

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**A LAGOA DE DETENÇÃO DO GUARÁ – ESTUDO DAS
VAZÕES E QUALIDADE DA ÁGUA AFLUENTES E
EFLUENTES**

LUÍSA ALVES DE SOUSA DINIZ

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE, PhD

COORIENTADORA: LETÍCIA LEITE DE FRANÇA LOPES

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL II**

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

A LAGOA DE DETENÇÃO DO GUARÁ – ESTUDO DAS
VAZÕES E QUALIDADE DA ÁGUA AFLUENTES E
EFLUENTES

LUÍSA ALVES DE SOUSA DINIZ

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:

SERGIO KOIDE, PhD (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)

ALEXANDRE KEPLER SOARES, PhD (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Eng. ANA CAROLINA VIEIRA DE PAULA, MSc.
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 14 DE DEZEMBRO DE 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

DINIZ, LUÍSA ALVES DE SOUSA

A lagoa de retenção do Guará – estudo das vazões e qualidade da água afluentes e efluentes.

ix, 102 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2020)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem Urbana

2. Lagoa de Detenção

3. PCSWMM 2D

4. SWMM

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Diniz, L.A.S. (2020). *A lagoa de retenção do Guará – estudo das vazões e qualidade da água afluentes e efluentes*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTORA: Luísa Alves de Sousa Diniz

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: A lagoa de retenção do Guará – estudo das vazões e qualidade da água afluentes e efluentes.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2020

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.

Luísa Alves de Sousa Diniz
Dinizlu96@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Àquele que se antecipou desde o princípio, meu divino Jesus, por todas as graças que me foram concedidas para que eu chegasse até aqui. À Virgem Santíssima, mediadora de todas as graças, que junto ao Seu Filho me abençoou, protegeu e amou tanto nessa graduação.

Aos meus pais, Russo e Fátima, por todo o amor, incentivo, compreensão e por sempre acreditarem em mim. Por terem me dado todas as condições necessárias para que eu me tornasse engenheira, e me ajudado tanto a perseverar mesmo no meu cansaço e exaustão de tantas noites não dormidas. Mãe, obrigada pelas palavras de conforto, pelo colo e todas as orações. Pai, obrigada por ser exemplo e modelo de perseverança e firmeza. Aos meus irmãos Lucas e Felipe, pelo apoio e compreensão nos meus momentos de estresse.

À minha irmã de coração, Ana Paula, pela cumplicidade, apoio e compreensão durante tantos anos, e mais intensamente nesse período de conclusão de curso. Obrigada por ser amiga, no sentido mais verdadeiro da palavra.

Ao professor Koide, por todo o conhecimento compartilhado, ensinamentos e dedicação. À minha coorientadora, Letícia, por toda a paciência, ajuda e contribuições para o Projeto Final. À Maria Elisa, por todo auxílio no projeto.

Ao grupo do MAPLU, pela rede de apoio, principalmente àqueles que foram solícitos nas ajudas para análise no laboratório e visitas de campo. Ao Ricardo Jayme, por conceder o MDT da área do projeto feito por ele. À CHI, pela licença universitária concedida do PCSWMM.

À Universidade de Brasília, por toda a experiência adquirida, conhecimento e amadurecimento durante o período da graduação, que me fizeram ser quem eu sou hoje. Aos meus professores, principalmente àqueles do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, pela dedicação e compromisso com a formação não só profissional, mas como pessoas que melhorem a sociedade.

Aos amigos que fiz na graduação, de forma especial à turma 1/2014. Obrigada Natália, Déborah, Isabela, Ana Paula, Matheus (MM's), Victor (Caçula), Kaio, Pedro, Matheus (Liminha), Dani, Bruna, Arthur, Gabriel, Rafael, Alexandre (Spencer), por tantas ajudas, momentos de alegria e desespero que passamos juntos. Às minhas amigas de fora da UnB, por acreditarem em mim e me ajudarem a me distrair quando necessário.

À Comunidade Católica Shalom, pelo acolhimento e suporte. Em especial à minha querida célula Ronaldo Pereira, por toda a intercessão, orações e por me entenderem no meu silêncio. Aos meus formadores, pela condução nesse tempo segundo a vontade de Deus. À Mariana e Adryele, pela amizade, auxílio, entendimento, por me ouvirem chorar e me consolarem tantas vezes.

Por fim, a todos aqueles que fazem ou fizeram parte da minha vida e não foram nominados, mas participaram de alguma forma e contribuíram para o meu crescimento, que me faz hoje alcançar essa conquista. Obrigada.

RESUMO

A crescente urbanização altera as condições de uso e ocupação do solo, de modo que a cobertura vegetal é substituída progressivamente pelas estruturas urbanas impermeáveis. Diante disso, o escoamento superficial aumenta à medida que a impermeabilização do solo cresce, o que provoca a transferência do volume escoado para jusante. Nesse cenário surge a necessidade de um sistema de drenagem urbana com um manejo sustentável com o objetivo de evitar as inundações urbanas. Assim, as técnicas compensatórias se apresentam focando no controle do escoamento superficial por meio da diminuição dos picos de vazão e aumento da infiltração das águas pluviais. Dentre essas técnicas destacam-se as bacias de retenção, que têm como objetivo reduzir os danos das cheias à jusante, por meio da diminuição do pico de vazão, além de melhorar a qualidade da água pluvial pela diluição e retenção de parte das cargas de poluição. Neste trabalho o objetivo foi de avaliar o funcionamento da lagoa de retenção do Guará II, localizada na Região Administrativa do Guará – DF, por meio da análise quantitativa e qualitativa das vazões afluentes e efluentes, utilizando levantamentos experimental hidrológico e de qualidade de água e modelagem computacional com o modelo SWMM. Para isso, foram feitos monitoramentos da quantidade e qualidade das águas na entrada e na saída da lagoa, além de simulações em duas dimensões para o estudo do fluxo dentro da lagoa de retenção. Foram obtidos dados de precipitação na área de contribuição, de nível da água na entrada da lagoa, além da coleta de 262 amostras, as quais foram analisadas quanto à: condutividade elétrica, turbidez e sólidos (totais, suspensos e dissolvidos) para a verificação da qualidade do efluente pluvial e investigação de ocorrência de *first flush*. Os dados de qualidade foram analisados com hidrogramas e polutogramas com o intuito de avaliar a relação entre as ondas de cheia e os sedimentos carreados pelo escoamento superficial. Os resultados indicaram valores significativos de sedimentos dissolvidos e suspensos na entrada da bacia, e constatou-se a ocorrência de *first flush* na maioria dos eventos. Quanto à modelagem 2D, os resultados permitiram a identificação do fluxo da água dentro da lagoa e foram modelados cenários com obstruções introduzidas com o objetivo de diminuir a ocorrência dos caminhos preferenciais, identificados visualmente em campo. Entretanto, o modelo se mostrou, conforme identificado em trabalhos anteriores, que as dimensões da lagoa são superestimadas com relação ao amortecimento das cheias, o que aponta para a possibilidade de melhorar o aproveitamento do espaço da lagoa promovendo melhorias na qualidade da água.

Palavras Chave: Drenagem urbana, lagoa de retenção, PCSWMM 2D, SWMM.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xii
LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS	xiii
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. CICLO HIDROLÓGICO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	4
3.2. DESENVOLVIMENTO URBANO E DRENAGEM URBANA	6
3.2.1. Gestão da Drenagem Urbana no Distrito Federal.....	10
3.3. PRÁTICAS DE MANEJO DE DRENAGEM.....	12
3.3.1. Sistema Convencional de Drenagem Urbana.....	12
3.3.2. Sistema Alternativo de Drenagem Urbana	14
3.3.2.1. <i>Low Impact Development</i> (LID)	15
3.4. BACIAS DE DETENÇÃO	18
3.4.1. Tipos de Bacia de Detenção	21
3.5. QUALIDADE DA ÁGUA PLUVIAL	24
3.5.1. Qualidade de Água nas Bacias de Detenção.....	27
3.6. MONITORAMENTO E MODELAGEM COMPUTACIONAL EM DRENAGEM URBANA	28
3.6.1. Monitoramento Quantitativo e Qualitativo	29
3.6.2. Tipos de Modelagem Computacional	30
3.6.2.1. Storm Water Management Model (SWMM) – 1D	31
3.6.2.2. <i>PCSWMM 2D</i>.....	32

4. METODOLOGIA	33
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
4.1.1. Clima e Solo.....	38
4.1.2. Uso e Ocupação do Solo e Área de Contribuição	39
4.2. MONITORAMENTO HIDRÁULICO, HIDROLÓGICO E DE QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA.....	40
4.3. MONITORAMENTO	41
4.3.1. Monitoramento Quantitativo.....	41
4.3.2. Monitoramento da qualidade das águas.....	43
4.4. MODELAGEM MATEMÁTICA	46
4.4.1. Modelagem no PCSWMM Professional 2D	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1. PRECIPITAÇÃO.....	50
5.2. QUALIDADE DA ÁGUA	54
5.2.1. Condutividade elétrica	55
5.2.2. Turbidez	57
5.2.3. Sólidos.....	59
5.2.4. First Flush	61
5.3. MODELAGEM MATEMÁTICA	63
5.3.1. Condição Atual da Lagoa	63
5.3.2. Cenários com Medidas Estruturais	69
5.3.2.1. Barreiras Verticais.....	70
5.3.2.2. Chicanas	72
5.3.2.3. Barreira única	77
5.3.2.4. Barreira Dupla: horizontal e vertical	79
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Ciclo hidrológico terrestre (IBGP, 1993, adaptado).....	4
Figura 3.2 - Hidrogramas de bacias urbana e antes da urbanização (Schueler, 1987 apud Tucci, 2005).....	5
Figura 3.3 - Ocupação do leito do rio (Adasa, 2018).	8
Figura 3.4 - Exemplo de LID em Illinois, EUA. (Ballard et al., 2015).	16
Figura 3.5 - Desenho típico de uma bacia de detenção (Gribbin, 2008, adaptado).....	18
Figura 3.6 - Princípio do armazenamento (Baptista et al., 2011).....	19
Figura 3.7 – Bacia de detenção com função paisagística em Hamilton, Leicester (Fonte: Ballard et al., 2015).	23
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia.	33
Figura 4.2 - Mapa de localização da lagoa de detenção.	34
Figura 4.3 – (a) Situação da área da lagoa em 2002; (b) e em 2019 (Fonte: Google Earth).	35
Figura 4.4 – (a) Localização das estruturas de entrada e saída da lagoa; b) vertedor e entrada da tubulação de descarga para o córrego do Guará;(c) tomada de água da descarga de fundo na saída da lagoa; (d) galeria de águas pluviais na entrada da lagoa.....	36
Figura 4.5 – (a) Empoçamento permanente de água na entrada da lagoa; (b) lixo nos arredores da área.	37
Figura 4.6 – (a) Vista da lagoa seca em setembro de 2019;(b) Idem, em novembro de 2019; (c)Tubulação de descarga do poço do vertedor, em período de estiagem.	37
Figura 4.7 - Precipitação acumulada em 24 horas em Brasília, no ano de 2019 (INMET, 2020).....	38
Figura 4.8 - Mapa de Uso e Ocupação da Área de Contribuição (Paula,2019).....	39
Figura 4.9 - Equipamentos para o monitoramento quantitativo: (a) pluviógrafo instalado no Cruzeiro Velho; (b) linígrafo de pressão instalado na galeria de entrada da lagoa; e (c) linígrafo de boia instalado na saída da lagoa.	43
Figura 4.10 – (a) Amostrador automático; e (b) sensor de nível.	44
Figura 4.11 – (a) Estrutura interior do amostrador automático; e (b) estrutura de proteção de concreto na saída da lagoa.	44
Figura 4.12 - Amostras brutas armazenadas (a) da entrada; e (b) da saída da lagoa.....	45
Figura 4.13 - Hietograma da chuva de projeto para um tempo de retorno de 10 anos.....	47

Figura 4.14 - Hidrograma da entrada da lagoa com base na chuva de projeto.....	48
Figura 5.1 – Hietograma do Evento 1 (24/01/2020).....	50
Figura 5.2 – Hietograma do Evento 2 (03/02/2020).....	51
Figura 5.3 – Hietograma do Evento 3 (05/02/2020).....	51
Figura 5.4 – Hietograma do Evento 4 (07/02/2020).....	52
Figura 5.5 – Hietograma do Evento 5 (20/02/2020).....	52
Figura 5.6 – Hietograma do Evento 6 (29/02/2020).....	53
Figura 5.7 – Hietograma do Evento 7 (02/03/2020).....	53
Figura 5.8 – Hidrogramas e polutogramas de condutividade elétrica dos eventos dos dias (a) 24/01/20; (b) 03/02/20; (c) 05/02/20; (d) 07/02/20; (e) 20/02/20; (f) 20/02/20; e (g) 02/03/20.	56
Figura 5.9 - Hidrogramas e polutogramas de turbidez dos eventos dos dias (a) 24/01/20; (b) 03/02/20; (c) 05/02/20; (d) 07/02/20; (e) 20/02/20, (f) 20/02/20; e (g) 02/03/20.	58
Figura 5.10 - Hidrogramas e polutogramas de sólidos (totais, suspensos e dissolvidos) dos eventos dos dias dos dias (a) 24/01/20; (b) 03/02/20; (c) 05/02/20; (d) 07/02/20; (e) 20/02/20, (f) 20/02/20; e (g) 02/03/20.	60
Figura 5.11 - M(V) ST.....	61
Figura 5.12 - M(V) SS.....	61
Figura 5.13 - M(V) SD.....	62
Figura 5.14 - Elevação das células.....	64
Figura 5.15 - Hidrograma entrada.....	65
Figura 5.16 – Situação da lagoa na simulação de enchimento.	66
Figura 5.17- Comportamento da água dentro da lagoa de detenção.	66
Figura 5.18 - Comparação entre a simulação e fotos da lagoa.	68
Figura 5.19 – Comparação dos hidrogramas de saída entre o modelo 1D e 2D.....	69
Figura 5.20 – Cenário com barreiras verticais.....	71
Figura 5.21 – Comportamento da água no cenário com barreiras verticais.	71
Figura 5.22 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com barreiras verticais.....	72
Figura 5.23 – Cenário com chicanas.	73
Figura 5.24 – Comportamento da água no cenário com Chicanas.	74
Figura 5.25 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com chicanas.	74
Figura 5.26 – Cenário com chicanas alteradas.	75

Figura 5.27 – Comportamento no cenário com chicanas alteradas.	76
Figura 5.28 - Comparação dos hidrogramas de saída entre os cenários base, com chicanas e com chicanas alteradas.	76
Figura 5.29 – Cenário com barreira única.	77
Figura 5.30 – Comportamento da lagoa com barreira única.	78
Figura 5.31 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com barreira única.	78
Figura 5.32 – Barreira dupla: horizontal e vertical.....	79
Figura 5.33 - Comportamento da água no cenário com barreira dupla: horizontal e vertical	80
Figura 5.34 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com barreiras horizontal e vertical.	80
Figura 5.35 - Comparação entre os cenários com barreiras	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Órgãos envolvidos na gestão de drenagem do DF (Adasa, 2018, adaptado)..	11
Tabela 4.1 – Porcentagens do Uso e Ocupação da Área de Contribuição (Paula, 2019)	40
Tabela 4.2 - Localização dos pluviógrafos	42
Tabela 4.3 - Parâmetros e métodos das análises de qualidade de água	46
Tabela 5.1 - Datas e horários dos eventos monitorados	50
Tabela 5.2 - Tempo de retorno e intensidade dos eventos monitorados.....	54
Tabela 5.3 - Parâmetros estatísticos da condutividade	55
Tabela 5.4 - Parâmetros estatísticos da turbidez.....	57
Tabela 5.5 - Parâmetros estatísticos dos sólidos.....	59
Tabela 5.6 - Valores dos coeficientes b	62

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1	25
Equação 3.2	25
Equação 4.1	40
Equação 4.2	46

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
Adasa	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
BMP	<i>Best Management Practices</i>
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CEB	Companhia Energética de Brasília
CME	Concentração Média por Evento
CORSAP	Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos e das Águas Pluviais da Região Integrada do Distrito Federal e Goiás
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DER-DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GDF	Governo do Distrito Federal
ha	Hectares
Ibram	Instituto Brasília Ambiental
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
L	Litros
LID	<i>Low Impact Development</i>
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
m	Metros
mm	Milímetro
Novacap	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
OD	Oxigênio Dissolvido
PDDU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
s	Segundos
SIA	Setor de Indústria e Abastecimento
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SD	Sólidos Dissolvidos
SEDUH	Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SODF	Secretaria de Estado de Obras e Infraestrutura do Distrito Federal
SS	Sólidos Suspensos
ST	Sólidos Totais
STORM	<i>Storage Treatment Overflow Runoff Model</i>
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage System</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
WSUDS	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização altera as condições de uso e ocupação do solo, de modo que a cobertura vegetal é substituída progressivamente pelas estruturas urbanas impermeáveis. Diante disso, o escoamento superficial aumenta à medida que a impermeabilização do solo cresce, visto que com a substituição da cobertura vegetal, que tende a retardar o escoamento superficial e proporcionar maiores taxas de infiltração, há a redução da capacidade de armazenamento natural do escoamento e assim o volume que não foi infiltrado ocupa outro lugar na superfície (Canholi, 2005). A gestão pública enfrenta então problemas na otimização dos espaços urbanos com a garantia dos serviços básicos de infraestrutura urbana, dada a crescente ocupação do solo, o que acarreta em inundações e frequentes problemas relacionados à infraestrutura de água.

Um adequado manejo das águas pluviais urbanas se faz necessário nesse contexto para a melhor gestão do escoamento superficial, a fim de garantir a qualidade de vida da população urbana. A partir da segunda metade do século XX, as obras de macrodrenagem passaram a ter espaço nas ações governamentais das cidades brasileiras, utilizando principalmente canalizações para o direcionamento das águas pluviais ao corpo hídrico (Righetto, 2009). Esse sistema de drenagem urbana, denominado sistema convencional, apresenta grandes limitações, como a transferência para jusante dos problemas de inundação e degradação da qualidade de água causada pela poluição difusa.

A partir da necessidade de mudança do sistema de drenagem urbana por uma forma de manejo mais sustentável para as cidades, surgiram sistemas alternativos de manejo das águas urbanas, com o objetivo de projetar técnicas compensatórias focando no controle do escoamento superficial por meio da diminuição dos picos de vazão e aumento da infiltração das águas pluviais. Nesse contexto as bacias de retenção são consideradas um tipo de medida compensatória que tem como objetivo minimizar os danos das cheias à jusante, por meio da diminuição do pico de vazão, além de melhorar a qualidade da água pluvial pela diluição e retenção de cargas de poluição.

No DF as bacias de retenção e retenção têm sido implementadas como medida preferencial no manejo da drenagem urbana para controle de quantidade e qualidade da água, conforme estabelecido pela Resolução nº 09/2011 da Adasa (Adasa, 2011). Diante desse cenário, o número de construções de bacias de retenção é cada vez maior no Distrito Federal, o que evidencia a necessidade do estudo e monitoramento desses dispositivos para a garantia da

sustentabilidade no processo da drenagem urbana no contexto atual de crescente urbanização.

A modelagem computacional é uma importante ferramenta no cenário da gestão e manejo da drenagem urbana, visto que pode ser utilizada para o melhor entendimento do sistema hidrológico, além de ser subsídio ao planejamento e à tomada de decisões. Dentro da modelagem hidráulico-hidrológica o modelo SWMM se destaca por proporcionar instrumentos como o controle da quantidade e da qualidade do escoamento gerado, e modelagem de fluxo em simulações hidrodinâmicas.

Neste contexto, o presente trabalho se propõe a estudar sobre o funcionamento da bacia de retenção do Guará II – DF, a fim de avaliar as vazões afluentes e efluentes, bem como a eficiência na melhoria da qualidade da água, identificar as suas limitações e propor possíveis medidas estruturais que melhorem sua eficiência.

Para isso, foi realizado o monitoramento da área de interesse por meio da análise quantitativa e qualitativa das vazões afluentes e efluentes, utilizando levantamentos experimental hidrológico e de qualidade de água. Esse monitoramento ocorreu de outubro de 2019 até março de 2020. Os dados de monitoramento adquiridos foram analisados em sete eventos de precipitação registrados durante o período de amostragem, de modo que foram elaborados hietogramas, hidrogramas e polutogramas para o melhor entendimento do efluente pluvial e do funcionamento da bacia de retenção.

Ainda, foi utilizado o modelo hidrodinâmico SWMM por meio do programa PCSWMM 2D para fazer simulações em duas dimensões com o objetivo de estudar do fluxo dentro da lagoa de retenção. Os resultados das simulações permitiram a identificação do fluxo da água dentro da lagoa e foram modelados cenários com obstruções a fim de diminuir a ocorrência dos caminhos preferenciais, identificados visualmente em campo.

Este trabalho está organizado em 7 capítulos. No Capítulo 2 os objetivos do trabalho são elencados, enquanto o Capítulo 3 apresenta conceitos relacionados ao tema. O Capítulo 4 expõe a metodologia que foi desenvolvida, o Capítulo 5 aborda e discute os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 elenca as conclusões do trabalho e aponta recomendações com base nelas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o funcionamento da lagoa de retenção do Guará II por meio da análise quantitativa e qualitativa das vazões afluentes e efluentes à lagoa, utilizando levantamento experimental hidrológico e de qualidade de água e modelagem computacional utilizando o programa SWMM.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

- Avaliar a eficiência da lagoa na remoção de poluentes por meio da análise de amostras afluentes e efluentes.
- Estudar e modelar a circulação da água dentro da lagoa com modelo hidráulico de duas dimensões.
- Propor e modelar medidas estruturais para melhorar a forma de circulação da água dentro da lagoa visando à melhoria de eficiência da lagoa na redução de carga de poluentes por sedimentação.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CICLO HIDROLÓGICO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O ciclo hidrológico pode ser entendido como a circulação da água entre a superfície e a atmosfera, de modo que a troca acontece tanto no sentido superfície-atmosfera, como no sentido atmosfera-superfície, e assim a água pode se apresentar em qualquer estado físico, sendo as formas mais significativas as precipitações de chuva e neve (Tucci, 2001). Ao cair sobre o solo, o volume de água resultante da precipitação pode seguir caminhos como a infiltração, caso o solo não seja saturado ou impermeável, e o escoamento superficial. A Figura 3.1 mostra de forma esquemática o ciclo hidrológico terrestre.

Sabendo que a bacia pode ser considerada como um sistema com entrada e saída, no qual a precipitação é a entrada, e a saída é o volume escoado pelo exutório, o ponto de saída pode ser considerado como diferentes locais no corpo hídrico, a depender do nível de análise desejado. Nesse contexto, ao analisar os caminhos que a precipitação pode percorrer no solo, nota-se que a vegetação exerce um papel fundamental no processo, pois parte da água precipitada é interceptada pela estrutura vegetal e evapora posteriormente.

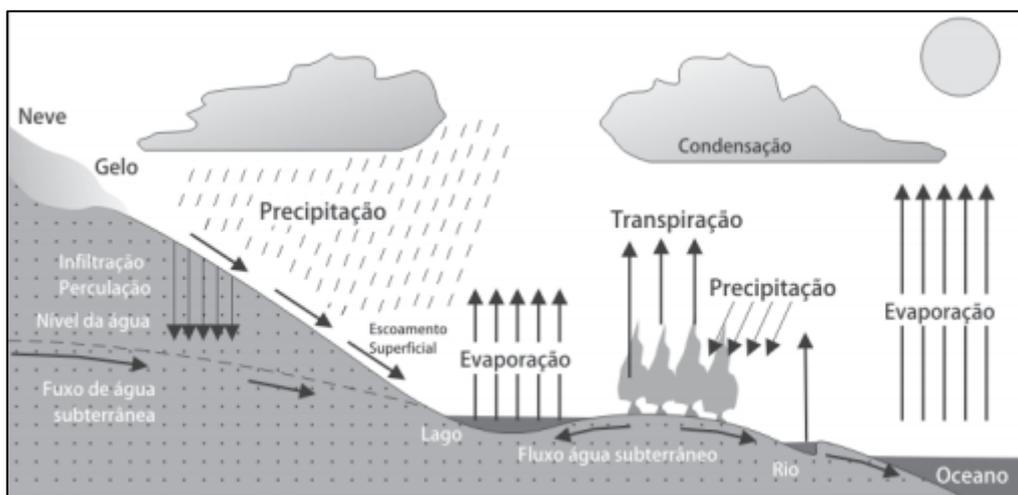


Figura 3.1 - Ciclo hidrológico terrestre (IBGP, 1993, adaptado).

O escoamento superficial tem origem principalmente nas precipitações. Do volume que atinge a superfície do solo, parte é retido em depressões do terreno, parte se infiltra, e o restante escoado pela superfície logo que a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração no solo e, os vazios no solo e na superfície sejam preenchidos. No início do

escoamento superficial forma-se uma película laminar que aumenta a espessura à medida que a precipitação prossegue, até atingir um estado de equilíbrio.

Ao analisar o comportamento do deslocamento da água na superfície da bacia, é possível notar que este depende principalmente, dentre outros fatores como relevo e duração da chuva, do tipo de cobertura da bacia hidrográfica e do solo. Deste modo, a cobertura vegetal tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração, da mesma forma que se a umidade do solo da bacia for baixa, parte da precipitação é retida, e consequentemente o escoamento superficial diminui. Nesse cenário, à medida que as águas vão atingindo os pontos mais baixos do terreno, passam a escoar em canalículos que formam a micro rede de drenagem. Sob a ação da erosão, a dimensão desses canalículos aumenta e o escoamento se processa, cada vez mais, por caminhos preferenciais até chegar a um corpo d'água, rede de captação ou outro tipo de reservatório de água. A rede de drenagem da bacia hidrográfica então é considerada como o conjunto dos cursos d'água, desde os córregos contribuintes até o rio principal (Pinto *et al.*, 1973).

Segundo Righetto (2009), estudos e pesquisas em hidrologia urbana são de extrema importância para o aprofundamento do conhecimento das águas urbanas. Nesses estudos hidrológicos utiliza-se como elemento principal de análise do escoamento superficial o hidrograma, gráfico que relaciona a vazão no tempo. Na Figura 3.2 é possível ver a comparação de um hidrograma de uma bacia urbana e outra antes da urbanização.

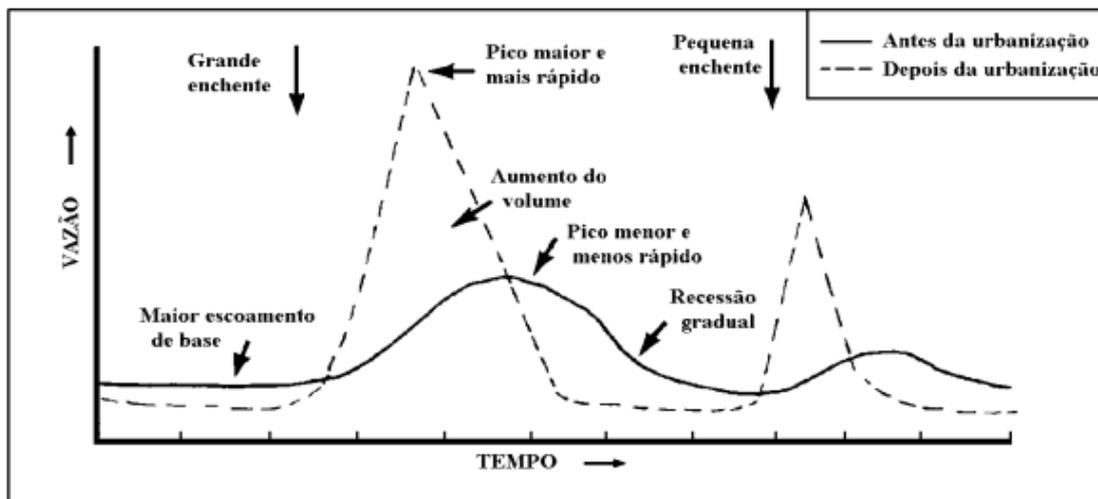


Figura 3.2 - Hidrogramas de bacias urbana e antes da urbanização (Schueler, 1987 apud Tucci, 2005).

Em um contexto urbano em que a ocupação do solo é alterada, tornando-o mais impermeável, e com uma rede de drenagem mais eficiente, o volume de água escoado e o pico de vazão aumentam. Portanto, ao analisar a drenagem de uma bacia hidrográfica

urbanizada, a porcentagem de impermeabilização do solo se mostra como um aspecto crucial, visto que com o aumento da área impermeabilizada, o escoamento superficial também aumenta diretamente.

3.2. DESENVOLVIMENTO URBANO E DRENAGEM URBANA

O avanço do desenvolvimento econômico e consequente urbanização das cidades fez com o que a gestão pública enfrentasse diversos problemas para a otimização da grande quantidade de pessoas, concentradas em espaços cada vez menores, com o fornecimento de infraestrutura urbana necessária para atender a população. Nesse contexto, as regiões metropolitanas e cidades mais desenvolvidas economicamente do Brasil enfrentam, nas últimas décadas, conflitos intensos nessa otimização, uma vez que a competição pelos mesmos recursos naturais, como solo e água, se torna cada vez maior. A ocupação do solo e uso dos recursos naturais nos centros urbanos além de acarretar em impactos ambientais, como ocupação do leito de inundação ribeirinha e diminuição da qualidade da água, também pode resultar em frequentes problemas relacionados à infraestrutura de água. A deficiência no atendimento de saneamento básico, que de acordo com a Lei Federal nº 11.445/2007, é composto por: abastecimento de água potável; esgotamento sanitário; limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; drenagem e manejo das águas pluviais; e limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas, é uma realidade presente em muitas cidades brasileiras (Brasil, 2007).

De forma particular, a urbanização e a impermeabilização do solo provocam a redução da capacidade de armazenamento natural da água, de modo que o volume que não foi infiltrado ocupa outro lugar na superfície da bacia hidrográfica (Canholi, 2005). Diante desse cenário, alternativas em engenharia surgiram para solucionar o problema do excesso de escoamento superficial nas ocupações urbanas, como por exemplo a construção de canalizações para o direcionamento das águas pluviais ao corpo hídrico mais próximo. Assim as obras de macrodrenagem, que são caracterizadas pela construção de canais, obras de aterros das áreas alagáveis, e obras da rede de drenagem em si, como bueiros, galerias, e bocas-de-lobo, passaram a ter espaço nas ações governamentais nas cidades brasileiras, a partir da segunda metade do século XX (Righetto, 2009). Diante dos problemas ambientais que surgiram nesse contexto, como as inundações por exemplo, a consciência da necessidade do manejo das águas pluviais urbanas passou a se difundir no meio técnico e político com o objetivo principal de propiciar o afastamento e o escoamento das águas pluviais nos pontos críticos.

Atualmente, de acordo com a Lei Federal nº 11.445/2007, o manejo de águas pluviais urbanas é considerado como o conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, do transporte, detenção ou retenção para amortecimento de vazões de cheias, do tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas associadas às ações de planejamento e de gestão da ocupação territorial urbana (Brasil, 2007). Entende-se então que as ações necessárias frente à drenagem urbana são mais amplas do que apenas promover o afastamento e o escoamento das águas pluviais nos pontos críticos. Entretanto, a resposta normalmente ditada pelos planos diretores de drenagem é recomendar a construção de mais obras de galerias e canalizações, que acabam por sobrecarregar rios e córregos com alguma capacidade de absorção dessas sobrecargas, ou então afetam populações mais marginalizadas. Ao não colocar os projetos de drenagem na fase inicial do desenvolvimento urbano, chega-se ao resultado de projetos mais dispendiosos ou até mesmo inviabilidade técnico-econômica de implantação. Sem um planejamento prévio e com a implantação de uma infraestrutura urbana desorganizada, problemas como pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento, redução de seção do escoamento por aterros de pontes e para construções em geral, projetos e obras de drenagem inadequados, são responsáveis pelo aumento da frequência e magnitude das enchentes (Tucci, 2008).

Em uma seção típica de um rio, os níveis d'água funcionam de modo que as vazões menores escoam pelo seu leito menor e as vazões de cheia pelo leito maior. Na situação pós-urbanização, além do aumento no nível da água provocado pelo aumento das vazões em função da impermeabilização da bacia, há a ocupação das várzeas aonde a frequência e os riscos de inundação são maiores, como pode ser observado na Figura 3.3. Segundo Tucci e Mendes (2006), as áreas urbanas devem ser ordenadas quanto à ocupação do solo, de modo a serem definidas regras que busquem preservar as condicionantes da natureza e assim o sistema possa receber o transporte, abastecimento de água, esgotamento sanitário, tratamento, e drenagem urbana. Desse modo, a drenagem urbana deve promover a proximidade dos níveis de infiltração às condições naturais, evitar transferência de aumento de vazão para jusante, bem como de volume e de carga de contaminação no escoamento pluvial e erosão do solo.

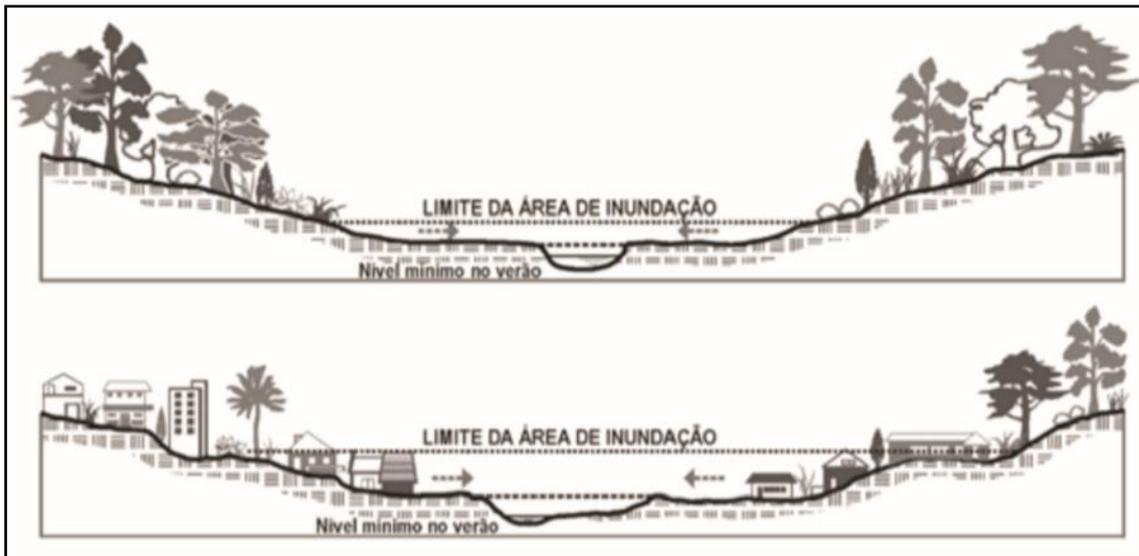


Figura 3.3 - Ocupação do leito do rio (Adasa, 2018).

