UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Pedro Vinícius Sampaio da Silva

Avaliação do Avanço da Urbanização de Maceió-AL e os Efeitos na Hidrologia Urbana de Bairros que Margeiam a Laguna Mundaú

Maceió-AL

2023

Pedro Vinícius Sampaio da Silva

Avaliação do Avanço da Urbanização de Maceió-AL e os Efeitos na Hidrologia Urbana de Bairros que Margeiam a Laguna Mundaú

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Professor Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves.

Maceió-AL

2023

Catalogação na Fonte Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

A447a Silva, Pedro Vinícius Sampaio da.
Avaliação do avanço da urbanização de Maceió-AL e os efeitos na hidrologia urbana de bairros que margeiam a laguna Mundaú / Pedro Vinícius Sampaio da Silva. – Maceió, 2023.
46 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientador: Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 44-46.

1. Sensoriamento remoto. 2. Áreas Impermeáveis. 3. Escoamento superficial. I. Título.

CDU: 556.16

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a quem há 18 anos está ao meu lado, passando por todas as fases da minha vida. Minha companheira Lalá, a cachorrinha mais amada desse mundo, que acompanhou meu eu criança, desde a educação infantil até o ensino médio e, agora, a faculdade e o emprego. Apesar da idade já avançada, e estar apenas “vivendo” nos últimos anos, é nela que arrumo forças suficientes para viver todos os dias e ser o melhor de mim e quem me ensinou o verdadeiro significado do amor.

Agradecer a minha mãe, meu irmão João, meu pai e minha cunhada pela companhia e suporte de sempre, tornando viável tudo que fiz até hoje em minha vida. Aos meus avós, em especial meu avô Beto, que em inúmeros aspectos me inspirou e auxiliou na montagem de toda minha personalidade e jeito de levar a vida.

Agradecer aos meus amigos de colégio e faculdade, que foram uma companhia essencial durante os 5 anos de graduação. Um agradecimento especial a Ana Lua que desde 2019 vem sendo o meu principal ponto de apoio e que passou comigo por todas as dificuldades e alegrias dos últimos anos.

Agradeço aos meus líderes do trabalho que me ensinaram muito sobre como o que significa ter impacto na vida de uma pessoa no âmbito pessoal e profissional, Ariel, Diogo, Franklin, Jordana, Laily, Luiza, Henrique, Hendrew, Igor, Marcos, Sérgio, Silas e Wilson. Aos amigos que fiz na empresa que tornaram tudo mais leve e prazeroso, todo o convívio dentro deste ambiente me fez crescer imensamente no contexto pessoal e profissional.

Ao professor Marllus, a quem poderia escrever todo um texto por tantos momentos de aprendizagem e tutoria, tanto no PET quanto em outros projetos, obrigado pela amizade e por toda paciência ao longo desse tempo. Ao Programa de Educação Tutorial, por ter sido responsável por mudar totalmente o rumo da minha vida e da minha graduação, o grupo que pôde me transformar de uma maneira que nem eu consigo mensurar.

E a UFAL por ter me proporcionado 5 incríveis anos que serviram como uma peça fundamental lapidadora na minha vida, onde aprendi que o básico bem feito também funciona e muito bem.

RESUMO

Constantemente no Brasil, noticiam-se problemas relacionados à ineficácia do planejamento urbano, como alagamentos, inundações e deslizamentos, que causam danos materiais e imateriais por vezes irreparáveis. Estas problemáticas estão ligadas, em parte, a processos de urbanização demasiados e crescentes após a segunda metade do século XX; em paralelo, existem muitos casos nos quais os planos diretores responsáveis por mitigar os impactos deste fenômeno se demonstram ineficazes e incapazes de fazer um controle de riscos no meio urbano. A urbanização desgovernada gera alterações em características hidrológicas, ecológicas e paisagísticas em uma determinada região - como por exemplo, tem-se o crescimento da área impermeável, do escoamento superficial e da degradação ecológica ocasionadas pelas alterações no uso e cobertura do solo. Em Alagoas, a capital do estado, Maceió, fica cercada por dois grandes corpos hídricos, o Oceano Atlântico e a Laguna Mundaú, nesta última, há um grande adensamento nas suas margens, ao longo de toda sua extensão. Essa ocupação ribeirinha, não foi feita de forma totalmente planejada, sendo uma área suscetível a diversos problemas hidrológicos e de saneamento, sofrendo com alagamentos e inundações em quase todo evento chuvoso. Como mitigação, a região conta com diversos canais de microdrenagem artificiais, que visam frear estes eventos, no entanto, a transgressão das águas da laguna para dentro da cidade torna-os ineficientes, gerando transbordamentos. Desta forma, o presente trabalho estudou o avanço da impermeabilização neste perímetro utilizando ferramentas de sensoriamento remoto e imagens de satélite datadas de 1986 até 2016 com manipulações no QGIS e seu consequente aumento na geração do escoamento superficial, avaliado pelo software SWMM identificando um avanço na impermeabilização nas regiões, mas que, no entanto, não implicaram numa relação única de causa-efeito na lâmina escoada.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Áreas Impermeáveis; Escoamento Superficial.

ABSTRACT

Constantly in Brazil, there are reports of problems related to the inefficiency of urban planning, such as floods and landslides, which cause material and immaterial damages that are sometimes irreparable. These problems are linked, in part, to excessive and increasing urbanization processes after the second half of the 20th century; in parallel, there are many cases in which the master plans responsible for mitigating the impacts of this phenomenon prove to be ineffective and incapable of controlling risks in the urban environment. Ungoverned urbanization generates changes in hydrological, ecological and landscape characteristics in a given region - for example, there is the growth of the impermeable area, surface runoff and ecological degradation caused by changes in land use and cover. In Alagoas, the capital of the state, Maceió, is surrounded by two large water bodies, the Atlantic Ocean and the Laguna Mundaú, in the latter, there is a great density on its banks, along its entire length. This riverside occupation was not carried out in a fully planned manner, being an area susceptible to several hydrological and sanitation problems, suffering from flooding in almost every rainy event. As a mitigation, the region has several artificial microdrainage channels, which aim to stop these events, however, the transgression of the lagoon waters into the city makes them inefficient, generating overflows. In this way, the present work studied the advancement of waterproofing in this perimeter using remote sensing tools and satellite images dated from 1986 to 2016 with manipulations in QGIS and its consequent increase in the generation of surface runoff, evaluated by the SWMM software, identifying an advance in waterproofing. in the regions, but which, however, did not imply a single cause-effect relationship in the flow rate.

Keywords: Remote sensing; Impermeable Areas; Surface runoff.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma metodológico 14
Figura 2 – Ilustração das etapas simuladas 19
Figura 3 – Etapas de Modelagem 20
Figura 4 - Bacias Delimitadas 21
Figura 5 – Representação das Curvas de Nível 21
Figura 6 - Comparativo entre imagens 25
Figura 7 - Avanço da Impermeabilização nas Bacias 26
Figura 8 - Avanço da Impermeabilização na Área Geral 27
Figura 9 – Hietograma TR 2 Anos 29
Figura 10 - Hietograma TR 10 Anos 30
Figura 11 – Hietograma TR 50 Anos 31
Figura 12 – Vazão pico esp. para TR 2 anos 32
Figura 13 - Vazão pico esp. para TR 10 anos 32
Figura 14 - Vazão pico esp. para TR 50 anos. 33
Figura 15 – Volume de chuva para TR 2 Anos 33
Figura 16 - Volume de chuva para TR 10 anos. 33
Figura 17 - Volume de Chuva TR 50 Anos 33
Figura 18 - Escoamento nas Bacias 3, 4 e 5 para 2016 e TR 2 anos 36
Figura 19 – Escoamento nas sub-bacias para o ano de 2016 e TR 2 anos 37
Figura 20 – Hidrograma com SB04 + SB05 comparadas a SB03 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de uso e cobertura do solo – Imagem 2016.....16
Tabela 2 - Tipo de Uso CN.....18
Tabela 3 – Método de obtenção dos demais parâmetros 18
Tabela 4 - Área das Bacias 22
Tabela 5 - Classificação das Bacias.....23
Tabela 6 - Tempo de Concentração e Intensidade de Chuva 28
Tabela 7 – Chuva de Projeto TR 2 Anos.....29
Tabela 8 - Chuva de Projeto TR 10 Anos.....30
Tabela 9 - Chuva de Projeto TR 50 Anos.....31
Tabela 10 - Resultados para TR 2 Anos 34
Tabela 11 - Resultados para TR 10 Anos 34
Tabela 12 - Resultados para TR 50 Anos 35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO....9
2 OBJETIVOS....10
2.1 Objetivo Geral....10
2.2 Objetivos Específicos....10
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA....10
3.1 Classificação de uso e cobertura do solo....10
3.2 Impacto das áreas impermeáveis na hidrologia urbana....12
3.3 Avaliação do Avanço da Urbanização....13
4 MÉTODOS....14
4.1 Definição da área de estudo....14
4.2 Classificação do uso e cobertura do solo....15
4.3 Avaliação do escoamento superficial....17
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES....20
5.1 Área de estudo....20
5.2 Classificações de uso e cobertura do solo....22
5.3 Avanço da urbanização....26
5.4 Avaliação do escoamento superficial....27
6 CONCLUSÕES....38
REFERÊNCIAS....41

1 INTRODUÇÃO

Entre os anos de 1960 e 2010, o Brasil passou por um êxodo rural demasiado. Em decorrência disso, a população urbana total apresentou um aumento na ordem de 500%; em paralelo, houve uma elevação também na densidade habitacional do país (IBGE, 2010). O significativo ímpeto nessas taxas demonstra um avanço no processo de urbanização vivenciado no país e levanta preocupações acerca do crescimento de alguns impactos incluídos no estudo da hidrologia urbana e planejamento das cidades, como a elevada cobertura impermeável ligada ao aumento no escoamento superficial e da vazão máxima em uma bacia, oportunizando o surgimento de pontos de alagamento ao longo da cidade. (MENEZES FILHO; TUCCI, 2012).

Nos âmbitos regional, nacional e internacional, o avanço das áreas impermeáveis são ligados a indicadores do crescimento da urbanização, a exemplo da densidade populacional. Internacionalmente, Stankowski (1972) relacionou a área impermeável com a densidade populacional para a cidade de Nova Jersey, nos Estados Unidos. Nacionalmente, Motta e Tucci (1984) em Porto Alegre e Tucci, Braga Jr. e Silveira (1989) em São Paulo desenvolveram curvas que estabeleceram uma relação entre a cobertura impermeável e a densidade populacional, gerando uma equação com modelos preditivos para aquelas regiões.

Quando se trata de urbanização, em função dos trabalhos já citados e diversos outros que estudam esse fenômeno, uma forma de se avaliar seu impacto é com a quantificação das áreas impermeáveis nas regiões estudadas. Para isso, o sensoriamento remoto e as imagens de satélite se mostram o método mais eficaz e válido no cenário atual pela sua viabilidade prática e econômica (WENG, 2012). Além disso, o uso de modelagem hidrológica avalia o efeito na geração de escoamento superficial.

Importa dizer que, seguindo a tendência nacional, a cidade de Maceió-AL passou por um processo de grande ocupação urbana a partir da segunda metade do século XX, evidenciado não apenas na população, mas também na urbanização das áreas da cidade (JAPIASSÚ, 2015). Em decorrência do avanço das áreas habitadas no município, houve um aumento no sistema viário maceioense, dada as necessidades de conexão e tráfego das principais áreas comerciais e turísticas com as que passaram a abrigar a população (JAPIASSÚ, 2015). Estes impactos puderam ser verificados por Almeida e Ferreira Neto (2015) e Barros, Neves e Henrique (2016),

que analisaram o aumento da fração de Área Impermeável (AIP) em bacias hidrográficas de regiões urbanizadas na cidade de Maceió-AL, citadas por Japiassú (2015) como receptoras do êxodo rural, ao longo de diferentes horizontes temporais.

Na área em que se pretende estudar, os alagamentos são frequentes. Trata-se de uma região plana com vários canais, que sofre a influência da laguna Mundaú e recebe a água drenada de encostas de tabuleiros. Tentar solucionar os problemas esta área passa por um estudo das causas dos alagamentos e este trabalho contribuirá para verificar o quanto o avanço da urbanização em pequenas bacias hidrográficas que englobam as encostas contribuiu para isto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da urbanização em pequenas bacias hidrográficas de Maceió na geração de escoamento superficial que atinge bairros no entorno da laguna Mundaú.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar estudos de classificação de uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas em diferentes anos;
- Avaliar o avanço da impermeabilização do solo nos diferentes anos;
- Avaliar o efeito da urbanização e da impermeabilização das regiões estudadas com efeitos na geração de escoamento superficial;
- Identificar possíveis problemas causadores dos constantes eventos de alagamento na região.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Classificação de uso e cobertura do solo

A utilização do solo pode se dividir em vários tipos, variando conforme o tipo de ocupação. Estudos voltados à hidrologia urbana, consideram classes que integram dois conjuntos: áreas permeáveis e impermeáveis. Subgrupos são considerados ao adentrar na nestas duas abrangências, são geralmente consideradas áreas impermeáveis aquelas que inibem ou reduzem significativamente a capacidade de

infiltração do solo, enquanto as permeáveis permitem que a área natural consiga ter efetiva participação no ciclo hidrológico.

O uso e cobertura do solo tem ligação direta com a resposta hidrológica de uma região aos eventos chuvosos. Áreas largamente urbanizadas tendem a ter uma maior fração de área impermeável, no entanto, apenas o efeito da urbanização não implica uma relação *sine qua non* com eventos de alagamentos, haja vista que autores consideram que ao se ter uma tendência de impermeabilização, pode se ter uma área impermeável efetiva, com infraestrutura necessária para que sejam controlados os eventos chuvosos.

