenidas mais importantes e sistemas de macrodrenagem;

- Grande número de áreas degradadas em regiões de alta declividade devido ao aumento da impermeabilização, da vazão e da velocidade do escoamento;

- Os mananciais urbanos estão sendo contaminados pelas águas pluviais, principalmente o Lago Paranoá. Esse problema não é tão significativo quando comparados com os outros, visto que há muitas áreas verdes do Plano Piloto, contudo, com a densificação isto deverá se agravar. Este obstáculo é maior no período de outubro a abril, que é o período chuvoso.

A partir de variadas análises com diferentes parâmetros, a Adasa conseguiu estabelecer a partir do Plano de Saneamento Básico, quais áreas do DF estão mais suscetíveis a tais tipos de problemas. A Figura 3.18 mostra um mapa de zoneamento de risco de alagamento feito durante o estudo.

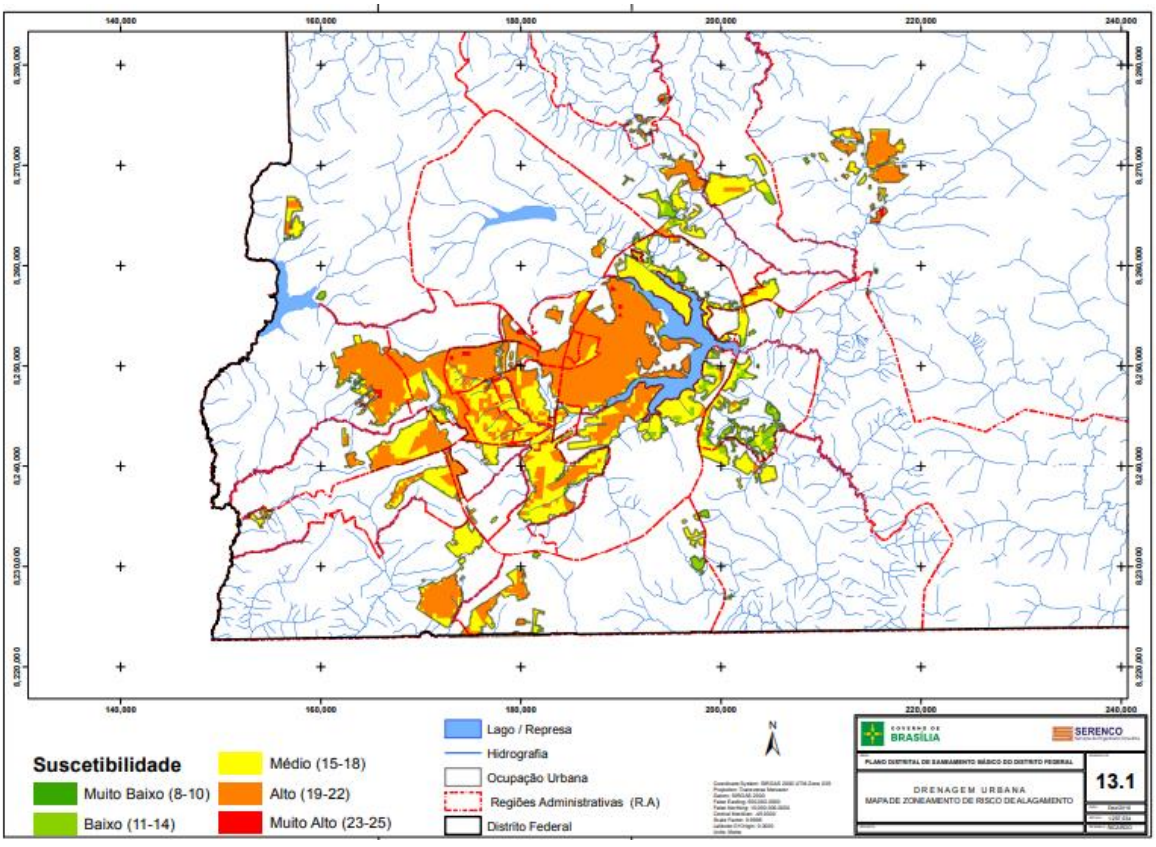


Figura 3.18 – Risco de alagamento no DF (GDF, 2017)

Como é possível perceber na Figura 4.1, a Região Administrativa (RA) 1 nomeada como Brasília, local que a área do Plano Piloto pertence, é um dos lugares onde há um alto risco de alagamento. Além das causas descritas em parágrafos anteriores, o PDDU-DF também registra que o Plano Piloto é a região onde mais são encontradas patologias nas vias ou na própria rede de drenagem, além de ser uma das áreas com o maior número de casos de ligações irregulares de esgoto sanitário na rede de drenagem pluvial.

Dentre as patologias destacadas estão: o afundamento de vias ou terreno, rachaduras ou ruptura da rede, abrasão da rede, destruição da rede, rede desalinhada, entre outras adversidades para uma boa drenagem de águas pluviais. Uma das explicações para as disfunções expostas é o fato de que o esgoto é um agente corrosivo das estruturas, portanto, quanto maior for o número de ligações clandestinas de esgoto na rede de drenagem, menor será a qualidade dos canais e da água transportada. Além disso, a sobrecarga sobre as estruturas é bastante identificada no Plano Piloto, uma vez que muitas pessoas circulam pela região.

Aprofundando no bairro da Asa Norte, localizado no Plano Piloto, GDF (2008) apresenta pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana os pontos críticos do conglomerado que sofrem com alagamentos na época chuvosa:

- Saída da Avenida L2 Norte para o Eixo Monumental;
- Setor Bancário Norte em frente ao prédio sede dos correios e em frente à parada da galeria;
- Via de ligação Eixinho Norte/Leste à L2 Norte ao lado do DNIT;
- Eixinho Norte/Oeste entre o Setor Comercial Norte e o HRAN;
- Avenida W3 Norte, em frente ao Setor de Rádio Televisão Norte;
- Tesourinha da 203/204 Norte;
- Avenida W2 Norte, entre a SQN 311 e a SEPN 511;
- Tesourinha da 211/212 Norte;
- Via W1 Norte e SQN 115;
- Tesourinha 215/216 Norte;

- Tesourinha da SQN 202;
- Rotatória ou Balão da SQN 202/402;
- SQN 402 Blocos F e G;
- Setor terminal Norte em frente ao Hipermercado Extra;
- Setor terminal Norte, portaria da Embrapa;
- VIA EPAA, balão de acesso ao SAAN e RCG.

3.5.1 Projeto Drenar-DF

Com todos os problemas de drenagem no Distrito Federal relatados até aqui, o Decreto N° 30.587/2009 instituiu o Programa de Gestão de Águas e Drenagem Urbana no Distrito Federal – Drenar DF. Tal programa tem o intuito de promover uma melhora no sistema de drenagem urbana de determinadas áreas, de modo a combater os alagamentos, proteger as nascentes e recuperar as erosões de todo o DF. A base do programa é voltada para ampliar e reforçar as galerias existentes, implementar novas redes de microdrenagem e instalar reservatórios de acumulação ou detenção (IPHAN, 2015). As áreas de atuação do Programa Drenar-DF estão expostas na Figura 3.19, sendo que todas fazem parte do conjunto de bacias de contribuição do Plano Piloto.

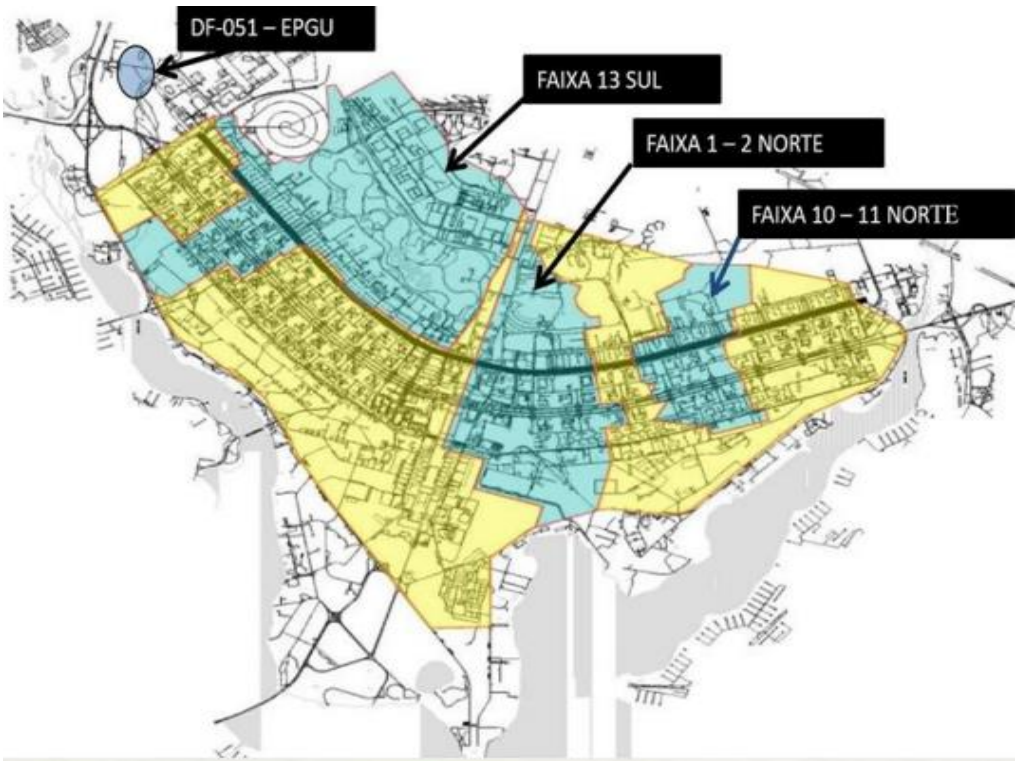


Figura 3.19 – Localização das bacias de contribuição do Projeto Drenar-DF (IPHAN, 2015)

3.6 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia de contribuição que será analisada no presente trabalho se localiza na Asa Norte e é chamada de sub-bacia do Iate, contemplando a região da Faixa 1-2 Norte da Figura 3.19. Terracap (2021) estabelece as áreas delimitadas pela Faixa 1-2 Norte, as quais envolvem parte do estacionamento do estádio Mané Garrincha, a via SRPN – Trecho 1 e parte das instalações do Autódromo Internacional de Brasília Nelson Piquet. O exutório da sub-bacia do Iate desce em direção à avenida W3, por entre as quadras 901(Setor de Rádio e TV Norte – SRTVN) e 902 (Colégio Militar) e termina dentro do Iate Clube de Brasília. Dessa forma, a sub-bacia que tem uma área de 8,68 Km², se desenvolve na direção oeste-leste desde as imediações do Palácio do Buriti até a via L4, abrangendo as quadras de numeração terminal 1,2,3,4 e parte da 5 (Terracap, 2021).

O sistema de drenagem da região especificada em parágrafo acima está sobrecarregado e não consegue operar de forma adequada, fazendo com que o excedente pluvial não captado pelas bocas de lobo, continue escoando superficialmente até que ocorram alagamentos e inundações. Alguns locais críticos da sub-bacia que operam com uma vazão maior do que podem suportar ficam: na quadra residencial 402 Norte, próximos a tesourinha 102/202 e no ponto baixo da via SRPN – Trecho 1 (Terracap, 2021).

Todas as complicações de drenagem enfrentadas na sub-bacia do Iate foram intensificadas após a reforma do Estádio Nacional Mané Garrincha em 2010, visto que cerca de 716 mil m² de área foram ocupados. Para auxiliar na drenagem urbana, o projeto original do estádio incluía um jardim com plantas nativas do cerrado e lagoas artificiais. No entanto, esta parte não foi executada, o que faz com que o espaço encontrado atualmente ao redor do empreendimento seja extremamente pavimentado, servindo como estacionamento de ônibus ou para realizações de eventos e shows musicais. Com a impermeabilização em torno da arena, a infiltração da água no solo sofre forte redução, proporcionando um maior volume pluvial a ser escoado para as demais áreas da Faixa 1-2 Norte, o que contribui para geração de focos de inundações e alagamentos pela cidade (Cambraia, 2020).

A Figura 3.20 mostra os problemas associados ao sistema de drenagem ineficaz da Faixa1-2 Norte.



Figura 3.20 – Alagamentos em áreas da Faixa 1-2 Norte (Metrópoles, 2021)

Por conta de obstáculos como os da Figura 3.20, o Programa Drenar-DF propôs inicialmente através do Parecer Técnico N° 01/2015 – Intervenções no Conjunto Urbanístico de Brasília, a inclusão das seguintes estruturas na sub-bacia do Iate: uma nova galeria de reforço, um reservatório subterrâneo de 2.900 m³ próximo ao Conjunto Nacional, um reservatório a céu aberto de 4.800m³ localizado no Setor de Administração Federal as margens da Via L2 Norte e uma bacia de detenção com capacidade de 40.000 m³ para controlar a qualidade da água no Setor de Embaixadas Norte. A Figura 3.21 apresenta o esquema do projeto original.



Figura 3.21 – Intervenções propostas no ano de 2015 pelo Projeto Drenar-DF na Faixa 1-2 Norte (IPHAN,2015)

Contudo, com algumas outras análises ao longo dos anos, a alternativa escolhida para controlar alagamentos verificados para um tempo de recorrência de 10 anos foi: a implantação de uma galeria de reforço que recebe os excedentes pluviais identificados e os encaminha para um reservatório de detenção, projetado para ter um volume útil de um pouco mais que 70.000 m, como apresentado no Projeto Executivo de Readequação de Drenagem da Faixa 1-2 Norte. A Figura 3.22 esboça as intervenções finais propostas na rede de drenagem da Faixa 1-2 Norte, sendo as linhas de cor azul escuro a representação da galeria de reforço com deságue na bacia de detenção.

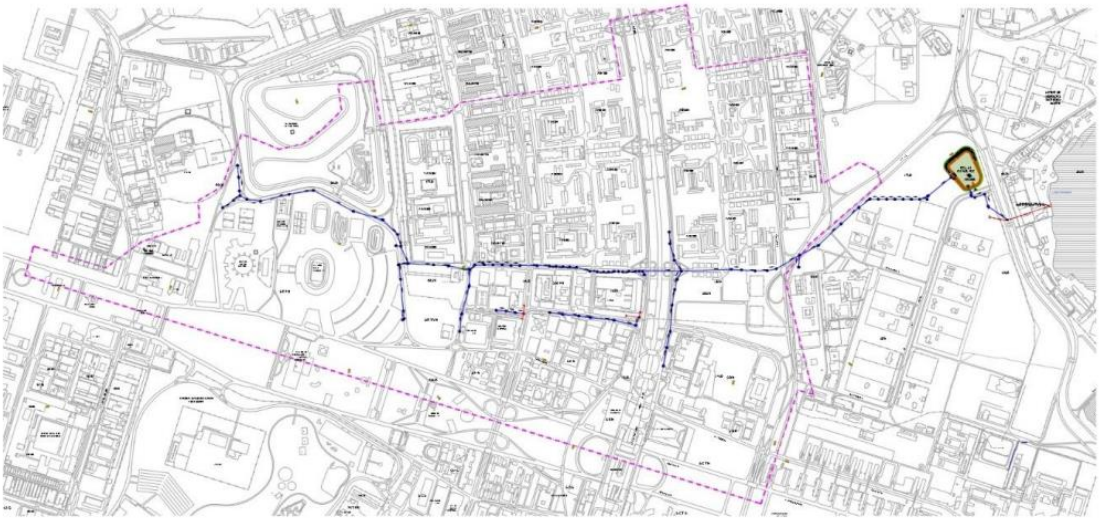


Figura 3.22 – Intervenções propostas no ano de 2021 pelo Projeto Drenar-DF na Faixa 1-2 Norte (IPHAN,2015)

4 METODOLOGIA

4.1 ETAPAS DA METODOLOGIA

O presente trabalho se desenvolveu por meio de etapas, as quais estão ilustradas de forma esquemática no fluxograma apresentado na Figura 4.1.

