



CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE

NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

SÉRGIO MANOEL DA SILVA

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

O EFEITO DAS TÉCNICAS DE INFILTRAÇÃO EM UMA REDE DE
DRENAGEM URBANA: ESTUDO DE CASO PARA A CIDADE DO
RECIFE

Caruaru

2018

SÉRGIO MANOEL DA SILVA

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
apresentado ao curso de ENGENHARIA
CIVIL DO CENTRO ACADÊMICO DO
AGRESTE - CAA, DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE, como
parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de BACHAREL EM ENGENHARIA
CIVIL.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Caruaru

2018

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4-124

S586e Silva, Sérgio Manoel da.
O efeito das técnicas de infiltração em uma rede de drenagem urbana: um estudo de caso para a cidade do Recife. / Sérgio Manoel da Silva. – 2018.
58f. ; il. : 30 cm.

Orientador: Artur Paiva Coutinho.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Drenagem urbana. 2. Geoprocessamento. 3. Infiltração. 4. Recursos hídricos. I. Coutinho, Arthur Paiva (Orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2018-141)

SÉRGIO MANOEL DA SILVA

O EFEITO DAS TÉCNICAS DE INFILTRAÇÃO EM UMA REDE DE DRENAGEM URBANA: ESTUDO DE CASO PARA A CIDADE DO RECIFE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste-CAA, da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato SÉRGIO MANOEL DA SILVA aprovado com NOTA _____.

Caruaru, 09 de agosto de 2018.

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. José Martins de França Neto: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Ms. Severino Martins dos Santos Neto: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Vitor Hugo de Oliveira Barros: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina de TCC)

A Deus pelas oportunidades e as
pessoas que colocou em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado a vida, saúde e meios para essa conquista.

À minha família, em especial à minha mãe que sempre é o combustível para realização dos meus sonhos.

À minha noiva Karina, por estar sempre me apoiando e me ajudando em muitos momentos difíceis.

Aos meus amigos irmãos companheiros de curso, que tornaram essa jornada menos árdua.

Aos todos os meus amigos que torcem e contribuem para o meu sucesso.

Ao professor Dr. Artur Paiva Coutinho, pela paciência, pela ajuda e conselhos ao longo do curso e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e demais colaboradores da UFPE - Centro Acadêmico do Agreste, os pilares que sustentam essa instituição, pela dedicação.

RESUMO

Com o crescimento da população intensificou-se a urbanização e a impermeabilização do solo, aumentando o escoamento superficial e a ocorrência de cheias. Diante desta problemática destacam-se as técnicas de infiltração, contribuindo para o restabelecimento do ciclo hidrológico. Este estudo, teve como objetivo principal avaliar o efeito de trincheiras de infiltração em uma rede de drenagem urbana na cidade do Recife-PE. No ambiente QGIS, foi delimitada a área de contribuição para o ponto crítico de alagamento na Avenida Dois Rios no Ibura, Recife-PE, o levantamento da topologia e uso e ocupação do solo da região. Escolheu-se uma sub-bacia da área delimitada, na qual, realizou-se o traçado e o dimensionamento da rede de drenagem pluvial pelo método racional. A partir do dimensionamento das galerias foi possível gerar os dados para a simulação da rede no SWMM. Inicialmente o sistema de drenagem foi modelado sem um uso de dispositivo de controle, apenas alterando o tipo de solo, em seguida a rede de drenagem foi simulada considerando o uso de trincheiras de infiltração na proporção de 2% em relação a área total de cada subárea. Para o evento chuvoso de 17 de maio de 2013, com 150,8 mm de precipitação em 13 horas, o uso de trincheiras de infiltração reduziu em até 8,62% o pico máximo de vazão, e para precipitações de menor intensidade, constatou-se uma eficiência de até 49%. A utilização de trincheiras de infiltração reduz a vazão máxima, diminuindo a ocorrência de cheias na região.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Drenagem urbana. Trincheira de infiltração. SWMM

ABSTRACT

As population increased, urbanization and soil sealing intensified, increasing surface runoff and the occurrence of floods. In the face of this problem, the techniques of infiltration stand out, contributing to the re-establishment of the hydrological cycle. This study had as main objective to evaluate the effect of infiltration trenches in an urban drainage network in the city of Recife-PE. In the QGIS environment, the area of contribution to the critical point of flooding in the Dois Rios Avenue in Ibura, Recife-PE, was delimited the survey of the topology and use and occupation of the soil of the region. A sub-basin was chosen from the delimited area, in which the drainage and sizing of the drainage network was carried out by the rational method. From the sizing of the galleries it was possible to generate the data for the simulation of the network in SWMM. Initially the drainage system was modeled without a control device, only altering the type of soil, then the drainage network was simulated considering the use of infiltration trenches in the proportion of 2% in relation to the total area of each subarea. For the rainy event of May 17, 2013, with 150.8 mm of precipitation in 13 hours, the use of infiltration trenches reduced the maximum flow peak by up to 8.62%, and for lower intensity precipitations, up to an efficiency of up to 49%. The use of infiltration trenches reduces the maximum flow, reducing the occurrence of floods in the region.

Keywords: Geoprocessing. Urban drainage. Infiltration trench. SWMM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Taxa de Urbanização Brasileira.	15
Figura 2. Características dos leitos do rio.	16
Figura 3. Ciclo hidrológico local de antes e depois da urbanização.	17
Figura 4. Adensamento urbano bairro do Pina, Recife – PE.	17
Figura 5. Picos máximos de vazão antes e depois da urbanização.	18
Figura 6. Plano de infiltração com valo.	20
Figura 7. Valos de infiltração	20
Figura 8. Bacia de percolação.	21
Figura 9. Filtro, vala e trincheira.	21
Figura 10. Pavimentos permeáveis.	22
Figura 11. Poço de infiltração.	23
Figura 12. Componentes de um Sistema de Informações Geográficas.	24
Figura 13. Alguns softwares de análise espacial utilizados no Brasil.	25
Figura 14. Localização do ponto crítico de alagamento e área de contribuição.	28
Figura 15. Etapas de processamentos para obtenção da área de contribuição do ponto crítico de alagamento.	29
Figura 16. Detalhamento da bacia hidrográfica.	30
Figura 17. Superposição imagem de satélite do Google e a área de contribuição.	31
Figura 18. Mapeamento das diferentes coberturas superficiais no QGIS.	33
Figura 19. Localização da sub-bacia escolhida.	35
Figura 20. Linhas de fluxo sub-bacia 10.	36
Figura 21. Traçado da rede de drenagem de água pluvial.	36
Figura 22. Precipitação utilizada na modelagem.	42
Figura 23. Detalhe típico de uma trincheira do modelo.	43
Figura 24. Modelagem da rede para o solo tipo areia.	44
Figura 25. Mapa da quantidade de trincheira (%) por subárea.	45
Figura 26. Mensagem de erro da simulação solo de areia.	46
Figura 27. Gráficos de vazão sem o uso de trincheiras de infiltração para diferentes tipos de solo.	47
Figura 28. Mensagem de erro da simulação solo de areia.	48
Figura 29. Gráficos de vazão com o uso de trincheiras de infiltração para diferentes tipos de solo.	49

Figura 30. Rede simulada sem trincheira de infiltração e com trincheira de infiltração para o solo de areia.....	51
Figura 31. Rede simulada sem trincheira de infiltração e com trincheira de infiltração para o solo franco argilo arenoso.	52
Figura 32. Linhas de fluxo para a bacia delimitada	57
Figura 33. Elevação da superfície da bacia delimitada com o <i>plugin Qgis2threejs</i> ...	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de C baseados nas características detalhadas das diversas superfícies.....	32
Tabela 2. Valores adotados de C para a área de estudo.	33
Tabela 3. Valores de coeficiente de escoamento para as sub-bacias e para toda bacia.	34
Tabela 4. Valores típicos em armazenamento em depressões.....	40
Tabela 5. Coeficiente n de Manning – Escoamento à superfície livre.	40
Tabela 6. Parâmetros do Modelo de infiltração de Green – Ampt para diferentes tipos de Solo	42
Tabela 7. Comparativo da vazão máxima na rede para as duas situações de simulações.	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1 Urbanização	15
3.2 Estruturas de Drenagem Urbana	16
3.3 Geoprocessamento	23
3.4 Pernambuco Tridimensional	25
3.5 Modelos Hidrológicos	26
4. METODOLOGIA	28
4.1 Área de Estudo	28
4.1.1 Delimitação da Área de Contribuição para o Ponto Crítico de Alagamento	29
4.2 Caracterização das Sub - bacias.....	31
4.3 Rede de Drenagem Urbana.....	34
4.4 Vazão de Enchente.....	37
4.4.1 Coeficiente de Escoamento Superficial	37
4.4.2 Intensidade da Chuva.....	38
4.5 Parâmetros para a Modelagem da Rede.....	39
4.5.1 Subáreas	39
4.5.2 Junções/ Nós.....	41
4.5.3 Infiltração.....	41
4.5.4 Chuvas	42
4.6 Modelagem sem Trincheira de Infiltração	44
4.7 Modelagem com Trincheiras de Infiltração.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
5.1 Simulações sem as Trincheiras de Infiltração	46
5.2 Simulações com as trincheiras de infiltração.....	48
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE A – LINHAS DE FLUXO	57
APÊNDICE B – ELEVAÇÃO DE SUPERFÍCIES.....	58

1. INTRODUÇÃO

Com aumento da população e consequente ampliação das cidades, há a necessidade, principalmente nos grandes centros urbanos, de um acompanhamento sustentável da infraestrutura urbana. O conhecimento das modificações realizadas no solo decorrentes do uso e ocupação é essencial para identificar a influência no escoamento da bacia devido à impermeabilização de sua superfície, auxiliando na elaboração de medidas que permitam o desenvolvimento sustentável da bacia (GURGEL e RIGHETTO, 2016).

Soma-se a este cenário o crescimento vertical imobiliário e os precários sistemas de coleta e tratamento de esgotos cloacais, que não atendem à demanda do crescimento urbano, tornando-se mais um contribuinte dos sistemas de micro e macrodrenagem. As redes de micro drenagem tornaram-se subdimensionadas e poluídas, provocando as já conhecidas consequências, como inundações e proliferação de doenças com veiculação hídrica (SILVA e CABRAL, 2014).

Para compensar os efeitos da urbanização e da impermeabilização do solo, destacam-se as técnicas compensatórias, as quais constituem em medidas de controle de escoamento na fonte de geração, aplicadas de forma difusa na bacia hidrográfica. Tais técnicas têm o objetivo principal de aumentar a parcela da água pluvial retida ou infiltrada.

Nesse contexto, valas, trincheiras e poços de infiltração constituem alternativas que visam propiciar a infiltração em áreas reduzidas e sob condições controladas. O grande entrave à aplicação segura dessas estruturas reside na determinação e na manutenção das taxas de infiltração de projeto, as quais dependem de aspectos ligados ao solo, tais como umidade, profundidade do lençol freático e condutividade hidráulica (LUCAS et al., 2015).

Como alternativa para solucionar dificuldades de previsão e estimativa de capacidade de escoamento de uma determinada rede de drenagem urbana, faz-se uso de aplicação de modelos matemáticos que possibilitam identificar pontos críticos, antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos, fundamentando a viabilidade de implantação e a tomada de decisão.

Segundo Garcia (2005), um dos primeiros modelos computacionais para análise qualitativa e quantitativa associada ao escoamento gerado em áreas urbanas,

o *Storm Water Management Model* (SWMM) é usado para estimar os sistemas de drenagem de água e escoamento decorrente de tempestade.

O (SWMM) permite utilizar diferentes equações de infiltração e esquemas de propagação de fluxo, definidos conforme a disponibilidade de dados de entrada e escolha do modelador (SOUZA et al., 2013).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito do uso de trincheiras de infiltração em uma rede de drenagem na cidade do Recife.