Em grande parte das bacias que são afetadas por inundação é possível notar que a ocupação urbana se desenvolveu no sentido jusante para montante do corpo hídrico, de forma que à medida que a ocupação aumenta, os picos de vazão afluentes às canalizações nas porções de jusante aumentam de forma direta, o que torna o gerenciamento da drenagem local e a busca de soluções viáveis difíceis, já que a população já instalada nas áreas mais baixas limita as opções que podem ser aplicadas no local (Canholi, 2005). Com a falta de execução de políticas integradas de controle de enchentes, os prejuízos observados nas cidades têm aumentado. Segundo Tucci *et al.* (2001), o grande desafio é buscar criar programas que abranjam a esfera nacional visando a redução de impactos causados pelas inundações, de modo a orientar de forma integrada o planejamento urbano, considerando a multidisciplinariedade que a abordagem dos recursos hídricos necessita.

De acordo com o art. 182 da Constituição Federal (Brasil, 1988) é de competência de cada município a execução da política de desenvolvimento urbano, de modo que no contexto atual o planejamento urbano municipal é baseado na Lei Federal nº 6.766/79 e alterações posteriores, que rege o parcelamento do solo para fins urbanos (Tavanti e Barbassa, 2010). Dessa forma, o contexto e termos das leis que regem a esfera do planejamento urbano proporcionam uma liberdade para a concepção de projetos urbanísticos que não fazem a integração com as variáveis hidrológicas e ambientais. Barros (2005) cita diversos fatos que contribuem para a ocorrência de inundações urbanas, entre eles:

- O aumento do escoamento superficial para uma mesma média de precipitação devido à impermeabilização intensa do solo e ocupação de áreas que são prioritárias para a recarga de aquíferos;
- Aumento da quantidade de sedimentos carregados pelas águas pluviais, que podem reduzir a capacidade de escoamento nos canais de drenagem ou obstruí-los completamente;
- Falta de inserção das características hidráulicas das bacias hidrográficas nos Planos Diretores da cidade;
- A bacia hidrográfica integral não é objeto de estudo nos projetos de drenagem, o que leva à transferência da vazão e, conseqüentemente, as inundações de uma cidade para a outra;
- A inexistência de um órgão gestor e coordenador especificamente da drenagem, o que gera uma gestão pulverizada em diversos órgãos que não trabalham de forma coordenada e conjunta.

A concepção integrada do planejamento urbano ao sistema de drenagem e tudo que interfere nele, bem como a aplicação de tecnologias alternativas ao sistema convencional de construção de canais como solução única, promovem um cenário mais favorável para a população e para o ambiente. Todos os elementos do saneamento básico, devem então ser considerados como um sistema em que seus componentes exercem influência entre si. Nesta conjuntura, o surgimento dos sistemas alternativos de drenagem se mostra promissor por considerar todo o sistema de drenagem de uma bacia e basear-se na infiltração e retenção das águas precipitadas, acarretando em uma diminuição do escoamento superficial, bem como no rearranjo temporal das vazões. Segundo Baptista e Nascimento (1996) essas tecnologias tomam a bacia hidrográfica como base de estudo, e buscam compensar os efeitos da urbanização, controlando na fonte a produção excedente de água decorrente da impermeabilização, através de infiltração, e evitando a sua transferência rápida para jusante, por meio de estruturas de armazenamento temporário. Conclui-se então que a crescente intensificação da urbanização e conseqüentemente os impactos hidrológicos e ambientais intrínsecos à ela, inseridas no contexto atual de demanda ambiental crescente, torna a questão da drenagem urbana bastante complexa por envolver questões ambientais, sanitárias e paisagísticas, além dos aspectos técnicos. Surge então a necessidade de uma nova abordagem no gerenciamento de drenagem urbana, que incorpore os princípios do desenvolvimento sustentável, levando ao questionamento, tanto dos aspectos técnicos vigentes, como também das próprias estruturas organizacionais na quais a drenagem é inserida (Baptista *et al.*, 2011).

3.2.1. Gestão da Drenagem Urbana no Distrito Federal

A gestão da drenagem urbana visa minimizar os danos à sociedade e ao ambiente por meio do manejo do escoamento, buscando a integração dos recursos hídricos na bacia hidrográfica e das águas pluviais. Nesse contexto, o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) é o instrumento da gestão das águas pluviais na cidade, e deve ser desenvolvido com interfaces com os outros planos da cidade tanto no saneamento, quanto no Plano Diretor Urbano. No contexto brasileiro, de acordo com o Diagnóstico de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas de 2015 do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS) feito em 2.541 dos 5.570 municípios do Brasil, apenas 20,2% dos municípios analisados possuem um Plano Diretor de Drenagem municipal (SNSA, 2018). Como afirma Righetto (2009), para um manejo eficiente de uma bacia urbana é necessário que um Plano Diretor da Cidade, no qual se integra o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU), seja a base da gestão. Ele tem como objeto o planejamento da distribuição dos deflúvios superficiais no espaço urbano em função da ocupação e da evolução da infraestrutura de drenagem.

No Distrito Federal, desde a consolidação do PDDU em 2009, os instrumentos que o compõe, como o relatório de caracterização e diagnósticos e manuais técnicos, são base no planejamento e implantação dos sistemas de drenagem urbana. O Manual de Drenagem e Águas Pluviais do Distrito Federal, feito pela Adasa e parte do PDDU do DF, é um grande instrumento da gestão da drenagem, por adotar uma visão integrada do manejo de águas pluviais e assim estabelecer critérios para estudos de concepção e projetos de sistemas de drenagem. Ainda, o Manual indica diretrizes tanto para a ampliação do sistema de drenagem, em consonância com a expansão urbana, como para a adequação do sistema de drenagem existente em áreas já urbanizadas (Adasa, 2018).

A gestão dos serviços de drenagem e o manejo de águas pluviais do DF são feitos por um conjunto de órgãos e instituições ligados à administração pública, como a Secretaria de Estado de Obras e Infraestrutura do Distrito Federal (SODF), que dentre as suas atribuições estão: projetos, execução e fiscalização das obras públicas; infraestrutura; recuperação de equipamentos públicos (Adasa, 2018). Por ser a grande executora de obras de expansão da rede de drenagem, outros órgãos estão diretamente vinculados à Sinesp, como a Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (Novacap), a Companhia Energética de Brasília (CEB), a Companhia de Saneamento Ambiental de Brasília (Caesb), e o Serviço de Limpeza Urbana (SLU). De forma prática, a gestão da drenagem urbana no DF passa por vários órgãos

nas suas várias fases. A Tabela 3.1 mostra de forma resumida as competências e atribuições de cada órgão ou instituição em cada fase da gestão.

Tabela 3.1 - Órgãos envolvidos na gestão de drenagem do DF (Adasa, 2018, adaptado).

Competências e Atribuições	Órgãos/Instituições
Planejamento	SODF CORSAP
Regulação e Fiscalização	ADASA
Prestação de Serviços	NOVACAP DER-DF
Licenciamento Ambiental	IBRAM
Outorga de Recursos Hídricos	ADASA

Nesse cenário a Resolução n° 09 de 08 de abril de 2011, publicada pela Adasa, exerce um papel muito importante na gestão e manejo de drenagem do DF, por ter como objetivo o estabelecimento das diretrizes e critérios gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos superficiais do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e estados (Adasa, 2011). A Resolução determina que todo lançamento de águas pluviais que seja efetuado diretamente em corpos hídricos superficiais e que tenha sua vazão proveniente de empreendimento que altere as condições naturais de permeabilidade do solo, está sujeito à outorga de lançamento de águas pluviais. O empreendimento requerente da outorga deve, segundo a Resolução, considerar chuvas com tempo de recorrência de dez anos para a vazão máxima gerada. Para a manutenção da qualidade e quantidade da água do corpo hídrico receptor, a Resolução n° 09 prevê, preferencialmente, a utilização de reservatório de qualidade e reservatório de quantidade, dispostos em série. Assim, o reservatório de qualidade tem como objetivo principal reduzir a carga poluente a ser lançada no corpo hídrico, de modo a reduzir, no mínimo, 80% dos sólidos totais gerados na área impermeabilizada. Já o reservatório de quantidade, tem como objetivo principal reter determinado volume de água originado pelo escoamento superficial, de forma que reduza as vazões de pico e retarde o escoamento das águas pluviais provenientes de impermeabilização do solo. O lançamento no corpo hídrico, do reservatório de quantidade, não pode ultrapassar a vazão máxima específica de 24,4 L/(s.ha). Nos casos em que não é possível o atendimento das condições estabelecidas na Resolução, estudos

alternativos que atestem a capacidade do corpo hídrico de receber vazão específica de lançamento diversa podem ser apresentados, ficando sujeitos à aprovação da Adasa.

3.3. PRÁTICAS DE MANEJO DE DRENAGEM

De acordo com a Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico (Brasil, 2007), o sistema de drenagem e manejo de águas pluviais envolve desde os aspectos iniciais da chegada da chuva no solo urbano, como o transporte e detenção para o amortecimento de vazões de cheia, ao tratamento e disposição final das águas drenadas na área urbana. Segundo Righetto (2009), o manejo de águas pluviais urbanas se inicia pelo levantamento e conhecimento do estado atual de uma sub-bacia hidrográfica, seguido pelo diagnóstico da infraestrutura de drenagem existente, do espaço construído e planejado, de diretrizes estabelecidas pelo Poder Público e inclui a constatação da eficácia do cumprimento das leis e normas associadas à ocupação do solo e aos impactos ambientais relacionados ao saneamento básico.

O manejo eficiente do controle dos deflúvios nas fontes geradoras pode alterar de forma significativa os picos de vazão e possíveis inundações na área urbana. Em áreas habitacionais o controle do escoamento superficial pode ser feito por paisagismos que incluam áreas públicas permeáveis, como praças gramadas, pequenos reservatórios de infiltração nos lotes, aplicação de pavimentos permeáveis, ou outras técnicas que diminuam a quantidade de água que permanece na superfície. Com relação à infraestrutura empregada nas atividades voltadas ao manejo das águas pluviais urbanas, historicamente o sistema é dividido em três grupos: controle na fonte, microdrenagem e macrodrenagem. Segundo a Adasa (2018), o controle na fonte pode ser entendido como o conjunto de dispositivos de amortecimento e infiltração que são posicionados na origem do escoamento pluvial, normalmente próximos às cabeceiras das bacias hidrográficas. Já a microdrenagem é composta pelos dispositivos que drenam o sistema viário, como sarjetas, canaletas, captações. A macrodrenagem então é formada por canais abertos ou fechados, galerias e tubulações com diâmetro mínimo de 1,0 m, que recebem vazão de um conjunto de redes de microdrenagem.

3.3.1. Sistema Convencional de Drenagem Urbana

O sistema convencional de drenagem urbana tem como princípio a captação e condução das águas pluviais por meio de dispositivos de microdrenagem, com condutos artificiais

usualmente subterrâneos, para serem retiradas das zonas urbanas até atingirem a rede de macrodrenagem e lançadas rapidamente no corpo d'água mais próximo (Cruz *et al.*, 2001). No contexto urbano esse sistema pode ser implantado de duas formas diferentes: como sistema unitário, no qual esgoto sanitário e águas pluviais são transportados juntos pelos mesmos canais; e como sistema separador absoluto, que trata apenas do transporte de águas pluviais, sendo este o sistema utilizado no Brasil. Nos dois sistemas as bocas de lobo captam o escoamento superficial e assim os canais da rede transportam a água para jusante, retirando assim o volume de água da área no qual foi captado, de modo que no sistema unitário os canais também recebem o esgoto sanitário.

Entretanto o sistema convencional causa impactos intensos no meio ambiente, que tende a se tornar insustentável com a expansão e urbanização das cidades. Baptista e Nascimento (1996) discutem as principais limitações encontradas nas soluções convencionais de drenagem, observadas ao longo da urbanização intensa ao longo da segunda metade do século XX, que incluem: a transferência para jusante dos problemas de inundação, de modo que novas áreas urbanizadas à montante de áreas de urbanização mais antigas têm a tendência de provocar inundações mais frequentes; necessidade de novas obras de drenagem construídas a jusante para conter as inundações geradas, como aumento da seção transversal de canais naturais e substituição por condutos com maior diâmetro, que normalmente geram mais gastos e transtornos à população; a falsa ideia de segurança, com respeito a inundações, gerada na população ao fazer a canalização de cursos d'água que facilita a ocupação de áreas ribeirinhas, usualmente ocupadas pela parcela da população de baixa renda, o que pode resultar em perda de vidas humanas e prejuízos econômicos; a qualidade de água normalmente não é contemplada, o que resulta nos problemas comuns observados no Brasil de inadequação do funcionamento do sistema de drenagem causados por deposição de sedimentos, que têm origem em processos erosivos intensificados pela urbanização e/ou por deficiências no sistema de limpeza urbana; e por fim, situações irreversíveis que limitam outros usos presentes ou futuros da água em meio urbano são causadas, como por exemplo a construção de galerias que impossibilita a inserção dos cursos d'água na paisagem urbana e a prática de atividades esportivas e de lazer junto a este.

Na evolução da concepção da forma mais eficiente do sistema de drenagem, o sistema convencional passa a ser revisto por apresentar problemas com o seu princípio de transferência das águas para jusante. Neste contexto, o sistema alternativo de drenagem, que tem sido desenvolvido desde 1970 principalmente na Europa e na América do Norte, busca

compensar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos e assim favorecer o aumento da qualidade de vida e a preservação ambiental.

3.3.2. Sistema Alternativo de Drenagem Urbana

O sistema alternativo, também chamado de solução compensatória, foi desenvolvido por meio da percepção dos projetistas que se fazia necessário a alteração da forma de planejar sistemas de drenagem pluvial em ambientes urbanos a fim de aumentar a sustentabilidade das cidades. O objetivo das técnicas compensatórias tem o foco no controle do escoamento superficial através da diminuição da velocidade e infiltração das águas pluviais (Silva *et al.*, 2006). Esse sistema considera os impactos da urbanização de forma global, de modo a considerar a bacia hidrográfica como base de estudo, e compensar sistematicamente os efeitos da urbanização. A compensação é feita pelo controle da produção de excedentes de água causados pela impermeabilização e evitando-se sua transferência rápida para jusante. A adoção dos sistemas alternativos está condicionada a um grande número de fatores, ligados às características hidrológicas locais, ao seu efetivo impacto sobre os processos hidrológicos na bacia, à sua integração com o planejamento urbanístico, à adoção de novas práticas de manutenção, aos custos de implantação e de manutenção (Nascimento *et al.*, 1997). Desse modo, medidas não estruturais com ações operacionais e educacionais, além das medidas de controle, estão envolvidas na execução das técnicas compensatórias.

Para a implantação de um sistema de controle não convencional é necessária a observação das condições físicas do local para que o sistema funcione com o melhor rendimento possível. Righetto (2009) lista os principais aspectos a serem considerados, dentre eles: a disponibilidade de espaço físico para implantação dos dispositivos, principalmente no caso de áreas densamente urbanizadas; identificação dos tipos de poluentes presentes no escoamento para a escolha do dispositivo mais adequado para remoção de substâncias de interesse; monitoramento dos níveis do lençol freático, pois tem influência direta na capacidade de armazenamento e nos sistemas de infiltração; identificação dos tipos de solo presentes no local de interesse, pois solos com alta capacidade de percolação são necessários para o bom funcionamento de sistemas de infiltração; análise de custos de implantação e manutenção da estrutura para a garantia da viabilidade técnico-econômica. Todos esses fatores devem ser considerados antes da escolha do tipo de estrutura a ser instalada para evitar posteriores problemas de incompatibilidades entre o projeto e a execução.

Com base nos princípios compensatórios e considerações sobre a bacia hidrográfica, no desenvolvimento do sistema de drenagem, surgiu então a drenagem urbana sustentável e modelos baseados em Melhores Práticas de Gestão, ou *Best Management Practices*, BMPs (Tucci e Bertoni, 2003). Dessa forma, novas abordagens mais abrangentes, no que se refere às águas pluviais urbanas, vêm sendo propostas nas últimas décadas. De acordo com cada país no qual foi desenvolvida, as técnicas possuem determinadas denominações, destacando-se os conceitos “*Low Impact Development*” (LID), na América do Norte, “*Sustainable Urban Drainage Systems*” (SUDS), no Reino Unido, “*Water Sensitive Urban Design*” (WSUD), na Austrália. Apesar de possuírem diferentes terminologias, todas são compatíveis e incorporam as tecnologias compensatórias em suas soluções. Para os efeitos desse trabalho aplicar-se-á de futuro a terminologia mais utilizada nos EUA e no Canadá de *Low Impact Development*, ou seja, LID, por se tratar da designação mais usada na literatura base deste trabalho.

3.3.2.1. *Low Impact Development* (LID)

Como já visto anteriormente, os sistemas de LIDs podem ser entendidos como o conjunto de técnicas de controle e gestão das águas pluviais que surgiu como alternativa ao sistema convencional. Este sistema foi concebido para gerir os riscos ambientais do escoamento urbano e contribuir sempre que possível para a melhoria e aprimoramento do ambiente urbano (Ballard *et al.*, 2015). Apesar das estruturas de LIDs serem referência internacional e bastante utilizadas em outros países desde a concepção de áreas residenciais, no Brasil o potencial de utilização das técnicas compensatórias ainda não é bem aproveitado (Batista *et al.*, 2011). Uma das razões observadas é que a maioria das ações de gestão de drenagem urbana no país são voltadas para a solução de problemas em áreas já urbanizadas, o que diminui as possibilidades e dificulta a implantação das técnicas.

Debo e Reese (2002) discutem como na maioria dos projetos de engenharia urbana estão presentes questões como regulações e limitações do uso do solo, controle de erosão, medidas de mitigação, poluição difusa, e outras questões ambientais que necessitam de uma abordagem multidisciplinar devido à complexidade e problemas inter-relacionados envolvidos. Nesse contexto, os sistemas de LIDs se destacam por poderem realçar a biodiversidade, beleza, tranquilidade e a estética natural de prédios, construções e paisagens, além de poder fazer esses lugares mais resilientes à mudança climática.

Sabe-se que o movimento do escoamento superficial sobre a superfície urbana carrega sedimentos, resíduos sólidos e uma grande quantidade de poluentes ligados à atividade humana, como óleos, metais pesados, fertilizantes e pesticidas. Sem um manejo adequado dessa água urbana, esses poluentes chegam aos rios, córregos e lençol freático, o que coloca em risco a saúde humana. As soluções compensatórias proporcionam então a detenção e o tratamento do escoamento por meio de interceptação, filtração e degradação de poluentes, além de reduzir o volume do escoamento potencialmente contaminado. Estudos desenvolvidos por Prince George's County (1999) no *Department of Environmental Resources* mostram que as estratégias e técnicas de LID oferecem os caminhos para alcançar metas e objetivos de gestão de águas pluviais, facilitando o desenvolvimento de planos adaptados a topografia natural, mantendo o rendimento do lote e as funções hidrológicas do local.

As soluções alternativas possuem, na maioria das vezes, uma estrutura bastante simples e aproveitam os processos naturais para promover a drenagem e disposição das águas pluviais. A Figura 3.4 mostra um exemplo de uma estrutura LID implantada em Illinois, nos Estados Unidos. “O Círculo” como é chamada a instalação, é um espaço público multifuncional localizado no centro do encontro de algumas ruas da cidade, e fornece um espaço verde que serve como sede dos eventos da comunidade local. A LID coleta o escoamento das ruas próximas para aliviar as inundações à jusante, infiltra, armazena e trata o escoamento, além de recircular a água para uma fonte pública que fornece um resfriamento local e até diminui o barulho dos carros em volta (Ballard *et al.*, 2015).



Figura 3.4 - Exemplo de LID em Illinois, EUA. (Ballard *et al.*, 2015).

Segundo Ballard *et al.* (2015), existem seis funções específicas que as instalações consideradas como LIDs podem proporcionar, são elas:

- Sistemas de coleta de águas pluviais: estruturas que coletam as águas pluviais e proporcionam o uso dentro do edifício ou do local no qual são instalados. Como exemplo, “O Círculo” construído em Illinois;
- Sistemas de superfície permeável: estruturas que permitem a infiltração da água, de modo a reduzir a proporção de escoamento que é transportada para o sistema de drenagem. Como por exemplo, telhados verdes e pavimentos permeáveis;
- Sistemas de infiltração: estruturas que facilitam a infiltração da água no solo. Geralmente esses sistemas incluem zonas de armazenamento temporário para alocar o volume do escoamento antes do lançamento lento no solo. As valas de infiltração são exemplos desse tipo de sistema;
- Sistemas de transporte: estruturas que transportam o escoamento para sistemas de armazenamento à jusante. Quando possível, esses sistemas também proporcionam o controle do volume e da vazão, e o tratamento da água, como por exemplo as valas de detenção;
- Sistemas de armazenamento: estruturas que controlam a vazão e, quando possível, o volume do escoamento que é descarregado no local, através do armazenamento e liberação lenta da água. Esses sistemas podem proporcionar o tratamento das águas do escoamento superficial, como por exemplo as bacias de detenção;
- Sistemas de tratamento: estruturas que removem ou facilitam a degradação de contaminantes presentes no escoamento. Os sistemas de biorretenção são exemplos de sistemas de tratamento.

Para cada sistema mencionado, existem diversas técnicas compensatórias que podem ser aplicadas, o que significa que o projetista tem muitas opções para escolher as técnicas que melhor se enquadram na área de estudo, além de poder utilizar uma combinação de técnicas compensatórias para a maximização do benefício que os sistemas de LIDs proporcionam. Entretanto, é importante ressaltar que sempre que possível, o escoamento deve ser gerenciado na fonte, para a diminuição da vazão à jusante e assim prevenir problemas como inundações. Entre os sistemas existentes, os sistemas de detenção são os mais utilizados no Brasil, principalmente através da utilização de bacias de detenção, que a partir dos anos 90, houve uma intensificação do seu emprego em diversas áreas metropolitanas brasileiras, tais como Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Belo Horizonte.

Por proporcionar o amortecimento de cheias, a redução de escoamento superficial e da poluição difusa no contexto urbano, essas estruturas contribuem para a redução dos impactos

da urbanização sobre os processos hidrológicos em bacias hidrográficas urbanas, e serão o foco deste trabalho.

3.4. BACIAS DE DETENÇÃO

As bacias de retenção são consideradas medidas compensatórias que possuem como composição básica um volume deixado livre para armazenamento de águas de escoamento e/ou possível infiltração, uma estrutura hidráulica de controle de saída, usualmente uma descarga de fundo, e um vertedor de emergência (Baptista *et al.*, 2011). Estas estruturas são projetadas para funcionar em série com a rede de drenagem e, geralmente, para que o esvaziamento dure até 24 horas. No contexto urbano, o objetivo dessas estruturas é impedir a inundação de áreas situadas a jusante, de modo a funcionar em série com a rede de drenagem, esvaziando-se completamente entre eventos. Além de diminuir a vazão de pico, a retenção do escoamento reduz o potencial erosivo na bacia e atua como prevenção sobre a vida aquática no corpo receptor. A Figura 3.5 mostra um desenho típico de uma bacia de retenção, enquanto na Figura 3.6 é possível ver o efeito do armazenamento no hidrograma, com a redução da energia cinética do escoamento e restituição a jusante de maneira controlada.

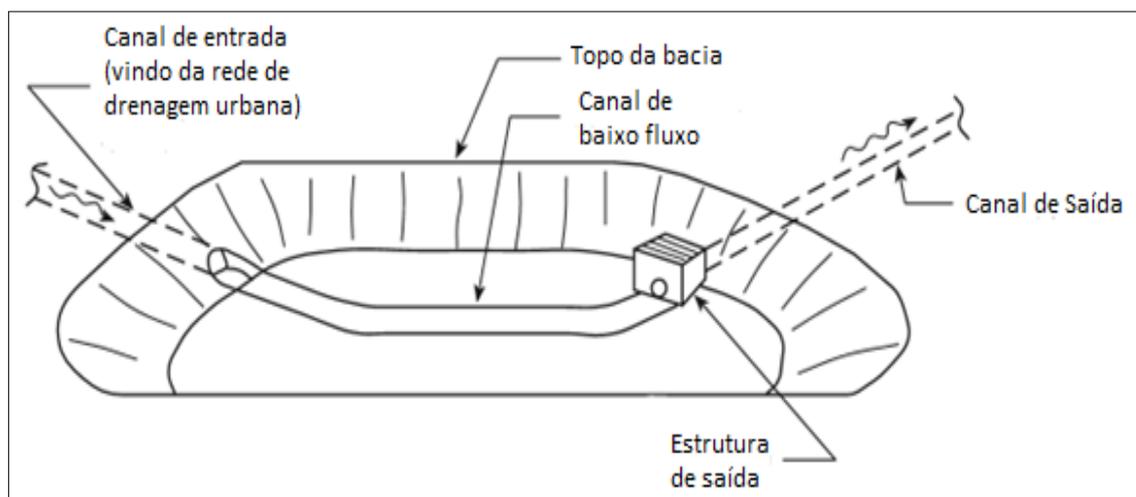


Figura 3.5 - Desenho típico de uma bacia de retenção (Gribbin, 2008, adaptado).

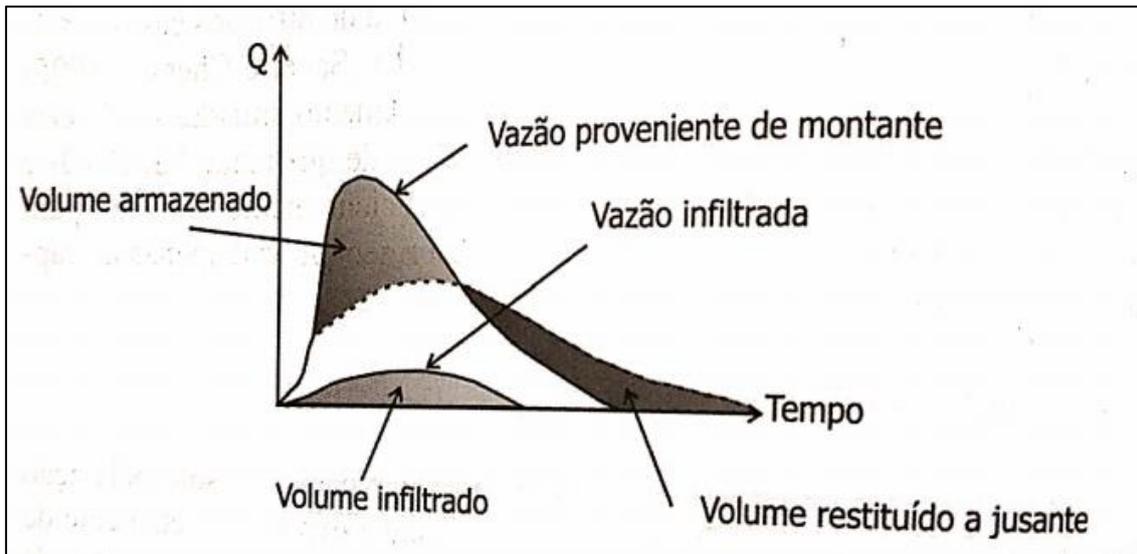


Figura 3.6 - Princípio do armazenamento (Baptista *et al.*, 2011).

No Brasil, o emprego de bacias de detenção nas concentrações urbanas teve início em meados do século passado, o que faz da técnica bem difundida no país. As primeiras estruturas implantadas tinham como objetivo essencial apenas o amortecimento de cheias, objetivo este que vem sendo mudado para uma melhor integração desse tipo de estrutura com o projeto urbanístico local, principalmente o emprego de usos múltiplos do espaço, no qual podem ser implantadas áreas verdes e ambientes propícios ao desenvolvimento de fauna e flora. Entretanto, no cenário atual a maioria dos projetos brasileiros de bacias de detenção ainda permanecem centrados sobre o objetivo de amortecimento de cheias, sem a orientação direta para a redução da poluição urbana de origem pluvial. De acordo com Baptista *et al.* (2011) esta realidade se explica pela relação com o atual contexto brasileiro do saneamento, no qual ainda é frequente as situações em que o esgoto é lançado de forma direta nos corpos d'água, sem tratamento, de modo a exigir que muitos esforços ainda sejam feitos para a redução da poluição nos corpos hídricos receptores. No DF, de forma particular, as bacias de detenção são propostas como medida preferencial no manejo da drenagem urbana para controle de quantidade e qualidade da água, conforme é estabelecido pela Resolução n° 09/2011 da Adasa. A contribuição da poluição difusa de origem pluvial é significativa e deve ser um dos critérios de projeto para a maximização dos benefícios do uso de uma bacia de detenção, que quando projetada de modo a aproveitar todos os benefícios que possa proporcionar, resulta em uma estrutura que oferece mais benefícios ao sistema urbano do que apenas o amortecimento de cheias.

Para o bom funcionamento e desempenho da bacia de detenção, o volume armazenado deve ser liberado de forma lenta por uma ou mais estruturas de saída, geralmente orifícios e um

vertedor para a liberação emergencial quando o volume de água armazenado ultrapassar o volume de projeto, de maneira que a vazão seja controlada e a detenção da água seja feita por um tempo suficiente para o depósito de matéria sólida e de poluentes. Conforme afirma Gribbin (2008), o orifício de saída deve estar sempre aberto, garantindo o esvaziamento constante até a bacia ficar vazia, enquanto o vertedor garante o extravasamento da água para o canal de saída quando a lagoa alcançar seu volume máximo. Ainda, para evitar erosões nos pontos de descarga no corpo hídrico, faz-se necessário a instalação de dissipadores de energia na saída da bacia de detenção para diminuir a velocidade de escoamento. A depender da vazão na saída da galeria e entrada da bacia, pode-se também dimensionar um dissipador de energia para garantir a manutenção da estrutura de entrada, como escadas hidráulicas.

Estudos feitos por Mah e Ho (2017) utilizando uma simulação de bacia de detenção projetada com o tempo de retorno de 100 anos para a melhora dos problemas de inundação na cidade de Kuching, na Malásia, comparam o escoamento superficial da rede de drenagem sem a instalação da bacia de detenção e com a adoção da medida compensatória. Os resultados mostram a diminuição do pico de vazão com a utilização da bacia de detenção, e o volume da bacia se mostrou suficiente para armazenar 100% do escoamento superficial gerado por uma precipitação com 100 anos de tempo de retorno, de modo a conseguir prevenir as inundações comuns na região estudada. Lim e Kueh Judy (2014) analisaram a eficiência da bacia de detenção também na Malásia, a qual foi construída adjacente ao rio Damansara para atenuar as inundações nas áreas a jusante do rio. Os resultados da simulação da bacia mostraram que para um evento de pico com 100 anos de tempo de retorno, a bacia de detenção é capaz de reduzir 15% do pico de vazão de entrada, o que atenua as inundações nas áreas urbanas à jusante do rio.

Fileni *et al.* (2019) fizeram o estudo de implantação de uma bacia de detenção em duas sub-bacias localizadas na Região Administrativa de Ceilândia, no DF, para analisar a eficiência do uso dos sistemas de LIDs para diminuição das áreas alagadas. O estudo utilizou três cenários, em um deles só haveria a implantação da bacia de detenção na chegada ao corpo hídrico, no segundo haveria a utilização da bacia combinada com a aplicação de pavimento permeável, e o terceiro cenário utilizaria a bacia na saída da rede de drenagem bem como a aplicação de pavimentos permeáveis e a implantação de reservatórios ao longo da rede. O dimensionamento da bacia de detenção foi feito com base nos cálculos recomendados pela Adasa na Resolução 09/2011, que considera a área de contribuição e a porcentagem de área impermeável. Apenas com a utilização da bacia de detenção houve uma redução do pico de vazão de 86% em uma sub-bacia e 84% na outra, além de um descarregamento mais lento

no exutório. Como limitação encontrada no uso da bacia de detenção, o volume total drenado para o exutório, bem como o número de bueiros inundados na rede, não foram diminuídos. O estudo mostra que o melhor cenário para a solução dos problemas de escoamento e inundações seria o terceiro, por ter uma quantidade maior de estruturas LIDs, que apresentou uma redução do pico de vazão similar aos outros cenários, e ainda proporcionou uma diminuição de 46% no volume total drenado bem como 30% a menos de bueiros inundados. Através desse estudo é possível notar que a bacia de detenção funciona muito bem como medida compensatória, mas que o ideal é utilizar a combinação de estruturas LID para a maximização do benefício que estas podem proporcionar.

De acordo com Certu (1998), o uso de bacias de detenção tem muitas vantagens como: efeitos paisagísticos, com a criação de áreas verdes em meio urbano; armazenamento de água que pode ser utilizado para outros fins; recarga de aquífero, no caso de bacias de infiltração; e utilização das áreas de bacia seca como espaço para prática de esportes. Ainda, Baptista *et al.* (2011) lista os impactos positivos das bacias de detenção sobre as cargas de poluição de origem pluvial, que inclui a diluição de cargas de poluição afluentes no corpo d'água armazenado na bacia de detenção, sedimentação das partículas sólidas transportadas pelo escoamento às quais estão associados vários tipos de poluentes, assimilação por vegetais de elementos eutrofizantes, uma vez que os nutrientes afluentes à bacia participam do processo de crescimento da vegetação. Entretanto, algumas limitações podem ser observadas no uso dessas estruturas como medida compensatória, como a necessidade de manutenção contínua devido à possibilidade de obstrução da estrutura de saída, ocupação de grandes áreas, e o risco de proliferação de vetores de doenças de veiculação hídrica quando a lâmina d'água permanece por muito tempo na bacia.

3.4.1. Tipos de Bacia de Detenção

A bacia de detenção é entendida como uma estrutura com função de armazenamento temporário do escoamento proveniente da precipitação em um contexto urbano, podendo ter infiltração ou não, que tenha uma escala maior que outras técnicas de armazenamento, como valetas e micro reservatórios, e conseqüentemente maior volume. Dessa forma, a literatura geralmente faz distinção entre as bacias de detenção e bacias de retenção, embora ambas possam se enquadrar no conceito de bacia de detenção. Segundo Righetto (2009), a diferença entre as duas é vista pelo funcionamento da bacia de detenção propriamente dita, que retém o volume escoado por um determinado período e depois o lança de forma gradual na rede de

drenagem a jusante, enquanto a bacia de retenção retém o volume escoado por um período de tempo bem maior, mantendo assim uma lâmina d'água permanente ou com redução por infiltração.

