



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

José Matheus Anacleto Caldeira Alves

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE ÁREA PERMEÁVEL NA
DIMINUIÇÃO DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA DO
RIACHO DO SAPO, MACEIÓ-AL**

Maceió/AL

2021

José Matheus Anacleto Caldeira Alves

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE ÁREA PERMEÁVEL NA
DIMINUIÇÃO DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA DO
RIACHO DO SAPO, MACEIÓ-AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como forma de obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Dr.º Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves

Co-orientador: MSc. Altair Maciel de Barros

Maceió/AL

2021

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

A474e Alves, José Matheus Anacleto Caldeira.

Estudo da influência da fração de área permeável na diminuição da geração de escoamento superficial na bacia do riacho do Sapo, Maceió-AL / José Matheus Anacleto Caldeira Alves. – Maceió, 2021.

107 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientador: Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves.

Coorientador: Altair Maciel Barros.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 83-88.

Anexos: f. 89-107.

1. Urbanização. 2. Uso do solo. 3. Cobertura do solo. 4. Escoamento superficial. 5. Simulação contínua. 6. *Storm Water Management Model*. I. Título.

CDU: 624.131.2/.5


Folha de Aprovação

José Matheus Anacleto Caldeira Alves

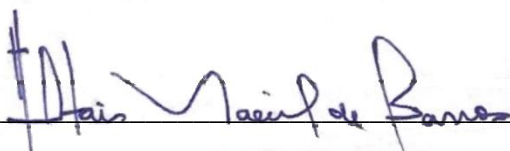
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE ÁREA PERMEÁVEL NA DIMINUIÇÃO DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA DO RIACHO DO SAPO, MACEIÓ-AL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como forma de obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho aprovado em 27 de setembro de 2021.

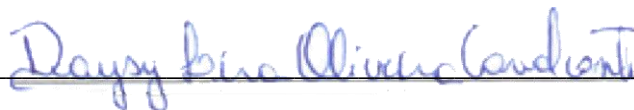


Prof.º Dr.º Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves - Universidade Federal de Alagoas



MSc. Altair Maciel de Barros - Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL)

Banca examinadora:



Prof.ª Dr.ª Daisy Lira Oliveira Cavalcanti - Universidade Federal de Alagoas



Prof.º Dr.º Vladimir Caramori Borges de Souza - Universidade Federal de Alagoas

Aos meus pais, Cristina e Rivaldo, a quem devo a vida e minha formação como ser humano. Meus sinceros agradecimentos pelo apoio constante, pelos grandes ensinamentos e por toda compreensão em todos os momentos da minha vida.

Sem vocês, nenhuma linha desse trabalho seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus. Me levou aonde meus pés jamais imaginavam pisar. Tu és e sempre será a minha rocha e fortaleza.

Agradeço mais uma vez aos meus pais, Cristina e Rivaldo, meus maiores exemplos em vida. Agradeço pelo esforço e suor derramado para que pudessem me prover a melhor educação possível. Tenho muito orgulho de vocês.

Agradeço aos meus avós, minhas tias, tios e demais membros da minha família. Vocês sonharam esse sonho junto comigo e sempre acreditaram em mim.

Ao PET Engenharia Civil e a todos os membros que dividiram essa jornada comigo. Com vocês experimentei o que é ter uma casa e uma família dentro da universidade. Guardarei no meu coração para sempre todos os momentos que dividimos, todo o apoio mútuo que trocamos, risadas que demos, caronas, viagens e todos os minutos passados naquela sala. Obrigado por me ensinarem tanto, tenho certeza que cada um deixa uma marca na pessoa que eu sou.

Agradeço à professora Karoline Melo. Embora tenha sido para mim uma grande tutora e uma grande professora, não consigo te enquadrar só nisso. Sua mão sempre presente em ajudar e seus conselhos precisos foram imprescindíveis nessa minha caminhada e te tornam uma grande amiga e um grande exemplo. Serei sempre grato.

Agradeço a todos meus amigos e fiéis companheiros de caminhada. Embora a graduação seja árdua, vocês fizeram com que muitos desses momentos se tornassem bastante divertidos e leves. Em especial, gostaria de agradecer ao Alef e Christian, que sempre me ajudaram a sair da inércia e dividiram comigo momentos lendários e igualmente desesperadores.

Agradeço aos meus orientadores, professor Marllus Gustavo e Altair Maciel. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados, pela paciência e pela presença constante no desenvolvimento desse trabalho. Vocês acrescentaram uma peça fundamental na minha formação.

Agradeço a todos os professores que compartilharam um pouco dos seus conhecimentos comigo. Em especial, aos meus demais orientadores na minha graduação, seja em pesquisa ou em monitoria: professora Aline Ramos, professor Roberaldo Carvalho, professor Carlos Ruberto e professor Francisco Patrick.

Por fim, a todos que cruzaram meu caminho durante a minha vida e puderam contribuir direta ou indiretamente para a pessoa que sou hoje. Com certeza vocês também influenciaram algum pedaço desse trabalho.

“Não é o crítico que importa; nem aquele que aponta onde foi que o homem tropeçou ou como o autor das façanhas poderia ter feito melhor. O crédito pertence ao homem que está por inteiro na arena da vida, cujo rosto está manchado de poeira, suor e sangue; que luta bravamente, que erra, que decepciona, porque não há esforço sem erros e decepções; mas que, na verdade, se empenha em seus feitos; que conhece o entusiasmo, as grandes paixões; que se entrega a uma causa digna; que, na melhor das hipóteses, conhece no final o triunfo da grande conquista e que, na pior, se fracassar, ao menos fracassa ousando grandemente.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

O processo de urbanização cada vez mais acelerado vem gerando mudanças significativas no uso e cobertura do solo em ambientes urbanos. Essa intervenção antropogênica se manifesta principalmente no aumento das áreas impermeáveis como ruas, calçadas, coberturas e pátios asfaltados ou em concreto. Esse fenômeno catalisa a ocorrência de alagamentos quando unido a grandes volumes de precipitação, causando danos socioeconômicos à população. Nesse contexto, controlar a fração da área urbana que se mantém permeável se apresenta como aspecto importante para o devido manejo das águas pluviais. Assim, o presente trabalho tem o objetivo de analisar os efeitos de diferentes cenários de uso e cobertura do solo na fração de área permeável e, conseqüentemente, no volume gerado de escoamento superficial e nas vazões de pico. Para tal, será utilizado um modelo hidrológico-hidráulico de uma bacia hidrográfica urbana de Maceió-AL, a bacia do riacho do Sapo (BHRS), através do *Storm Water Management Model* (SWMM), e o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió como base para estabelecimento dos cenários. Foi possível avaliar o efeito das diretrizes desses documentos, além de algumas intervenções estabelecidas na geração do escoamento superficial, vazão de pico, pontos de alagamento e no balanço hídrico da bacia. Esse efeito foi visto com maior destaque na sub-bacia 1 da BHRS, que é a maior em área e declividade e influi diretamente em um dos pontos de alagamento do canal. Concluiu-se que, o estabelecimento dessas diretrizes é eficaz na redução do escoamento superficial, da vazão de pico e do coeficiente de escoamento da bacia, entretanto isoladamente não é capaz de extinguir os pontos de alagamento encontrados.

Palavras-chave: Urbanização. Uso e Cobertura do Solo. Escoamento Superficial. Simulação Contínua. SWMM.

ABSTRACT

The increasingly accelerated urbanization process has generated significant changes in land use and land cover in urban environments. This anthropogenic intervention is manifested mainly in the increase of impermeable areas such as streets, sidewalks, roofs and paved or concrete patios. This phenomenon catalyzes the occurrence of flooding when combined with large volumes of precipitation, causing socioeconomic damage to the population. In this context, controlling the fraction of the urban area that remains permeable is an important aspect for the proper management of rainwater. Thus, the present work aims to analyze the effects of different land use and land cover scenarios on the permeable area fraction and, consequently, on the generated volume of runoff and on the peak flows. To this end, a hydrological-hydraulic model of an urban watershed in Maceió-AL, the Sapó's creek basin (BHRS) will be used, through the Storm Water Management Model (SWMM), and the Master Plan and the Code of Urbanism and Buildings of Maceió as a basis for establishing the scenarios. It was possible to assess the effect of the guidelines of these documents, in addition to some interventions established in the generation of surface runoff, peak flow, flooding points and the water balance of the basin. This effect was seen more prominently in sub-basin 1 of the BHRS, which is the largest in area and slope and directly influences one of the channel's flooding points. It was concluded that the establishment of these guidelines is effective in reducing surface runoff, peak flow and the basin runoff coefficient, however alone it is not able to quench the flooding points found.

Keywords: Urbanization. Land Use and Coverage. Surface runoff. Continuous Simulation. SWMM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre o número de habitantes e a ocorrência de inundações no município de Belo Horizonte - MG	24
Figura 2 - Fração Impermeável (%) versus Densidade Habitacional (hab/ha) para bacias urbanas da região metropolitana de São Paulo.....	25
Figura 3 - Balanço hídrico em diferentes cenários de uso e ocupação do solo	26
Figura 4 - Crescimento do volume de escoamento superficial em comparação com as alterações no uso e cobertura do solo em estudo de Kim et al. (2002)	27
Figura 5 - Zoneamento urbano do uso de solo do município de Maceió	29
Figura 6 - Mirante localizado na área da Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo	32
Figura 7 - Reservatório Não-Linear utilizado como forma de cálculo do escoamento superficial através do SWMM	37
Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo, a bacia hidrográfica do riacho do Sapo (BHRS), expondo sua divisão em sub-bacias.....	40
Figura 9 - Perfil longitudinal de todo o trecho da bacia do Riacho do Sapo.....	41
Figura 10 - Classificação hidrológica dos solos da Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo seguindo o levantamento detalhado dos solos de Maceió (EMBRAPA, 2005)	45
Figura 11 - Delimitação das diretrizes expostas no Plano Diretor e no Código de Urbanismo na região da BHRS	47
Figura 12 - Zoneamento Urbano de Uso do Solo do Município de Maceió na região da BHRS.....	48
Figura 13 - Principais áreas industriais/comerciais localizadas na Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo.....	50
Figura 14 - Zonas Especiais de Interesse Social na região da BHRS	51
Figura 15 - Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico na região da BHRS	51

Figura 16 - Zonas de ocupação/parcelamento do solo restrito na região da BHRS	52
Figura 17 - Interface do SWMM mostrando a marcação de todas as sub-bacias na área de estudo	54
Figura 18 - Função “Pluviômetro” do SWMM e suas propriedades (a) e arquivo .dat usado para inserção dos dados de precipitação (b)	55
Figura 19 - Funções “Nó”, “Exutório e “Conduto” do SWMM	55
Figura 20 - Parametrização da BHRS no SWMM	56
Figura 21 - Fluxograma do processo de simulação e análise dos resultados para os cenários de fração de área permeável definidos	57
Figura 22 - Resultados da calibração do modelo com os parâmetros do cenário de referência da BHRS	59
Figura 23 - Variação do percentual de área impermeável (%AI), entre os cenários, separado por sub-bacia	61
Figura 24 - Variação do CN, entre os cenários, separado por sub-bacia.....	62
Figura 25 - Padrão de ocupação observado atualmente na sub-bacia 1 da BHRS	63
Figura 26 - Gráficos box-plot do CN das sub-bacias da BHRS para ambos os cenários de estudo	63
Figura 27 - Escoamento total simulado, em m ³ , em todas as sub-bacias, para os cenários de estudo	65
Figura 28 - Queda no volume de escoamento superficial gerado, em m ³ , nos três primeiros meses de cada ano para a BHRS e para a sub-bacia 1 isoladamente, no cenário 2	67
Figura 29 - Queda no volume de escoamento superficial gerado, em m ³ , nos três primeiros meses de cada ano para a BHRS e para a sub-bacia 1 isoladamente, no cenário 3.....	68
Figura 30 - Gráficos box-plot das vazões de pico encontradas em cada evento da série simulada por sub-bacia	70
Figura 31 - Localização dos pontos de alagamento observados na simulação do SWMM na bacia do riacho do Sapo	71

Figura 32 - Redução abrupta na seção do canal do riacho do Sapo no ponto de alagamento 1.....	72
Figura 33 - Perfil longitudinal do canal do riacho do Sapo em situação de alagamento nos pontos 1	72
Figura 34 - Passagem de seção aberta para seção fechada no ponto de alagamento 2 do canal	73
Figura 35 - Ponto de alagamento 3 do canal do riacho do Sapo	73
Figura 36 - Frequência de excedência das profundidades atingidas em eventos chuvosos para o ponto de alagamento 1	74
Figura 37 - Tempo de inundação no ponto de alagamento 1, no evento chuvoso do dia 15/04/2021	74
Figura 38 - Horas com fluxo acima do normal em cada ponto de alagamento, para os três cenários	75
Figura 39 - Gráfico de barras e box-plot expondo a variação do coeficiente de escoamento entre as sub-bacias para os cenários de estudo	76
Figura 40 - Coeficientes de escoamento nos três primeiros meses do ano, por sub-bacia.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros urbanísticos por zonas e corredores de atividades múltiplas para a Zona Residencial 2 (ZR-2)	31
Tabela 2 - Síntese dos parâmetros requeridos para a simulação hidrológica no SWMM.....	42
Tabela 3 - Coeficientes de escoamento (C) para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo.....	43
Tabela 4 - Valores recomendados por Gironás et al. (2009) para o Coeficiente de Rugosidade (n) e a Profundidade de Armazenamento (d)	44
Tabela 5 - Valores do Curve Number (CN) para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo	45
Tabela 6 - Taxa de Ocupação do Terreno Máxima para os usos da Zona Residencial 1 (ZR-1).....	49
Tabela 7 - Parâmetros de uso e ocupação do solo da Zona Residencial 1 (ZR-1) no município de Curitiba	53
Tabela 8 - Parâmetros calibrados do modelo no SWMM	59
Tabela 9 - Parâmetros de entrada do SWMM comuns a todos os cenários propostos	60
Tabela 10 - Curve Number (CN) e percentual de área impermeável (%AI) para todos os cenários.....	60
Tabela 11 - Resultados da simulação precipitação-vazão para o cenário de referência.....	64
Tabela 12 - Resultados da simulação precipitação-vazão para o cenário 2 (Plano Diretor e Código de Urbanismo de Maceió).....	64
Tabela 13 - Resultados da simulação precipitação-vazão para o cenário 3 (Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo de Maceió)	65
Tabela 14 - Volume de escoamento superficial, em m ³ , gerado na BHRS nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, para todos os cenários de estudo	66

Tabela 15 - Volume de escoamento superficial, em m ³ , gerado na sub-bacia 1 nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, para todos os cenários de estudo	67
Tabela 16 - Máxima vazão de pico, em m ³ /s, para todas as sub-bacias da BHRS em todos os cenários de estudo.....	68
Tabela 17 - Coeficiente de escoamento para os cenários de estudo, por sub-bacia, em todo o período da série.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volume de água na sub-bacia;
A	Área da superfície da sub-bacia;
d	Profundidade de água armazenada na sub-bacia;
P_{ef}	Chuva efetiva;
Q	Vazão;
W	Largura;
d_p	Profundidade de armazenamento da superfície permeável;
N	Coefficiente de Manning;
S	Declividade;
$WCON$	Largura característica do escoamento superficial;
t	Tempo;
$\%AI$	Percentual de área impermeável;
n_i	Coefficiente de rugosidade da superfície impermeável;
n_p	Coefficiente de rugosidade da superfície permeável;
d_i	Profundidade de armazenamento da superfície impermeável;
CN	<i>Curve Number</i> ;
C	Coefficiente de Escoamento;
$TOTM$	Taxa de ocupação de terreno máxima;
R	Coefficiente de correlação;
R^2	Coefficiente de determinação;
NSE	Coefficiente de Nash e Sutcliffe.

LISTA DE SIGLAS

- AIDC – Área Impermeabilizada Diretamente Conectada
- AMC – Condição de Umidade do Solo Antecedente
- ANA – Agência Nacional de Águas
- AQ – Areias Quartzosas
- BHRS – Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo
- CAD – *Computer Aided Design*
- CN – *Curve Number*
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IRL – Bacia do Lago do Rio Indian
- KSC – Espaço Central Kennedy
- LA – Latossolos Amarelos
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- NSE – Coeficiente de Nash e Sutcliffe
- PA – Argissolos Amarelos
- SB – Sub-bacia
- SEPLAG – Secretaria do Estado de Planejamento, Gestão e Patrimônio
- SIG – Sistemas de Informação Geográfica
- SWMM – *Storm Water Management Model*
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
- UN – United Nations (Nações Unidas)
- UR – Uso Residencial
- U.S EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
- TOTM – Taxa de Ocupação do Terreno Máxima
- ZEIS - Zonas de Especial Interesse Social

ZIAP-M - Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico referente aos Mirantes

ZIAP-R - Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico referentes às margens dos cursos d'água

ZRO - Zona de Restrição à Ocupação

ZR-1 - Zona Residencial 1

ZR-2 - Zona Residencial 2

ZR-4 - Zona Residencial 4

ZRV-1 - Parcela das vias públicas da Zona Residencial 1

ZRA-1 - Parcela das áreas livres e equipamentos da Zona Residencial 1

ZRP-1 - Parcela "privada" Zona Residencial 1

ZRV-2 - Parcela das vias públicas da Zona Residencial 2

ZRA-2 - Parcela das áreas livres e equipamentos da Zona Residencial 2

ZRP-2 - Parcela "privada" Zona Residencial 2

ZRV-4 - Parcela das vias públicas da Zona Residencial 4

ZRA-4 - Parcela das áreas livres e equipamentos da Zona Residencial 4

ZRP-4 - Parcela "privada" Zona Residencial 4

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	22
2.1. GERAIS	22
2.2. ESPECÍFICOS	22
3. REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1. O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E SEU IMPACTO NA GESTÃO DAS ÁGUAS URBANAS	23
3.2. IMPERMEABILIZAÇÃO DAS CIDADES E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	24
3.3. USO E COBERTURA DO SOLO: FRAÇÃO PERMEÁVEL E IMPERMEÁVEL	25
3.4. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE MACEIÓ: PLANO DIRETOR E O CÓDIGO DE URBANISMO	27
3.4.1. Diretrizes para o uso e ocupação do solo.....	28
3.4.1.1. Zonas residenciais (ZRs)	30
3.4.1.2. Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico (ZIAPs).....	32
3.4.1.3. Zonas Especiais de Interesse Social (ZEISs).....	33
3.5. MODELOS HIDROLÓGICOS	33
3.5.1. Modelos Hidrológicos Chuva-Vazão.....	34
3.5.2. Simulação de Séries Contínuas.....	35
3.6. STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM).....	36
3.6.1. Módulo <i>Runoff</i>	36
4. METODOLOGIA.....	39
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.2. DADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO	41
4.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SWMM PARA OS CENÁRIOS DE	

ESTUDO	41
4.3.1. Características Físicas.....	42
4.3.2. Percentual de Área Impermeável (%AI).....	42
4.3.3. Coeficiente de Rugosidade (n) e Profundidade de Armazenamento (d)	43
4.3.4. Métodos de Infiltração	44
4.3.4.1. Parâmetros do Método SCS.....	44
4.4. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DO SOLO.....	46
4.4.1. Cenário 1: Cenário de Referência.....	46
4.4.2. Cenário 2: Diretrizes do Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió	46
4.4.2.1. Zoneamento Urbano de Uso do Solo.....	47
4.4.2.2. Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS)	50
4.4.2.3. Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico (ZIAP)	51
4.4.2.4. Zonas de Restrição à Ocupação (ZRO)	51
4.4.3. Cenário 3: Intervenções no cenário do Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió	52
4.5. MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRÁULICA.....	53
4.5.1. Inserção das informações no SWMM.....	53
4.5.2. Calibração	56
4.5.3. Simulação hidrológica e análise dos resultados.....	57
4.5.3.1. Balanço hídrico	57
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
5.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO NO SWMM.....	59
5.2. PARAMETRIZAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	60
5.3. TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO NAS SUB-BACIAS	64
5.4. PONTOS DE ALAGAMENTO	71

5.5. BALANÇO HÍDRICO.....	75
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
REFERÊNCIAS	83
ANEXO A - DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO CENÁRIO DE REFERÊNCIA	89
ANEXO B - DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO CENÁRIO DO PLANO DIRETOR E CÓDIGO DE URBANISMO DE MACEIÓ (CENÁRIO 2)	90
ANEXO C - DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO CENÁRIO DE INTERVENÇÃO AO PLANO DIRETOR E CÓDIGO DE URBANISMO DE MACEIÓ (CENÁRIO 3)	99

1. INTRODUÇÃO

A urbanização das cidades se apresenta como uma tendência em todos os locais do globo. Espera-se que em 2050 cerca de 70% da população mundial viva em ambientes urbanizados (UN, 2008). Assim, a mudança no uso e cobertura do solo, gerada por esse processo, se apresenta como um fator responsável pelo aumento de áreas impermeáveis no meio (HASSAN e NAZEM, 2016).

A presença cada vez maior de estruturas urbanas impermeáveis tais como a pavimentação de ruas, coberturas e pátios, por exemplo, contribui para uma série de alterações hidrológicas, principalmente criando cenários de redução da capacidade de infiltração do solo e aumento do escoamento superficial, levando à diminuição do tempo de concentração de bacias hidrográficas (FLETCHER et al., 2013). A consequência prática desse fenômeno se manifesta na maior frequência de inundações e alagamentos quando essa maior impermeabilização se junta a grandes volumes de precipitação (PETIT-BOIX et al., 2015).

Com essa constatação, é possível então correlacionar o aumento da impermeabilização das cidades, aspecto inerente ao avanço da urbanização, com o aumento da ocorrência desses eventos. Em seu estudo, Jacobson (2011 apud. BARROS et al., 2016) mostra que bacias urbanizadas geram vazões de pico em cerca de 30% a 100% maiores que vazões naturais.

Envolto em uma desordenada dinâmica de ocupação de espaços, o Brasil não foge à essa realidade, sendo problemas com inundações e alagamentos frequentes nas suas grandes cidades. Nesse cenário, a modelagem hidrológica surge como uma ferramenta que permite a avaliação dos impactos do clima, uso e cobertura do solo sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos (MORIASI et al., 2012). Assim, torna-se possível a análise da relação entre a ocupação do espaço urbano e o seu impacto sobre os recursos hídricos, para os mais variados e possíveis cenários.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAIS

Analisar, para diferentes cenários de uso e cobertura do solo de uma bacia hidrográfica urbana de Maceió-AL, a influência da fração de área permeável no escoamento superficial gerado e transportado pelo sistema de drenagem a partir de modelagem hidrológico-hidráulica.

2.2. ESPECÍFICOS

- Avaliar a aplicação das diretrizes do Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió e seu efeito na geração do escoamento superficial;
- Verificar, a partir de cenário de intervenção proposto, a influência da mudança na fração de área permeável entre estes na geração de escoamento superficial da bacia;
- Avaliar a aplicação da simulação contínua nas simulações de cenários de intervenção em bacias urbanas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E SEU IMPACTO NA GESTÃO DAS ÁGUAS URBANAS

A evolução cada vez mais acelerada do processo de urbanização e suas consequentes modificações no ambiente natural vem transformando a forma com que se dá o uso e cobertura do solo das grandes cidades. Essa ação antropogênica se manifesta principalmente com a redução das áreas de cobertura natural do solo e no aumento das áreas impermeáveis (TAM e NGA, 2018).

Inicialmente, essas intervenções não provocavam sérias consequências. Entretanto, o crescente aumento das áreas impermeabilizadas reduz a infiltração da água no solo e, quando unida a altos volumes de precipitação, afeta os processos hidrológicos. Entre os efeitos gerados, podemos destacar a criação de bacias de resposta rápida à chuva, devido à aceleração do escoamento superficial, modificação do curso natural das águas e, como consequência, a ocorrência cada vez mais frequente de enchentes e inundações (BRAUD et al., 2013; MILLER et al., 2014).