2.2 Objetivos Específicos

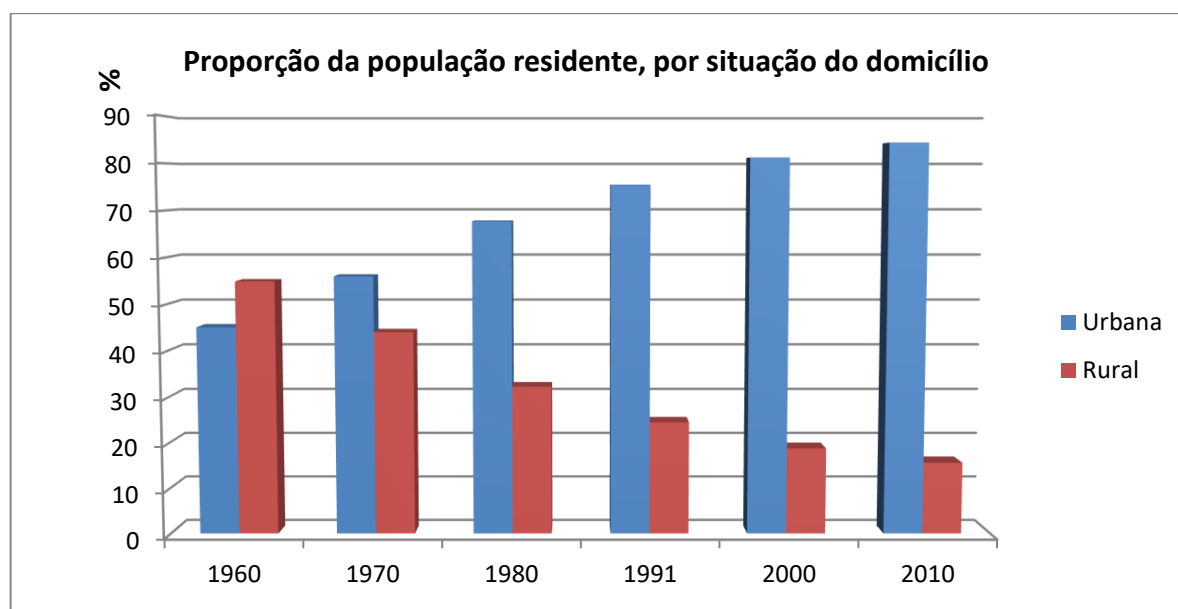
- Simular uma rede fictícia de drenagem urbana na Cidade do Recife utilizando o SWMM.
- Avaliar o uso de técnicas de infiltração de água pluviais no desempenho de uma rede de drenagem na cidade do Recife.
- Verificar o efeito do uso de trincheiras de infiltração através de simulação numérica em uma rede de drenagem na cidade do Recife.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Urbanização

O último censo divulgado pelo IBGE, em 2010, revela que o Brasil atingiu a marca de 190.755.799 habitantes. Deste total, 84,4% habita a área urbana. A estimativa é que a população brasileira atinja 259,8 milhões a partir do ano de 2020 (IBGE, 2010). O crescimento da população urbana tem sido acelerado nas últimas décadas no Brasil, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1. Taxa de Urbanização Brasileira.



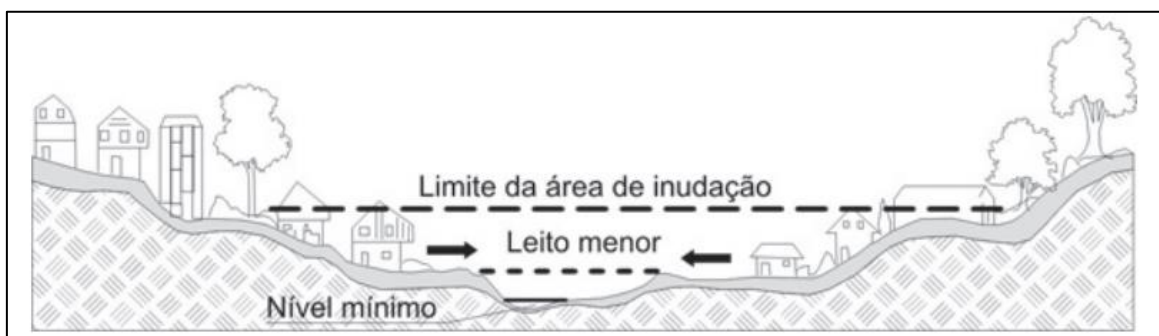
Fonte: censo IBGE (2010)

O desenvolvimento urbano brasileiro tem sido concentrado em regiões metropolitanas na capital dos estados e cidades polos regionais. Segundo Tucci (2008), os principais problemas relacionados com a infraestrutura e a urbanização são:

- Grande concentração populacional em pequenas áreas;
- Aumento da periferia das cidades;
- A urbanização é espontânea e o planejamento é realizado apenas para a área ocupada pela população de renda média e alta;

Parte importante da população vive em um conjunto de habitações precárias, portanto, existem a cidade formal e a informal. A gestão urbana geralmente atinge somente a primeira. Essas regiões juntamente com áreas ribeirinhas (Figura 2) estão mais sujeitas a sofrer inundações provocadas pelo escoamento pluvial. A inundação é mais intensa quando as regiões ribeirinhas sofrem influência de áreas urbanizadas (TUCCI, 2008).

Figura 2. Características dos leitos do rio.



Fonte: TUCCI (2008).

3.2 Estruturas de Drenagem Urbana

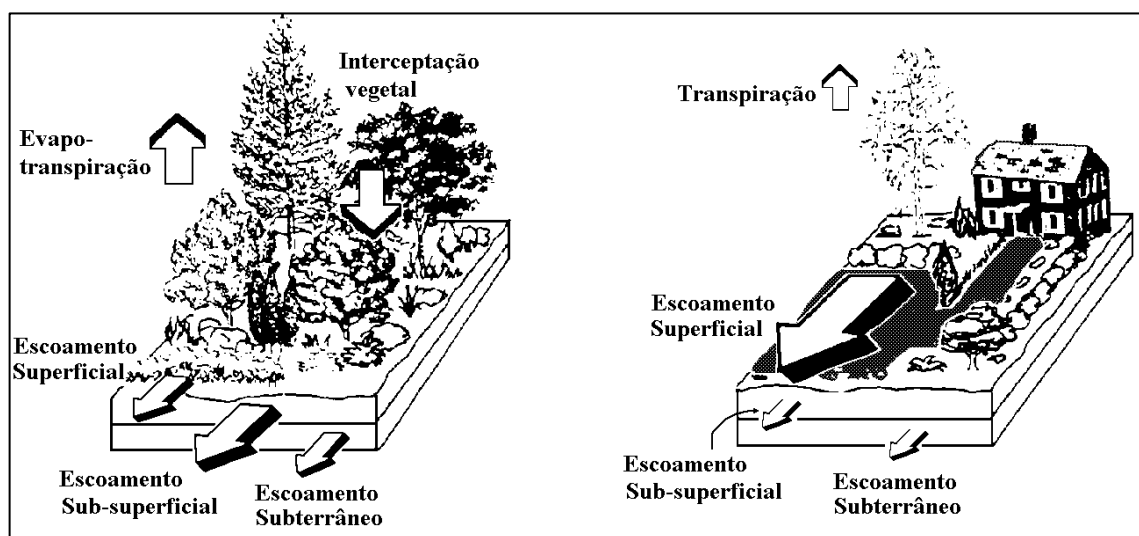
Os sistemas de drenagem urbana no Brasil se basearam na busca do sistema hidráulicamente mais eficiente. Focado em uma visão higienista, a noção do saneamento (no sentido de tornar o ambiente sã) representa a necessidade de “sempre drenar”, criando estruturas de micro e macrodrenagem para conduzir a água para fora das cidades. Esta abordagem resulta no próprio conceito de sistema de drenagem urbana adotado no Brasil, presente na maioria dos manuais de drenagem urbana: conjunto de elementos destinados a recolher as águas pluviais precipitadas sobre uma determinada região e que escoam sobre sua superfície, conduzindo-as a um destino final (SOUZA, 2013).

Em uma visão simplista, o problema seria apenas de calcular vazões e dimensionar os condutos e galerias para transportá-las. Ainda segundo Souza (2013), essa abordagem resulta na divergência entre o planejamento das cidades e o desenvolvimento sustentável dos sistemas de drenagem: com raras exceções, a cidade modificou o ciclo hidrológico, ignorou os cursos d'água na ocupação do espaço, ocupando áreas ribeirinhas e deixou para a técnica de drenagem resolver os problemas de alagamentos e ocupações urbanas.

Para Tucci e Bertoni (2003), o crescimento urbano altera a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural.

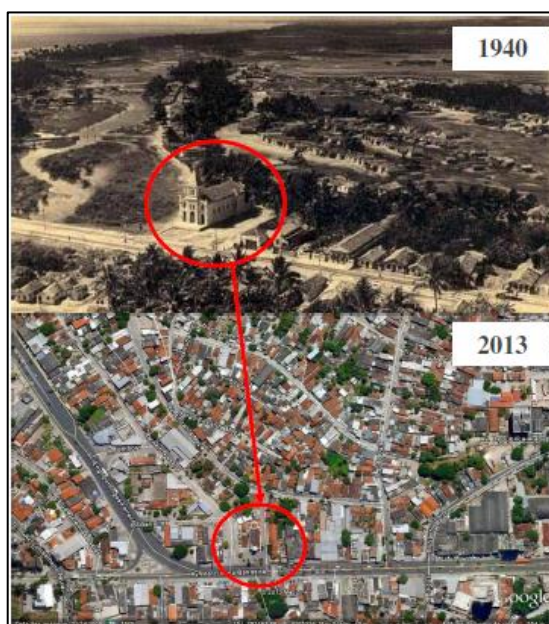
Com a urbanização, a cobertura da bacia é alterada para pavimentos impermeáveis e são introduzidos condutos para escoamento pluvial, diminuição da infiltração no solo, aumento do escoamento superficial, redução do nível do lençol freático e o escoamento subterrâneo e redução da evapotranspiração (Figura 3 e Figura 4).

Figura 3. Ciclo hidrológico local de antes e depois da urbanização.



Fonte: TUCCI (1997).

Figura 4. Adensamento urbano bairro do Pina, Recife – PE.

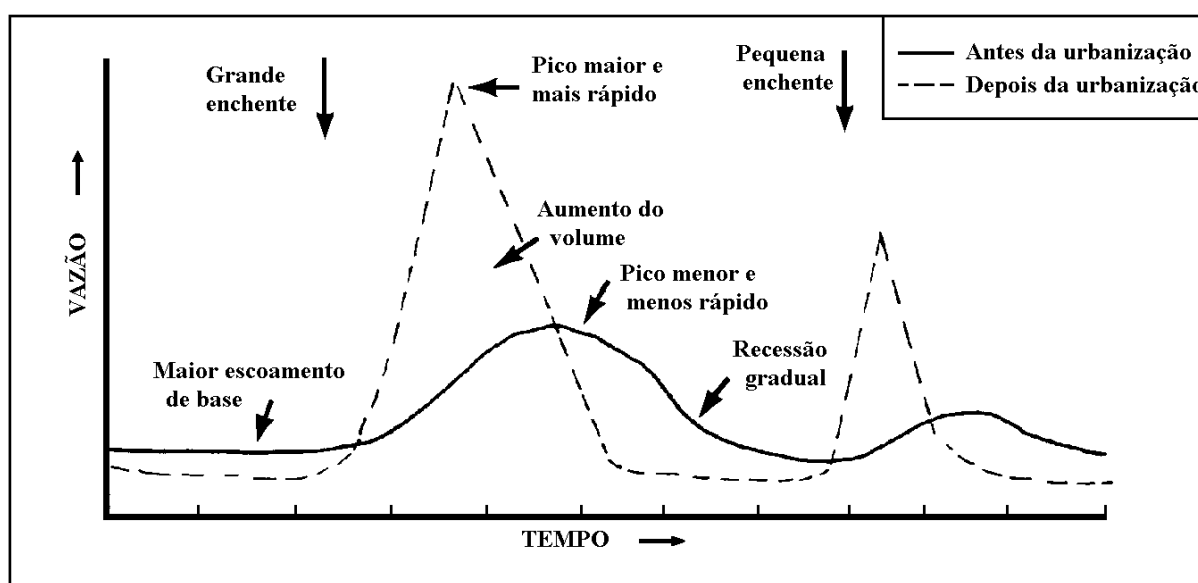


Fonte: SILVA JÚNIOR E SILVA (2016).