Baptista *et al.* (2011) discute ainda que as bacias de retenção podem ser classificadas de acordo com a forma, usos e localização em relação ao sistema de drenagem pluvial. Quanto à forma, as bacias de retenção podem ser a céu aberto ou subterrâneas, sendo as de céu aberto divididas entre bacias a céu aberto com espelho d'água permanente, bacias secas (que armazenam água apenas durante eventos de precipitação) e bacias de zonas úmidas. Por sua vez, as bacias secas dividem-se entre bacias secas com fundo impermeabilizado ou não impermeabilizado e bacias de infiltração, sendo esta última projetada para que todo o volume se infiltre no solo e, portanto, não possui dispositivo de controle de saída. Considerando as funções hidrológicas, pode-se dividir as bacias em três tipos: bacias de tempestade, instaladas em redes unitárias de esgotamento sanitário e pluvial destinadas a armazenar provisoriamente parte ou todo o escoamento e posterior condução do volume à estação de tratamento de esgoto; bacias de decantação, as quais são especialmente concebidas para a decantação de sedimentos em sistemas separadores de drenagem pluvial; e bacias de retenção propriamente ditas, que desempenham usualmente as funções de amortecimento de cheias e de controle da poluição de origem pluvial em sistemas separadores de drenagem pluvial urbana. Para os fins desse trabalho, considerar-se-á bacia de retenção como o tipo bacia de retenção propriamente dita a céu aberto, tipo de bacia o qual é mais utilizado no Brasil. A Figura 3.7 abaixo mostra um exemplo de uma bacia de retenção a céu aberto seca em Hamilton, Leicester.

A escolha do tipo de bacia a ser implantada deve levar em consideração as condições locais de instalação, como topografia, uso e ocupação do solo, pedologia, dados hidrológicos e de qualidade de água disponíveis. As condições ambientais também devem ser critério de escolha do tipo de bacia adequado, levando em consideração os possíveis impactos ambientais, uma vez que a bacia como uma estrutura de LID tem como objetivo principal a redução dos impactos negativos da urbanização. Os custos e facilidade de manutenção das estruturas devem ser parte da análise de escolha desde a fase de planejamento para garantir a viabilidade do projeto.



Figura 3.7 – Bacia de retenção com função paisagística em Hamilton, Leicester (Fonte: Ballard *et al.*, 2015).

Para as bacias a céu aberto as principais ações de manutenção necessárias envolvem usualmente as estruturas hidráulicas, limpeza do corpo d'água, bem como de áreas secas destinadas ao armazenamento e das margens da bacia, e tratamento das áreas verdes. Quanto às estruturas hidráulicas, a principal ação preventiva é a retirada de materiais que as obstruem, de modo que podem comprometer a vazão de saída ideal do orifício. A retirada de resíduos sólidos é de extrema importância tanto em bacias secas como em bacias com espelho d'água, para a garantia da qualidade sanitária do local. O crescimento de vegetação deve ser controlado tanto dentro da bacia, como nos arredores, para garantir a manutenção das condições de projeto e a qualidade ambiental (Ballard *et al.*, 2015).

Ao analisar as experiências de países do Reino Unido, França e Brasil com a utilização de bacias de retenção, Nascimento *et al.* (1999) concluem que essas estruturas contribuem para a redução da dimensão e dano potencial causados pelas chuvas no contexto urbano, além de reduzir a quantidade de poluentes na água e poder proporcionar espaços públicos para a prática de esportes ao ar livre. Ainda, salienta a necessidade de uma abordagem multidisciplinar no projeto, execução, e manutenção das bacias, para a garantia do atendimento de todos os benefícios que as estruturas de armazenamento podem proporcionar.

Silva (2017) para avaliar o desempenho de seis reservatórios de retenção localizados no Setor Taquari, Distrito Federal, fez a simulação da rede de drenagem atuando em conjunto com os reservatórios e sem a utilização dos reservatórios, analisando os hidrogramas de saída

no ponto de lançamento ao corpo receptor considerando um tempo de retorno de 10 anos. Nos resultados encontrados é possível notar a grande contribuição dos reservatórios na diminuição do pico de vazão na rede de drenagem, que sem a atuação conjunta aos reservatórios apresentou pico de 16,8 m³/s após 12 horas do início da precipitação, enquanto com a utilização dos reservatórios o pico de vazão observado foi de 0,49 m³/s após 18,5 horas do início da precipitação.

3.5. QUALIDADE DA ÁGUA PLUVIAL

A poluição difusa urbana, a qual é proveniente de múltiplas fontes, é um fator significativo no que tange à qualidade das águas subterrâneas e do corpo hídrico receptor da rede de drenagem de água pluvial. Segundo Ballard *et al.* (2015), a quantidade e tipo de poluição encontrada no escoamento superficial urbano depende de muitos fatores sendo eles: atividades já previstas acima e adjacentes à superfície que afetem a deposição de poluentes, sua detenção na superfície e a extensão em que eles são misturados ao escoamento; atividades não previstas, que podem causar uma alta concentração de poluentes inesperada; a localização e tipo de superfície, que afete as taxas de lixiviação e os mecanismos de movimentação dos contaminantes; o caminho feito pela rede de drenagem; o tamanho do período de seca anterior ao evento de chuva; a intensidade e duração da chuva, e a velocidade do fluxo associada.

O mecanismo de transporte da maioria dos poluentes é a adesão às partículas de areia que são carregadas pelo escoamento superficial, que ocorre em sua maior parte no estágio inicial da chuva. Dessa forma, o primeiro fluxo do escoamento da chuva, chamado *first flush*, carrega o sedimento que se depositou na superfície, e assim conforme a chuva avança e o fluxo aumenta, a quantidade de poluente transportado diminui. Portanto, pode-se concluir que o *first flush* transporta a maior parte dos poluentes da área urbana, sendo assim o foco do controle de qualidade da água pluvial. Conforme afirma Schueller (1987), os primeiros 25 mm de escoamento superficial geralmente transportam grande parte da carga poluente de origem pluvial.

Para análise do fenômeno *first flush* pode se utilizar a metodologia proposta Bertrand-Krajewski *et al.* (1998), na qual avaliam o comportamento da taxa de massa de poluente presente no efluente pluvial por meio de curvas adimensionais de massa $M(V)$, conforme a Equação 3.1.

$$\frac{\sum_{i=1}^j C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i} = f \left(\frac{\sum_{i=1}^j Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} \right) = f \left(\frac{\sum_{i=1}^j V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \right) \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:

C = Concentração dos poluentes na amostra;

Q = Vazão da seção transversal;

N = Número de amostra;

V = Volume de água no intervalo de tempo;

Δt = Intervalo de tempo entre as amostras.

Segundo Bertrand-Krajewski *et al.* (1998), toda curva $M(V)$ pode ser representada por uma função:

$$F(X) = X^b$$

$$\ln(F(X)) = b * \ln(X) \quad \text{Equação 3.2}$$

Em que:

X = Volume acumulado;

F(X) = Carga acumulada;

X [0,1];

F(0) = 0 e F(1) = 1.

Assim obtêm-se a relação entre fração acumulada do volume de água e fração acumulada de carga de poluentes. Com um gráfico de dispersão entre as duas variáveis é visto o coeficiente de determinação (R^2), que para ser considerado como satisfatório deve ser superior à 0,9.

Além disso, o valor do parâmetro b indica a distância entre a curva $M(V)$ e a bissetriz, a qual é utilizada como referência, uma vez que quando a curva está acima da bissetriz é confirmada a ocorrência do *first flush*. Do mesmo modo, quando a curva $M(V)$ se apresenta abaixo da bissetriz, constata-se que o fenômeno não aconteceu. Portanto, valores de b menores que 1 indicam a ocorrência do *first flush*.

Os principais poluentes encontrados no escoamento superficial urbano são: sedimentos, nutrientes, substâncias que consomem oxigênio, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e vírus patogênicos (Tucci e Bertoni, 2003). O risco potencial o qual o ambiente é exposto nesse contexto depende da sensibilidade do ambiente receptor, do caminho entre a fonte do escoamento e o corpo hídrico receptor, e do nível de diluição

disponível. Grande parte dessa poluição encontra-se fixada em sedimentos, com exceção de nitratos, de fosfatos e de algumas formas de metais que se encontram dissolvidos na água, como o zinco e o cádmio (Chebbo e Bachoc, 1993). A erosão do solo pela ação da chuva e do escoamento faz com o que partículas do solo se desagreguem, as quais serão colocadas em movimento se a capacidade de transporte sólido do escoamento for suficiente. O transporte sólido resulta em uma tendência à desestruturação das partículas erodidas, facilitando assim a dissociação de alguns dos elementos que se encontram a elas associados (Chocat, 1998).

Águas residuárias e pluviais contêm uma quantidade significativa de matéria orgânica tanto em forma particulada como solúvel (Butler e Davies, 2011). Sabe-se que a maioria dos componentes orgânicos em meio aquoso são instáveis e oxidam facilmente, biologicamente ou quimicamente, para se estabilizarem e resultam em produtos como dióxido de carbono, nitratos e sulfatos. Ainda segundo Butler e Davies (2011), os testes mais utilizados em laboratório para mensurar a quantidade de matéria orgânica na água são os testes de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Orgânico Total (COT), que basicamente medem a quantidade de oxigênio dissolvido nos processos de degradação do composto orgânico na água. Na análise da qualidade da água pluvial a análise dos nutrientes presentes, principalmente nitrogênio e fósforo, são de extrema importância para a garantia da qualidade do corpo receptor. Derivados do nitrogênio, a amônia, o nitrito, e o nitrato na água são indicadores de poluição. Alta concentração de nitrogênio contribui para eutrofização do sistema aquático e provoca um excessivo crescimento de plantas aquáticas (Tucci e Mendes, 2006). Da mesma forma, o fósforo em forma insolúvel e solúvel também contribui para a eutrofização do corpo d'água e deve ser controlado para a manutenção da qualidade do corpo hídrico.

Os microrganismos patogênicos são encontrados nas águas pluviais urbanas e se mostram como um aspecto a ser controlado, uma vez que o manejo de drenagem visa a melhoria da qualidade de vida da população urbana. O indicador mais utilizado para a detecção de microrganismos patogênicos presentes na água são os coliformes totais, grupo de bactérias Gram negativas que possuem forma de bastonetes, mais especificamente pela identificação da presença da bactéria intestinal *Escherichia coli*. A *Escherichia coli* é uma bactéria coliforme, facultativamente anaeróbia, e normalmente encontrada no intestino grosso de animais endotérmicos, de modo que são utilizadas para identificar a potencial contaminação das águas por fezes humanas ou de animais, uma vez que são veículos potenciais de

transmissão de doenças e indicam possível presença de organismos patogênicos (Righetto, 2009).

Metais pesados e compostos sintéticos também são facilmente encontrados nas águas pluviais urbanas, e são encontrados mais comumente em forma de partículas. Dentre os muitos constituintes preocupantes estão as espécies de metais pesados como arsênio, cianeto, chumbo, cádmio, ferro, cobre, zinco e mercúrio (Butler e Davies, 2011). Assim como os herbicidas e pesticidas, metais pesados são conhecidos por apresentarem efeitos tóxicos na vida aquática, e conseqüentemente na saúde humana. Com base nisso, o tratamento prévio do efluente da drenagem urbana se mostra extremamente importante para a garantia da qualidade ambiental e da saúde da população, embora ainda não seja muito utilizado na maioria das cidades brasileiras.

3.5.1. Qualidade de Água nas Bacias de Detenção

Além de controlar a quantidade de escoamento, as bacias de detenção podem controlar também a qualidade do efluente lançado no corpo d'água, de modo a impedir que a poluição originária da lixiviação da superfície urbana chegue ao corpo d'água. Os poluentes são tipicamente constituídos de hidrocarbonetos, fosfatos, nitratos, sais, pesticidas e metais pesados (Gribbin, 2008). A eficiência dos dispositivos de armazenamento na redução de poluição está associada a diversos fatores, o primeiro é relacionado ao princípio de controle na fonte, de modo que se a água lixiviar pouco as superfícies urbanas, ela carreará poucos poluentes e será mais fácil o tratamento da poluição existente. O segundo fator é ligado à natureza decantável da poluição de origem pluvial, sendo a decantação dos sólidos em suspensão um fenômeno importante para a redução dos compostos poluentes encontrados no efluente pluvial (Baptista *et al.*, 2011). Segundo Gribbing (2008), a bacia de detenção controla os poluentes pela retenção do sedimento no qual o poluente está aderido, por meio da filtração do material suspenso pela vegetação na entrada da bacia, bem como pela decantação do sedimento conforme o volume da bacia aumenta. É importante ressaltar que nem todos os poluentes são retirados pelas bacias de detenção comuns, de modo que as bacias com espelho d'água permanente têm maior eficiência na retirada de sedimentos, uma vez que o processo de sedimentação é mais eficiente com o aumento do tempo disponível para as moléculas sedimentarem.

Gomes (2015) avaliou a eficiência de oito bacias de detenção do Distrito Federal quanto à qualidade da água lançada nos corpos hídricos receptores através da análise dos seguintes

parâmetros: condutividade, cor aparente, DBO, DQO, fósforo total, nitrato, nitrogênio amoniacal, óleos e graxas, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos totais, turbidez, coliformes termotolerantes e pH. Amostras de água à montante e no ponto de lançamento final das bacias de detenção foram coletadas para a análise das eficiências. Em algumas bacias foi possível notar a diferença nos níveis de entrada e de saída da bacia, principalmente de sólidos totais, sólidos suspensos totais e cor aparente. Entretanto, os outros parâmetros não apresentaram uma remoção significativa, o que pode indicar que as bacias analisadas não estão funcionando como foram projetadas, de modo que a importância da manutenção periódica das estruturas se mostra imprescindível para a eficiência dessas estruturas.

Experimentos feitos por Sébastian *et al.* (2013) em uma bacia de detenção em uma região urbana na França, cuja capacidade de armazenamento é de 32000 m³, para caracterizar os sedimentos acumulados quimicamente e microbiologicamente, mostraram que os sedimentos encontrados na superfície da bacia apresentavam grandes concentrações de hidrocarbonetos, metais pesados e poluentes orgânicos persistentes. A partir desse estudo, e pesquisas relacionadas, nota-se a necessidade de projetar bacias de detenção para garantir a qualidade da água que chega ao corpo receptor. Nessa mesma bacia, Sebastian *et al.* (2014) analisaram a remoção e retenção de micropoluentes provenientes do escoamento superficial, de modo que 10 eventos de chuva foram utilizados com a captação de amostras de água na entrada e na saída da bacia. Os resultados mostraram uma boa eficiência para a retenção de metais pesados, de forma a aprisionar uma média de 65% de chumbo, cobre, zinco e níquel. Em estudos feitos por Chebbo (1993) para a análise de eficiência de remoção em bacias de detenção secas, a partir da medição na entrada e na saída da bacia, mostram que a eficiência de remoção de sólidos em suspensão chega a 86%, enquanto as medidas de remoção de DBO e DQO ficam em torno de 80%. A taxa remoção de metais pesados foi de, 78% para chumbo, 85% para zinco e 85% para cádmio. A eficiência de remoção de nitrogênio foi a mais baixa encontrada no estudo, sendo de 62%.

3.6. MONITORAMENTO E MODELAGEM COMPUTACIONAL EM DRENAGEM URBANA

Sabe-se que a área urbana é dinâmica e por isso, a rede de drenagem deve acompanhar o movimento de crescimento populacional que conseqüentemente aumenta a impermeabilização do solo e gera aumento no volume do escoamento superficial. Nesse

contexto, o monitoramento do sistema de drenagem e dos eventos hidrológicos se mostra como um aspecto crucial no gerenciamento de drenagem de uma cidade, de modo que este proporciona o acompanhamento no tempo e no espaço do sistema hidrológico e da rede de drenagem. Ações de monitoramento se inserem na perspectiva preventiva da infraestrutura de drenagem para a garantia do atendimento futuro e preparação frente ao risco de ocorrência de inundações (Righetto, 2009).

De forma conjunta ao monitoramento, a modelagem computacional é uma ferramenta imprescindível para o melhor entendimento do sistema hidrológico, do comportamento da água e para a prevenção de impactos futuros. Um modelo hidrológico é utilizado como um subsídio ao planejamento e à tomada de decisões, bem como para a avaliação do comportamento da bacia hidrográfica frente a condições de incerteza. Este instrumento pode ser entendido como a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas correspondentes a diferentes dados de entrada, de modo que possam ser feitos possíveis cenários futuros.

3.6.1. Monitoramento Quantitativo e Qualitativo

Além de proporcionar o acompanhamento no tempo e no espaço do sistema hidrológico, o monitoramento também produz informações, as quais formam um banco de dados, que podem ser quantitativas e qualitativas. Apesar de serem feitos separadamente, os monitoramentos qualitativos e quantitativos necessitam ser integrados, pois há uma grande relação entre a situação de quantidade e qualidade da água, de modo que a análise separada prejudica a validação dos resultados obtidos, além de não refletir a forma integrada a qual os recursos hídricos estão inseridos em uma bacia hidrográfica. O monitoramento quantitativo é feito com o objetivo de medir precipitações, volumes, na bacia hidrográfica, bem como vazões e níveis d'água em um corpo hídrico (Righetto, 2009). Assim, pode-se utilizar pluviômetros e pluviógrafos para medição de precipitações, régua limimétrica e linígrafos para a medição de nível d'água, molinetes e equipamentos acústicos para a medição de velocidade. Este tipo de monitoramento se mostra importante principalmente na obtenção de séries hidrológicas, que podem ser utilizadas para análises estatísticas de eventos de cheia e de seca, podendo assim ser base para tomada de decisão quanto ao dimensionamento da rede de drenagem.

No aspecto qualitativo, o monitoramento visa a obtenção de informações que caracterizam a qualidade da água, ou seja, características físicas, químicas e biológicas dos componentes

encontrados na amostragem. De forma específica, o tipo de informação levantada depende do objetivo da rede de monitoramento, como a identificação de qualidade da água, determinação de fontes e cargas de poluentes, e acompanhamento dos níveis de poluentes em determinado corpo hídrico (Lima, 2004). De acordo com Righetto (2009) variáveis como cor, dureza total, odor, pH, Sólidos Totais (ST), temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD), turbidez e Carbono Orgânico Total (COT), permitem uma avaliação preliminar do corpo hídrico, e devem ser escolhidas de acordo com a característica de uso e ocupação do solo da bacia de drenagem.

3.6.2. Tipos de Modelagem Computacional

Os modelos computacionais hidrológicos se tornaram parte do gerenciamento e concepção de drenagem urbana em meados dos anos 70, a partir de então os projetistas de drenagem passaram a ver a importância da utilização da modelagem, visto que além de simular cenários hidráulicos e hidrológicos, estes podem ser utilizados para a extrapolação de dados em locais onde não há informações suficientes, de modo a apresentar resultados satisfatórios. Na avaliação da drenagem, Tucci (1998) divide os modelos computacionais em três grupos distintos: modelos hidrológicos, hidráulicos e hidrológico-hidráulico.

Os modelos hidrológicos consideram a bacia hidrográfica para o cálculo de hidrogramas gerados por chuvas críticas, a propagação das ondas de cheias em canais, e podem simular o efeito de bacias de retenção no abatimento dos hidrogramas gerados. Os modelos hidráulicos simulam o escoamento em canais sob pressão atmosférica e podem gerar linhas de inundação, além de simular a qualidade de água através da análise de parâmetros selecionados. Modelos hidrológico-hidráulico, também chamados de modelos integrados, podem simular condutos forçados integrados ao escoamento superficial, além de gerar linhas de inundação e simular a qualidade de água. No cenário atual muitos modelos se destacam na concepção de projetos e no gerenciamento de recursos hídricos, como HEC-RAS, *Storm Water Management Model* (SWMM), *Storage Treatment Overflow Runoff Model* (STORM), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Neste trabalho os programas utilizados foram o SWMM e o PCSWMM, programa comercial que tem como núcleo de processamento o SWMM.

3.6.2.1. Storm Water Management Model (SWMM) – 1D

O modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) é do tipo integrado, foi desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) e pode ser utilizado em todos os tipos de gerenciamento de águas pluviais, desde drenagem urbana até análise de inundações. O modelo é capaz de fornecer o acompanhamento da quantidade e de qualidade do escoamento gerado em cada sub-bacia de análise, bem como a vazão, profundidade do fluxo, e a qualidade da água em cada conduto e canal considerado na simulação (Rossman, 2015). Pela sua versatilidade de análise, além da possibilidade de simulação tanto em eventos individuais ou contínuos, e seu livre acesso, o SWMM se mostra eficiente para a análise de redes de drenagem urbana.

O SWMM representa o sistema de drenagem por meio de quatro módulos, que são considerados os principais aspectos ambientais, sendo eles os módulos atmosférico, de transporte, de superfície do solo e águas subterrâneas (Souza, 2014). Desse modo, em cada módulo ocorrem os fenômenos do ambiente que se relacionam entre si, como a precipitação no módulo atmosférico e o depósito de poluentes sobre a superfície do solo, o fluxo de água por meio de infiltração proveniente da precipitação, no módulo transporte, e o módulo de águas subterrâneas que recebe a infiltração da superfície do solo.

Siqueira *et al.* (2019) utilizaram o modelo SWMM na bacia do córrego Cachoeirinha, em Belo Horizonte, para a construção de um gráfico de risco de inundação em bacias urbanas. Depois de inseridas as informações da bacia hidrográfica, foi feita a modelagem hidrológica-hidráulica com o modelo SWMM validado e calibrado, de modo que a construção do gráfico de risco de inundação foi feita baseada no nível máximo dos eventos de chuva de projeto simuladas. No estudo, concluiu-se que o desempenho do modelo foi satisfatório e os resultados possibilitaram a construção de faixas de risco ou níveis de alerta de risco em função do volume e da duração de chuva acumulada, o que representa uma valiosa ferramenta para a gestão do risco de inundação.

Além de considerar os diversos processos que ocorrem no ciclo das águas urbanas, o SWMM também faz a simulação hidrológica-hidráulica com a introdução de vários tipos de estruturas de LID, sendo a bacia de retenção uma delas, de modo que é possível analisar os impactos de vazão e escoamento no funcionamento da rede com algum tipo de LID ou utilizando o sistema convencional de drenagem.

Em estudo feito na bacia do Iate Clube, que tem como exutório o lago Paranoá, Souza *et al.* (2019) fizeram a simulação de diferentes cenários para a comparação do processo de

drenagem da área com o desenho do sistema de drenagem que foi implementado e as mudanças causadas pela urbanização com o modelo SWMM. Em oito cenários foi feita a estimativa de uma lagoa de retenção em cada galeria, enquanto em outros três a estimativa foi feita com duas lagoas de retenção, e o último cenário, com três lagoas. O modelo foi considerado satisfatório, e mostrou que as alternativas com mais lagoas de retenção apresentaram maior eficiência da diminuição da vazão de pico, bem como maior redução dos níveis de poluição analisados.

Sabendo das capacidades do modelo, e com base nos estudos que mostram como o seu uso pode ser de extrema importância para a gestão das águas pluviais urbanas, o SWMM se apresenta como uma ferramenta promissora na modelagem hidrológica-hidráulica por se mostrar eficiente e de fácil uso. Na análise de sistemas de drenagem urbana que envolvem uso de LID, o modelo é uma ferramenta importante para tomadas de decisão, por permitir a simulação de diferentes alternativas além da avaliação dos resultados (Souza *et al.*, 2019).

3.6.2.2. *PCSWMM 2D*

Diante da necessidade de análises de fluxo mais realistas em um sistema bidimensional, o PCSWMM 2D, programa que opera dentro do ambiente da modelagem do SWMM, foi criado de modo a abranger todo o conjunto de modelagem hidráulica e hidrológica 1D já existente no SWMM, e ainda um modelo hidrodinâmico que permite a modelagem em duas dimensões. A funcionalidade bidimensional resulta em um modelo mais preciso, pois considera a variação do fluxo no tempo, e nas duas dimensões espaciais, o que o torna mais adequado para estudos em ambientes urbanos, de inundações, e outros casos em que se espera que a água se movimente por uma área aberta sem restrições, em várias direções (Beck, 2016).

Segundo Haestad (2013), em modelos de inundação a utilização de modelagem 2D propicia a análise de fluxo com obstruções e das alturas de lâmina d'água na planície de inundação, vantagens essas que torna o resultado amplamente mais preciso quando comparado ao ambiente de simulação unidimensional.

Fileni (2016) obteve resultados satisfatórios na identificação de pontos de acúmulo em uma zona urbana na Região Administrativa de Ceilândia – DF a partir da modelagem e simulações de cenários com o PCSWMM 2D. Os resultados indicaram os locais com tendência à inundação e medidas que poderiam ser implantadas para melhorar o cenário atual.

4. METODOLOGIA

No presente trabalho estudou-se o comportamento da lagoa de retenção do Guará II, visando um melhor conhecimento do comportamento das vazões afluentes e efluentes, com vistas a proposição de melhoria na eficiência da lagoa. Assim, a metodologia consistiu no levantamento de dados por monitoramento tanto da quantidade como da qualidade da água na lagoa, e simulações hidráulico-hidrológicas em duas dimensões com o modelo SWMM, por meio do programa PCSWMM 2D.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma de forma esquemática da metodologia que contém as etapas adotadas para a concepção do trabalho.

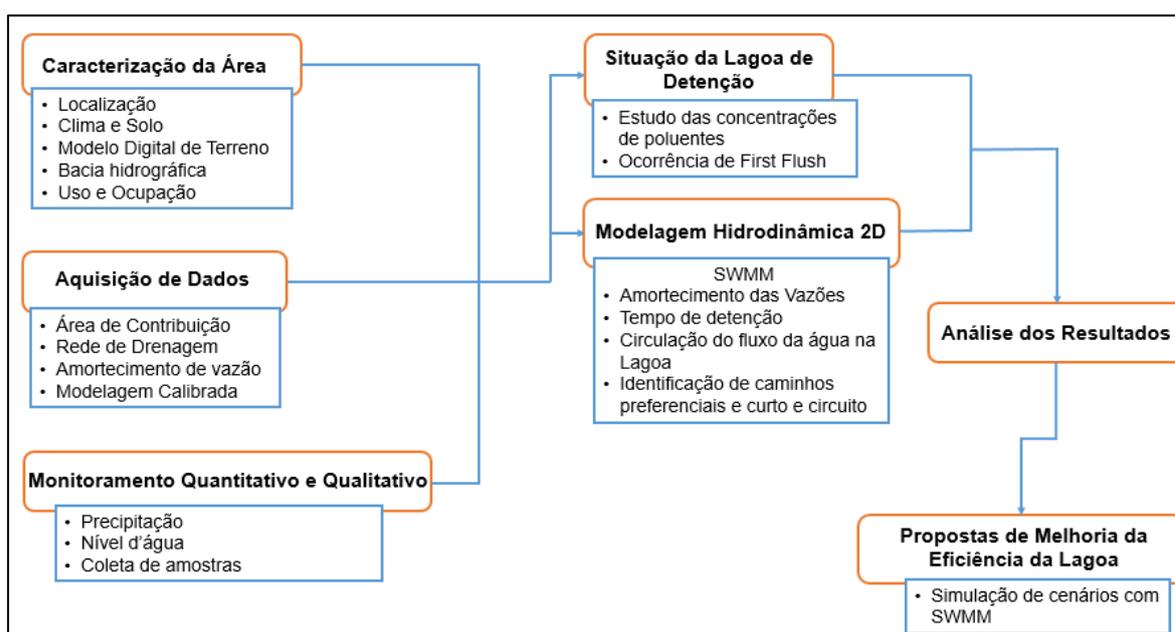


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia.

A caracterização da área de estudo, bem como a aquisição de dados já levantados na área, foi feita inicialmente para montar o cenário base da situação atual da lagoa de retenção. Nesse sentido, os trabalhos de Paula (2019), Henz (2019), Volken (2018) e Dantas (2018) auxiliaram na caracterização da área por já terem levantado informações e dados da lagoa de retenção do Guará.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do trabalho corresponde à lagoa de retenção, ou também denominada bacia de retenção, localizada na Região Administrativa do Guará – DF. A lagoa está inserida dentro do Parque Ecológico Ezequias Heringer, no Setor de Oficinas Sul, e recebe a contribuição das regiões: Cruzeiro Velho e Cruzeiro Novo, Octogonal, Setor de Indústria e Abastecimento (SIA), Subestação de Furnas, Instituto Nacional de Meteorologia, parte do Setor Sudeste, Hospital das Forças Armadas e parte do Setor de Oficinas Sul. O mapa da Figura 4.2 mostra a localização da lagoa de retenção no Distrito Federal, bem como a bacia hidrográfica e a unidade hidrográfica em que está inserida. Para a elaboração do mapa foram utilizados dados disponíveis no GeoPortal, endereço eletrônico da SEDUH que disponibiliza gratuitamente dados geográficos do DF.

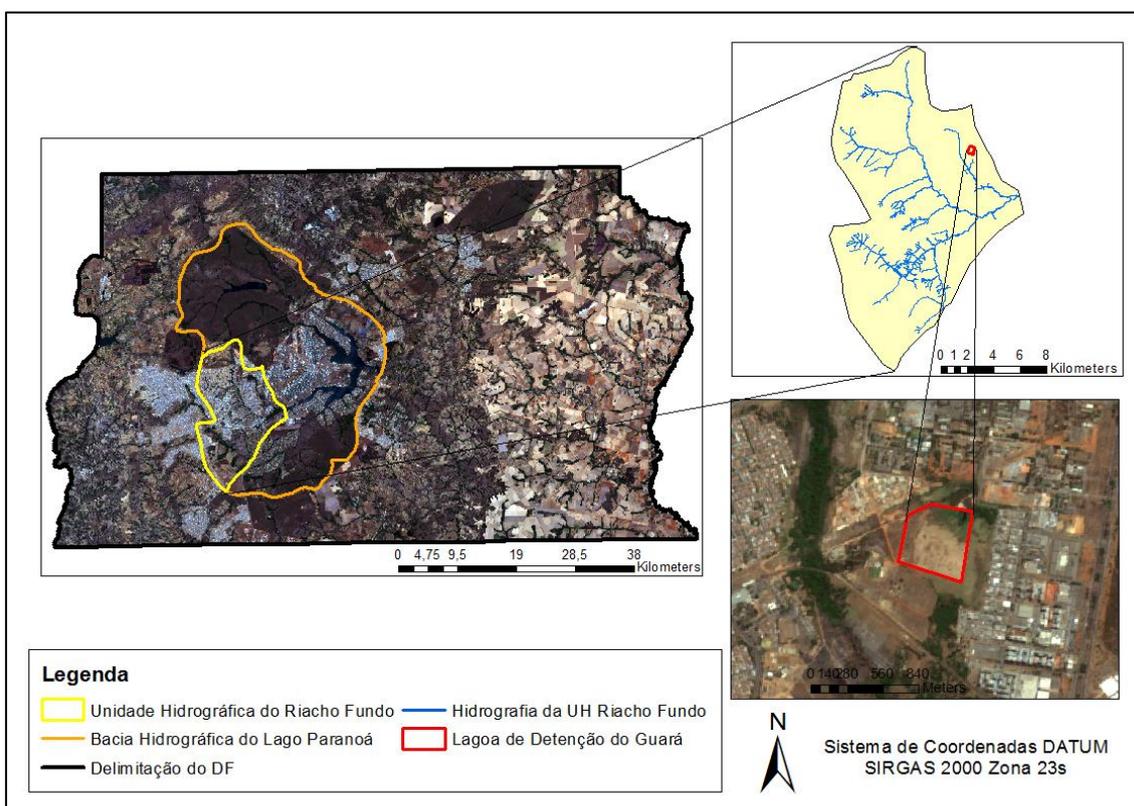


Figura 4.2 - Mapa de localização da lagoa de retenção.

A lagoa de retenção do Guará se encontra na bacia hidrográfica do rio Paranoá, na unidade hidrográfica do Riacho Fundo, possui declividade que varia de 1% a 3%, e seu ponto de lançamento é no córrego do Guará (ArKIS, 2005). A área da lagoa é de aproximadamente 25 hectares, comporta um volume de 353.280 m³ e recebe uma área de contribuição de 7,0 quilômetros quadrados.

A área de estudo não foi inicialmente concebida para ser uma bacia de retenção de águas pluviais, uma vez que foram implementadas primeiramente como lagoas de estabilização que integravam o sistema de tratamento de esgoto, proveniente das proximidades, da Caesb, as quais funcionaram até 1993. Em 2007 a lagoa começou a desempenhar a função de bacia de retenção, com o aproveitamento da área das lagoas de estabilização. Em face desse histórico, a lagoa de retenção do Guará apresenta grandes dimensões quando comparada à área necessária para drenar as regiões que contribuem para a bacia. Como é constatado por Henz (2019), a lagoa poderia receber uma maior contribuição do que já possui, por apresentar uma capacidade de amortecimento grande. A Figura 4.3 mostra a evolução da área de 2002, quando ainda permanecia com a forma das lagoas de estabilização desativadas, a julho de 2019 em plena utilização como bacia de retenção de águas pluviais.

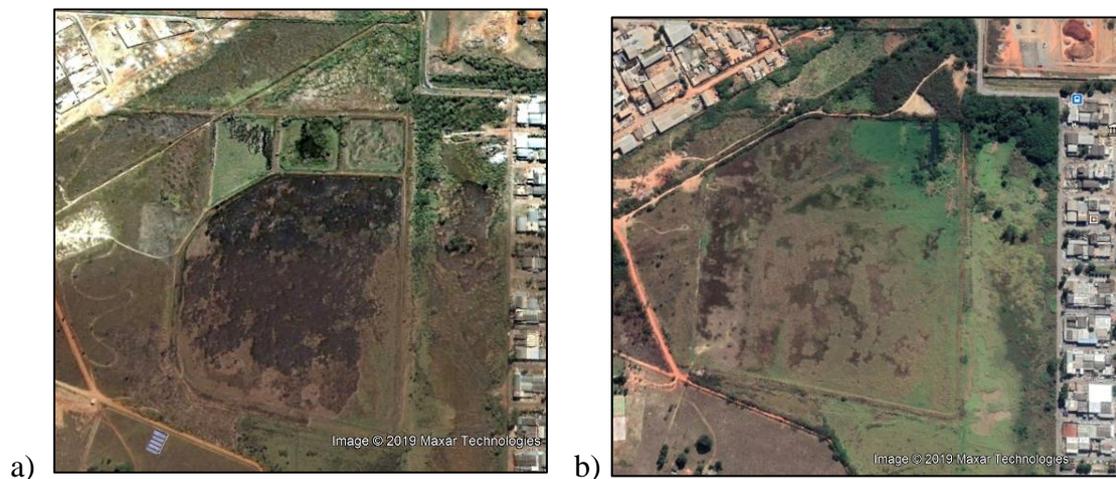


Figura 4.3 – (a) Situação da área da lagoa em 2002; (b) e em 2019 (Fonte: Google Earth).