No geral, os planejamentos urbanos consideram o crescimento populacional de uma região junto da infraestrutura necessária para inserir economicamente e socialmente as zonas de expansão nos centros. Isto é, ao se ter alterações no uso e cobertura do solo em função da ocupação de áreas por parte da população, um conjunto de ações é iniciado a partir deste movimento, tendo estas alterações efeitos sociais e econômicos indiretamente.

Áreas que precisem ser classificadas a fins de estudo, necessitam de uma imagem de satélite que represente fielmente suas disposições para uma determinada resolução espacial. Ainda, este processamento de dados, requer *softwares* e computação adequados, para que as informações de entradas possam ser lidas, manipuladas e o resultado seja obtido (WENG, 2012). A classificação supervisionada pixel-a-pixel é largamente utilizada para o fim deste trabalho, seu uso já foi atestado em experiências com sensoriamento remoto no mapeamento de áreas de vegetação e urbana (WENG, 2012).

Quando se realiza a classificação de uma área amostral, os resultados estão intrinsecamente ligados à resolução espacial da imagem de satélite. Isto é, o tamanho da sua superfície de estudo não deve ser tão maior quanto o tamanho de cada pixel da sua imagem, Jensen e Cowen (1999) sugerem que, esta relação seja de 1:2, ou seja, a resolução mínima deve ter metade do diâmetro do menor objeto estudado.

A depender da metodologia do trabalho, alternativas complementares podem ser avaliadas, como o conhecimento empírico da região e a identificação visual de cada objeto, realizando classificações manuais de forma a refinar o trabalho (WENG, 2012). Hamilton, Coops e Lokman (2021), utilizaram-se de dados aerofotogramétricos obtidos a partir de um sensor LiDAR em conjunto com imagens do satélite Landsat para gerar classes de uso e ocupação do solo e as características topográficas de

Vancouver, Canadá, no entanto, apesar de um grande refino, este método requere um maior processamento computacional e um custo mais elevado (WENG, 2012).

No Brasil, Menezes Filho (2013) realizou a quantificação da área impermeável em bairros da cidade de Porto Alegre-RS. Neste trabalho, o autor utilizou o método da classificação supervisionada, com aplicação da máxima verossimilhança, que realiza uma leitura dentro do comportamento de cada pixel e sua classe de uso de solo atribuída em amostras de treinamento. Esta metodologia permitiu ao autor identificar diversas classes atribuídas como impermeáveis e quantificar a fração em que esta ocupava no total da área de estudo.

3.2 Impacto das áreas impermeáveis na hidrologia urbana

As áreas impermeáveis podem ter diversas classes, para este estudo, considera-se telhados, estacionamentos, estradas de asfalto, áreas construídas em geral. Cada ocupação desta, possui um grau de interferência no ciclo hidrológico, haja vista que elas inibem a infiltração natural de água no terreno, necessitando de uma microdrenagem adequada (GONG et al., 2020). Em regiões com características acima citadas, tem-se um favorecimento ao aumento do escoamento superficial nestas regiões (MILLER; HESS, 2017; MENEZES FILHO; TUCCI, 2012), provocando alagamentos e inundações (HAMILTON; COOPS; LOKMAN, 2021; WENG; 2012).

A avaliação e os efeitos da impermeabilização de áreas, são notadas a um nível de bacias de contribuição, podendo variar de pequenos a grandes, a depender do tipo de impacto a ser avaliado. Nestas bacias, o aumento neste parâmetro pode indicar também a qualidade ambiental e ecológica desta região de estudo (HAMILTON; COOPS; LOKMAN; 2021), além disso, pode-se haver perda de biodiversidade, ocasionada pela alteração direta de ecossistemas e habitats com a ocupação e urbanização de áreas (LI et al., 2016).

Muitos riscos ambientais estão ligados ao efeito da urbanização, principalmente no tocante aos que são ligados à chuva. Inevitavelmente, as áreas impermeáveis possuem relação direta com a capacidade de infiltração do solo, quando se tem redução deste potencial, a região fica suscetível a uma série de ameaças, podendo estas serem mitigadas a partir da retenção e infiltração das águas de chuva (LEPESKA, 2016), características estas comuns em regiões predominantemente permeáveis.

3.3 Avaliação do Avanço da Urbanização

A urbanização em uma cidade se caracteriza como a ocupação de áreas em função da necessidade de expansão da população, isso se dá por diversos fatores, a exemplo do êxodo rural e da taxa de natalidade. Este avanço, nem sempre é acompanhado de um planejamento adequado, ocasionando em interferências nas características naturais das áreas ocupadas e, afetando o funcionamento de diversos serviços nestas regiões, a exemplo da questão do saneamento e, consequentemente, a drenagem (MENEZES FILHO; TUCCI, 2012).

A má distribuição do uso e ocupação do solo trazem fatores, como a redução da infiltração, consequente aumento do escoamento superficial e, indiretamente, pode impactar diretamente nas águas subterrâneas (TUCCI, 2006). É com esses impactos que podem ocorrer alterações em diversas características da região afetada, ao se ter a água de chuva percorrendo maiores caminhos, sem sua infiltração, o carreamento de sedimentos e impurezas presentes na superfície pode vir a ser um atenuante poluidor tanto das águas superficiais, no ponto final de lançamento do sistema de drenagem, quando em áreas que haja recarga de aquífero. (HAMILTON, COOPS, LOKMAN; 2021).

A simples alteração do uso e cobertura do solo e a urbanização não atestam alterações significativas na hidrologia local, já que essa impermeabilização pode ser, de fato, efetiva, acompanhada do planejamento urbano adequado. Desta forma, há a compensação do aumento das superfícies impermeabilizadas com intervenções na microdrenagem local, portanto, quando se pretende avaliar os efeitos destas mudanças, faz-se necessário avaliar diversas outras características e, a resposta da área de estudo sobre eventos chuvosos (MILLER et. al, 2014).

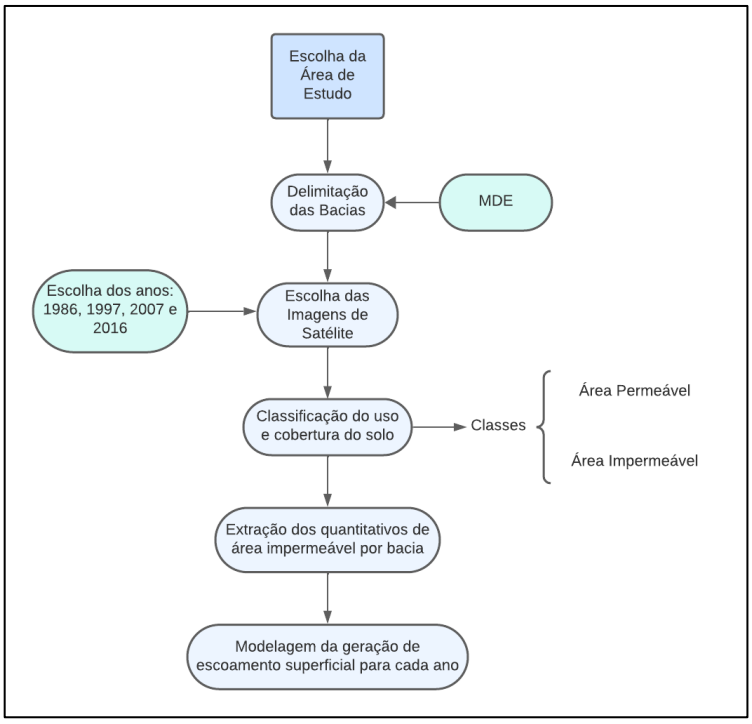
A avaliação do avanço da urbanização pode ser parametrizada a partir de diversos indicadores. Estudos consideram o aumento da área impermeável como uma consequência deste efeito, enquanto outros utilizam este dado como subsídio para se obter mais informações, a exemplo de modelagens hidrológicas nas áreas habitadas, o que há, de fato, é que esta tendência pode ser atestada de diversas formas, no entanto, todas passam por estudos que considerem classificações de uso e cobertura do solo. (HAMILTON; COOPS; LOKMAN, 2019; TUCCI, 2006; MILLER; HESS, 2017)

4 MÉTODOS

Inicialmente, foi levantada toda a base teórica que guiou o desenvolvimento do trabalho. A partir de documentos de referência, a exemplo do Plano Municipal de Saneamento Básico de Maceió, foram definidas as áreas de estudo dos levantamentos feitos. A escolha das amostras foi uma etapa crucial no seguimento do projeto, já que se estudaram localidades que puderam ter uma representatividade nos aspectos avaliados.

Neste trabalho, consideraram-se 5 amostras para obtenção dos resultados de fração de área impermeável e posterior modelagem hidrológica. Cada ponto de estudo, foi avaliado nos anos de 1986, 1997, 2007 e 2016. A ideia inicial era de utilizar o intervalo fixo de 10 anos, sendo inviabilizada pela presença de nuvens, já que para imagens dos anos de 1996 e 2006, havia presença significativa destas em cima da área de estudo. Na Figura 1, há um fluxograma dos passos estabelecidos para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 1 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor (2023).

4.1 Definição da área de estudo

Para escolha das áreas de estudo, tomou-se como base a região que margeia a laguna Mundaú, em sua parte mais próxima ao litoral. Esta delimitação contém bairros de duas regiões administrativas 1 e 2 (RA1 e RA2), sendo a escolha em função

dos constantes problemas de alagamentos e inundações que prejudicam o dia-a-dia. Na área de estudo existem diversos canais de drenagem que surgiram historicamente, na maioria das vezes, da retificação de cursos d'água ocorrida devido à ocupação urbana, com a instalação de pontos importantes da cidade, como o Mercado da Produção.

A região possui uma proximidade muito grande com a laguna, fazendo com que a cota de inundação da lagoa ocasione em problemas de remanso na rede de canais. É possível observar que ocorre seção plena em algum destes em dias sem precipitação, o que significa que, muitas vezes, a rede se torna ineficaz na drenagem do escoamento superficial. Soma-se a isto o fato de haver bairros vizinhos, a montante aos bairros nas áreas alagáveis na margem do estuário, com cotas bem superiores, havendo um direcionamento das águas pluviais para o mesmo exutório.

A partir da topografia foram delimitadas bacias hidrográficas, que serviram para que, além da classificação do uso do solo, fosse avaliada a geração de escoamento superficial em cenários correspondentes aos anos citados anteriormente. A delimitação das bacias hidrográficas foi realizada utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão Topodata, de livre acesso na internet. O dado possui resolução espacial de 30x30m. As bacias hidrográficas foram obtidas via QGIS na versão 3.16.14, utilizando dois complementos do GRASS, já embutidos no *software*: *r.watershed* e *r.wateroutlet*.

O GRASS é um conjunto de algoritmos e *plugins* já inseridos gratuitamente no QGIS, esta biblioteca conta como funções voltadas para todos os tipos de dados de entrada em sistemas de informações geográficas. A função *r.watershed* faz a leitura do modelo digital de elevação, resultando em arquivos *rasters* que, para este estudo, utilizou-se da Direção de Drenagem e Segmentos de Fluxo, a partir destes produtos implementou-se o *r.wateroutlet* para criar a partir de exutórios as bacias estudadas.

4.2 Classificação do uso e cobertura do solo

Nesta etapa do trabalho, foi feito uso do satélite Landsat 5 para os anos de 1986 e 1997, Landsat 7 para o ano de 2007 e Landsat 8 para o ano de 2016. Em todos os casos, considerou-se apenas a distinção entre área impermeável e área permeável para as amostras de cada pixel. Utilizou-se das bandas *Red, Green* e *Blue* (RGB) para todos os anos, sendo obtida cada uma delas separada e unificadas a partir do QGIS. Por se tratar de imagens grosseiras e com longos horizontes temporais, algumas

delas apresentaram nuvens em seus recortes, sendo estas atribuída nas amostras para que fosse feito o desconto em seu quantitativo total.

Para este trabalho, tinha-se disponível ainda de uma imagem de maior resolução, referente ao ano de 2016, cedida pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente (SEDET), com resolução espacial de 0,60 m. Foram gerados pares ordenados Ano x Fração de Área Impermeável, visando obter a evolução temporal com base em todas as classificações. Este produto serviu como comparativo entre a classificação para um mesmo ano com diferentes resoluções espaciais, auxiliando no entendimento de cada resultado.

Para a imagem de maior resolução do ano de 2016, foram divididas 10 classes de uso e cobertura do solo, expostas na Tabela 1, abaixo. Na amostragem e classificação, foi utilizado o *software* QGIS, a partir da sua ferramenta de classificação Dzetsaka usando o Modelo de Mistura Gaussiana, ambos os produtos são de desenvolvimento livre e *free-to-use*. O método explorado no trabalho foi o da classificação supervisionada *pixel* a *pixel*, largamente utilizado para quantificação das classes de uso e cobertura do solo.

Tabela 1 – Classes de uso e cobertura do solo – Imagem 2016

Nº	Ocupação	Tipo
1	Áreas Verdes	Permeável
2	Pastagens	Permeável
3	Terrenos Baldios	Permeável
4	Estradas de Terra	Permeável
5	Telhados	Impermeável
6	Estacionamentos	Impermeável
7	Estradas de Paralelepípedo	Impermeável
8	Estradas de Asfalto	Impermeável
9	Nuvens	Desconsiderado
10	Água	Impermeável

Fonte: Autor (2023).