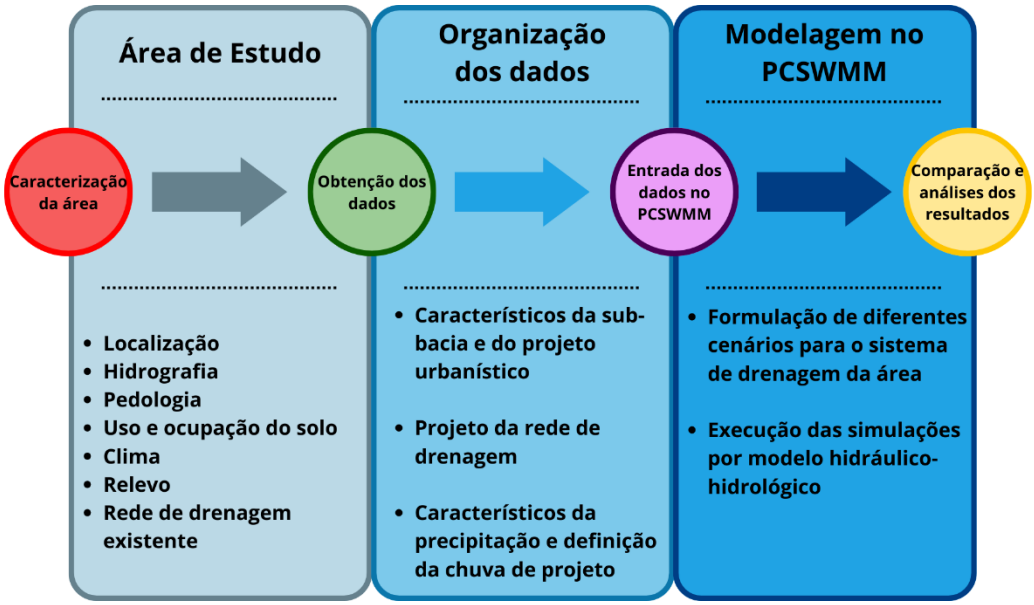


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas a serem concluídas na metodologia

Inicialmente foi necessário realizar uma caracterização da área de estudo (Faixa 1-2 Norte), uma vez que os aspectos urbanos e naturais são uma parte essencial para o alcance dos resultados. Após a obtenção e organização de tais dados, estes foram inseridos no software PCSWMM, para que fosse possível simular diferentes cenários do sistema de drenagem urbano do conglomerado. A modelagem foi baseada no método hidráulico-hidrológico e os resultados de cada cenário obtidos pelo programa foram comparados entre si.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Como mencionado no Item de Definição da Área de Estudo, a sub-bacia possui uma área de 8,68 Km², se desenvolve na direção oeste-leste e tem seu início antes do Estádio Nacional Mané Garrincha, próximo ao Palácio Buriti. A Faixa 1-2 Norte envolve o Setor Hoteleiro Norte, Setor de Autarquias Norte, abrange as quadras de numeração final 1,2,3,4 e parte da 5 (do bairro Asa Norte), e termina na via L4 ao desaguar dentro do Iate Clube de Brasília. A Figura 4.2 mostra a delimitação da Faixa 1-2 Norte com alguns pontos referenciais destacados.

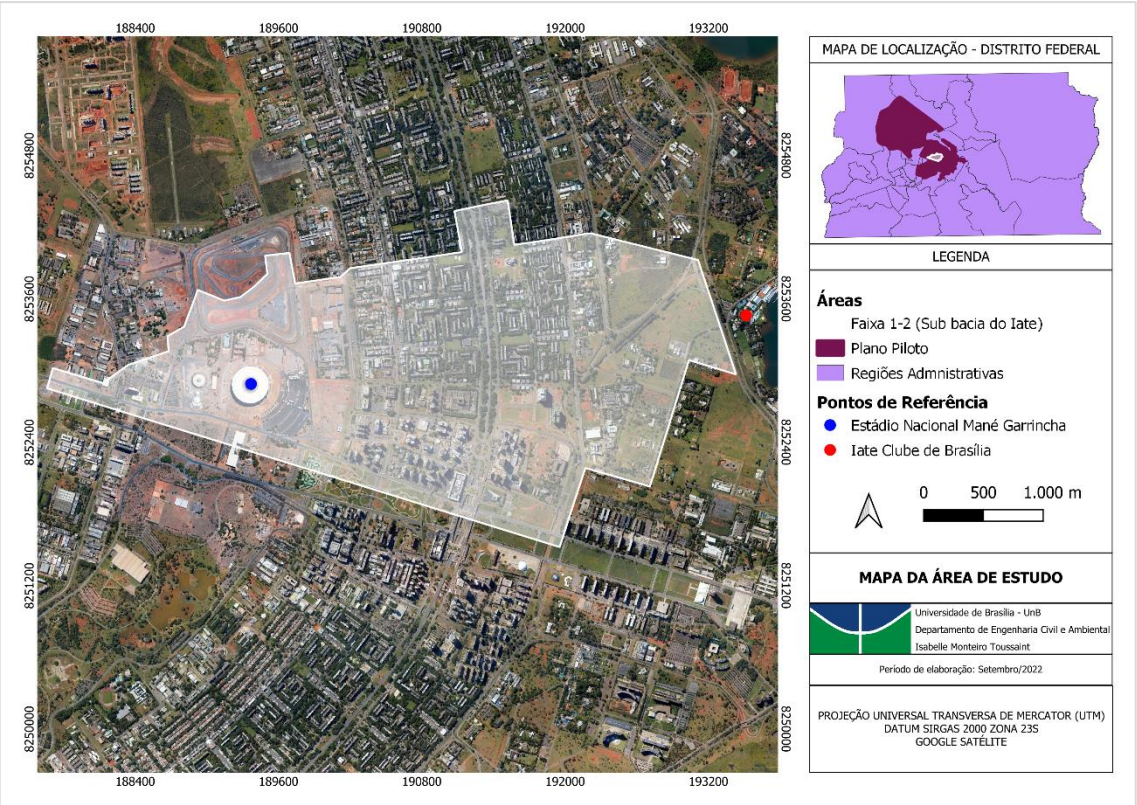


Figura 4.2 – Delimitação da Faixa 1-2 Norte

4.2.1 Hidrografia

A área de estudo faz parte do grupo de 28 sub-bacias afluentes do Lago Paranoá, que segundo o Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF, foram divididas de acordo com as condições das redes de macrodrenagem da região. A Figura 4.3 mostra como a sub-bacia do Iate Clube, tratada no presente trabalho, está inserida na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá, umas das mais importantes para o Distrito Federal.

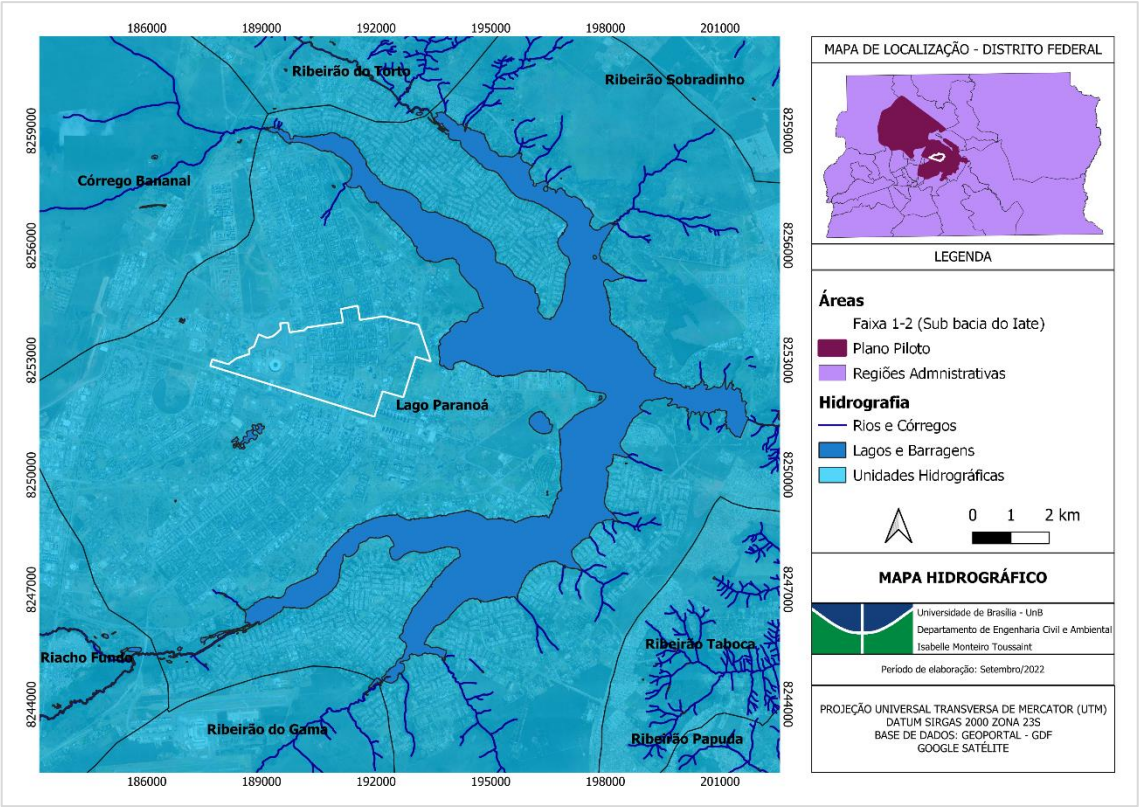


Figura 4.3 – Hidrografia da área de estudo

4.2.2 Relevo

O relevo de uma região influencia diretamente no fluxo do escoamento superficial, visto que a ordem natural é que o seu deslocamento ocorra de acordo com a força da gravidade. Posto isto, para analisar a altitude e a declividade da área de estudo, curvas de nível separadas de 1 m foram utilizadas para gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE). Tais curvas de nível foram fornecidas pela plataforma Geoportal do GDF.

A partir do MDE foi possível obter a altitude e a declividade da Faixa 1-2 Norte com o auxílio do software QGis, assim como exposto na Figura 4.4 e na Figura 4.5. Por meio destes mapas percebe-se que o nível mais baixo da sub-bacia fica próximo ao Lago Paranoá, com cota entre 1013 e 1020 m, e a parte mais elevada em torno das proximidades do Palácio dos Buritis, com cota de 1160 a 1172 m. Souza (2014) especificou que a parcela mais plana da área de estudo está na cabeceira da sub-bacia, assim como a maior declividade é encontrada quando se aproxima do exutório e da área sudeste. Costa (2013) determinou que a declividade média da sub-bacia do Iate fica em torno de 4,05%.

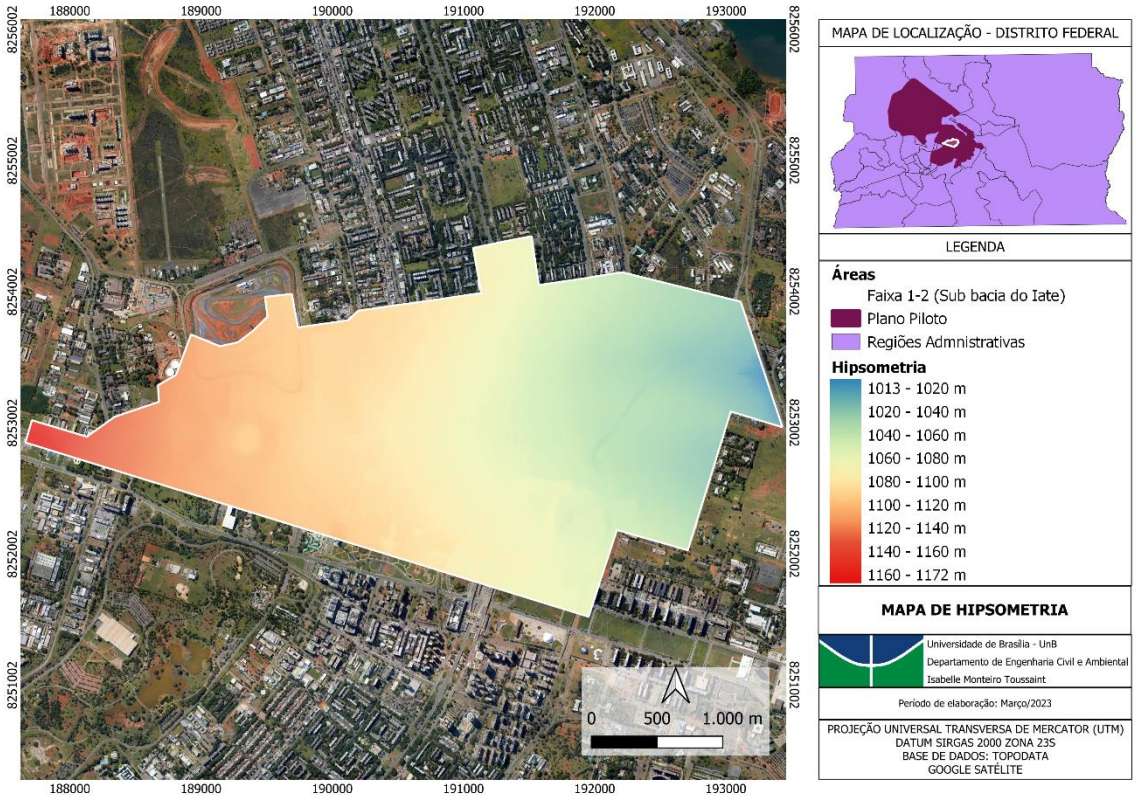


Figura 4.4 – Hipsometria da área de estudo

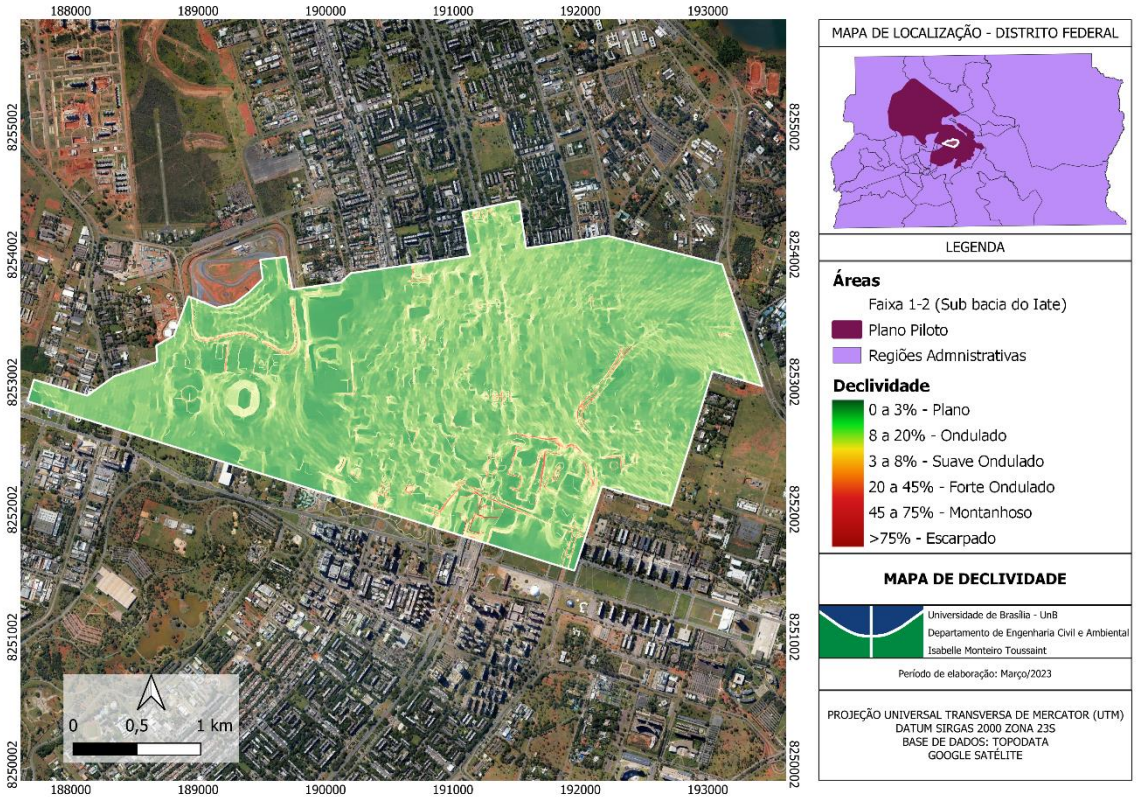


Figura 4.5 – Declividade da área de estudo

4.2.3 Tipo de Solo e seu Uso e Ocupação

Para realizar a modelagem no software PCSWMM é essencial saber as características físicas do solo da região, dado que a capacidade de infiltração de uma área é um fator primordial na análise do sistema de drenagem urbano.