De acordo com projeto elaborado pela ArKIS (2005), a descarga da lagoa é composta por um duto circular de fundo com 1 metro de diâmetro e por um vertedor de 20 metros de comprimento. O projeto mostra que a profundidade da área de estudo é de 1,5 metros, resultante da diferença da cota de fundo da lagoa, que é de 1079,0 m, e da crista do vertedor, de 1080,5 m. A galeria de entrada da bacia possui uma seção retangular de 8,1 x 2,5 metros, sendo o trecho final dividido em três partes retangulares paralelas com dimensões 3 x 2,7 x 2,5 metros (Dantas, 2018). A Figura 4.4 mostra os dispositivos de entrada e saída da lagoa. Durante visita técnica feita na área, no dia 21 de setembro de 2019, observou-se que a entrada da lagoa estava alagada com mau cheiro, apesar de estar no período de seca, o que indica que pode haver entrada de águas residuárias. Esse empoçamento é observado de forma contínua na entrada da lagoa, e de acordo com estudos feitos por Paula (2019), isso se deve ao fato de haver remanso na galeria de entrada. Também foi observado que a água é muito

poluída, com resíduos sólidos, óleos e com odor de esgoto. Ainda, os arredores da lagoa possuem grandes espaços de solo exposto que são utilizados como despejo de resíduos sólidos domiciliares e entulho pela população, fato este que foi observado nas visitas no mês de setembro e novembro. A Figura 4.5 mostra as situações relatadas.

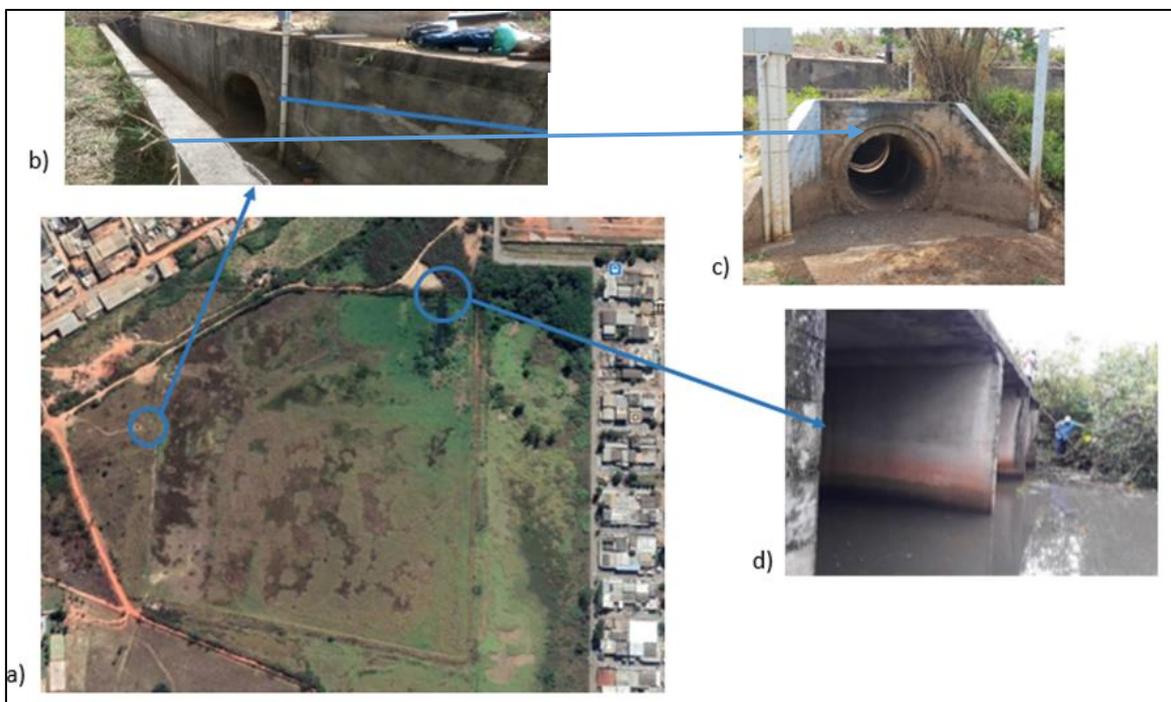


Figura 4.4 – (a) Localização das estruturas de entrada e saída da lagoa; b) vertedor e entrada da tubulação de descarga para o córrego do Guará;(c) tomada de água da descarga de fundo na saída da lagoa; (d) galeria de águas pluviais na entrada da lagoa.

Uma visita técnica foi realizada na lagoa de detenção no dia 5 de novembro de 2019, período no qual a estação de chuvas já havia começado no Distrito Federal, entretanto, a lagoa se encontrava seca assim como em uma visita prévia, no mês de setembro, e não havia lâmina d'água na descarga de fundo. Apesar da ocorrência de eventos de chuva dois dias antes da visita de novembro, devido as grandes dimensões da lagoa e pelo baixo volume precipitado, a água já havia sido escoada, como pode ser visto na Figura 4.6.

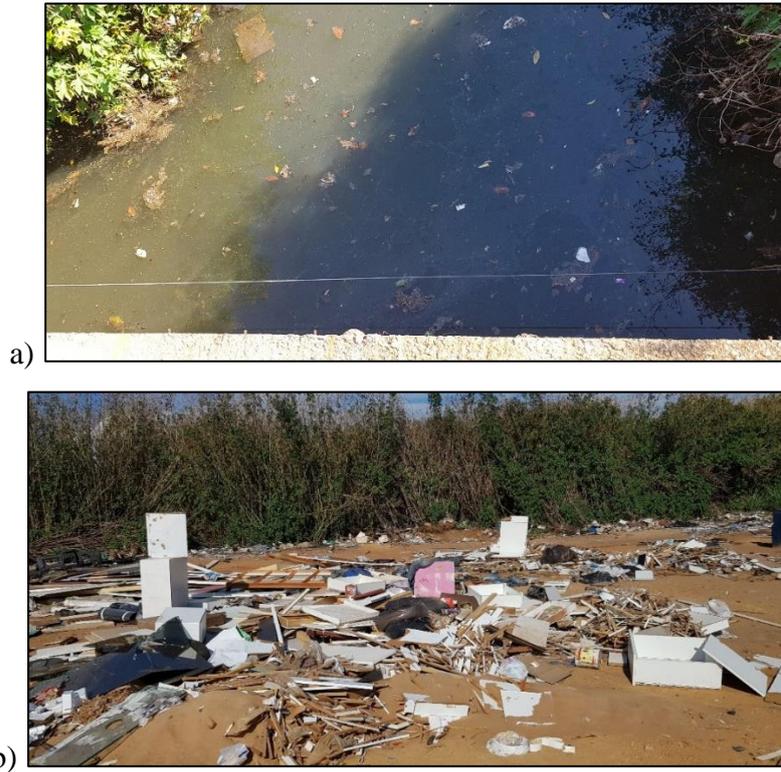


Figura 4.5 – (a) Empoçamento permanente de água na entrada da lagoa; (b) lixo nos arredores da área.



Figura 4.6 – (a) Vista da lagoa seca em setembro de 2019;(b) Idem, em novembro de 2019; (c)Tubulação de descarga do poço do vertedor, em período de estiagem.

4.1.1. Clima e Solo

O clima do Distrito Federal é marcado por duas estações bem definidas de período chuvoso e outro de estiagem. A estação chuvosa começa em meados de outubro e dura até o mês de abril, enquanto a estação seca acontece entres os meses de maio e setembro. De acordo com os dados históricos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, a média de temperatura anual varia entre 22 e 24°C, chegando a média máxima a mais que 25°C, e a mínima a 18°C. Ainda, por apresentar duas estações muito distintas, o DF apresenta grande variação de umidade, de modo que nos meses mais secos a umidade pode chegar a valores menores que 10%, enquanto na estação chuvosa o valor varia em torno de 75%.

De acordo com a classificação de Köppen, o DF tem clima predominantemente tropical, e apresenta uma média pluviométrica em torno de 1.500 mm/ano (GDF, 2009). Na Figura 4.7 é possível observar a grande variação dos valores de precipitação ao longo do ano.

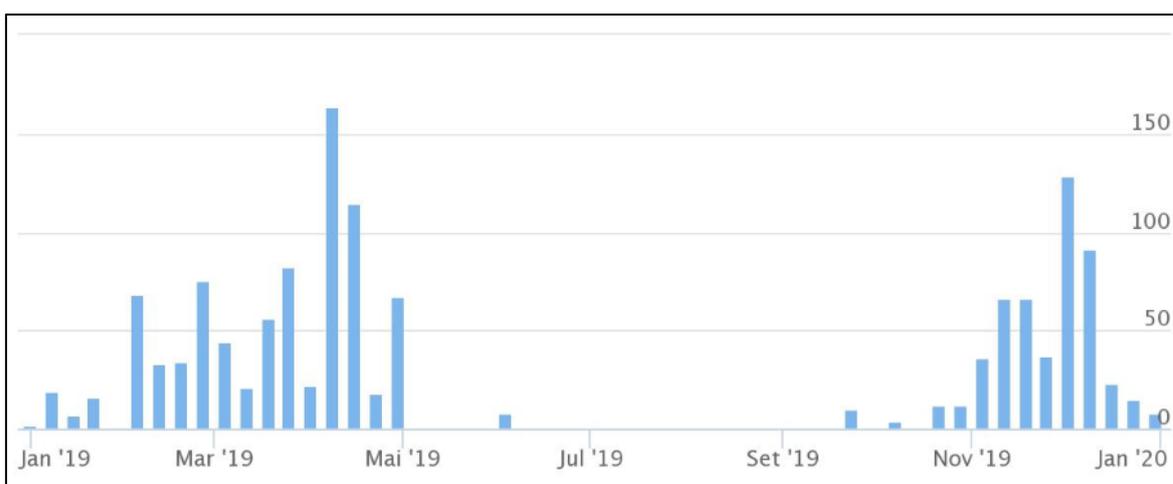


Figura 4.7 - Precipitação acumulada em 24 horas em Brasília, no ano de 2019 (INMET, 2020).

No Distrito Federal, segundo estudos feitos por Campos (2015), as principais classes de solos presentes são os Latossolos, que ocupam aproximadamente 50% da área, e os Cambissolos, que ocupam cerca de 30%. Na área de estudo o tipo de solo encontrado é o Latossolo Vermelho, caracterizado por ser formado a partir de rochas metamórficas e frequentemente em terrenos de relevo plano e suave ondulado. Esse tipo de solo apresenta capacidade moderada de infiltração da água, de maneira que a taxa de infiltração em superfície varia na ordem de grandeza de 10^{-4} m/s a 10^{-7} m/s (Campos, 2015).

4.1.2. Uso e Ocupação do Solo e Área de Contribuição

O uso e ocupação do solo é um parâmetro essencial no estudo do escoamento superficial, uma vez que com a mudança dele, a forma como a água escoar na superfície também muda. Por essa razão o uso e ocupação do solo, juntamente com o tipo de solo, é usado para o cálculo do CN, que caracteriza o escoamento superficial em determinado local.

A área de contribuição e o mapa de uso e ocupação do solo da lagoa de retenção são mostrados na Figura 4.8, e observa-se que foram identificados sete tipos de ocupação na área. As porcentagens de cada ocupação podem ser vistas na Tabela 4.1.

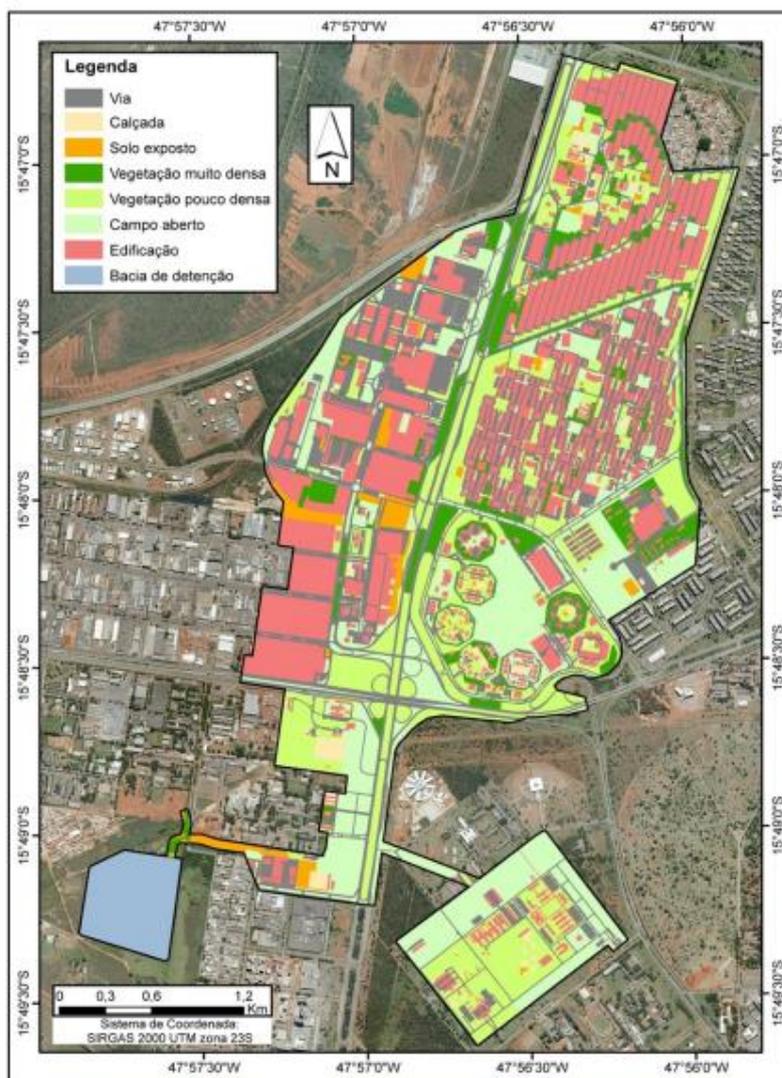


Figura 4.8 - Mapa de Uso e Ocupação da Área de Contribuição (Paula, 2019)

Tabela 4.1 – Porcentagens do Uso e Ocupação da Área de Contribuição (Paula, 2019)

Tipo de ocupação	Porcentagem
Edificações	25%
Vias Asfaltadas	25%
Campo Aberto	19%
Vegetação pouco densa	19%
Vegetação muito densa	6%
Solo Exposto	2%
Calçada	1%
Lagoa de Detenção	3%

As classes de edificações, vias asfaltadas e calçada são as que apresentam maior área, somando 51% da área de contribuição. Assim, é possível constatar que a área de contribuição da lagoa de detenção é majoritariamente urbanizada e conseqüentemente, com grandes áreas impermeabilizadas. Diante disso, destaca-se que o escoamento superficial aumenta à medida que a impermeabilização do solo também aumenta, o que evidencia a necessidade de um manejo adequado do efluente pluvial dessa água, tanto na quantidade como na qualidade.

4.2. MONITORAMENTO HIDRÁULICO, HIDROLÓGICO E DE QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA

Para a melhor aplicação da metodologia proposta, e sabendo que outros estudos foram feitos na área de estudo, foram levantados dados históricos já adquiridos pelos estudos de Paula (2019), Henz (2019), Volken (2018) e Dantas (2018) para aumentar a quantidade de dados disponíveis. Nos estudos de Paula (2019), pluviógrafos foram instalados em campo no mês de outubro de 2018, localizados em áreas de contribuição da lagoa de detenção, no Cruzeiro Velho (CV), no Cruzeiro Novo (CN), na Octogonal (Oct) e no Setor de Indústria e Abastecimento (SIA), além de um outro dentro do Parque Ezechias Heringer (Bacia), nas proximidades da lagoa de detenção. Com os dados medidos pelos pluviógrafos, foi obtida a série histórica de precipitação.

Os dados referentes à rede de drenagem e valores de amortecimento de vazão previamente observados foram obtidos dos trabalhos de Henz (2019) e Paula (2019), que realizaram a

simulação da rede de drenagem contribuinte da lagoa de retenção. Ainda, o modelo hidrodinâmico construído e calibrado nesses trabalhos foi utilizado como referência para a comparação dos resultados obtidos, visto que este já havia sido calibrado e verificado com dados experimentais.

Para a análise das vazões de entrada e saída da lagoa de retenção, Henz (2019) utilizou os dados obtidos pelos linígrafos instalados na galeria de entrada e na saída associados às medições de velocidade de fluxo em diferentes cotas. E assim obteve a curva-chave para a entrada da lagoa de retenção, mostrada na Equação 4.1.

$$Q = 321,69 * H^{11,219} \quad \text{Equação 4.1}$$

Em que:

Q – Vazão (m³/s)

H – Nível d'água (m)

Com base nisso, os dados de vazão utilizados neste trabalho foram obtidos por meio da aplicação da equação acima.

4.3. MONITORAMENTO

A etapa de monitoramento foi realizada no período de chuva, entre os meses de outubro de 2019 e março de 2020. Foram utilizadas as estruturas previamente construídas por Paula (2019) e Henz (2019) para a instalação de linígrafos de pressão e de boia, pluviógrafos, régua limimétrica e amostradores automáticos.

4.3.1. Monitoramento Quantitativo

A etapa de monitoramento quantitativo consistiu na aquisição de dados de precipitação, de nível e de vazão em eventos no período chuvoso do DF. Os dados de nível e vazão foram adquiridos tanto para a entrada, como para a saída da lagoa de retenção, com o objetivo de analisar a eficiência da lagoa na amortização da vazão de pico.

Para as medições de precipitação foram utilizados pluviógrafos instalados na área de contribuição da bacia. Os cinco pluviógrafos utilizados são de balança da marca *ONSET*, modelo *RG3-M*, que funcionam de modo a registrar o momento no qual a balança é acionada

pelo gotejamento, com uma resolução de 0,2 mm para lâmina de chuva. Os dados de cada pluviógrafo são discretizados em intervalos de 5 minutos.

A coleta dos dados de cada pluviógrafo foi feita em média a cada 30 dias, por meio de visitas nos locais de instalação, nas quais eram conferidos as baterias e o funcionamento dos equipamentos. A Tabela 4.2 contém as informações sobre a localização dos pluviógrafos, enquanto a Figura 4.9 mostra os aparelhos utilizados para o monitoramento quantitativo.

Tabela 4.2 - Localização dos pluviógrafos

Localização	Latitude	Longitude
Cruzeiro Velho	15°47'06.72" S	47°56'16.45" O
Cruzeiro Novo	15°47'39.92" S	47°56'27.75" O
Octogonal	15°48'27.73" S	47°56'14.98" O
SIA	15°48'15.21" S	47°56'56.60" O
Bacia do Guará	15°49'05.57" S	47°57'50.38" O

As medições do nível d'água foram feitas de modo contínuo nos dois pontos de controle da lagoa de detenção, com dois equipamentos distintos. Na galeria de entrada foi utilizado um linígrafo de pressão, modelo WL16, do fabricante *Global Water* (Figura 4.9 (b)), enquanto na saída da lagoa foi utilizado um linígrafo de boia, modelo Thalimedes, da *OTT HydroMet* (Figura 4.9 (c)), ambos registravam os dados a cada 5 minutos e com precisão de 0,001 m. A cada visita na lagoa de detenção os dados disponíveis nos linígrafos eram coletados e os equipamentos conferidos quanto a sua funcionalidade.

Ao analisar os dados do linígrafo instalado na seção de saída da lagoa, foi observado que o equipamento havia registrado dados de nível negativos, o que evidencia o funcionamento incorreto do aparelho. Para a resolução do problema foi feita uma calibração dos dados com base nos valores observados na régua instalada próxima ao linígrafo. Entretanto, ao fazer a extrapolação dos dados, encontrou-se valores superestimados que não seriam razoáveis dada a observação dos valores médios de nível na saída da lagoa. Por esse motivo os dados de nível, e conseqüentemente, os dados de vazão na saída da lagoa, não puderam ser utilizados neste trabalho.



Figura 4.9 - Equipamentos para o monitoramento quantitativo: (a) pluviógrafo instalado no Cruzeiro Velho; (b) linígrafo de pressão instalado na galeria de entrada da lagoa; e (c) linígrafo de boia instalado na saída da lagoa.

4.3.2. Monitoramento da qualidade das águas

O monitoramento qualitativo foi realizado com coletas de amostras na galeria de entrada e na saída da lagoa, com o propósito de analisar a capacidade de remoção dos poluentes presentes na água armazenada e as características do efluente pluvial na entrada da lagoa. As amostras foram coletadas por meio de amostradores automáticos ISCO 6712, os quais funcionam de forma que quando o nível d'água atinge uma determinada cota dentro da galeria (entrada) e ou junto à descarga (saída), o aparelho é acionado a partir de um sensor de nível e coleta até 24 amostras de 900 ml em intervalos de tempo pré-definidos (Figura 4.10).

Na entrada e na saída da lagoa os amostradores foram posicionados dentro de uma estrutura de concreto, como pode ser visto na Figura 4.11, para que fossem protegidos de interferências externas.

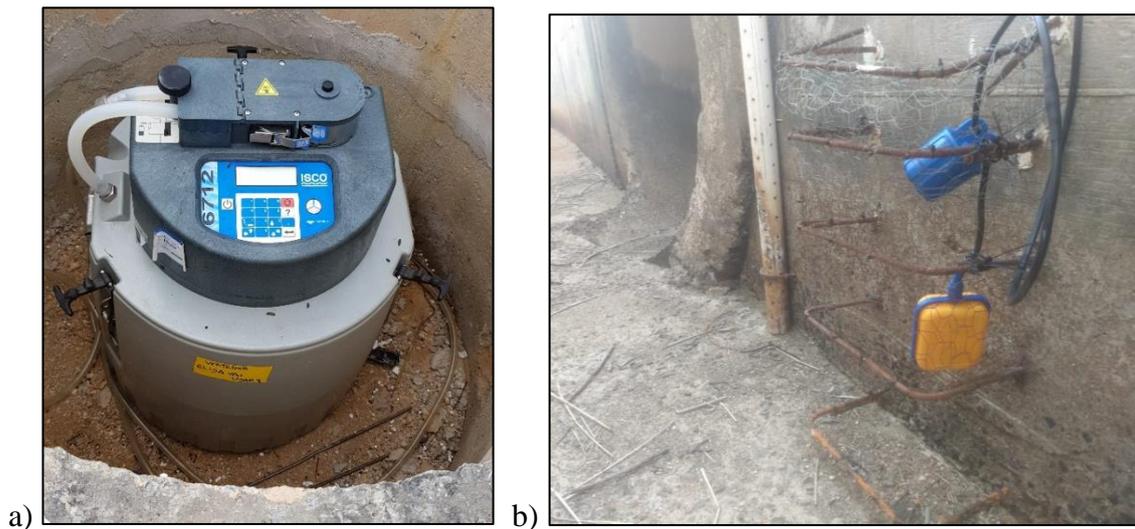


Figura 4.10 – (a) Amostrador automático; e (b) sensor de nível.

Como foi observado nas visitas, mesmo no tempo de seca o interior da galeria de entrada fica sempre alagada. Por esse motivo, o amostrador colocado na galeria foi programado para iniciar a coleta apenas quando o nível d'água fosse superior ao nível constantemente observado no alagamento.

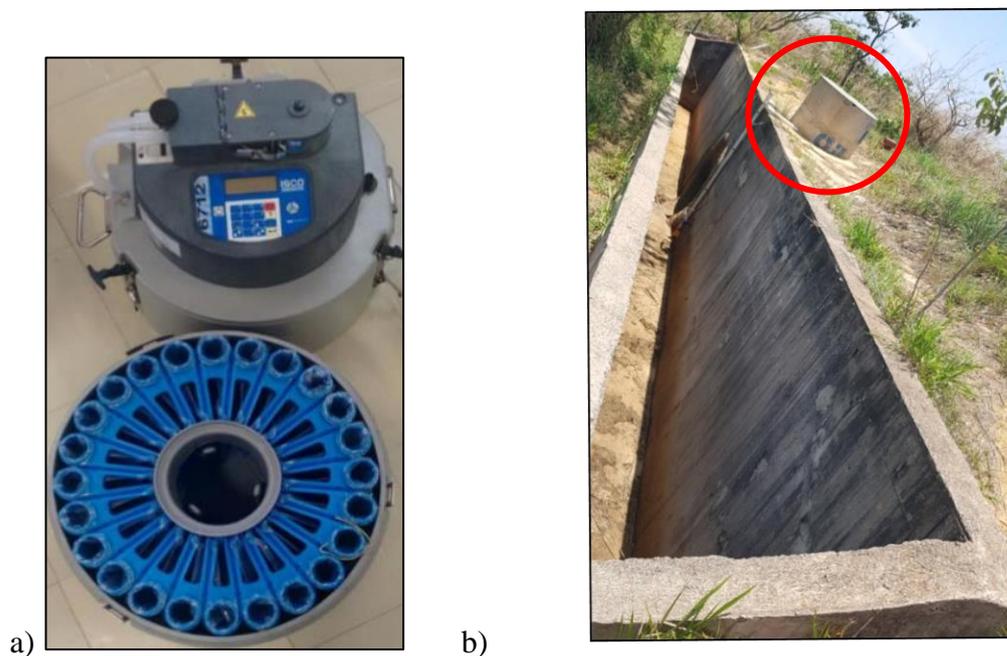


Figura 4.11 – (a) Estrutura interior do amostrador automático; e (b) estrutura de proteção de concreto na saída da lagoa.

Após as observações de eventos de chuva, foram feitas visitas de campo para recolher as amostras coletadas pelos amostradores e encaminhá-las para o Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), do PTARH na UnB, para análises dos parâmetros físico-químicos. Para uma análise geral da situação da qualidade da água que entra e sai da lagoa, foram escolhidos

os seguintes parâmetros para análise: Sólidos Totais (ST), Sólidos Suspensos (SS), Sólidos Dissolvidos (SD), pH, Condutividade Elétrica e Turbidez.

Depois de recolhidas as amostras coletadas pelo amostrador, no LSA as amostras brutas eram passadas para garrafas plásticas limpas identificadas e, no mesmo dia da coleta, eram feitas as medições de sólidos, pH, condutividade elétrica e turbidez. A Figura 4.12 exhibe as amostras brutas armazenadas coletadas na entrada e da saída da lagoa.

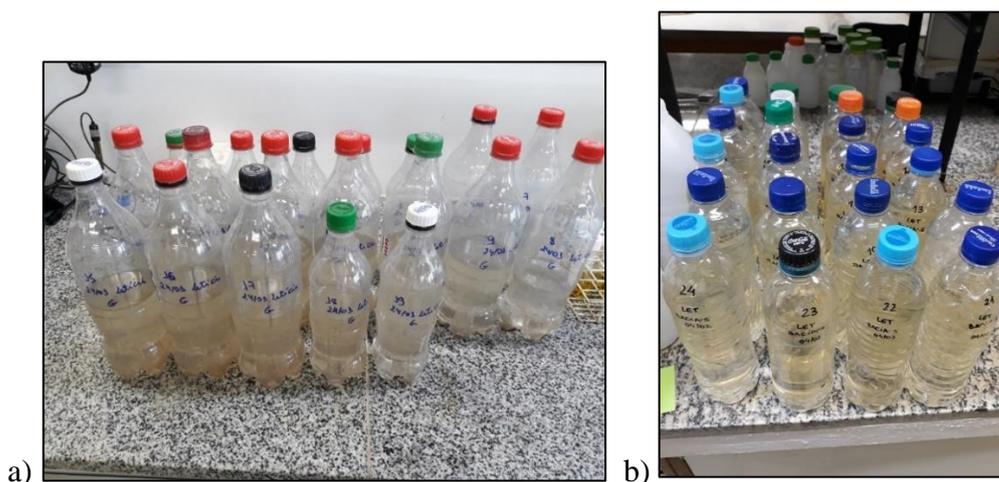


Figura 4.12 - Amostras brutas armazenadas (a) da entrada; e (b) da saída da lagoa.

Os métodos de análise, bem como os equipamentos utilizados e procedimentos para cada parâmetro foram feitos seguindo as diretrizes do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995), e estão expressos na Tabela 4.3.

A análise dos dados foi feita por meio da avaliação da variação da qualidade do efluente pluvial ao longo dos eventos de precipitação. Com o objetivo de fazer uma análise geral do impacto do escoamento superficial de uma área urbanizada em um corpo hídrico, e visto que os dados na saída da lagoa foram comprometidos devido aos problemas no linígrafo, aprofundou-se no estudo das amostras de água coletadas na galeria de entrada da lagoa.

Ainda, sabendo que a análise da ocorrência do *first flush* evidencia a qualidade do efluente pluvial depois da lavagem da área de drenagem, foi investigada a ocorrência do fenômeno nos eventos monitorados com o estudo da qualidade da água na entrada da lagoa.

Tabela 4.3 - Parâmetros e métodos das análises de qualidade de água

Parâmetro	Unidade	Método	Equipamento
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	Balança de Precisão
Sólidos Suspensos	mg/L	Gravimétrico	Balança de Precisão
pH	-	Eletrométrico	pHmetro
Condutividade	μS/cm	Condutivimétrico	Condutivímetro
Turbidez	NTU	Nefelométrico	Turbidímetro

4.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem da lagoa de retenção do Guará foi feita com o modelo SWMM e por meio do programa PCSWMM Professional 2D, concedido pela CHI com uma licença estudantil. Foram feitas simulações de ondas de cheia com base em uma chuva de projeto com tempo de retorno de 10 anos, visto que em projetos de estruturas de drenagem esse é o tempo de retorno recomendado.

O PCSWMM Professional 2D foi desenvolvido pela *Computational Hydraulics International* – CHI, e utiliza o ambiente de modelagem do SWMM acoplado a uma interface de geoprocessamento, além de contar com o módulo de duas dimensões. Nesse trabalho foi utilizado a versão 7.3.3095 do programa, na qual está integrado o SWMM versão 5.0.013.

A modelagem foi feita utilizando a área interna da lagoa de retenção, de modo que foi necessário importar para o programa dados como delimitação da área da lagoa, modelo digital de elevação e localização da galeria de entrada e da saída da lagoa. De acordo com observações feitas por Volken (2018), a lagoa de retenção tem o fundo de argila compactada, e por isso é dificilmente infiltrada. Por isso, para as simulações adotou-se um valor de CN igual a 98, que considera um alto nível de impermeabilização.

Para as simulações, foi utilizada uma chuva de projeto, a qual foi calculada pelo método dos blocos alternados a partir da equação da curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência), adotada pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. A escolha pela chuva de projeto nas simulações se deve ao fato de que esta proporciona uma análise de eventos de precipitação mais intensos do que os observados no período de amostragem. Desse modo, pode-se observar o comportamento da lagoa de retenção para vazões críticas.

$$i = \frac{1574,70 * T_R^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Em que:

i = Intensidade da chuva (mm/h);

T_R = Tempo de retorno (ano);

t = Intervalo de tempo (min).

Assim, foram utilizados os seguintes valores: tempo de retorno igual a 10 anos, intervalo de 5 min e duração de 24 horas. Segundo as recomendações do manual de drenagem da Adasa (2018), bem como o termo de referência da Novacap (2019), esses valores proporcionam uma margem de segurança na concepção de projetos de drenagem no DF. A figura 4.13 abaixo mostra o hietograma da chuva de projeto utilizada.

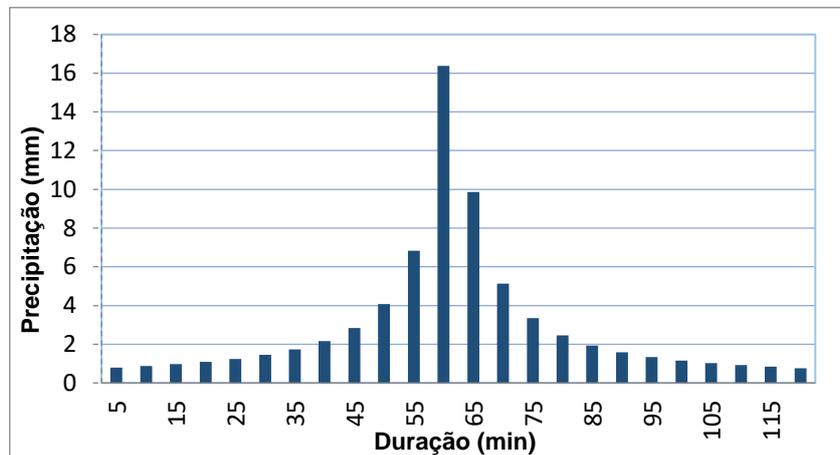


Figura 4.13 - Hietograma da chuva de projeto para um tempo de retorno de 10 anos.

Nas simulações foi adotado o método de infiltração Curva Número do SCS, devido a facilidade na aquisição de dados, que caracteriza o solo conforme sua capacidade de infiltração determinando o coeficiente superficial. Em relação ao método de propagação de escoamento, foi utilizado o método da onda dinâmica, por levar em consideração todos os componentes da equação de Saint-Venant, e assim promover uma simulação mais real, e mais precisa dos fenômenos que acontecem desde a precipitação até a saída da lagoa.

4.4.1. Modelagem no PCSWMM Professional 2D

Como etapa prévia para as simulações da área da lagoa de retenção, foi feita a simulação de toda a rede de drenagem associando à todas as sub-bacias da área de contribuição a chuva de projeto, de modo que pudesse ser constatado no final da rede qual a vazão máxima que

chega na lagoa, e assim pudessem ser feitas as simulações 2D. Para essa etapa utilizou-se o modelo em uma dimensão feito por Paula (2019), o qual contempla toda a área de contribuição da bacia e foi calibrado e verificado quanto à eficiência. Na Figura 4.14 é possível observar o hidrograma resultante na entrada da lagoa de retenção proveniente da simulação com a chuva de projeto, o qual foi utilizado como dado de entrada para o modelo 2D construído.