O impacto de impermeabilização do solo na drenagem urbana já é reconhecido largamente, porém a caracterização destas áreas impermeáveis apresenta ainda algumas questões a serem elucidadas. Entre estas questões, a mais relevante é a distinção entre área total impermeabilizada e a área efetiva. A área total impermeabilizada representa toda a área de uma bacia ou sub-bacia urbana recoberta por materiais e construções que impedem a infiltração da água da chuva no subsolo. Já a área impermeabilizada efetiva é definida como área impermeabilizada diretamente conectada ao sistema de drenagem urbana. Estas áreas contribuem efetivamente com o escoamento superficial direto não passando por áreas permeáveis, nem tendo oportunidades de infiltração no solo, ou seja, áreas impermeáveis diretamente conectadas são aquelas que despejam água pluvial diretamente na rede de drenagem sem que existam perdas entre o ponto, a superfície e a saída da bacia (MOURA e SILVA, 2015)

Cidades como Recife, o grau de impermeabilização muito alto devido à ocupação quase total dos lotes, gerando um volume de escoamento superficial maior e consequentemente supressão dos escoamentos sub superficial e de base. E isto favorece ainda mais os picos maiores de vazão das chuvas e consequentemente os tempos de concentração das bacias (SILVA e CABRAL, 2014), como é mostrado na Figura 5.

Figura 5. Picos máximos de vazão antes e depois da urbanização.



Fonte: TUCCI (1997).

Diante desta problemática, há algumas décadas, se vem dando uma nova concepção ao tratamento da drenagem urbana, com a utilização de técnicas que visam restabelecer processos do ciclo hidrológico como: a infiltração e o armazenamento, com o objetivo de aumentar o tempo de concentração da bacia e diminuir as vazões máximas geradas com as chuvas (SILVA e CABRAL, 2014).

Pompêo (2000) fala sobre a evolução do conceito de drenagem urbana no Brasil e destaca que foi somente a partir do século XXI que os debates sobre a drenagem urbana passaram a incorporar o conceito de sustentabilidade e assim ultrapassaram a visão de construção de estruturas por onde as águas da chuva serão transportadas, passando a considerar um conjunto de medidas que minimizem o escoamento superficial através da manutenção de áreas permeáveis em espaços públicos e nos lotes urbanos diminuindo os riscos e prejuízos causados por enchentes.

Buscando caracterizar esta nova fase conceitual da drenagem urbana, Tucci (2005) também chama de “sustentável” o momento atual do estudo de drenagem urbana iniciado na última década do século XX que tem como uma de suas características principais a recuperação da capacidade de infiltração da água no solo.

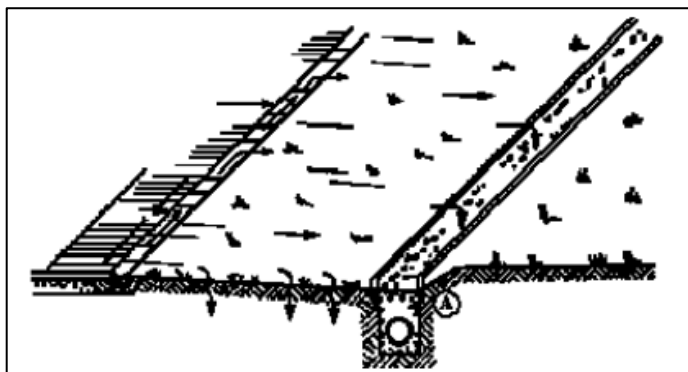
Nos últimos anos, um conceito de controle estrutural alternativo ao convencional tem conquistado espaço no cenário da drenagem urbana brasileiro, que são técnicas com foco na não transferência dos problemas para jusante pelo controle do escoamento na bacia, isto é, mais próximo de sua fonte e não no curso d'água. Este conceito foi desenvolvido nos EUA, pela EPA (*Environmental Protection Agency*) nos anos 80 (embora algumas localidades já aplicassem alguns de seus dispositivos desde a década de 70), e é constituído pelo planejamento de controle de águas pluviais em escala de bacia e uso de estruturas físicas para armazenamento e infiltração do escoamento na tentativa de compensar os efeitos da urbanização (CRUZ et al., 2007).

De acordo com Tucci (2005), os principais dispositivos para criar maior infiltração são discutidos a seguir:

- **Planos de infiltração:** Em geral, são áreas de gramados laterais, que recebem a precipitação de uma área permeável, como residência ou edifícios (Figura 6). Durante precipitações intensas, essas áreas podem ficar submersas, se a sua capacidade for muito inferior à intensidade da precipitação. Caso a drenagem

transporte muito material fino, a capacidade de infiltração pode ser reduzida, necessitando limpeza do plano para manter sua capacidade de funcionamento.

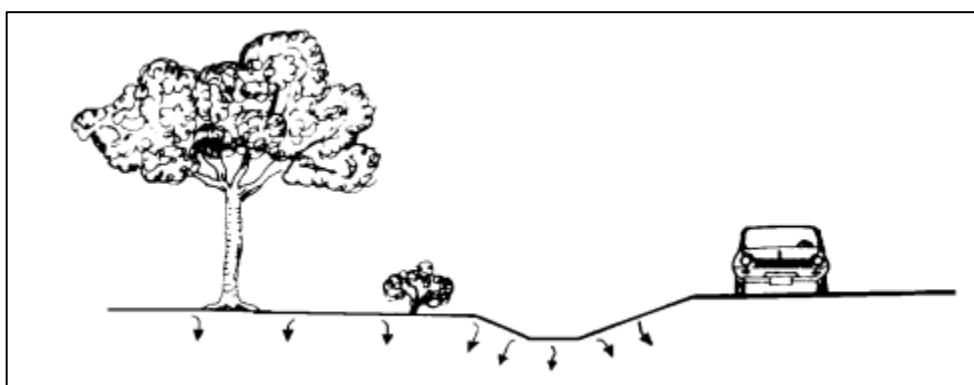
Figura 6. Plano de infiltração com valo.



Fonte: TUCCI (2005).

- **Valos de infiltração:** esses são dispositivos de drenagem lateral, muitas vezes utilizado paralelo às ruas, estradas, estacionamentos e conjuntos habitacionais. Esses valos concentram o fluxo das áreas adjacentes e criam condições para uma infiltração ao longo do seu comprimento (Figura 7).

Figura 7. Valos de infiltração

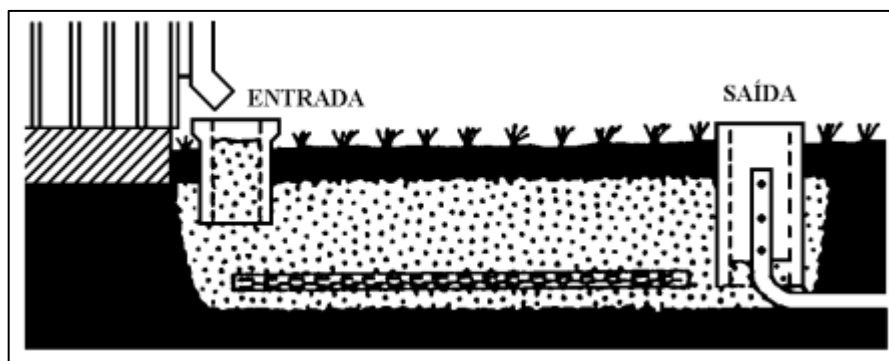


Fonte: TUCCI (2005).

- **Bacias de percolação:** dispositivos de percolação permitem aumentar a recarga e reduzir o escoamento superficial. O armazenamento é realizado na camada superior do solo e depende da porosidade e da percolação. Portanto, o nível do lençol freático deve ser baixo, criando espaço para armazenamento. (Figura 8). Para áreas de lençol freático alto, esse tipo de dispositivo não é

recomendado. As bacias são construídas para recolher a água do telhado e criar condições de escoamento através do solo.

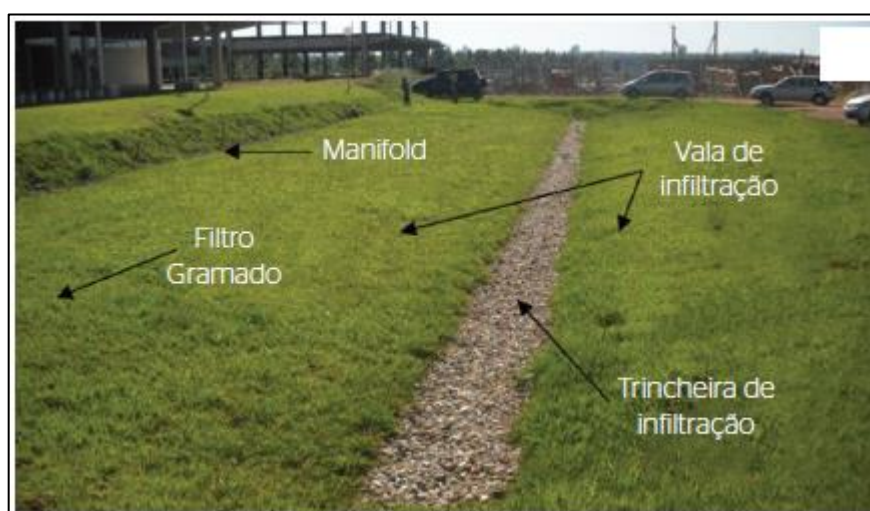
Figura 8. Bacia de percolação.



Fonte: TUCCI (2005).

- **Dispositivos hidráulicos permeáveis:** existem diferentes tipos de dispositivos que drenam o escoamento e podem ser construídos de forma a permitir a infiltração. Alguns desses dispositivos são: entradas permeáveis na rede de drenagem. Trincheiras ou valas permeáveis que são um caso especial de bacia de percolação e consistem de uma caixa com cascalho e filtro por onde passa um conduto poroso ou perfurado.

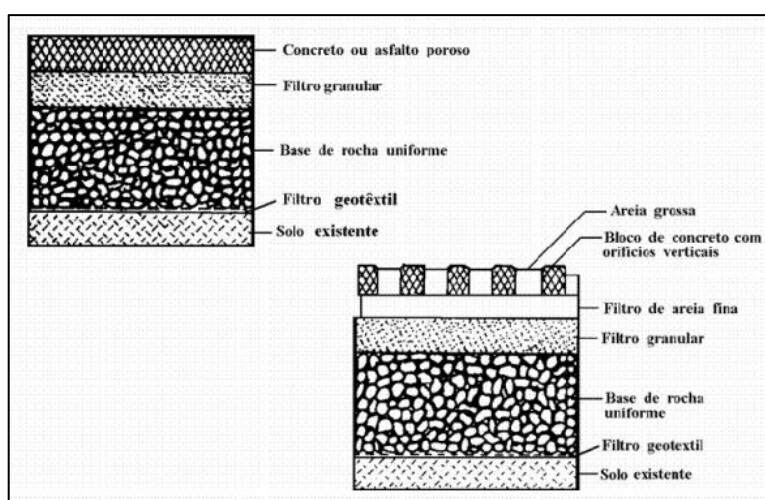
Figura 9. Filtro, vala e trincheira.



Fonte: adaptado de Gutierrez et al. (2010).

- **Pavimentos permeáveis:** o pavimento permeável pode ser utilizado em passeios, estacionamentos, quadras esportivas e ruas de pouco tráfego. Em ruas de grande tráfego, esse pavimento pode ser deformado e entupido, tornando-se impermeável. Esse tipo de pavimento pode ser de bloco vazado, concreto ou de asfalto (Figura 10). No caso dos dois últimos, é construído da mesma forma que os pavimentos tradicionais, com a diferença que o material fino é retirado da mistura.