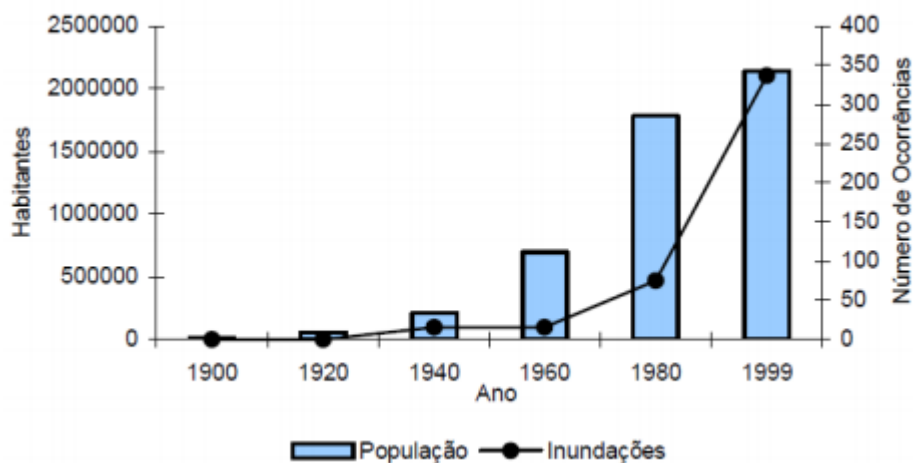
Nesse cenário, em muitas cidades, eventos de grande volume de precipitação são praticamente sinônimos de inundações e alagamentos. Historicamente, é possível perceber que seus impactos sócio-econômicos transcendem a engenharia, se tornando também uma questão de saúde pública, sociologia e ciência ambiental. Entre suas consequências práticas, notabilizam-se o aumento de doenças vindas de excreções animais, além da poluição de rios e mares através da sobrecarga dos sistemas de descarga de efluentes. Assim, evidencia-se que gerenciar os processos hidrológicos em águas urbanas e mitigar esses impactos supracitados é algo longe de ser simples e exige a colaboração de várias disciplinas envolvidas no bem-estar das comunidades (FLETCHER et al., 2013).

No Brasil, o aumento no processo de urbanização começou a ser notado após a década de 60, trazendo consigo todas as problemáticas aqui já expostas (TUCCI, 1995). Caracterizado por um aumento no processo de migração da população da zona rural para regiões metropolitanas e por uma expansão irregular em zonas de periferia, todo o processo ignorou totalmente a natureza interdisciplinar essencial ao devido planejamento da ocupação urbana. Portanto, se tornou extremamente difícil evitar nacionalmente a ocorrência de todos os problemas correlatos e seus impactos nas populações (SANTOS JÚNIOR; SANTOS, 2013).

Como exemplo prático desse processo, a Figura 1 demonstra a relação entre o

crescimento da população, e consequente aumento de áreas impermeabilizadas, e a ocorrência de enchentes no município de Belo Horizonte - MG.

Figura 1: Relação entre o número de habitantes e a ocorrência de inundações no município de Belo Horizonte - MG.



Fonte: LIMA-QUEIROZ et al. (2003).

Seguindo a realidade nacional, o município de Maceió também passou por um rápido processo de urbanização conectado a problemas em sistemas de infraestrutura (NEVES et al., 2007). Segundo o IBGE (2009 apud. SILVA JUNIOR, 2009), entre 1950 e 2000 o crescimento da população do município foi de 420%, saltando de 162.976 habitantes em 1950 para 797.759 habitantes. No seu levantamento mais atualizado, o IBGE (2020) estima que o município conta com um total de 1.025.360 habitantes.

Como soluções para eventos de alagamentos e inundações, apenas obras de macro e microdrenagem foram implementadas na área da cidade. Entre as obras de macrodrenagem, destaca-se a canalização do Riacho do Sapo, área de estudo do presente trabalho.

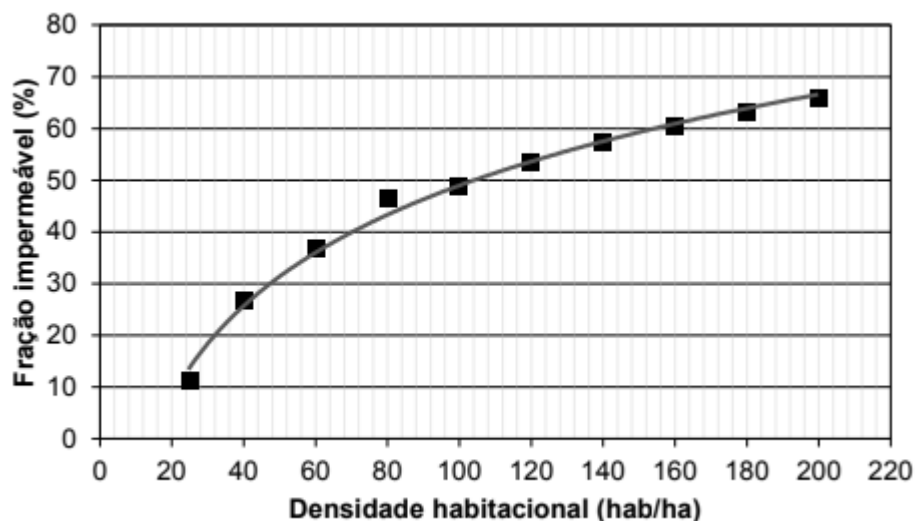
3.2. IMPERMEABILIZAÇÃO DAS CIDADES E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Conforme destaca Holz (2010), alagamentos em bacias urbanas se devem, principalmente, ao processo de “impermeabilização das grandes superfícies”. O aumento da presença de áreas impermeabilizadas (ruas, calçadas, coberturas e pátios asfaltados ou em concreto), como já visto, é um dos grandes reflexos do processo de urbanização das cidades.

A relação entre a densificação populacional (hab/ha), aspecto derivado diretamente da urbanização, e a fração impermeável (%) do solo, observada em estudo feito em bacias urbanas

da região metropolitana de São Paulo, pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Fração Impermeável (%) versus Densidade Habitacional (hab/ha) para bacias urbanas da região metropolitana de São Paulo.



Fonte: CAMPANA e TUCCI (1994).

No tocante aos processos hidrológicos, esse fenômeno impacta diretamente no volume do escoamento superficial gerado pelas precipitações. A falta de áreas permeáveis impossibilita a infiltração e reduz a evapotranspiração das águas das chuvas, somando assim esse volume à parcela que naturalmente escoaria pela região afetada. Além disso, esse escoamento também se direciona em sua maioria às redes de drenagem urbana, através de sarjetas e canais, onde a velocidade de escoamento aumenta consideravelmente devido à menor rugosidade. Esse fator transforma as grandes bacias urbanas nas chamadas bacias de resposta rápida.

3.3. USO E COBERTURA DO SOLO: FRAÇÃO PERMEÁVEL E IMPERMEÁVEL

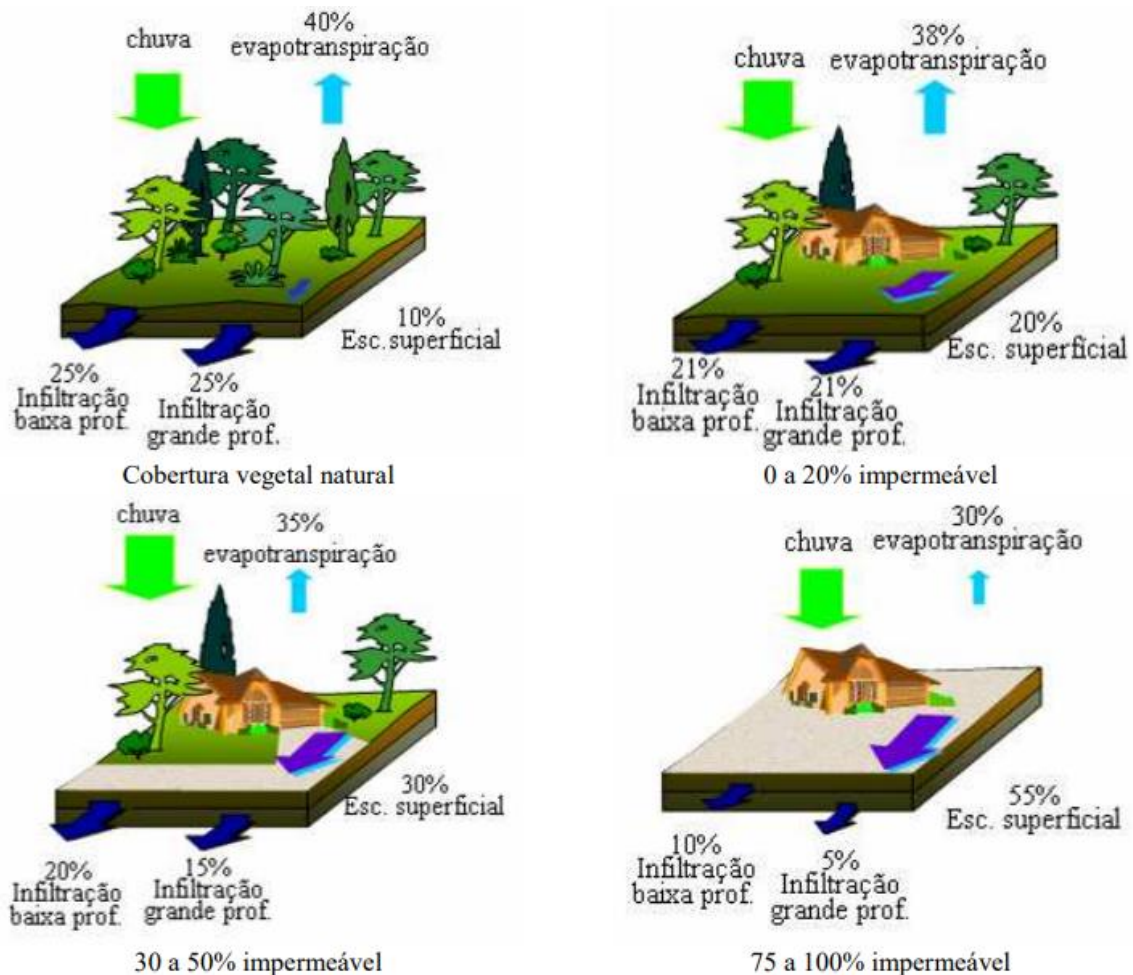
As formas de uso e ocupação do solo são um ponto chave da problemática em questão. Segundo Barros et al. (2016), “o escoamento superficial aumenta como resultado da urbanização e é governado pela fração de área impermeabilizada”. O aumento dessa área depende principalmente da forma que o solo dos ambientes urbanos é usado e ocupado.

Alguns estudos evidenciam que o aumento da cobertura vegetal impõe consequentemente uma redução das vazões observadas e do escoamento superficial, mediante a diminuição da área impermeabilizada (DIAZ e QUERNER, 2005; ZHANG et al., 2004).

A figura abaixo ilustra diferentes cenários de ocupação de solo e expõe suas consequências no balanço hídrico da região, devido aos diferentes cenários de

impermeabilização do terreno.

Figura 3: Balanço hídrico em diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

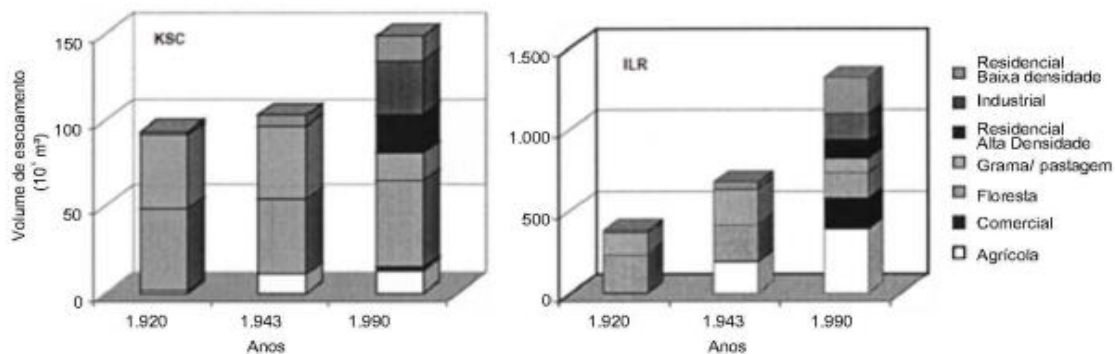


Fonte: HOLZ (2010). Adaptado de CIRIA (2001) e FAGUNDES (2002).

Consequências práticas das mudanças no uso e ocupação do solo no escoamento superficial foram observadas no estudo de Kim et al. (2002 apud. CAPUTO, 2012) na bacia do Lago do rio Indian (IRL) e na sua sub-bacia chamada Espaço Central Kennedy (KSC), localizadas no estado da Flórida, nos Estados Unidos. No período de 1920 a 1990, a sub-bacia KSC teve um acréscimo de 3% para 9 % no uso agrícola e residencial de baixa densidade e de 11% nos usos comercial, residencial de alta densidade e industrial. Também nesse período, na bacia IRL, a área florestal diminuiu de 72% para 27%, os usos comerciais, residenciais de alta densidade e comerciais tiveram o mesmo crescimento comparado à KSC, e o uso agrícola e residencial de baixa densidade subiu de 4,5% para mais de 50%. O crescimento do volume de escoamento superficial em comparação com as alterações no uso e cobertura do solo, obtidos

no estudo de Kim et al. (2002), está exposto na Figura 4.

Figura 4: Crescimento do volume de escoamento superficial em comparação com as alterações no uso e cobertura do solo em estudo de Kim et al. (2002).



Fonte: CAPUTO (2012). Adaptado de KIM et.al. (2002).

Já Benini e Mediondo (2015), em seus estudos na bacia do Mineirinho, também observaram que com a redução da cobertura natural do solo e aumento das superfícies impermeabilizadas o tempo para ocorrência do pico é reduzido e a magnitude de sua vazão maximizada.

Observadas essas constatações, estudar as alterações no uso e ocupação do solo, advindas do processo de urbanização e, conseqüentemente, controlar essa fração da área permeável se apresentam como um ponto chave para o correto e efetivo manejo das águas pluviais.

3.4. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE MACEIÓ: PLANO DIRETOR E O CÓDIGO DE URBANISMO

Ordenar o uso e ocupação do solo consiste na busca da preservação da convivência social neste ambiente além da qualidade deste. A falta de planejamento nesse processo unida às ocupações informais e desordenadas contribuem para as alterações hidrológicas citadas no item anterior.

O planejamento urbano é abordado na Constituição Federal de 1988, no seu artigo 182, onde afirma-se que “a política de desenvolvimento urbano [...] tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes” (BRASIL, 1988). No cerne dessa política de desenvolvimento urbano, mora o Plano Diretor Municipal que, segundo o Parágrafo 1º do mesmo artigo 182, é “o instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana” (BRASIL 1988).

Ainda segundo Pedrosa (2008), por meio do Plano Diretor “são feitos estudos para identificar e analisar as características físicas, as atividades predominantes e as vocações da cidade, os problemas e as potencialidades”.

No seu artigo 120, seção II, o Plano Diretor de Maceió (MACEIÓ, 2005) divide o território municipal em macrozonas, com distintas diretrizes de uso e ocupação do solo. A delimitação dessas macrozonas estão expostas em mapas anexos ao plano, sendo eles usados para caracterização. Além disso, como complementação a essas diretrizes, o Plano Diretor expõe, em seus artigos 125 e 126, a adequação delas à legislação urbanística e especificidades locais. Assim, se torna primordial que o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (MACEIÓ, 2006) seja usado em conjunto ao Plano para o devido planejamento urbano da cidade.

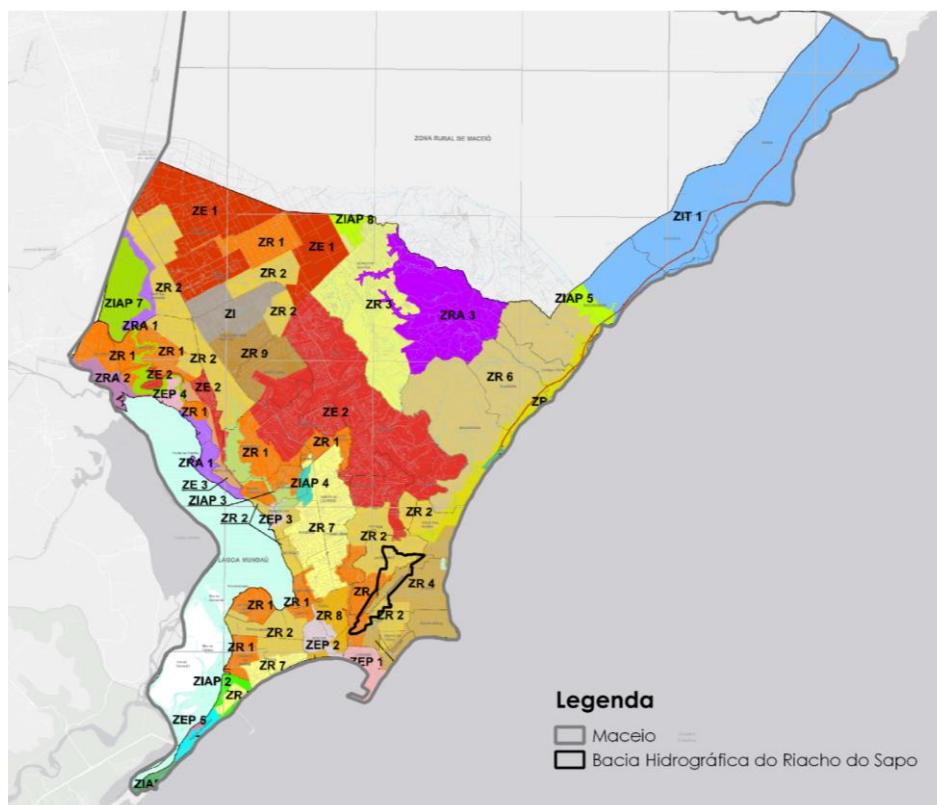
3.4.1. Diretrizes para o uso e ocupação do solo

O Código de Urbanismo e Edificações de Maceió, considerando a sua utilização e consequentemente o tipo de uso e ocupação do solo esperados, divide o município na seguintes macrozonas:

- Zonas residenciais (ZR);
- Zonas residenciais agrícolas (ZRA);
- Zonas de interesse turístico (ZIT);
- Zonas de expansão (ZE);
- Zonas especiais de preservação cultural (ZEP);
- Zonas de interesse ambiental e paisagístico (ZIAP);
- Zonas especiais de interesse social (ZEIS);
- Zona Industrial (ZI).

O mapa de zoneamento urbano do uso de solo do município de Maceió, anexo do Código de Urbanismo e Edificações, com destaque para a localização da Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo (BHRS), pode ser visto abaixo.

Figura 5: Zoneamento urbano do uso de solo do município de Maceió.



Fonte: Adaptado de MACEIÓ (2006).

Fora do zoneamento urbano descrito acima, algumas restrições ao uso e ocupação do solo devem ser levadas em conta ao analisar o Plano Diretor e o Código de Urbanismo. Essas zonas serão chamadas neste estudo de Zonas de Restrição à Ocupação (ZRO).

O Código de Urbanismo e Edificações determina que:

Art. 146. É vedado o parcelamento do solo urbano nas seguintes situações:

[...]

III – em glebas ou terrenos com declividade igual ou superior a 30% (trinta por cento), salvo se o empreendedor apresentar soluções técnicas que garantam a segurança contra deslizamentos de terra e erosão; [...] (MACEIÓ, 2006, p. 40).

Essa restrição também é exposta no item III do parágrafo único do art. 3º da Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, que estabelece:

Somente será admitido o parcelamento do solo para fins urbanos em zonas urbanas, de expansão urbana ou de urbanização específica, assim definidas pelo plano diretor ou aprovadas por lei municipal. (Redação dada pela Lei nº 9.785, de 1999)

Parágrafo único - Não será permitido o parcelamento do solo:

[...]

III – em terrenos com declividade igual ou superior a 30% (trinta por cento), salvo se

atendidas exigências específicas das autoridades competentes; [...] (BRASIL, 1979).

Já o Plano Diretor, quanto à chamada Macrozona de Restrição à Ocupação, define que:

Art. 129. A Macrozona de Restrição à Ocupação é constituída por:

[...]

III – nas encostas, áreas com declividade superior a 17° (dezesete graus) e inferior a 45° (quarenta e cinco graus) (MACEIÓ, 2005, p. 52).

Quanto às diretrizes de ocupação desta macrozona, o plano determina no Parágrafo 8º deste mesmo artigo:

§ 8º. São diretrizes para a Macrozona de Restrição à Ocupação nas encostas:

I – recuperação ambiental mediante reflorestamento das encostas;

II – recuperação das encostas degradadas por retirada de aterro e erosão pluvial;

III – estabelecimento de mecanismos de controle e fiscalização rigorosos das atividades extrativas;

IV – Zonas Especiais de Interesse Social nas áreas caracterizadas de acordo com o artigo 107 desta Lei;

V – programa de apoio à agricultura consorciada;

VI – projeto de contenção de encostas aliado à implantação de uma unidade de compostagem de lixo (MACEIÓ, 2005, p. 54).

Nos itens abaixo, são apresentadas as diretrizes dos zoneamentos, descritos no início deste item, que são encontrados na BHRS. Essas diretrizes foram retiradas de ambos os documentos e nortearam a caracterização do uso e cobertura de solo deste cenário, exposta na metodologia.

3.4.1.1. Zonas residenciais (ZRs)

O Código de Urbanismo e Edificações de Maceió divide a área urbana definida no Plano Diretor Municipal, e inserida nos limites do perímetro urbano, em nove Zonas Residenciais (ZR-1 a ZR-9). As peculiaridades de cada uma dessas zonas estão expostas a partir do Artigo 26 do documento.

No tocante à aplicação das normas de uso e ocupação de solo dentro dessas zonas, considera-se ainda uma classificação de usos que está exposta no Artigo 250 do Código de Urbanismo.

I – residencial, destinado à moradia de caráter permanente, unifamiliar, multifamiliar

ou coletivo, nas seguintes modalidades:

- a) Uso Residencial 1 (UR-1), quando na gleba ou no lote for implantada uma unidade residencial unifamiliar;
- b) Uso Residencial 2 (UR-2), quando na gleba ou no lote forem implantadas 2 (duas) unidades residenciais unifamiliares;
- c) Uso Residencial 3 (UR-3), quando na gleba ou lote for implantada uma vila, segundo as características que lhe são aplicáveis;
- d) Uso Residencial 4 (UR-4), quando na gleba ou no lote forem implantadas 3 (três) ou mais unidades residenciais de uso UR-1, e/ou 2 (duas) ou mais unidades de uso UR-5;
- e) Uso Residencial 5 (UR-5), quando na gleba ou lote for implantada 1 (uma) edificação multifamiliar com 3 (três) ou mais pavimentos.

II – comercial, destinado à comercialização de mercadorias;

III – de serviços, destinado à prestação de serviços e ao apoio às atividades comerciais e industriais [...] (MACEIÓ, 2006, p. 61).

Utilizando essas classificações, o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió determina diferentes padrões de ocupação, de taxa de permeabilidade, entre outras particularidades que também serão utilizados para caracterização. A Tabela abaixo, retirada do Código, é um exemplo destas.

Tabela 1: Parâmetros urbanísticos por zonas e corredores de atividades múltiplas para a Zona Residencial 2 (ZR-2).