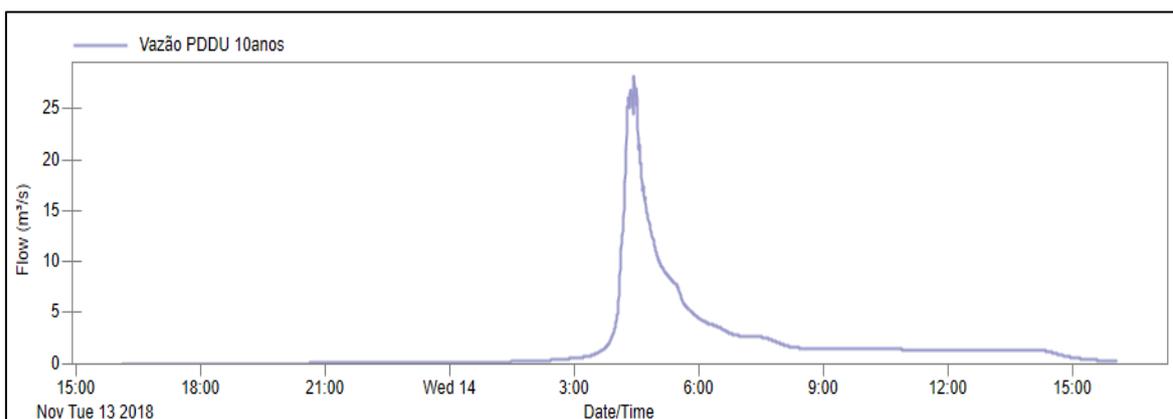


Figura 4.14 - Hidrograma da entrada da lagoa com base na chuva de projeto.

Com base em observações feitas por Henz (2019) e Paula (2019), e na confirmação por meio de observações in loco, a lagoa de retenção do Guará possui lugares com curto-circuito e um caminho preferencial direto da galeria de entrada para a saída. Esse fato faz com o que as simulações 1D apresentem dificuldades em representar a realidade da lagoa, uma vez que a modelagem em uma dimensão não considera esses fatores.

Diante disso, e sabendo que a ocorrência de caminhos preferenciais e curto-circuito provoca uma diminuição da eficiência da lagoa na remoção de poluentes, assim como foi constatado por Henz (2019), foi feita uma modelagem 2D da lagoa para que pudesse ser feita a identificação desses fenômenos.

No programa PCSWMM Professional 2D foi utilizada a metodologia recomendada para a análise do fluxo da água em determinada área, que consiste na produção de uma malha 2D a partir do MDT da área de estudo. Para a criação do modelo 2D deve-se colocar como dado de entrada a delimitação da área de estudo, que servirá como limite para a criação da malha, os pontos de elevação da área (criados pelo próprio PCSWMM), um MDT e, de modo opcional, obstruções que possam interferir no fluxo da água.

O programa disponibiliza vários tipos de malha que podem ser produzidas de acordo com o interesse da modelagem. As opções são de malhas hexagonais, retangulares, direcionais ou adaptáveis. Assim, para áreas abertas, como o caso do estudo desse projeto, o programa

recomenda que seja utilizada a malha hexagonal. O resultado da malha são células hexagonais que correspondem a uma determinada área da lagoa, e que possuem em cada extremidade um nó, o qual possui uma determinada elevação.

Além disso, é possível definir a resolução espacial das células da malha, que define qual o tamanho da célula. O PCSWMM recomenda que a resolução não seja menor que 2 m, de modo que na avaliação do modelo e dos interesses do projeto, optou-se por utilizar uma malha com 5 m de resolução, a qual proporcionou um resultado satisfatório para as análises. Dessa forma, com a malha criada, foi possível adicionar aos nós uma vazão de entrada e assim ao final da modelagem foi possível ver o fluxo da água a partir do local onde ela foi inserida no sistema. Assim, para todas as simulações utilizou-se a vazão obtida como resultado do escoamento superficial da área de contribuição com a chuva de projeto com tempo de retorno de 10 anos. Ainda, a resolução das células 2D produzidas a partir da malha foi definida como de 5 metros considerando o tamanho da lagoa e a resolução necessária para obter o resultado esperado.

Por fim, foi possível observar os caminhos da água dentro da malha, o fluxo, bem como a altura da lâmina d'água em cada célula hexagonal. A análise é feita ao longo do tempo, portanto foi observado o comportamento da água na lagoa ao longo do evento de chuva, bem como o seu esvaziamento que ocorre depois do evento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da apresentação dos resultados, é importante ressaltar que a pandemia da COVID-19 prejudicou a obtenção de dados em campo, que estavam planejados para serem concluídos com os dados do início do período chuvoso de 2020-2021. Assim, os resultados obtidos referem-se ao período chuvoso de 2019-2020, quando foram iniciados os trabalhos.

Para os resultados de precipitação e qualidade de água foi feita uma discretização em eventos, que correspondem aos dias e horários nos quais houve coleta na entrada da lagoa. A Tabela 5.1 mostra os dias de cada evento, bem como os horários de coleta na entrada, na saída e o número de amostras coletadas. Nos eventos dos dias 20 e 29 de fevereiro de 2020 não houve vazão o suficiente na saída para que houvesse coleta de amostras. Com base nesses dias e horários, os dados coletados de precipitação durante o período de amostragem foram analisados.

Tabela 5.1 - Datas e horários dos eventos monitorados

Evento n°	Entrada			Saída		
	Data	Horário do início da coleta	N° de amostras	Data	Horário do início da coleta	N° de amostras
1	24/01/2020	00:01	19	24/01/2020	10:48	12
2	03/02/2020	18:33	24	04/02/2020	07:49	24
3	05/02/2020	19:15	24	06/02/2020	01:24	24
4	07/02/2020	16:58	24	07/02/2020	21:54	19
5	20/02/2020	15:30	24	20/02/2020	-	-
6	29/02/2020	13:02	24	29/02/2020	-	-
7	02/03/2020	14:40	24	02/03/2020	19:59	20

5.1. PRECIPITAÇÃO

O monitoramento dos dados coletados pelos cinco pluviógrafos instalados foi realizado entre os meses de outubro de 2019 e março de 2020. Para o estudo da vazão que chega na lagoa de retenção do Guará após os eventos de precipitação foram feitos hietogramas para os sete eventos identificados, que podem ser observados nas Figuras 5.1 a 5.7 abaixo.

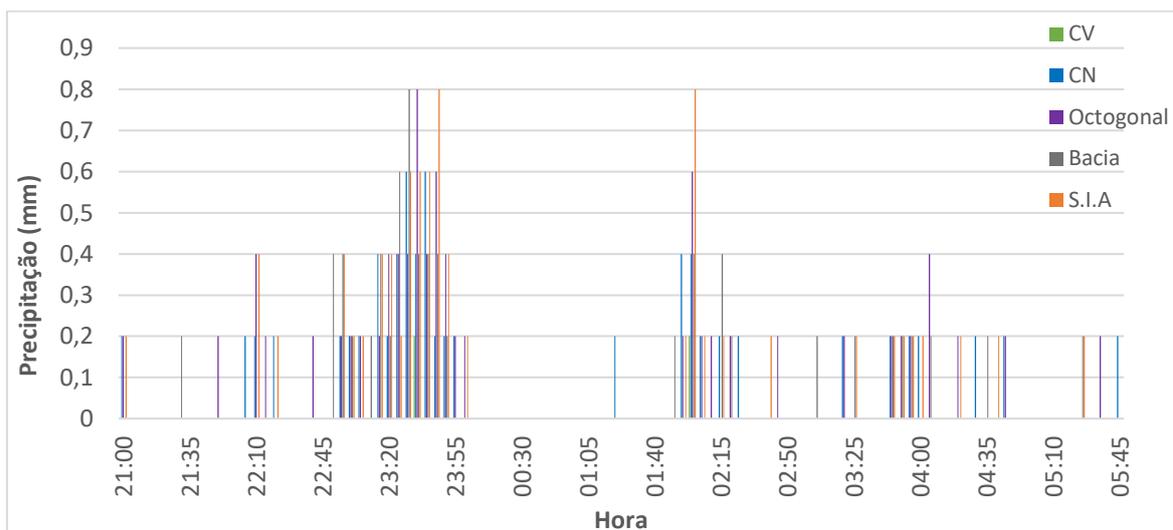


Figura 5.1 – Hietograma do Evento 1 (24/01/2020).

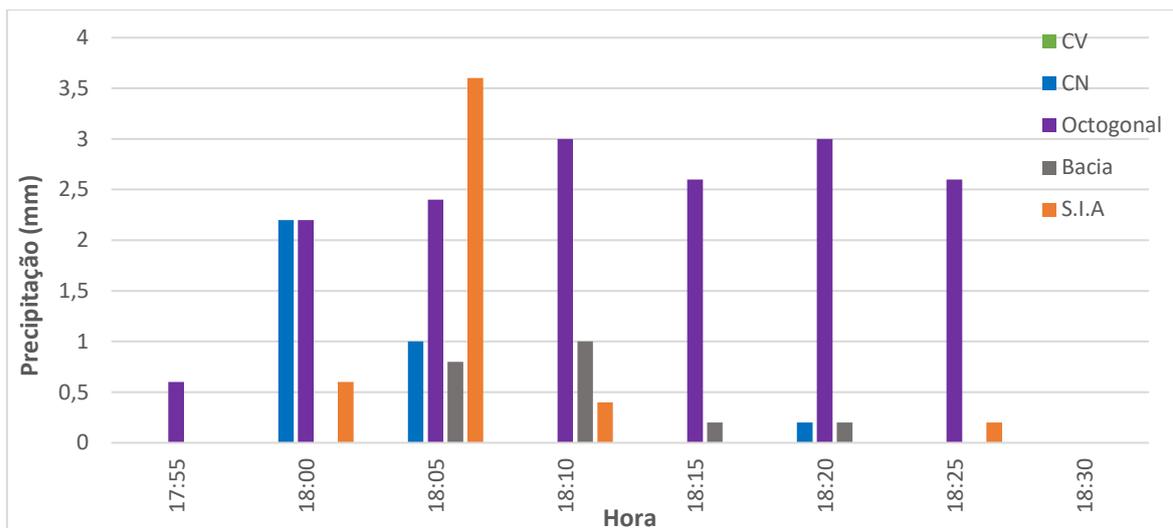


Figura 5.2 – Hietograma do Evento 2 (03/02/2020).

É possível observar que há uma grande variabilidade espacial pluviométrica na região, uma vez que há uma diferença significativa entre as precipitações medidas em cada pluviógrafo. Em todos os eventos nota-se que o pluviógrafo instalado no Cruzeiro Velho registrou as menores precipitações, enquanto as maiores precipitações foram registradas pelo pluviógrafo instalado no SIA.

Além disso, as Figuras 5.1 e 5.4 evidenciam como os eventos dos dias 24/01/2020 e 07/02/2020 foram caracterizados por chuvas com picos menores de volume e períodos maiores de duração, quando comparadas com as chuvas dos outros eventos. Nesse contexto o evento do dia 24/01/2020 se destaca por apresentar precipitação máxima de 0,8 mm no cenário acumulado em 5 minutos, sendo assim o menor valor de pico registrado no período de amostragem.

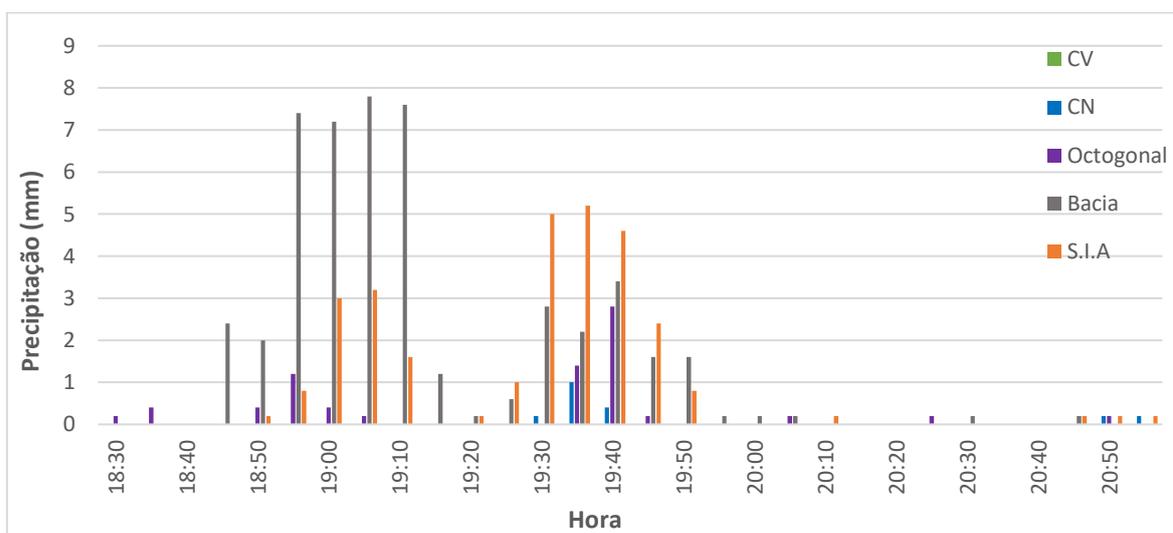


Figura 5.3 – Hietograma do Evento 3 (05/02/2020).

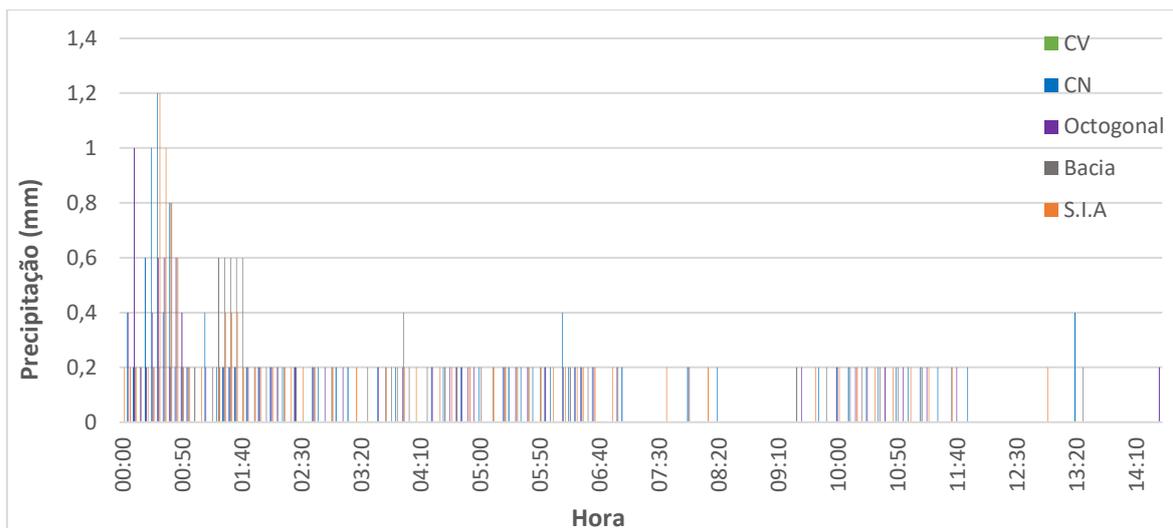


Figura 5.4 – Hietograma do Evento 4 (07/02/2020).

No que tange aos eventos dos dias 03/02/2020, 05/02/2020, 20/02/2020 e 29/02/2020, em comparação com os demais eventos, nota-se que estes apresentam os maiores valores de precipitação e com menores durações de chuva, de modo que o evento do dia 05/02/2020 apresentou o maior pico de volume no cenário acumulado em 5 minutos, com 7,8 mm. Ainda, o evento do dia 20/02/2020 apresentou o menor tempo de duração de chuva, com 25 minutos de duração.

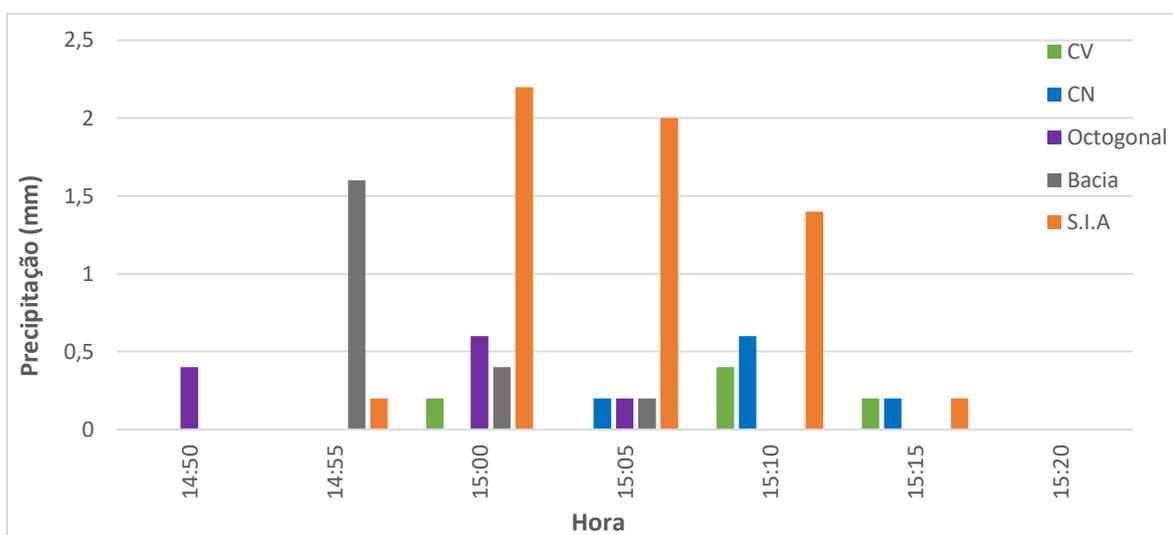


Figura 5.5 – Hietograma do Evento 5 (20/02/2020).

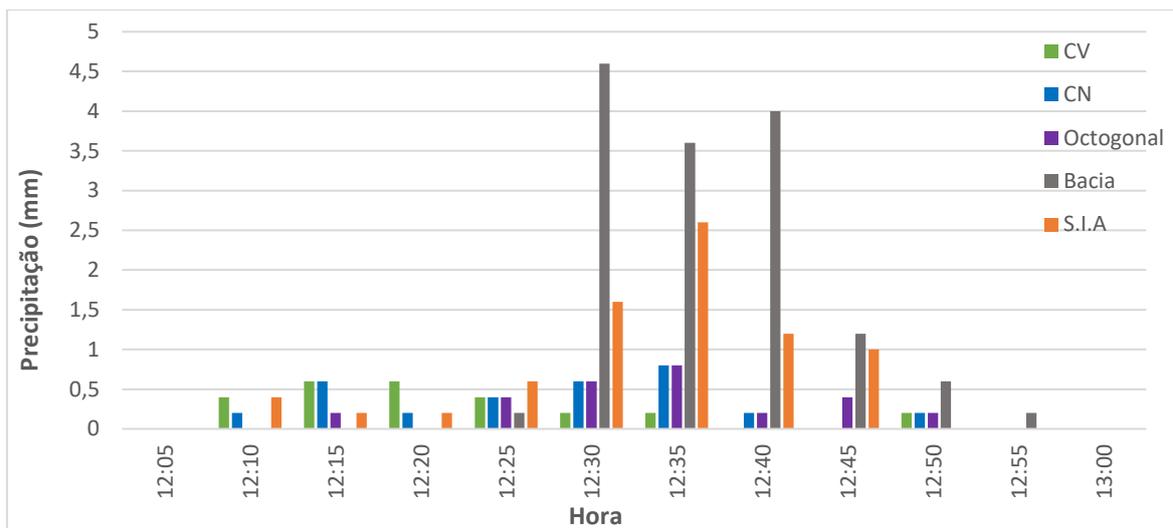


Figura 5.6 – Hietograma do Evento 6 (29/02/2020).

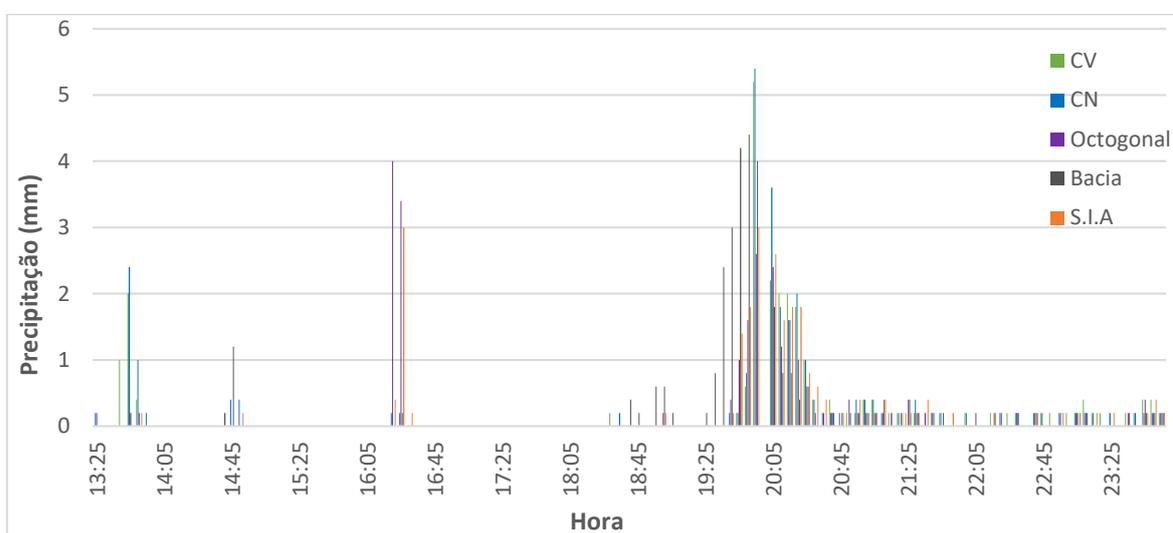


Figura 5.7 – Hietograma do Evento 7 (02/03/2020).

Assim como o comportamento dos eventos dos dias 24/01/2020 e 07/02/2020, o evento do dia 02/03/2020 também se apresenta de forma mais distribuída ao longo do tempo, se diferenciando destes no volume precipitado, o qual foi significativamente mais alto.

Segundo Righetto et al. (2017), espera-se que quanto maior o número de dias secos antecedentes, maior seja também o carreamento de poluentes pelo evento chuvoso seguinte ao período sem chuva. Sabendo que o estudo da intensidade e do número de dias secos antecedentes é de suma importância para o entendimento da quantidade e transporte de poluentes no escoamento superficial, foi feito o cálculo destes e do tempo de retorno para cada pluviógrafo em cada evento com base na curva IDF (Equação 4.2). Os resultados podem ser vistos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tempo de retorno e intensidade dos eventos monitorados

Pluviógrafos	Evento 1		Evento 2		Evento 3		Evento 5		Evento 6		Evento 7	
	TR	I (mm/h)										
CV	-	-	-	-	< 1	0,5	< 1	3,2	< 1	3,7	< 1	21,3
CN	< 1	2,4	< 1	9,3	< 1	2,6	< 1	6,7	< 1	5,2	< 1	7,4
Oct	< 1	1,9	< 1	22	< 1	2,9	< 1	4,8	< 1	5,6	< 1	0,4
Bacia	< 1	2,1	< 1	9,4	1,8	9,5	< 1	12	< 1	30,9	< 1	16,8
SIA	< 1	1,7	< 1	12,5	< 1	6,5	< 1	22,5	< 1	7,9	< 1	0,4
Nº dias secos:	0		5,9		0,6		0,9		0,9		0,4	

É possível observar que a grande maioria dos tempos de retorno foram pequenos, não chegando a um ano, exceto pelo evento registrado no pluviógrafo da Bacia no dia 07/02/2020, o qual apresentou um tempo de retorno igual a 1,8 anos. Ainda assim, nota-se que todos os eventos monitorados tiveram baixa intensidade e tempos de retornos que denotam chuvas mais corriqueiras e frequentemente observadas.

5.2. QUALIDADE DA ÁGUA

Os dados de qualidade foram obtidos para cada evento inicialmente na entrada e na saída da lagoa, entretanto devido aos problemas nos equipamentos não foi possível analisar os dados da saída da lagoa. Dessa forma, os resultados de qualidade da água pluvial mostrados se restringem às coletas feitas na galeria de entrada.

Apesar do amostrador ter sido programado para recolher 24 amostras a cada evento, em alguns eventos não foram coletadas todas as amostras, provavelmente pela falha da bateria do equipamento antes que todas as amostras fossem coletadas, ou porque o nível da água na seção baixou durante o período de coleta.

Foram recolhidos 7 eventos na entrada da lagoa e 5 na saída, totalizando 262 amostras. Para cada uma dessas amostras foram medidos os parâmetros descritos na Tabela 4.3. Neste trabalho são apresentadas as análises quanto aos resultados dos parâmetros físicos condutividade elétrica, turbidez e sólidos (totais, suspensos e dissolvidos). O estudo desses parâmetros tem como objetivo o melhor entendimento da concentração de sedimentos no efluente pluvial.

5.2.1. Condutividade elétrica

Os dados de condutividade elétrica evidenciam uma variabilidade significativa do parâmetro nos eventos monitorados, como pode ser visto na Tabela 5.3. O maior valor de condutividade elétrica é observado no evento do dia 03/02/2020, com 155,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, no qual também foi observado o maior número de dias antecedentes de seca. Esse fato indica que durante o período de estiagem antecedente ao evento monitorado houve maior acúmulo de material depositado na superfície, que posteriormente foi lavado pela chuva. Nesse mesmo dia o menor valor medido de condutividade foi de 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo superior à média dos valores medidos, de 77,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Já o menor valor obtido foi de 28,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no dia 05/02/2020. Ao analisar o desvio padrão da condutividade nota-se que há uma elevada dispersão entre os dados, corroborando a variabilidade pluviométrica entre os eventos monitorados.

Tabela 5.3 - Parâmetros estatísticos da condutividade

Parâmetro	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
N° de amostras	163
Mínimo	28,2
Máximo	155,7
Média	77,8
Mediana	69,5
Desvio Padrão	27,9

A figura 5.8 mostra os polutogramas de condutividade elétrica ao longo da onda de cheia nos dias dos eventos monitorados. Sabendo que esse parâmetro está relacionado à presença de sólidos dissolvidos, e ao observar os eventos dos dias 05/02/2020, 07/02/2020, 20/02/2020 e 02/03/2020, é possível ver que o pico de condutividade se dá anteriormente ao pico de vazão, o que pode indicar a ocorrência de *first flush*. Com os resultados obtidos constata-se que não é possível estabelecer uma relação de proporcionalidade entre vazão e condutividade elétrica.

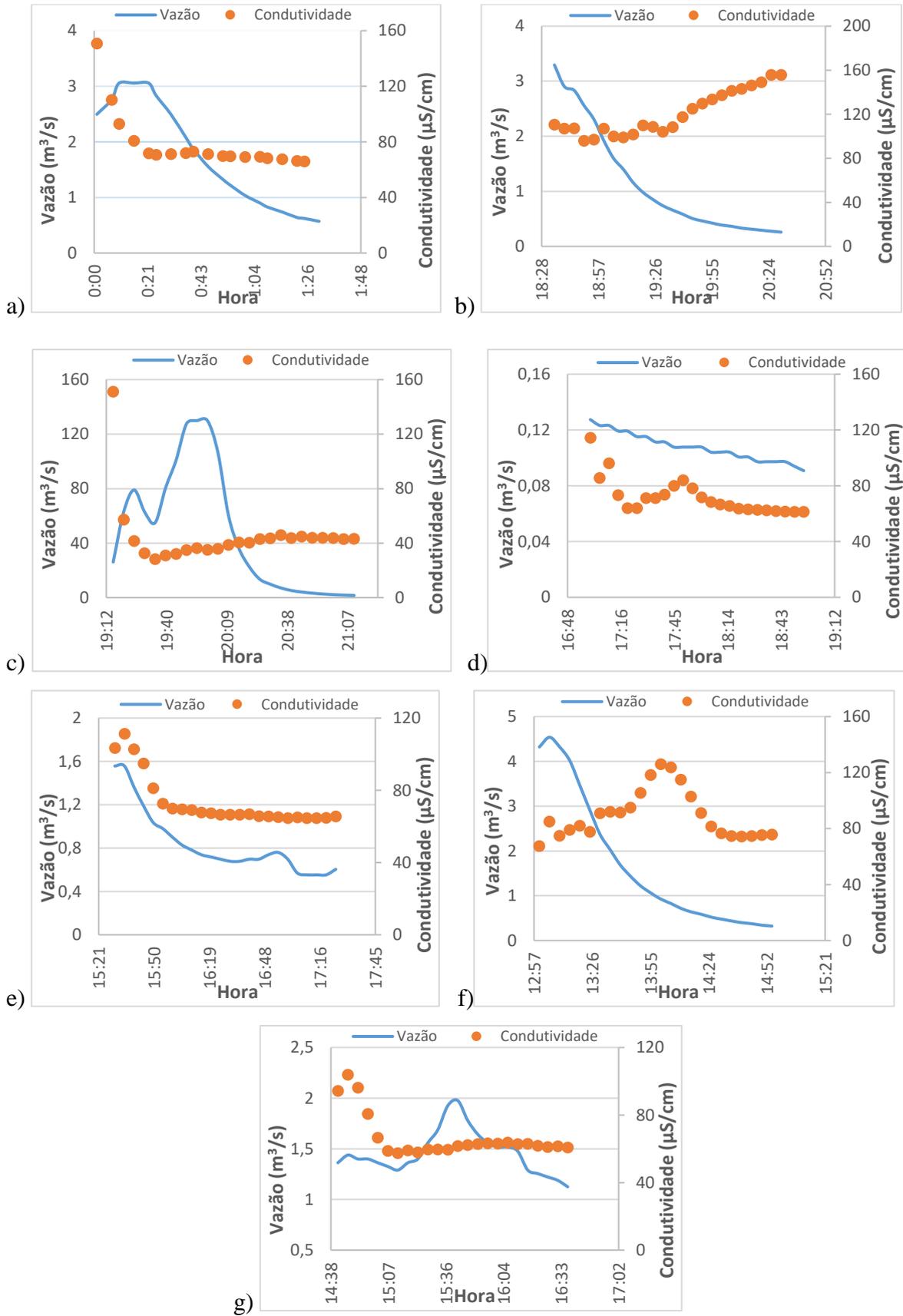


Figura 5.8 – Hidrogramas e polutogramas de condutividade elétrica dos eventos dos dias (a) 24/01/20; (b) 03/02/20; (c) 05/02/20; (d) 07/02/20; (e) 20/02/20; (f) 20/02/20; e (g) 02/03/20.

5.2.2. Turbidez

Os valores de turbidez encontrados na galeria de entrada da lagoa de retenção do Guará variam de 16,4 a 361 NTU durante o período monitorado, como pode ser visto na Tabela 5.4. Esse intervalo se mostrou menor do que os obtidos por Costa (2013) e Souza (2014) em seus estudos em duas galerias de drenagem pluvial localizadas no Plano Piloto – DF. A diferença também foi menor do que a observada por Paula (2019) em amostras no mesmo local de estudo.

O menor valor de turbidez ocorreu no evento do dia 20/02/2020, o qual não teve nenhum dia completo seco antecedente, o que pode evidenciar que não houve acúmulo dos sedimentos na área de contribuição. O valor médio de turbidez se assemelha ao valor encontrado por Paula (2019). O valor alto de desvio padrão indica uma grande variabilidade de turbidez entre os eventos monitorados.

Tabela 5.4 - Parâmetros estatísticos da turbidez

Parâmetro	Turbidez (NTU)
Nº de amostras	163
Mínimo	16,4
Máximo	361
Média	89,3
Mediana	62,8
Desvio Padrão	74,5

Os polutogramas para cada evento são mostrados na Figura 5.9, na qual é possível notar que há uma relação proporcional entre os valores de turbidez e a vazão registrada. No evento do dia 03/02/2020, o qual apresentou o maior número de dias secos antecedentes, também apresenta o maior valor de turbidez encontrado, o que indica que esse parâmetro está diretamente ligado aos dias secos antecedentes ao evento.

Ainda, observa-se que na passagem da vazão de pico os valores obtidos de turbidez são menores na maioria dos eventos, o que indica que com o grande volume de água que está passando pela galeria, há uma maior diluição, e assim menos sólidos suspensos.