Figura 10. Pavimentos permeáveis.



Fonte: TUCCI (2005).

- **Poços de infiltração:** são estruturas geralmente cilíndricas cuja profundidade e diâmetro dependem das características do perfil do solo e do volume de água a ser infiltrado. Para Reis et al., (2008) o dimensionamento deve considerar o volume de armazenamento do poço e a capacidade de infiltração do terreno. Para essa solução de drenagem na fonte, toda água de chuva captada pela edificação é lançada inicialmente no poço de infiltração. Somente após a diminuição da capacidade de absorção do solo e total enchimento do poço, a água passa a ser lançada no sistema público de drenagem, por meio de extravasares do próprio poço de infiltração ou em uma caixa de passagem anterior ao sistema (Figura 11).

Figura 11. Poço de infiltração.



Fonte: adaptado de Gutierrez *et al.* (2010).

3.3 Geoprocessamento

O conceito de Geoprocessamento pode ser entendido como um conjunto de técnicas computacionais que opera sobre diferentes tipos de bases de dados (que são registros de ocorrências) georreferenciados, para os transformar em informações digitais relevantes. (XAVIER, 2001).

Para Hamanda e Gonçalves (2007), geoprocessamento é uma poderosa ferramenta computacional, que processa dados geograficamente referenciados e pode ser bastante útil na abordagem integrada, essencial ao gerenciamento dos recursos naturais. Sendo uma ferramenta cada vez mais utilizada na solução de problemas geográficos complexos, como são, em geral, os casos de aplicação na área de meio ambiente e, torna-se bastante oportuno e proveitoso que o potencial e a aplicabilidade do geoprocessamento sejam conhecidos pelas pessoas e instituições vinculadas às diversas áreas. Os exemplos de aplicação de técnicas de geoprocessamento são:

- **Manejo e conservação de recursos naturais:** estudos de impacto ambiental, modelagem das águas subterrâneas e estudo dos potenciais e hidráulicos.
- **Gestão das explorações agrícolas:** cultivo de campo, manejo de irrigação, avaliação do potencial agrícola da terra.

- **Planejamento de área urbana:** planejamento dos transportes, desenvolvimento de plano de evacuação, localização dos acidentes, seleção dos itinerários.
- **Gestão das instalações** localização dos cabos e tubulações, planejamento e manutenção das instalações das galerias de drenagem pluvial e hidrossanitárias.
- **Administração pública** (gestão de cadastro, avaliação predial/territorial, gestão da qualidade das águas, conservação/manutenção das infra-estruturas, planos de organização.
- **Comércio** análise da estrutura de mercado, planejamento de desenvolvimento, análise da concorrência e das tendências de mercado.
- **Saúde pública** epidemiologia, distribuição e evolução das doenças, distribuição dos serviços sociais sanitários, planos de emergência.

O geoprocessamento abrange um conjunto de Geotecnologias voltadas para a coleta, o processamento e a manipulação de informações geograficamente referenciadas, destacando-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG), entre outras. (ROSA, 2005).

Na apreciação de Rosa (2005), um Sistema de Informações Geográficas funciona mediante a integração de cinco componentes básicos, quais sejam: computadores ou hardware, aplicativos computacionais ou software, dados, pessoas ou *peopleware* e método de trabalho, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12. Componentes de um Sistema de Informações Geográficas.



Fonte: SILVA; et al (2017).

De acordo com o exposto da Figura 13, estão listados os principais Softwares usados no gerenciamento de dados, mapeamento digital e geoprocessamento disponíveis no mercado, cujas funcionalidades aprimoram-se a cada nova versão lançada.

Figura 13. Alguns softwares de análise espacial utilizados no Brasil.

Programas	Funcionalidades
ArcGIS	Geoprocessamento. Modelagem Digital do Terreno. Análise Geoestatística.
QGIS	Geoprocessamento. Modelagem Digital do Terreno. Análise Geoestatística.
Global Mapper	Geoprocessamento. Modelagem Digital do Terreno. Análise Geoestatística. Exportação de dados.
Spring	Geoprocessamento. Modelagem numérica de terreno.
gvSIG	Geoprocessamento.
AutoCAD Map 3D	Gerenciamento de dados espaciais. Acesso a dados CAD.
PostgreSQL (PostGIS)	Gerenciamento de dados espaciais.
Saga	Geoprocessamento.
Kosmo	Geoprocessamento.
Surfer	Geoprocessamento. Modelagem digital de elevação.
SAS.GIS	Geoprocessamento.
Idrisi	Geoprocessamento. Classificação por segmentação de imagens. Modelagem por detecção de mudanças.
Envi	Geoprocessamento. Classificações supervisionadas e não-supervisionadas.
TerraView/SIG	Gerenciamento de dados espaciais. Geoprocessamento.
ERDAS imagine	Geoprocessamento. Ortorectificação de imagens.

Fonte: SILVA; et al (2017).

3.4 Pernambuco Tridimensional

Após as enchentes que atingiram drasticamente municípios da Mata Sul do Estado de Pernambuco, entre 2010 e 2011, foram realizados serviços de mapeamento das áreas afetadas e da calha dos principais rios das bacias hidrográficas atingidas. Esse mapeamento, realizado por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), realizou uma varredura a laser do terreno que permitiu obter com rapidez e qualidade as informações altimétricas para elaboração dos projetos das barragens de controle de cheias, além de desenvolver sistema de prevenção e alerta de inundações para a bacia do rio Una (PE3D, 2018).

Perfilamento ou varredura a laser consiste no levantamento da altura de pontos sobre uma superfície através da emissão de raios laser. É como construir uma

maquete digital que representa as variações de altitude do terreno e do que se encontra sobre ele, como edificações e árvores (PE3D, 2018).

Atualmente, cabe à Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC) gerenciar o Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE), financiado pelo Banco Mundial. O PSHPE tem como objetivo ampliar o acesso da população à água potável e ao esgotamento sanitário. Com o êxito obtido, foi tomada a decisão de inserir nas metas do PSHPE o mapeamento para todo o território do Estado, dando assim origem ao Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) (PE3D, 2018).

Os serviços compreendem o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano. O conjunto de dados está sendo apresentado exclusivamente em meio digital e todo o conteúdo será disponibilizado integralmente para download. Ao final do levantamento serão disponibilizados, com coordenadas planimétricas e altimétricas, cerca de 75 bilhões de pontos, ou seja, um ponto a cada 1,3 m² de todo o território pernambucano. É uma notável base de dados espaciais para suporte a muitas iniciativas para o desenvolvimento sustentável de Pernambuco (PE3D, 2018).

3.5 Modelos Hidrológicos

Como alternativa para solucionar dificuldades de previsão e estimativa de capacidade de escoamento de uma determinada bacia hidrográfica urbana, tem-se a possibilidade de aplicação de modelos matemáticos que possibilita também antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos, o que possibilita fundamentar as decisões de gestão de bacias tomadas por seus responsáveis legais (SILVA, 2007).

Os modelos para simulação da drenagem urbana em geral, incluem dois componentes conectados: modelo hidrológico para transformação da precipitação em escoamento superficial e um modelo para propagação do escoamento em redes de condutos e canais. Os modelos hidrológicos descrevem o processo de transformação chuva-vazão através de algoritmos de perdas por armazenamento em depressões, interceptação, perdas por infiltração e propagação na superfície (MELLER e PAIVA, 2007).

O SWMM é um modelo de simulação que abrange tanto aspectos hidrológicos como de qualidade da água, desenvolvido principalmente para áreas urbanas. Ele é

capaz de simular um único evento ou uma série de dados contínuos, além de considerar distintos processos hidrológicos que produzem escoamentos procedentes de áreas urbanas; possuir várias ferramentas de modelagem hidráulica e permitir uma variabilidade espacial em todos estes processos. (ROSSMAN, 2004).

O escoamento no conduto pode ser modelado através do fluxo em regime permanente, onda cinemática ou onda dinâmica. Em que cada um desses se utiliza o equacionamento de Manning para relacionar a vazão com altura da lâmina d'água e a declividade presente no escoamento, tendo como exceção a ocorrência condições de fluxo em conduto forçado em que são empregadas as equações de Hazen-Williams ou de Darcy-Weisbach (SOUZA et al., 2013).

Ainda segundo Rossman (2004), as principais aplicações do SWMM são:

- Concepção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem para controle de inundações;
- Dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios para o controle de inundações e a proteção da qualidade das águas;
- Delimitação de zonas de inundação em leitos naturais;
- Concepção de estratégias de controle para minimizar o transbordamento de sistemas unitários e mistos;
- Avaliação do impacto de contribuições e infiltrações sobre o transbordamento de sistemas de drenagem de águas residuárias;
- Geração de poluição difusa para estudos de lançamento de efluentes (carga de contaminantes);

Feitosa (2015), fez simulações utilizando trincheiras de infiltração instaladas no passeio público, afim de analisar a redução da vazão de pico gerados pelos lotes na cidade do Crato-CE, chegando eficiências de até 70% na diminuição da vazão máxima da rede de drenagem.

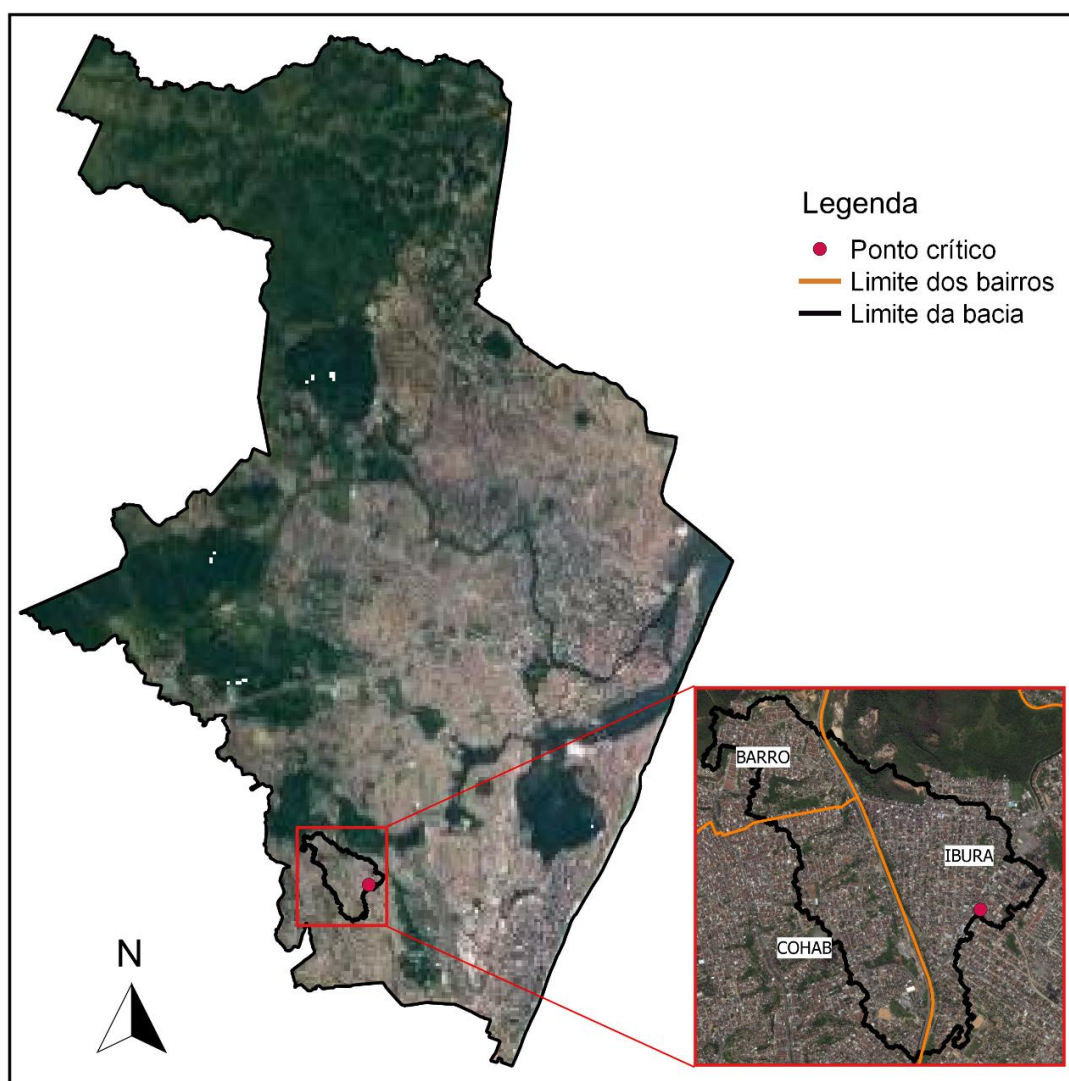
Silva Junior (2015), objetivando diminuir o volume de alagamento para uma rede de drenagem na cidade do Recife-PE, realizou simulações no SWMM para a rede readequada e simulações utilizando reservatórios de retenção, obtendo resultados na ordem de 58% e 38%, respectivamente, na diminuição do volume de alagamento.