É importante destacar que, nas imagens do satélite Landsat, apesar de cada *pixel* ter sido classificado apenas como área permeável ou impermeável, o conjunto de cada categoria é condizente com o apresentado na tabela 1, apenas não sendo discretizado em função da baixa qualidade espacial, isto é, no ato da caracterização, foram consideradas as áreas verdes, terrenos baldios, pastagens e afins como permeáveis e telhados, estacionamentos, estradas de asfalto e afins como impermeáveis, por ação visual, mas, atribuídas todas a um só tipo de uso.

Após coleta das amostras, obteve-se uma imagem do tipo *raster* contendo um conjunto de *pixels* atribuídos a uma classe, sendo permeável ou impermeável. Ainda utilizando o *software* QGIS, foi possível quantificar em termos de fração de área o total para cada vertente, tendo em mãos as fatias de cada região de estudo que se enquadram como áreas permeáveis ou impermeáveis. Após a extração, para cada ano gerou-se uma relação de pares ordenados para a fração de área impermeável por ano estudado para cada bacia.

4.3 Avaliação do escoamento superficial

Com a finalidade de atestar os efeitos da urbanização geração de escoamento das bacias hidrográficas, foi utilizado o modelo EPA Storm Water Management Model (SWMM), de livre acesso e com diversos guias na internet, nos diferentes cenários, definindo-se parâmetros de simulação hidrológica para o algoritmo de separação de escoamento do SCS e para o algoritmo de propagação na superfície reservatório não-linear.

Os hietogramas de projeto foram construídos pelo método dos blocos alternados, basearam-se na curva IDF de Maceió de Dernadin e Freitas (1982). A duração da chuva de projeto pode ser aquela que corresponde ao maior tempo de concentração de todas as pequenas bacias hidrográficas delimitadas.

Três tempos de retorno foram adotados: 2, 10 e 50 anos, sendo em seguida realizadas simulações chuva-vazão para cada cenário e avaliação dos resultados, com intervalo de tempo de simulação de 2 minutos.

Para cada tempo de retorno e para cada cenário, obteve-se um hidrograma simulado, dos quais foram extraídos: volume (m^3), vazão de pico específica (L/s/ha), coeficiente de *runoff* e tempo de pico (min), permitindo uma avaliação da variação destas variáveis entre cenários, entre tempos de retorno e entre bacias hidrográficas.

Previamente à simulação dos cenários, fez-se necessário a parametrização do modelo, a partir da extração, em cada bacia hidrográfica, do comprimento do curso d'água (talvegue principal), desnível geométrico da bacia, declividade (%), tempo de concentração (TC), coeficiente de forma (kc), n de manning impermeável, n de manning permeável e fator *curve number* (CN) de cada bacia e perímetro de cada bacia a tabela 2 e a discussão subsequente expõe os métodos utilizados para obtenção de cada parâmetro.

Estas características fisiográficas das bacias hidrográficas foram em sua maioria obtidas a partir do *software* QGIS, com exceção do tempo de concentração, obtido pela equação 1, conhecida como equação de Kirpich (1940), largamente utilizada para áreas menores que 0,5 km², exposta a seguir.

$$Tc = 57 \frac{L^3}{\Delta h}^{0,385}$$

(Equação 1)

onde Tc representa o tempo de concentração em minutos, L o comprimento do talvegue principal e Δh o desnível geométrico em metros.

Quanto à parametrização do modelo SWMM, para o CN foram consideradas 4 tipos de uso do solo e admitidos 2 tipos de solo nas bacias, sendo os Latossolos Vermelhos Amarelos, considerados grupo hidrológico A, onde se encontram altas taxas de infiltração e os Neossolos Quartzarênico, enquadrado no grupo hidrológico B com taxa de infiltração moderada, conforme levantamento dos solos realizados na área de abrangência (EMBRAPA, 2005). Os tipos de uso da tabela 2 foram generalizados para as 6 sub-bacias em estudo, o valor resultante para o CN foi obtido a partir de uma média ponderada relacionada as porcentagens de solo A e solo B em cada bacia.

Tabela 2 - Tipo de Uso CN

Tipo de Solo	Solo A em boas condições	Solo B em boas condições
Áreas Impermeáveis	98	98
Floresta com cobertura boa	61	74
Espaços Abertos	39	61
Ruas Pavimentadas	98	98
CN Médio	74	83

Fonte: Autor (2023).

Tabela 3 – Método de obtenção dos demais parâmetros

Parâmetro	Metodologia
Talvegue Principal	Obtido atrás da leitura do raster gerado via QGIS e utilização da função $length
Desnível Geométrico	Obtido atrás da leitura do raster para as sub-bacias
Declividade (%)	Obtido atrás da leitura do raster para as sub-bacias
n de manning impermeável	Considerados valores da bibliografia para ocupação residencial e parques (0,03)
n de manning permeável	Utilizado valor recomendado pelo EPA SWMM padronizado (0,1)

Fonte: Autor (2023).

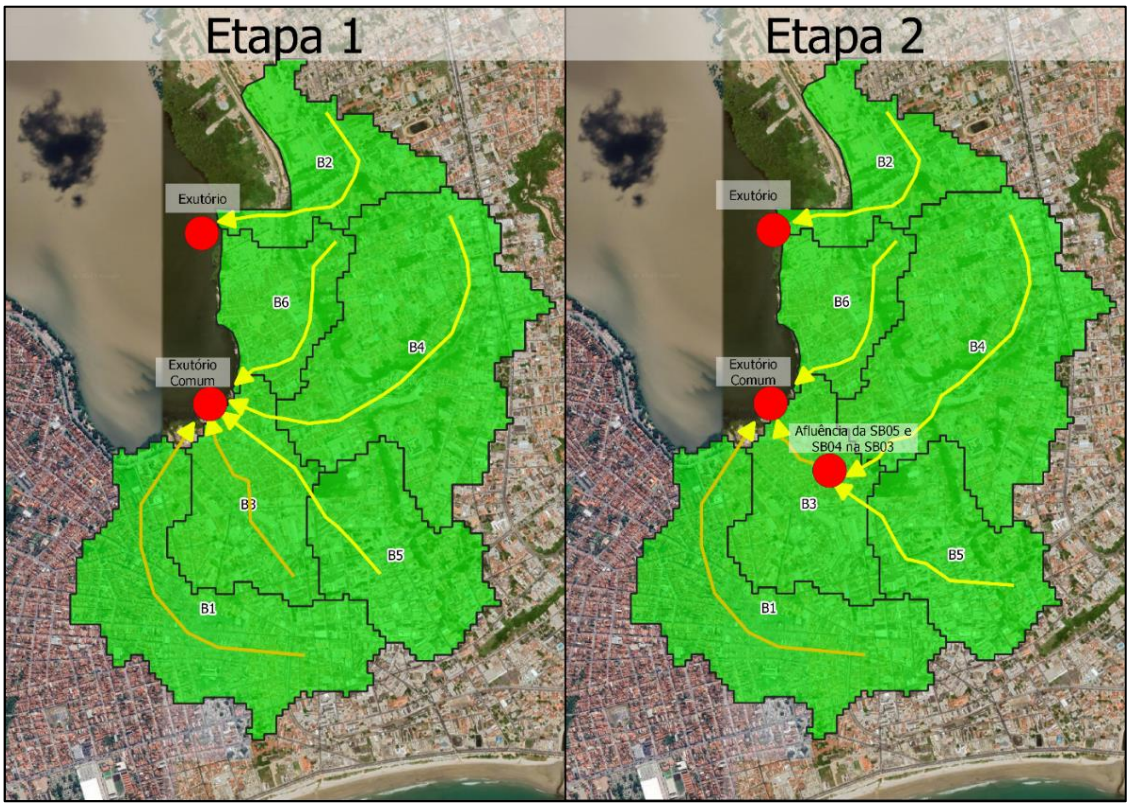
Para obtenção do coeficiente de forma da sub-bacia, utilizou-se a equação 2, descrita a seguir:

$$kc = 0{,}28 * \frac{perímetro\ (m)}{\sqrt{Área\ da\ Sub - Bacia\ (m^2)}}$$

(Equação 2)

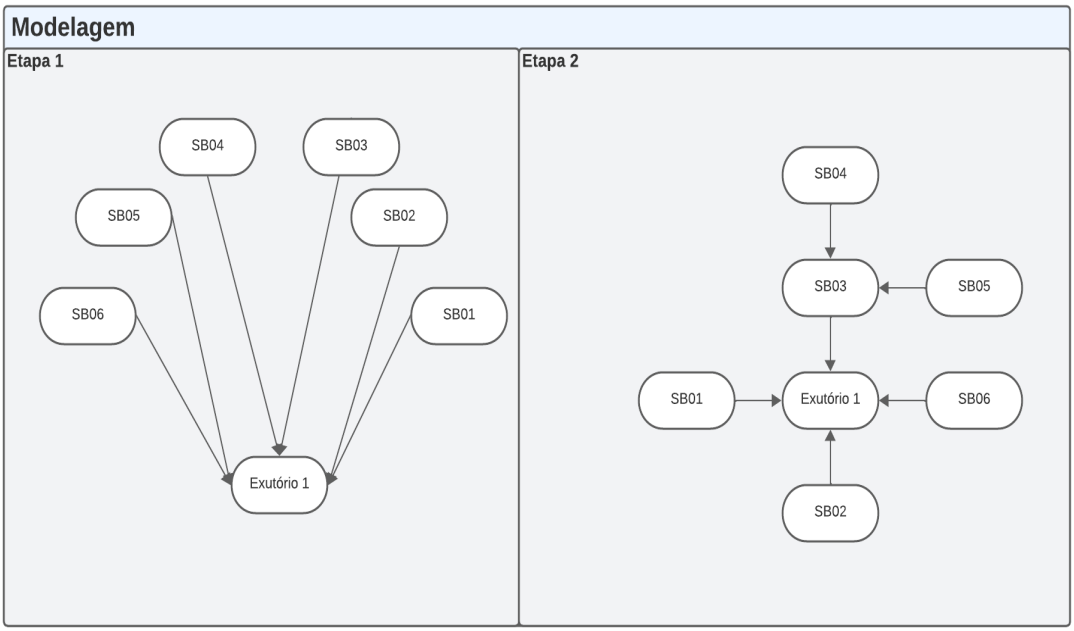
Nas simulações, foram definidas duas etapas de modelagem: na primeira, considerou-se que as bacias escoavam de forma independente, sem afluências; na segunda etapa considerada como a real de acordo com a topografia, determinou-se afluências das SB-04 e 05 na SB-03. Na Figura 2, que ilustra a área de estudo nas duas etapas, percebe-se a disposição geográfica delas e na Figura 3, tem um fluxograma com as etapas detalhadas.

Figura 2 – Ilustração das etapas simuladas



Fonte: Autor (2023).

Figura 3 – Etapas de Modelagem



Fonte: Autor (2023).

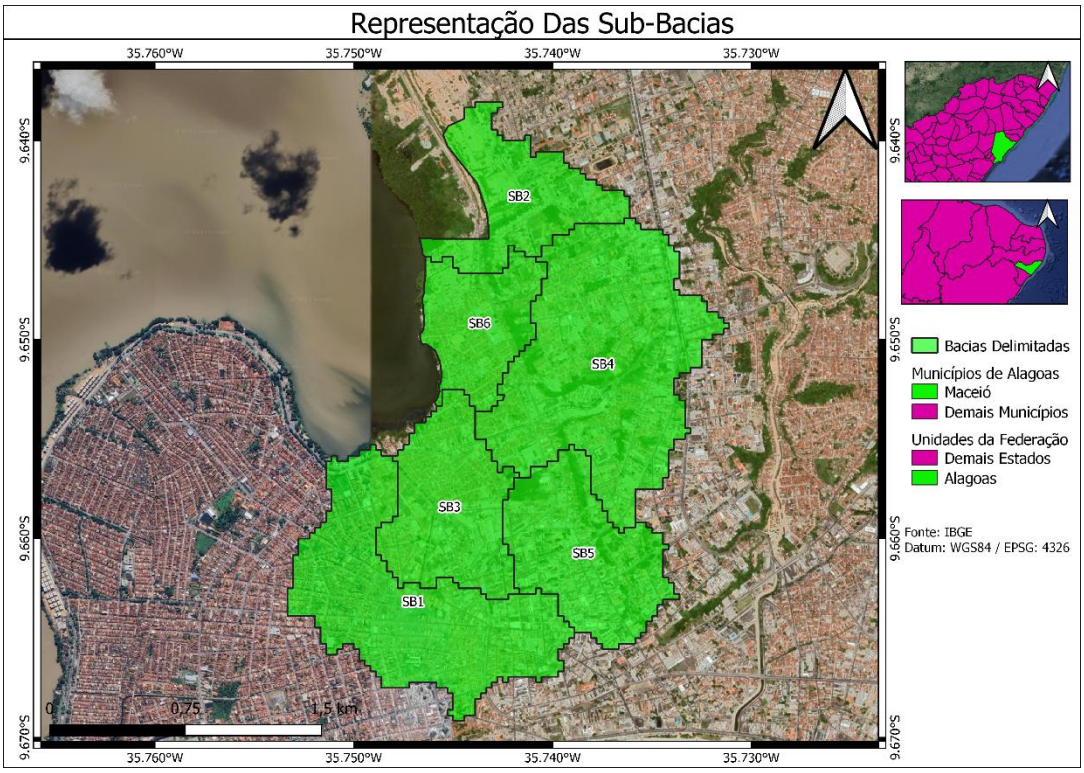
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Área de estudo

Para delimitação das áreas de estudo, foram traçadas 6 bacias hidrográficas, que possuem direção de fluxo semelhante, com exutórios nas margens da Laguna Mundaú, conforme Figura 4. Este resultado foi obtido considerando o tamanho mínimo de uma microbacia de 100 m². Os exutórios foram selecionados por serem regiões de convergência de fluxos e dos canais existentes nas proximidades da laguna, obtidos a partir da leitura topográfica da região.