Dessa maneira, através de um levantamento realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) no ano de 2004, pode-se dizer que as classes de Latossolos e Cambissolos são as mais encontradas no Distrito Federal, tendo: 38,92% da área com Latossolos Vermelhos, 15,58% com os Latossolos Vermelho-Amarelos e 30,98% de Cambissolo. Menezes (2010) cita que essas classes são definidas como solos tropicais, vermelhos, ricos em ferro e alumínio, ácidos e pobres em macro e micro nutrientes. Como pode ser visto na Figura 4.6, a Embrapa caracteriza a região da área de estudo como Área Urbana, onde conforme Araújo (2018) a cobertura do solo já foi modificada a ponto de perder as características naturais.

Quando o assunto é o uso e ocupação do solo, além de interferir na permeabilidade da área esse fator também afeta a qualidade da água pluvial, uma vez que determinados tipos de resíduos/efluentes podem ser encontrados nas redes de drenagem, de acordo com ocupação do entorno. A plataforma Geoportal disponibiliza dados de uso e ocupação do solo no DF em 2019. Assim, foi possível desenvolver o mapa exposto na Figura 4.7, o qual demonstra que a Faixa1-2 Norte é dividida em sua maioria por construções (áreas impermeáveis), tendo uma parcela de vegetação e uma pequena parte de solo exposto.

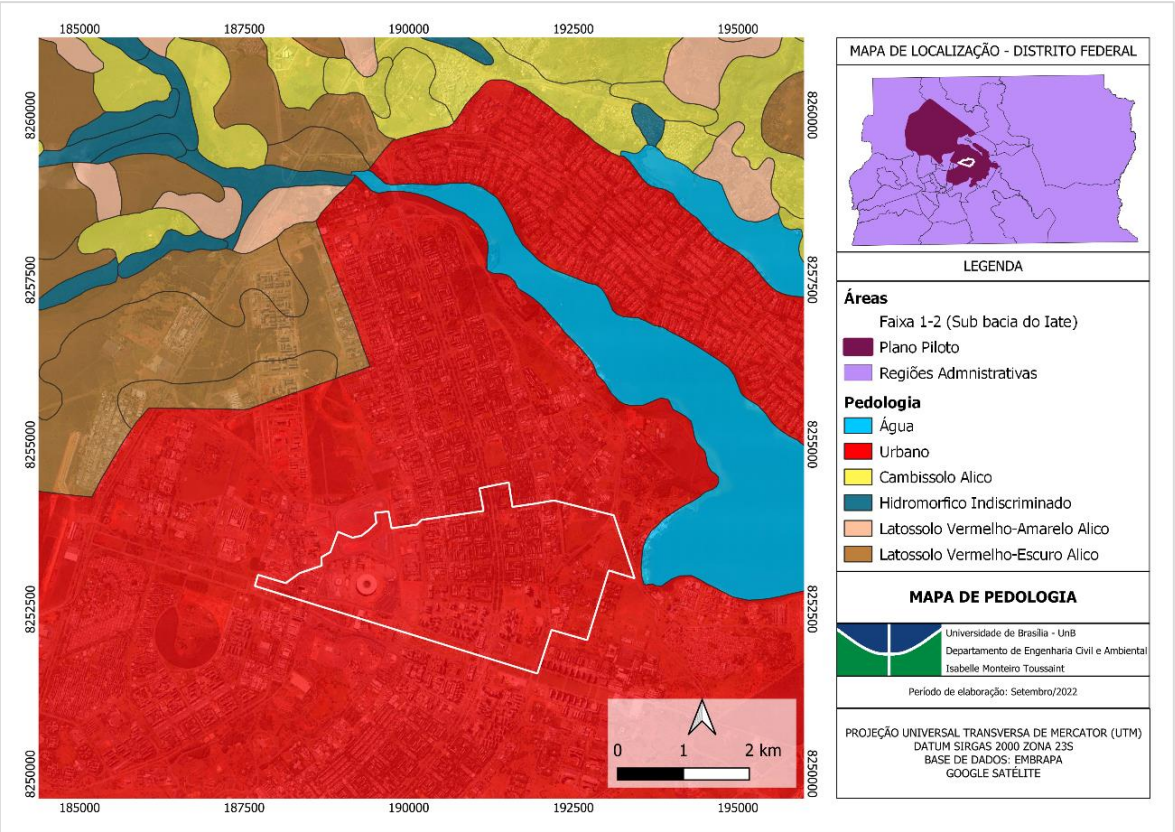


Figura 4.6 – Pedologia da área de estudo

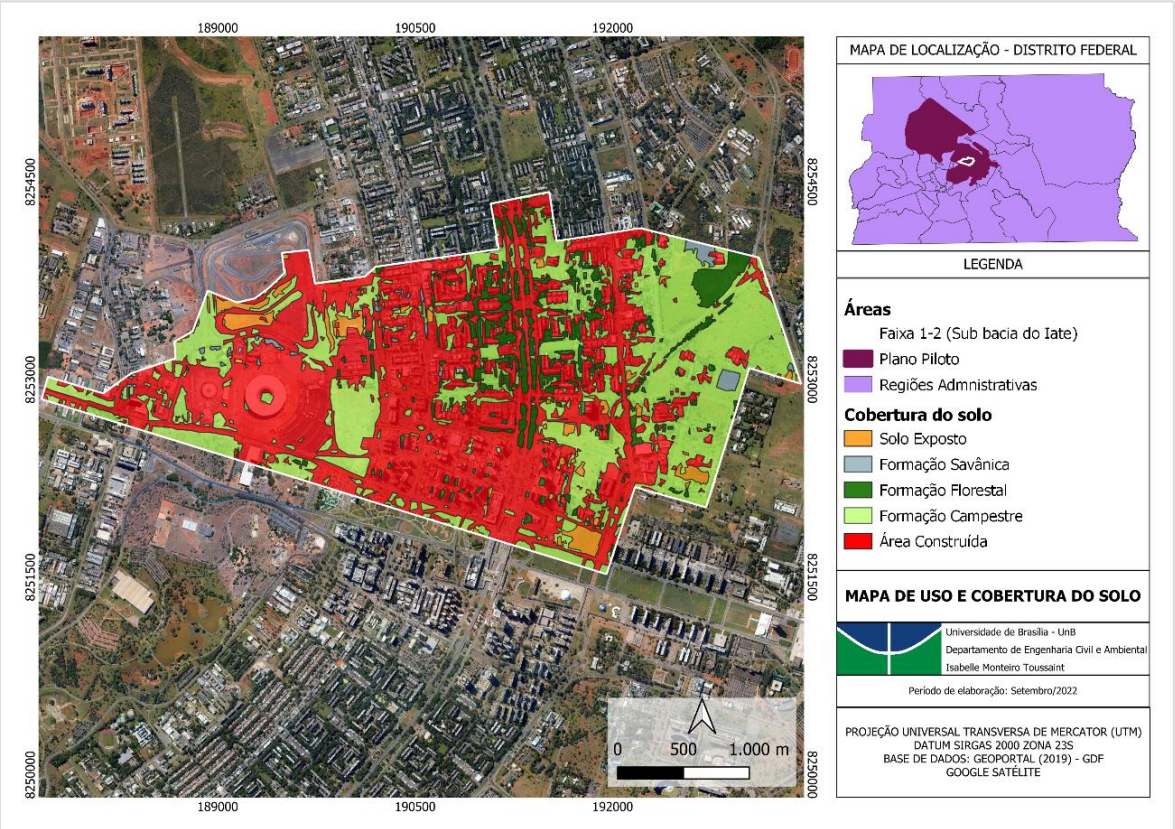


Figura 4.7 – Uso e Ocupação da área de estudo

4.2.4 Clima

A precipitação é um dado de entrada fundamental para o software PCSWMM, desse modo, informações sobre o clima da área de estudo foram obtidas. O clima de Brasília é considerado tropical, tendo um verão chuvoso e um inverno extremamente seco. A precipitação da região se inicia em meados de outubro e termina por volta do mês de abril, enquanto a estação seca ocorre entre maio e setembro. Tais observações podem ser visualizadas no gráfico da Figura 4.8. A temperatura média anual no DF varia entre 18° e 22° C.

Para obtenção dos dados de precipitação na área de estudo, foram utilizadas duas estações pluviométricas próximas à região. A primeira pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e é denominada como Estação Brasília 83377, ficando a menos de 2 Km de distância da cabeceira da sub-bacia. Já a segunda, fica a menos de 1 Km do outro lado da cabeira, sendo de responsabilidade da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb) e conhecida pelo código 1547029.

Para uma segurança maior, optou-se por trabalhar com dados de mais de uma série histórica. A estação do INMET forneceu a precipitação média acumulada de cada mês em duas séries históricas, de 1961 a 1990 e de 1991 a 2020. A estação da Caesb disponibilizou os dados mensais de chuva entre 1999 e 2021. Dessa maneira, foi possível realizar o gráfico da Figura 4.8, ressaltando que o mês de dezembro concentra as maiores precipitações e o mês de julho as menores.

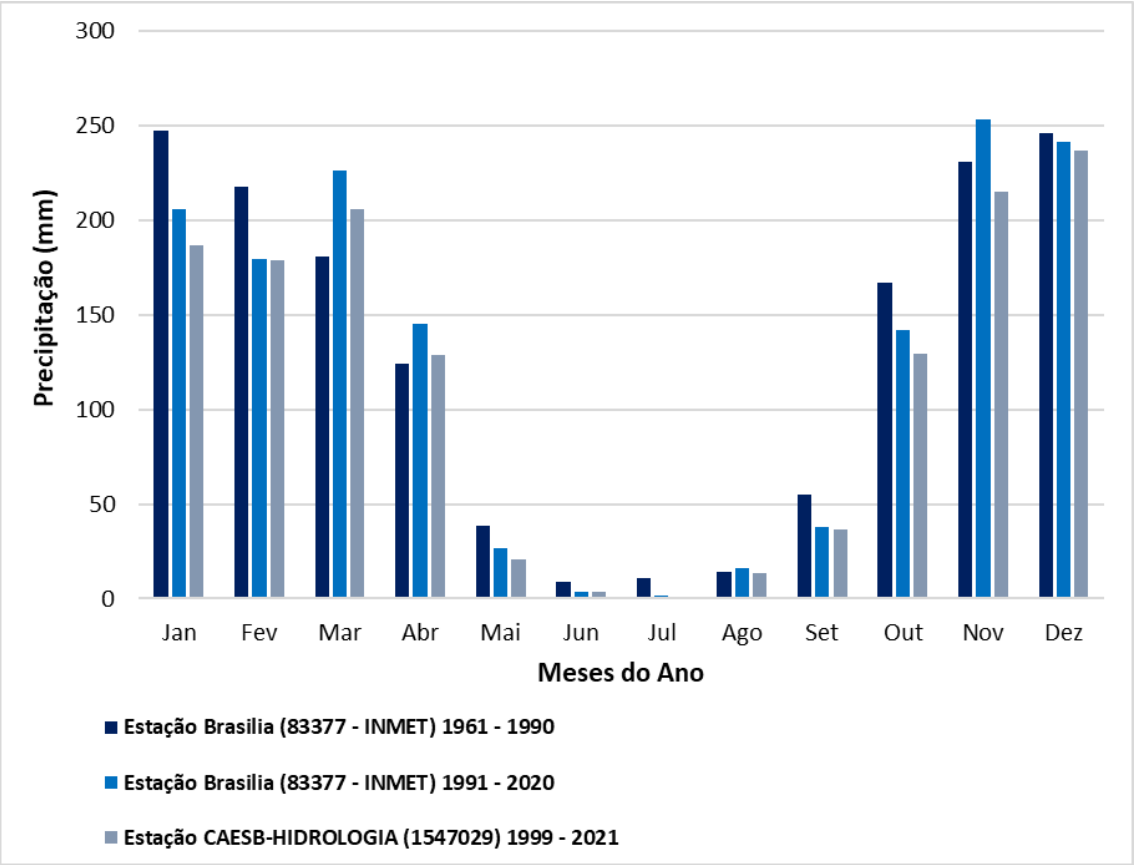


Figura 4.8 – Precipitação na área de estudo

4.2.5 Drenagem Urbana

O sistema de macrodrenagem da Faixa 1-2 Norte é composto por quatro eixos principais (macrogalerias 1 a 4), os quais convergem para uma macrogaleria exutória de seção 3,00m x 3,00m, que deságua no Lago Paranoá, assim como apresentado na Figura 4.9. Souza (2014) cita que as dimensões de cada macro galeria são:

- Macrogaleria 01: 3,97 Km;
- Macrogaleria 02: 3,77 Km;
- Macrogaleria 03: 2,68 Km;
- Macrogaleria 04: 4,75 Km.



Figura 4.9 – Sistema de macrodrenagem na área de estudo (Terracap, 2021)

As redes de drenagem coletoras, as macrogalerias e os poços de visita utilizados neste projeto são referentes ao estudo realizado por Cambraia (2020), que adotou os dados da rede disponibilizados Adasa. Adicionado a este estudo, foram inseridos os PVs e as redes de microdrenagem disponibilizadas pela base de dados da Novacap, atualizados pela Adasa. É importante salientar que cerca de 40 a 50% dos PVs e condutos não continham as informações, o que fez com que a rede de drenagem espalhada pela área de estudo fosse simplificada, conforme a Figura 4.10.