4. Metodologia

4.1 Área de Estudo

Para realização do estudo, foi escolhido o ponto crítico com histórico de alagamento, mostrado na Figura 14, localizado no bairro do Ibura, mais precisamente na Avenida dois Rios, próximo ao cruzamento com o canal do Ibura. Sua localização geográfica apresenta as seguintes coordenadas geográficas: $-8,115^{\circ}$ (latitude), $-34,940^{\circ}$ (longitude). A região está inserida em uma sub-bacia do Rio Moxotó.

Figura 14. Localização do ponto crítico de alagamento e área de contribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

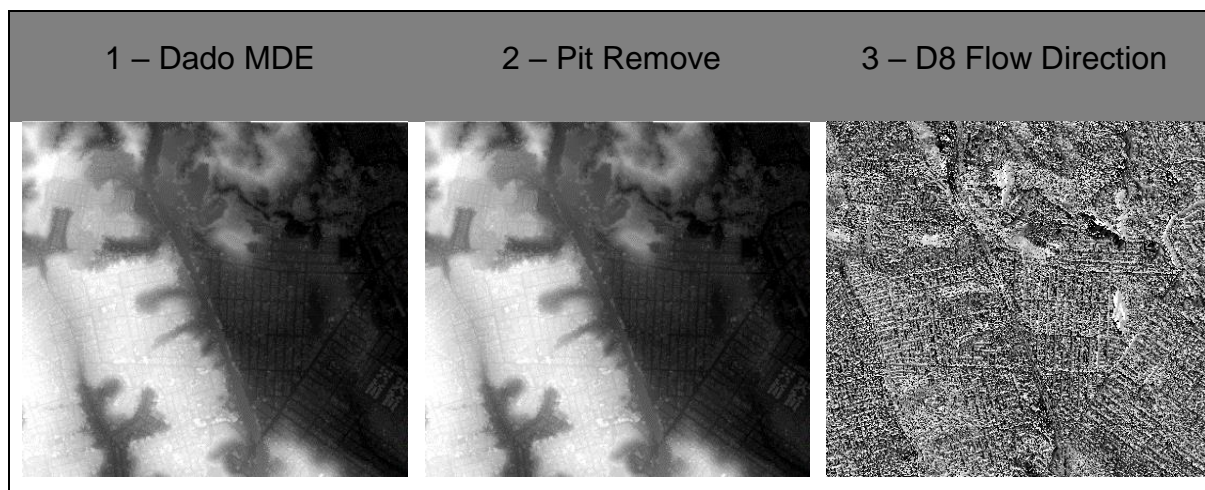
4.1.1 Delimitação da Área de Contribuição para o Ponto Crítico de Alagamento

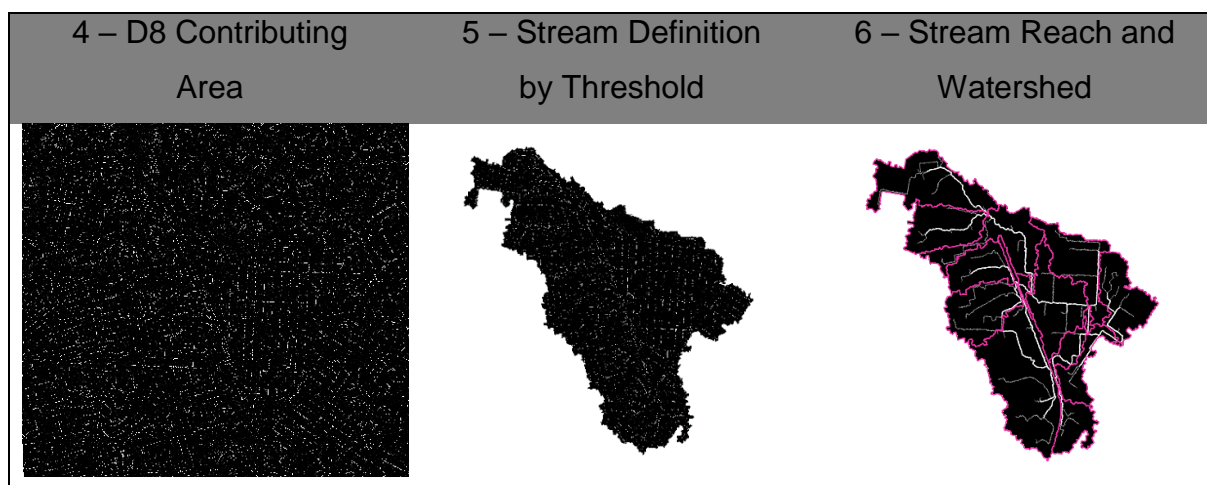
A delimitação da área de contribuição para o ponto crítico de alagamento, o levantamento de coordenadas, cotas, cálculo de áreas, foram realizados utilizando o QGIS Versão 2.18.7, como programa de geoprocessamento e a modelagem digital de elevação do terreno. Para delimitação da área de contribuição o algoritmo TauDEM – *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*. Versão 5 (USA, 2015) foi inserido ao QGIS.

Os dados de entrada, com a topografia da região de interesse foram fornecidos pelo Laboratório de Recursos Hídricos da UFPE – Campos do Agreste, no qual utilizou-se arquivos MDE (Modelo Digital de Elevação) na escala 1:5000, produzido pelo Pernambuco Tridimensional.

Apresenta-se na Figura 15 as etapas dos processos realizados no QGIS a partir da ferramenta TauDEM para obtenção da área de contribuição. O dado de entrada foi o MDE; em seguida foi utilizada a ferramenta *Pit Remove* para remover pixels muito diferentes dos vizinhos; após isso foi obtida a imagem das direções de fluxo por meio do método *D8 Flow Direction*; o próximo passo foi encontrar a área de contribuição utilizando o algoritmo *D8 Contributing Area*; em seguida definiu-se o exutório mancando-se a opção *Stream Definition by Threshold* para que o fluxo gerado seja a partir dele; e por fim, foi obtido a delimitação das sub-bacias (*Stream Reachand Watershed*).

Figura 15. Etapas de processamentos para obtenção da área de contribuição do ponto crítico de alagamento.

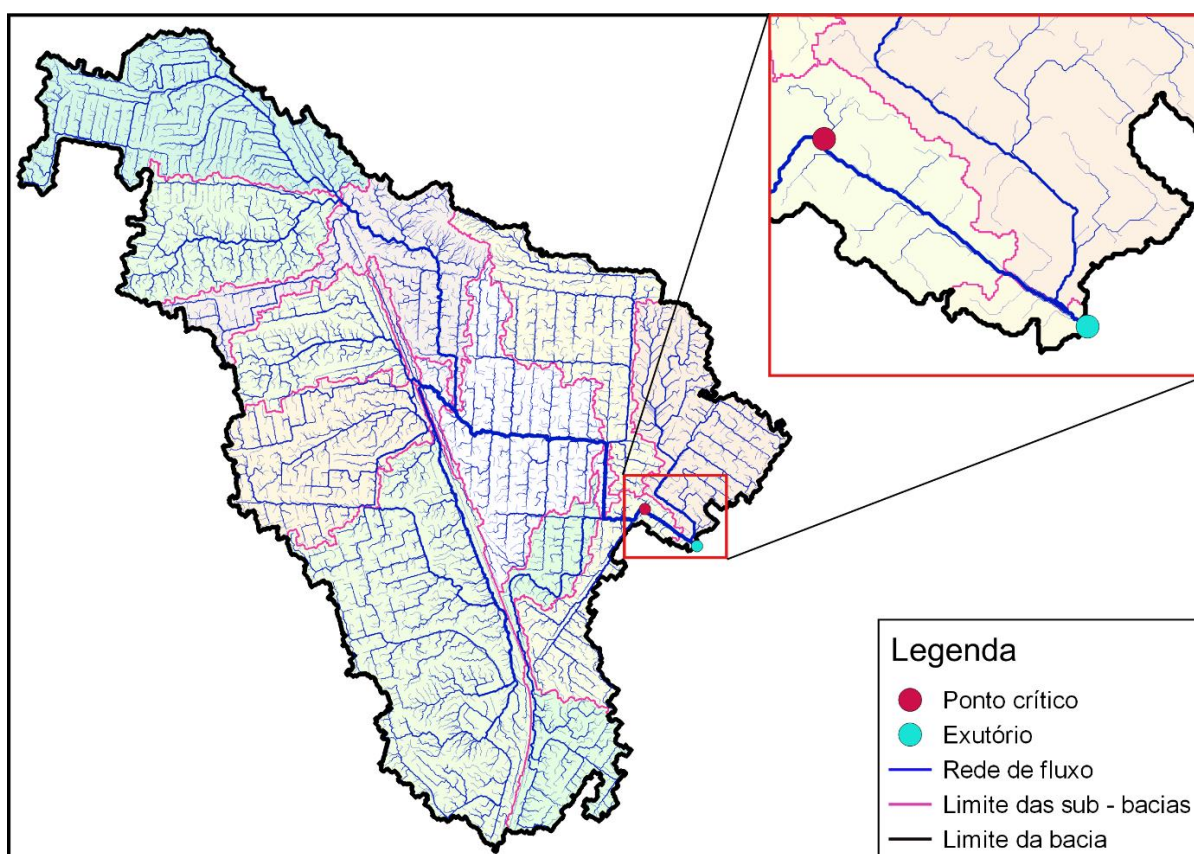




Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 16 é detalhada a bacia hidrográfica (área de contribuição para o ponto crítico de alagamento), gerada pelos processos executados na Figura 15, mostrando a rede de fluxo e as delimitações das sub-bacias. O exutório da bacia hidrográfica (Figura 16), foi inserido a jusante do ponto crítico para que fosse possível contabilizar a contribuição da sub-bacia mais à direita.

Figura 16. Detalhamento da bacia hidrográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Caracterização das Sub - bacias

Na Figura 17 é mostrada a superposição do limite da bacia (Figura 16) com a imagem de satélite do Google, destacando-se a localização do ponto crítico e a abrangência de sua área de contribuição, pertencendo aos bairros do Ibura, Cohab e Barro.

Figura 17. Superposição imagem de satélite do Google e a área de contribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Limite do bairro do Ibura com os bairros Cohab e Barro coincidem com a BR-101 que corta longitudinalmente a bacia. A região de estudo possui uma área de 1,85 Km² e possui características distintas.

Analisando a Figura 17, percebe-se que a região compreendida pelo bairro do Ibura é mais urbanizada, possuindo poucas áreas verdes e quadras bem definidas, já os bairros Cohab e Barro tem assentamentos irregulares com quadras e ruas mal definidas.

O canal do Ibura tem início no bairro Barro e estende-se pelo bairro do Ibura cruzando a Avenida Dois Rios. O transbordamento do canal provoca alagamento na Avenida dois rios, evidenciando que ele recebe praticamente toda a vazão da bacia.