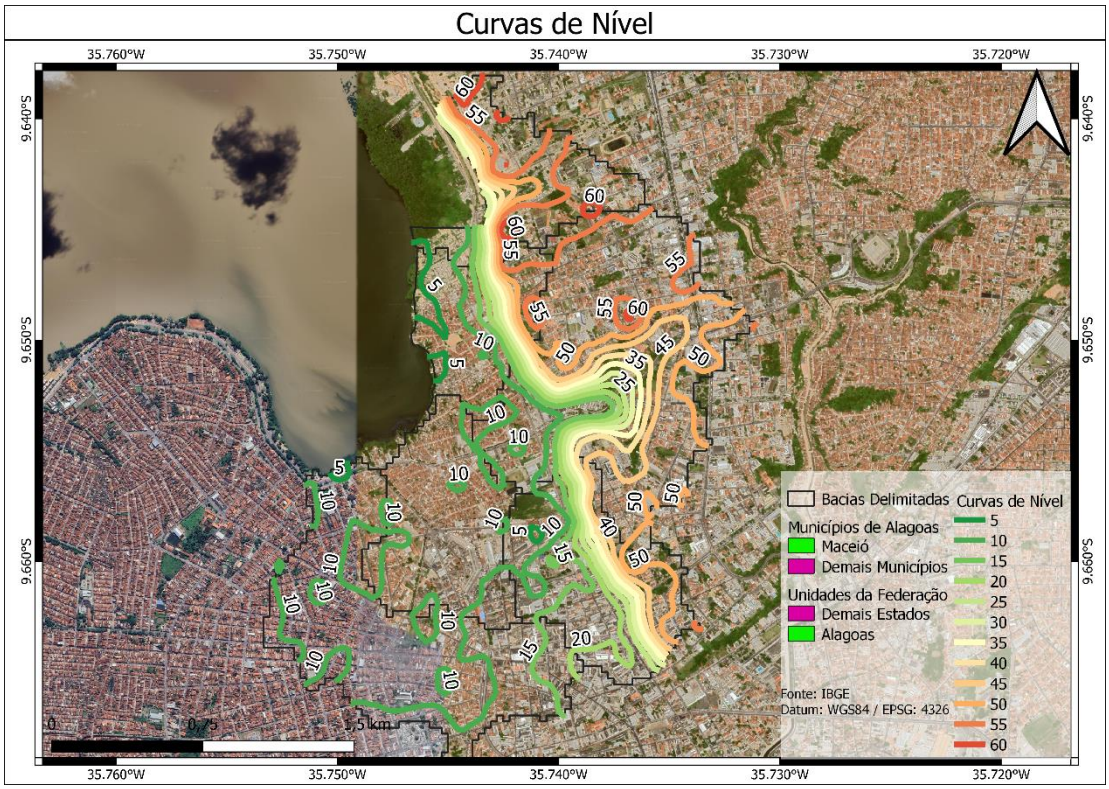
Na Figura 4, as bacias SB3, SB4 e SB5, fazem parte de uma grande região de escoamento, sendo a SB4 e SB5 afluentes da SB3. No entanto, para utilização dos dados na modelagem, optou-se por realizar a divisão para que a influência da declividade esteja mais explícita. A Figura 5 apresenta as curvas de nível destas bacias. Podem-se ver porções com características mais comuns entre si bem delimitadas, ou seja, áreas com cotas maiores que 40 m e áreas planas com cotas entre 5 e 20 m, sendo muitos pontos com cotas de 10m. A transição entre as duas porções ocorre com declividades grandes.

Figura 4 - Bacias Delimitadas



Fonte: Autor (2023).

Figura 5 – Representação das Curvas de Nível



Fonte: Autor (2023).

A tabela 4 apresenta a área das bacias. Importa destacar que, em função da resolução espacial do MDE, a representação da região de escoamento pôde conter variações quando comparada com a realidade. Esta diferença, no entanto, é compensada, ou seja, a variação total estaria contida nas bacias adjacentes, não tendo impactos significativos para o alcance dos objetivos aqui propostos.

Tabela 4 - Área das Bacias

Bacia	Área Total (m^2)	Área Total (km^2)
Bacia 1	1.015.331,90	1,02
Bacia 2	484.437,80	0,48
Bacia 3	589.163,56	0,59
Bacia 4	1.329.156,60	1,33
Bacia 5	626.625,32	0,63
Bacia 6	401.953,02	0,40

Fonte: Autor (2023).

5.2 Classificações de uso e cobertura do solo

Para avaliação e quantificações das classificações de uso do solo, separam-se os anos referentes a cada classificação, sendo 1986, 1997, 2007 e 2016. De forma geral, esperava-se uma tendência natural de crescimento das áreas impermeáveis. No entanto, em função de imagens antigas não possuírem qualidade adequada e da baixa resolução espacial das imagens do satélite Landsat, os valores são variáveis, podendo não seguir esta tendência. A tabelas 5 traz os resultados para cada classificação por bacia e por ano.

Tabela 5 - Classificação das Bacias

Bacia	Ano	Área Impermeável (km²)	Área Permeável (km²)	Área Impermeável (%)	Área Permeável (%)
Bacia 1	**1986**	979.878,90	37.861,01	96,28%	3,72%
	1997	736.486,72	219.052,96	77,08%	22,92%
	2007	968.160,02	56.791,51	94,46%	5,54%
	2016	1.016.838,45	9.014,53	99,12%	0,88%
Bacia 2	**1986**	323.526,91	162.209,09	66,61%	33,39%
	1997	360.959,78	37.432,87	90,60%	9,40%
	2007	358.286,00	128.341,24	73,63%	26,37%
	2016	457.215,72	32.976,57	93,27%	6,73%
Bacia 3	**1986**	520.039,67	43.037,77	92,36%	7,64%
	1997	391.822,99	46.624,25	89,37%	10,63%
	2007	551.421,37	24.208,74	95,79%	4,21%
	2016	581.009,83	1.793,24	99,69%	0,31%
Bacia 4	**1986**	1.010.905,20	300.661,03	77,08%	22,92%
	1997	1.163.936,26	145.829,60	88,87%	11,13%
	2007	1.105.424,39	201.640,93	84,57%	15,43%
	2016	1.249.453,62	66.613,52	94,94%	5,06%
Bacia 5	**1986**	500.314,85	110.193,68	81,95%	18,05%
	1997	475.432,41	65.760,74	87,85%	12,15%
	2007	490.539,61	121.746,24	80,12%	19,88%
	2016	598.955,97	24.882,44	96,01%	3,99%
Bacia 6	**1986**	232.514,37	161.945,81	58,94%	41,06%
	1997	322.986,89	68.759,11	82,45%	17,55%
	2007	310.320,74	85.044,17	78,49%	21,51%
	2016	367.318,42	28.046,48	92,91%	7,09%

Fonte: Autor (2023).

Inicialmente, destaca-se que, para todos os anos classificados, pelo fato do método utilizado basear em amostras por *pixels*, a somatória das áreas de cada um, não coincidem com a área total das bacias. Isto se dá por conta do tamanho dos componentes da imagem de satélite. Na classificação, atribuiu-se aos *pixels* a classificação das nuvens, quando pertinente, para que estas fossem descartadas da porção total de áreas permeáveis e impermeáveis.

Além disso, tomaram-se amostras distribuídas além da área total que compreende as 6 bacias, buscando um melhor treinamento e mais refinado produto obtido. Isto decorre da resolução espacial das imagens do Landsat, combinada com o tamanho pequeno das áreas. Esta estratégia auxiliou na delimitação correta principalmente das áreas permeáveis, já que, em sua maioria, estas são áreas urbanas de terrenos baldios, estradas de terra e áreas verdes no geral. No entanto, considerando *pixels* 30x30m, quando estes usos estão cercados por áreas construídas, uma homogeneidade é transparecida, dificultando a separação e distinção.

. Ao se analisar os anos 1997 e 2007, percebe-se um comportamento distinto para cada bacia, tendo umas o aumento de área impermeável, enquanto outras não. Apesar deste resultado, esse decréscimo da impermeabilização pode não representar qualitativamente que a área não foi urbanizada.

Isto se dá em função de alguns fatores, podendo variar conforme a interpolação dos *pixels* ao realizar a classificação, a forma de renderização, entre outros. No aspecto visual, percebeu-se que houve notória substituição de áreas verdes por construídas, no entanto, em função da baixa resolução, não é possível realizar uma grande discretização de cada pixel.

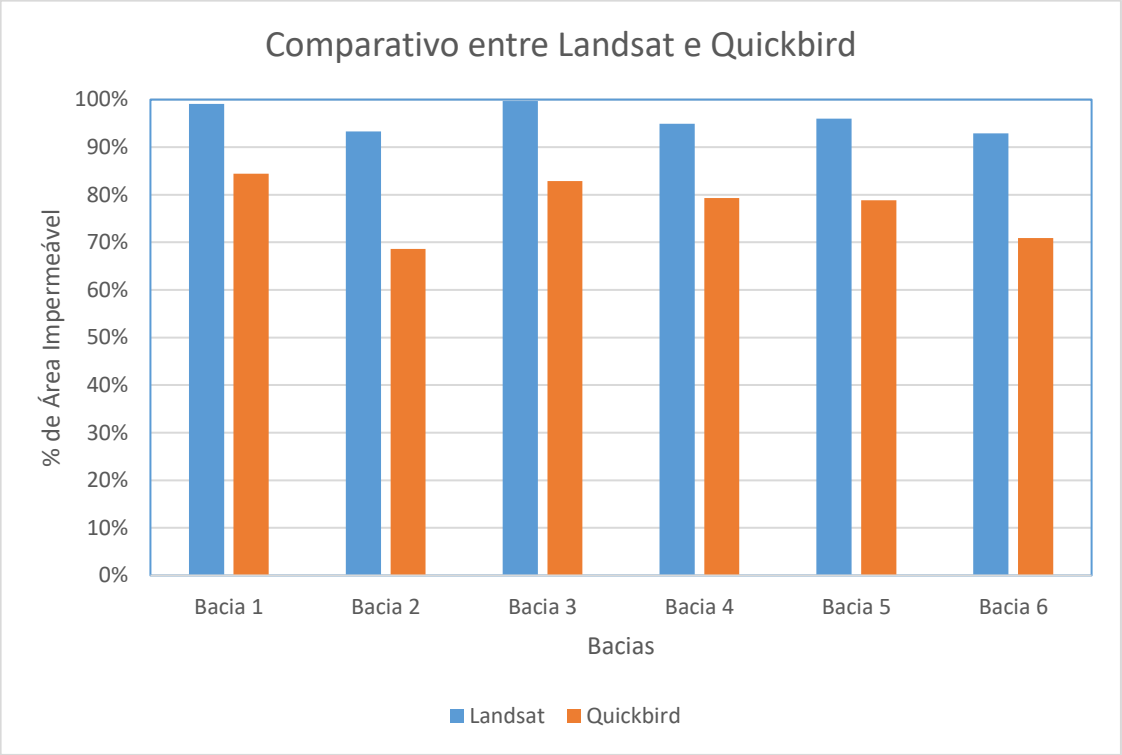
No início do desenvolvimento do trabalho, planejava-se utilizar uma imagem base do Quickbird, já citada na metodologia, com resolução espacial suficiente 0,60x0,60m, para realizar uma classificação de uso e cobertura do solo mais detalhada. De fato, esse resultado é obtido, porém, ao se considerar outros três resultados obtidos em cima de imagens de menor resolução do Landsat, a consolidação torna-se incompatível com as tendências obtidas.

Desta forma, apesar de se ter feito a classificação para o ano de 2016 com a imagem do satélite *Quickbird*, esta será apresentada apenas para efeito de reporte, não sendo utilizada para o seguimento do trabalho com a modelagem. Como dado de

entrada no SWMM, será utilizado o produto obtido a partir de estudo feito em cima da imagem do Landsat 8.

O resultado para o último ano traduz parte da atual situação, tendo a grande maioria da região consolidada como área urbanizada e impermeabilizada. Ainda, esta tendência é reforçada ao se utilizar de uma imagem com resolução 30x30m, que reduz drasticamente o potencial de se identificar classes como terrenos baldios, estradas de terra e demais áreas permeáveis, com exceção das áreas predominantemente verdes. Na Figura 6, é apresentado um comparativo entre ambas classificações.