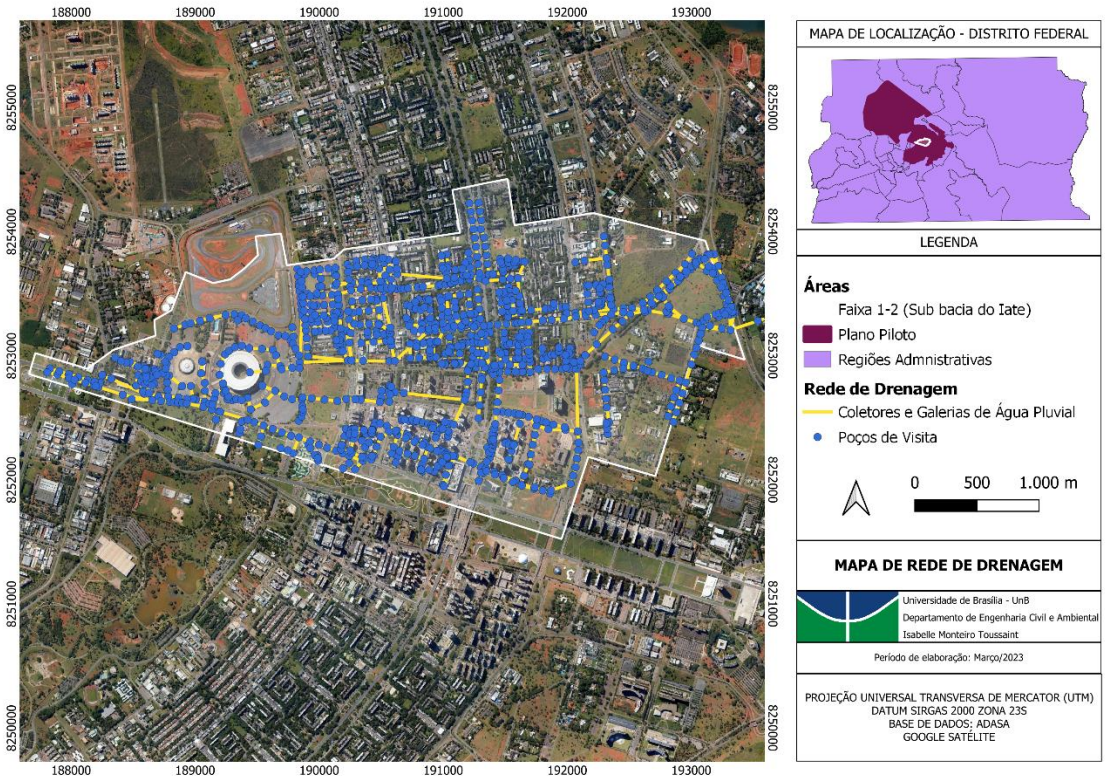


Figura 4.10 – Rede de drenagem na área de estudo – Cenário Base

4.3 CHUVA DE PROJETO

Seguindo o critério estabelecido pela Adasa, de que a vazão máxima de lançamento em corpos hídricos, para áreas impermeáveis, deve ser menor ou igual a 24,4l/(s.ha), foi considerado uma chuva de projeto para calcular o maior valor de vazão que passa pelas estruturas de drenagem e obras de retenção.

A chuva de projeto foi baseada no método dos blocos alternados, que distribui a chuva no tempo com base nas curvas intensidade-duração-frequência (IDF). A duração da chuva de projeto deve ser de no mínimo 24 horas, ao passo que seu valor deve ser distribuído em intervalos de tempo menores ou iguais a 1/5 do tempo de concentração da bacia.

A equação de curva IDF para uso nos cálculos de drenagem urbana do Distrito Federal, indicada pelo PDDU – DF, é apresentada na Equação (4.1).

$$I = \frac{1574{,}70 * TR^{0{,}207}}{(tc + 11)^{0{,}884}} \qquad \text{Equação (4.1)}$$

Onde:

- I = intensidade (mm/h)
- TR = tempo de retorno em anos;
- tc = duração da chuva em minutos.

Dessa maneira, com base na Equação (4.1), foram calculadas as intensidades de chuvas com diferentes tempos de retorno. Os tempos de retorno utilizados foram de 1, 2, 5 e 10 anos e, para todas as chuvas, considerou-se a precipitação de 24 horas, discretizada em intervalos de 5 minutos. A comparação das quatro chuvas é apresentada na Figura 4.11.

Por fim, para determinar a chuva de projeto, utilizou-se o método dos blocos alternados como já mencionado em parágrafo anterior, para calcular e agrupar as precipitações de cada chuva. A Tabela 4.1 exibe os picos das chuvas calculadas através do método descrito e utilizadas no estudo.

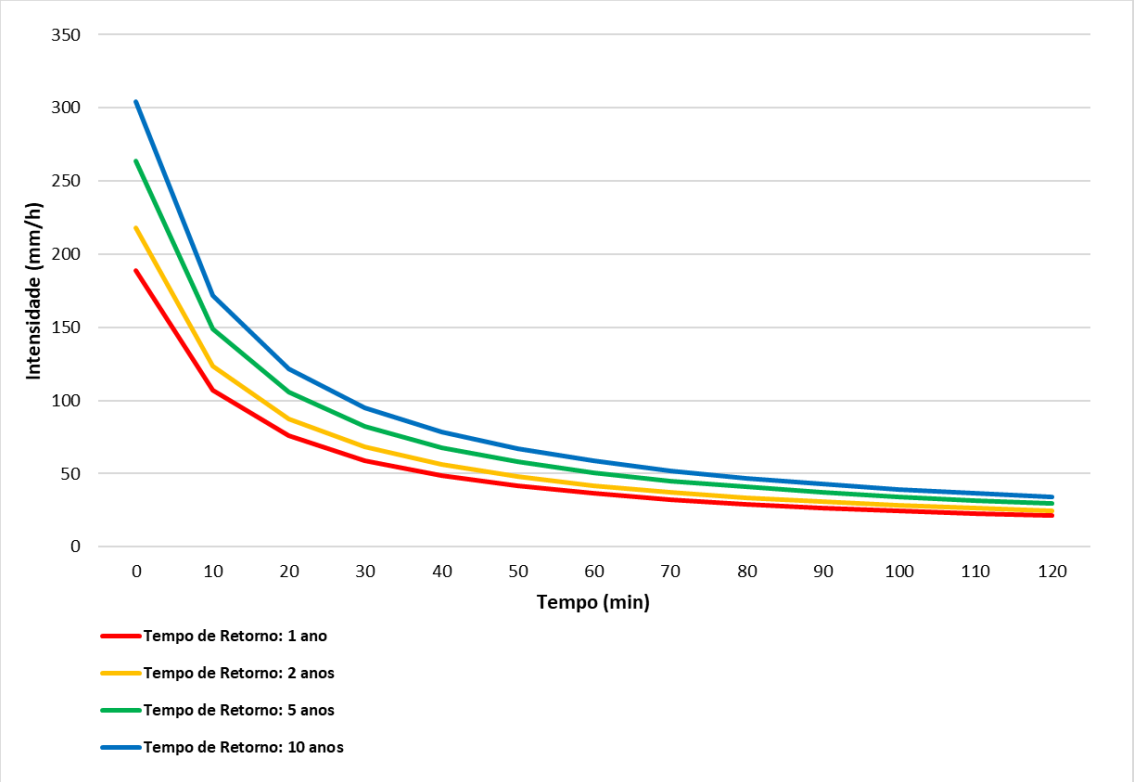


Figura 4.11 – Curvas IDF de Brasília recomendada pelo PDDU para diferentes valores de TR

Tabela 4.1 – Picos das precipitações calculadas

Chuva utilizada	Pico da precipitação
TR 1 ano	11,31 mm
TR 2 anos	13,06 mm
TR 5 anos	15,79 mm
TR 10 anos	18,22 mm

4.4 DESCRIÇÃO DE CENÁRIOS

Para avaliar os impactos da urbanização na Faixa 1-2 Norte, uma vez que o escoamento superficial e a capacidade de infiltração da área promovem alagamentos, como referido anteriormente, foi feita uma análise que tem como princípio a simulação e comparação de diferentes cenários.

- **Cenário Base:** Foi considerado o sistema de drenagem atual da área de estudo, sem nenhuma intervenção na área de contribuição e sem a implementação de estruturas tradicionais ou técnicas compensatórias;

- **Cenário Drenar-DF:** foi considerada a galeria de reforço do Projeto Executivo de Readequação de Drenagem da Faixa 1-2 Norte, proposto pelo Programa Drenar-DF. Para este cenário optou-se por fazer as simulações no PCSWMM inserindo apenas a galeria de reforço sugerida como intervenção na área. Tal escolha se deu pelo fato de que o reservatório de detenção proposto pelo programa, além de ser localizado à jusante da sub-bacia, tem como objetivo principal melhorar a qualidade da água direcionada a ele. Dessa forma, os problemas de alagamentos relacionados à quantidade de água em toda a área, foco do presente trabalho, ficariam a cargo somente da galeria de reforço. A Figura 4.12 mostra como ficou a rede de drenagem na área de estudo após a inserção da galeria de reforço, enquanto a Figura 4.13 apresenta o perfil principal da nova galeria.

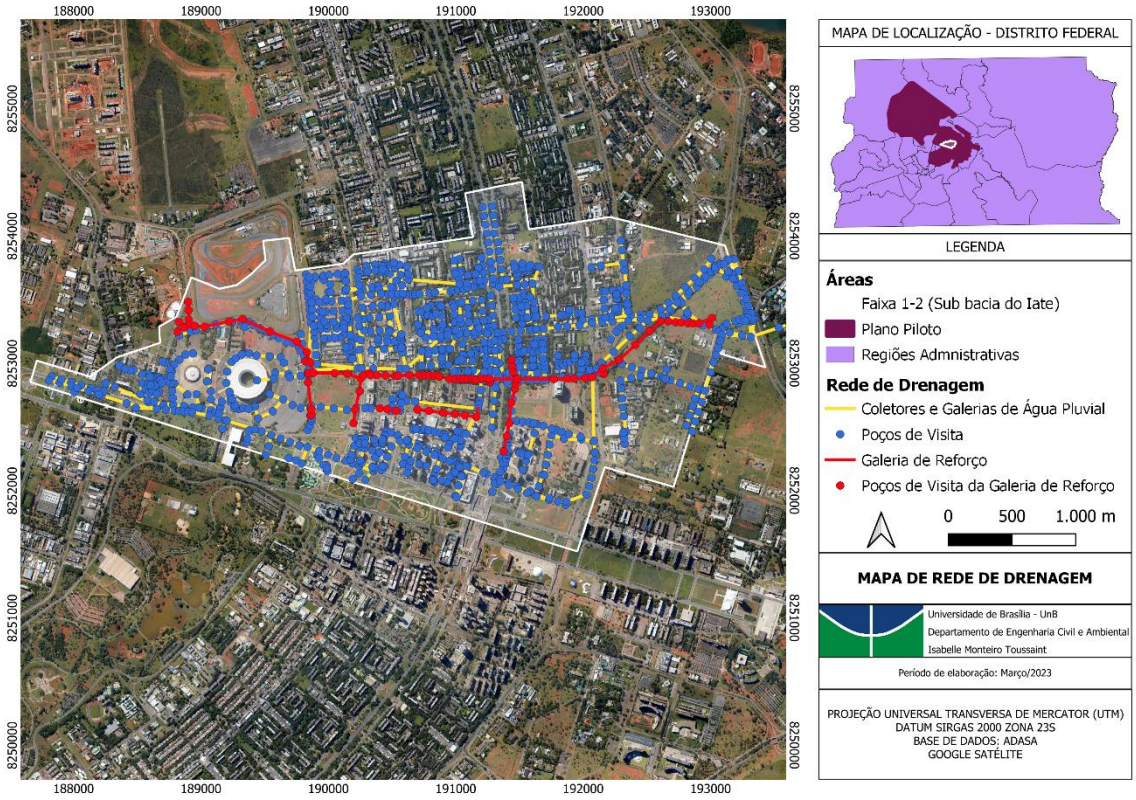


Figura 4.12 – Rede de drenagem na área + galeria de reforço proposta pelo Programa Drenar-DF

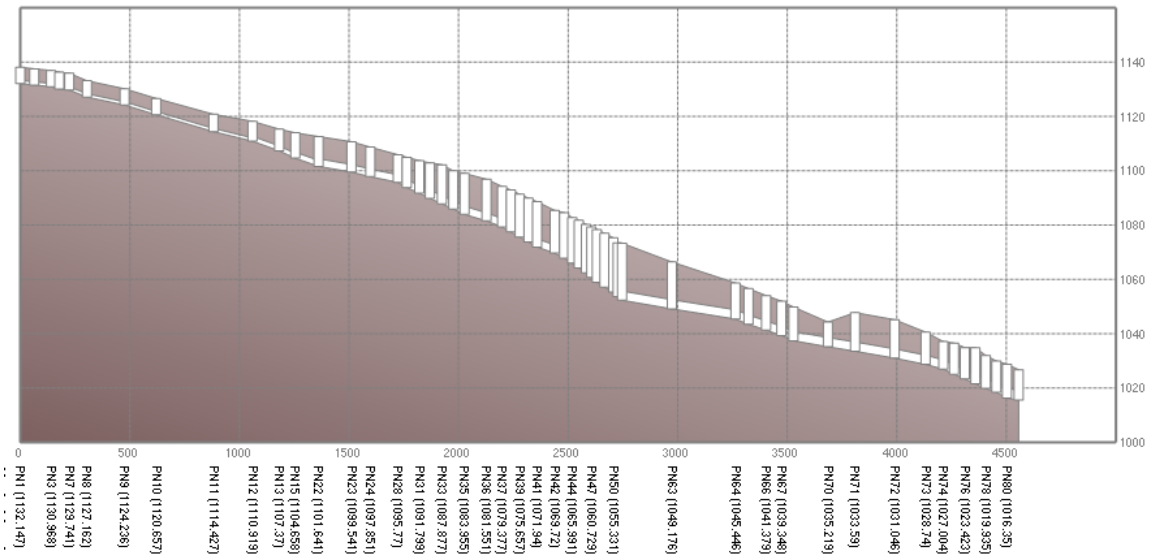


Figura 4.13 – Perfil principal da galeria de reforço proposta pelo Programa Drenar-DF

4.5 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA NO PCSWMM

As simulações hidráulico-hidrológicas foram baseadas nos modelos 1D e 2D do software PCSWMM, disponibilizado para pesquisas pela *Computational Hydraulics International Water* (CHI). Foi possível analisar o comportamento da rede de drenagem e do escoamento superficial quando as chuvas de projetos calculadas no Item 4.3 eram inseridas. Dessa forma, para cada uma das chuvas, foram obtidos resultados diferentes nas análises.

4.5.1 Divisão da área

A área limitada no PCSWMM como sendo a Faixa 1-2 Norte possui 890 ha. Para representar melhor a realidade e calcular a infiltração de forma adequada, a região foi dividida em 1099 sub-bacias.