Zonas	Usos	Taxa de Ocupação do Terreno Máxima	Altura Máxima da Edificação (nº pavtos)	Testada Mínima do Lote (m)	Área Mínima do Lote (m²)	Recuo Mínimo		Coeficiente de Aproveitamento do Terreno	Vagas de Estacionamento	
						Frontal (m)	Laterais/fundos(m)			
ZR-2	UR-1	90%	2	---	---	3,00	---	1,5	Espaço p/ guarda de 01 veículo (*)	
	UR-4	Para condomínios horizontais, aplicam-se os critérios definidos para o uso UR1; Para condomínios verticais, aplicam-se os critérios definidos para o uso UR5.								
	UR-3	70%	2	Ver art.408		---	---	1,5	Isenta	
	UR-5	60%	9	---	---	$R = 3 + \frac{n-2}{2}$	$R = 1,5 + \frac{n-2}{2}$	4,0	AC: - até 60m²: vagas para 30% das unidades. - acima de 60m²: 1 vaga p/ cada unidade.	
	Comercial, Serviços Industrial Grupos I, II e III	AC até 70m²: 90%	2 (*)	---	---	---	5,00	art. 473	3,5	Isenta
		AC até 300m²: 80%								1 vaga p/ cada 150m².
	Comercial, Serviços Industrial Grupos IV e V	AC acima de 300m²: 70%	70%	2 (*)	---	---	10	5	3,5	1 vaga p/ cada 100m²

Fonte: MACEIÓ (2006).

No seu Artigo 281, o Código de Urbanismo define também para estas mesmas zonas e

corredores uma taxa de permeabilidade mínima, dependente da área do lote, seguindo a regra abaixo:

Art. 281. Nas Zonas Urbanas e Corredores Urbanos previstos no Quadro 1 do ANEXO III desta Lei, a taxa de permeabilidade mínima para terrenos ou lotes será de :

I – para os terrenos ou lotes com área igual ou inferior a 1.200,00 m² (um mil e duzentos metros quadrados), os quais serão isentos dessa taxa;

II – 5% (cinco por cento), nos imóveis com área superior a 1.200,00 m² (um mil e duzentos metros quadrados) até 1.800,00 m² (um mil e oitocentos metros quadrados);

III – 10% (dez por cento), nos imóveis com área superior a 1.800,00 m² (um mil e oitocentos metros quadrados) até 2.400,00 m² (dois mil e quatrocentos metros quadrados);

IV – 15% (quinze por cento), nos imóveis com área superior a 2.400,00 m² (dois mil e quatrocentos metros quadrados) [...] (MACEIÓ, 2006, p. 66).

Outrossim, o código também considera em seu Art. 163:

Art. 163. Nos loteamentos será obrigatória a transferência ao Município de, no mínimo, 35% (trinta e cinco por cento) da área loteável da gleba a ser parcelada, destinadas a áreas públicas, sendo:

I – 20% (vinte por cento) destinados às vias públicas;

II – 10% (dez por cento) destinados às áreas livres de lazer;

III – 5% (cinco por cento) destinados à implantação de equipamentos comunitários. (MACEIÓ, 2006, p. 43).

3.4.1.2. Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico (ZIAPs)

Em seu Artigo 31, o Plano Diretor Municipal define as Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico (ZIAPs) como as “áreas de especial importância ambiental, em face de sua relevante contribuição para o equilíbrio ecológico.” (MACEIÓ, 2005). A primeira ZIAP no interior da BHRS seria a área destinada a mirantes, entretanto ambos os documentos não dão nenhuma diretriz em particular para esta.

Figura 6: Mirante localizado na área da Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo.



Fonte: Autor (2021).

Além disso, o Artigo 32, em seu inciso VII, estabelece:

Art. 32. Serão instituídas as seguintes Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico, dentro dos limites municipais:

[...]

VII – faixa de proteção de 30 m (trinta metros) de cada lado das margens dos cursos d'água (MACEIÓ, 2005, p. 20)

3.4.1.3. Zonas Especiais de Interesse Social (ZEISs)

Segundo o Plano Diretor de Maceió, as Zonas Especiais de Interesse Social (ZEISs) “serão constituídas nos locais [...] caracterizados como assentamentos precários”. No que se refere a essas áreas, o Plano informa:

Art. 104. Zonas Especiais de Interesse Social 1 (ZEIS 1) serão constituídas nos locais já ocupados por segmentos da população mencionados nos incisos I e II do artigo 96 desta Lei, caracterizados como assentamentos precários.

Parágrafo único. São passíveis de reassentamento para garantir a segurança de vida ou a preservação ambiental, as moradias nas seguintes localizações:

[...]

III – em áreas de grotas e encostas, com declividade superior a 45° (quarenta e cinco graus) (MACEIÓ, 2005, p. 43)

3.5. MODELOS HIDROLÓGICOS

Segundo Fletcher et al. (2013), muito do que se sabe sobre os efeitos de longo prazo da urbanização em processos hidrológicos deriva de conhecimentos obtidos através da aplicação de modelos hidrológicos. Em conjunto com práticas de monitoramento, esses modelos possibilitam a previsão dos efeitos que as alterações no uso e cobertura do solo, advindas do crescimento das cidades, causarão nas bacias hidrográficas.

O uso de modelos hidrológicos vem sendo bastante expandido em muitos trabalhos, possibilitando variadas aplicações no ramo da hidrologia urbana, tanto na previsão de cenários futuros para avaliação de impactos nesses ecossistemas, bem como na elaboração de projetos de estruturas de manejo de águas pluviais, seja para armazenamento ou para implementação de dispositivos de tratamento e de infiltração.

Segundo Rennó e Soares (2000 apud. COLLODEL, 2009), um modelo hidrológico auxilia no entendimento dos processos através de uma simulação simplificada da realidade. Na prática, busca-se estimar os efeitos combinados dos processos físicos envolvidos no ciclo hidrológico, isto é, que ocorrem durante uma chuva, ou seja, a própria chuva ou precipitação, a

interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial.

A escolha do modelo que será utilizado depende de alguns fatores, entre eles, o propósito da simulação, a variabilidade e disponibilidade dos dados, afinal alguns modelos requerem informações mais precisas, a tecnologia utilizada, e também o conhecimento do profissional (MAKSIMOVIC, 2001).

3.5.1. Modelos Hidrológicos Chuva-Vazão

Existem uma série de modelos matemáticos empregados atualmente para a tomada de decisão no gerenciamento de recursos hídricos, dentre eles, os modelos de transformação de chuva (ou precipitação) em vazão.

Os modelos precipitação-vazão representam matematicamente a parte do ciclo hidrológico compreendido entre a precipitação e a vazão. De acordo com Tucci (1998), os modelos precipitação-vazão devem ser capazes de “descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, e fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio”.

Sobre seus usos, Pinheiro (2009), citando Wagener et al. (2004), expõe a possibilidade de utilizar esses modelos para:

Avaliar estratégias de gerenciamento de recursos hídricos, a resposta de bacias hidrográficas a variações climáticas e no uso e ocupação do solo, para o cálculo de cheias de projeto, para previsão de cheias em tempo real e para fornecer condições de contorno para modelos de circulação atmosférica (PINHEIRO, 2009, p. 10 apud. WAGENER et al., 2004).

Em geral, o principal objetivo consiste em estimar séries hidrológicas mais longas e representativas de vazão usando como entrada séries contínuas de precipitação. Séries de precipitação são normalmente mais extensas em comparação com séries de vazão pois, como exposto por Barros (2013), “a mudança no cenário de ocupação do solo e a construção de estruturas hidráulicas são fatores que alteram a homogeneidade desta série de vazão”. Partindo então da precipitação, é possível estimar as vazões que não são conhecidas para os novos cenários existentes ou previstos para as bacias em estudo.

A estrutura de um modelo hidrológico chuva-vazão mora nos seguintes elementos (LOU, 2010; TUCCI, 1998 apud. BARROS, 2013):

- Discretização da Bacia Hidrográfica: Utilização de critérios de subdivisão espacial para representar a bacia. Em geral, os modelos adotam uma discretização concentrada, distribuída por sub-bacias ou distribuída por módulos;

- Variáveis Temporais de Entrada: Os modelos utilizam como variáveis de entrada geralmente a precipitação e a evapotranspiração potencial. No caso de modelos de calibração, a vazão também é uma variável de entrada. Já no caso de modelos de previsão, ela não está presente;
- Estrutura de Integração dos Processos: Os processos são integrados para representar o mecanismo chuva-vazão do ciclo hidrológico. Essa estrutura é separada em dois módulos: bacia (simula o balanço vertical dos fluxos, ou seja, a transformação de chuva em vazão nas sub-bacias ou módulos) e canal (propagação dessa vazão gerada gerado pelo primeiro módulo por toda a bacia simulando o escoamento em rios e canais definidos);
- Dados físicos da Bacia: Diante dos diferentes cenários de uso e cobertura do solo na bacia estudada, é necessário adquirir uma série de informações sobre esses dados físicos que serão inseridas no modelo na condição de parâmetros. Em alguns modelos, o uso de sistemas geográficos de informações (SIG), tem integrado a estrutura de entrada de alguns modelos (LOU, 2010).

3.5.2. Simulação de Séries Contínuas

Em detrimento à simulação de eventos de precipitação, muito comuns em hidrologia urbana, a simulação de séries contínuas em modelos hidrológicos chuva-vazão apresenta particularidades, em sua maioria benéficas, que serão apresentadas neste item. Este método será utilizado nas simulações do presente estudo.

Simular uma série contínua de longo prazo consiste em obter, por meio de séries de dados pluviométricos observados em uma bacia hidrográfica, uma série longa de vazão simulada. Em geral, essa forma de simulação apresenta como vantagem a consideração de “todos os processos hidrológicos que influenciam a geração do escoamento e o evento de inundação completo, incluindo os processos que o antecederam em toda a área da bacia hidrográfica” (FALTER et al., 2014 apud. SANTOS, 2018).

Boughton e Droop (2003) expõem que a simulação contínua não necessita de atribuição de tempo de retorno, intensidade e duração para a chuva, além de não ser necessário definir uma condição de umidade do solo anterior ao evento, fatores que preenchem lacunas da simulação de eventos.

3.6. STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM)

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo hidrológico dinâmico desenvolvido pela U.S. EPA - Environmental Protection Agency em 1971, mas desde lá vem sofrendo uma série de atualizações e aprimoramentos. Destaca-se por ser um pacote de domínio público, com uma grande comunidade de usuários pesquisadores pelo mundo, e por admitir a escolha do nível de detalhe pretendido (COLLODEL, 2009).

Dentre suas aplicações, o SWMM pode ser utilizado em sistemas de drenagem para controle de inundações, mapeamento de problemas em controle de inundação e qualidade da água, fontes de poluentes para estudos de redução, entre outros. Em particular, na hidrologia urbana, o SWMM trabalha com a precipitação variável no tempo, a evaporação, armazenamento em depressões, infiltração, percolação, troca de fluxo entre aquíferos e a rede de drenagem, entre outros mecanismos do ciclo hidrológico (ROSSMAN, 2010).

O modelo se encontra atualmente na sua quinta versão, o SWMM 5.0. Entre os aprimoramentos que fazem parte da evolução do modelo, podemos destacar a construção de aplicativos de integração deste com ambientes SIG (Sistemas de Informações Geográficas) ou CAD (*Computer Aided Design*), incluindo novas ferramentas de apresentação dos resultados gerados e maior capacidade do banco de dados (BASTOS, 2007). Esses aprimoramentos derivam do fato do SWMM ser de domínio público, o que permitiu que além da EPA outras empresas trabalhassem no desenvolvimento destes aplicativos.

Para a simulação do transporte hidráulico, regido pelas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, o SWMM disponibiliza ao usuário a opção de escolher três modelos:

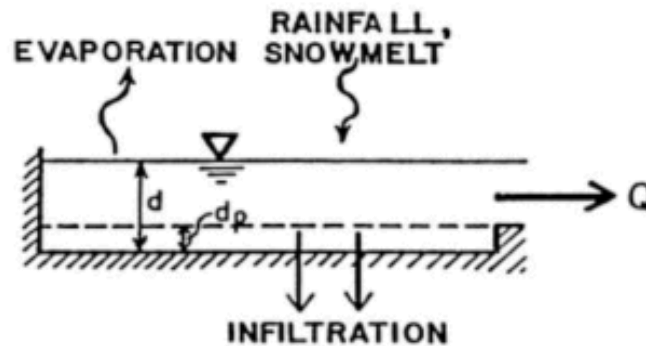
- Fluxo em Regime Uniforme;
- Onda Cinemática;
- Onda Dinâmica.

3.6.1. Módulo *Runoff*

O módulo hidrológico de simulação precipitação-vazão do modelo SWMM é chamado de *Runoff*. Ele é responsável por simular não só a quantidade mas também a qualidade das águas geradas na bacia através do fenômeno da chuva ali incidente. O módulo utiliza como dados de entrada por exemplo o hietograma de um evento e, a partir dele, simula os processos hidrológicos de infiltração nas áreas permeáveis, armazenamento em superfícies e escoamento superficial gerado na bacia e em canais (HUBER e DICKINSON, 1992).

No funcionamento do módulo, cada sub-bacia é interpretada como um reservatório não linear, expresso pela combinação da equação da continuidade com a equação de Manning. Elas recebem contribuição dos diferentes tipos de precipitação e de qualquer outra sub-bacia que esteja situada à montante, já os fluxos de saída são ocasionados pelos processos de infiltração, evaporação ou pelo escoamento superficial gerado. Só há escoamento superficial (Q) quando a profundidade da água excede o chamado valor máximo do armazenamento (d_p), que designa a capacidade dessa sub-bacia de armazenar água em suas depressões. Esse esquema foi exposto por Rossman (2010) na Figura 7.

Figura 7: Reservatório Não-Linear utilizado como forma de cálculo do escoamento superficial através do SWMM.



Fonte: ROSSMAN (2010).

Para cada sub-bacia, a equação da continuidade no modelo pode ser escrita como (BARROS, 2013):

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot P_{ef} - Q \quad (1)$$

onde V é o volume de água na sub-bacia, em m^3 , A é a área da superfície da sub-bacia, em m^2 , d é a profundidade da água armazenada na sub-bacia, em m, P_{ef} é a chuva efetiva, em m/s e Q é a vazão de saída, em m^3/s .

Combina-se esta equação com a equação de Manning para canais em movimento uniforme. Como as sub-bacias terão largura muito superior à profundidade, podemos assumir que o raio hidráulico é aproximadamente igual à profundidade ($R_h \approx y$), sendo a profundidade igual a $d - d_p$, como visto na Figura 7. Assim, podemos escrever a equação de Manning da seguinte forma:

$$Q = \frac{W \cdot (d - d_p)^{\frac{5}{3}}}{n} \cdot \sqrt{S} \quad (2)$$

onde, Q é a vazão de saída, em m^3/s , W é a largura do canal, em m , d é a lâmina d'água sobre a sub-bacia, em m , d_p é a profundidade do armazenamento, em m , n é o coeficiente de Manning, em $s \cdot m^{-1/3}$, S é a declividade de fundo do canal, em m/m .

Assim, podemos fazer a combinação entre as equações 1 e 2, obtendo:

$$A \frac{dd}{dt} = A \cdot P_{ef} - \frac{W \cdot (d - d_p)^{5/3}}{n} \cdot \sqrt{S} \Rightarrow \frac{dd}{dt} = P_{ef} - WCON \cdot (d - d_p)^{5/3} \quad (3)$$

sendo, $WCON = \frac{W \cdot \sqrt{S}}{A \cdot n}$, parcela chamada de largura característica do escoamento superficial (BARROS, 2013).

A equação acima é calculada a cada espaço de tempo, utilizando o método das diferenças finitas. O escoamento (Q) é calculado pela equação de Manning e a lâmina de água no reservatório (d) na sub-área é recalculada de forma contínua no tempo (t) mediante solução numérica do balanço hídrico na sub-bacia (ROSSMAN, 2010).

4. METODOLOGIA

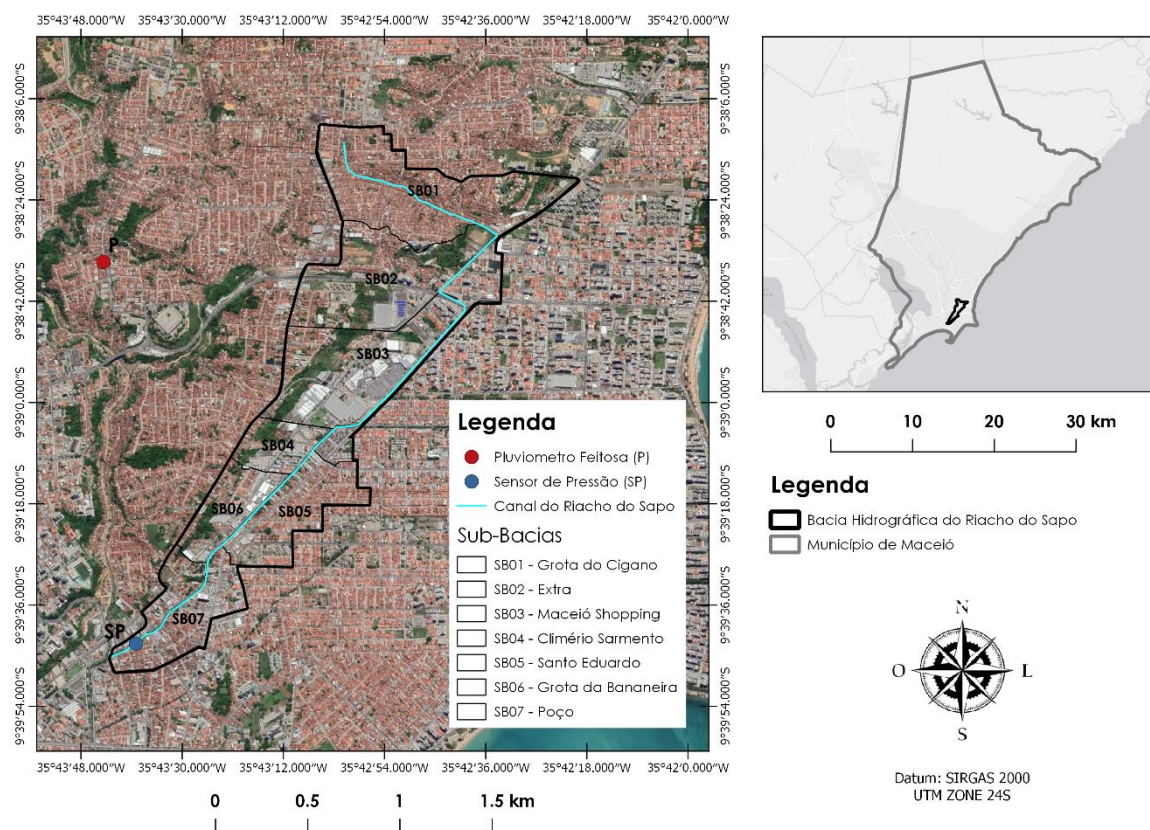
4.1. ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho utilizou como área de estudo a bacia hidrográfica do riacho do Sapo (BHRS), localizada em Maceió - AL. A BHRS é uma sub-bacia da bacia do riacho Reginaldo e está totalmente inserida no perímetro urbano do município, mais precisamente entre o tabuleiro costeiro e a planície costeira (Figura 8).

O principal curso d'água da bacia é o riacho do Sapo que possui 4,4 km de extensão, nasce no bairro do Jacintinho ($9^{\circ}38'14''\text{S}$ e $35^{\circ}43'01''\text{O}$), área do tabuleiro costeiro em um ponto com 65 m de cota, perpassando Mangabeiras e Jatiúca até desaguar no riacho Reginaldo ($9^{\circ}39'45''\text{S}$ e $35^{\circ}43'43''\text{O}$), no bairro do Poço. O riacho do Reginaldo então percorre aproximadamente 1 km até sua foz no mar (BARROS et al., 2020; AGRA, 2017).

Sua nascente está localizada em uma área densamente ocupada, em sua maioria por população de baixa renda, chamada de Grota do Cigano. A área de todo o tabuleiro costeiro, onde a Grota do Cigano está inserida, praticamente não possui esgotamento sanitário. Já a área de planície costeira possui um baixo índice de esgotamento sanitário, estimado em cerca de 63% (MACEIÓ, 2018). Por conseguinte, é possível observar grande contribuição de águas residuárias de forma indevida no canal, impactando também de forma visual já que este cruza partes de grande fluxo na cidade. Sendo assim, mesmo em períodos secos é possível observar a ocorrência de escoamento, inclusive já na cabeceira da bacia (SB1 - Sub-bacia 1: Grota do Cigano) (AGRA, 2017).

Figura 8: Mapa de localização da área de estudo, a bacia hidrográfica do riacho do Sapo (BHRS), expondo sua divisão em sub-bacias.



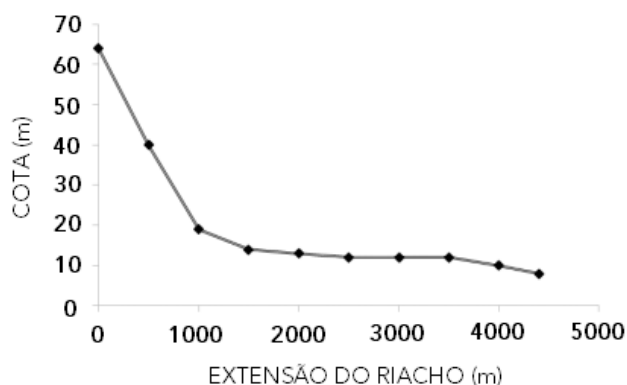
Fonte: Autor (2021).

Somada a problemática acima exposta, o riacho do Sapo também não comporta a demanda de escoamento necessária nas condições atuais da bacia. Assim, é possível ver alagamentos na região em dias de precipitação intensa.

A BHRS possui pequena área de drenagem (2,1 km²), 60 m de desnível entre a cabeceira e o exutório (Figura 9) e sua região de maior declividade (cerca de 4%) ocorre próximo à cabeceira, na região da Grota do Cigano. Nos outros trechos do canal, a declividade é baixa e a região é em sua maior parte composta por uma zona comercial, com presença de fábricas, concessionárias, shopping center e residências.

Com essas características, Agra (2017) afirma que a bacia possui aproximadamente 72% da sua área impermeabilizada, composta por pavimentos, cobertas e calçadas. Junto aos seus canais de drenagem retificados e com baixa resistência ao escoamento, essa condição de uso e ocupação do solo colabora para que a bacia possua resposta hidrológica rápida, com tempo de concentração da bacia igual a 85 min (VIDAL, 2012).

Figura 9: Perfil longitudinal de todo o trecho da bacia do Riacho do Sapo.



Fonte: Adaptado de AGRA (2017).

4.2. DADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO

Os dados relacionados à precipitação na área de estudo foram obtidos através de um pluviômetro de báscula da Hydrological Services modelo TB4, com resolução correspondente a 0,20 mm, localizado no bairro do Feitosa ($9^{\circ}38'35''S$ e $35^{\circ}43'44''O$), distante cerca de 1,5 km da área de estudo descrita no item acima.

O pluviômetro em questão foi instalado em março/2014, sendo o primeiro registro de chuva na data 29/03/2014, portanto utilizou-se para esse trabalho os dados das precipitações ocorridas no período desta data até 30/04/2021. Esses dados foram tratados de forma a gerar uma série discretizada a intervalos de 5 minutos, como feito por Barros et al. (2020).

Os dados de evaporação média diária foram obtidos através da plataforma HIDROWEB da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (ANA, 2021). Esses dados provêm da estação climatológica Maceió, de código 935004, localizada no bairro do Tabuleiro ($9^{\circ}33'3.960''S$ e $35^{\circ}46'12''O$). A série compreende o período entre 1925 e 1978 e, embora seja uma série antiga, compreende um período razoável de tempo.

4.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SWMM PARA OS CENÁRIOS DE ESTUDO

Os parâmetros necessários para a simulação hidrológica no SWMM estão sintetizados na Tabela 2. Após, serão expostos os métodos usados para obtenção de cada um deles.

Tabela 2: Síntese dos parâmetros requeridos para a simulação hidrológica no SWMM.

GRUPO	PARÂMETRO	UNID.
Características Físicas	Área (A)	ha
	Declividade (S)	m
	Largura (W)	%
Tipo do Uso e Cobertura do Solo	Percent. Área Impermeável (%AI)	%
	Percent. Área Impermeável S/ Armazenamento	%
	Coef. Rugosidade - Superfície Impermeável (n_i)	-
	Coef. Rugosidade - Superfície Permeável (n_p)	-
	Prof. de Armazenamento - Sup. Impermeável (d_i)	mm
	Prof. de Armazenamento - Sup. Permeável (d_p)	mm
Método de Infiltração	<i>Curve Number</i> (CN) (Método SCS)	-

Fonte: Autor (2021).