Figura 6 - Comparativo entre imagens



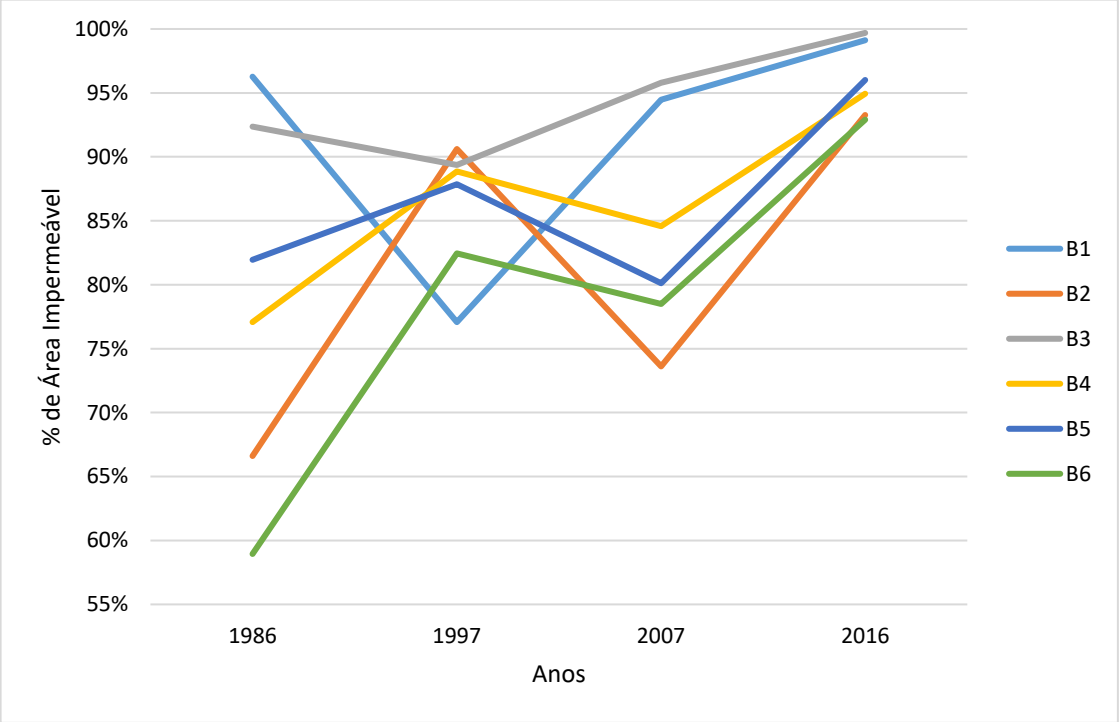
Fonte: Autor (2023).

Nota-se que, ao se utilizar a imagem do Landsat, por se tratar de uma imagem com menor resolução espacial, as áreas já consolidadas urbanisticamente, tendem a ser majoritariamente impermeáveis. Ressaltando que, apesar de a classificação apresentar tal ordem de grandeza, estes valores podem estar distorcidos da realidade pelo fato já aqui citado, a falta de capacidade de distinguir áreas permeáveis como terrenos baldios e estradas de terra de áreas de fato construídas. No entanto, o resultado obtido é um indicador que busca coerência com os dados amostrais do estudo, já que tem a mesma fonte base.

5.3 Avanço da urbanização

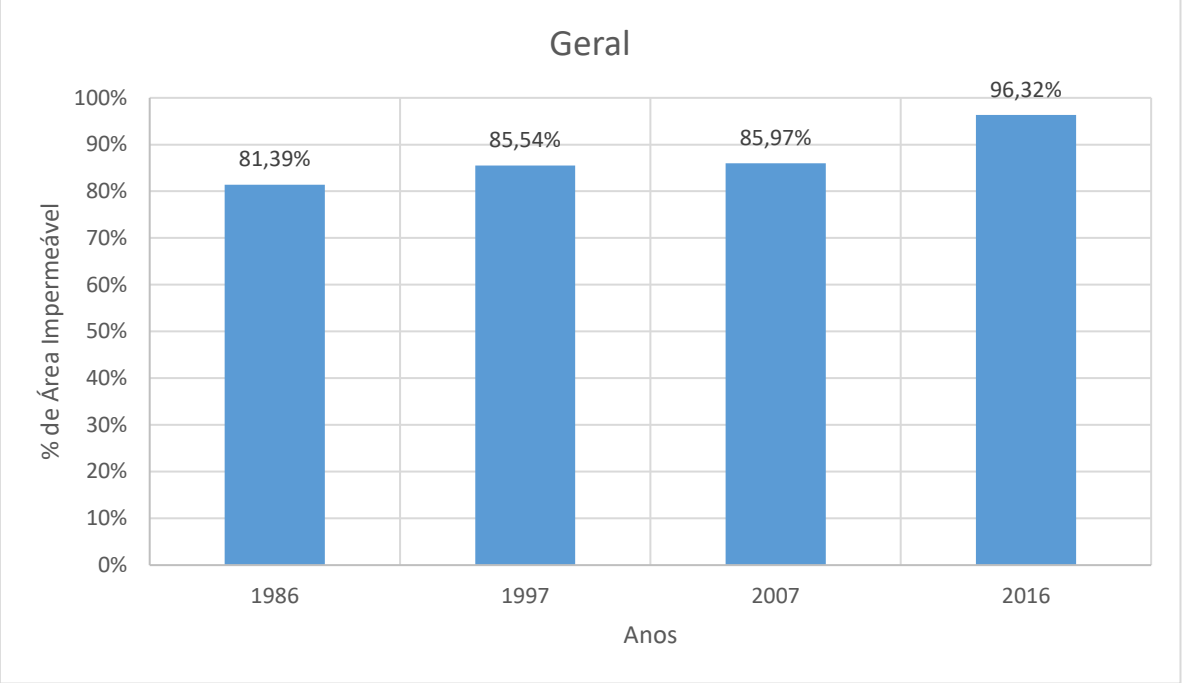
Para avaliação do efeito da urbanização, foram montados diversos pares ordenados, considerando individualmente cada bacia e suas frações de área impermeável com o passar dos anos e um aglomerado geral, utilizando do conjunto da área de todas as regiões hidrográficas. Nesta avaliação, as tendências apresentadas e discutidas no tópico 5.2 ficam visíveis, apresentando uma volatilidade para algumas amostras e com o nítido crescimento urbanístico em função da impermeabilização. As Figuras 7 e 8 mostram estes comportamentos.

Figura 7 - Avanço da Impermeabilização nas Bacias



Fonte: Autor (2023).

Figura 8 - Avanço da Impermeabilização na Área Geral



Fonte: Autor (2023).

É perceptível que, ao se estudar imagens de satélite com baixas resoluções espaciais, a exemplo deste caso, a qualidade do produto varia conforme a área de abrangência, já que para maiores áreas, pode-se obter uma maior qualificação do resultado. Por se tratar de urbanização, em uma capital e em região densamente povoada, o resultado esperado seria constatar o avanço da impermeabilização. No entanto, a delimitação de microbacias necessita de avaliação pontual, porém, com produtos, em mãos, servíveis para macro análises.

É notório que, ao se aumentar a área de estudo, um comportamento esperado é analisado, conforme apresentado na Figura 8. Isto se dá pelo fato de que, apesar de para bacias possuirmos variações abruptas na impermeabilização, como estas áreas são reduzidas, ao aumentar a abrangência de análise, ou seja, as bacias, esta variação de cada *pixel* é compensada, fornecendo um comportamento mais racional para o tópico em questão.

5.4 Avaliação do escoamento superficial

Para a delimitação da chuva de projeto, calculou-se os tempos de concentração de cada sub-bacia e suas intensidades de chuva, conforme metodologia detalhada previamente. A tabela 6, mostra os resultados de cada TC para os tempos de retorno estudados e suas respectivas intensidades de chuva.

Tabela 6 - Tempo de Concentração e Intensidade de Chuva

Tempo de Concentração								
Bacia	Curso D'Água (m)	Curso D'Água (km)	Δh (m)	i (%)	TC (min)	I2anos (mm/h)	I10anos (mm/h)	I50anos (mm/h)
SB01	2332,16	2,33	18,27	0,78%	50	35,10	55,08	86,43
SB02	1189,49	1,19	52,18	4,39%	15	60,19	94,45	148,23
SB03	941,08	0,94	2,747	0,29%	36	41,03	64,39	101,04
SB04	1991,76	1,99	53,95	2,71%	27	46,81	73,45	115,27
SB05	1345,14	1,35	44,83	3,33%	19	55,41	86,95	136,46
SB06	790,07	0,79	44,4	5,62%	10	70,25	110,25	173,02

Fonte: Autor (2023).

Na tabela 6, os valores de intensidade I2anos, I10anos e I50anos correspondem às intensidades relativas aos tempos de retorno de 2, 10 e 50 anos, respectivamente. É fácil notar que, conforme se aumenta o tempo de retorno, maior se é a intensidade da chuva calculada, já que se trata de parâmetros diretamente proporcionais.

Conforme explicitado no tópico de metodologia, o tempo de concentração de 50 minutos foi escolhido para determinação da chuva de projeto, este tempo foi obtido na SB01. Note que, a SB01 possui uma grande área, o maior talvegue entre as bacias e uma baixa declividade quando comparada as demais, isto indicia o motivo pelo elevado tempo de concentração, haja vista que o segundo maior, na SB03, está vinculado a características geométricas semelhantes, apesar de o valor de área não ser diretamente inserido na fórmula de cálculo.

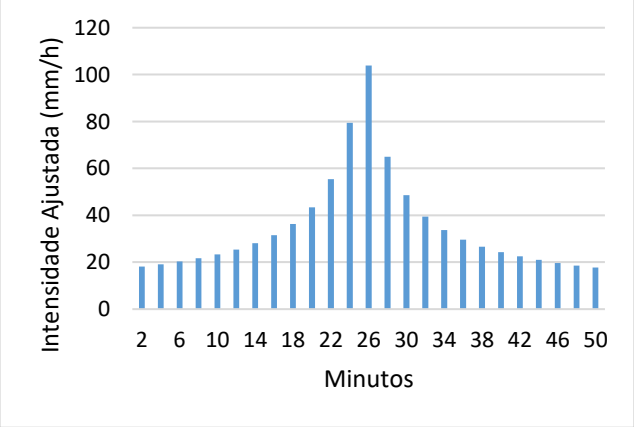
Para TC equivalente a 50 minutos, calculou-se as chuvas de projeto a partir do método dos blocos alternados para cada tempo de retorno. O intervalo de duração de chuva foi de 2 minutos, para gerar mais informações nas bacias com baixo TC, como a SB06, gerando 24 dados de intensidade distribuídos alternadamente como mostra as Figuras 9, 10 e 11, e as tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 – Chuva de Projeto TR 2 Anos

Chuva de Projeto - TR2 Anos e TC = 50 min		
td (min)	I (mm/h)	I Ajustada (mm/h)
2	103,86	18,14
4	91,66	19,15
6	82,76	20,32
8	75,92	21,71
10	70,45	23,39
12	65,95	25,45
14	62,17	28,08
16	58,94	31,53
18	56,14	36,32
20	53,68	43,47
22	51,50	55,38
24	49,54	79,46
26	47,79	103,86
28	46,19	64,97
30	44,74	48,57
32	43,40	39,50
34	42,17	33,71
36	41,04	29,68
38	39,98	26,68
40	39,00	24,36
42	38,08	22,51
44	37,22	20,99
46	36,41	19,71
48	35,65	18,62
50	34,93	17,68

Fonte: Autor (2023).

Figura 9 – Hietograma TR 2 Anos



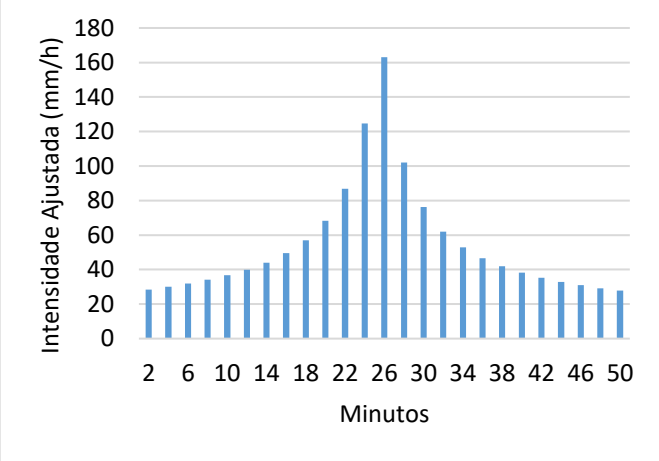
Fonte: Autor (2023).

Tabela 8 - Chuva de Projeto TR 10 Anos

Chuva de Projeto - TR10 Anos e TC = 50 min		
td (min)	i (mm/h)	I Ajustada (mm/h)
2	162,99	28,46
4	143,84	30,05
6	129,88	31,89
8	119,14	34,07
10	110,56	36,70
12	103,50	39,95
14	97,57	44,06
16	92,50	49,48
18	88,10	57,00
20	84,24	68,22
22	80,81	86,92
24	77,75	124,70
26	74,99	162,99
28	72,49	101,96
30	70,20	76,22
32	68,11	61,99
34	66,18	52,91
36	64,40	46,57
38	62,74	41,87
40	61,20	38,24
42	59,76	35,32
44	58,41	32,93
46	57,14	30,93
48	55,94	29,22
50	54,82	27,75

Fonte: Autor (2023).

Figura 10 - Hietograma TR 10 Anos



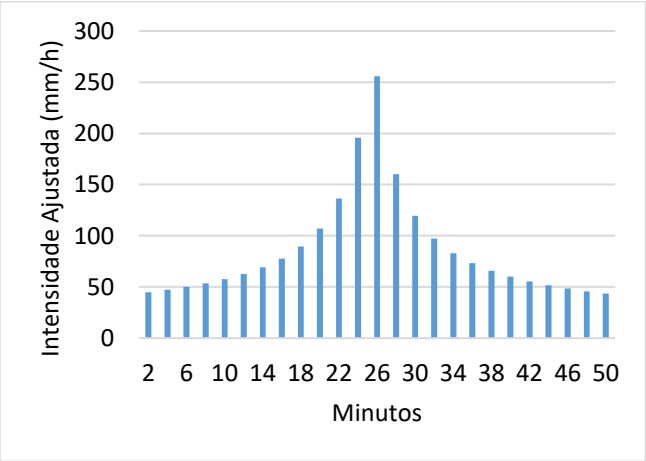
Fonte: Autor (2023).