Conforme recomendado no Manual de Drenagem da Adasa (2018), estudos em bacias com mais de 100 ha devem utilizar o método *Soil Conservation Service* (SCS). De acordo com Canholi (2014) e Rossman (2016 *apud* Cambraia, 2020) tal método visa obter a capacidade de infiltração total do solo por meio do parâmetro Curva-Número (CN), valor tabelado e que depende principalmente do uso e ocupação do solo.

Assim sendo, as 1099 sub-bacias representadas na Figura 4.14 tiveram o CN definido a partir do uso e ocupação do solo na Faixa1-2 Norte, pelo método SCS.



Figura 4.14 – Área de estudo dividida em sub-bacias

4.5.2 Simulação na Modelagem 1D

Os dois cenários apresentados no Item 4.4 foram simulados na modelagem 1D. Tal modelo serviu para analisar o comportamento de toda a rede, obtendo os perfis e os dados de funcionamento de cada conduto e PV. Através do modelo 1D pode-se avaliar a vazão de saída, a quantidades de poços de visitas que sofrem extravasamentos, a sobrecarga de condutos, a velocidade da água e a vazão que passa em cada rede, o tempo de alagamento de cada PV, entre outras características.

4.5.3 Simulação na Modelagem 2D

Assim como no modelo 1D, todos os cenários foram analisados no modelo 2D. Tais simulações servem principalmente para verificar o escoamento superficial e a lâmina d'água acumulada em alguns locais.

O limite da área, os nós gerados pelo PCSWMM, as construções presentes na região e o MDE foram os dados de entrada necessários para gerar uma malha na modelagem 2D. O máximo de células que podem ser geradas na malha 2D é igual a 100.000 (Cavalcante, 2023). No presente trabalho utilizou-se uma resolução de 15 metros na malha de formato hexagonal, para que o número de células ficasse dentro do limite e para que o tempo de execução da simulação de cada cenário não fosse tão longo.

Para interligar a malha criada no 2D com a rede 1D existente, optou-se por ligar os poços de visita da rede 1D com os mais próximos da rede 2D, através da ferramenta *Bottom Orifices*, mais indicada para áreas urbanas de acordo com Cavalcante (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SIMULAÇÃO NA MODELAGEM 1D

Para que fosse possível comparar os resultados de cada cenário, foi necessário apurar as características fundamentais da rede de drenagem em toda área. Isto posto, a Tabela 5.1 apresenta tais propriedades.

Tabela 5.1 – Características da rede de drenagem em ambos os cenários

	Cenário Base	**Cenário Drenar-DF**
Área (ha)	890	890
Número de poços de visita	1104	1196
Número de condutos	1106	1198
Maior diâmetro da tubulação (m)	3	3,6
Menor diâmetro da tubulação (m)	0,3	0,3
Comprimento total da rede de drenagem (Km)	67,84	75,37

Por meio das informações expostas na Tabela 5.1, identifica-se que a galeria de reforço, do Cenário Drenar-DF agregou 92 PVs e condutos, tubulações de até 3,6 m de diâmetro e 7,53 Km de rede para a rede de drenagem da Faixa 1-2 Norte.

Inicialmente, a análise dos resultados se deu ao determinar a vazão de saída no exutório da bacia, de forma a avaliar se a exigência estabelecida pela Adasa (2018), em que a vazão máxima de lançamento é de até 24,4 L/(s.ha) quando o tempo de retorno das chuvas é de 10 anos, estavam sendo obedecidas nos dois cenários.

Como a área delimitada no PCSWMM é de 890 ha, a vazão de saída máxima permitida com base no Manual de Drenagem do DF seria de 21,72 m³/s. A Tabela 5.2 apresenta a vazão de lançamento calculada em cada cenário para as quatro chuvas de projeto inseridas.

Tabela 5.2 – Vazão de saída da rede drenagem para as chuvas analisadas

Tempo de retorno (anos)	**Vazão de saída (m³/s)**	
	Cenário Base	**Cenário Drenar DF**
TR1	1,245	1,234
TR2	10,7	10,38
TR5	49,28	48,32

Tempo de retorno (anos)	Vazão de saída (m³/s)	
	Cenário Base	Cenário Drenar DF
TR10	62,67	66,21

Pela Tabela 5.2 percebe-se que em ambos os cenários, os valores de vazão de saída encontrados nas chuvas de TR 10 anos supera demasiadamente o limite máximo definido pela Adasa, permanecendo superior ao permitido durante um período de 32 minutos.

Cambraia (2020), ao analisar a área de estudo do presente trabalho, também encontrou resultados que mostram que a rede de drenagem atual não possui a capacidade necessária para atender os apontamentos feitos pelo Manual de Drenagem, quando se fala da vazão de saída da sub-bacia para o Lago Paranoá. Porém, como como o lago possui uma alta capacidade de suporte, o fator essencial a ser preservado é a qualidade da água que é direcionada a ele.

É importante destacar que o Programa Drenar-DF possui uma bacia de detenção à jusante da Faixa 1-2 Norte, para onde a galeria de reforço é direcionada. Dessa forma, é possível que tal bacia seja capaz de diminuir os valores de vazão de saída encontrados no Cenário Drenar-DF, uma vez que uma função importante desta medida compensatória é lançar gradualmente no exutório o volume de água capturado.

Tendo em vista que nas situações simuladas com os dois tempos de retorno mais altos a vazão de saída se provou ser maior que a permitida, foi feita uma avaliação de como a rede se comporta com as simulações dos quatro TRs, tanto no Cenário Base quanto no Cenário Drenar-DF, como evidenciado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados sobre o comportamento da rede de drenagem nas simulações das quatro chuvas em ambos os cenários

	Cenário Base				Cenário Drenar-DF			
	Tempo de retorno (anos)							
	1	2	5	10	1	2	5	10
N° de PVs alagados	6	106	443	708	6	101	427	696
PVs alagados (%)	0,54	9,60	40,13	64,13	0,50	8,44	35,70	58,19
N° de PVs em sobrecarga	89	159	519	780	89	155	506	771

	Cenário Base				Cenário Drenar-DF			
	Tempo de retorno (anos)							
	1	2	5	10	1	2	5	10
PVs em sobrecarga (%)	8,06	14,40	47,01	70,65	7,44	12,96	42,31	64,46
Volume máximo extravasado por um PV (m^3)	82	1.223	2.548	8.414	77	1.223	2.548	7.382
Volume total extravasado (m^3)	162	2.811	31.115	94.416	157	2.793	28.637	87.216

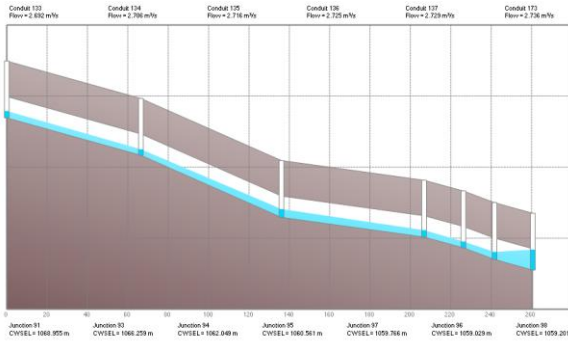
Os resultados expostos na Tabela 5.3 permitem que as análises sejam separadas em dois âmbitos primordiais, os quais representam:

- Comparações das simulações das quatro chuvas em apenas um cenário, ou seja, análise da diferença entre os dados adquiridos em cada TR, mas no mesmo cenário;

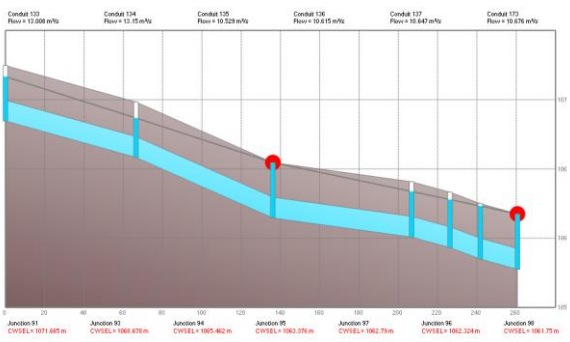
- Comparações das simulações de uma chuva nos dois cenários, ou seja, análise da diferença entre os dados adquiridos com o mesmo TR, mas em cenários distintos.

À vista disso, a primeira observação a respeito das informações contidas na Tabela 5.3, é em relação à quantidade de PVs que sofrem alagamentos e que operam em sobrecarga quando ocorre alguma chuva. Percebe-se que ao avaliar apenas um cenário, a quantidade de poços de visita que extravasam aumenta à medida que o TR se eleva. Desse modo, tanto na rede de drenagem atual quanto na rede com a galeria de reforço, constata-se que chuvas mais intensas podem alagar mais de 50% dos PVs e fazer com que o volume extravasado por eles seja maior que 85.000 m^3, como é visto nos resultados obtidos nas simulações com tempo de retorno de 10 anos.

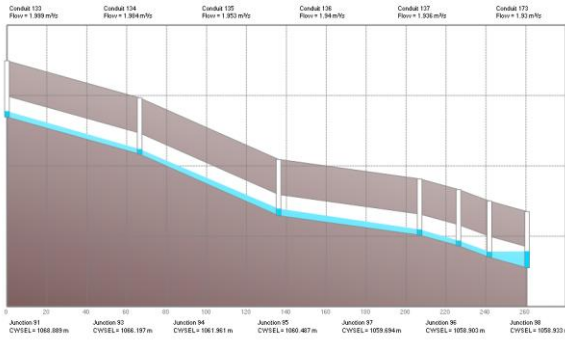
Uma vez que a porcentagem de PVs que se sobrecarregam no Cenário Base é de 47,01% para TR 5 anos e 70,65% para TR 10 anos, pode-se dizer que o número de poços de visita sobrecarregados segue a condição referida no parágrafo acima. O mesmo ocorre no Cenário Drenar-DF, posto que 42,31% e 64,46% dos PVs estão sobrecarregados para os tempos de retorno de 5 e 10 anos, respectivamente. Tais resultados mostram que muitos dos condutos não são capazes de atuar adequadamente em chuvas severas, mesmo com diâmetros maiores, o que pode ser visto na Figura 5.1 que exibe o perfil de parte da rede em ambos os cenários.



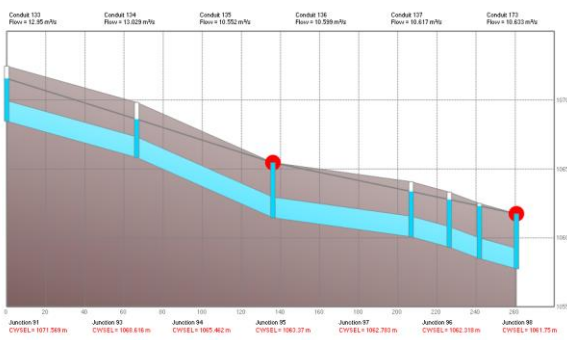
Cenário Base – TR 2 anos



Cenário Base – TR 10 anos



Cenário Drenar-DF – TR 2 anos



Cenário Drenar-DF – TR 10 anos

Figura 5.1 – Perfil dos mesmos condutos em simulações de chuvas diferentes para ambos os cenários

Com base nas imagens da Figura 5.1, nota-se que para TR 2 anos o perfil exposto não apresenta nenhum PV extravasado ou sobrecarregado nos dois cenários, o que não ocorre quando se olha para o perfil simulado no TR de 10 anos. Assim sendo, em uma chuva que possui tempo de retorno igual a 10 anos, o perfil do sistema apresentado mostra dois PVs alagados e condutos que atuam como conduto forçado, não seguindo a recomendação da Adasa (2018) de permanecerem sempre com um tirante máximo igual a 0,82 vezes o diâmetro da tubulação.

Ao comparar o Cenário Drenar-DF com o Cenário Base, identifica-se que para todos os tempos de retorno a galeria de reforço foi capaz de diminuir o número de poços de visitas alagados e em sobrecarga, assim como o volume total extravasado. Contudo, em um TR de 10 anos, apenas 6,19% da rede deixaram de se sobrecarregar e 5,94% dos PVs de sofrerem extravasamentos, o que aponta pouca eficácia no projeto do Programa Drenar-DF nessa situação.

Tabela 5.4 – Porcentagem de PVs que alagam por determinado período

% de PVs que alagam por determinado período								
Tempo que o PV fica alagado	**Cenário Base**				**Cenário Drenar-DF**			
	Tempo de Retorno (anos)							
	1	**2**	**5**	**10**	**1**	**2**	**5**	**10**
Entre 0 e 0,25 h	0,27	8,70	36,23	54,71	0,25	7,60	32,14	50,17
Entre 0,25 e 0,5 h	0,00	0,45	1,72	6,25	0,00	0,42	1,50	5,01
Entre 0,5 e 0,75 h	0,00	0,09	1,18	1,72	0,00	0,08	1,09	1,59
Entre 0,75 e 1 h	0,00	0,00	0,54	0,45	0,00	0,00	0,50	0,42
Maior que 1 h	0,27	0,36	0,45	1,00	0,25	0,33	0,42	0,92

Quando a análise parte para o tempo de extravasamento nos PVs, percebe-se, pelos dados da Tabela 5.4, que o valor é maior à medida que o tempo de retorno aumenta. Tem-se então, 8,7% dos PVs extravasando água por até 15 min no Cenário Base, para uma simulação de TR 2 anos. Nesse mesmo cenário, para um TR de 10 anos, mais de 50% dos PVs extravasam por até 15 min. No Cenário do Programa Drenar-DF a porcentagem de poços de visita que alagam por até 15 min é de 7,60% para TR 2 anos e 50,17% para TR 10 anos. Também é possível perceber que, em ambos os cenários, a minoria dos PVs extravasa por mais de 45 min, visto que menos de 2% dos poços de visita apresentaram esse resultado, tanto no Cenário Base quanto no Drenar-DF.

Tabela 5.5 – Porcentagem de PVs que se sobrecarregam por determinado período

% de PVs que se sobrecarregam por determinado período								
Tempo de sobrecarga no PV	**Cenário Base**				**Cenário Drenar-DF**			
	Tempo de Retorno (anos)							
	1	**2**	**5**	**10**	**1**	**2**	**5**	**10**
Entre 0 e 0,25 h	0,09	2,81	24,91	34,15	0,08	2,50	23,29	32,97
Entre 0,25 e 0,5 h	0,00	1,72	7,61	18,93	0,00	1,34	5,84	15,86
Entre 0,5 e 0,75 h	0,09	0,82	2,99	3,62	0,08	0,75	2,59	3,01
Entre 0,75 e 1 h	0,00	0,45	0,91	2,45	0,00	0,42	0,75	2,00
Maior que 1 h	7,88	8,61	10,60	11,50	7,26	7,93	9,77	10,52

Como pode ser visto na Tabela 5.5, a porcentagem de PVs que sofrem sobrecarga é distribuída principalmente nas extremidades dos intervalos delimitados, entre PVs que possuem um tempo de sobrecarga de até 15 min ou maior que 1 h (com exceção dos resultados encontrados nas simulações de TR 10 anos). Dessa forma, juntamente com os resultados expostos na Tabela 5.4, pode-se dizer que a galeria de reforço proposta pelo

Programa Drenar-DF foi capaz de diminuir o tempo em que os PVs ficam alagados e sobrecarregados, mas assim como na redução de extravasamentos, não se mostrou tão eficaz.