4.3.1. Características Físicas

Os parâmetros “Área” e “Declividade” foram analisados por Barros et al. (2020) através de um Modelo Digital de Elevação (MDE) construído com base nas curvas de nível da região espaçadas a cada metro. Já o parâmetro “Largura” foi obtido por meio da razão entre a área e o comprimento máximo do escoamento superficial nas sub-bacias (HUBER; DICKINSON, 1992).

4.3.2. Percentual de Área Impermeável (%AI)

O percentual de área impermeável (%AI) pode ser medido em campo ou através de fotografias aéreas e representa a parcela de área impermeabilizada diretamente conectada (AIDC) (HUBER; DICKINSON, 1992). Caso não seja possível obter esse parâmetro através das duas técnicas acima, Gironás et al. (2009) descreve a utilização do coeficiente de escoamento do método racional (C) como uma aproximação do percentual de área impermeável. Assim, calcula-se o %AI através da ponderação dos coeficientes de escoamento (C_i), adotados para as categorias de cobertura do solo, pela área (A_i) (Equação 4) (BARROS, 2015).

$$I = \frac{\sum C_i \cdot A_i}{\sum A_i} \cdot 100 \quad (4)$$

Os coeficientes de escoamento (C) para cada tipo de uso e cobertura de solo estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes de escoamento (C) para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo.

Cobertura do solo	C
Solo exposto	0,10
Floresta	0,10
Espaço relvado	0,10
Comércio	0,66
Indústria	0,66
Residência	0,80
Edifício	0,75
Estacionamento	0,78
Asfalto	0,78
Paralelepípedo	0,78
Estrada de terra	0,78

Fonte: GAROTTI e BARBASSA (2010).

Para o percentual de área impermeável sem armazenamento, foi adotado um percentual de 25%, seguindo recomendação de Gironás et al. (2009). Isso se dá devido à falta de informação que possibilite estimar este parâmetro de forma mais específica para a área de estudo (BARROS, 2015).

4.3.3. Coeficiente de Rugosidade (n) e Profundidade de Armazenamento (d)

O coeficiente de rugosidade (n) é uma medida da resistência que o escoamento superficial encontrará ao tentar se propagar na superfície da bacia. O SWMM utiliza a equação de Manning no processo de propagação da precipitação efetiva, portanto é preciso inserir um coeficiente de rugosidade médio tanto para a superfície impermeável (n_i) como também para a superfície permeável (n_p) (ROSSMAN, 2010).

Já a profundidade de armazenamento (d) representa a lâmina d'água total que deve ser armazenada no solo para que o volume precipitado passe a somar diretamente na geração do escoamento superficial (ROSSMAN, 2010). Esse parâmetro também é estimado tanto para a área impermeável (d_i) como para a área permeável (d_p).

Para esses parâmetros, foram utilizados os valores estimados por Barros et al. (2020) utilizando as recomendações de Gironás et al. (2009), expostos na Tabela 4.

Tabela 4: Valores recomendados por Gironás et al. (2009) para o Coeficiente de Rugosidade (n) e a Profundidade de Armazenamento (d).

Parâmetro	Valor
Coef. Rugosidade - Superfície Impermeável	0,015
Coef. Rugosidade - Superfície Permeável	0,24
Prof. de Armazenamento - Sup. Impermeável	1,5 mm
Prof. de Armazenamento - Sup. Permeável	7,6 mm

Fonte: Autor (2021).

4.3.4. Métodos de Infiltração

No tocante aos métodos de infiltração, o SWMM permite o uso de três diferentes: o método SCS (USDA, 1956), o método de Horton e o método de Green-Ampt (ROSSMAN, 2010). Foram utilizados para todos os cenários deste estudo o método SCS.

4.3.4.1. Parâmetros do Método SCS

O método SCS possibilita estimar o volume de escoamento superficial e a magnitude da vazão de pico para um determinado evento de precipitação em pequenas bacias hidrográficas agrícolas, florestais e urbanas (USDA, 1956). O método SCS precisa apenas de um parâmetro, o *Curve Number* (CN). Para estimar o CN, precisa-se levar em conta o uso e cobertura do solo da bacia, sua condição de umidade e o grupo hidrológico.

O tipo de uso e cobertura do solo de todas as sub-bacias serão obtidos, para todos os cenários, através do procedimento de caracterização descrito no item 4.4. Já a condição de umidade será tomada como a condição média (AMC II), cenário em que corresponde à capacidade de campo do solo.

A avaliação dos solos (Figura 10) foi definida com base nos grupos hidrológicos do solo e nos tipos permeáveis de cobertura observados na bacia, considerando o levantamento detalhado dos solos de Maceió (EMBRAPA, 2005), denotando como pertencentes ao grupo hidrológico A as areias quartzosas (AQ), enquanto foram classificados como pertencentes ao grupo hidrológico C os latossolos amarelos (LA) e argissolos amarelos (PA) (USDA, 1986).

Figura 10: Classificação hidrológica dos solos da Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo seguindo o levantamento detalhado dos solos de Maceió (EMBRAPA, 2005).



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 5 mostra os tipos de uso e cobertura do solo usados neste trabalho junto aos seus respectivos valores para o *Curve Number* (CN), dependendo de como ele está classificado quanto ao grupo hidrológico (Grupo A ou Grupo C).

Tabela 5: Valores do *Curve Number* (CN) para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo.

Cobertura do solo	CN Referência	
	Tipo de solo	
	A	C
Solo exposto	54	80
Floresta	35	74
Espaço relvado	44	77
Comércio	89	94
Indústria	81	91
Residência	77	90
Edifício	61	83
Estacionamento	98	98
Asfalto	98	98
Paralelepípedo	76	89
Estrada de terra	72	87

Fonte: Adaptado de USDA (1986).

Utilizando a tabela acima, o valor médio para o CN de cada sub-bacia será calculado através de média ponderada pela área (A_i) do CN de cada tipo de uso e cobertura do solo junto ao respectivo grupo hidrológico do solo (CNi) por meio da Equação 5.

$$CN = \frac{\sum CN_i \cdot A_i}{A} \quad (5)$$

4.4. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DO SOLO

De forma a analisar a influência de diferentes frações de área permeável na geração do escoamento superficial, foram definidos dois cenários de intervenção para a Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo (BHRS), além do cenário atual de referência.

Dois parâmetros serão influenciados pela alteração entre os cenários:

- Percentual de Áreas Impermeáveis (%AI): Como exposto no item 4.3.2., foi utilizado o coeficiente de escoamento do método racional (C) para estimá-lo. Esse coeficiente depende do uso e cobertura do solo da área de estudo;
- *Curve Number* (CN): Como visto no item 4.3.4.1., o CN depende diretamente também do uso e cobertura do solo, sendo o principal parâmetro do método de infiltração escolhido, o método SCS.

A caracterização desses cenários está descrita nos itens a seguir.

4.4.1. Cenário 1: Cenário de Referência

O cenário de referência busca aproximar com a maior precisão possível o cenário atual de uso e ocupação de solo da bacia do Riacho do Sapo. Este cenário foi usado para a calibração do modelo visto que, já que representa a situação atual da bacia, possibilita a comparação real entre valores estimados e valores monitorados em campo.

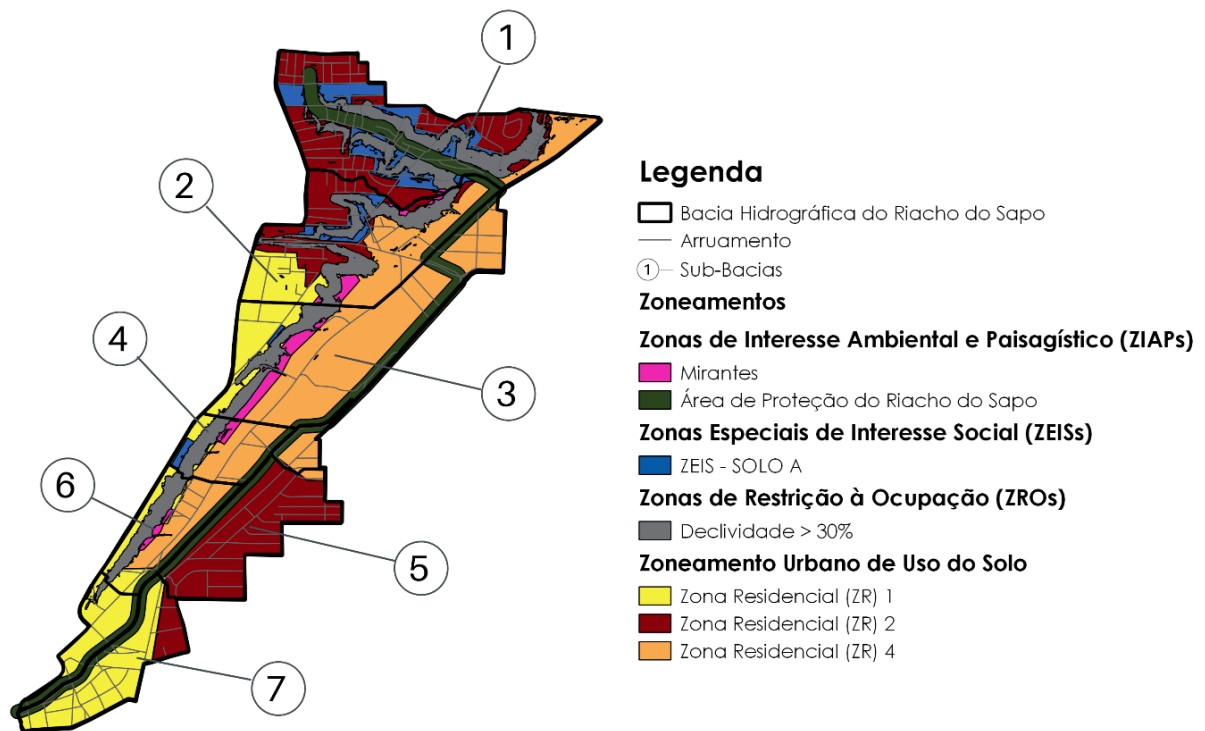
A caracterização do uso e cobertura do solo para o cenário de referência da BHRS foi feita por Barros et al. (2020). As áreas de cada tipo de uso e ocupação do solo, discretizado por sub-bacia, adotada para este cenário podem ser consultadas no Anexo A.

4.4.2. Cenário 2: Diretrizes do Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió

Nesse cenário, foi feita a caracterização do parcelamento do solo da bacia hidrográfica do riacho do Sapo conforme as diretrizes propostas pelo Plano Diretor de Maceió (MACEIÓ, 2005) e pelo Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (MACEIÓ, 2006). Supôs-se um cenário onde fossem aplicadas estas intervenções ao uso e ocupação do solo atual da bacia. Todas as diretrizes levadas em conta nesta caracterização foram destrinchadas no item 3.4.1.

De posse delas, foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a obtenção das áreas dos diferentes tipos de zoneamento preconizados por ambos os documentos. A Figura 11 mostra a delimitação de todos os zoneamentos levados em conta nesta caracterização.

Figura 11: Delimitação das diretrizes expostas no Plano Diretor e no Código de Urbanismo na região da BHRS.



Fonte: Autor (2021).

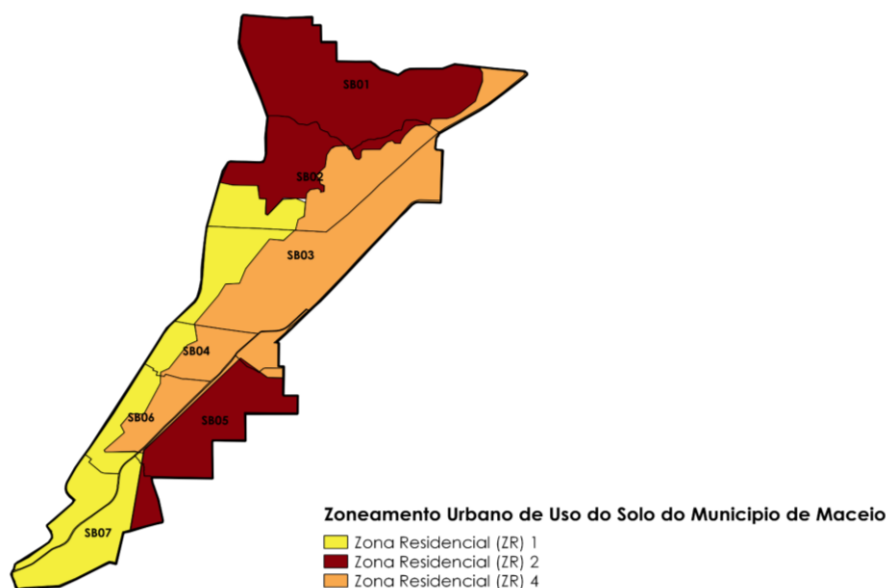
Os itens abaixo descrevem os métodos utilizados para a delimitação de cada tipo de zoneamento e diretriz aplicada à bacia. No Anexo B, encontram-se todos os resultados da caracterização como a área por zoneamento, o padrão de ocupação estabelecido para cada zoneamento e a síntese final das áreas por cada tipo de ocupação de solo. Essas informações estarão divididas por sub-bacia

4.4.2.1. Zoneamento Urbano de Uso do Solo

Utilizando o mapa de zoneamento urbano de uso do solo (Figura 5), disponível no Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (MACEIÓ, 2006), vemos que a BHRS abrange três diferentes zonas: as zonas residenciais ZR-1, ZR-2 e ZR-4.

Através de um SIG, essas áreas foram delimitadas e o resultado desse parcelamento está exposto na figura abaixo.

Figura 12: Zoneamento Urbano de Uso do Solo do Município de Maceió na região da BHRS.



Fonte: Autor (2021); MACEIÓ (2006).

Como esse cenário se trata de intervir sobre o cenário atual com as diretrizes do Plano Diretor e do Código de Urbanismo, foram utilizados como base o padrão de uso e ocupação do solo atualmente observados na bacia, para assim estimar a porcentagem de cada um deles.

Devido à necessidade de repassar 35% dessas áreas ao Município (Art. 163 do Código de Urbanismo, exposto no item 3.4.1.1. do presente trabalho), essas zonas foram inicialmente divididas em três partes:

- ZRP (65% da área da zona): Parcela “privada” da Zona Residencial, onde estão construídas as edificações;
- ZRV (20% da área da zona): Parcela destinada às vias públicas da Zona Residencial;
- ZRA (15% da área da zona): Junção da parcela destinada às áreas livres de lazer e para a instalação de equipamentos comunitários na Zona Residencial.

Dentro das chamadas ZRPs, é necessário levar em consideração os diferentes usos possíveis para cada tipo de zona residencial (ZR-1, ZR-2 ou ZR-4). Assim, em cima da porcentagem de área de cada sub-bacia ocupada por alguma UR, é necessário também incidir sobre esta a taxa de ocupação de terreno máxima (Tabela 1).

Por exemplo, para a Zona Residencial 1 (ZR-1), temos como parte do exposto na Tabela 1:

Tabela 6: Taxa de Ocupação do Terreno Máxima para os usos da Zona Residencial 1 (ZR-1).

Zonas	Usos	Taxa de Ocupação do Terreno Máxima	Altura Máxima da Edificação (nº pavtos)
ZR-1	UR-1	90%	2
	UR-3	70%	2
	UR-4/UR-5	60%	4
	Comercial Serviços Industrial Grupos I e II	AC até 70m ² : 90% AC até 300m ² : 80%	2 ^(*)

Fonte: MACEIÓ (2006).

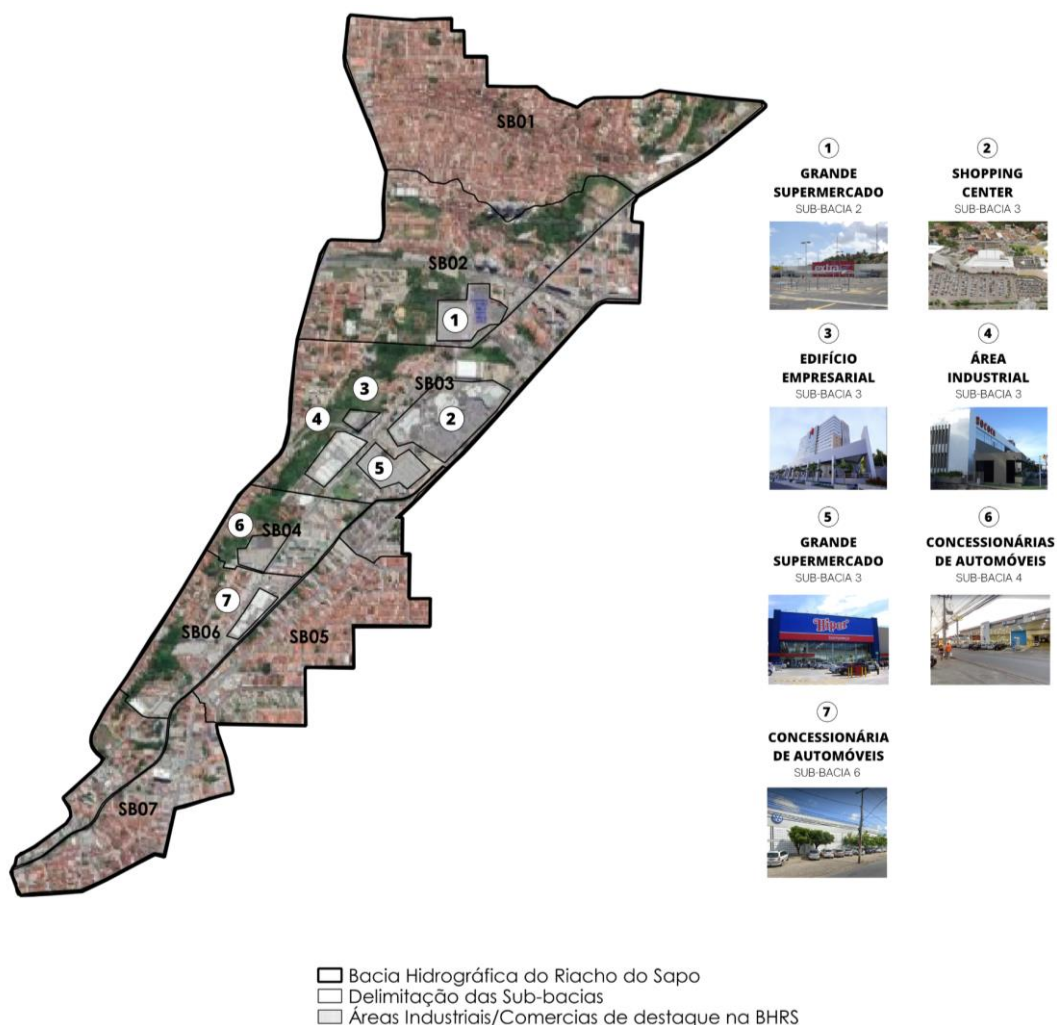
Assim, as residências unifamiliares foram encaixadas como UR-1 e UR-3, assumindo para todas uma Taxa de Ocupação do Terreno Máxima (TOTM) de 80% (média entre 90% e 70%). Os edifícios desta zona terão 60% de ocupação do terreno máxima e os serviços comerciais e industriais 90% ou 80% dependendo da área construída. Portanto, o percentual de área de Edifícios da Zona Residencial 1 (ZR-1) na sub-bacia X (SB - X) será:

$$\% \text{ Área de Edifícios - SB - X (ZR-1)} = \text{TOTM} * \% \text{ Área de Edifícios na SB - X atual} \quad (6)$$

onde, no caso de Edifícios a Taxa de Ocupação de Terreno Máxima (TOTM) seria de 60%.

Esses padrões de ocupação variam entre as sub-bacias, portanto neste item, ainda é necessário analisar as particularidades de cada uma delas, ou seja, embora diferentes bacias tenham áreas para a mesma Zona Residencial, a porcentagem de ocupação do solo por cada tipo de uso pode ser diferente devido à presença de mais residências ou menos residências, em comparação às áreas industriais/comerciais. A Figura 13 mostra as maiores áreas industriais/comerciais observadas na BHRS.

Figura 13: Principais áreas industriais/comerciais localizadas na Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo.

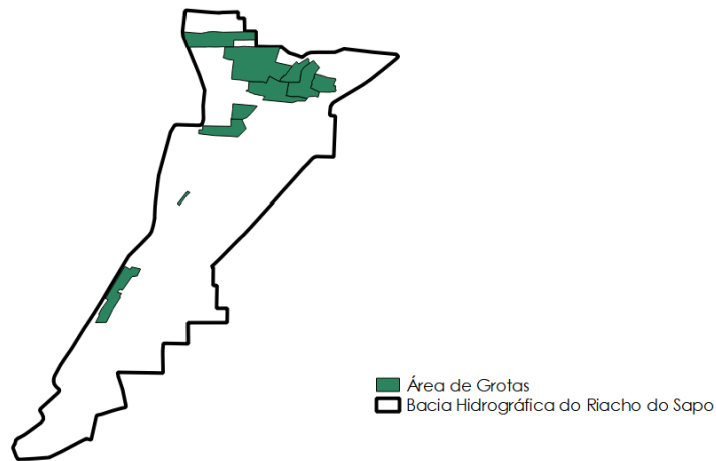


Fonte: Autor (2021).

4.4.2.2. Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS)

O parcelamento das Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS) localizadas dentro da BHRS foi feito utilizando como base o levantamento das grotas de de Maceió realizado pelo IBGE e pelo projeto Vida Nova nas Grotas, ambos disponibilizados pela Secretaria do Estado de Planejamento, Gestão e Patrimônio – SEPLAG/AL (ALAGOAS, 2021).

Figura 14: Zonas Especiais de Interesse Social na região da BHRS.

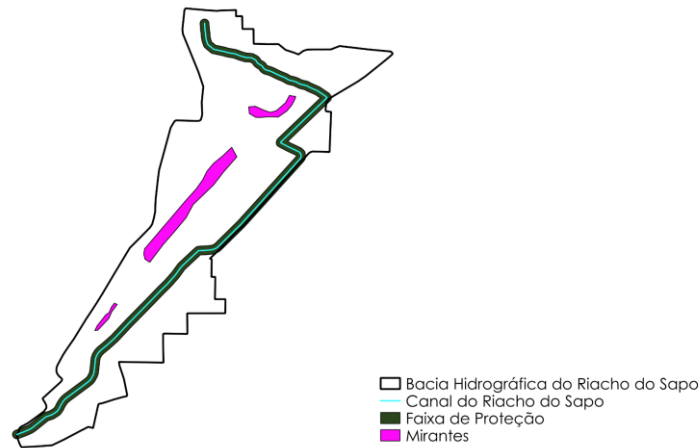


Fonte: Autor (2021); ALAGOAS (2021).

4.4.2.3. Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico (ZIAP)

A área da BHRS possui apenas dois tipos de Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico (ZIAPs), segundo o Plano Diretor do município (MACEIÓ, 2005). A primeira área é reservada para mirantes. Além dos mirantes, às margens de rios, riachos e córregos deve haver uma faixa de proteção de 30 m em cada lado, que foi instituída ao longo do canal do Riacho do Sapo. O zoneamento está mostrado na Figura 15.

Figura 15: Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico na região da BHRS.