Tabela 9 - Chuva de Projeto TR 50 Anos

Chuva de Projeto - TR50 Anos e TC = 50 min		
td (min)	i (mm/h)	I Ajustada (mm/h)
2	255,78	44,66
4	225,74	47,15
6	203,83	50,05
8	186,97	53,47
10	173,50	57,60
12	162,42	62,69
14	153,12	69,14
16	145,16	77,65
18	138,26	89,45
20	132,20	107,05
22	126,82	136,40
24	122,02	195,69
26	117,68	255,78
28	113,76	160,01
30	110,17	119,61
32	106,89	97,28
34	103,86	83,03
36	101,06	73,08
38	98,46	65,71
40	96,04	60,00
42	93,78	55,44
44	91,66	51,68
46	89,67	48,54
48	87,79	45,86
50	86,02	43,55

Fonte: Autor (2023).

Figura 11 – Hietograma TR 50 Anos

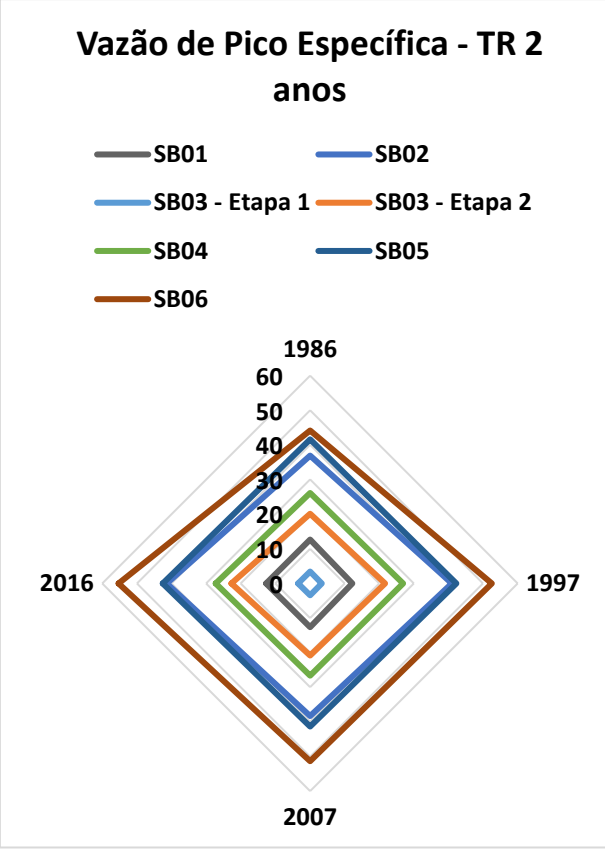


Fonte: Autor (2023).

Pelo método dos blocos alternados, percebe-se que o tempo em que está localizado o pico de intensidade é para duração de 26 minutos, seguido do td = 24 minutos. Esta metodologia é utilizada para realizar melhor distribuição e maior adequação à realidade da chuva simulada. Quando se diferenciou o TR entre 2 e 10 anos, houve uma diferença de aproximadamente 60 mm/h de chuva na intensidade, enquanto isso, para TR 50 anos, obteve-se uma diferença de 90 mm/h no mesmo parâmetro, sendo assim, conforme se eleva o TR, mais torrencial se torna a chuva.

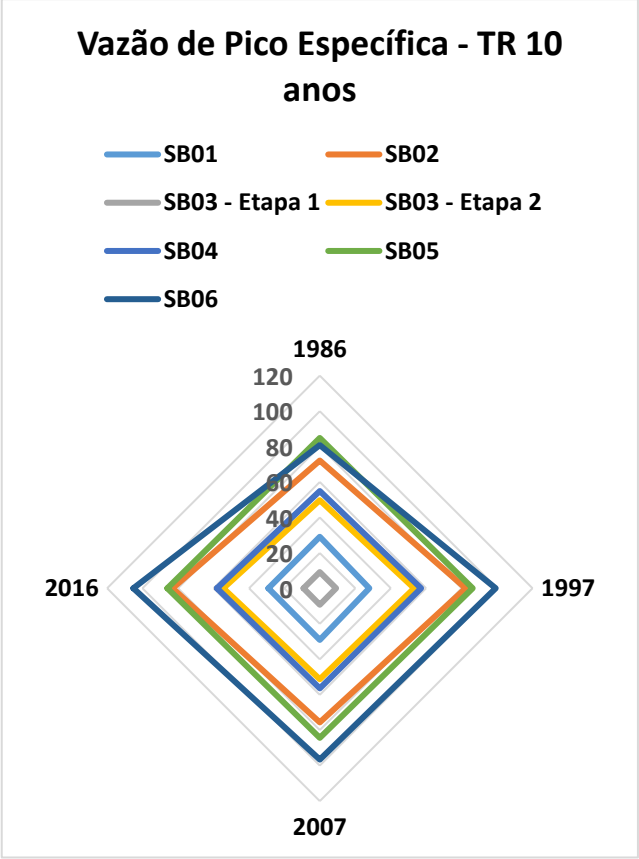
Durante a simulação dos cenários, a vazão produzida em todas as bacias foi a mesma, com exceção da SB03. Isto se deu por conta de a simulação levar em consideração apenas os fatores fixos citados na metodologia, como na área citada existe uma afluência em termos de contribuição de vazão para a etapa 2, esta se mostrou diferente da etapa 1. As Figuras 12 a 17, expõem gráficos do tipo radar que mostram o comparativo entre as vazões de pico específicas em L/s.ha e o volume de escoamento em m³ para a SB03 ao longo dos anos estudados para as duas etapas e TR adotados.

Figura 12 – Vazão pico esp. para TR 2 anos



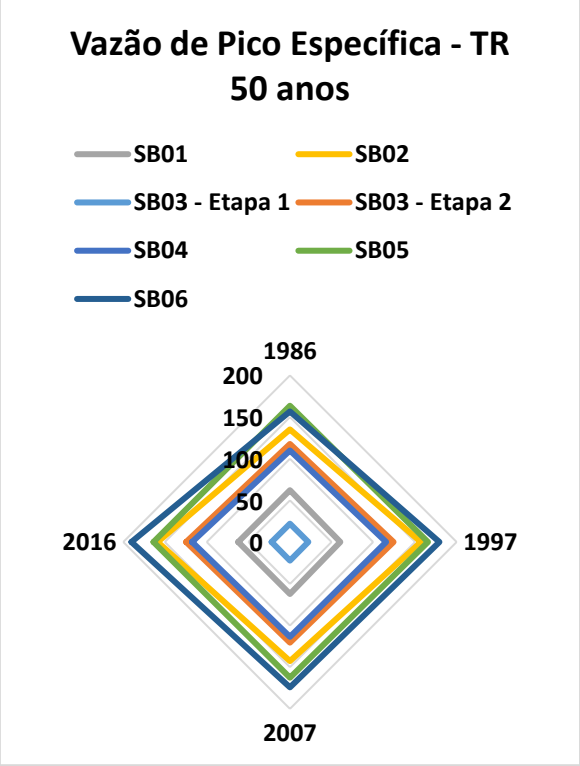
Fonte: Autor (2023).

Figura 13 - Vazão pico esp. para TR 10 anos



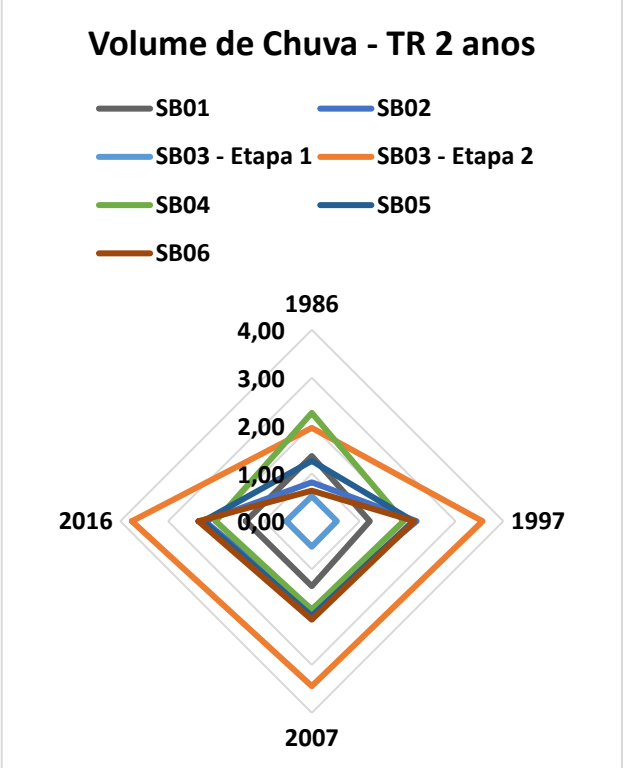
Fonte: Autor (2023).

Figura 14 - Vazão pico esp. para TR 50 anos.



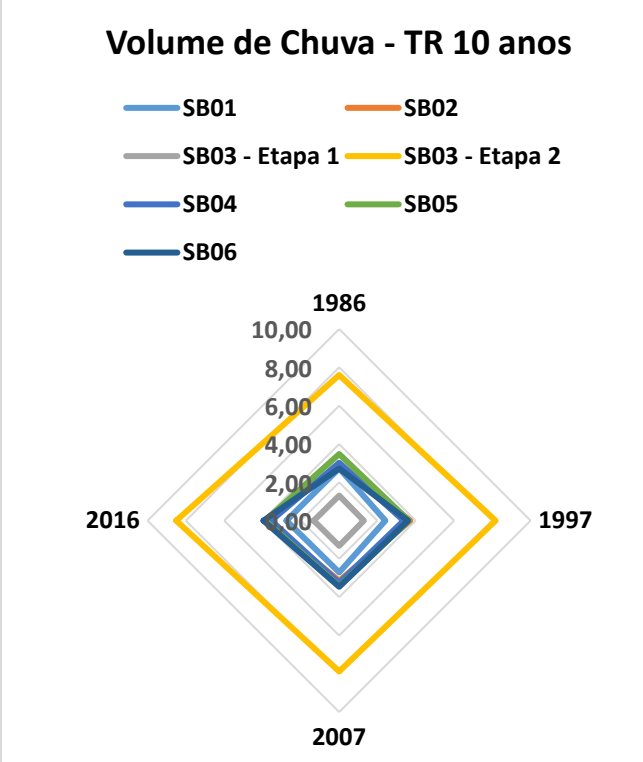
Fonte: Autor (2023)

Figura 15 – Volume de chuva para TR 2 Anos



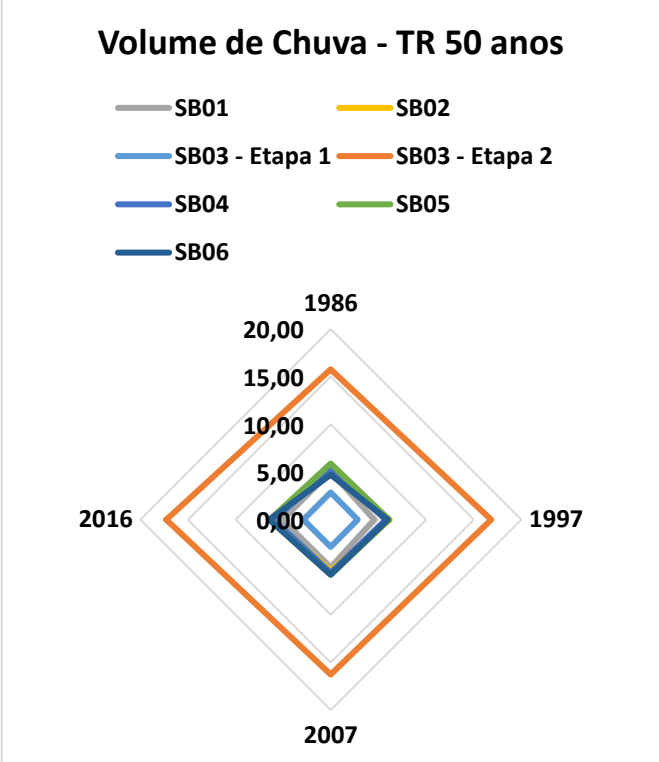
Fonte: Autor (2023).

Figura 16 - Volume de chuva para TR 10 anos.



Fonte: Autor (2023).

Figura 17 - Volume de Chuva TR 50 Anos



Fonte: Autor (2023).

Como forma de expor os resultados obtidos, as tabelas 10, 11 e 12 trazem os valores obtidos para os três tempos de retorno, os quatro anos estudados e as duas etapas delimitadas nos parâmetros estudados.