A Figura 5.2 e a Figura 5.3 representam os locais onde os PVs alagados estão espalhados, assim como o tempo de extravasamento de cada um deles. As imagens retratam as chuvas com tempo de retorno de 2 e 10 anos, para ser possível verificar a diferença entre o segundo evento mais comum e o mais extremo, dentre os simulados.



Figura 5.2 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 2 anos – Cenário Base



Figura 5.3 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 10 anos – Cenário Base

A partir da Figura 5.2 e da Figura 5.3, nota-se que quando há uma precipitação com tempo de retorno de 2 anos, embora a rede de drenagem atual tenha alguns pontos sobrecarregados, em geral as macrogalerias têm um bom funcionamento. No entanto, ao analisar uma chuva com TR de 10 anos, verifica-se que as quatro macrogalerias sofrem extravasamentos, indicando que para eventos mais intensos a rede é ineficiente.

A Figura 5.4 e a Figura 5.5 representam a situação da rede de drenagem atual com a galeria de reforço, proposta pelo Programa Drenar-DF, nas simulações de chuvas com tempo de retorno de 2 e 10 anos.



Figura 5.4 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 2 anos – Cenário Drenar-DF



Figura 5.5 – Tempo de extravasamento nos poços de visita em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

Os retângulos vermelhos destacados na Figura 5.4 e na Figura 5.5 indicam alguns dos locais onde o tempo de extravasamento diminuiu do Cenário Base para o Cenário Drenar-DF. Observa-se que a galeria de reforço proposta como intervenção não sofreu extravasamento em nenhum dos tempos de retorno. Entretanto, mesmo com algumas melhorias na rede de drenagem como um todo, a eficácia da galeria de reforço se mostrou baixa, principalmente nas quadras de numeração final 1, 2, 3 e 4. Como a rede adicional proposta pelo programa possui PVs de profundidade extremamente elevadas, em torno de 3 a 21 m, eram esperados resultados mais promissores em relação à redução de alagamentos.

A Figura 5.6 mostra perfis que, mesmo após a inserção da galeria de reforço na área, permanecem alagados em uma chuva com tempo de retorno de 10 anos.

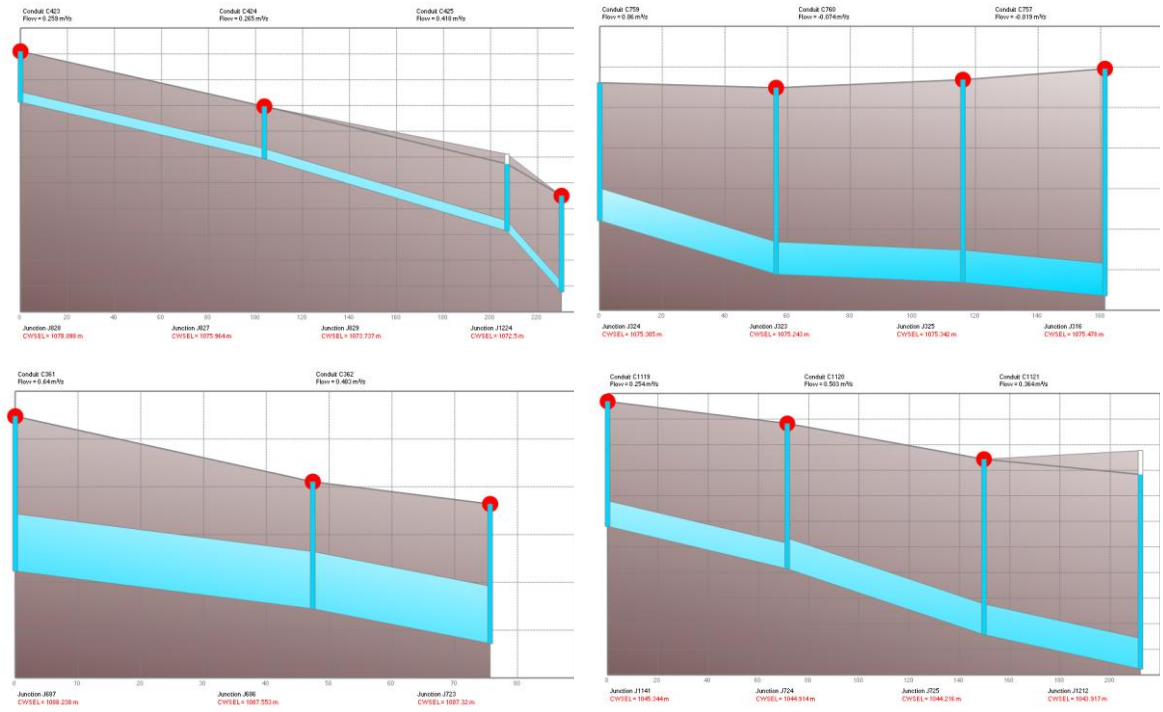


Figura 5.6 – Perfis de diferentes condutos e PVs que permanecem alagados no Cenário Drenar-DF em TR 10 anos

Tabela 5.6 – Porcentagem de condutos que apresentam velocidade máxima entre os intervalos determinados

% de condutos que apresentam velocidade máxima entre os intervalos determinados								
Velocidade máxima nos condutos	**Cenário Base**				**Cenário Drenar-DF**			
	Tempo de Retorno (anos)							
	1	**2**	**5**	**10**	**1**	**2**	**5**	**10**
Menor que 1 m/s	67,63	33,09	12,12	7,32	66,19	32,64	12,19	7,68
Entre 1 e 3 m/s	31,10	51,27	52,17	48,92	32,97	51,50	50,75	46,99
Entre 3 e 6 m/s	1,18	15,28	29,75	35,71	0,75	15,53	30,97	35,14
Maior que 6 m/s	0,09	0,36	5,97	8,05	0,08	0,33	6,09	10,18

Outro parâmetro a ser estudado é a velocidade máxima da água na rede de drenagem. Pelos dados da Tabela 5.6, avalia-se que apenas na chuva com TR de 1 ano a maioria dos condutos apresentou velocidade máxima de 1 m/s, limite mínimo estabelecido pelo Manual de Drenagem da Adasa (2018). Em uma chuva de TR 10 anos, o valor da velocidade máxima na rede foi de 11,69 para Cenário Base e 11,52 m/s para Cenário Drenar-DF, quase o dobro do limite máximo recomendado pela Adasa de 6 m/s.

Assim sendo, é possível afirmar a partir dos resultados apresentados na Tabela 5.6, a medida de intervenção proposta pelo programa não foi suficiente para fazer com que a velocidade máxima ficasse entre os limites estabelecidos pela Adasa. As Figura 5.7 e Figura 5.8 mostram a velocidade máxima encontrada em cada conduto da Faixa 1-2 Norte para as simulações com tempo de retorno de 10 anos.



Figura 5.7 – Velocidade máxima da água nos condutos em TR 10 anos – Cenário Base



Figura 5.8 – Velocidade máxima da água nos condutos em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

Através da Figura 5.7 e Figura 5.8, simuladas com TR de 10 anos, verifica-se que algumas partes das macrogalerias escoam água com velocidade acima de 6 m/s, principalmente a

macrogaleria 3. A galeria de reforço do Programa Drenar-DF também possui alguns condutos em que a velocidade da água está acima do limite. Tais figuras indicam que a rede de drenagem da área não está dimensionada adequadamente para esses eventos. Desse modo, é importante se atentar aos problemas que podem ser causados, uma vez que velocidades muito baixas podem propiciar deposição de sedimentos ao longo do sistema ao passo que velocidades muito altas ocasionam um maior desgaste da superfície da tubulação.

5.2 SIMULAÇÃO NA MODELAGEM 2D

Posteriormente às simulações realizadas na modelagem 1D, foi possível realizar uma conexão com o modelo 2D, para comparar os cenários e verificar quais são as maiores alturas que o escoamento superficial alcança na região. As simulações no modelo 2D foram executadas para os tempos de retorno de 2 e 10 anos e os dados obtidos estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Dados sobre o comportamento do escoamento superficial nas simulações das chuvas de TR 2 e 10 anos, em ambos os cenários

	Cenário Base		**Cenário Drenar-DF**	
	Tempo de retorno (anos)			
	2	**10**	**2**	**10**
Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s)	1,1	4,64	1,1	4,66
Altura máxima da lâmina d'água (m)	1,02	4,58	0,99	4,57

Os valores de velocidade máxima do escoamento superficial analisados ficaram entre 1,1 e 4,66 m/s. Nas simulações realizadas com tempo de retorno de 2 anos, a velocidade máxima do escoamento superficial ficou dentro do limite estabelecido pela Adasa (2018), a qual menciona no seu Manual de Drenagem do DF que tal parâmetro deve ser até 3 m/s nas vias, para evitar erosão do pavimento, e 1,5 m/s, em locais onde há movimento de pedestres. Nas simulações feitas com precipitações de TR 10 anos, a velocidade máxima ultrapassa o limite permitido, mostrando que em eventos mais severos, a água percorre de forma mais rápida pela superfície.

Vale ressaltar que apesar da velocidade máxima de escoamento superficial nas simulações de TR 10 ter excedido o valor determinado pela Adasa, apenas 2,21% das células geradas na malha 2D apresentaram uma velocidade maior que 1,5 m/s, no Cenário Base. Esse valor cai para 1,84% quando se analisa o Cenário Drenar-DF. Isto posto, pode-se dizer que apesar de algumas células da malha terem apresentado uma velocidade alta, a maioria está dentro dos limites permitidos pelo Manual de Drenagem.

No quesito de altura da lâmina d'água acumulada pelo escoamento superficial, o maior valor encontrado nas simulações foi de 4,58 m. Nos dois cenários, a célula da malha 2D que apresentou a maior altura da lâmina foi a mesma, ficando próxima à uma construção que impede a passagem da água naquele local. A Figura 5.9 mostra onde está localizada a célula referida e, uma explicação viável para apenas ela ser maior que 4 m (altura bastante elevada para uma lâmina d'água) na simulação de TR 10, é uma possível falha do Modelo Digital de Elevação neste ponto.



Figura 5.9 – Célula que apresentou maior altura da lâmina d'água acumulada em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

As Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 mostram os resultados obtidos nas simulações para os tempos de retorno de 2 e 10 anos, uma vez que são os que apresentam os alagamentos mais comuns e mais extremos, dentre os simulados.

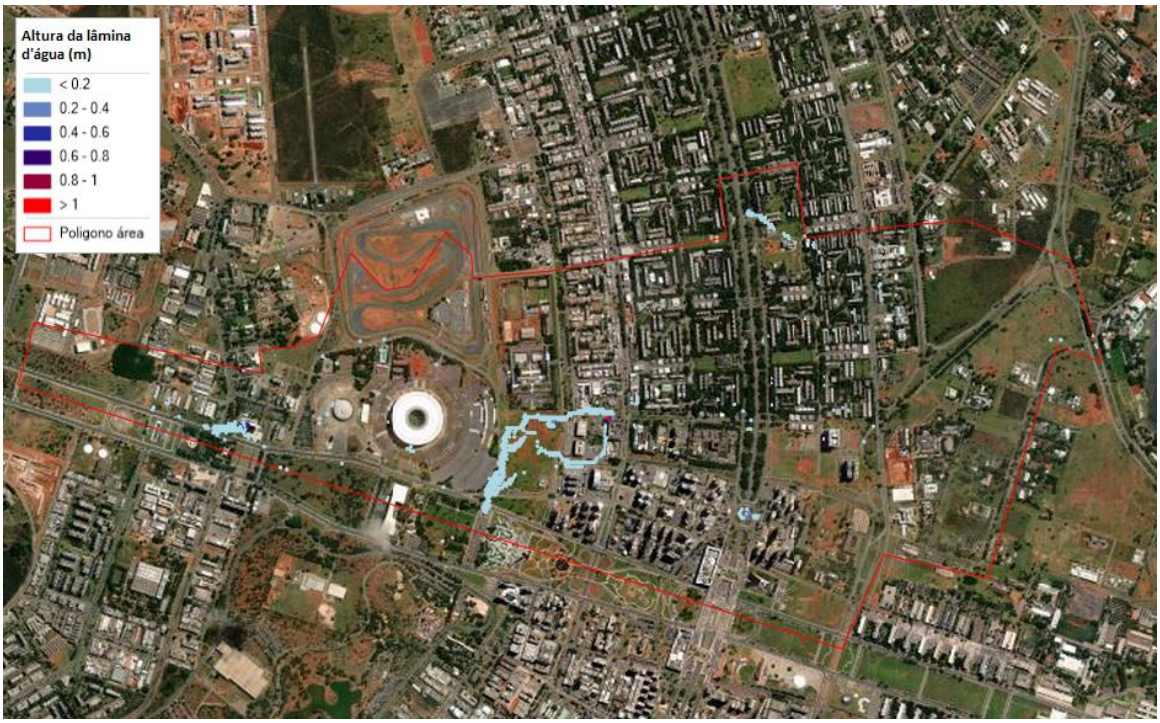


Figura 5.10 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 2 anos – Cenário Base



Figura 5.11 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 2 anos – Cenário Drenar-DF



Figura 5.12 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 10 anos – Cenário Base



Figura 5.13 – Comportamento do escoamento superficial e máxima lâmina acumulada em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

Ao comparar as simulações na modelagem 2D, nota-se que quanto maior é o TR utilizado, mais partes da superfície são tomadas pelo escoamento superficial. A maioria das células geradas na malha 2D apresentaram uma lâmina d'água com altura máxima de 5 cm, no entanto, percebe-se que em alguns lugares essa lâmina é maior que 40 cm. Tal situação ocorre em menos de 1% das células totais, estando próximas principalmente de obstruções que impossibilitam o fluxo do escoamento.

Para verificar a eficiência da galeria de reforço do Programa Drenar-DF em relação ao escoamento superficial, foram separados três setores principais por onde tal galeria percorre, como exposto da Figura 5.14 até a Figura 5.19. Os retângulos vermelhos demarcados nestas figuras representam alguns pontos onde houve diminuição na altura da lâmina d'água após a inserção da galeria de reforço.