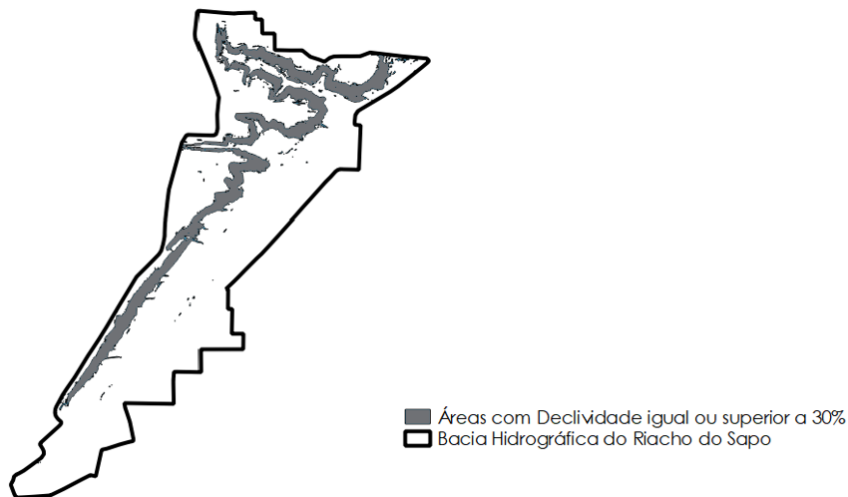
Fonte: Autor (2021); MACEIÓ (2005).

4.4.2.4. Zonas de Restrição à Ocupação (ZRO)

Como visto no item 3.4.1., as cidades também apresentam algumas zonas de ocupação/parcelamento do solo restrito. A restrição à ocupação delas advém da declividade do terreno. A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir da base cartográfica de Maceió, é possível delimitar a região que não pode ser ocupada por conta da declividade.

Sendo assim, as zonas da BHRS com declividade igual ou superior a 30% estão expostas na figura abaixo.

Figura 16: Zonas de ocupação/parcelamento do solo restrito na região da BHRS.



Fonte: Autor (2021).

4.4.3. Cenário 3: Intervenções no cenário do Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió

Para este cenário, foram planejadas duas intervenções ao cenário 2. Essas intervenções buscam aumentar a área permeável da BHRS e conseqüentemente diminuir a geração do escoamento superficial em relação aos dois cenários de estudo já apresentados.

Embora designe uma taxa de ocupação do terreno máxima, como visto na Tabela 6, o Plano Diretor e o Código de Urbanismo não especificam que a área não ocupada deve ser necessariamente permeável. Assim, o cenário 2 leva em conta que esta área pode ser pavimentada com paralelepípedos, por exemplo (Ver Anexo B).

A prefeitura de Curitiba, na Lei Nº 9800 de 29 de março de 2000, que dispõe sobre o zoneamento, uso e ocupação do solo do município, estabelece uma área permeável mínima para as zonas residenciais, conforme pode ser visto no quadro abaixo (CURITIBA, 2000).

Tabela 7: Parâmetros de uso e ocupação do solo da Zona Residencial 1 (ZR-1) no município de Curitiba.

QUADRO III
ZONA RESIDENCIAL 1 – ZR-1
PARÂMETROS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

USOS			OCUPAÇÃO							
PERMITIDOS	TOLERADOS	PERMISSÍVEIS	PORTE (m²)	COEFIC. APROV.	TAXA OCUP. MÁX. (%)	ALTURA MÁXIMA (PAV.)	RECULO MÍN. ALIN. PREDIAL (m)	TAXA PERMEAB. MÍN. (%)	AFAST. DAS DIVISAS (m)	LOTE MÍN. (Tejado x Área)
- Habitação Unifamiliar (1)										
- Habitações Unifamiliares em Série (2)				1	50%	2	5m	25%	-	15/600
- Comércio e Serviço Vicinal 1 (3)			100m²	-	-	-	-	-	-	-
	- Indústria Tipo 1 (4)		100m²	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: CURITIBA (2000).

Devido a ausência desse direcionamento no município de Maceió, o cenário 3 estabeleceu que 50% da área não ocupada nos terrenos deve ser obrigatoriamente permeável.

Além disso, como visto no item 3.4.1.1., estabelece-se para as zonas residenciais no Plano Diretor e no Código de Urbanismo uma porcentagem de 15% dedicada à implantação de áreas livres de lazer (10%) e equipamentos comunitários (5%). No cenário 3, adotou-se 20% para esta porcentagem dedicada ao município.

Com essas considerações, foi estabelecido o padrão de uso e ocupação de solo da BHRS para este cenário fictício. Esse padrão pode ser visto no Anexo C.

4.5. MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRÁULICA

Como já visto na Figura 8, para a modelagem hidrológica no SWMM foi considerada a subdivisão da bacia em 7 sub-bacias (SB) que foram definidas com base na microdrenagem e fisiografia da região.

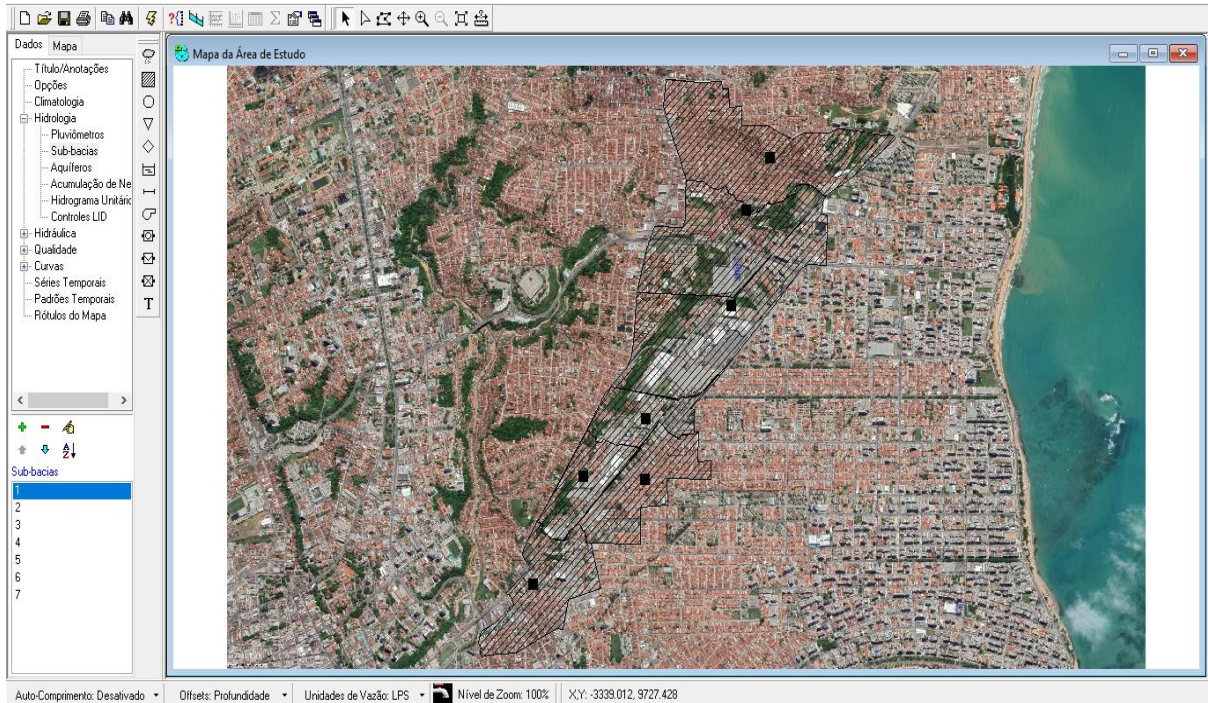
Assim como Barros et al. (2020), a simulação do transporte hidráulico no SWMM para esse estudo utilizou o método da onda dinâmica considerando a divisão do canal do Riacho do Sapo em 15 condutos e 16 nós. Já o formato e o desnível dos condutos foram obtidos através da análise topográfica do canal. O coeficiente de rugosidade de Manning foi utilizado como sendo 0,035 para os condutos abertos e 0,045 para os condutos fechados.

4.5.1. Inserção das informações no SWMM

Utilizando uma imagem de fundo da área de estudo como base, é possível traçar a subdivisão da BHRS utilizando a ferramenta “SUB-BACIA” do SWMM. Após o seu lançamento, é possível lançar todos os parâmetros de cada uma através do editor de

propriedades. Nele, também selecionamos o método de infiltração desejado, no caso, o método SCS.

Figura 17: Interface do SWMM mostrando a marcação de todas as sub-bacias na área de estudo.

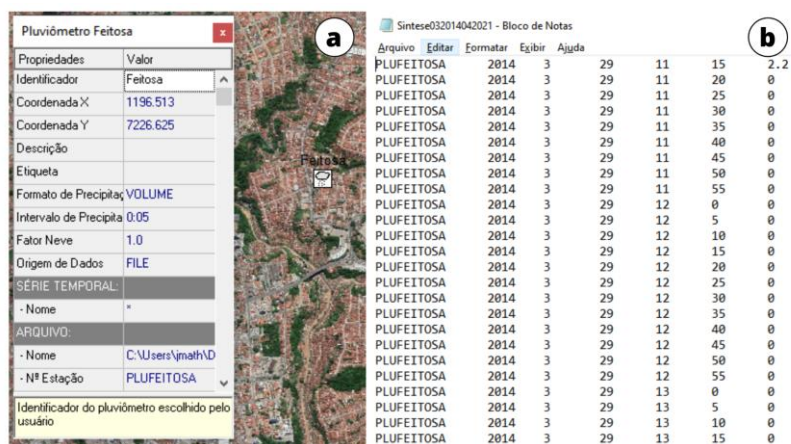


Fonte: Autor (2021).

A inserção dos dados de precipitação é feita através da função “PLUVIÔMETRO”. Nela selecionamos o local do arquivo, no formato .dat, que contém a série contínua que usaremos nas simulações. As informações no arquivo .dat seguem a ordem a seguir: Nome do Pluviômetro - Ano - Mês - Dia - Hora - Minuto - Precipitação (mm) (Figura 18).

Segundo o manual do modelo, de forma ideal essa série deve ser discretizada temporalmente em intervalos de um a cinco minutos (ROCHA, 2019). A série utilizada possui discretização temporal de cinco minutos como exposto no item 4.2.

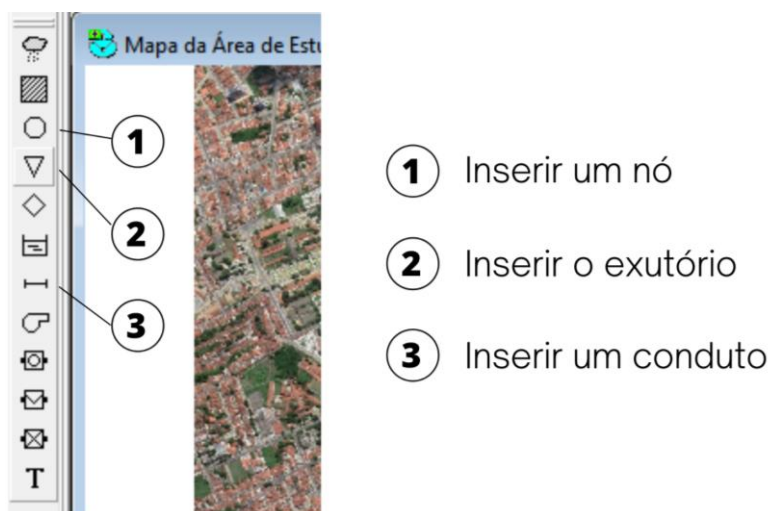
Figura 18: Função “Pluviômetro” do SWMM e suas propriedades (a) e arquivo .dat usado para inserção dos dados de precipitação (b).



Fonte: Autor (2021).

Passa-se então para o lançamento dos nós e condutos que formarão o canal do Riacho do Sapo, além do seu exutório. Essas funções são encontradas na barra de ferramentas laterais do SWMM e estão indicadas na Figura 19.

Figura 19: Funções “Nó”, “Exutório” e “Conduto” do SWMM.



Fonte: Autor (2021).

Com isso, a bacia estará totalmente lançada e parametrizada no modelo. O resultado final desse processo pode ser visto abaixo.

Figura 20: Parametrização da BHRS no SWMM.



Fonte: Autor (2021).

4.5.2. Calibração

Para calibração, foram levados os parâmetros expostos na Tabela 2, obtidos por Barros et al. (2020) para a bacia em seu cenário atual de uso e ocupação do solo. Como mencionado no item 4.3.4., o método de infiltração usado neste estudo será o método SCS, através do *Curve Number* (CN).

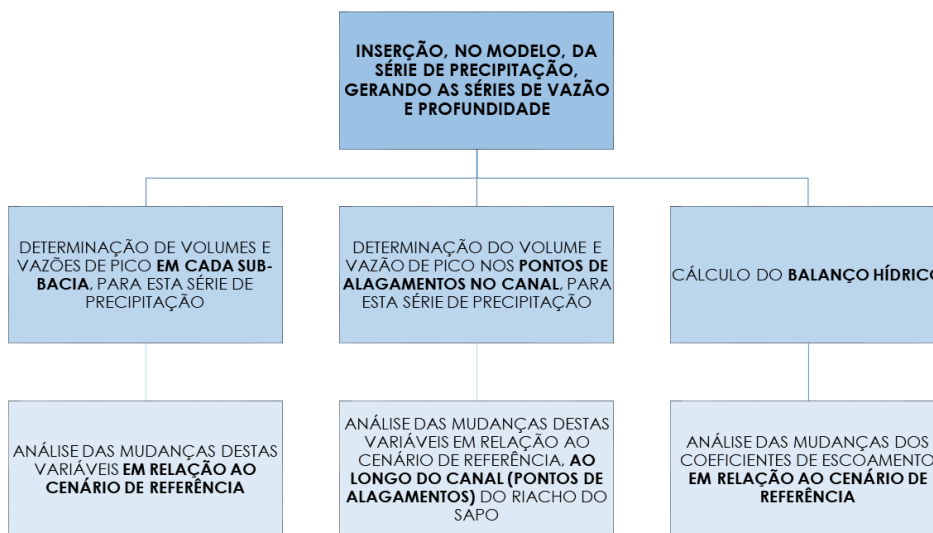
Os dados monitorados na bacia datam do dia 30/04/2014 ao dia 12/05/2014 e foram obtidos através de um sensor de pressão cuja localização pode ser vista na Figura 8. Com esses dados foi possível o ajuste dos parâmetros para que representassem com a maior fidelidade possível os dados estimados.

Para mensurar a eficiência da calibração foram utilizados os coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2) e de Nash e Sutcliffe (NSE).

4.5.3. Simulação hidrológica e análise dos resultados

Para cada cenário definido, foi realizada uma simulação precipitação-vazão utilizando o SWMM. Essas simulações e análises seguirão o escopo apresentado na Figura 21.

Figura 21: Fluxograma do processo de simulação e análise dos resultados para os cenários de fração de área permeável definidos.



Fonte: Autor (2021).

Com a inserção da caracterização da bacia e dos dados de precipitação, procede-se à simulação no SWMM. Obtém-se como resultado séries de vazão geradas em cada sub-bacia e em outros pontos desejados no canal, como o exutório, por exemplo, e também séries de profundidade em vários pontos no canal, todas com intervalo de tempo de simulação de cinco minutos correspondendo a discretização temporal dos dados de entrada.

Mediante os resultados das simulações realizadas, é possível comparar o efeito global na geração de escoamento superficial e na profundidade quando se é alterado o uso e ocupação do solo nas sub-bacias devido à implantação das diretrizes do Plano Diretor e Código de Urbanismo e Edificações de Maceió. Essa comparação também foi feita para pontos específicos ao longo do canal, que se caracterizam como pontos de alagamento, como também no exutório da bacia.

4.5.3.1. Balanço hídrico

O balanço hídrico pode ser entendido como a contabilização das entradas e saídas de água em um determinado sistema. Sabemos que, para o ciclo de processos hidrológicos presentes neste estudo, a entrada de água no nosso sistema se deve em sua totalidade à

precipitação na sub-bacia. Já a saída, é dada na forma de infiltração, evaporação ou na geração de escoamento superficial. Para os fins deste trabalho, a análise do balanço hídrico consistirá no cálculo do coeficiente de escoamento.

O coeficiente de escoamento foi calculado através dos valores simulados tanto para a série completa como anualmente. Esse indicador permite mensurar o quanto do volume precipitado efetivamente se transformou em escoamento superficial tanto para cada sub-bacia como também no exutório da bacia. Espera-se que condições mais impermeáveis produzam coeficientes de escoamento maiores, pois haverá mais água escoada nas superfícies. O cálculo do coeficiente é feito através da razão entre todo o volume escoado por todo o volume precipitado, da forma expressa abaixo.

$$\text{Coeficiente de Escoamento (\%)} = 100 * \frac{\text{Volume de escoamento superficial}}{\text{Volume total de precipitação}} \quad (7)$$

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO NO SWMM

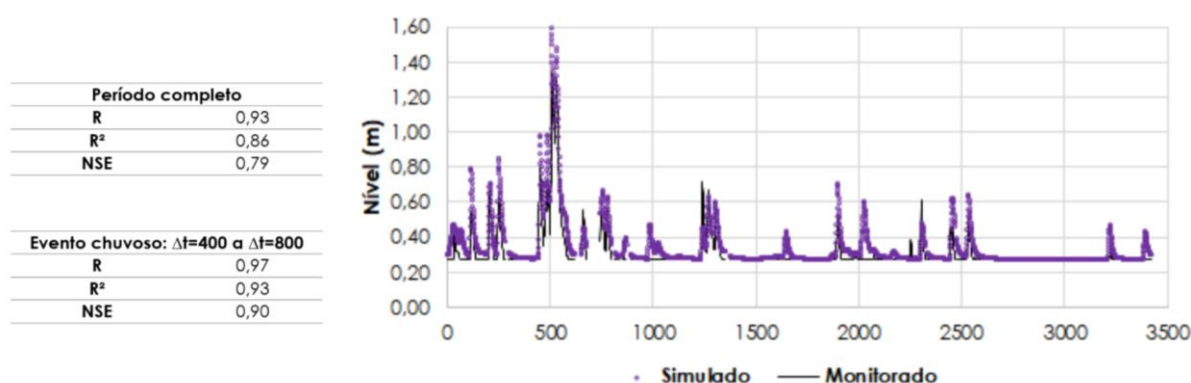
A calibração do modelo resultou nos parâmetros expostos na Tabela 8. Quanto ao método de infiltração, foram utilizados para calibração os valores de CN do cenário de referência, pois retrata a condição atual da bacia, possibilitando a comparação com os valores monitorados. O processo seguiu o mesmo fluxo de Barros et al. (2020), onde foi feita uma redução de 10% nos valores calculados de percentual de área impermeável (%AI), como exposto no item 5.1. Assim foi possível obter valores satisfatórios para as estatísticas da simulação ($R = 0,93$; $R^2 = 0,86$ e $NSE = 0,79$, no período completo e $R = 0,97$; $R^2 = 0,93$ e $NSE = 0,90$, para o evento chuvoso detectado neste período) (Figura 22).

Tabela 8: Parâmetros calibrados do modelo no SWMM.

SB	A (ha)	W (m)	S (%)	ni	np	Di (mm)	Dp (mm)	CN	%AI (%)
1	47,9	690	24,1	0,015	0,24	1,5	7,6	87,62	63,80
2	39,2	636	16,5	0,015	0,24	1,5	7,6	83,61	43,92
3	46,9	705	8,5	0,015	0,24	1,5	7,6	84,38	54,04
4	14,1	391	10,9	0,015	0,24	1,5	7,6	77,54	51,04
5	22,3	512	1,2	0,015	0,24	1,5	7,6	76,54	62,20
6	14,5	281	15,0	0,015	0,24	1,5	7,6	81,84	52,15
7	25,0	417	2,2	0,015	0,24	1,5	7,6	81,04	60,14

Fonte: Adaptado de Barros et al. (2020).

Figura 22: Resultados da calibração do modelo com os parâmetros do cenário de referência da BHRS.



Fonte: Barros et al. (2020).

5.2. PARAMETRIZAÇÃO DOS CENÁRIOS

Seguindo o exposto no item 4.3, foram definidos os parâmetros gerais de entrada para o SWMM. Dentre todos os citados, apenas o percentual de área impermeável (%AI) e o *Curve Number* (CN) serão diferentes para cada cenário proposto, sendo os demais dependentes unicamente de características da BHRS. Embora já tenham sido expostos, a Tabela 9 isola esses parâmetros que são comuns a todos os cenários propostos.

Tabela 9: Parâmetros de entrada do SWMM comuns a todos os cenários propostos.

SB	A (ha)	W (m)	S (%)	ni	np	Di (mm)	Dp (mm)
1	47,9	690	24,1	0,015	0,24	1,5	7,6
2	39,2	636	16,5	0,015	0,24	1,5	7,6
3	46,9	705	8,5	0,015	0,24	1,5	7,6
4	14,1	391	10,9	0,015	0,24	1,5	7,6
5	22,3	512	1,2	0,015	0,24	1,5	7,6
6	14,5	281	15,0	0,015	0,24	1,5	7,6
7	25,0	417	2,2	0,015	0,24	1,5	7,6

Fonte: Autor (2021).

O percentual de área impermeável (%AI) e o *Curve Number* (CN) variam de acordo com o uso e ocupação do solo, por isso sendo assim distintos entre os cenários.

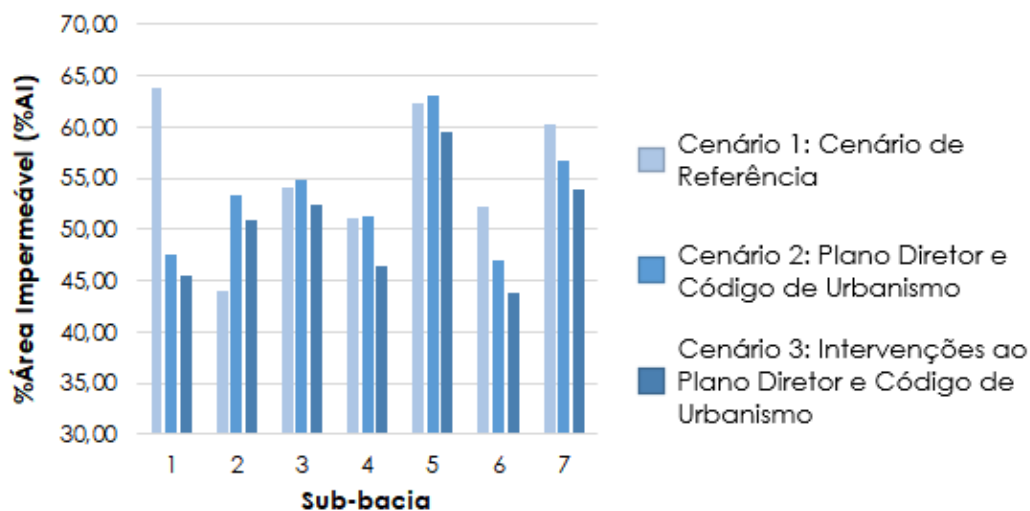
Tabela 10: *Curve Number* (CN) e percentual de área impermeável (%AI) para todos os cenários.

Sub-bacia	Cenário 1: Cenário de Referência		Cenário 2: Plano Diretor e Código de Urbanismo		Cenário 3: Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo	
	CN	%AI (%)	CN	%AI (%)	CN	%AI (%)
1	87,62	63,80	83,69	47,49	83,18	45,52
2	83,61	43,92	84,11	53,37	83,39	50,84
3	84,38	54,04	77,73	54,85	78,58	52,46
4	77,54	51,04	75,63	51,29	73,38	46,40
5	76,54	62,20	76,12	63,07	74,16	59,54
6	81,84	52,15	77,28	47,04	75,93	43,75
7	81,04	60,14	74,29	56,69	72,76	53,92

Fonte: Autor (2021).

O percentual de área impermeável (%AI) é um parâmetro calibrável do modelo. Assim seguiu-se para os cenários 2 e 3 com a mesma regra de parametrização do cenário de referência, onde os valores adotados são iguais a 90% do valor calculado através da Equação 4. A Figura 23 mostra a variação desse parâmetro entre as sub-bacias da BHRS.

Figura 23: Variação do percentual de área impermeável (%AI), entre os cenários, separado por sub-bacia.



Fonte: Autor (2021).

Podemos observar que a maior variação do parâmetro se deu na sub-bacia 1, saindo de 63,80% no cenário de referência para 47,49% no cenário 2 e 45,52% no cenário 3. Seu relevo apresenta uma alta declividade, sendo a maior entre as sub-bacias, portanto é possível perceber na Figura 11 uma grande área desocupada por ser restrita à ocupação devido a este fator (ZRO). Além disso, também é possível observar a existência da ZIAP às margens do canal. A presença dessas zonas de restrição é o principal fator responsável pela redução tanto do seu CN como da %AI (Tabela 10).