Tabela 10 - Resultados para TR 2 Anos

TR 2 Anos													
Variável	Sub-Bacia/Ano Simulado	SB1		SB2		SB3		SB4		SB5		SB6	
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2
V (m³)	1986	1,36	1,36	0,82	0,82	0,53	1,95	2,27	2,27	1,26	1,26	0,64	0,64
	1997	1,21	1,21	2,19	2,19	0,52	3,57	1,91	1,91	2,12	2,12	2,14	2,14
	2007	1,35	1,35	1,84	1,84	0,53	3,44	1,84	1,84	1,98	1,98	2,05	2,05
	2016	1,38	1,38	2,24	2,24	0,53	3,76	2,01	2,01	2,27	2,27	2,37	2,37
$Q_{p.esp.}$ (L/s/ha)	1986	12,66	12,66	36,91	36,91	3,42	20,11	26,11	26,11	41,60	41,60	44,16	44,16
	1997	12,24	12,24	41,02	41,02	3,42	21,70	26,91	26,91	42,29	42,29	52,54	52,54
	2007	12,64	12,64	38,32	38,32	3,43	20,83	26,64	26,64	41,34	41,34	51,35	51,35
	2016	12,66	12,66	41,36	41,36	3,43	22,69	27,24	27,24	42,53	42,53	55,29	55,29
Tempo de Pico (min)	1986	60	60	45	45	60	165	45	45	45	45	45	45
	1997	60	60	45	45	60	180	45	45	45	45	45	45
	2007	60	60	45	45	60	180	45	45	45	45	45	45
	2016	60	60	45	45	60	180	45	45	45	45	45	45
Coef. Runoff	1986	0,47	0,47	0,58	0,69	0,18	0,37	0,59	0,73	0,69	0,82	0,55	0,66
	1997	0,42	0,42	0,75	0,75	0,18	0,38	0,66	0,66	0,73	0,73	0,74	0,74
	2007	0,47	0,47	0,63	0,63	0,18	0,38	0,63	0,63	0,68	0,68	0,71	0,71
	2016	0,47	0,47	0,77	0,77	0,18	0,38	0,69	0,69	0,78	0,78	0,81	0,81

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 - Resultados para TR 10 Anos

TR 10 Anos													
Variável	Sub-Bacia/Ano Simulado	SB1		SB2		SB3		SB4		SB5		SB6	
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2
V (m³)	1986	2,73	2,73	2,89	2,89	1,30	7,60	3,02	3,02	3,47	3,47	2,72	2,72
	1997	2,42	2,42	3,72	3,72	1,29	8,17	3,38	3,38	3,65	3,65	3,60	3,60
	2007	2,71	2,71	3,14	3,14	1,32	7,88	3,25	3,25	3,42	3,42	3,46	3,46
	2016	2,75	2,75	3,80	3,80	1,33	8,50	3,54	3,54	3,87	3,87	3,95	3,95
$Q_{p.esp.}$ (L/s/ha)	1986	29,11	29,11	72,11	72,11	9,20	49,76	54,92	54,92	84,86	84,86	80,83	80,83
	1997	27,91	27,91	82,26	82,26	9,18	53,22	57,13	57,13	86,22	86,22	99,21	99,21
	2007	29,06	29,06	75,57	75,57	9,22	51,24	56,39	56,39	84,29	84,29	96,56	96,56
	2016	29,03	29,03	83,07	83,07	9,21	54,45	58,03	58,03	86,02	86,02	105,21	105,21
Tempo de Pico (min)	1986	60	60	45	45	60	135	45	45	45	45	45	45
	1997	60	60	45	45	60	135	45	45	45	45	45	45
	2007	60	60	45	45	60	135	45	45	45	45	45	45
	2016	60	60	45	45	60	135	45	45	45	45	45	45
Coef. Runoff	1986	0,60	0,60	0,63	0,63	0,29	0,51	0,66	0,66	0,76	0,76	0,60	0,60
	1997	0,53	0,53	0,81	0,81	0,28	0,51	0,74	0,74	0,80	0,80	0,79	0,79
	2007	0,59	0,59	0,69	0,69	0,29	0,51	0,71	0,71	0,75	0,75	0,76	0,76
	2016	0,60	0,60	0,83	0,83	0,29	0,51	0,78	0,78	0,85	0,85	0,87	0,87

Fonte: Autor (2023).

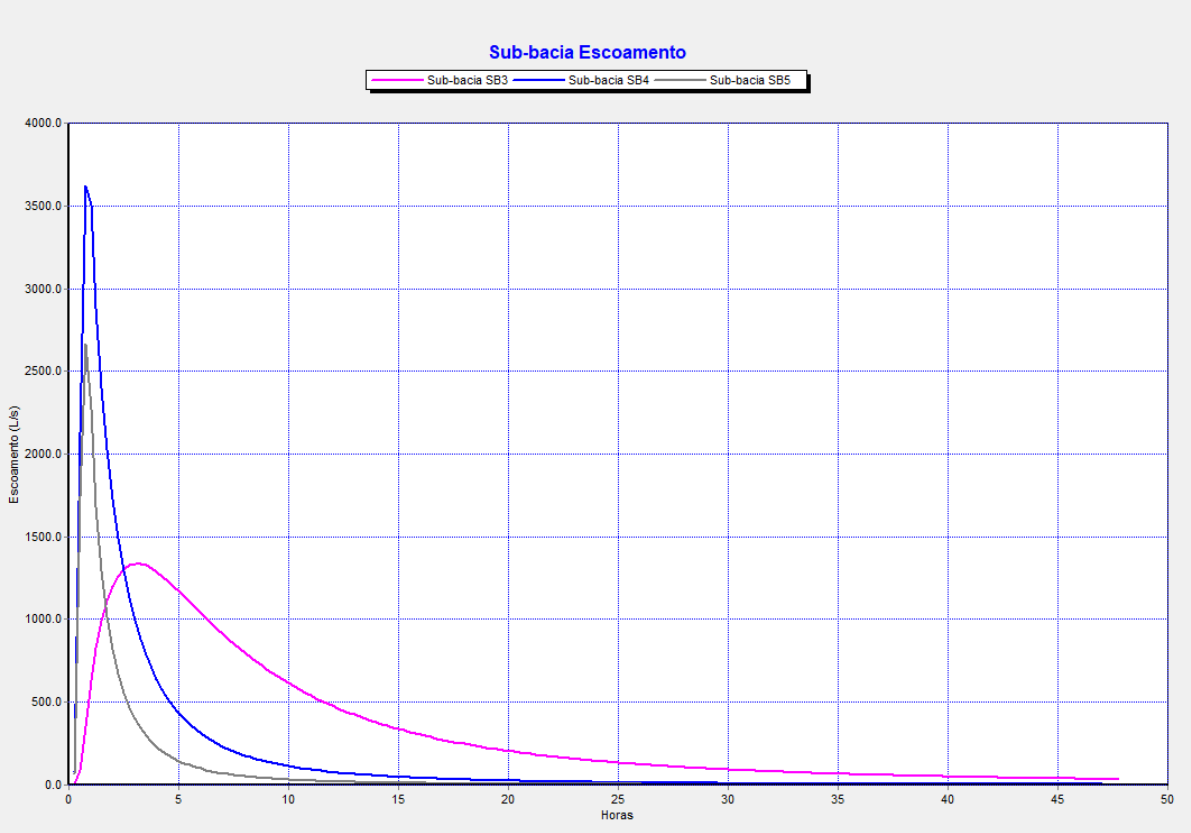
Tabela 12 - Resultados para TR 50 Anos

TR 50 Anos													
Variável	Sub-Bacia/Ano Simulado	SB1		SB2		SB3		SB4		SB5		SB6	
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2
V (m^3)	1986	5,05	5,05	4,96	4,96	2,85	15,77	5,21	5,21	5,88	5,88	4,71	4,71
	1997	4,55	4,55	6,19	6,19	2,82	16,84	5,77	5,77	6,12	6,12	5,98	5,98
	2007	5,02	5,02	5,35	5,35	2,87	16,27	5,58	5,58	5,80	5,80	5,78	5,78
	2016	5,08	5,08	6,31	6,31	2,88	17,28	6,02	6,02	6,42	6,42	6,46	6,46
$Q_{p.esp.}$ (L/s/ha)	1986	62,29	62,29	135,17	135,17	22,10	117,75	109,93	109,93	163,61	163,61	156,77	156,77
	1997	60,43	60,43	157,16	157,16	22,04	124,26	115,39	115,39	165,59	165,59	179,31	179,31
	2007	62,23	62,23	142,72	142,72	22,15	120,55	113,58	113,58	162,62	162,62	174,22	174,22
	2016	62,09	62,09	158,73	158,73	22,06	124,55	117,44	117,44	163,75	163,75	190,21	190,21
Tempo de Pico (min)	1986	45	45	45	45	60	105	45	45	45	45	30	30
	1997	45	45	45	45	60	105	45	45	45	45	45	45
	2007	45	45	45	45	60	105	45	45	45	45	45	45
	2016	45	45	45	45	60	105	45	45	45	45	45	45
Coef. Runoff	1986	0,70	0,70	0,69	0,69	0,40	0,63	0,73	0,73	0,82	0,82	0,66	0,66
	1997	0,64	0,64	0,86	0,86	0,39	0,63	0,81	0,81	0,86	0,86	0,83	0,83
	2007	0,70	0,70	0,75	0,75	0,40	0,63	0,78	0,78	0,81	0,81	0,81	0,81
	2016	0,71	0,71	0,88	0,88	0,40	0,63	0,84	0,84	0,90	0,90	0,90	0,90

Fonte: Autor (2023).

Com estes resultados, fica exposta uma alteração brusca nos parâmetros para a SB03. Acontece que, dadas suas características geométricas, a bacia de forma isolada tem baixa capacidade de geração de vazão. No entanto, após receber as contribuições de seus afluentes, existe um salto na sua geração de escoamento, o que é percebido pelo tempo de pico elevado, já que ela atinge seus máximos valores após o TC adotado para a modelagem. A Figura 18 mostra o escoamento em L/s dessa SB e de suas afluentes ao longo da simulação para o ano de 2016 considerando a etapa 2 e TR 2 anos.

Figura 18 - Escoamento nas Bacias 3, 4 e 5 para 2016 e TR 2 anos

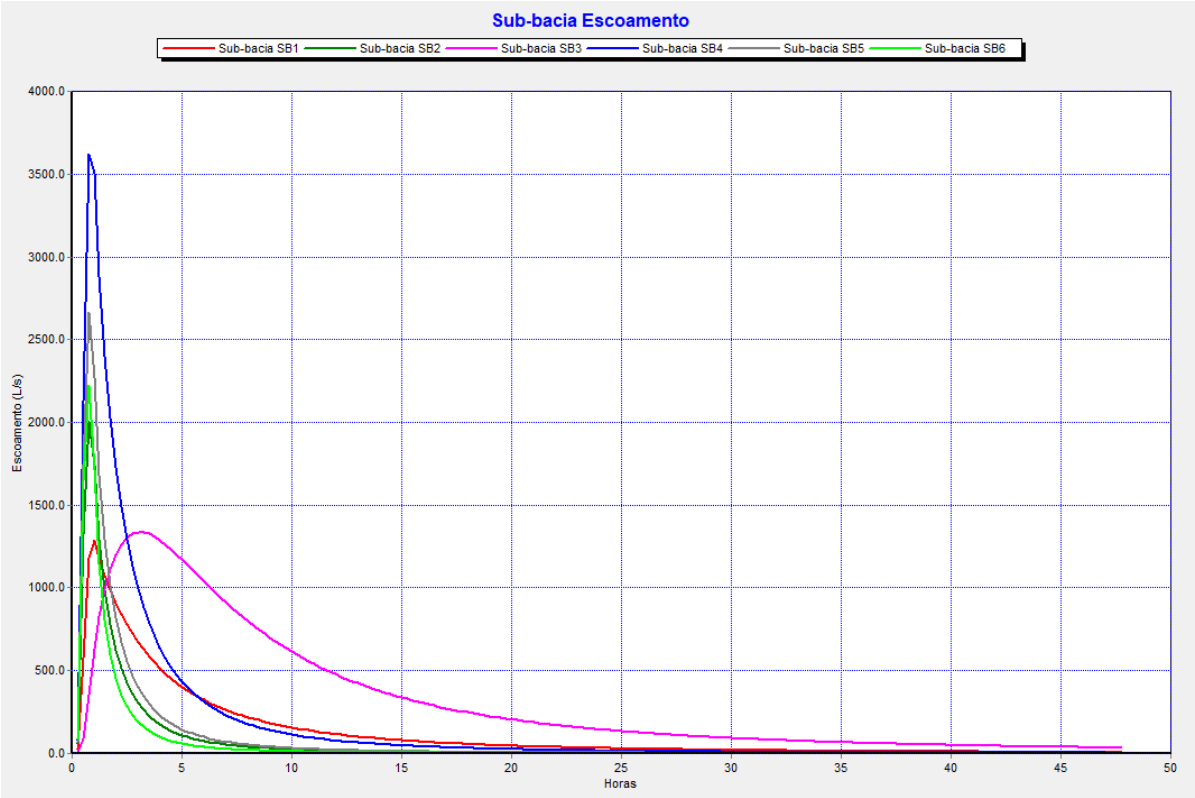


Fonte: Autor (2023).

A Figura 19 mostra o mesmo resultado considerando todas as bacias deste estudo. É de rápida assimilação que, apesar de a SB03 não possuir a maior vazão de pico entre todas as bacias, tem seu tempo de pico elevado e um grande valor de escoamento ao longo do tempo, gerando maiores vazões pra sua área de contribuição com um decaimento muito menos acentuado que nas demais regiões de estudo.

Estes fatores se explicam por conta da alta contribuição advinda das SB04 e 05, já que estas têm seus exutórios na sub-bacia 03. Ademais, não tornando exclusivo o fato, as frações de áreas impermeáveis nela foram sempre superiores a 89%, possuindo baixo potencial de infiltração natural, devido a sua densa urbanização, potencializando a geração de escoamento nesta região.