O processo de extração da bacia hidrográfica com o algoritmo TauDEM, gerou 15 sub-bacias, no qual, foram caracterizadas quanto ao uso e ocupação do solo. No ambiente QGIS utilizando as imagens de satélite do Google de 2015, identificou-se e quantificou-se, as áreas verdes, canal, solo compactado, vias de paralelepípedo, vias de asfalto e áreas impermeáveis dos lotes (Figura 18).

Na Figura 17 é refletida de forma visual a urbanização e o grau de impermeabilização da área de estudo, uma vez que as áreas com vegetação e áreas sem revestimentos, são pontuais. O coeficiente de escoamento (C) foi calculado a partir do coeficiente de escoamento das diversas superfícies mostradas na Tabela 1. Os valores adotados de C para cada superfície estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1. Valores de C baseados nas características detalhadas das diversas superfícies.

Superfícies	C
Telhados perfeitos sem fuga;	0,70 a 0,95
Superfícies asfaltadas em bom estado;	0,85 a 0,90
Pavimentação de paralelepípedos, ladrilhos ou blocos de madeira;	0,70 a 0,85
Para superfícies anteriores sem as juntas tomadas;	0,50 a 0,70
Pavimentação de blocos inferiores sem as juntas tomadas;	0,40 a 0,50
Estradas macadamizadas;	0,25 a 0,60
Estradas e passeios de pedregulho;	0,15 a 0,30
Superfícies não-revestidas, terrenos descampados, parques, jardins	0,10 a 0,30
Do solo na natureza e do subsolo.	0,01 a 0,20

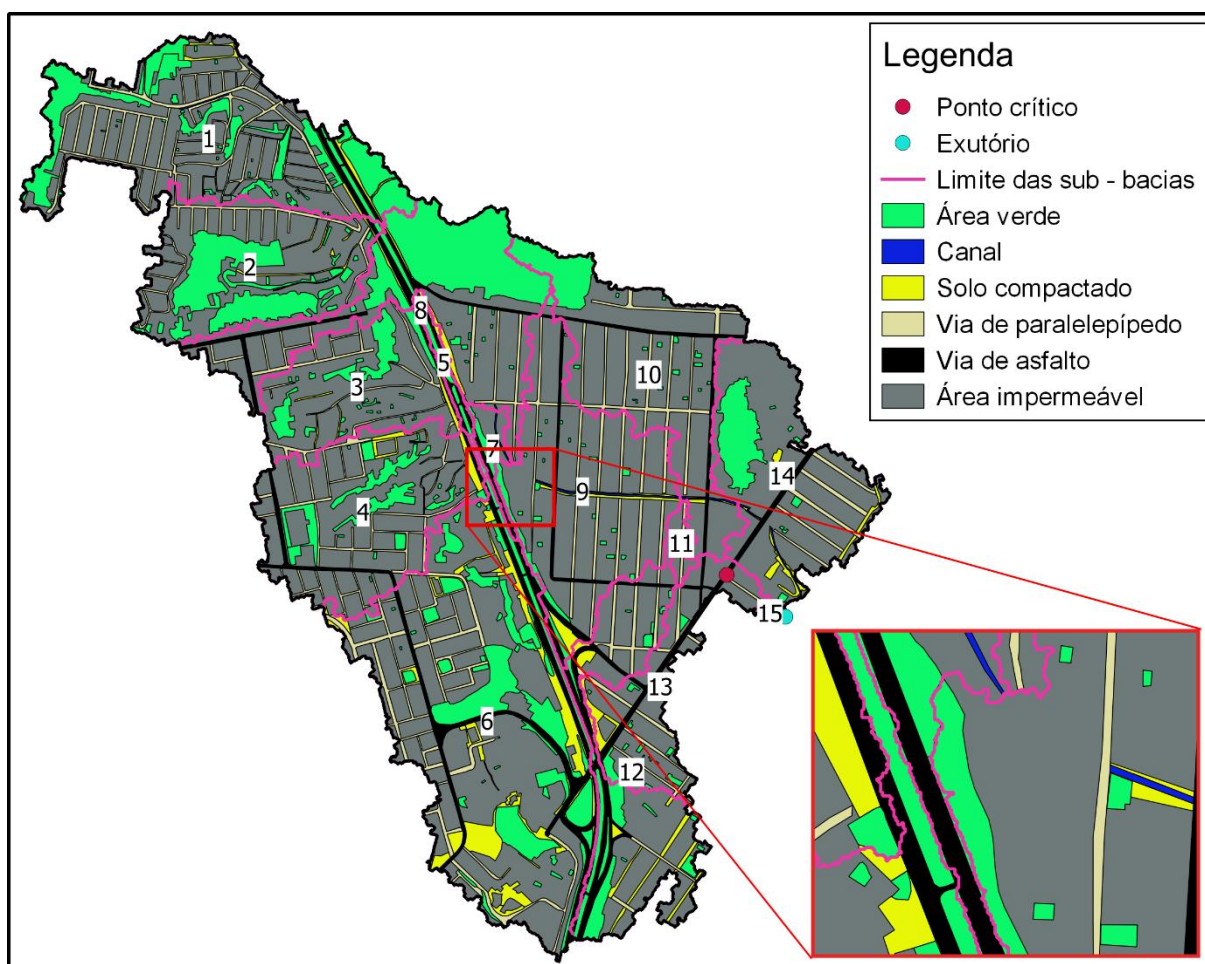
Fonte: VILLELA E MATTOS (1980).

Tabela 2. Valores adotados de C para a área de estudo.

Superfícies	C
Área verde	0,10
Solo compactado	0,60
Via de paralelepípedo	0,80
Via de Asfalto	0,90
Área Impermeável dos Lotes	0,85

Fonte: VILLELA E MATTOS (1980).

Figura 18. Mapeamento das diferentes coberturas superficiais no QGIS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os diferentes usos de ocupação do solo nas sub-bacias, o coeficiente de escoamento foi calculado fazendo-se a média ponderada conforme a Equação 1.

$$\text{Coeficiente de escoamento: } C = \frac{C1.A1+C2.A2+\dots+Cn.An}{A1+A2+\dots+An} \quad (1)$$

Onde: Cn: coeficiente de escoamento para uma determinada superfície

An: área correspondente a essa superfície

As áreas levantadas no QGIS foram exportadas para o *Excel* usando a ferramenta *XY tools*, em seguida foi aplicado a Equação 1. Os resultados encontrados do coeficiente de escoamento para cada sub-bacia e para toda bacia estão na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de coeficiente de escoamento para as sub-bacias e para toda bacia.

Sub-bacia	An(m²)	Cn	C
1	218205,40	0,64	0,70
2	140921,94	0,61	
3	104617,24	0,73	
4	158933,41	0,75	
5	9012,98	0,59	
6	358718,45	0,69	
7	12594,60	0,71	
8	163520,36	0,55	
9	178600,26	0,80	
10	153207,74	0,76	
11	7364,53	0,84	
12	122446,32	0,74	
13	76743,90	0,80	
14	142866,28	0,74	
15	1383,40	0,84	

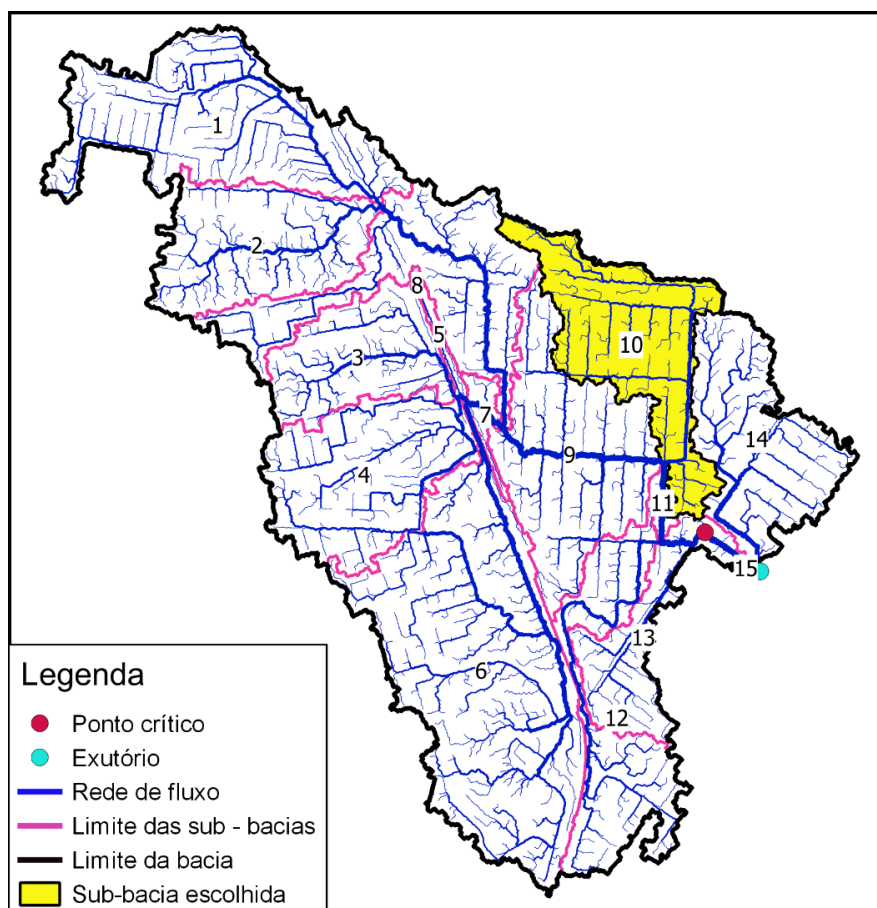
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Rede de Drenagem Urbana

Na ausência do cadastro da rede de drenagem de água pluvial, optou-se em escolher uma sub-bacia compreendida na área de contribuição para o ponto crítico de alagamento. Foi escolhida a sub-bacia 10 (Figura 19), sendo umas das sub-bacias

com superfícies mais impermeáveis, no qual, tem-se uma maior necessidade da aplicação de técnicas de infiltração para atenuar os picos de vazões,

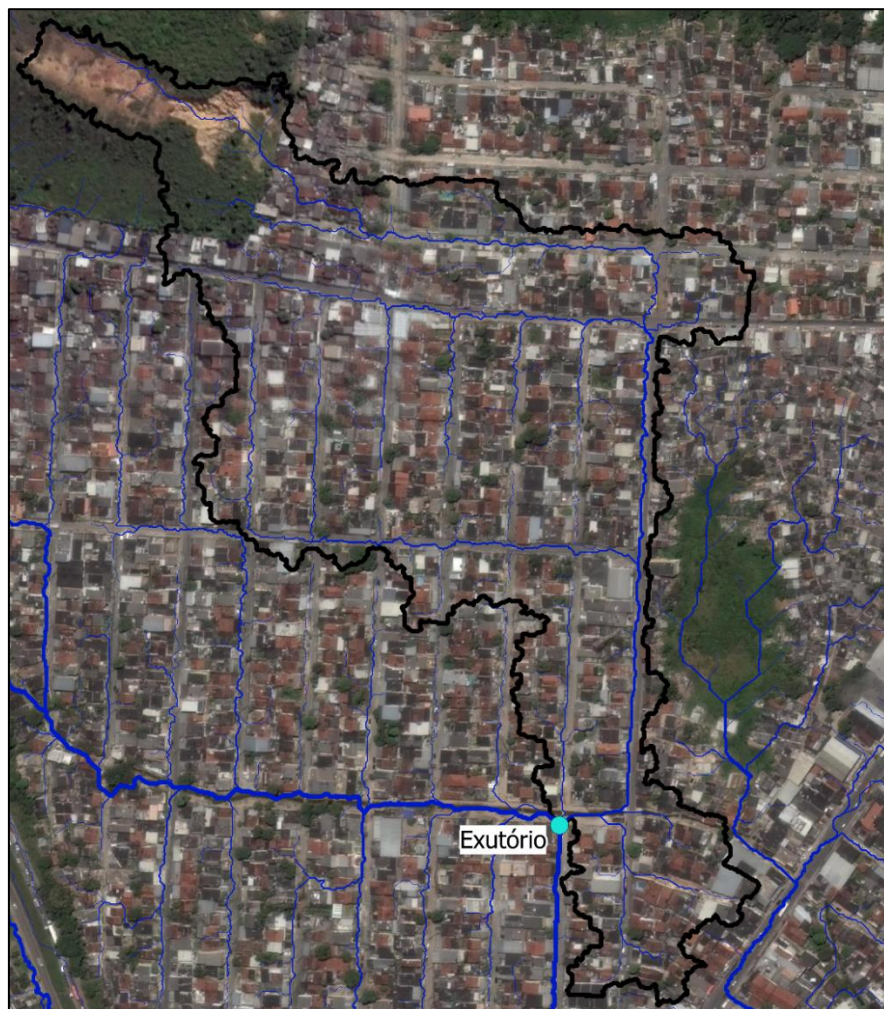
Figura 19. Localização da sub-bacia escolhida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