Em relação às intervenções do cenário 3, o melhor comportamento em cima deste parâmetro se deu na sub-bacia 4, onde o percentual de área impermeável variou de 51,29% para 46,40%, entre esses dois cenários propostos.

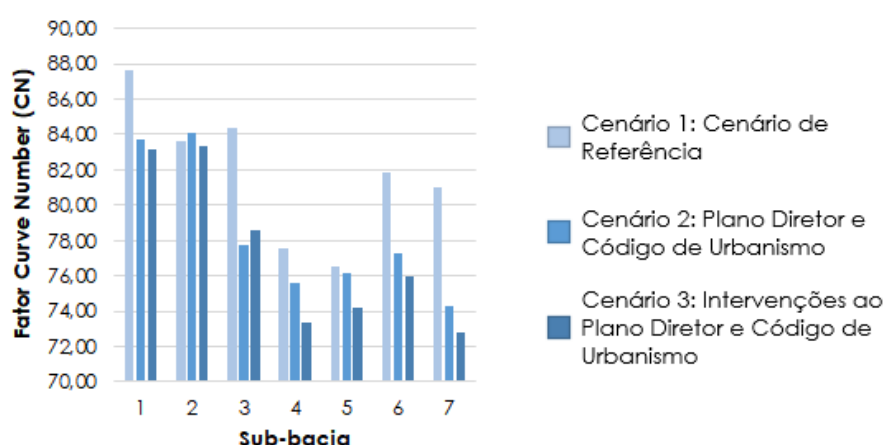
Embora a Tabela 10 mostre que a sub-bacia 3 apresentou uma queda considerável no seu valor de CN, observamos que a mesma queda não foi vista para o seu percentual de área impermeável no cenário 2. Isso se deve principalmente pela diminuição da área de estacionamentos e aumento da área de paralelepípedos (ZIAP de mirantes) que afetam o valor de CN mas não afetam o %AI, pois possuem o mesmo coeficiente de escoamento (C). Essa queda só pode ser vista no cenário 3, onde a inserção de áreas de relvado, devido a porcentagem mínima de área permeável, afetou o parâmetro.

A sub-bacia 2 apresentou aumento no seu percentual de área impermeável, saindo de 43,92% para 53,37%, no cenário 2, e para 50,84% no cenário 3. Embora esse seja um comportamento inicialmente não esperado, ao analisar o uso e cobertura do solo atual na sub-

bacia, observa-se a presença de uma área considerável classificada como “solo exposto” (Ver Anexo A). Ao assumir a uniformidade do zoneamento imposto pelo Plano Diretor e Código de Urbanismo, essas áreas acabaram sendo sobrepostas por lotes construídos que não possuíam, no cenário 2, qualquer obrigatoriedade quanto à áreas permeáveis mínimas, sendo seu tipo de cobertura do solo classificado como “paralelepípedo” (Ver Anexo B). Assim temos um impacto no cálculo de %AI, visto que o coeficiente de escoamento (C) para solos expostos é de 0,10, e para paralelepípedos é de 0,78.

O *Curve Number* (CN) expõe as condições de uso e ocupação do solo nas sub-bacias. O efeito da mudança entre os cenários de estudo, separado por sub-bacias, pode ser melhor visualizado através do gráfico abaixo.

Figura 24: Variação do CN, entre os cenários, separado por sub-bacia.



Fonte: Autor (2021).

É possível perceber que o CN sofreu maior redução na área da sub-bacia 7 (8,33% no cenário 2 e 10,22% no cenário 3). Também destaca-se a redução no CN da sub-bacia 1 pois ela possuía o maior valor para o CN no cenário de referência. Além disso, é a sub-bacia que possui a maior área (47,9 ha) e declividade (24,1%), o que acelera o escoamento superficial gerado dentro desta.

A sub-bacia 3 possui quatro das sete áreas comerciais/industriais de destaque na BHRS, em seu cenário atual, pontuadas na Figura 13, por isso possuía um valor já elevado para o CN no cenário de referência. Na Figura 11, é possível perceber que, levando em conta as diretrizes do Plano Diretor e Código de Urbanismo, esta possui em seu território áreas que deveriam ser totalmente permeáveis devido à zona de restrição à ocupação, em virtude da declividade, e à

ZIAP de margens de cursos d'água.

No caso da sub-bacia 7, é possível observar também uma grande fração de área permeável nos cenários 2 e 3 devido à ZIAP de margens de cursos d'água no entorno do canal do Riacho do Sapo.

Já a sub-bacia 1 inclui em sua área a cabeceira da bacia além da Grota do Cigano, uma região de grande concentração de residências (Figura 25). Observamos que os mesmos fatores que alteraram seu %AI levaram à redução do seu CN, que decresceu em 4,48%, para o cenário 2, e em 5,06%, para o cenário 3.

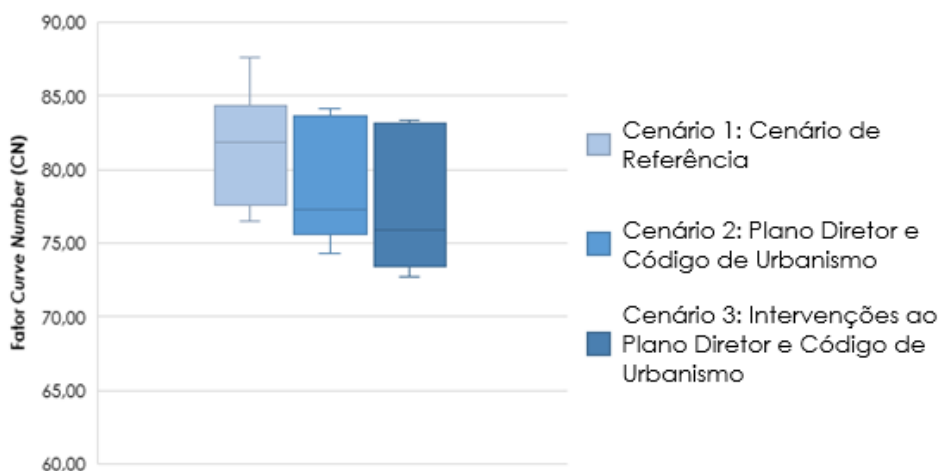
Figura 25: Padrão de ocupação observado atualmente na sub-bacia 1 da BHRS.



Fonte: Autor (2021).

De forma geral, o impacto da mudança de cenários nos valores de CN estão expostos no gráfico *box-plot* da Figura 26.

Figura 26: Gráficos *box-plot* do CN das sub-bacias da BHRS para ambos os cenários de estudo.



Fonte: Autor (2021).

Podemos observar de forma mais nítida a redução do valor máximo de CN, que variavam de 87,62 a 76,54 para o cenário de referência, e passaram a variar de 83,39 a 72,76 para o cenário 3. Nota-se também a redução da mediana, que variou de 81,8 para 77,3, no cenário 2, e para 75,93, no cenário 3.

5.3. TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO NAS SUB-BACIAS

A simulação precipitação-vazão em todo o sistema da BHRS retornou os resultados expressos nas Tabelas 11, 12 e 13, separados por sub-bacias e para toda a série simulada.

Tabela 11: Resultados da simulação precipitação-vazão para o cenário de referência.

Sub-bacia	Evaporação Total (mm)	Infiltração Total (mm)	Escoamento Total (mm)	Escoamento Total (m³)	Pico do Escoamento (m³/s)
1	2174,71	1626,24	6758,10	3237150,00	11,92
2	1888,93	3329,88	5327,37	2088340,00	7,83
3	2085,61	2321,56	6120,35	2870460,00	9,59
4	1841,62	3235,78	5493,41	774580,00	3,08
5	2075,73	2339,99	6089,11	1358580,00	4,13
6	1946,97	2919,35	5691,49	825270,00	3,19
7	2081,36	2428,75	5994,09	1498530,00	4,64

Fonte: Autor (2021).

Tabela 12: Resultados da simulação precipitação-vazão para o cenário 2 (Plano Diretor e Código de Urbanismo de Maceió).

Sub-bacia	Evaporação Total (mm)	Infiltração Total (mm)	Escoamento Total (mm)	Escoamento Total (m³)	Pico do Escoamento (m³/s)
1	1982,90	2778,07	5791,37	2774080,00	10,04
2	2030,21	2433,51	6086,64	2385980,00	8,63
3	1977,81	2806,44	5742,93	2693450,00	9,42
4	1814,99	3324,33	5431,36	765830,00	3,04
5	2050,18	2434,20	6020,40	1343250,00	4,16
6	1819,56	3501,34	5234,21	758960,00	2,92
7	1953,53	2921,89	5628,46	1407120,00	4,30

Fonte: Autor (2021).

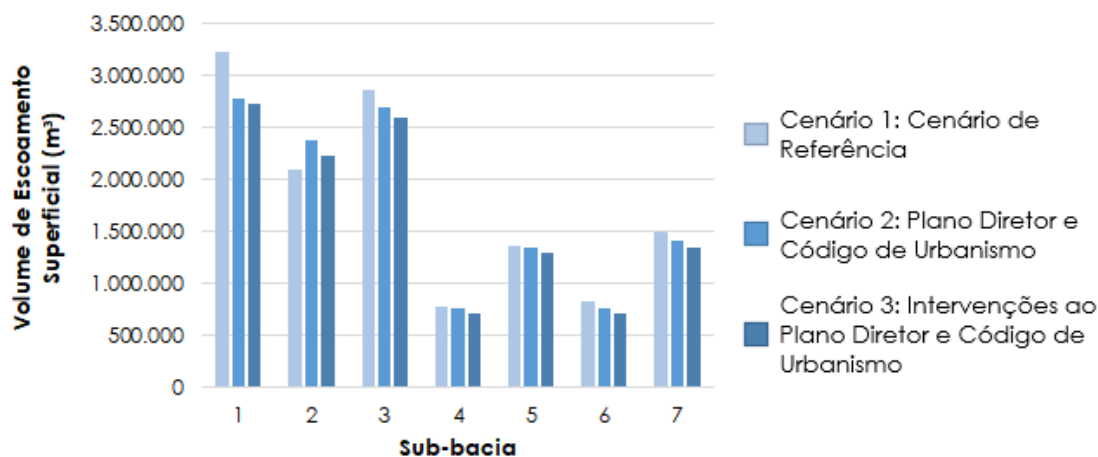
Tabela 13: Resultados da simulação precipitação-vazão para o cenário 3 (Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo de Maceió).

Sub-bacia	Evaporação Total (mm)	Infiltração Total (mm)	Escoamento Total (mm)	Escoamento Total (m ³)	Pico do Escoamento (m ³ /s)
1	1961,44	2904,87	5685,44	2723340,00	9,89
2	1941,48	2939,25	5668,30	2221990,00	8,42
3	1932,86	3053,56	5540,17	2598360,00	9,03
4	1739,43	3814,31	5013,47	706900,00	2,82
5	1990,88	2712,67	5801,02	1294300,00	3,98
6	1743,88	3854,93	4954,50	718410,00	2,78
7	1908,20	3177,74	5417,73	1354440,00	4,10

Fonte: Autor (2021).

É possível notar que todas as sub-bacias, exceto a sub-bacia 2, apresentaram redução no escoamento superficial total gerado no período da série simulada. Esse resultado acontece principalmente pelo aumento da infiltração do volume precipitado no solo, devido a alteração do uso e cobertura deste entre os cenários. Visualmente, este resultado está expresso na figura abaixo.

Figura 27: Escoamento total simulado, em m³, em todas as sub-bacias, para os cenários de estudo.



Fonte: Autor (2021).

A redução mais significativa pode ser observada na sub-bacia 1, onde o escoamento superficial total apresentou redução de 14,3% no cenário 2 e de 15,9% no cenário 3. Como visto na Figura 25, o padrão de ocupação desta sub-bacia é tomado em sua maioria por uma grande concentração de residências com área pequena.

A aplicação das diretrizes do Plano Diretor e Código Municipal gera uma menor

densificação desses terrenos, devido à exigência de uma porcentagem de área não construída nos lotes, além da dedicação de uma porcentagem da área da zona residencial à aparatos municipais, como praças e equipamentos comunitários. Além disso, como explicado no item 5.1., vemos que a área da sub-bacia 1 possui grande presença da ZRO devido à declividade, como também da ZIAP que deve ocupar as margens do canal do Riacho do Sapo.

Além da sub-bacia 1, podemos mencionar as reduções no escoamento superficial, em relação ao cenário de referência, das sub-bacias 6 (8,03% no cenário 2 e 12,9% no cenário 3), sub-bacia 3 (6,17% no cenário 2 e 9,48% no cenário 3) e sub-bacia 7 (6,10% no cenário 2 e 9,61% no cenário 3).

Em seu estudo na BHRS, Barros et al. (2020) observou que as falhas no sistema de drenagem da bacia ocorrem em sua maioria no período do verão (63%), com destaque para os meses de janeiro, fevereiro e março. Assim, levando em consideração apenas esses três meses em cada ano da série, temos a seguinte redução no escoamento superficial gerado, em m³, para toda a BHRS.

Tabela 14: Volume de escoamento superficial, em m³, gerado na BHRS nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, para todos os cenários de estudo.

Ano	Cenário 1: Cenário de Referência	Cenário 2: Plano Diretor e Código de Urbanismo	Queda (%)	Cenário 3: Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo	
				Queda (%)	Queda (%)
2014	813,00	780,00	4,06	756,00	7,01
2015	402591,00	385533,00	4,24	374967,00	6,86
2016	213414,00	201327,00	5,66	191586,00	10,23
2017	124332,00	115470,00	7,13	110205,00	11,36
2018	428163,00	408537,00	4,58	394242,00	7,92
2019	511785,00	488508,00	4,55	472917,00	7,59
2020	417855,00	397929,00	4,77	382788,00	8,39
2021	303885,00	287616,00	5,35	275109,00	9,47

Fonte: Autor (2021).

Vemos que as reduções no sistema inteiro não superam 10% no cenário 2, com a maior redução no ano de 2017 (7,13%). Já para o cenário 3, a redução neste mesmo ano supera os 10%, chegando a 11,36%. Notou-se também que ocorreu uma redução significativa no volume de escoamento superficial gerado ao observarmos a sub-bacia 1 isoladamente (Tabela 15), assim como foi visto também para todos os meses do ano (Figura 27).

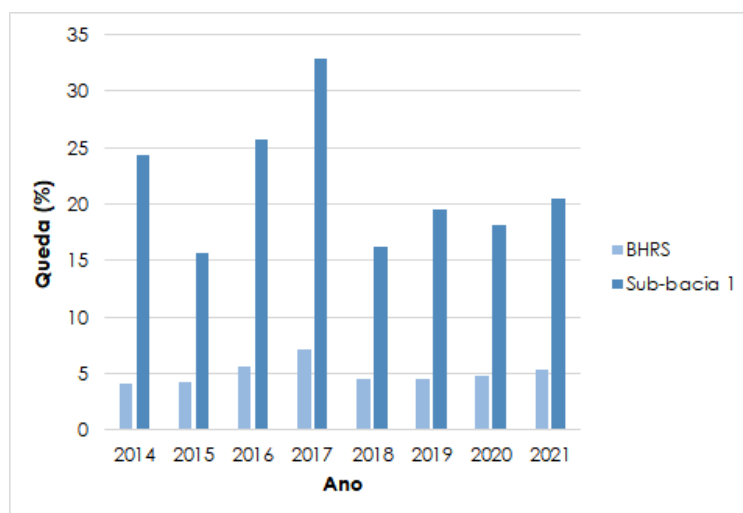
Tabela 15: Volume de escoamento superficial, em m³, gerado na sub-bacia 1 nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, para todos os cenários de estudo.

Ano	Cenário 1: Cenário de Referência	Cenário 2: Plano Diretor e Código de Urbanismo	Queda (%)	Cenário 3: Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo	Queda (%)
2014	222,00	168,00	24,32	168,00	24,32
2015	102252,00	86166,00	15,73	85212,00	16,66
2016	56877,00	42204,00	25,80	41232,00	27,51
2017	35283,00	23673,00	32,91	23163,00	34,35
2018	108597,00	90924,00	16,27	89553,00	17,54
2019	132162,00	106257,00	19,60	104433,00	20,98
2020	107247,00	87750,00	18,18	86346,00	19,49
2021	79110,00	62916,00	20,47	61782,00	21,90

Fonte: Autor (2021).

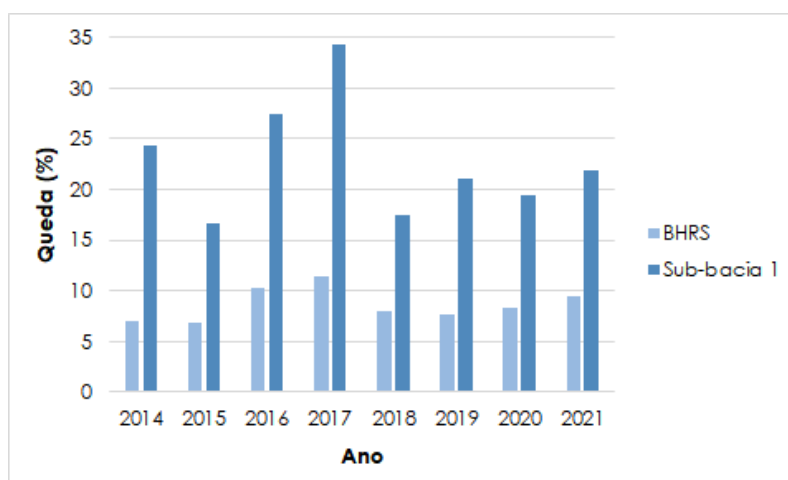
É possível observar que nos três primeiros meses do ano, caracterizados pela ocorrência de eventos de alto volume de precipitação, os efeitos gerados pela implantação das diretrizes dos dois cenários propostos são mais latentes no caso da sub-bacia 1. A maior capacidade de infiltração do solo nesse cenário atenua as consequências desse alto volume na geração do escoamento superficial, chegando a uma redução de 34,35% neste período em 2017, para o cenário 3. A comparação desse efeito globalmente na BHRS e na sub-bacia 1 pode ser vista nos gráficos abaixo.

Figura 28: Queda no volume de escoamento superficial gerado, em m³, nos três primeiros meses de cada ano para a BHRS e para a sub-bacia 1 isoladamente, no cenário 2.



Fonte: Autor (2021).

Figura 29: Queda no volume de escoamento superficial gerado, em m³, nos três primeiros meses de cada ano para a BHRS e para a sub-bacia 1 isoladamente, no cenário 3.



Fonte: Autor (2021).

Os valores máximos de vazão de pico encontrados para todas as sub-bacias da BHRS, para todos os cenários de estudo e todo o período da simulação, encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 16: Máxima vazão de pico, em m³/s, para todas as sub-bacias da BHRS em todos os cenários de estudo.

Sub-bacia	Pico do Escoamento (m ³ /s)				Queda (%)
	Cenário 1: Cenário de Referência	Cenário 2: Plano Diretor e Código de Urbanismo	Queda (%)	Cenário 3: Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo	
1	11,92	10,04	15,77	9,89	17,03
2	7,83	8,63	-10,22	8,42	-7,54
3	9,59	9,42	1,77	9,03	5,84
4	3,08	3,04	1,30	2,82	8,44
5	4,13	4,16	-0,73	3,98	3,63
6	3,19	2,92	8,46	2,78	12,85
7	4,64	4,30	7,33	4,10	11,64

Fonte: Autor (2021).

Constata-se que as sub-bacias 1, 2 e 3 possuem valores de vazão de pico, em ambos os cenários, muito superiores às demais. Isso acontece pois estas sub-bacias são as que possuem as maiores áreas e larguras características em toda a BHRS (Tabela 8 e 9). Além disso, quanto ao seu uso e ocupação do solo, elas possuem os maiores valores para o *Curve Number* entre todas as sub-bacias (Tabela 10).

Aqui, a sub-bacia 1 também se destaca com a maior redução entre o cenário de referência e os cenários 2 e 3, apresentando uma queda de 15,77% na vazão (11,92 m³/s para

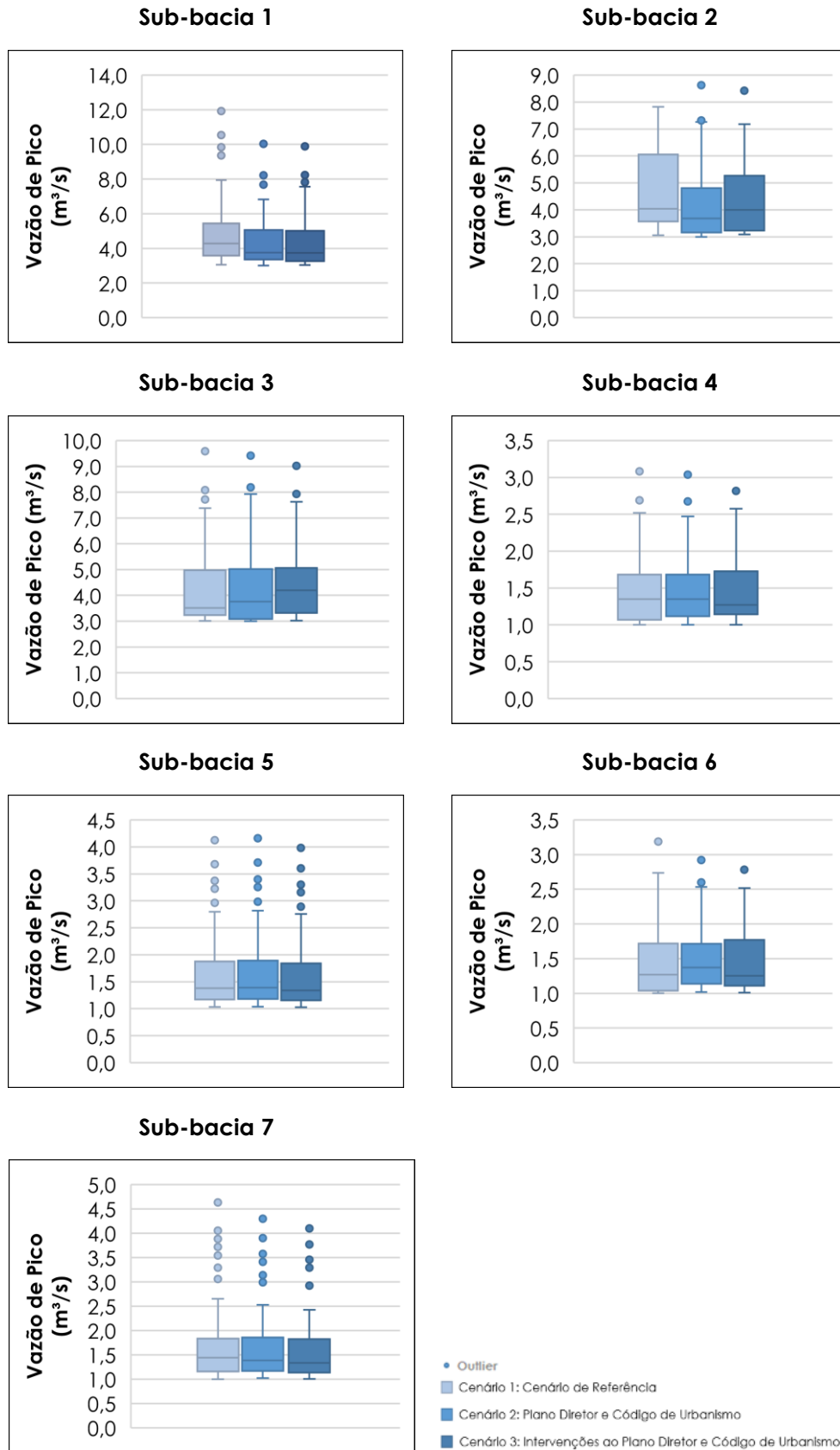
10,04 m³/s) no cenário 2, e de 17,03% (11,92 m³/s para 9,89 m³/s) no cenário 3. Esta sub-bacia, como visto na Tabela 8 e 9, apresenta a maior declividade na BHRS, o que dá a ela alto potencial para acelerar as vazões geradas nesta. Assim, é possível ver o impacto do aumento das suas áreas permeáveis nesse potencial.