Figura 19 – Escoamento nas sub-bacias para o ano de 2016 e TR 2 anos

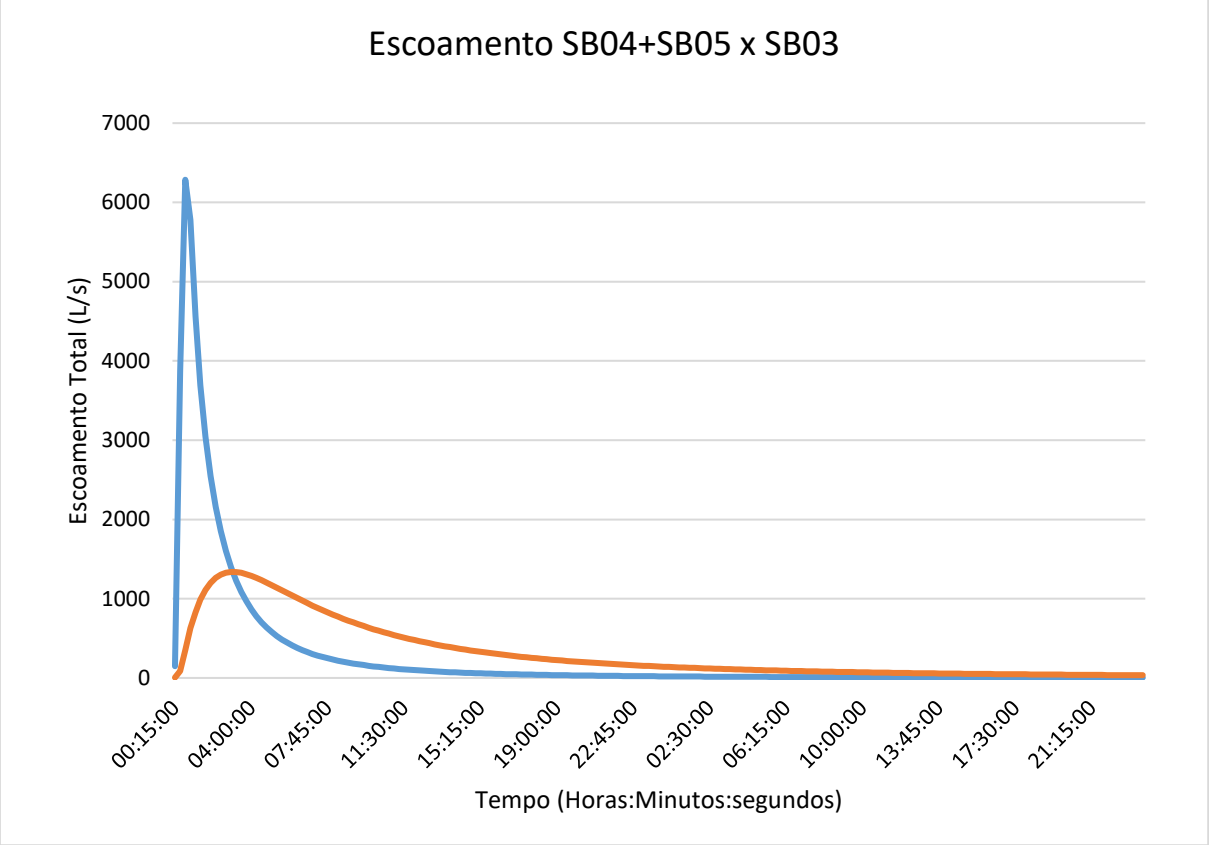


Fonte: Autor (2023).

Conforme já mencionado ao longo deste trabalho, a região geral de estudo possui diversos canais artificiais que visam mitigar o efeito do escoamento superficial nas áreas ocupadas. Apesar de não ser escopo deste projeto avaliar a eficiência destas galerias, percebe-se que há uma influência significativa das características topográficas no entorno da localidade analisada, conforme mostram as Figuras e tabelas anteriores.

Nota-se ainda que, a partir da leitura da Figura 18, a SB03 possui uma função de amortecimento das vazões máximas nas bacias, afluentes das SB 04 e 05. Isto é, as curvas de crescimento e decaimento a partir do momento de contribuição são mais suaves quando comparadas aos demais cenários e bacias. A Figura 20 expõe o hidrogramas somado das bacias 04 e 05 e da 03 comparados num tempo simulado de 48h.

Figura 20 – Hidrograma com SB04 + SB05 comparadas a SB03



Fonte: Autor (2023).

As Figuras de 12 a 17, que tratam dos gráficos radar acerca do volume de chuva e da vazão específica permite a visualização de alguns resultados. Apesar de se ter constatado que há um avanço na urbanização-impermeabilização da área, essa evolução não se reflete significativamente no volume de chuva e no aumento da vazão específica de pico.

Com base nisso, evidentemente o problema de alteração do uso e cobertura do solo tem impacto na geração de vazão, no entanto, estes resultados indicam que devem existir mais problemas que, correlatos a isso, geram eventos críticos na região durante períodos de chuva. Essa situação é semelhante aos dias atuais, onde se encontram problemas de constantes alagamentos e inundações. A avaliação temporal do escoamento demonstra uma baixa variação com o passar dos anos nos parâmetros avaliados, com exceção da SB06.

6 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo foram obtidos com dados de livre acesso da internet e com baixo requisito computacional. No tocante à delimitação das bacias

hidrográficas, ponto inicial do trabalho, ao se utilizar o MDE da missão Topodata, fica nítido que os dados obtidos apesar de conseguir representar a realidade são poucos refinados, isto se dá por conta deste produto ser mais viável para análise de grandes áreas, que não é o caso aqui praticado.

No entanto, apesar desta problemática, o conhecimento empírico da região foi fundamental para que as bacias hidrográficas se tornassem, no mínimo, coerentes. Porém, para estudos que tenham um objetivo mais amplo da mesma área e com diretrizes semelhantes, recomenda utilizar dados com maiores refinos, podendo obter resultados mais direcionados.

Acerca da classificação de uso e cobertura do solo, enfrentou-se a mesma problemática para todos os anos, a utilização do satélite *Landsat* fornece uma classificação grosseira e pouco detalhada. Novamente, isto se dá pela remota área de estudo quando comparada a resolução espacial oferecida pelo produto. Apesar de se dispor de uma imagem para 2016 do satélite *Quickbird*, de qualidade bastante superior, esta qualidade destoante prejudicaria a avaliação temporal da impermeabilização, já que se pode ter maior discretização de cada uso do solo, diferentemente dos outros anos, sendo esta descartada no estudo.

Com a classificação obtida, evidencia-se que houve, de fato um avanço da urbanização na área estudada, no entanto, a os valores de impermeabilização do ano inicial, 1986, já eram, em sua maioria, altos. Isto é, o aumento da cobertura impermeável nestas áreas não é o único fator para o escoamento superficial neste conjunto de áreas ser um problema tão evidente nos dias atuais.

A região levantada possui características topográficas favoráveis ao escoamento superficial, os elevados desníveis fornecem uma maior velocidade desta água, prejudicando a infiltração, que somados ao efeito da impermeabilização pode estar gerando elevadas lâminas de água. Este fator reforça a necessidade de um maior refino nas bacias hidrográficas, para que todas afluências sejam corretamente determinadas e as direções de fluxo sejam corretamente entendidas.

Para compreender totalmente a complexidade da região, necessita-se de mais estudos que incluam os comportamentos dos canais afluentes à Laguna Mundaú, para que estes sejam simulados em tempo seco e tempo de chuva. O resultado desta modelagem, adicionado à geração de escoamento pode fornecer situações reais de eventos chuvosos da região, podendo ser determinada a representação de cada um em cenários de alagamento.

Por fim, foi constatado o avanço da urbanização na área estudada ao longo dos anos e é evidente que esse crescimento influenciou no aumento do escoamento superficial da região. No entanto, essa alteração não se mostra tão significativa ao se realizar a leitura gráfica dos parâmetros expostos no tópico de resultados, já que, não se tem alterações bruscas com grandes desvios, este fato é notado nas Figuras de 12 a 17. Portanto, a existência de problemas hidrológicos graves em eventos chuvosos na região não se dá, apenas, em função da alta impermeabilização da área.

Na interpretação topográfica, algumas bacias mais planas, a exemplo da SB03, funcionam como um reservatório de acumulação, amortecendo as vazões afluentes de outras sub-bacias (Figura 18) com características mais íngremes (SB04 e SB05). Esta relação, gera um ponto de acúmulo nas regiões de desague das bacias, que atrelado aos remansos e cota de enchente da laguna pode ser um dos potenciais causadores dos problemas da região.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. J. P.; FERREIRA NETO, J. V. Análise do Processo de Urbanização e Impermeabilização do Solo da Bacia Endorreica do Tabuleiro do Martins, Maceió-AL. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPEGE, 11., 2015, Presidente Prudente. Anais [...] . Presidente Prudente: 2015. p. 5711-5722. Disponível em: http://www.enanpege.ggf.br/2015/anais/arquivos/19/532.pdf. Acesso em: 23 mai. 2023.

BARROS, A. M. de. Estudo de medidas descentralizadas para o controle do escoamento urbano: aplicação à bacia hidrográfica do Riacho do Sapo - Maceió/AL. 2015. 136 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015

BARROS, A. M. de; NEVES, M. G. F. P. das; 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, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 220, 14 dez. 2016. Universidade Federal da Bahia. http://dx.doi.org/10.9771/gesta.v4i2.15636.

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (ed.). IBGE Cidades. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/panorama. Acesso em: 20 mai. 2023.

DENARDIN, J. E.; FREITAS, P. L. Características Fundamentais da Chuva no Brasil. Pesquisa Agropecuária, v. 17, p. 1409-1416, 1982.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias). Diagnóstico Ambiental do Município de Maceió. Anexo I-f. Levantamento Semi detalhado de Solos, 2005.

FU, G.; LIU, C.; ZHOU, R.; SUN, T. Classification for High Resolution Remote Sensing Imagery Using a Fully Convolutional Network. Remote Sensing, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 498, 18 maio 2017. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/rs9050498.

GONG, P.; LI, X.; WANG, J.; BAI, Y.; CHEN, B.; HU, T.; LIU, X; XU, B.; YANG, J.; ZHANG, W.; ZHOU, Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. Remote Sensing Of Environment, [S.L.], v. 236, p. 111510-111522, jan. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111510

HAMILTON, B.; COOPS, N. C.; LOKMAN, K. Time series monitoring of impervious surfaces and runoff impacts in Metro Vancouver. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 760, p. 143873, mar. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143873.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sinopse do Censo Demográfico 2010: Brasil. 2010a. Disponível em: https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8. Acesso em: 7 mai. 2023.

JAPIASSÚ, L. A. T. Expansão Urbana de Maceió, Alagoas: Caracterização do Processo de Crescimento Territorial Urbano em Face do Plano de Desenvolvimento -

de 1980 a 2000. 2015. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Maryland, v. 65, n. 5, p. 611-622, maio 1999. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1999journal/may/1999_may_611-622.pdf. Acesso em: 7 mai. 2023.

KEYS, L.; BAADE, J. Uncertainty in Catchment Delineations as a Result of Digital Elevation Model Choice. Hydrology, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 13, 1 fev. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/hydrology6010013.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration in small agricultural watersheds, Civil Engineering, v. 10, n. 6, p.362-, 1940.

LEPESKA, Tomáš. The Impact of Impervious Surfaces on Ecohydrology and Health in Urban Ecosystems of Banská Bystrica (Slovakia). Soil & Water Res., p. 29-36. nov. 2016.

LI, X. et al. Response of vegetation phenology to urbanization in the conterminous United States. Global Change Biology, [S.L.], v. 23, n. 7, p. 2818-2830, 18 dez. 2016. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13562.

MACEIÓ. Lei Municipal nº 6.755, de 24 de maio de 2018. Estabelece a Política Municipal de Saneamento Básico do Município de Maceió e dá outras providências. Maceió, AL, 1 jun. 2018.

MENEZES FILHO, F. C. M. de. Estimativa das áreas impermeáveis de bairros de Porto Alegre - RS como etapa ao planejamento urbano. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 35, n. 1, p. 33-42, jul. 2013. Disponível em: http://oaji.net/articles/2017/16021488890208.pdf. Acesso em: 24 mai. 2023.

MENEZES FILHO, F. M. de; TUCCI, C. E. M. Alteração na relação entre densidade habitacional x área impermeável: Porto Alegre-RS. Rega: Revista de Gestão de Água da América Latina, Rega, v. 9, n. 1, p. 49-55, jan. 2012. Disponível em: http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/04/artigoregaareaimpermeavel.pdf. Acesso em: 01 jun. 2023.

MILLER, J. D.; HESS, T. Urbanization impacts on storm runoff along a rural-urban gradient. Journal Of Hydrology, [S.L.], v. 552, p. 474-489, set. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.025.

MOTTA, José C.; TUCCI, Carlos E. M.. Simulation of the urbanization effect in flow. Hydrological Sciences Journal, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 131-147, jun. 1984. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/02626668409490930.

STANKOWSKI, S. J., 1972: Population density as an indirect indicator of urban and suburban land-surface modifications. Professional Paper, Rep. 800B, U.S. Geological Survey, 6 pp. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=XUzwAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=SL2-

PA219&ots=wBJyAo8VRH&sig=e73zpQHadH5KOeyTm1mpN4DowjA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 12 jun. 2023.

TUCCI, C. E. M, BRAGA Jr. B. P. F; SILVEIRA, A. Avaliação do impacto da urbanização nas cheias urbanas. RBE, Caderno de Recursos Hídricos. Vol.7, n.1, 1989.

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Org.). **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. Escrituras Editora, 3ª ed. São Paulo, 2006. Capítulo 12, p. 399-432.

WENG, Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods, and trends. Remote Sensing Of Environment, [S.L.], v. 117, p. 34-49, fev. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030.