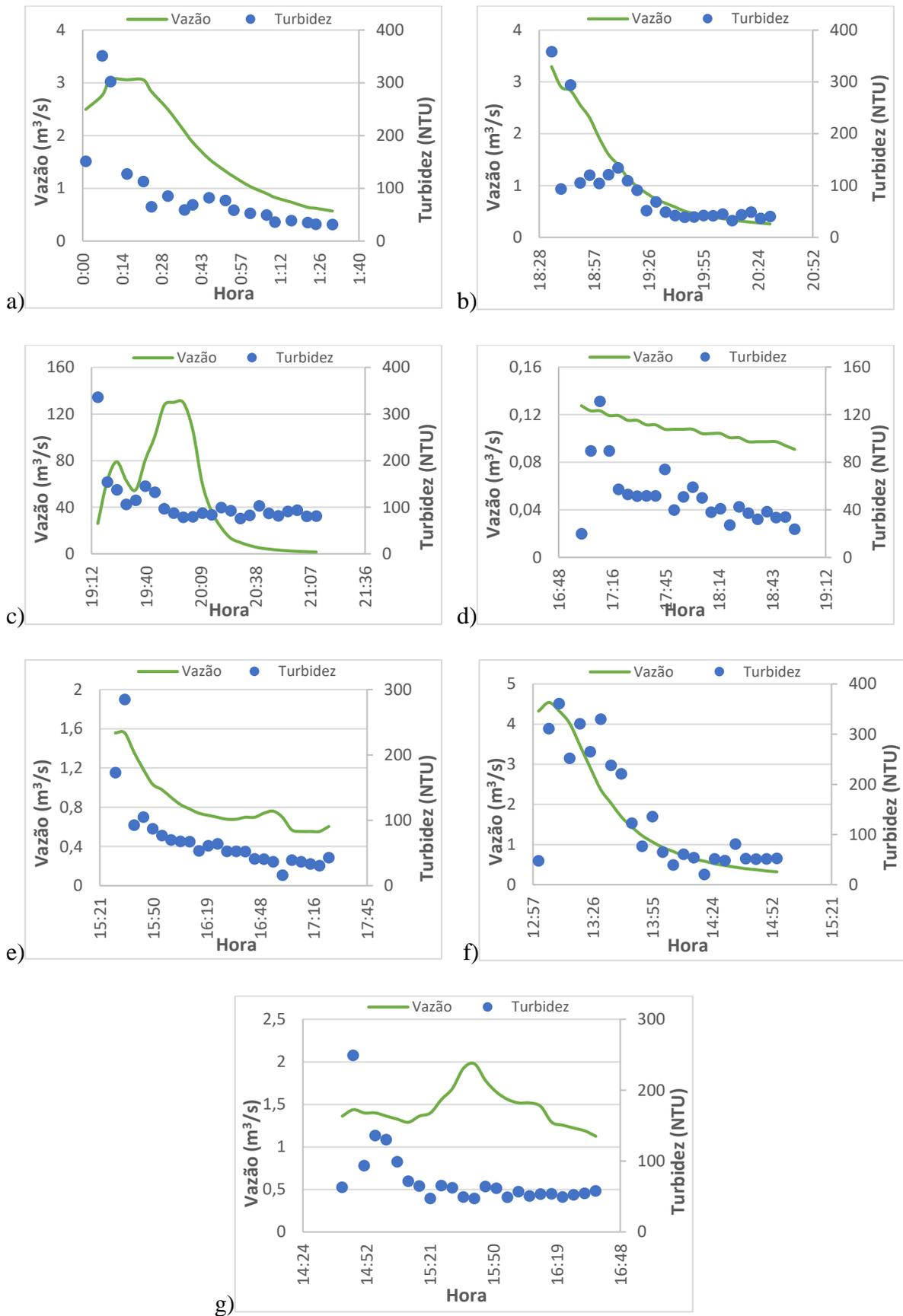


Figura 5.9 - Hidrogramas e polutogramas de turbidez dos eventos dos dias (a) 24/01/20; (b) 03/02/20; (c) 05/02/20; (d) 07/02/20; (e) 20/02/20, (f) 20/02/20; e (g) 02/03/20.

5.2.3. Sólidos

Na Figura 5.10, na qual estão os polutogramas de sólidos totais, suspensos e dissolvidos, observa-se que as concentrações de sólidos ao longo do tempo reduzem ao passo que a onda de cheia também vai suavizando com o tempo, o que indica um comportamento consistente do que se é esperado. Como pode ser visto na Tabela 5.5, o maior valor de sólidos totais obtido foi de 436 mg/L, enquanto o de sólidos suspensos correspondeu a 325 mg/L, valores esses que se mostraram próximos aos encontrados por Paula (2019). Essas concentrações foram observadas no evento do dia 24/01/2020.

Tabela 5.5 - Parâmetros estatísticos dos sólidos

Parâmetro	ST (mg/L)	SS (mg/L)	SD (mg/L)
N° de amostras	154	154	154
Mínimo	49	6	0
Máximo	436	325	184
Média	126	76	53
Mediana	100	53	42
Desvio Padrão	73	62	34

De maneira geral, é possível ver nos polutogramas que os valores de SS se mostraram maiores do que os valores de SD, exceto nos eventos dos dias 29/02/2020 e 02/03/2020, nos quais ao final da onda de cheia os valores de SD superaram os valores de SS. O que pode ser explicado pelo fato de serem eventos que ocorreram depois de um mês muito chuvoso. A variabilidade observada no desvio padrão também se assemelha aos valores obtidos por Paula (2019).

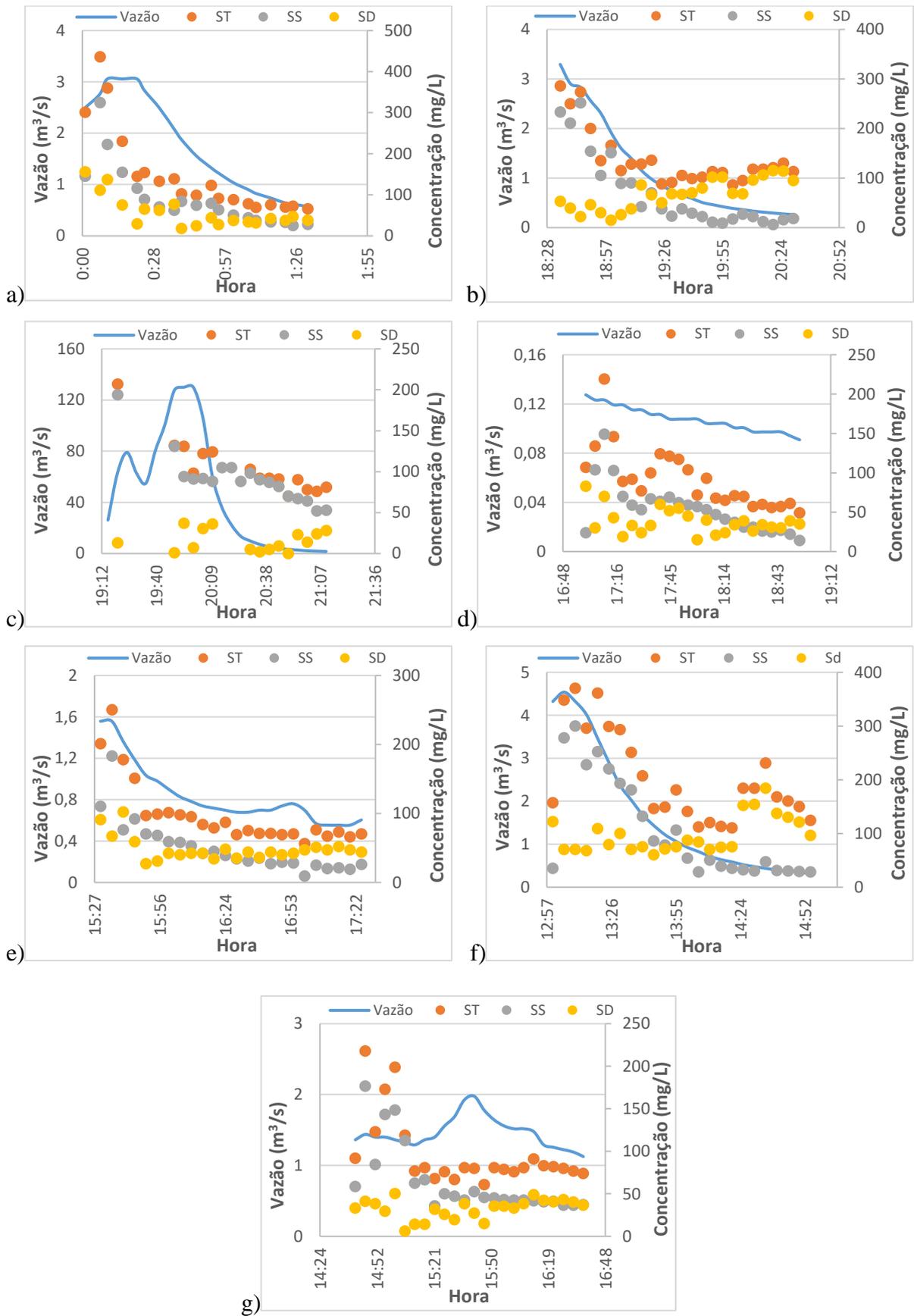


Figura 5.10 - Hidrogramas e polutogramas de sólidos (totais, suspensos e dissolvidos) dos eventos dos dias dos dias (a) 24/01/20; (b) 03/02/20; (c) 05/02/20; (d) 07/02/20; (e) 20/02/20, (f) 20/02/20; e (g) 02/03/20.

5.2.4. First Flush

Para a análise de ocorrência de *First Flush* foi utilizada a metodologia por meio de curvas adimensionais de massa $M(V)$ e o parâmetro b , nos quais avaliam o comportamento da taxa de massa de poluente presente no efluente pluvial. Foram elaboradas curvas $M(V)$ para os sólidos em cada evento monitorado.

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 abaixo mostram as curvas $M(V)$ dos sólidos totais, suspensos e dissolvidos, respectivamente. É possível notar que nas curvas $M(V)$ de sólidos totais e sólidos suspensos, apenas o evento do dia 29/01/2020 não indica a ocorrência do fenômeno para esses parâmetros.

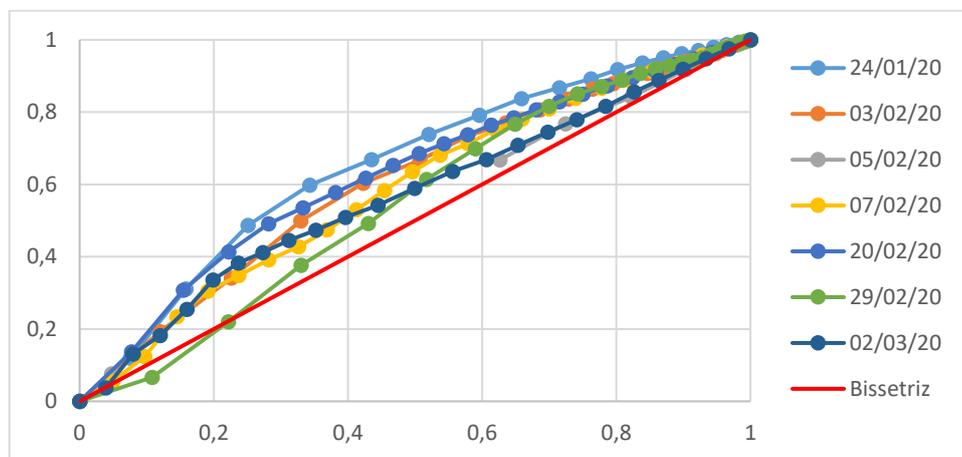


Figura 5.11 - $M(V)$ ST

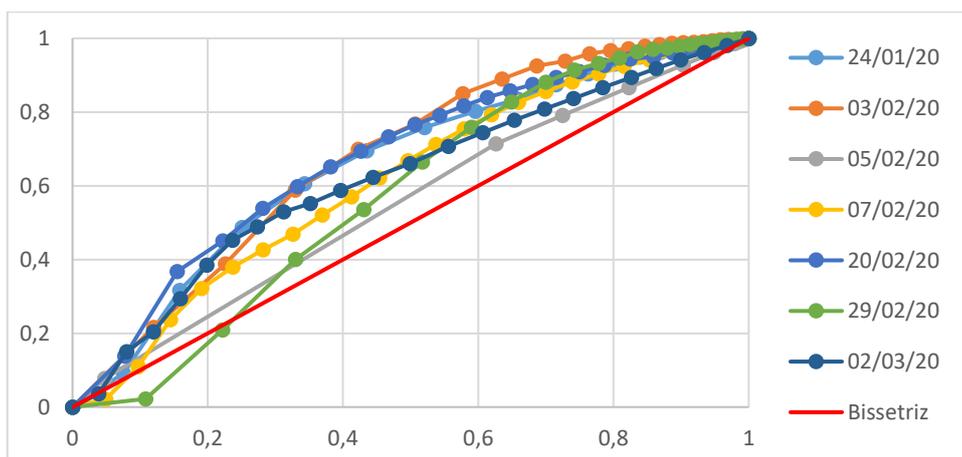


Figura 5.12 - $M(V)$ SS

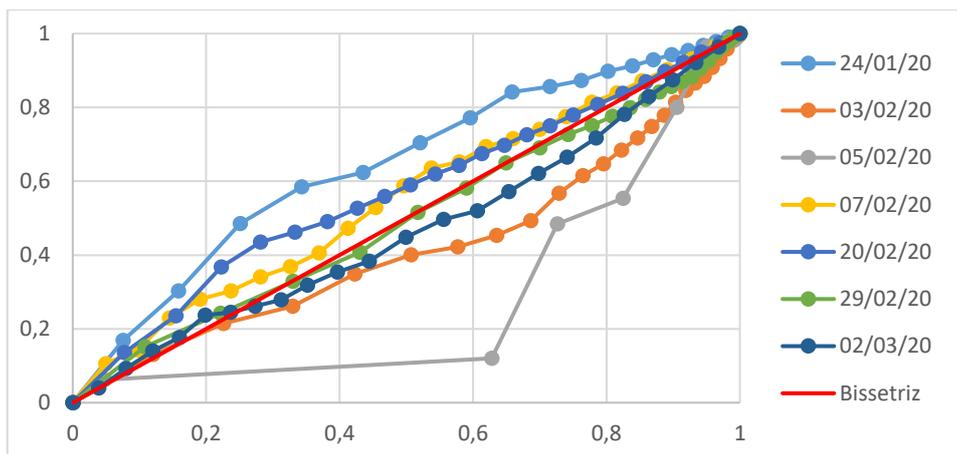


Figura 5.13 - M(V) SD

Já para o parâmetro de sólidos dissolvidos, apenas as curvas M (V) dos eventos dos dias 24/01/20, 07/02/20, e 20/02/20 indicaram a ocorrência de *first flush*, o que não é esperado visto que nas curvas dos outros parâmetros de sólidos foi identificada a ocorrência em quase todos os eventos. Essa discrepância pode ser explicada por erros de medição no processo de manuseio das amostras.

A Tabela 5.6 mostra os valores encontrados para o coeficiente b em cada curva M (V) para todos os eventos.

Tabela 5.6 - Valores dos coeficientes b

Evento	ST	SS	SD
24/01/2020	0,6690	0,7081	0,6233
03/02/2020	0,7049	0,5878	1,1236
05/02/2020	0,8453	0,8355	1,0193
07/02/2020	0,8239	0,9003	0,7946
20/02/2020	0,6505	0,5770	0,7510
29/02/2020	1,0364	1,2390	0,9282
02/03/2020	0,8260	0,7622	0,9883

Nota-se que o coeficiente b corrobora com as análises feitas a partir do gráfico da curva M (V), de modo que para os parâmetros ST e SS todos os valores de b se mostram menores do que 1, enquanto apenas no dia 29/02/2020 os números são superiores à 1. Para o parâmetro SD nota-se que os valores do coeficiente b não confirmam o que foi constatado pelos

gráficos, sendo os valores superiores à 1 apenas nos dias 03/02/2020 e 05/02/2020, fato este que também pode indicar algum erro nas medições de SD.

5.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A partir dos dados obtidos, a modelagem hidráulica-hidrológica foi feita utilizando o programa PCSWMM 2D. Como a verificação dos dados das simulações não puderam ser comparados com os dados coletados em campo, fez-se uma comparação entre os resultados obtidos e os resultados do modelo feito por Paula (2019), que por sua vez já havia sido calibrado.

Os produtos das simulações feitas a partir do modelo 2D construído mostram o fluxo da água dentro da lagoa, bem como pontos de acúmulo, caminhos preferenciais e curto-circuito. Além disso, foram feitos cenários de possíveis medidas estruturais que pudessem melhorar a eficiência da lagoa de retenção com base na identificação do fluxo da água.

O MDT foi construído a partir da topografia levantada por meio de voos de drone com referenciais no local levantados com o uso de GPS geodésico, em 29/09/2019, realizado por integrantes do grupo de pesquisa em monitoramento de águas pluviais da UnB. Os voos foram realizados no período de estiagem, logo após uma queimada ter ocorrido dentro da lagoa, o que reduziu em muito a vegetação rasteira e arbustiva de pequeno porte. No entanto, junto à entrada onde ocorre empocamento permanente de água devido aos pequenos fluxos da galeria, a vegetação no interior da lagoa assume porte maior, que se manteve mesmo após a queimada, o que certamente introduziu distorções na topografia levantada. Os dados levantados foram processados e o produto final foi concedido pelo engenheiro Ricardo Jayme para a realização desse trabalho.

5.3.1. Condição Atual da Lagoa

A simulação para analisar a condição atual da lagoa de retenção foi feita a partir do MDT e do contorno da lagoa, de forma que o resultado final do processamento 2D fosse a visualização do caminho da água dentro da lagoa.

Anteriormente à visualização do fluxo, utilizou-se uma ferramenta do PCSWMM que permite a visualização das elevações de cada célula 2D formada a partir do modelo digital de terreno, como pode ser visto na Figura 5.14.

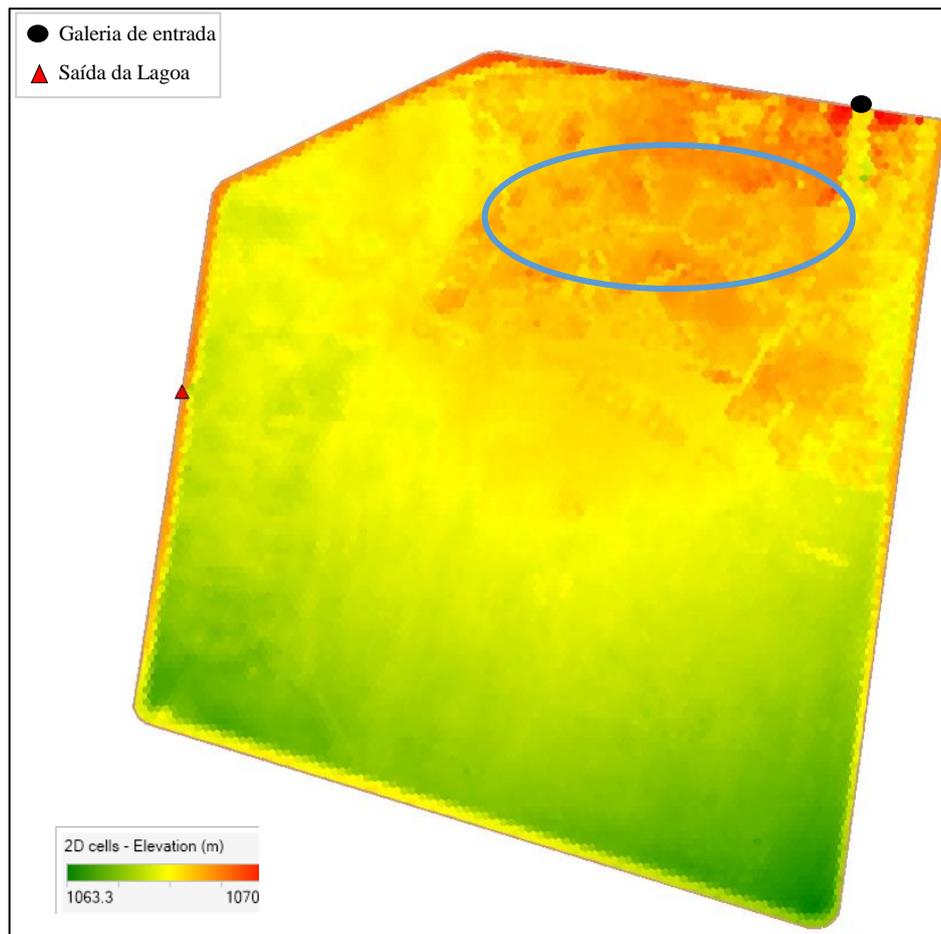


Figura 5.14 - Elevação das células

A elevação da área dentro da lagoa varia de 1063,3 a 1070,8 m, evidenciando que há uma variabilidade considerável de elevação. Conforme relatado, uma das principais razões dessas elevações de maior porte se deve à vegetação densa, que foi identificada no levantamento topográfico como sendo a cota do terreno, introduzindo erros significativos.

Observa-se na Figura 5.14 que já é possível identificar os locais mais baixos da lagoa de detenção, locais estes que fazem com que a água não se distribua uniformemente pela lagoa. De forma específica, destaca-se o caminho mais baixo que se encontra perto da galeria de entrada, uma vez que indica um possível caminho preferencial.

Sabendo que o caminho preferencial que é visto nas visitas in loco acontece quando a lagoa está cheia, ou seja, quando há entrada de água anteriormente ao evento de cheia observado, foi feito um hidrograma com uma vazão crescente de 1 a 1,3 m³/s nos oito dias antecedentes ao evento de cheia (Figura 5.15). Portanto, o período de simulação foi de 06/11/2018 à 17/11/2018, de modo que o evento de cheia ocorre no dia 14/11/2018.

Esse hidrograma foi inserido nas três células 2D que representam a galeria de entrada da lagoa, de modo que toda a água só entrasse por esses pontos. Da mesma forma, foi colocado um ponto de saída ligado à célula 2D que representa o local da saída da água. Essa ligação

foi feita por meio de um orifício, configurado com as mesmas dimensões da descarga de fundo da lagoa de detenção.

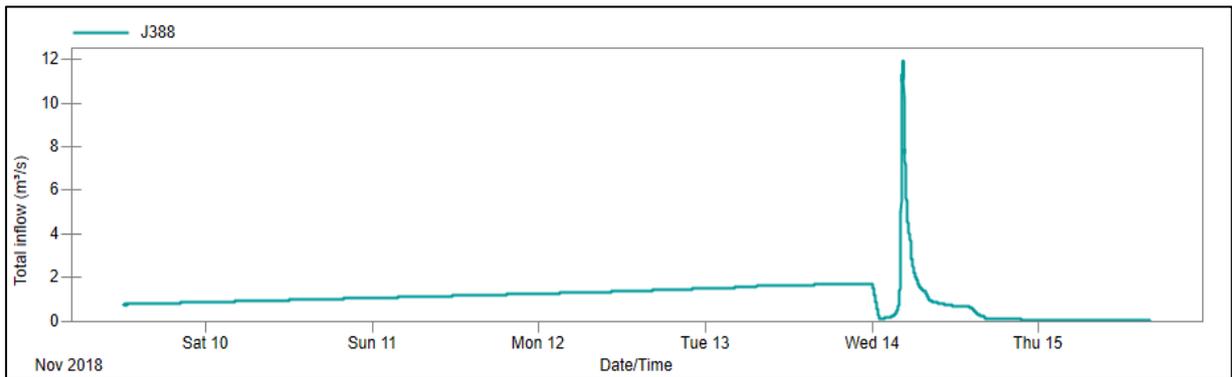


Figura 5.15 - Hidrograma entrada

Para a visualização do fluxo foi utilizada a ferramenta em que as células 2D mostram a altura da lâmina d'água. Assim, os lugares que estivessem com água mais acumulada são visualizados como as células com maiores valores de altura da lâmina d'água, e consequentemente, mais escuras.

A Figura 5.16 mostra a lagoa no pico da cheia, ou seja, com as alturas máximas de lâmina d'água nesse cenário. Já a Figura 5.17 mostra uma sequência que evidencia o fluxo da água dentro da lagoa de detenção.

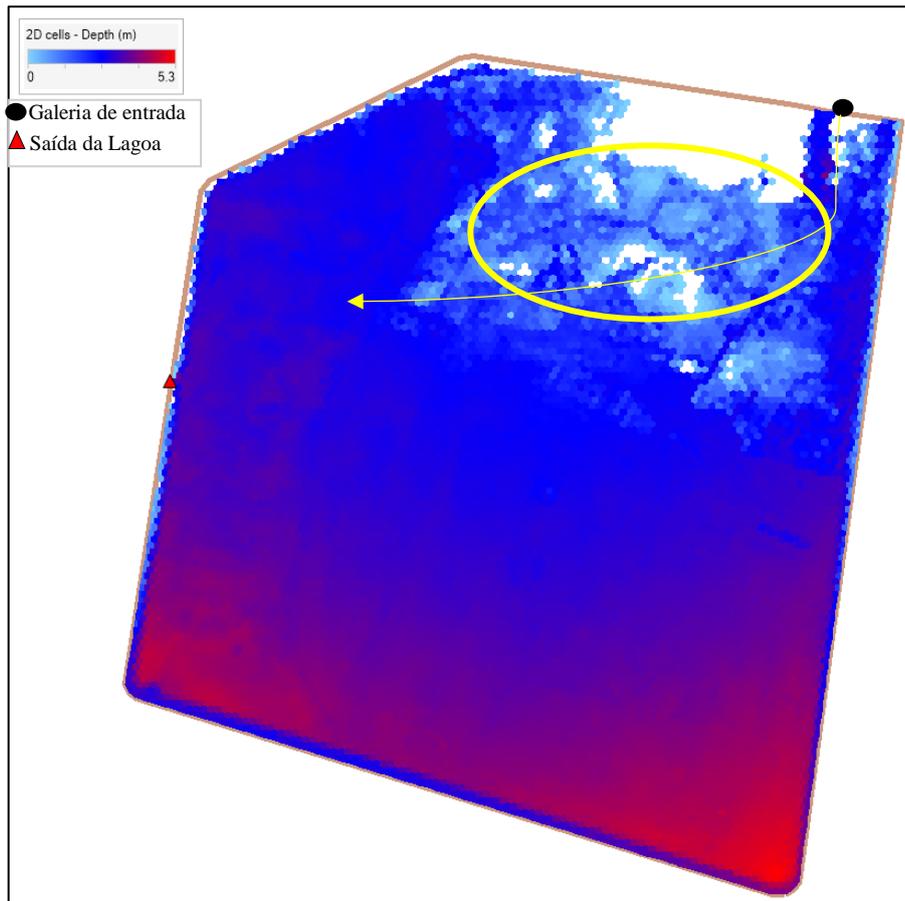


Figura 5.16 – Situação da lagoa na simulação de enchimento.

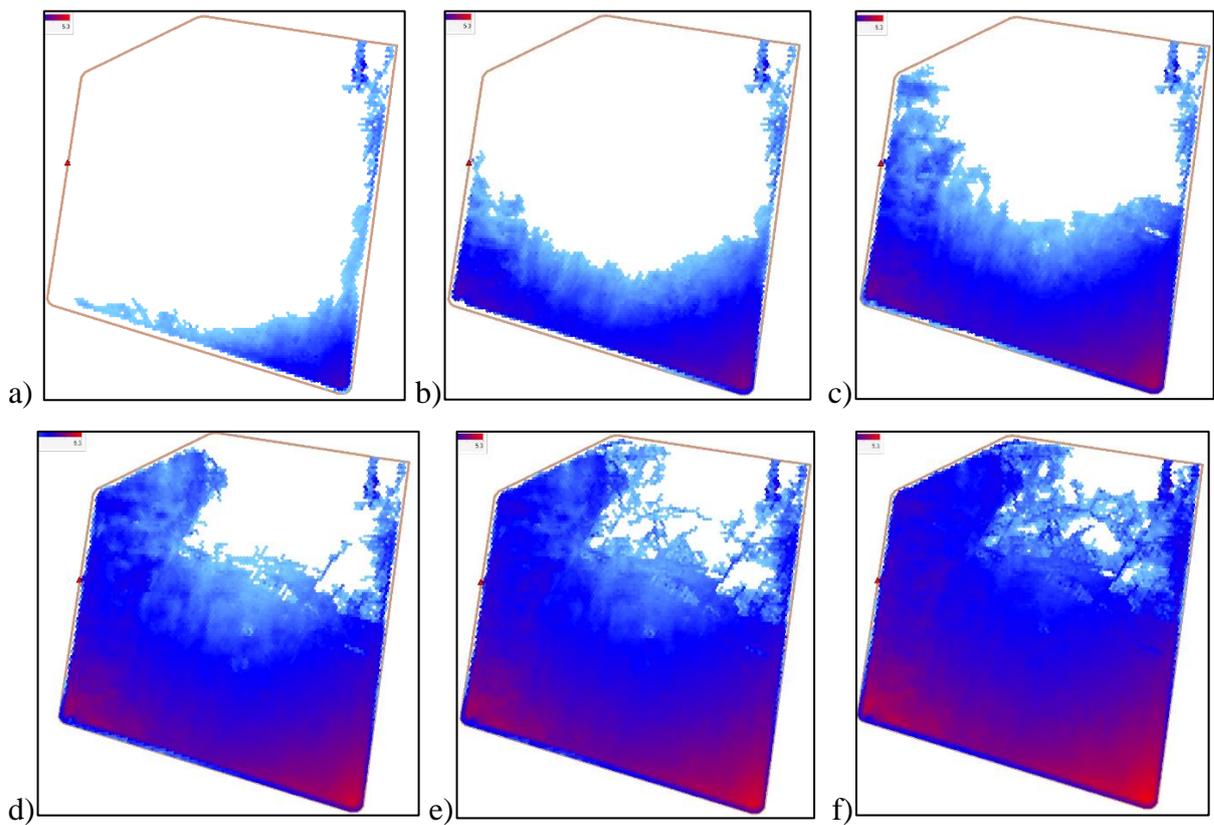


Figura 5.17- Comportamento da água dentro da lagoa de detenção.

O resultado mostra que no pico de vazão a altura da lâmina d'água chega à 5,3 m na parte inferior direita da lagoa, onde visualmente percebe-se que há um grande acúmulo de água. Considerando os dados experimentais e os estudos feitos na área de estudo anteriormente, o valor resultante de lâmina d'água máxima parece estar superestimado. Entretanto, nos demais pontos, com exceção da parte inferior direita que também tem mais acúmulo, a altura máxima de lâmina d'água é de aproximadamente 2 metros.

Ao analisar o fluxo da água, nota-se que há de fato uma distribuição não uniforme de água dentro da lagoa, o que era esperado visto a análise das elevações das células 2D (Figura 5.14). De modo especial, destaca-se a Figura 5.17 (b) a qual evidencia que a água vai para a descarga de fundo por um caminho mais curto do que o desejável, uma vez que a eficiência da lagoa aumenta se a água percorrer um caminho mais longo, aumentando assim o tempo de detenção. Ainda, é importante ressaltar que a existência do caminho preferencial e curto-circuito localizado perto da galeria de entrada é comprovada por observações em campo, em que se verificou o fluxo de águas mais turvas em direção ao ponto de descarga após a entrada de ondas de cheia na lagoa. Esse fato é também indicado na simulação, como pode ser visto no destaque em amarelo na Figura 5.16. Nessa área há um maior acúmulo de água, caracterizado pelas células mais escuras, e a partir disso a água proveniente da galeria passa a seguir esse caminho até a saída da lagoa.

Na sequência da Figura 5.17 (d), (e) e (f) observa-se que esse caminho preferencial é formado quando há água na lagoa suficiente para chegar a esse ponto, evidenciando o motivo deste ser observado quando a lagoa está cheia.

Para a melhor verificação dos resultados acerca dos pontos de acúmulo, um sobrevoo de drone foi feito no dia 22/11/2020 para a captação de imagens aéreas da lagoa. É importante ressaltar que nos 3 dias anteced~~e~~ntes ao dia do sobrevoo houve registro de precipitação na área de contribuição da lagoa. As comparações entre os resultados das simulações e as fotos da bacia são mostradas na Figura 5.18.

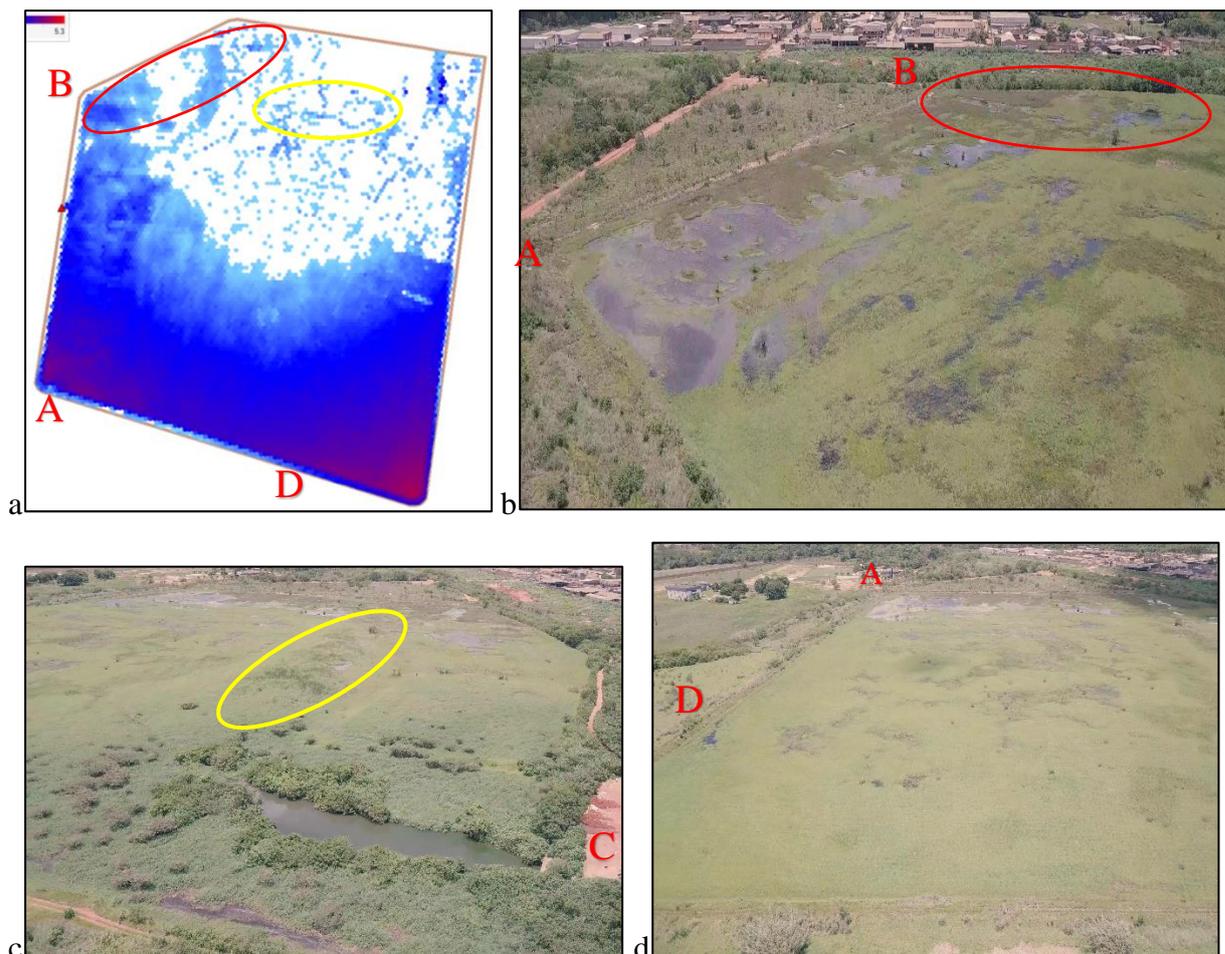


Figura 5.18 - Comparação entre a simulação e fotos da lagoa.