Entretanto, podemos observar que algumas sub-bacias apresentaram aumento na sua vazão de pico, em destaque a sub-bacia 2 onde houve um acréscimo de 10,22% no cenário 2 (saindo de 7,83 m³/s para 8,63 m³/s) mas que foi reduzido com as intervenções do cenário 3 para 7,54% (saindo de 7,83 m³/s para 8,42 m³/s), e a sub-bacia 5 onde podemos caracterizar um estado de estabilidade entre o cenário de referência e o cenário 2.

No tocante ao comportamento da sub-bacia 2, como vimos na Figura 24 e como explicado no item 5.3., esta apresentou uma redução mínima no seu *Curve Number* (CN) o que indica pouca alteração na sua capacidade de infiltração do volume precipitado. Além disso, seu percentual de área impemeável (%AI) subiu para os dois cenários em relação ao cenário de referência devido à mudança do seu uso e cobertura do solo.

Os gráficos *box-plot* abaixo mostram a variação das vazões de pico encontradas para todos os eventos da série, por sub-bacia, nos três cenários de estudo. É possível notar a presença de alguns “pontos fora da curva” (outliers) que seriam de grande volume de precipitação que, consequentemente, geraram valores de vazão de pico acima das médias encontradas. Esses eventos são em sua maioria os retratados na Tabela 16.

Figura 30: Gráficos *box-plot* das vazões de pico encontradas em cada evento da série simulada por sub-bacia.



Fonte: Autor (2021).

Inicialmente, ignorando os *outliers* (valores “fora da curva”), é possível notar que a adoção das diretrizes dos cenários 2 e 3 foi capaz de reduzir os valores de vazão de pico, de forma mais perceptível, na sub-bacia 1 e 2. As demais sub-bacias apresentaram estabilidade nesses valores mas podemos perceber que as sub-bacias 6 e 7 tiveram redução nas suas vazões de pico máximas.

Quanto aos *outliers*, podemos notar que o padrão de uso e ocupação do solo dos cenários propostos foi capaz de reduzir a magnitude desses eventos de grande vazão, fato que já podia ser notado na Tabela 16. Podemos destacar as sub-bacias 1, 6 e 7, que tiveram quedas nas suas vazões de pico.

5.4. PONTOS DE ALAGAMENTO

Com os resultados da simulação contínua, foi possível notar três pontos de alagamento ao longo do canal do riacho do Sapo. Esses pontos já haviam sido identificados como problemáticos no tocante à ocorrência destes eventos em outros estudos (BARROS, 2015; BARROS et al., 2020; PEPLAU e NEVES, 2014).

Figura 31: Localização dos pontos de alagamento observados na simulação do SWMM na bacia do riacho do Sapo.

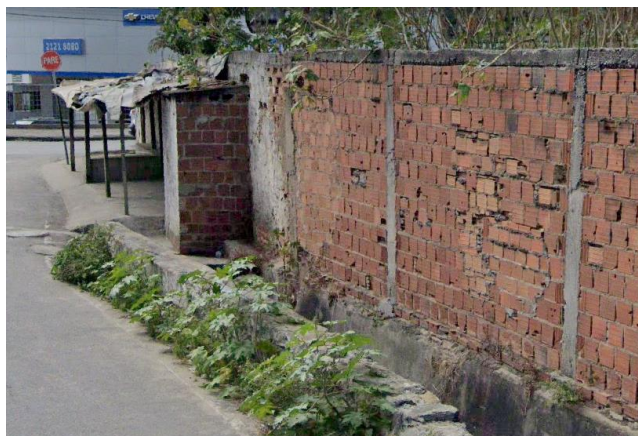


Fonte: Autor (2021).

Conforme visto por Barros et al. (2020), no ponto 1 há uma redução abrupta das seções

do canal (de 2,22 m para 1,30 m), assim como há uma passagem de seção aberta para uma galeria de seção fechada, dificultando a sua manutenção e limpeza (Figura 32).

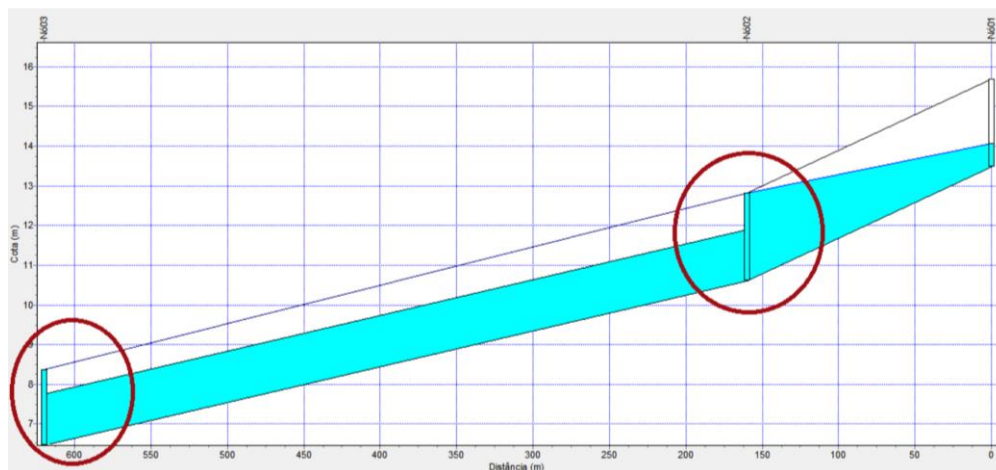
Figura 32: Redução abrupta na seção do canal do riacho do Sapo no ponto de alagamento 1.



Fonte: Autor (2021).

Assim, em eventos de grande volume de precipitação, a água escorre rapidamente devido a declividade nesta região, fazendo com que a galeria não suporte a demanda necessária. A Figura 33 mostra o perfil longitudinal do canal evidenciando a situação de alagamento à montante e à justante, em evento chuvoso registrado no dia 15/04/2021, no cenário de referência.

Figura 33: Perfil longitudinal do canal do riacho do Sapo em situação de alagamento.



Fonte: Autor (2021).

No ponto de alagamento 2, há também a passagem de seção aberta para seção fechada, o que limita a profundidade do escoamento. Essa passagem reduz a profundidade máxima de 2,48 m para 1,40 m ao entrar em mais uma galeria (Figura 34).

Figura 34: Passagem de seção aberta para seção fechada no ponto de alagamento 2 do canal.



Fonte: Autor (2021).

O ponto de alagamento 3 (Figura 35) ocorre na região plana da bacia do riacho do Sapo. Neste trecho, observa-se uma redução na profundidade de 3,73 m à montante para uma profundidade de 2,04 m.

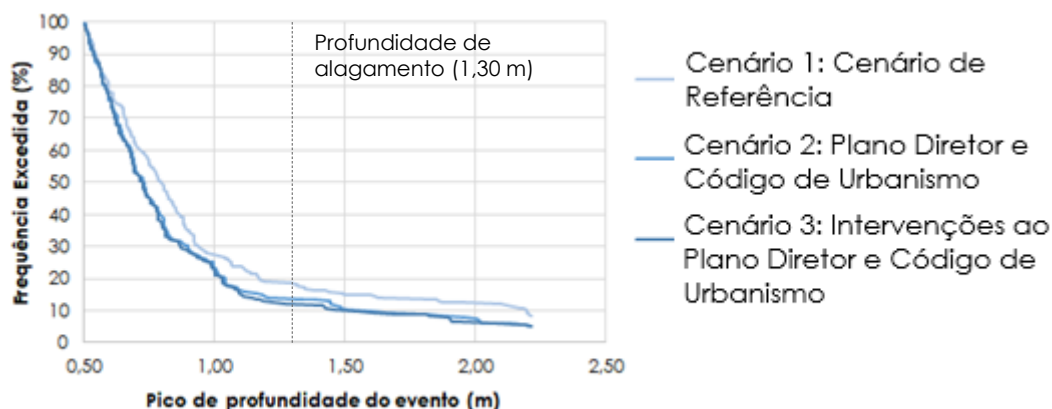
Figura 35: Ponto de alagamento 3 do canal do riacho do Sapo.



Fonte: Autor (2021).

Embora as falhas estruturais destes pontos sejam grandes responsáveis pela ocorrência de alagamentos nessa região, é possível notar, a partir das intervenções do Plano Diretor e do Código de Urbanismo, uma redução na frequência de excedência dos picos de profundidades atingidos nos eventos de precipitação. Entretanto, não se vê tanta diferença entre os cenários 2 e 3. Para o ponto 1, essa comparação está exposta no gráfico abaixo.

Figura 36: Frequência de excedência das profundidades atingidas em eventos chuvosos para o ponto de alagamento 1.

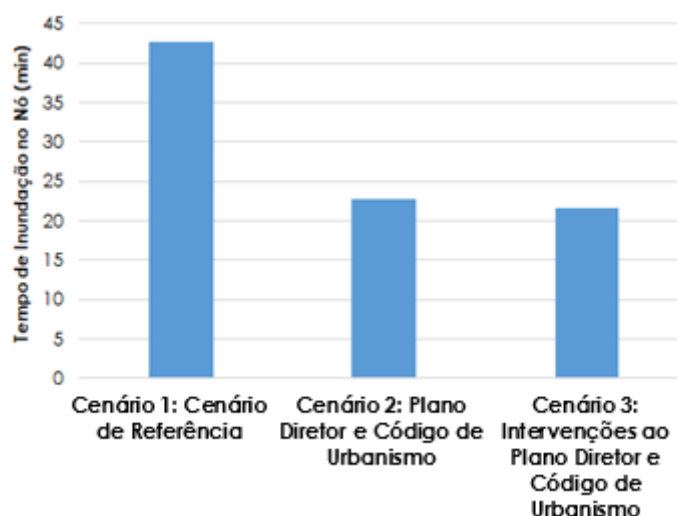


Fonte: Autor (2021).

O ponto de alagamento 1 está localizado próximo ao exutório da sub-bacia 1, possuindo assim a maior parte da sua contribuição vinda do escoamento superficial gerado por ela. Como visto no item 5.3., a sub-bacia 1 foi a sub-bacia que apresentou maior redução do volume de escoamento superficial e da vazão de pico, impactando consequentemente nos alagamentos do ponto 1.

No evento chuvoso do dia 15/04/2021, em particular, o tempo de inundação sofrido pelo nó representativo do ponto de alagamento 1 variou de 42,6 minutos para 22,8 minutos (46,5%), no cenário 2, e para 21,6 minutos (49,3%), no cenário 3 (Figura 37).

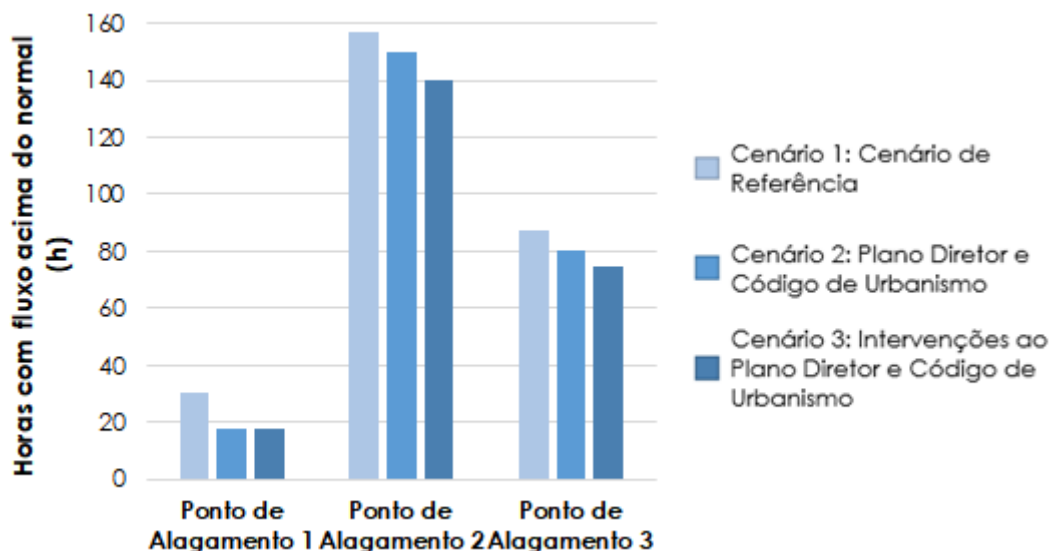
Figura 37: Tempo de inundação no ponto de alagamento 1, no evento chuvoso do dia 15/04/2021.



Fonte: Autor (2021).

Para todo o período da série, pode-se conferir no gráfico abaixo o tempo com fluxo acima do normal em cada ponto de alagamento, para os três cenários de estudo.

Figura 38: Horas com fluxo acima do normal em cada ponto de alagamento, para os três cenários.



Fonte: Autor (2021).

A maior diferença percentual se apresenta no ponto de alagamento 1, onde há a redução de 30,56 horas para 17,60 horas (42,4%) no cenário 3. Já no ponto de alagamento 2, a redução foi de 157,16 horas para 140,25 horas (10,8%) e, no ponto de alagamento 3, de 86,99 horas para 74,81 horas (14,0%), ambas também em relação ao cenário 3.

É possível perceber que os pontos 2 e 3 não apresentam alterações, tanto na frequência de excedência de alagamentos como na duração destes, da mesma ordem do ponto 1. Nota-se que a localização do ponto de alagamento 2 está próxima ao exutório da sub-bacia 2 e no início da sub-bacia 3 e o ponto de alagamento 3 está próximo ao exutório da sub-bacia 4, sendo que estas regiões não apresentaram melhorias notáveis quanto ao volume de escoamento superficial gerado (Figura 27).

5.5. BALANÇO HÍDRICO

A Tabela 17 apresenta os valores de coeficiente de escoamento para os cenários de estudo, em todo o período da série.

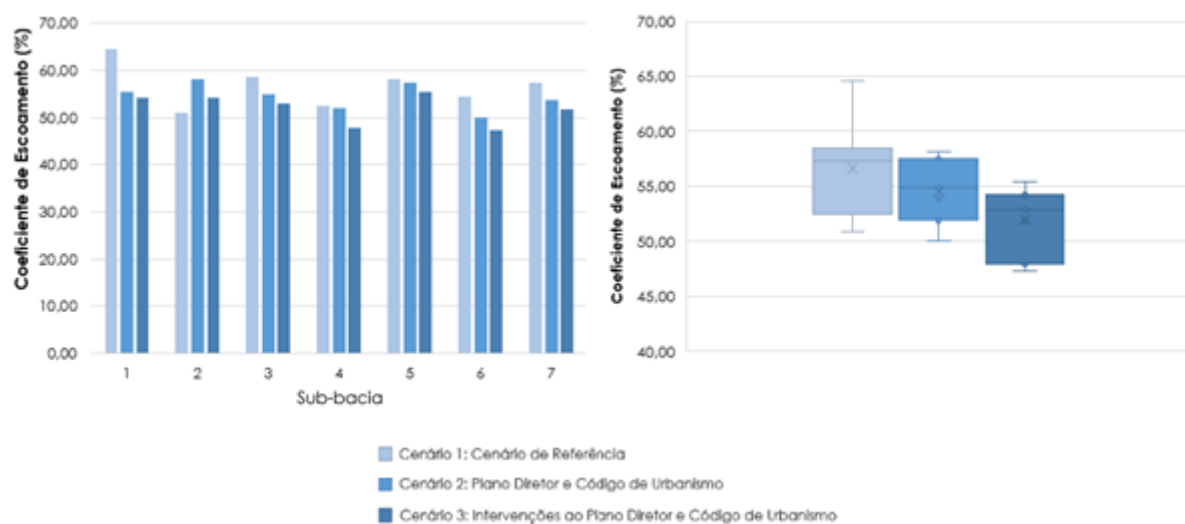
Tabela 17: Coeficiente de escoamento para os cenários de estudo, por sub-bacia, em todo o período da série.

Sub-bacia	Precipitação Total (mm)	Cenário 1: Cenário de Referência		Cenário 2: Plano Diretor e Código de Urbanismo		Cenário 3: Intervenções ao Plano Diretor e Código de Urbanismo	
		Escoamento Total (mm)	Coeficiente de Escoamento (%)	Escoamento Total (mm)	Coeficiente de Escoamento (%)	Escoamento Total (mm)	Coeficiente de Escoamento (%)
1	10467,60	6758,10	64,60	5791,37	55,30	5685,44	54,30
2	10467,60	5327,37	50,90	6086,64	58,10	5668,30	54,20
3	10467,60	6120,35	58,50	5742,93	54,90	5540,17	52,90
4	10467,60	5493,41	52,50	5431,36	51,90	5013,47	47,90
5	10467,60	6089,11	58,20	6020,40	57,50	5801,02	55,40
6	10467,60	5691,49	54,40	5234,21	50,00	4954,50	47,30
7	10467,60	5994,09	57,30	5628,46	53,80	5417,73	51,80

Fonte: Autor (2021).

Podemos observar que todas as sub-bacias apresentaram redução em seus coeficientes de escoamento, exceto a sub-bacia 2. Esse comportamento já havia sido observado no item 5.3. para o volume de escoamento superficial e vazão de pico. A maior redução também se apresenta novamente na sub-bacia 1, onde o coeficiente de escoamento passa de 64,60% para 55,30%, no cenário 2, e para 54,30%, no cenário 3. Os gráficos abaixo expõem esse resultado visualmente.

Figura 39: Gráfico de barras e *box-plot* expõem a variação do coeficiente de escoamento entre as sub-bacias para os cenários de estudo.



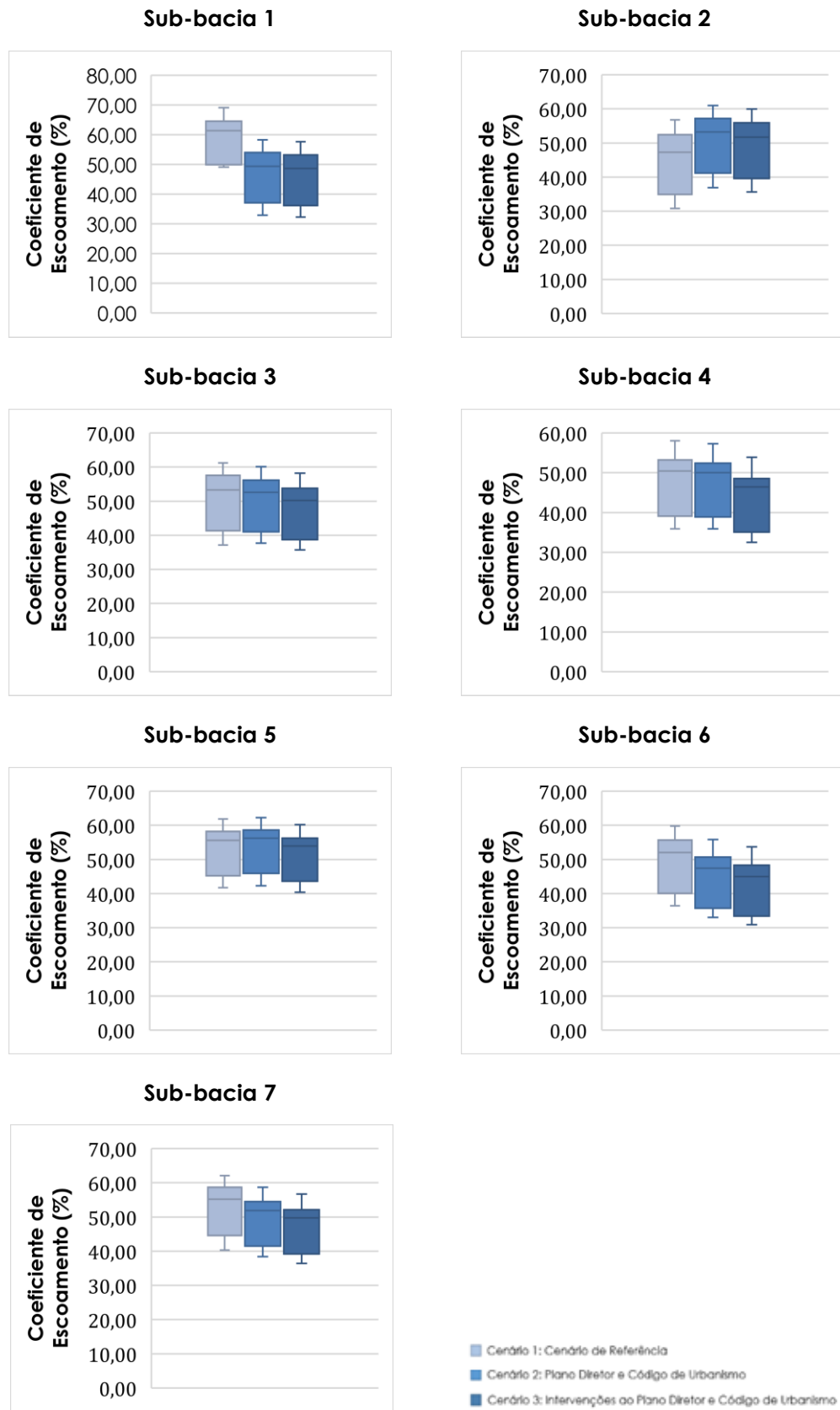
Fonte: Autor (2021).

É possível observar no gráfico *box-plot* que, para o cenário de referência, o valor máximo do conjunto de dados é puxado pela sub-bacia 1 que apresentava um coeficiente de escoamento acima das demais (64,60%). Também podemos observar que a mediana dos dados decresceu, indo de 57,30% para 54,90%, no cenário 2, e para 52,90%, no cenário 3.

Fazendo a mesma análise do item 5.3., podemos verificar o comportamento do coeficiente de escoamento nos meses mais chuvosos do ano (janeiro, fevereiro e março) para toda a série. Assim, podemos analisar o balanço hídrico nos períodos onde se observa maior frequência de eventos de grande volume de precipitação.

Abaixo apresenta-se uma série de gráficos *box-plot*, separados por sub-bacia, com os valores do coeficiente de escoamento para cada ano nesses três meses citados.

Figura 40: Coeficientes de escoamento nos três primeiros meses do ano, por sub-bacia.



Fonte: Autor (2021).

Aqui como para as vazões de pico, pode-se destacar as reduções nos coeficientes de escoamento para as sub-bacias 1, 6 e 7 nos meses de janeiro, fevereiro e março. Seguindo o mesmo padrão anterior, a sub-bacia 2 apresentou uma piora no seu coeficiente de escoamento.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho propôs avaliar a influência da fração de área permeável na geração e transporte do escoamento superficial, para diferentes cenários de uso e cobertura do solo, em uma bacia hidrográfica urbana de Maceió-AL, empregando o modelo de transformação precipitação-vazão *Storm Water Management Model – SWMM*, por meio de simulação de uma série contínua.

De forma a tornar possível essa análise, foram utilizadas as características atuais da Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo (BHRS), área de estudo do trabalho, levantadas por Barros et al. (2020) como cenário de referência. Como comparação, foram estabelecidos dois cenários de estudo utilizando como base o Plano Diretor (MACEIÓ, 2005) e o Código de Urbanismo e Edificações (MACEIÓ, 2006) de Maceió – AL. Assim, foi feita a caracterização do uso e cobertura do solo usando as diretrizes expostas nestes dois documentos, o que caracterizou o cenário 2, e foram implementadas algumas intervenções nestas para idealização do cenário 3.