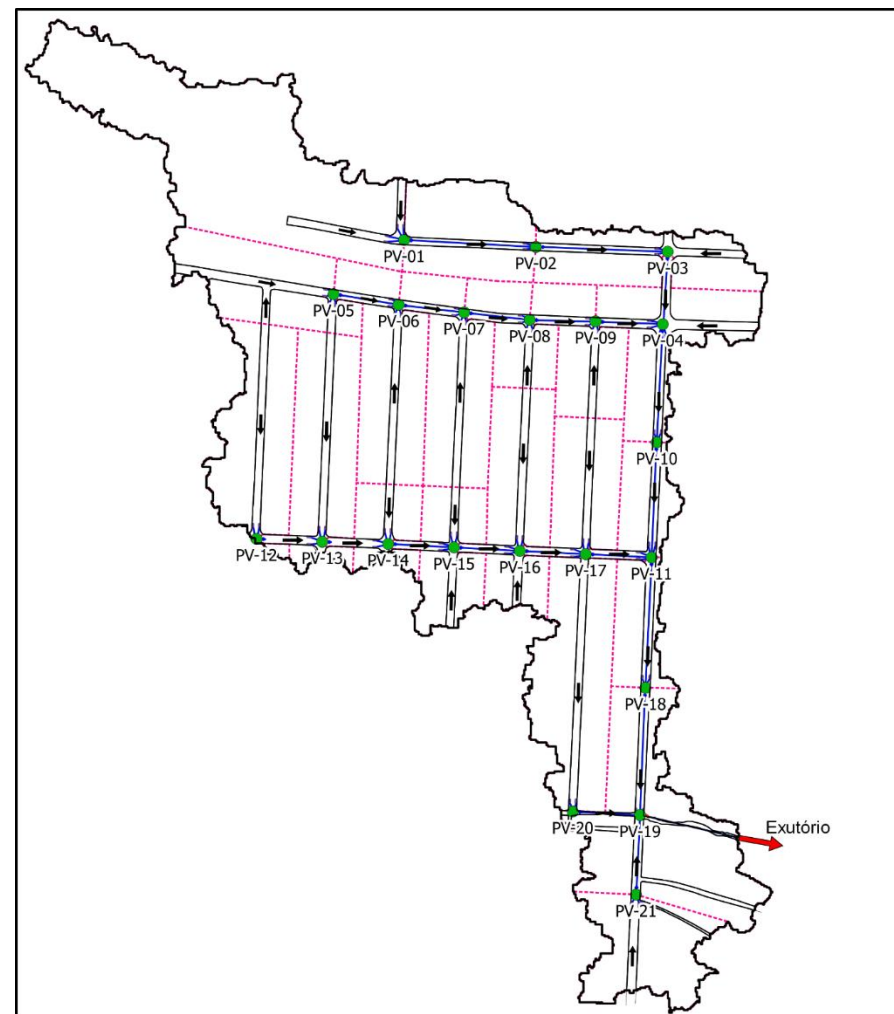
As linhas de fluxo mostradas na Figura 20, permitem identificar a direção do escoamento, facilitando o traçado da rede de drenagem de água pluvial. Os poços de visitas foram colocados nos cruzamentos e nas mudanças de direções da galeria principal, respeitando a distância máxima entre poços de visita de 100 m. O traçado da rede de drenagem e a discretização das sub-áreas que contribuem para cada poço de visita estão mostrados na Figura 21.

Figura 20. Linhas de fluxo sub-bacia 10.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21. Traçado da rede de drenagem de água pluvial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido a uma maior viabilidade de aplicação de técnicas de infiltração, o exutório da região de estudo foi deslocado para direita, mostrado na Figura 21.

4.4 Vazão de Enchente

Com o sistema de drenagem traçado, fez-se o dimensionamento hidráulico dos condutos, a partir do cálculo da vazão de enchente. Como a área região a ser dimensionada é de 0,153 Km², recorreu-se ao Método Racional para tal tarefa, no qual, não se recomenda a utilização do método para áreas maiores que 2 Km².

O método racional foi apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney e depois utilizado por Emil Kuichling em 1889, característico por estabelecer uma relação entre a chuva e o escoamento superficial. Com o objetivo de contrapor os métodos empíricos antigos, recebeu o nome de método racional. É utilizado para determinar a vazão contribuinte gerada por uma determinada área. (TOMAZ, 2013)

A obtenção da vazão de enchente pelo método racional consiste na aplicação da Equação 2.

$$Q = \frac{C.i.A}{360} \quad (2)$$

Onde: Q = vazão (m³/s);

C = coeficiente de escoamento superficial;

i = intensidade da precipitação para o tempo de duração igual ao tempo de concentração.

4.4.1 Coeficiente de Escoamento Superficial

Conforme apresentado na Tabela 3, o coeficiente de escoamento para a sub-bacia 10 foi de 0,7. A subárea que contribui para o poço de visita 1 (Figura 21), possui área verde, diferenciando-se das outras subáreas (Figura 20). A subárea 1 possui uma área de 2,28 ha, sendo que 1,64 ha é de área verde. Aplicando a Equação 1, obteve-se o coeficiente de escoamento de 0,31 e 0,84 para a subárea 1 e as demais subáreas, respectivamente.

4.3.1.2 Tempo de Concentração

É o intervalo de tempo da duração da chuva necessário para que toda a bacia hidrográfica passe a contribuir para a vazão no exutório. Seria também o tempo de percurso, até a secção de drenagem, de uma porção da chuva caída no ponto mais distante da bacia.

Para cada um dos trechos de galeria a seção a ser considerada é sempre a sua extremidade de montante, pois, se concentra a vazão a ser conduzida no trecho. Então, para o primeiro trecho, o tempo de concentração é o mesmo da área a montante do início da galeria, adotou-se 10 mim. Para os seguintes, o tempo de concentração será a soma do tempo de concentração do trecho anterior e o tempo e percurso do trecho anterior (Equação 3).

$$t_c = t_{c(anterior)} + t_p \quad (3)$$

Onde: t_c = tempo de concentração (mim);
 t_p = tempo de percurso (mim).

O tempo de percurso é obtido a partir da Equação 4.

$$t_p = \frac{L}{V} \quad (4)$$

Onde: L = comprimento do trecho anterior (m);
 V = velocidade real no trecho anterior (m/mim).

4.4.2 Intensidade da Chuva

Em relação à chuva de projeto, foi adotada a equação elaborada pela ENCIBRA especificamente para a cidade do Recife, a qual é apresentada na Equação 5.

$$i = \frac{335,47.T^{0,218}}{(t+4)^{0,539}} \quad (5)$$

onde:

i = intensidade da chuva (mm/h);

T = tempo de retorno (adotou-se 25 anos);

t = duração da chuva (igual ao tempo de concentração tc).

4.5 Parâmetros para a Modelagem da Rede

Após o dimensionamento das galerias de drenagem de água pluvial, fez-se a modelagem da rede no SWMM a partir da identificação dos objetos: subáreas, contos e nós. Para inserção dos dados cadastrais de drenagem no modelo, foram considerados os seguintes aspectos para os diferentes objetos.

4.5.1 Subáreas

Área – parâmetro que representa o valor da área das subáreas presentes no sistema de drenagem, tais valores foram obtidos na planta da área de estudo, utilizando o software AutoCAD 2017.

Largura – valor referente à dimensão do escoamento superficial principal em cada subárea, o traçado da rede de drenagem foi exportado para o QGIS e fez-se a superposição com as linhas de fluxo de escoamento, identificando o superficial principal.

Declividade – as declividades superficiais das subáreas foram obtidas a partir do levantamento das cotas no QGIS para os topos dos poços de visita, e onde não existia este elemento fez-se a coleta das cotas das regiões mais altas.

Taxa impermeável – este parâmetro foi obtido de acordo com o item 3.3.1.1.

Profundidade das depressões – Este parâmetro representa a retenção da água da chuva na superfície. É apresentado na Tabela 4 os valores sugeridos pelo SWMM, em função das diferentes coberturas da superfície.

Tabela 4. Valores típicos em armazenamento em depressões.

Natureza da Superfície	Valores (mm)
Superfícies Impenetráveis	1,27 - 2,54
Gramados	2,54 - 5,08
Pastagem	5,08
Serrapilheira	7,62

Fonte: ASCE, (1992). Apud Manual do SWMM Brasil (2012).

O valor de depressões sobre superfícies impermeáveis, adotou-se 2,54 mm, para as superfícies permeáveis o valor das depressões foi de 5 mm.

Rugosidade – é um parâmetro que estima o coeficiente de rugosidade com base nas características do recobrimento do solo. Adotou-se sugeridos pelo SWMM, presentes na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficiente n de Manning – Escoamento à superfície livre.

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
Cobertos de resíduos < 20%	0,06
Cobertos de resíduos > 20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Gramina	
Curta, pradaria	0,15
Densa	0,24
Gramina-bermudas	0,41

Floresta	
Vegetação rasteira leve	0,4
Vegetação rasteira densa	0,8

Fonte: MCCUEN (1996). Apud Manual do SWMM Brasil (2012).

Para as áreas impermeáveis, adotou-se um valor igual a 0,024, referente ao cimento com superfície de pedregulho, já para as superfícies permeáveis adotou-se um valor igual a 0,15, referente à grama curta.

4.5.2 Junções/ Nós

Cota dos nós – no QGIS foram levantadas as cotas correspondente aos tampões dos poços de visita

Profundidade máxima dos condutos – esse parâmetro corresponde ao diâmetro dos condutos que foi dimensionando pelo método racional.

Comprimento dos condutos – é dado pela distância entre o nó de montante e jusante do elemento condutor. Como não se teve acesso ao cadastro de drenagem da região de estudo, os comprimentos dos condutos foram obtidos a partir do traçado da Figura 21.

4.5.3 Infiltração

A determinação da variável infiltração pode ser obtida por três modelos diferentes considerados pelo SWMM (Modelo de infiltração de Horton, Green – Ampt e Curva Número do SCS).

Para este estudo, adotou-se o modelo de infiltração de Green – Ampt. A Tabela 6, apresenta os parâmetros do método para diferentes tipos de solo. Além da sucção capilar e a condutividade hidráulica, o SWMM solicita o déficit inicial, para este último, foi adotado 3 para todos os tipos de solo da Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros do Modelo de infiltração de Green – Ampt para diferentes tipos de Solo.

Tipo de Solo	Sucção Capilar (mm)	Condutividade Hidráulica (mm/h)
Areia	49,5	117,8
Areia argilosa	61,3	29,9
Solo franco arenoso	110,1	10,9
Solo franco	88,9	3,4
Solo franco siltoso	166,8	6,5
Solo franco argilo arenoso	218,5	1,5

Fonte: SMITH (2010)

4.5.4 Chuvas

Antes de executar a simulação, foi necessário definir o evento chuvoso e a forma de precipitação a ser inserido no SWMM. A chuva utilizada foi registrada pela estação automática de Recife – A301 operada pelo Inmet. A forma de precipitação adotada foi a intensidade em que cada valor de precipitação é uma taxa média (mm/h).