A Figura 5.18 (a) mostra o resultado da simulação um dia após o evento de cheia, quando a lagoa estava apenas esvaziando, sem nenhuma entrada de água. Observa-se na Figura 5.18 (b) que a área de acúmulo entre os pontos A e B, e na área destacada em vermelho, que foram mostradas na simulação também são vistas na foto da bacia em proporções menores. O ponto C indica a galeria de entrada da lagoa, que se encontra permanentemente alagada, como também indica o resultado do modelo. Já a área destacada em amarelo mostra o empoçamento residual do caminho preferencial observado em campo e indicado na simulação (Figura 5.16). Na Figura 5.18 (d) é possível notar que há pequenas áreas de acúmulo na parte inferior direita da lagoa, com empoçamentos menores do que os apresentados no resultado da simulação.

A fim de fazer uma análise da confiabilidade dos resultados obtidos, foi feita uma comparação com os resultados do modelo 1D construído e calibrado previamente por Paula (2019). Para isso, o mesmo hidrograma de entrada utilizado nas células 2D (Figura 5.15) foi inserido na entrada da lagoa dentro do modelo 1D e foram comparados os resultados da

vazão na saída da lagoa. Os hidrogramas de cada modelo na saída da lagoa de detenção podem ser vistos na Figura 5.19 abaixo.

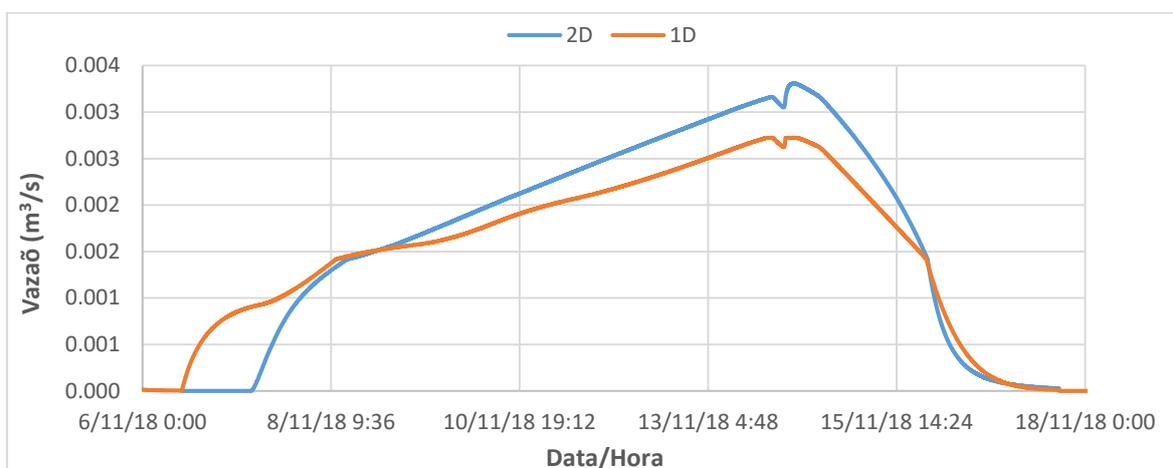


Figura 5.19 – Comparação dos hidrogramas de saída entre o modelo 1D e 2D

Os hidrogramas mostram que o comportamento da vazão é o mesmo nos dois modelos, com variações no tempo de ocorrência e valores de vazão. Na simulação com o modelo 1D a vazão máxima é observada no dia do evento à 00h15, com o valor de 2,7 m³/s. Já na simulação 2D o resultado mostra um pico de vazão maior, com 3,3 m³/s, que ocorre sete horas mais tarde, às 07h20 do dia do evento. Nas comparações feitas por Paula (2019) dos resultados do modelo com os valores experimentais foi constatado que a vazão simulada superestima a vazão real. Assim, considerando que a vazão simulada no modelo 2D se mostrou maior do que a vazão do modelo 1D, conclui-se que o resultado também é superestimado.

Também é possível notar que no modelo 2D o esvaziamento da lagoa acontece mais rápido, já que o início do hidrograma se dá às 10h55 do dia 07/11/2018 e termina no dia 16/11/2018 às 21h15, enquanto no modelo 1D a onda de cheia se inicia 12h45 do dia 06/11/2018 e, assim como no modelo 2D, finaliza no dia 16/11/2018, cerca de uma hora mais tarde. No processo de calibração do modelo 1D Paula (2019) atesta que a vazão modelada tem um decaimento mais rápido do que a vazão observada. Com relação a esse aspecto o modelo 2D se mostra ainda superestimado.

5.3.2. Cenários com Medidas Estruturais

A partir do que foi observado no cenário da condição atual da lagoa, foram testadas alternativas que pudessem ser construídas ou instaladas na lagoa para melhorar a sua

eficiência. Sendo elas com a construção de barreiras verticais, chicanas, barreira única e barreira dupla horizontal e vertical.

5.3.2.1. Barreiras Verticais

Inicialmente foi simulado um cenário no qual haveriam duas barreiras verticais de aproximadamente 80 metros de largura, e 1 metro de comprimento, situadas em locais que impediriam o caminho preferencial identificado e fariam com que a água acumulasse mais na parte inferior direita antes de seguir para a descarga da lagoa. Nesse cenário buscou-se uma solução economicamente e estruturalmente viável para uma possível futura implantação.

Dessa forma foi colocada uma barreira superior no meio do caminho preferencial para que a água fosse conduzida à parte inferior para seguir para a descarga, e assim o fluxo direto da galeria para a saída seria impedido. Também foi colocada uma outra barreira na parte inferior direita da lagoa, com o objetivo de acumular mais água nesse local antes do fluxo seguir para o canto inferior esquerdo, e assim chegar no ponto de descarga. A Figura 5.20 mostra a localização das barreiras e a situação no pico do evento de cheia. Já na Figura 5.21 o comportamento da água nesse cenário é evidenciado.

Com base nos resultados nota-se que o acúmulo de água no caminho preferencial não é evitado, e como foi discutido no cenário da condição atual da bacia, isso se deve ao fato de que o acúmulo acontece devido à água proveniente do enchimento gradual da lagoa, e não diretamente da galeria. Além disso, existe o acúmulo em razão do local apresentar partes mais baixas, e por isso, mesmo com a barreira superior há acúmulo da água. Entretanto, a barreira funciona para impedir que o caminho preferencial se concretize quando a água chega no empoçamento, uma vez que não segue direto para a descarga da lagoa, mas ao se chocar com a barreira, desce para a parte mais central da área.

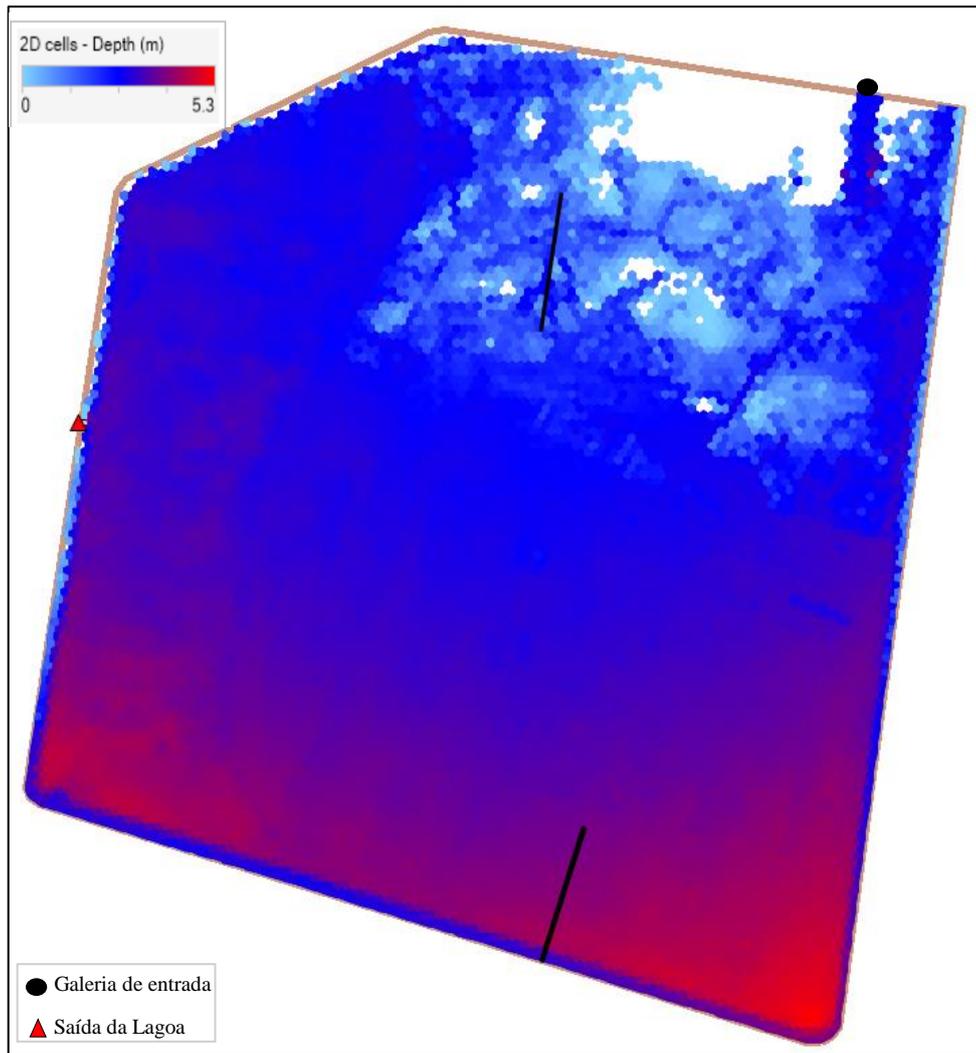


Figura 5.20 – Cenário com barreiras verticais.

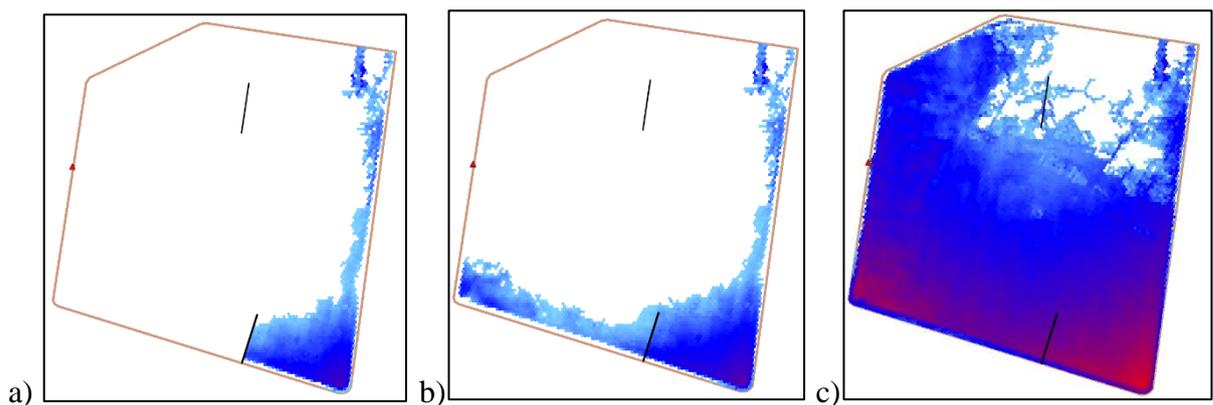


Figura 5.21 – Comportamento da água no cenário com barreiras verticais.

Para saber qual o impacto final das barreiras na vazão de saída da lagoa de detenção, foi feita uma comparação com a vazão de saída na condição atual da lagoa. Os hidrogramas podem ser vistos na Figura 5.22 abaixo.

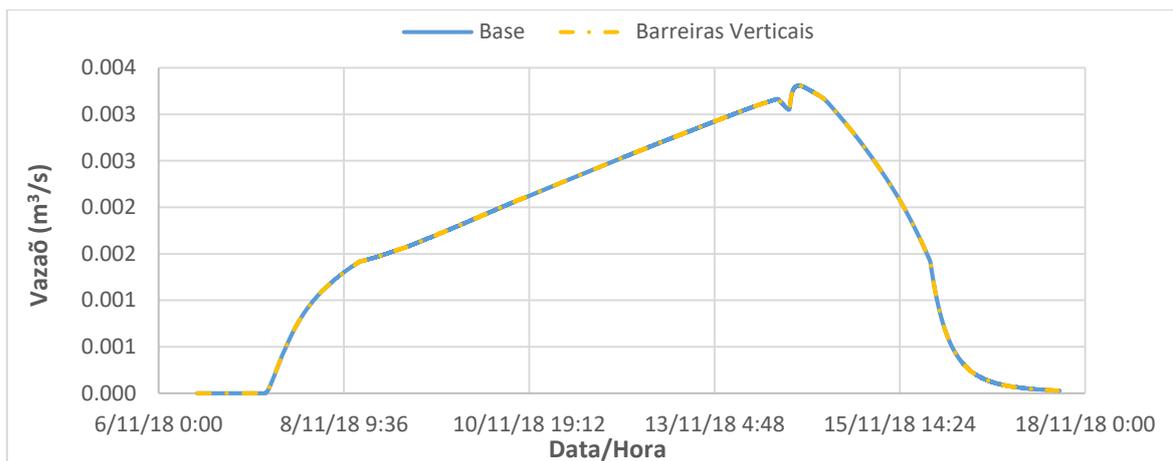


Figura 5.22 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com barreiras verticais.

O gráfico mostra que nesse cenário não há nenhuma mudança quantitativa em relação ao cenário base sem estruturas, de modo que as duas curvas se sobrepõem.

Esse resultado mostra que as barreiras verticais não proporcionam uma melhoria no tempo de detenção, mas é importante ressaltar que a barreira superior tem um importante papel para impedir o caminho preferencial identificado.

5.3.2.2. Chicanas

A fim de encontrar uma solução que melhorasse a eficiência da lagoa ao máximo por meio de construções de estruturas, foi feita uma simulação de um cenário no qual a lagoa de detenção funcionaria com chicanas que conseguissem abranger toda a sua área interna. Assim, foram colocadas três estruturas na bacia com aproximadamente 300 metros de largura e 1 metro comprimento.

A Figura 5.23 mostra esse cenário no pico da onda de cheia e nela observa-se que as obstruções que a água encontra são suficientemente grandes para mudar o fluxo dentro de toda a área da lagoa. Nesse cenário não houve mudança na lâmina d'água máxima observada, permanecendo 5,3 m.

O comportamento da água ao longo do tempo nesse cenário pode ser visto na Figura 5.24.

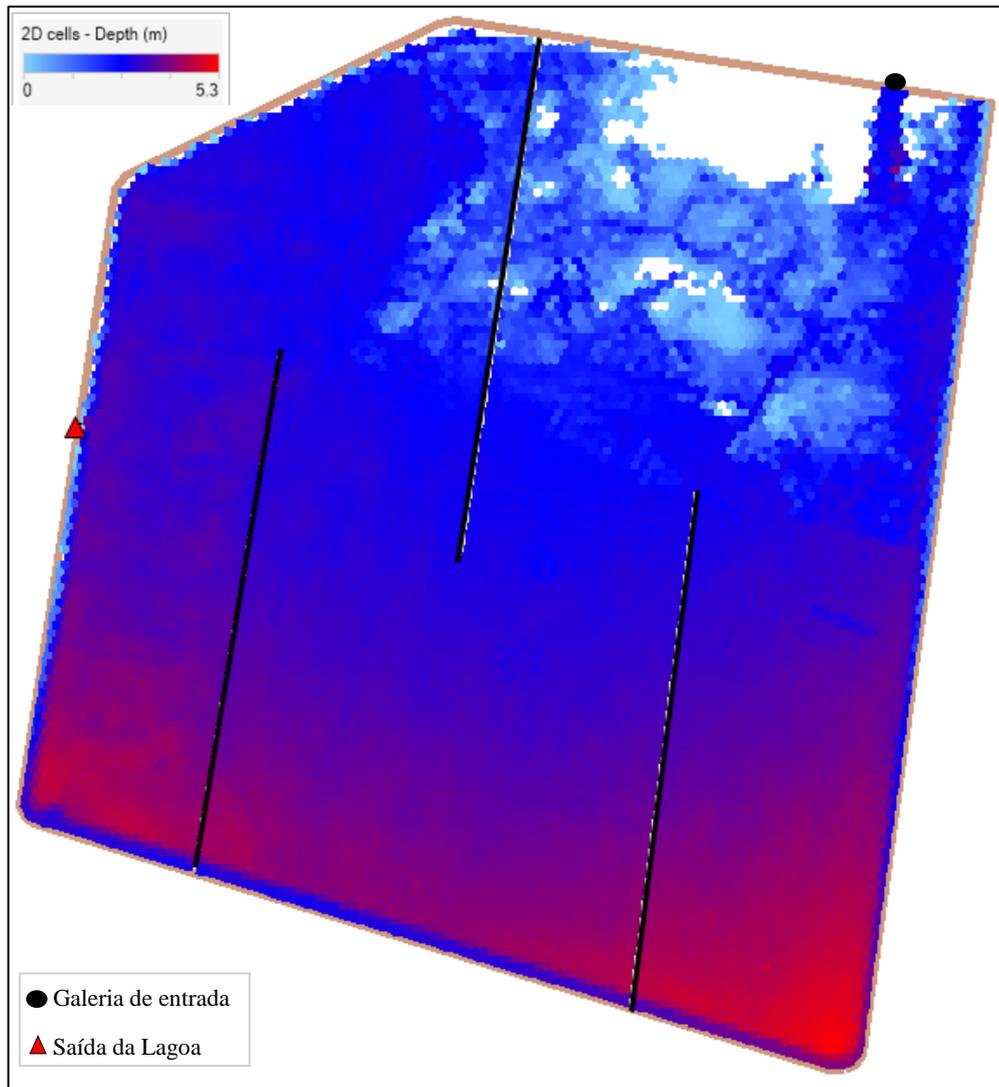


Figura 5.23 – Cenário com chicanas.

Na Figura 5.24 (a) observa-se que a barreira inferior direita funciona bem, e toda a água proveniente da galeria acumula primeiramente nela antes que siga para a descarga. A barreira superior tem o objetivo de não permitir que haja fluxo da galeria direto para a descarga da lagoa. Como pode ser visto na Figura 5.24 (c) esse cenário não funcionou como o esperado, visto que com a largura da chicana inferior esquerda, a água que passa por ela vai direto para o ponto de saída, sem antes acumular no canto inferior esquerdo.

A comparação entre os hidrogramas desse cenário e do cenário sem obstruções é mostrada na Figura 5.25.

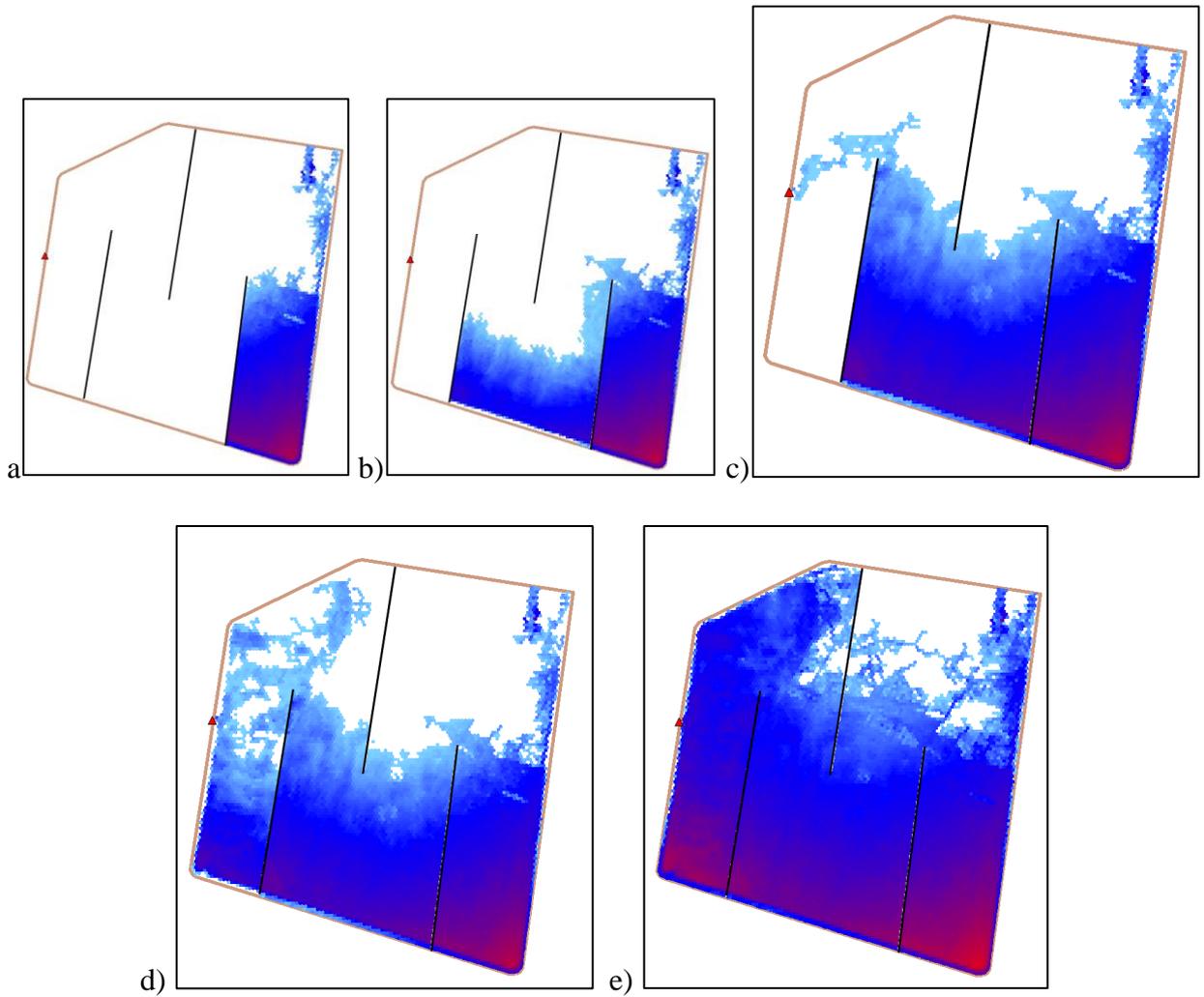


Figura 5.24 – Comportamento da água no cenário com Chicanas.

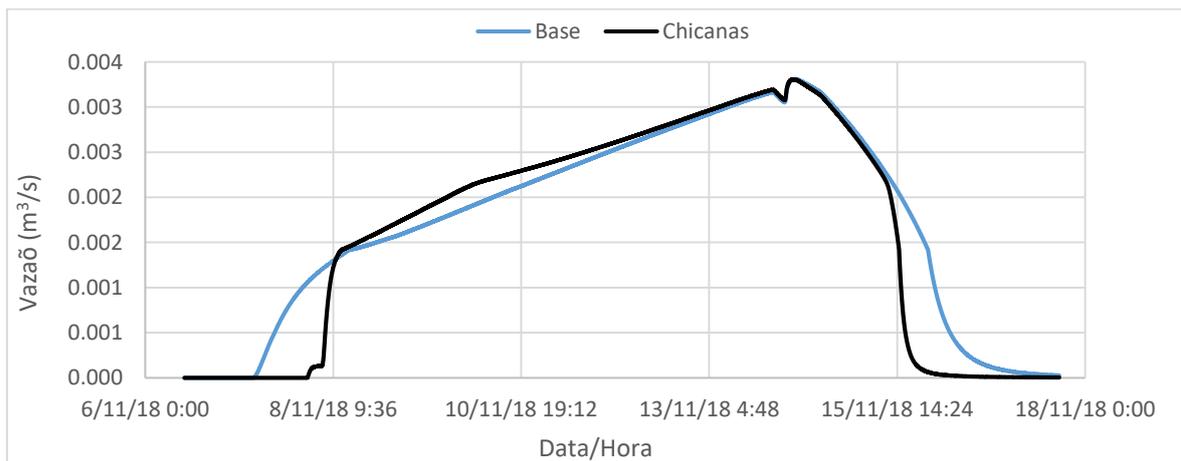


Figura 5.25 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com chicanas.

É possível observar que esse cenário detém a água por mais tempo, cerca de 1 dia e 14 horas a mais, uma vez que o hidrograma de saída do cenário com chicanas se inicia no dia 08/11/2018 às 03h00. Assim, comprova-se o esperado na análise visual do comportamento

da água, uma vez que de fato as chicanas fazem com o que a água fique retida na lagoa por mais tempo, e, portanto, aumenta sua eficiência. O horário da vazão de pico e seu valor não mudaram nesse cenário.

Ainda com o objetivo de encontrar uma solução que melhorasse significativamente a eficiência da lagoa, foi feita uma adaptação do cenário com chicanas redimensionando a barreira inferior esquerda para uma largura de aproximadamente 150 metros. Dessa forma espera-se que a água não siga da barreira direto para a saída, mas primeiramente acumule na parte inferior esquerda. A Figura 5.26 abaixo mostra o novo cenário de chicanas no pico da vazão de cheia, enquanto a Figura 5.27 indica o fluxo da água nesse cenário.

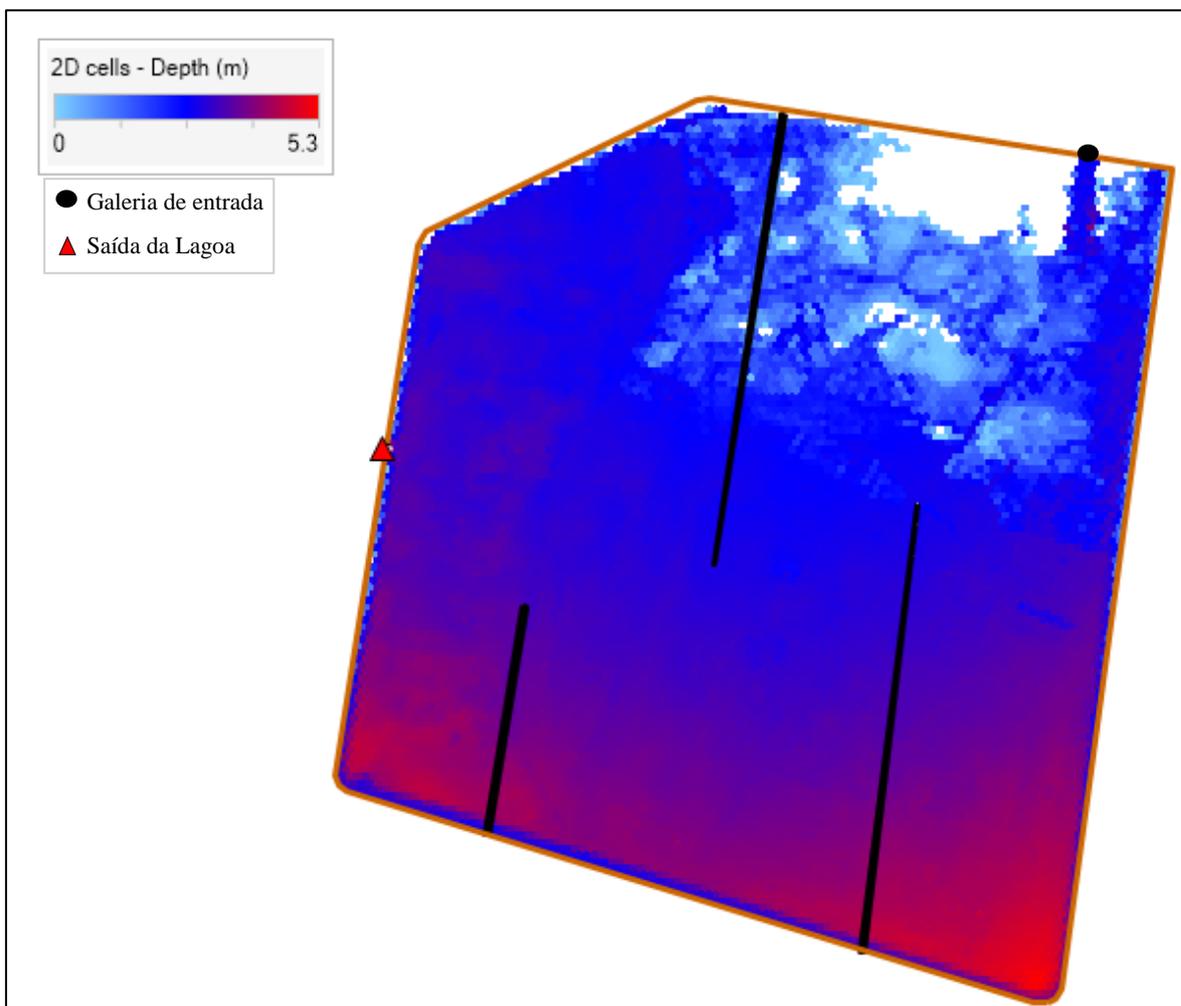


Figura 5.26 – Cenário com chicanas alteradas.

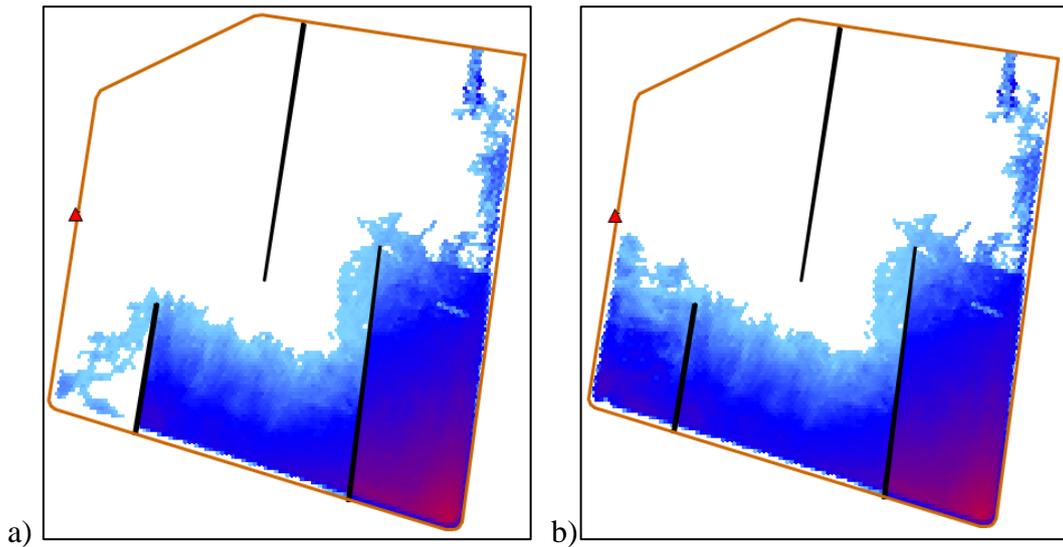


Figura 5.27 – Comportamento no cenário com chicanas alteradas.

Nesse cenário também não houve alteração na lâmina d'água máxima em comparação com os outros cenários. Na Figura 5.27 é possível observar que a água precisa acumular na primeira barreira, no meio da lagoa, e no canto inferior esquerdo antes de seguir para a saída. A comparação entre os hidrogramas dos cenários base sem estruturas, com chicanas e com chicanas alteradas pode ser visto na Figura 5.28.

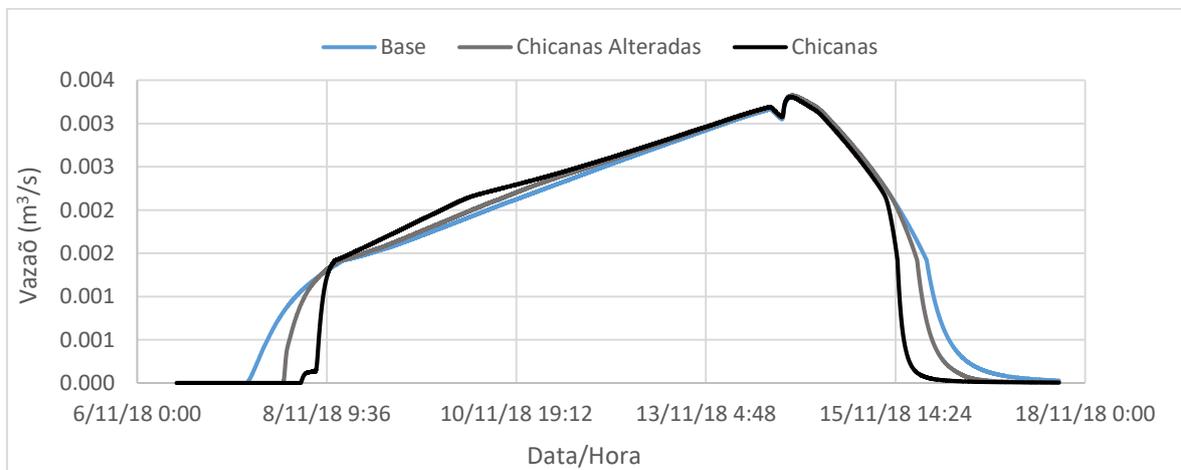


Figura 5.28 - Comparação dos hidrogramas de saída entre os cenários base, com chicanas e com chicanas alteradas.

De acordo com os hidrogramas é possível ver que o cenário continua retendo a água por mais tempo do que no cenário base sem obstruções, mas de forma pouco significativa comparado ao cenário anterior, com uma diferença de apenas 10 horas. Ainda, esse cenário não se comportou como o esperado, visto que o tempo de detenção foi menor do que o original cenário com chicanas.

Apesar de haver uma acumulação de água na parte inferior esquerda da lagoa que não ocorria no cenário anterior, o acúmulo não foi suficiente para compensar o que já era retido pela barreira de 300 metros.

5.3.2.3. Barreira única

Tendo como base os resultados obtidos nas simulações anteriores, e com o objetivo de encontrar uma solução ótima que melhore a eficiência e seja viável para implantação, foi simulado um cenário com apenas a barreira mais próxima da saída da lagoa no cenário de chicanas. A Figura 5.29 mostra esse cenário no pico de cheia do evento, enquanto a Figura 5.30 indica o comportamento da água nesse caso.