A partir dos diferentes padrões de uso e cobertura do solo entre os três cenários estabelecidos, foi possível observar a variação dos dois parâmetros delas dependentes: o *Curve Number* (CN), necessário para o método de infiltração do estudo, o método SCS; e o percentual de área impermeável (%AI). Nesta análise, a sub-bacia 1 se destaca por sua redução nos dois parâmetros para os cenários propostos de maior permeabilidade. Esta sub-bacia possui forte relevância na BHRS devido a ter a maior área e declividade entre todas, além de ser caracterizada pela alta densidade de residências de pequeno porte. Por outro lado, a sub-bacia 2 apresentou aumento tanto no CN como no %AI, o que nos leva a inferir que, embora seja teoricamente um cenário de maior permeabilidade, ainda é possível que as diretrizes do Plano Diretor e Código de Urbanismo “impermeabilizem” algumas áreas.

De posse desses parâmetros, passou-se para a análise da resposta da transformação chuva-vazão gerada pelo SWMM. Analisando toda a série simulada, foi possível confirmar o efeito da maior redução dos parâmetros citados acima na sub-bacia 1, apresentando uma redução de 15,9% para o cenário 3, que se apresenta como cenário “mais permeável” entre os três. Também foi possível confirmar os efeitos do aumento do CN e do %AI na sub-bacia 2, que apresentou um aumento no seu volume de escoamento superficial gerado.

Ao levarmos essa análise para os três primeiros meses do ano (janeiro, fevereiro e

março), caracterizados pela ocorrência de eventos de grande volume de precipitação, se torna possível analisar o efeito da mudança do uso e cobertura do solo nos maiores eventos de precipitação. Foi possível perceber que, para todos os anos da série, ocorreu a diminuição na geração do escoamento superficial, com destaque para o ano de 2017 onde pode-se observar uma queda de 11,36% para todas as sub-bacias e de 34,35% para a sub-bacia 1 isoladamente, ambas no cenário 3.

Foram analisadas as vazões de pico encontradas nos eventos de precipitação da série contínua. Notou-se que houve destaque para as quedas nas vazões de pico máximas encontradas para as sub-bacias 1 (17,03%), 6 (12,85%) e 7 (11,64%) (quedas no cenário 3). Essas quedas são ainda mais importantes nas sub-bacias 1 e 6 que possuem altas declividades (24,1% e 15,0%, respectivamente). Por possuírem relevos íngremes, elas tendem a acelerar os escoamentos superficiais levando naturalmente a altos valores de vazão. Já na sub-bacia 2 foi observado um aumento na sua vazão de pico máxima (10,22% no cenário 2 e 7,54% no cenário 3).

O levantamento dos pontos de alagamento no canal do riacho do Sapo mostraram que, mesmo com as intervenções do Plano Diretor e do Código de Urbanismo não foi possível extinguir os pontos que naturalmente já eram observados em outros estudos como suscetíveis à essas ocorrências (BARROS, 2015; BARROS et al., 2020; PEPLAU e NEVES, 2014). Inferiu-se, por meio de levantamento fotográfico, que as estruturas do canal contribuem bastante para a manutenção desses pontos de alagamento. Entretanto, para o ponto de alagamento 1, foi possível notar diminuição na frequência de excedência dos seus valores de profundidade, assim como do tempo de inundação. Como este ponto está localizado próximo à sub-bacia 1, isso é um reflexo dos efeitos aqui já citados.

Por último, a análise do balanço hídrico na BHRS mostrou o aumento do potencial de infiltração do seu terreno devido às mudanças no uso e cobertura de solo. Mais uma vez a redução global foi puxada pela sub-bacia 1, onde o coeficiente de escoamento passa de 64,60% para 55,30%, no cenário 2, e para 54,30%, no cenário 3.

Por fim, verifica-se que a implantação das diretrizes do Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió de fato aumentam a permeabilidade e possui influência na redução do escoamento superficial gerado. Entretanto, essas diretrizes não são capazes de por si só extinguir a ocorrência de alagamentos e demais problemas de drenagem na região, tanto por questões de infraestrutura dessa rede como pelo padrão de ocupação ainda promover um

nível de impermeabilização.

Para futuros estudos, recomenda-se a realização de monitoramentos pluviométricos e hidrométricos mais frequentes na área da BHRS, de forma a permitir maior acurácia na calibração dos modelos. Também recomenda-se que, junto à essas diretrizes, sejam analisadas outras medidas de controle do escoamento urbano que possam assim reduzir ou extinguir os pontos de alagamento da região.

REFERÊNCIAS

- AGRA, C. C. **Metodologia para estimativa de cargas poluentes em bacias urbanas. Estudo de caso: bacia do riacho do Sapo.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (PPGRHS). Universidade Federal de Alagoas (UFAL), 2017.
- ALAGOAS. **Alagoas em Dados e Informações - Identificação das Grotas de Maceió – AL.** Secretaria do Estado de Planejamento, Gestão e Patrimônio – SEPLAG-AL. Disponível em: <<https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/identificacao-das-grotas-de-maceio>>. Acesso em: 03 Ago. 2021.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas.** Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 11 Mai. 2021.
- BARROS, A. M. **Efeito da mudança do uso do solo no escoamento de uma bacia urbana: estudo de caso da bacia do riacho do Sapo – Maceió/AL.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Universidade Federal de Alagoas. Maceió-AL, 2013.
- BARROS, A. M. **Estudo de medidas descentralizadas para o controle do escoamento urbano: aplicação à bacia hidrográfica do riacho do Sapo - Maceió.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Maceió, 2015.
- BARROS, A. M.; NEVES, M. G. F. P.; HENRIQUE, D. C. **Variabilidade e causas na geração de vazão em bacias urbanas: estudo de caso do riacho do Sapo, Maceió-AL.** Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais. 4. 2016.
- BARROS, A. M.; NEVES, M. G. F. P.; UCHÔA, L. M. **Modelagem hidrológico-hidráulica e simulação contínua para fins de gestão do regime hidrológico de bacias urbanas.** Anais do XIII Encontro Nacional de Águas Urbanas, Porto Alegre, Out. 2020. Anais eletrônicos... Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=7181>>. Acesso em: 02 mai. 2020.
- BASTOS, G. A. P. **Análise dos parâmetros do modelo SWMM para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa Maria-RS.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2007.
- BENINI, R. M.; MENDIONDO, E. M. **Urbanização e impactos no ciclo hidrológico na bacia do Mineirinho.** Floresta e Ambiente, v. 22, n. 2, p. 211 - 222, 2015.

BOUGHTON, W.; DROOP, O. **Continuous simulation for design flood estimation— a review.** Journal: Environmental Modelling and Software. Volume 18. Issue 4. Pg 309-318, 2003.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. **Lei 6.766 de 1979.** Publicada em 19 de dezembro de 1979. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCivil_03/leis/L6766.htm>. Acesso em: 30 jul. 2021.

BRAUD, I.; BREIL, P.; THOLLET, F.; LAGOY, M.; BRANGER, F.; JACQUEMINET, C.; KERMADI, S.; MICHEL, K. **Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France.** J. Hydrol. 485, pp. 5–23, 2013.

CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. **Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas.** In: Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos, v. 12, n. 2, Rio de Janeiro, 1994.

CAPUTO, U. K. **Avaliação do potencial de utilização de trincheiras de infiltração em espaços com urbanização consolidada / Estudo de caso do município de Belo Horizonte – MG.** 2012. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão.** 2009. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009. doi:10.11606/D.18.2009.tde-14102009-182636. Acesso em: 2021-05-06.

DIAZ, R.A. & QUERNER, E.P. **Estimating the climate change effect upon flood risk reduction by afforestation.** In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C. & GALVÃO, C.O., eds. Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decision-making. Wallingford, IAHS, 2005. p.248-253.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Diagnóstico Ambiental do Município de Maceió.** Anexo I-f. Levantamento Semidetalhado de Solos. 2005.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. **Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of art.** Water Resour. 51, pp. 261-279, 2013.

GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. **Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental 15, v. 1, pp. 19-28, 2010.

GIRONÁS, J.; ROESNER, L. A.; DAVIS, J. **Storm Water Management Model: Applications manual.** U.S. Environmental Protection Agency. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2009.

HASSAN, M. M.; NAZEM, M. N. I. **Examination of land use/land cover changes, urban growth dynamics, and environmental sustainability in Chittagong city, Bangladesh.** Environment, Development and Sustainability. 18 (3), pp. 697–716, 2016.

HOLZ, J. **Levantamento e Mapeamento do Índice de Risco de Alagamento na Bacia do Riacho Reginaldo.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Maceió, 2010.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. **Storm Water Management Model, version 4: User's manual.** U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1992.

IBGE. **Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2020.** Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, IBGE, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

KIM, Y.; ENGEL, B. A.; LIM, K. J.; LARSON, V.; DUCAN, B. **Runoff impacts of land-use change in Indian river lagoon watershed.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 7, n. 3, p. 245-251, 2002.

MACEIÓ. **Plano Diretor do Município de Maceió.** Prefeitura Municipal de Maceió. Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento, Maceió. 2005.

MACEIÓ. **Código de Urbanismo e Edificações.** Prefeitura Municipal de Maceió. Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento, Maceió. 2006

MACEIÓ. **Plano de Saneamento Básico do Município de Maceió/AL. Etapa 6: Relatório final do PMSB. Volume 1: Relatório Síntese.** Secretaria Municipal de Habitação Popular e Saneamento. Prefeitura Municipal de Maceió. 2018.

MAKSIMOVIC, C. **General overview of urban drainage principles and practice.** Urban Drainage in Specific Climates (IHP - V - Technical Documents in Hydrology). Paris: UNESCO,

v. 1, n. 40, pp. 1 - 21, 2001.

MORIASI, D., WILSON, B., DOUGLAS-MANKIN, K., ARNOLD, J., GOWDA, P. **Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation.** Transactions of the ASABE 55 (4), pp. 1241-1247, 2012.

MILLER, J. D.; KIM, H.; KJELDSSEN, T. R.; PACKMAN, J.; GREBBY, S.; DEARDEN, R. **Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover.** Journal of Hydrology, v. 515, p. 59–70, 2014.

NEVES, M. G. F. P.; SOUZA, V. C. B.; PEPLAU, G. R.; SILVA JÚNIOR, R. I.; PEDROSA, H. T. S.; CAVALCANTE, R. B. L. **Características da bacia do Riacho Reginaldo em Maceió-AL e suas implicações no escoamento superficial.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. Anais... São Paulo: SBRH, 2007.

PEDROSA, H. F. S. **Avaliação do impacto da aplicação das diretrizes do Plano Diretor de Maceió sobre o escoamento superficial – estudo de caso: bacia do Riacho Reginaldo.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2008.

PEPLAU, G.J.R.; NEVES, M.G.F.P. **Análise de critérios para a determinação da vazão de restrição ao escoamento superficial urbano.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos 19(4), pp. 97-106, 2014.

PETIT-BOIX, A.; ITOIZ, E.; ROJAS-GUTIERREZ, L.; BARBASSA, A.; JOSA, A.; RIERADEVALL, J.; GABARRELL DURANY, X. **Environmental and economic assessment of a pilot stormwater infiltration system for flood prevention in Brazil.** Ecological Engineering. 84, pp. 194-201, 2015.

PINHEIRO, V. B. **Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas.** 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Acesso em: 2021-05-08.

ROCHA, M. J. D. **Aplicação do SWMM para modelagem hidrológico-hidráulica em uma grande bacia de um riacho Costeiro.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE, 2019.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model, version 5.0: User's manual.** U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2010.

SANTOS, C. F. **Simulação contínua vs. simulação de eventos para estimativa de hidrogramas de cheia.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2018.

SANTOS JÚNIOR, V. J.; SANTOS, C. O. **A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas.** Estação Científica (UNIFAP), v.3 n. 1, p. 19-30, 2013.

SILVA JÚNIOR, R. I. **Evolução da urbanização e seu efeito no escoamento superficial na bacia do Riacho Reginaldo, Maceió – AL.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2009.

TAM, V. T.; NGA, T. T. V.; **Assessment of urbanization impact on groundwater resources in Hanoi, Vietnam.** Journal of Environmental Management, v. 227, pp. 107-116, 2018.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana.** 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade ABRH, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

UN - United Nations. **United Nations expert group meeting on population distribution, urbanization, internal migration and development.** United Nations Population Division. 2008. Disponível em: <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2529P01_UNPopDiv.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2021.

USDA - United States Department of Agriculture. **SCS. Hydrology, National Engineering Handbook.** Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC, 1956.

USDA - United States Department of Agriculture. **Urban hydrology for small watersheds.** Technical Release, n.55. Washington D. C, 1986.

VIDAL, D. H. F. **Modelagem hidrodinâmica como suporte à avaliação e proposição de alternativas compensatórias para mitigação dos problemas de cheias urbanas na bacia do riacho Reginaldo em Maceió-AL.** Dissertação de mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). 2012.

ZHANG, C.; NEARING, M.A.; GARBRECHT, J.D. & STEINER, J.L. **Downscaling monthly forecasts to simulate impacts of climate change on soil erosion and wheat production.** Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1376-1385, 2004.

ANEXO A - DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO CENÁRIO DE REFERÊNCIA

Tabela A - 1: Síntese da caracterização do uso e cobertura do solo atual da bacia hidrográfica do riacho do Sapo (Cenário de referência).

Cobertura do solo	Área (m ²)													
	SB01		SB02		SB03		SB04		SB05		SB06		SB07	
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
Solo exposto	13233	6218	20173	63940	26324	9925	11751	1717	20267	0	3577	4330	11722	1506
Floresta	0	1670	7051	24646	1305	28617	1	5251	0	0	7693	11617	8299	2540
Espaço relvado	7168	27034	5527	42088	15868	25388	6353	13918	6584	0	3275	8676	9726	90
Comércio	8489	14397	15772	24116	82313	3763	21129	1866	30204	0	24382	1628	55854	0
Indústria	0	0	0	0	16155	2042	0	0	0	0	0	0	0	0
Residência	661	322506	5267	83276	45429	31180	4259	10701	115224	0	17944	17846	88559	2330
Edifício	0	3885	0	8539	11575	4345	31332	0	11240	0	2088	877	0	0
Estacionamento	4488	3507	42087	0	113369	5104	12954	2016	7098	0	20522	909	27299	60
Asfalto	4668	11466	29904	0	33261	1662	15387	913	13235	0	11178	1752	32382	427
Paralelepípedo	0	35822	345	11417	1132	11760	728	0	20066	0	5928	0	8774	379
Estrada de terra	295	12834	0	7646	0	0	0	255	0	0	0	1049	0	0

Fonte: Adaptado de Barros et al. (2020).

ANEXO B - DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO CENÁRIO DO PLANO DIRETOR E CÓDIGO DE URBANISMO DE MACEIÓ (CENÁRIO 2)

Legenda para as tabelas do anexo B e C:

- **ZEIS:** Zonas de Especial Interesse Social;
- **ZIAP-M:** Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico referente aos Mirantes;
- **ZIAP-R:** Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico referentes às margens dos cursos d'água;
- **ZRO:** Zona de Restrição à Ocupação;
- **ZR-1:** Zona Residencial 1;
- **ZR-2:** Zona Residencial 2;
- **ZR-4:** Zona Residencial 4;
- **ZRV-1:** Parcela das vias públicas da Zona Residencial 1 (20%);
- **ZRA-1:** Parcela das áreas livres e equipamentos da Zona Residencial 1 (15%);
- **ZRP-1:** Parcela "privada" Zona Residencial 1 (65%);
- **ZRV-2:** Parcela das vias públicas da Zona Residencial 2 (20%);
- **ZRA-2:** Parcela das áreas livres e equipamentos da Zona Residencial 2 (15%);
- **ZRP-2:** Parcela "privada" Zona Residencial 2 (65%);
- **ZRV-4:** Parcela das vias públicas da Zona Residencial 4 (20%);
- **ZRA-4:** Parcela das áreas livres e equipamentos da Zona Residencial 4 (15%);
- **ZRP-4:** Parcela "privada" Zona Residencial 4 (65%);

Tabela B - 1: Caracterização do zoneamento na bacia hidrográfica do riacho do Sapo por sub-bacia e por grupo hidrológico do solo.

Zoneamento	Área (m ²)													
	SB01		SB02		SB03		SB04		SB05		SB06		SB07	
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
ZEIS	102	76854	174	16973	0	1471	0	4605	0	0	0	0	0	0
ZIAP-M	0	1091	0	10583	0	23232	0	4612	0	0	0	4286	0	0
ZIAP-R	971	41769	9074	9168	58012	40	18897	0	20968	0	17183	0	45851	0
ZRO	991	133999	3365	82970	94	45244	87	21054	38	0	49	33988	150	3272
ZR-1	0	0	0	61338	0	67156	0	10115	293	0	7718	21090	153878	17190
ZR-2	188	189823	4333	93820	0	0	1198	0	196331	0	0	0	29087	0
ZR-4	21877	10768	38640	61228	255051	21187	66710	13517	4824	0	39075	18334	0	0

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 2: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 1 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)													
	SB01													
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4	
Solo exposto														
Floresta				100										
Espaço relvado			100			10		10				10	15	
Comércio										6			5	
Indústria														
Residência	85							72		73			65	
Edifício								6		1			0	
Estacionamento														
Asfalto	3				60						60			
Paralelepípedo	9	100			30	90	22	30	90	20	30	90	15	
Estrada de terra	3				10						10			

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 3: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 2 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB02												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10			10			10	10
Comércio							4			4			14
Indústria													
Residência	85						72			72			38
Edifício							6			6			4
Estacionamento													24
Asfalto	3				60				60			60	
Paralelepípedo	9	100			30	90	18	30	90	18	30	90	10
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 4: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 3 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB03												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10			10			10	10
Comércio													19
Indústria													4
Residência	85						72			72			17
Edifício							6			6			2
Estacionamento													38
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	22	30	90	22	30	90	10
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 5: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 4 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB04												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10			10			10	21
Comércio													23
Indústria													
Residência	85						72			72			15
Edifício							6			6			19
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	22	30	90	22	30	90	22
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 6: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 5 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB05												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10			10			10	16
Comércio											17		
Indústria													
Residência	85						72			59			64
Edifício							6			4			4
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	22	30	90	20	30	90	16
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 7: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 6 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB06												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10			10			10	16
Comércio													28
Indústria													
Residência	85						72			72			38
Edifício							6			6			2
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	22	30	90	22	30	90	16
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 8: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 7 da BHRS conforme o Plano Diretor e o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB07												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10			10			10	16
Comércio							17			52			
Indústria													
Residência	85						65			34			64
Edifício													4
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	18	30	90	14	30	90	16
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela B - 9: Síntese da caracterização do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do riacho do Sapo considerando as diretrizes do Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió.

Cobertura do solo	Área (m ²)													
	SB01		SB02		SB03		SB04		SB05		SB06		SB07	
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
Solo exposto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Floresta	991	133999	3365	82970	94	45244	87	21054	38	0	49	33988	150	3272
Espaço relvado	3457	45838	12237	16406	78529	2752	29118	2219	24504	0	21855	2454	48596	258
Comércio	658	7583	3615	9102	31681	2632	10071	2041	22144	0	7140	3350	26845	1914
Indústria	0	0	0	0	6696	556	0	0	0	0	0	0	0	0
Residência	9369	161007	11845	102364	28188	35021	7114	9976	77201	0	13437	14480	71278	7238
Edifício	68	855	1158	7619	3551	2914	8380	2083	5635	0	795	1054	0	0
Estacionamento	0	0	5902	9353	62285	5174	0	0	0	0	0	0	0	0
Asfalto	2651	26377	5162	26476	30606	10645	8149	2974	24174	0	5615	4731	21956	2063
Paralelepípedo	6491	72328	11436	76956	66426	51581	22615	12946	64730	0	14198	16852	56482	5374
Estrada de terra	444	6317	865	4837	5101	1811	1358	611	4029	0	936	788	3659	344

Fonte: Autor (2021).

ANEXO C - DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO CENÁRIO DE INTERVENÇÃO AO PLANO DIRETOR E CÓDIGO DE URBANISMO DE MACEIÓ (CENÁRIO 3)

Tabela C - 1: Caracterização do zoneamento na bacia hidrográfica do riacho do Sapo por sub-bacia e por grupo hidrológico do solo.

Zoneamento	Área (m ²)													
	SB01		SB02		SB03		SB04		SB05		SB06		SB07	
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
ZEIS	102	76854	174	16973	0	1471	0	4605	0	0	0	0	0	0
ZIAP-M	0	1091	0	10583	0	23232	0	4612	0	0	0	4286	0	0
ZIAP-R	971	41769	9074	9168	58012	40	18897	0	20968	0	17183	0	45851	0
ZRO	991	133999	3365	82970	94	45244	87	21054	38	0	49	33988	150	3272
ZR-1	0	0	0	61338	0	67156	0	10115	293	0	7718	21090	153878	17190
ZR-2	188	189823	4333	93820	0	0	1198	0	196331	0	0	0	29087	0
ZR-4	21877	10768	38640	61228	255051	21187	66710	13517	4824	0	39075	18334	0	0

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 2: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 1 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB01												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	11		10	10		10	15
Comércio										5			5
Indústria													
Residência	85						72			74			65
Edifício							6			1			0
Estacionamento													
Asfalto	3				60				60			60	
Paralelepípedo	9	100			30	90	11	30	90	10	30	90	15
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 3: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 2 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB02												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	9		10	9		10	10
Comércio							4			4			14
Indústria													
Residência	85						72			72			38
Edifício							6			6			4
Estacionamento													24
Asfalto	3				60				60			60	
Paralelepípedo	9	100			30	90	9	30	90	9	30	90	10
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 4: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 3 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB03												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	11		10	11		10	10
Comércio													19
Indústria													4
Residência	85						72			72			17
Edifício							6			6			2
Estacionamento													38
Asfalto	3				60				60			60	
Paralelepípedo	9	100			30	90	11	30	90	11	30	90	10
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 5: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 4 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB04												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	11		10	11		10	21
Comércio													24
Indústria													
Residência	85						72			72			15
Edifício							6			6			19
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	11	30	90	11	30	90	21
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 6: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 5 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB05												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	11		10	10		10	16
Comércio										17			
Indústria													
Residência	85						72			59			64
Edifício							6			4			4
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	11	30	90	10	30	90	16
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 7: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 6 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB06												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	11		10	11		10	16
Comércio													28
Indústria													
Residência	85						72			72			38
Edifício							6			6			2
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	11	30	90	11	30	90	16
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 8: Padrão de ocupação estabelecido para a sub-bacia 7 da BHRS para o cenário 3.

Cobertura do solo	Área (%)												
	SB07												
	ZEIS	ZIAP-M	ZIAP-R	ZRO	ZRV-1	ZRA-1	ZRP-1	ZRV-2	ZRA-2	ZRP-2	ZRV-4	ZRA-4	ZRP-4
Solo exposto													
Floresta				100									
Espaço relvado			100			10	9		10	7		10	16
Comércio							17			52			
Indústria													
Residência	85						65			34			64
Edifício													4
Estacionamento													
Asfalto	3				60			60			60		
Paralelepípedo	9	100			30	90	9	30	90	7	30	90	16
Estrada de terra	3				10			10			10		

Fonte: Autor (2021).

Tabela C - 9: Síntese da caracterização do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do riacho do Sapo considerando as intervenções propostas ao Plano Diretor e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (cenário 3).

Cobertura do solo	Área (m ²)													
	SB01		SB02		SB03		SB04		SB05		SB06		SB07	
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
Solo exposto														
Floresta	991	133999	3365	82970	94	45244	87	21054	38		49	33988	150	3272
Espaço relvado	3413	57903	12499	25792	78521	7519	28829	2861	36980		22293	3900	59112	1277
Comércio	608	7000	3337	8402	29244	2429	9296	1884	20440		6591	3092	24780	1766
Indústria					6181	513								
Residência	8655	153647	10945	95599	26020	32423	6567	9510	71263		12403	13366	65795	6681
Edifício	63	789	1069	7033	3278	2690	7735	1923	5201		734	973		
Estacionamento			5448	8633	57494	4776								
Asfalto	2651	26377	5162	26476	30606	10645	8149	2974	24174		5615	4731	21956	2063
Paralelepípedo	7305	68272	12895	76340	76619	50279	24871	13087	60330		15404	16859	53514	5059
Estrada de terra	444	6317	865	4837	5101	1811	1358	611	4029		936	788	3659	344

Fonte: Autor (2021).