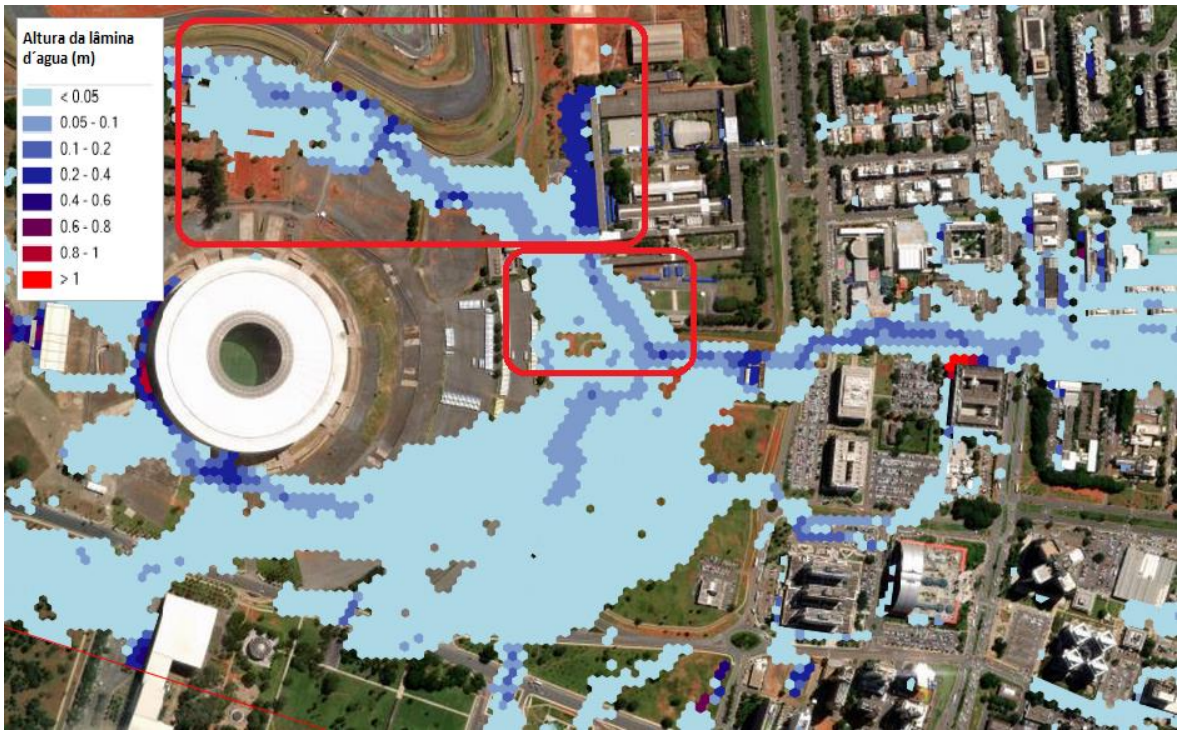


Figura 5.14 – Escoamento superficial no setor 1 em TR 10 anos – Cenário Base

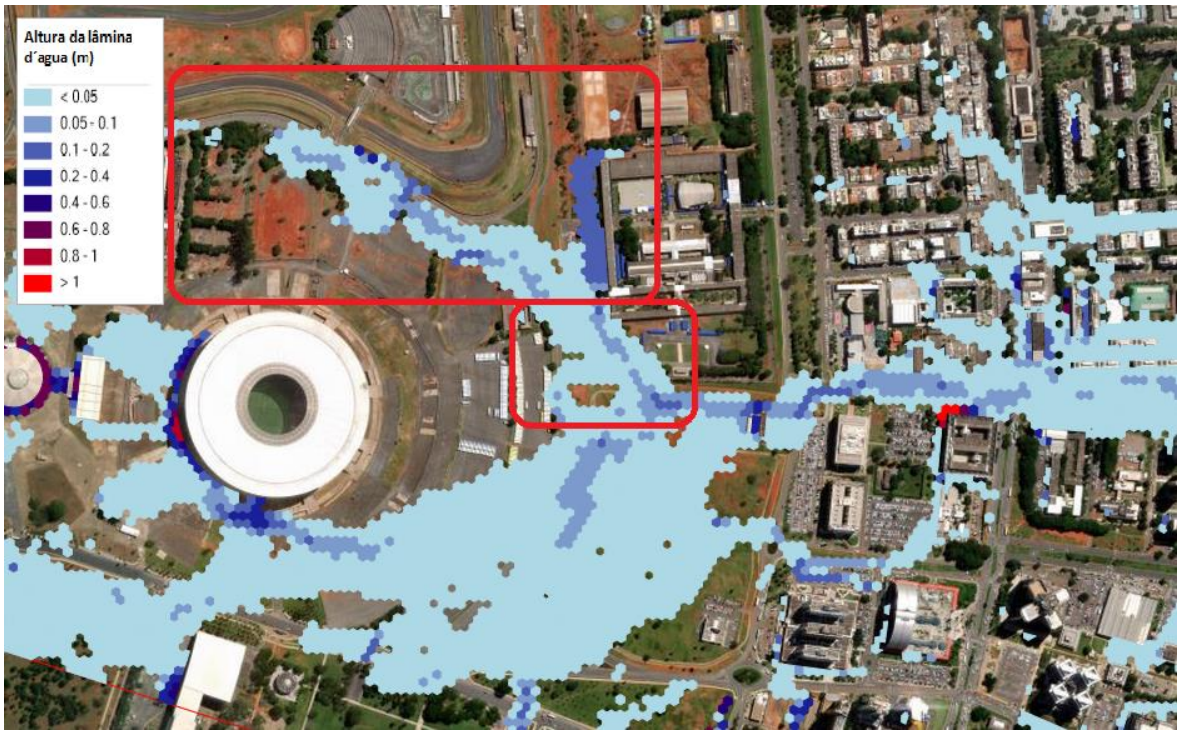


Figura 5.15 – Escoamento superficial no setor 1 em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

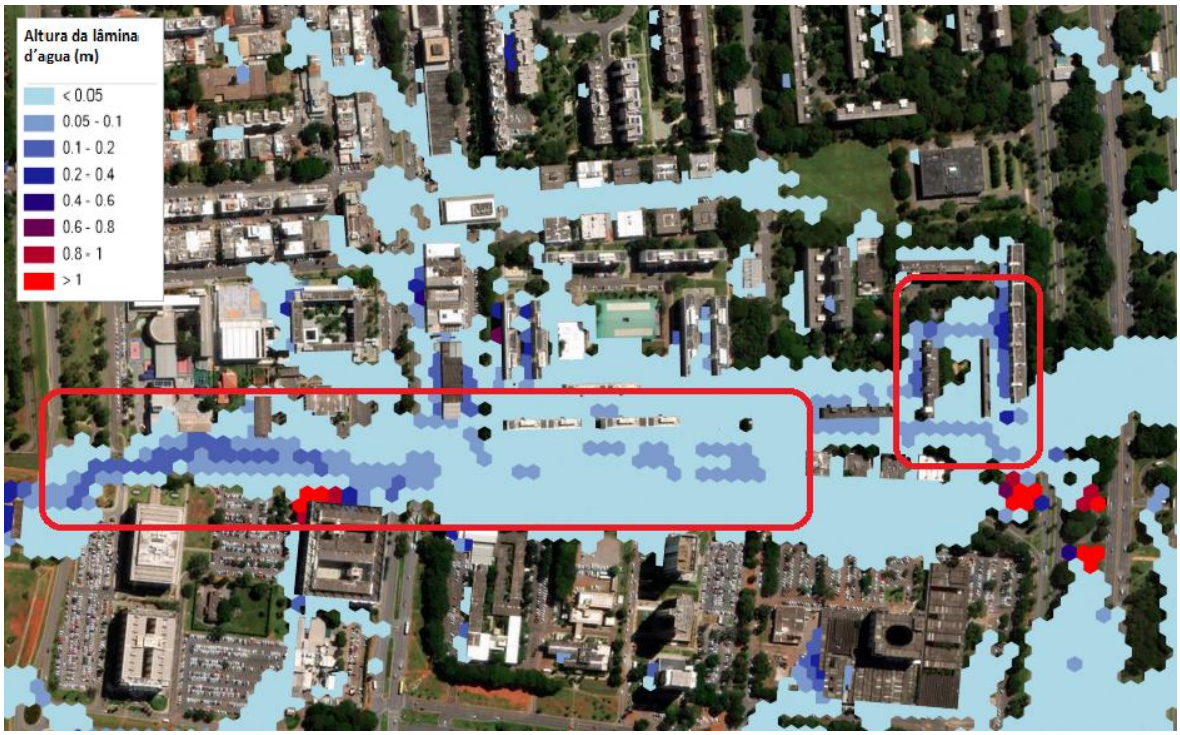


Figura 5.16 – Escoamento superficial no setor 2 em TR 10 anos – Cenário Base



Figura 5.17 – Escoamento superficial no setor 2 em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

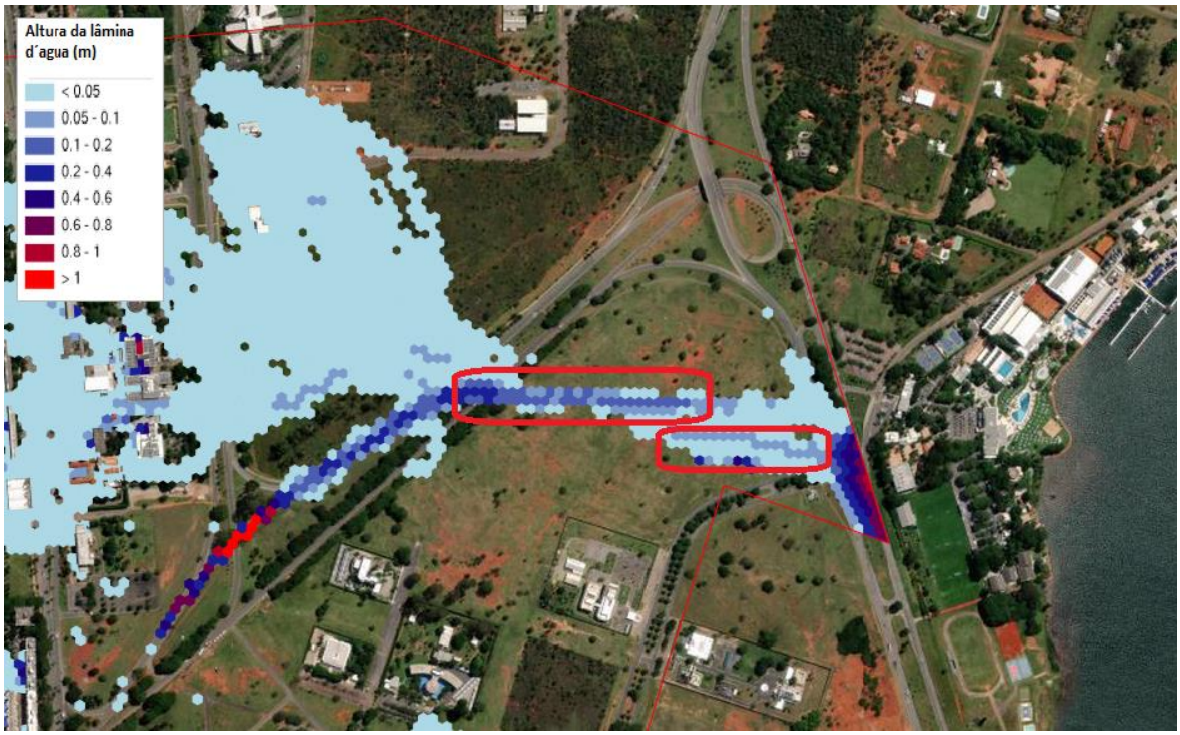


Figura 5.18 – Escoamento superficial no setor 3 em TR 10 anos – Cenário Base

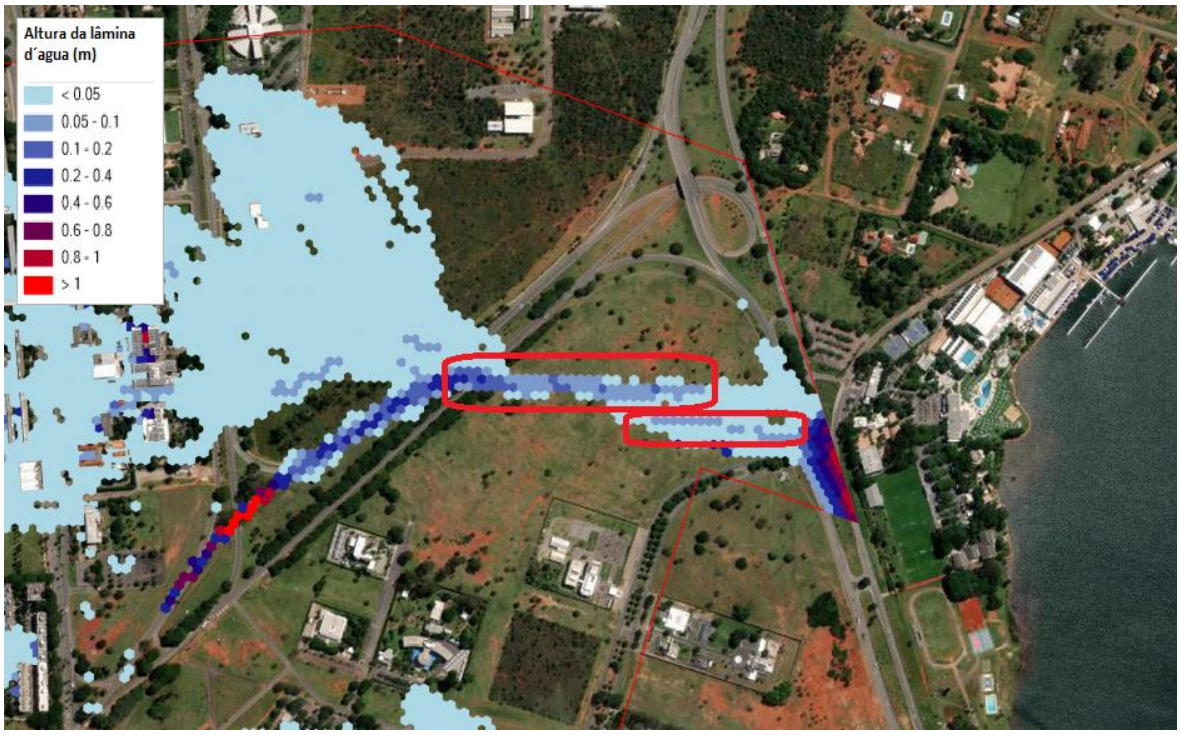


Figura 5.19 – Escoamento superficial no setor 3 em TR 10 anos – Cenário Drenar-DF

Por meio da Figura 5.14 até a Figura 5.19, percebe-se que a intervenção proposta como melhoria da rede de drenagem no Cenário Drenar-DF, surtiu efeito positivo na redução da altura da lâmina d'água do escoamento superficial em alguns locais. Todavia, a nova rede não foi capaz de eliminar totalmente os alagamentos existentes na região, mostrando que os problemas enfrentados mesmo em chuvas mais amenas, não serão resolvidos apenas com essa medida.

Vale salientar que foi identificado o problema de que o limite da área de estudos implementado nas simulações atuou como uma barreira para o escoamento superficial. Dessa forma, as águas se acumularam nas bordas de tal limite, fazendo com que perto dele fossem encontradas algumas das células que possuíam altura da lâmina maior que 80 cm.

Medidas compensatórias espalhadas na área de estudo auxiliariam a infiltração e o amortecimento dos volumes de água escoado, proporcionando uma redução na velocidade de escoamento e na vazão de água que é direcionada à jusante da sub-bacia. Dessa maneira, pode-se dizer que a inclusão de dispositivos voltados a uma drenagem sustentável permitiria com que a rede de drenagem existente na região não se sobrecarregasse tanto.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo monitorar a quantidade das águas de drenagem na sub-bacia urbana do Iate Clube, por meio de simulações no software PCSWMM, usando modelagens 1D e 2D. Através dessas simulações foi possível analisar o comportamento de dois cenários, um com base apenas na rede de drenagem atual, chamado de Cenário Base, e outro baseado na inserção de uma galeria de reforço na rede da área, denominado de Cenário Drenar-DF.