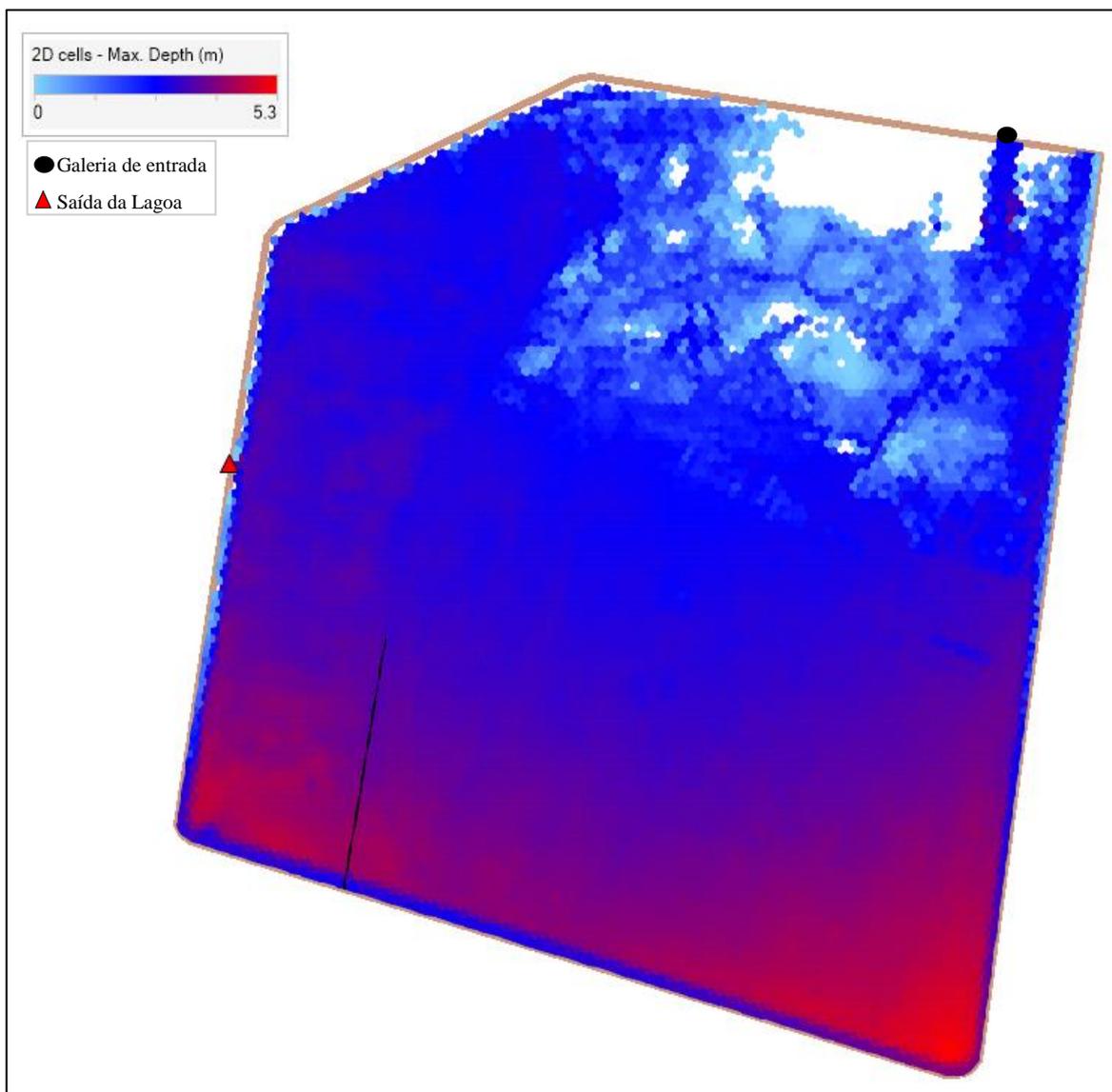


Figura 5.29 – Cenário com barreira única.

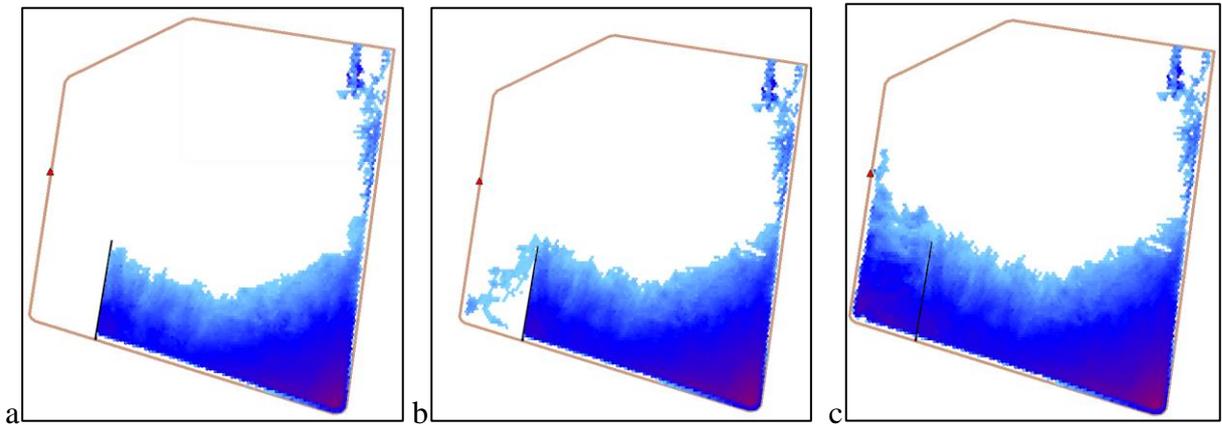


Figura 5.30 – Comportamento da lagoa com barreira única.

Assim como nos cenários anteriores, a utilização dessa única barreira não altera o valor máximo da lâmina d'água observado. Ao comparar visualmente o comportamento da água na lagoa sem obstruções (Figura 5.17) e nesse cenário, é possível observar que a barreira faz com o que a água tenha que acumular antes e depois dela para seguir para o ponto de descarga. Já no cenário no qual não há obstruções, a água só acumula na parte inferior esquerda para chegar à saída. Portanto, espera-se que com a utilização de apenas uma barreira o tempo de detenção aumente, e assim também a eficiência.

A Figura 5.31 mostra a comparação entre as vazões de saída da lagoa nesse cenário, e o cenário sem obstruções.

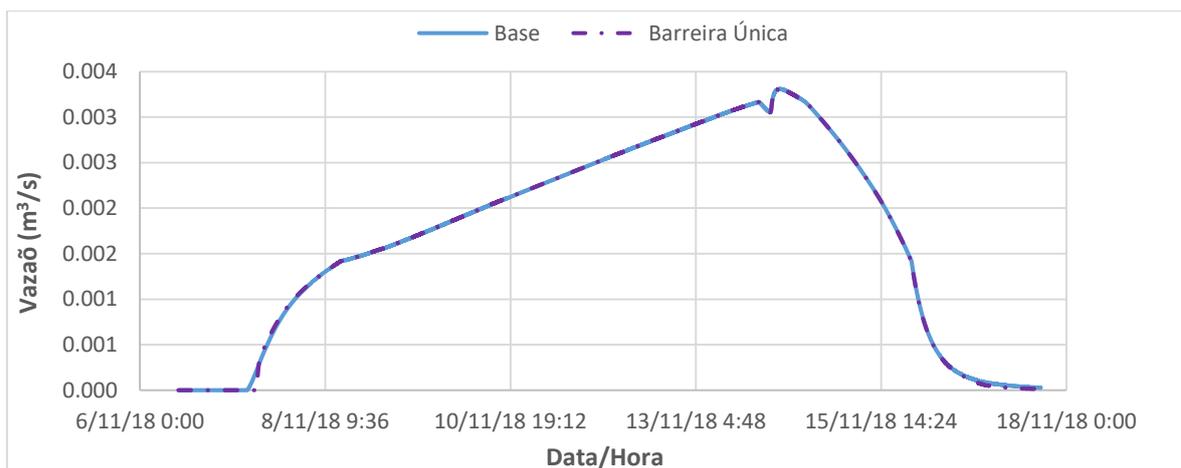


Figura 5.31 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com barreira única.

Os resultados mostram que assim como no cenário de barreiras verticais, não houve mudança significativa no tempo de detenção e na vazão modelados. As curvas se sobrepõem quase

totalmente, havendo uma pequena diferença apenas nos pontos de início e final do hidrograma.

Mesmo sem resultados quantitativos representativos, é importante enfatizar que as barreiras funcionam de forma satisfatória na mudança do fluxo dentro da bacia.

5.3.2.4. Barreira Dupla: horizontal e vertical

O último cenário concebido consiste na implantação de duas barreiras, sendo uma vertical e outra horizontal, com dimensões de aproximadamente 100 metros de largura, e 1 metro de comprimento. O objetivo desse cenário é a tentativa de otimização na implantação das estruturas, de modo que seja economicamente e estruturalmente viável.

Como pode ser visto na Figura 5.32, a barreira vertical se localiza no meio da área aonde foi identificado o caminho preferencial. Apesar de não impedir que a água acumule, a barreira impede que a água que saia da galeria vá direto para a seção de saída.

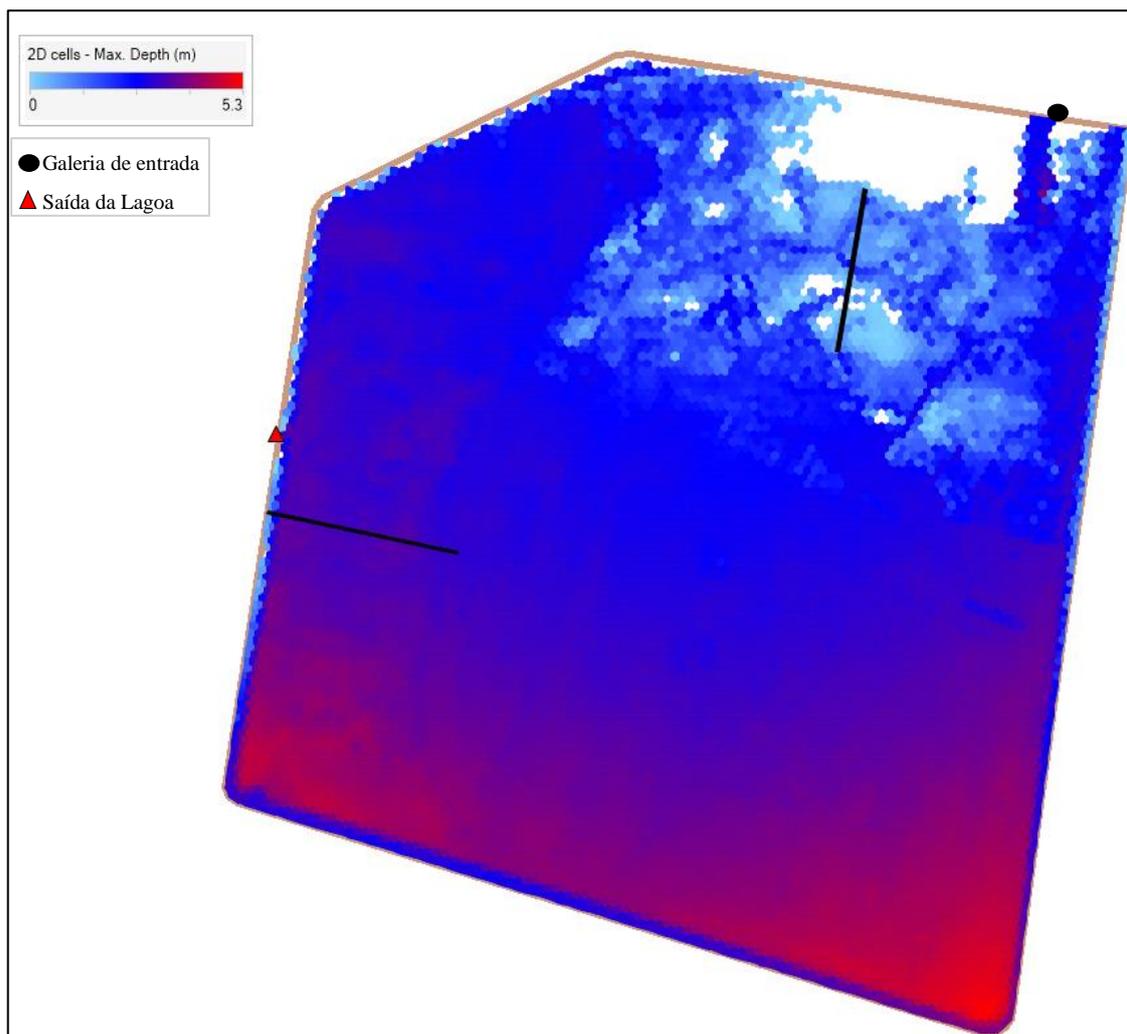


Figura 5.32 – Barreira dupla: horizontal e vertical.

Já a barreira horizontal foi posicionada 47 metros abaixo do ponto de descarga da lagoa, dessa forma ela promoveria o acúmulo de água abaixo de sua extensão antes da chegada na saída da lagoa. A Figura 5.33 abaixo mostra o comportamento da água nesse cenário e o funcionamento dessas barreiras ao longo do tempo.

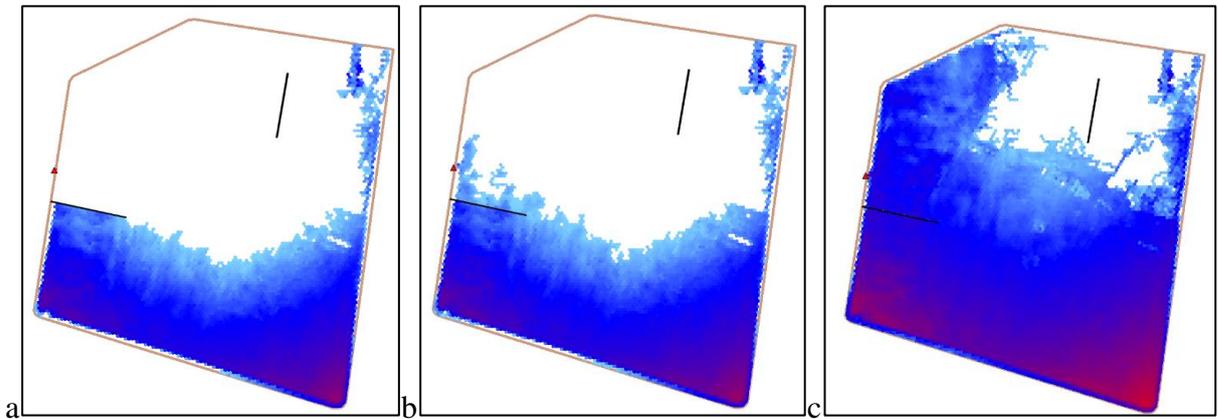


Figura 5.33 - Comportamento da água no cenário com barreira dupla: horizontal e vertical

A Figura 5.33 (a) destaca o funcionamento da barreira horizontal abaixo do ponto de saída da lagoa, e observa-se que o desempenho dela é satisfatório, uma vez que a água acumula mais na parte inferior da lagoa do que no cenário base (Figura 5.17 (b)) antes de seguir para a saída. A comparação entre os hidrogramas de saída no cenário base e esse último cenário pode ser vista na Figura 5.34 abaixo.

Ainda, fez-se também a comparação entre os hidrogramas de saída desse cenário com os cenários com barreira única e com barreiras verticais a fim de encontrar a melhor alternativa para o objetivo proposto. Essas comparações são mostradas na Figura 5.35 abaixo.

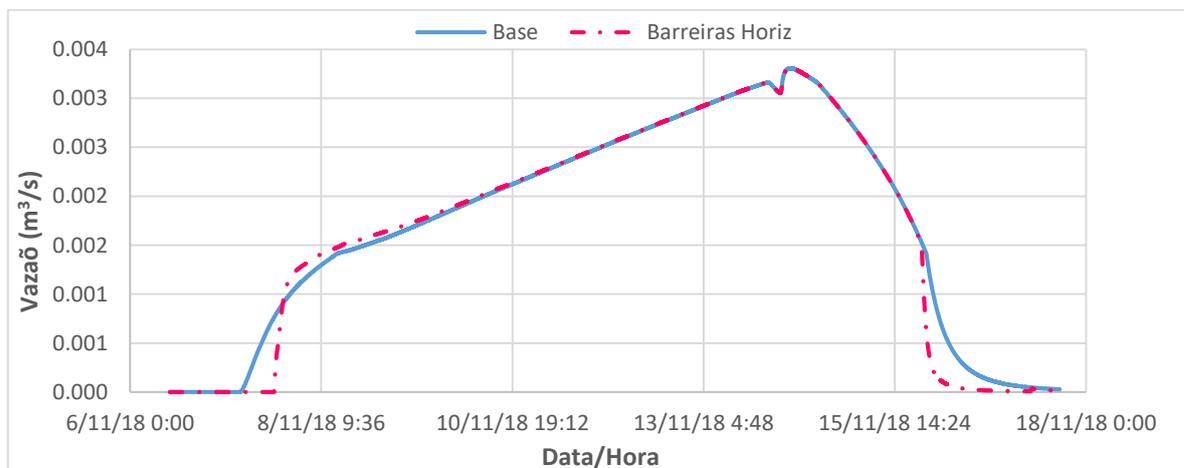


Figura 5.34 - Comparação dos hidrogramas de saída entre o cenários base e com barreiras horizontal e vertical.

O gráfico evidencia que esse cenário apresenta alterações quantitativas mais significativas quando comparado com os outros cenários com barreiras. Nota-se que as barreiras aumentaram o tempo de detenção da bacia em aproximadamente 9 horas, mas também fazem a lagoa esvaziar mais rápido.

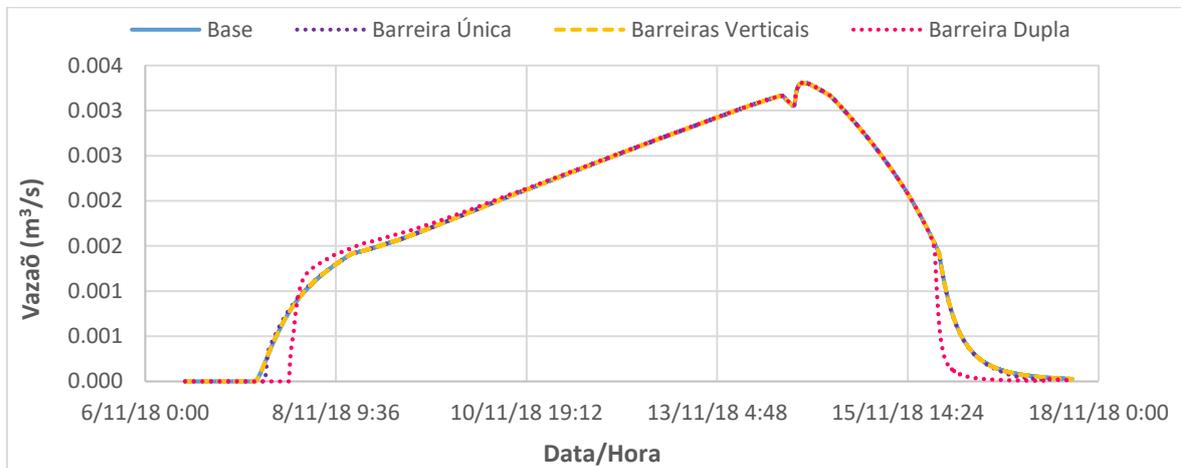


Figura 5.35 - Comparação entre os cenários com barreiras

Com base nos resultados apresentados na Figura 5.35 é possível concluir que, dentre os cenários simulados com barreiras, o melhor desempenho se dá no cenário com a dupla, uma vez que este além de proporcionar o impedimento do caminho preferencial e curto circuito identificado, ainda promove um aumento do tempo de detenção da água, o que faz com que a eficiência da lagoa melhore. Os outros cenários com barreiras não apresentaram mudanças significativas no aspecto quantitativo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A avaliação do funcionamento da lagoa de retenção do Guará II, localizada na Região Administrativa do Guará – DF, por meio da análise quantitativa e qualitativa, bem como a modelagem utilizando os programas SWMM/PCSWMM, foram realizadas e com isso foi possível um melhor entendimento do fluxo na lagoa de retenção e do comportamento da qualidade da água do efluente pluvial que chega na galeria de entrada.

Os dados obtidos pelos pluviômetros monitorados permitiram a verificação da variabilidade espacial da chuva na área de contribuição da lagoa, característica essa que é observada em Brasília. Ainda, os dados de precipitação foram importantes para a verificação da ocorrência de *first flush*, junto aos dados de qualidade e da caracterização da área de estudo. Os eventos de chuva monitorados apresentaram intensidades baixas e pequenos tempos de retorno, característica de chuvas mais frequentes.

No que tange à qualidade do efluente pluvial, a análise de condutividade elétrica permitiu a associação do evento com maior período de dias secos antecedentes e o maior valor de condutividade elétrica medido. Além disso, a observação de que o pico de condutividade elétrica ocorre antes do pico de vazão na maioria dos eventos indicou a ocorrência de *first flush*. A variabilidade desse parâmetro também se mostrou elevada, em consonância com a variabilidade pluviométrica observada.

Os valores de turbidez encontrados, juntamente com análise dos hidrogramas, evidenciam a relação proporcional entre os valores de vazão e de turbidez encontrados. Ainda, foi possível verificar a correlação entre o número de dias secos antecedentes ao evento e a turbidez encontrada no efluente pluvial. Dentre os eventos monitorados, o evento com maior número de dias de estiagem antecedentes também apresentou o maior valor de turbidez medido.

A análise de ocorrência de *first flush* foi feita a partir dos dados de sólidos totais, suspensos e dissolvidos medidos. A partir da análise de carga de sólidos e volume de água, constatou-se a ocorrência do fenômeno na maior parte dos eventos, o que evidencia a necessidade de um tratamento adequado do efluente pluvial antes de ser conduzido a um corpo hídrico.

A modelagem 2D do interior da bacia proporcionou a identificação do fluxo da água, bem como seus locais de acúmulo, caminhos preferenciais e curto-circuito. Observou-se como a água não se distribui uniformemente na lagoa, o que reduz a sua eficiência. Além disso, o fluxo indica que o efluente pluvial se desloca até o ponto de descarga por um caminho mais curto do que o desejável, o que indica a necessidade de implementação de medidas para a melhoria desse cenário.

A partir do que foi observado na simulação do comportamento da água, foram testadas no PCSWMM 2D alternativas que conduziriam melhor o fluxo no interior da lagoa. Assim, foram simulados cinco cenários com diferentes tipos de obstruções instaladas na lagoa para a avaliação dos resultados e escolha da melhor alternativa para ser construída.

O cenário com chicanas foi visto como o melhor desempenho qualitativo e quantitativo, por impedir os fluxos diretos e aumentar o tempo de detenção em mais de um dia. Entretanto, esse cenário é apenas teórico, visto que não há viabilidade de implantação de estruturas com dimensões tão grandes. Dessa forma, entre os cenários simulados com barreiras menores, os quais são viáveis para a construção, o melhor cenário constatado foi o de barreiras horizontal e vertical. Além de se mostrar eficiente no bloqueio dos caminhos preferenciais identificados, esse cenário ainda proporcionou um aumento no tempo de detenção na lagoa. Os demais cenários se mostraram funcionais para evitar os fluxos diretos, mas não apresentaram alterações quantitativas significativas.

Dado que a alteração do tempo de detenção da lagoa se dá pela alteração do volume, as barreiras não poderiam proporcionar alterações quantitativas significativas. Entretanto, quanto ao objetivo de identificar e interromper os caminhos preferenciais de fluxo direto, as barreiras mostraram resultados satisfatórios.

Para um entendimento melhor da realidade dos fluxos na bacia, caso retificações no funcionamento da bacia venham realmente a ser realizadas, recomenda-se que o modelo 2D seja refeito com melhor detalhamento da topografia que deve ser realizada no local com levantamentos após a retirada da vegetação. Com isso, a real configuração topográfica e dos fluxos de água, bem como do melhor posicionamento das barreiras podem ser determinados.

Sugere-se que o monitoramento e estudo de qualidade da água afluente à lagoa seja expandido uma vez que a área de contribuição é composta majoritariamente por área urbanizada e possui locais de oficinas e indústrias, o que pode acarretar em carreamento de óleos, graxas e metais pesados. Nesse contexto recomenda-se que o modelo 2D também seja utilizado para a simulação de qualidade no PCSWMM para que possam ser estudadas alternativas que melhorem o tratamento do efluente pluvial pela lagoa. Ainda, sabendo da área permanentemente alagada na galeria de entrada e do remanso que ocorre nessa região, sugere-se que seja feita uma medição contínua de vazão no local para o melhor ajuste da curva-chave da entrada da lagoa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2018). *Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal*. Brasília, DF, 329p.
- APHA. (1995). “*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.*” American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 19^a ed., Washington.
- ArKIS Infraestrutura Urbana Ltda. (2005). *Projeto de avaliação ambiental e estudo de dissipação dos pontos de lançamentos da galeria do Cruzeiro – Guará – Distrito Federal*. Brasília, DF, 56p.
- Ballard, B. W.; Kellagher, R., Martin, P.; Jefferies, C.; Bray, R.; Shaffer, P. (2015). *The SUDS Manual*. CIRIA – Construction Industry Research and Information Association, Londres, Inglaterra, 968p.
- Baptista, M. B.; Nascimento, N. O. (1996). “Sustainable development and urban stormwater management in the context of tropical developing countries”. *Anais do Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Vol. 4, 523- 529, México.
- Baptista, M.; Nascimento, N.; Barraud, S. (2011). *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. ABRH, Porto Alegre, 318p.
- Barros, M. T. L. de. (2005). “Drenagem urbana: bases conceituais e planejamento”. In: Júnior, A. P. *Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável*. Manole, São Paulo, 221-265.
- Beck, J. (2016). “*Comparison of three Methodologies for Quasi-2D River Flood Modeling with SWMM5.*” *Journal of Water Management Modeling*.
- Bertrand-Krajewski, J.; Chebbo, G.; Saget, A. (1998). “*Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon.*” *Water Research*. Vol. 32, No. 8, pp. 2341 a 2356.
- BRASIL. (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF
- BRASIL. (2007). Lei Federal nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
- Brunner, G. W.; CEIWR-HEC – U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center. (2016). *HEC-RAS River Analysis System User’s Manual Version 5.0*. USACE, Davis, E.U.A., 960p.
- Butler, D.; Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Spon Press, Nova Iorque, E.U.A. 652p.

- Campos, J. L. G.; Gonçalves, T. D. (2015). Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no Distrito Federal: Relatório de Consultoria Técnica. Adasa, Brasília, DF.
- Canholi, A. P. (2005). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de Textos, São Paulo, 302 p.
- Certu – Centre d'études sur les reseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques). (1998). *Techniques alternatives aux reseaux d'assainissement pluvial: éléments clés pour leur mise em oeuvre*. Edition du Certu, Lyon, França, 155p.
- Chebbo, G.; Bachoc, A. (1993). “Caracterisation des solides em suspension dans les rejets pluviaux urbains”. In: Tassin, B.; Thevenot, D. *Rejets Urbains par temps de Pluie: Pollution et Nuisances. Actes des Troisième journée du DEA-STE*. Presses de l'ENPC, Paris, França, 45-47.
- Chocat, B. (1998). *Encyclopédie de l'hydrologie urbanie*. Tec et Doc Lavoisier, Paris, França, 1136p.
- Costa, M. E. L. (2013) *Monitoramento e Modelagem de Águas de Drenagem Urbana na Bacia do Lago Paranoá*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 179p.
- Cruz, M. A. S.; Araújo, P. R.; Agra, S. G.; Souza, V. C. B. de; Collischonm, W. (2001). “Valorização da água no meio urbano: um desafio possível”. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Aracaju, Brasil.
- Dantas, B. O. (2019). *Aplicação de geotecnologias (GNSS, LIDAR e VANT) para estudo de drenagem e sedimentos. Estudo de caso da bacia de retenção do Guará – DF*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113p.
- Debo, T. N.; Reese, A. J. (2002). *Municipal storm water management*. CRC Press LLC, Nova York, E.U.A., 1154p.
- FILENI, F. (2016). *Modelagem Quantitativa da drenagem Urbana e Proposições de drenagem sustentável para a região de Ceilândia-DF*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 48p.
- Fileni, F. M.; Costa, M. E. L.; Alves, C. de M. A. (2019). “Aplicação de LIDs na região de Cerrado para mitigação de áreas alagadas”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24(40).
- GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2009). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Concremat Engenharia, Brasília, DF.

- Gomes, C. I. D. (2015). “Avaliação da qualidade de águas pluviais lançadas por bacias de retenção em corpos hídricos do Distrito Federal, DF – Brasil”. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, Brasil.
- Gribbin, J. E. (2008). *Introduction to Hydraulics and Hydrology with Applications for Stormwater Management*. Thomson Delmar Learning, Nova Iorque, E.U.A., 528p.
- Haestad Methods, Dyhouse, G., Hatchett, J., Benn, J., (2003). “*Floodplain Modeling Using HEC-RAS*.” Haestad Press.
- Hardesty, S.; Shen, X.; Nikolopoulos, E.; Anagnostou, E. (2018). “A Numerical Framework for Evaluating Flood Inundation Hazard under Different Dam Operation Scenarios – A case Study in Naugatuck River”. *Water*, 10, 1798-1819.
- Henz, S. K. F. (2019). *Análise da eficiência hidráulico-hidrológica e de qualidade da água da lagoa de retenção do Guará – DF*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90p.
- IGBP (1993). *Biosphere Aspects of the Hydrological Cycle. The International GeosphereBiosphere Programme: A Study of Global Change, Report n.27*. Estocolmo (Suécia): BARC Core Project Office, Institut fur Meteorologie, Freie Universitat Berlin.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2019). Gráficos. Disponível em: < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 11 de novembro de 2019.
- Lea, D.; Yeonsu, K.; Hyunuk, A. (2019). “Case Study of HEC-RAS 1D-2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea”. *Water*, 11, 2048-2062.
- Lim, P. S.; Kueh Judy, K. J. (2014). “Effectiveness of Off-line Ara Damansara Detention Pond in Mitigating Flood”. *Anais do XIII International Conference on Urban Drainage*, Sarawak, Malásia.
- Lima, J. B. M. (2004). *Estudo de redes de monitoramento de Qualidade das Águas Superficiais – o Caso da Bacia do Rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 112p.
- Mah, D. Y. S. e Ho, T. Y. (2017). “Alternative Use of Roundabout as Storm water Detention Pond”. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 8(1), 15-23.
- Mihu-Pintilie, A.; Cimapiianu, C. I.; Stoleriu, C. C.; Pérez, M. N.; Paveluc, L. E. (2019). “Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach”. *Water*, 11, 1832-1856.

Nascimento, N. O.; Ellis, J. B.; Baptista, M.B.; Deutsch, J. C. (1999). “Using detention basins: operational experience and lessons”. *Urban Water I*, 113-124.

Nascimento, N.O.; Baptista, M. B. e Souza, V. C. B. (1997). “Sistema ‘Hidrourb’ para o pré-dimensionamento de soluções compensatórias em drenagem urbana – Parte I: Conceitos” *Anais Eletrônicos do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vitória, Brasil.

Novacap (Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil) (2019). Termo de Referência e Especificações para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal. NOVACAP, 25 pg.

Park, K.; Lee, M. (2019). “The Development and Application of the Urban Flood Risk Assessment Model for Reflection upon Urban Planning Elements”. *Water*, 11, 920-937.

Paula; A. C. V. (2019). *Comportamento e evolução temporal de bacias de retenção e retenção no amortecimento de cheias e na qualidade da água – estudo de caso da bacia de retenção do Guará – DF*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 156p.

Pinto, N. L. de S.; Holtz, A. C. T.; Martins, J. A. (1973). *Hidrologia de Superfície*. Edgard Blücher; Centro de Estudos e Pesquisas de Hidráulica e Hidrologia da Universidade Federal do Paraná, São Paulo, 179p.

Prince Georges County (PGC). (1999). *Low Impact Development Design Strategies – an Integrated Design Approach*. Department of Environmental Resources, Maryland, E.U.A., 150p.

Righetto, A. M. (2009). *Manejo De Águas Pluviais Urbanas*. Projeto PROSAB, Editora ABES, Rio de Janeiro, 396p.

Righetto, A. M., Gomes, K. M., Freitas, F. R. S. (2017). “Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. ” *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 22, n. 6. Nov/Dez 2017. 1109-1120.

Rossmann, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1*. USEPA (United States Environment Protection Agency), Cincinnati, E.U.A., 353p.

Schueler, T. R., (1987). *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, Washington, E.U.A., 628p.

Sébastien, C., Barraud, S., Gonzalez-Merchan, C., Perrodin, Y. e Visiedo, R. (2014). “Stormwater retention basin efficiency regarding micropollutant loads and ecotoxicity”. *Water Science & Technology*, 974-981.

Sébastien, C.; Barraud, S.; Ribun, S.; Zoropogui, A.; Blaha, D.; Becouze-Lareure, C.; Lipeme Kouyi, G.; Cournoyer, B. (2013). “Accumulated sediments in a detention basin: chemical and microbial hazards assessment linked to hydrological process”. *Environ Sci Pollut Res Int.*, 21(8), 5367-5378.

Silva, G. B. L. (2006). *Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas*. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 199p.

Silva, T. J. B. (2017). *Avaliação da rede de drenagem urbana do Setor Habitacional Taquari – DF*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79p.

Siqueira, R. C.; Moura, P. M.; Silva, T. F. das G. (2019). “Metodologia para construção de gráfico de risco de inundações urbanas”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24(23).

SNSA (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental). (2018). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo das Águas Pluviais Urbanas - 2015*. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, DF.

Souza, F. P. (2014). *Monitoramento e modelagem hidrológica da sub-bacia do lago Paranoá – Brasília/DF – e avaliação de bacia de retenção*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p.

Souza, F. P.; Costa, M. E. L.; Koide, S. (2019). “Hydrological Modelling and Evaluation of Detention Ponds to Improve Urban Drainage System and Water Quality”. *Water*, 11(8), 1547-1564.

Tavanti, D. R.; Barbassa, A. P. (2010). “Contribuições do planejamento urbano às questões hidrológicas e ambientais”. Anais do IV Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado, Sustentável – Pluris 2010. Faro, Portugal.

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

Tucci, C. E. M. (2001). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. ABRH; Editora da UFRGS, Porto Alegre, 943p.

Tucci, C. E. M. (2008). “Águas Urbanas”. In: Estudos Avançados, São Paulo, 22(63), 97-112.

Tucci, C. E. M.; Bertoni, J. C. (2003). *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH, Porto Alegre, 495p.

Tucci, C. E. M.; Mendes, C. A. (2006). *Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 302p.

Tucci, C.E.M; Hespanhol, I; Cordeiro Netto, O. de M. (2001). *Gestão da água no Brasil*. UNESCO, Brasília, 192p.

Volken, N. J. (2018). *Avaliação hidráulica e hidrológica de bacias de retenção – Estudo de caso da bacia de retenção do Guará II – DF*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.