Os resultados obtidos na modelagem 1D mostram que quanto maior o tempo de retorno das chuvas, maior é o comprometimento da rede em ambos os cenários. Isto posto, a precipitação com tempo de retorno de 10 anos é responsável pela maior porcentagem de PVs alagados, PVs sobrecarregados, volume extravasado, tubulações que atuam como condutos forçados, pelo maior tempo de extravasamento nos PVs e pela maior velocidade da água nos condutos.

Entretanto, percebe-se que até mesmo a chuva mais amena, com tempo de retorno de 1 ano, causa extravasamento na rede e já possui condutos trabalhando em carga. A chuva com TR de 1 ano causa sobrecarga em 8,06% dos poços de visita da rede, enquanto a chuva de TR 10 anos causa sobrecarrega em mais de 70% deles, no caso do Cenário Base.

Nos dois cenários simulados as vazões de lançamento para os tempos de retorno de 5 e 10 anos foram maiores que a permitida pela Adasa (2018), o que também acontece quando se analisa a velocidade máxima encontrada nos condutos, principalmente nas simulações com TR de 10 anos.

Na modelagem 2D, foram avaliadas a velocidade de escoamento superficial e a altura máxima da lâmina d'água acumulada por ele. Verificou-se que em ambos os cenários, para o tempo de retorno de 10 anos, a velocidade do escoamento na superfície ultrapassou a máxima estabelecida no Manual de Drenagem do DF (2018).

No quesito da altura da lâmina d'água, percebeu-se que grande parte da Faixa 1-2 Norte é tomada pelo escoamento em eventos de precipitação com TR de 10 anos. Mesmo a maioria das células geradas da malha 2D apresentarem uma lâmina de água de 5 cm, em uma simulação feita com tempo de retorno de 10 anos, é possível analisar que em alguns locais a altura da lâmina chega a ser de 60 cm, especialmente perto de construções que impedem o fluxo do escoamento.

Os pontos que apresentaram altura de lâmina d'água maior que 80 cm também estão próximos a obstruções, porém aparecem em menor quantidade. Nesse contexto, um problema identificado foi que o limite da área de estudos implementado nas simulações, atuou como uma barreira para o escoamento superficial. Desse modo, as águas se acumularam nas bordas de tal limite, fazendo com que perto dele fossem encontradas algumas das células que possuíam altura da lâmina maior que 80 cm.

A partir de todos os resultados obtidos e analisados nos modelos 1D e 2D, pode-se dizer que a intervenção proposta no Programa Drenar-DF é capaz de reduzir alguns dos problemas de drenagem na sub-bacia do Iate. No entanto, mesmo a galeria de reforço sugerida pelo programa tendo PVs de profundidade extremamente elevadas, em torno de 3 a 21 m, a redução de poços de visita que alagam foi de no máximo 6% em relação ao Cenário Base, enquanto apenas 7,2 m³ foram reduzidos do volume total extravasado. Dessa maneira, implantar a galeria de reforço mobiliza muitos recursos para poucos ganhos.

Para tentar potencializar a nova galeria, sugere-se uma maior interligação entre ela e a rede atual, uma vez que no projeto Drenar-DF há poucos locais em que os condutos antigos estão sendo interligados com os novos.

Assim como avaliado no estudo de Cambraia (2020), recomenda-se a utilização de formas combinadas de medidas compensatórias, espalhadas em diferentes pontos da região estudada. Isto posto, seria possível permitir uma maior infiltração e um menor escoamento superficial, proporcionando uma intensificação na redução do pico de vazão, da quantidade de poços de visita extravasados e dos demais problemas de drenagem encontrados na área.

Como recomendação para futuros trabalhos, sugere-se que haja uma melhora na base de dados da Novacap, visto que diversos PVs da região não tinham as informações básicas necessárias para serem inseridos no PCSWMM. Também recomenda-se que seja utilizado um novo Modelo Digital de Elevação, com melhores resoluções para refinar a malha, uma vez que o software utiliza o MDE para diversas análises e para a obtenção de vários dados das simulações. Por fim, é recomendado que sejam feitas simulações estudando a bacia de detenção do Programa Drenar-DF para uma avaliação mais específica de tal medida compensatória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento. (2011). Resolução nº 9, de 8 de abril de 2011. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais. Diário Oficial do Distrito Federal, Brasília, 8 abr. 2011.

Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento. (2018). Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal. Edição revista e atualizada. Brasília, DF: Adasa.

Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal, (2022). Disponível em: <https://www.Adasa.df.gov.br/drenagem-urbana/competencia />. Acesso em 08 de setembro de 2022.

AGOSTINHO, M.S.P; POLETO, C. (2012). "Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana: Dispositivos". *HOLOS Environment*, 12(2), 121-131.

AGRA, S.D. (2001). Estudo Experimental de Microrreservatórios para Controle do Escoamento Superficial. Dissertação de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 122p.

ALMEIDA, I.C. (2020). Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana: Uma Proposta para a Bacia Hidrográfica do Córrego São Pedro, em Juiz De Fora – MG. Trabalho Final de Curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenharia Ambiental e Sanitária, Juiz de Fora, MG, 64p.

ARAÚJO, A.S. (2018). Análise da Rede de Drenagem da Região do Lago Norte – DF. Monografia de Projeto Final 1, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 42p.

BAPTISTA, M.B. (2007). Águas Pluviais: Técnicas Compensatórias para o Controle de Cheias Urbanas: Guia Do Profissional em Treinamento: Nível 2 e 3. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.), ReCESA, Belo Horizonte, MG, 56p.

BARBOSA JUNIOR, A.P. (2019). Drenagem Urbana Sustentável: Estudo de Caso no Setor Habitacional de Taguatinga Sul – DF. Monografia De Projeto Final 2, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 93p.

BRASIL. (2001). Lei Federal Nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Estabelece Diretrizes Gerais da Política Urbana e dá Outras Providências. Diário Oficial da União. Brasília, 2001.

BRASIL. (2012). Lei Federal Nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC. Diário Oficial da União. Brasília, 2012.

BRASIL. (2020). Lei Federal Nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico e Altera a Lei Nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) Competência para Editar Normas de Referência sobre o Serviço de Saneamento. Diário Oficial da União. Brasília, 2020.

Caesb – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, (2022). Resumo de Dados Pluviométricos Mensais. Disponível em:

<https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/Relatorios/#/mensal/pluviometria/1547029>. Acesso em 18 de setembro de 2022.

CAMBRAIA, M.T.C. (2020). Estudo do Manejo de Águas Pluviais na Bacia do Iate Clube, Brasília/DF. Monografia de Projeto Final 2, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 86p.

CAMPOS, A.L; CUBAS, S.A. (2019). "Proposta de Implementação de Dispositivos da Drenagem Sustentável na Rede de Águas Pluviais do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná". Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hidrícos, Foz do Iguaçu, PR.

CASA ABRIL. (2020). Telhado Verde é uma Necessidade Sustentável e Cheia de Benefícios. Disponível em: <https://casa.abril.com.br/sustentabilidade/telhado-verde-e-uma-necessidade-sustentavel-e-cheia-de-beneficios/>. Acesso em 07 de setembro de 2022.

CAVALCANTE, G. E. S. (2023). Análise do sistema de drenagem da Asa Norte, Brasília/DF, e das proposições feitas pelo programa Águas do DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

CHRISTOFIDIS, H.V. (2010). Drenagem Urbana Sustentável: Análise do uso do Retrofit. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, DF, 165p.

COSTA, M.E.L. (2013). Monitoramento e Modelagem das Águas da Drenagem Urbana na Bacia do Lago Paranoá. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 203p.

DRUMOND, P. (2022). Croqui do Funcionamento do Sistema de Drenagem Residencial com Microrreservatório Entrerrado. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-319-Croqui-do-funcionamento-do-sistema-de-drenagem-residencial-com_fig2_336605858>. Acesso em 07 de setembro de 2022.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2004). Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

FILHO, G.M.M. *et al*. (2012). "Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades". Revista de Ciências Ambientais, Vol. 6, n. 2, p. 35-47.

FLETCHER, T.D. *et al*. (2015). "*SUDS, LID, BMPS, WSUD and More – The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage*". *Urban Water Journal*, Vol. 12, n. 7, p. 525-542.

GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação. (2012). Geoportal. Disponível em: < https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>. Acesso em 14 de setembro de 2022.

GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2009). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Volume 8, Relatório de Produto 4, Diagnóstico do Sistema de Drenagem, Tomo 1. Concremat Engenharia, Brasília, DF.

GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2009). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Volume 2, Manual Técnico 2 e 3, Manual de Drenagem Urbana. Concremat Engenharia, Brasília, DF.

GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2008). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Volume 6, Relatório de Produto 3. Concremat Engenharia, Brasília, DF.

GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2008). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Volume 4, Relatório de Produto 2, Caracterização. Concremat, Brasília, DF.

GDF – Governo do Distrito Federal. (2017). Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Tomo V, Produto 2, Diagnóstico Situacional - Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas, Versão Final. Serenco, Brasília, DF.

GOMES, T. L. L. (2019). Análise dos problemas de drenagem urbana no Distrito Federal: proposição de ampliação do uso da Lagoa de detenção do Guará. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.

HOFFMANN, R.C *et al*. (2011). "A Importância do Planejamento Urbano e da Gestão Ambiental para o Crescimento Ordenado das Cidades". Revista de Engenharia e Tecnologia, Vol. 3, n. 3, p. 70-81.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica. (2022). Conheça o Brasil – População População Rural e Urbana. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html#:~:text=De%20acordo%20com%20dados%20da,brasileiros%20vivem%20em%20%C3%A1reas%20rurais>. Acesso em 25 de agosto de 2022.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). Gráficos Climatológicos, Distrito Federal, Brasília (83377). Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>. Acesso em 18 de setembro de 2022.

IPHAN – Instituto Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. (2015). Parecer Técnico nº 01/2015, Projeto Drenar DF – Intervenções no Conjunto Urbanístico de Brasília. Grupo Técnico Executivo, Brasília, DF.

LOURENÇO, R. (2014). Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Engenharia Civil - Especialização em Construção Urbana, Coimbra, Portugal, 164p.

MACEDO, R.L. (2010). Estudo Hidrológico da Bacia do Rio Negrinho – SC Utilizando o HEC-HMS. Trabalho para Conclusão do Curso de Graduação 2, Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópois, SC, 50p.

MELO, T.A.T. (2016). "Trincheira de Infiltração como Técnica Compensatória no Manejo das Águas Pluviais Urbanas". Ambiente Construído, Vol. 16, n. 3, p. 53-72.

Menezes, P.H.J. (2010). Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do lago Paranoá. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, 133 p.

METRÓPOLES. (2021). Estação do Metrô-DF fica Alagada após Forte Chuva. Disponível em: <https://www.metropoles.com/distrito-federal/estacao-do-metro-df-fica-alagada-apos-forte-chuva>. Acesso em 16 de setembro de 2022.

MOREIRA, I.A. (2005). Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão com Dados de Radar e Pluviômetros. Dissertação Parcial de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, PR, 96p.

NUNES, D.M. *et al*. (2017). "Aplicação de Técnicas Compensatórias no Controle dos Escoamentos Superficiais: Estudo de Caso em Loteamento Residencial em Jacarepaguá, Rio de Janeiro". Revista Internacional de Ciências, Vol. 07, n. 1, p. 3-21.

OLIVEIRA, A.N. *et al*. (2017). "Avaliação de Usos de Técnicas Compensatórias em Sub Bacia do Lago Paranoá - Brasília-DF". Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópois, SC.

ONU – Organização das Nações Unidas. (2022). ONU-Habitat: População Mundial será 68% Urbana até 2050. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-populacao-mundial-sera-68-urbana-ate-2050#:~:text=No%20ritmo%20atual%2C%20a%20estimativa,crescer%20para%2068%25%20at%C3%A9%202050>. Acesso em 26 de agosto de 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. (2022). *World Cities Report 2022 - Envisaging the Future of Cities. United Nations Human Settlements Programme,* 422p.

PMPA – Prefeitura Municipal de Porto Alegre. (2005). Plano Diretor de Drenagem Urbana. Manual de Drenagem Urbana, Volume VI. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

POLETO, C. (2011). "SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*): Uma Contextualização Histórica". Revista Thema, Vol. 8, n. 1, p. 1-12.

POMPÊO. C.A. (2000). "Drenagem Urbana Sustentável". Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 5, n. 1, p. 15-23.

RIBEIRO, A.M. (2014). BMP's em Drenagem Urbana - Aplicabilidade em Cidades Brasileiras. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Engenharia Hidráulica e Ambiental, São Paulo, SP, 104p.

RIGHETTO, A. M. (2009). Manejo De Águas Pluviais Urbanas. Projeto PROSAB, Editora ABES, Rio de Janeiro, 398p.

ROSSMAN, L. A. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual. Volume I – Hydrology (Revised). Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division. New York. US EPA.* 233p.

SILVA, J.P. (2007). Estudos Preliminares para Implantação de Trincheiras de Infiltração. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 167p.

SILVEIRA, A.L.L. (2018). "Trama Verde-Azul e Drenagem Urbana Sustentável". In: LADWIG, Nilzo Ivo; SCHWALM, Hugo (Org.) Planejamento e gestão territorial: a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos. EDIUNESC, Criciúma, SC, Cap. 3, p. 69-91.

SOUZA, F.P. (2014). Monitoramento e Modelagem Hidrológica da Sub-Bacia do Lago Paranoá - Brasília/DF – E avaliação de Bacias de Detenção. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 139p.

SOUZA, V.C.B. (2013). “Gestão da Drenagem Urbana no Brasil: Desafios para a Sustentabilidade”. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais – GESTA, Vol. 1, n. 1, p. 52-72.

TAVANTI, D.R.; BARBASSA, A.P. (2010). Contribuições do Planejamento Urbano às Questões Hidrológicas e Ambientais. Disponível em: <http://pluris2010.civil.uminho.pt/Actas/PDF/Paper161.pdf>. Acesso em 05 de setembro de 2022.

TERRACAP - Companhia Imobiliária de Brasília. (2021). Projeto Executivo de Readequação de Drenagem da Faixa 1-2 Norte - Drenar-DF - RA I - Brasília - DF. DRN, Projeto Executivo de Drenagem Pluvial, Brasília, DF.

TUCCI, C.E.M. (2005). Gestão de Águas Pluviais Urbanas. Saneamento para todos, 4º volume. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Brasília, DF, 197p.

TUCCI, C.E.M. (2008). Águas Urbanas. Estudos Avançados, Vol. 22, n. 63, p. 97–112.

TUCCI, C.E.M. (2012). Gestão da Drenagem Urbana. Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 48, Brasília, DF, 54p.

TUCCI, C.E.M. (2016). Regulamentação da Drenagem Urbana no Brasil. REGA, Vol. 13, n. 1, p. 29-42.

TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. (2003). Inundações Urbanas na América Do Sul. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, RS, 156p

TUCCI, C.E.M.; MENDES, C.A. (2006). Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Brasília, DF, 302p.

VOLKEN, N.J. (2018). Avaliação de Bacias de Detenção Estudo de Caso da Bacia do Guará - DF. Monografia de Projeto Final 1, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 44p.