Na Figura 22 e mostrada a precipitação de 17 de maio de 2013, com 150,8 mm em 13 horas.

Figura 22. Precipitação utilizada na modelagem.



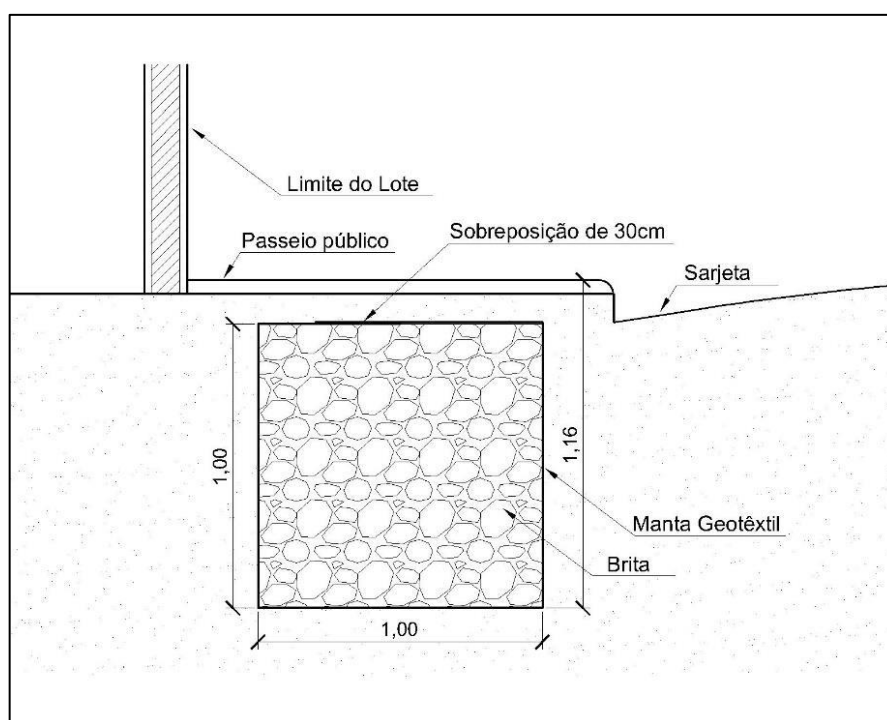
Fonte: INMET. Apud SILVA JUNIOR (2015).

4.5.6 Técnica Compensatória Adotada

O SWMM pode modelar especificadamente cinco tipos de dispositivos de baixo impacto (LID): Bacia de filtração, trincheira de infiltração, pavimentos permeáveis, cisternas, e valas de infiltração sem dreno. Essas técnicas subtraem parte do escoamento superficial atenuando os picos de vazão.

A técnica de infiltração adotada foi a trincheira de infiltração, instaladas no passeio público (Figura 23). Considerou-se que essas trincheiras receberam contribuições das áreas impermeáveis e após atingir sua capacidade, escoarão as águas excedentes para as sarjetas.

Figura 23. Detalhe típico de uma trincheira do modelo.



Fonte: FEITOSA (2015).

Quanto as propriedades da superfície das trincheiras de infiltração, não se considerou armazenamento ou cobertura vegetal. Por recomendação do Manual do SWMM Brasil (2012), a rugosidade e a declividade atribuídas foram iguais a zero.

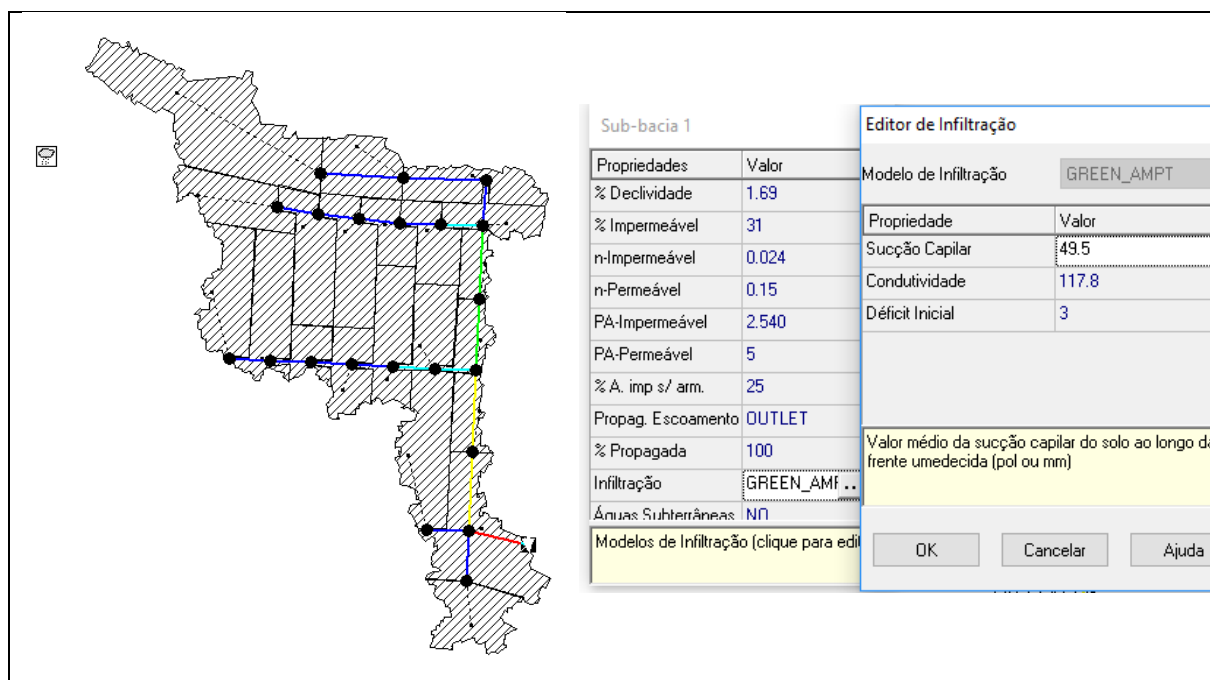
Em relação ao armazenamento, a espessura da camada de brita foi de um metro (Figura 23), parâmetro que representa a altura de armazenagem. O índice de vazios em torno de 40% (seixo, brita, pedra-de-mão ou outro) (TUCCI; MARQUES,

2001). E a taxa de filtração, no qual representa a taxa máxima que a água pode ser drenada para fora da camada de fundo da trincheira.

4.6 Modelagem sem Trincheira de Infiltração

Após serem definidos todos os parâmetros no Item 4.4, a rede de drenagem de água pluvial foi modelada no SWMM. Para esta etapa não foram usadas técnicas de infiltração para a rede. Foram realizadas seis simulações, uma para cada tipo de solo da Tabela 6, logo, o único parâmetro diferente para as simulações foram os dados de entrada do método de infiltração Green – Ampt. Na Figura 24 é mostrada a rede inserida no SWMM para o tipo de solo areia.

Figura 24. Modelagem da rede para o solo tipo areia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

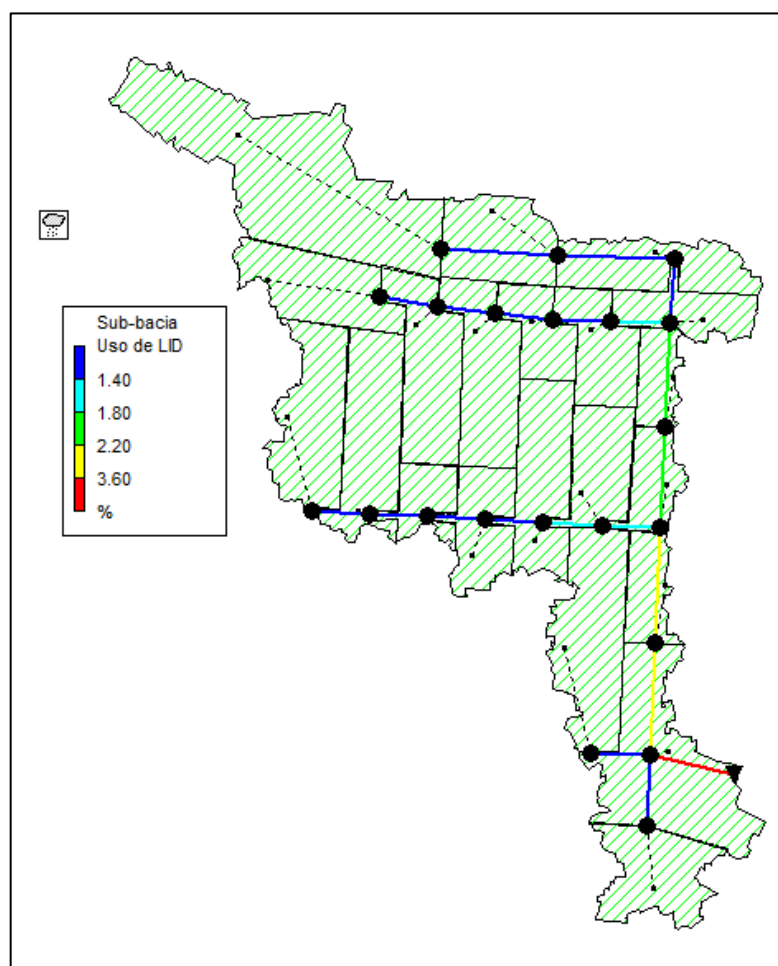
O trecho de tubulação em vermelho mostrado na Figura 24, se conecta ao exutório. Toda a vazão canalizada do sistema de drenagem passa por esse trecho, sendo o objeto de análise para obter o comportamento da vazão de pico.

4.7 Modelagem com Trincheiras de Infiltração

Nesta etapa foram realizadas mais seis simulações. Com os parâmetros das modelagens anteriores, foi inserido os dados de entrada descritos no Item 4.5 para a trincheira de infiltração

A área de cada trincheira de infiltração foi fixada em 10 m² e um metro de camada de brita (Figura 23). Determinou-se que 50% da área impermeável seria direcionado para as trincheiras. Para ter uma distribuição mais uniforme das trincheiras por subárea, foi mantida uma proporção de 2% em relação as áreas das trincheiras e a área da subárea que estão inseridas (Figura 25).

Figura 25. Mapa da quantidade de trincheira (%) por subárea.



Fonte: Elaborado pelo autor.

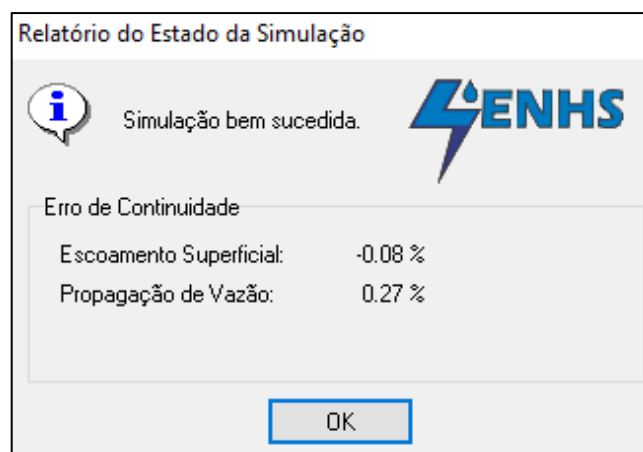
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir se referem as simulações da rede de drenagem pluvial, para a situação sem o uso de dispositivo de controle e outra modelagem da rede com trincheiras de infiltração. Para as duas etapas de modelagem foi avaliado o trecho da galeria que liga o exutório, afim de analisar o efeito da técnica de infiltração na atenuação do pico de vazão.

5.1 Simulações sem as Trincheiras de Infiltração

Na Figura 26 é apresentado o relatório de erro para simulação do solo tipo areia sem trincheiras de infiltração. Os pequenos erros de continuidade, refletem a qualidade da simulação. Para os outros tipos de solos os erros foram semelhantes ao apresentado na Figura 26.

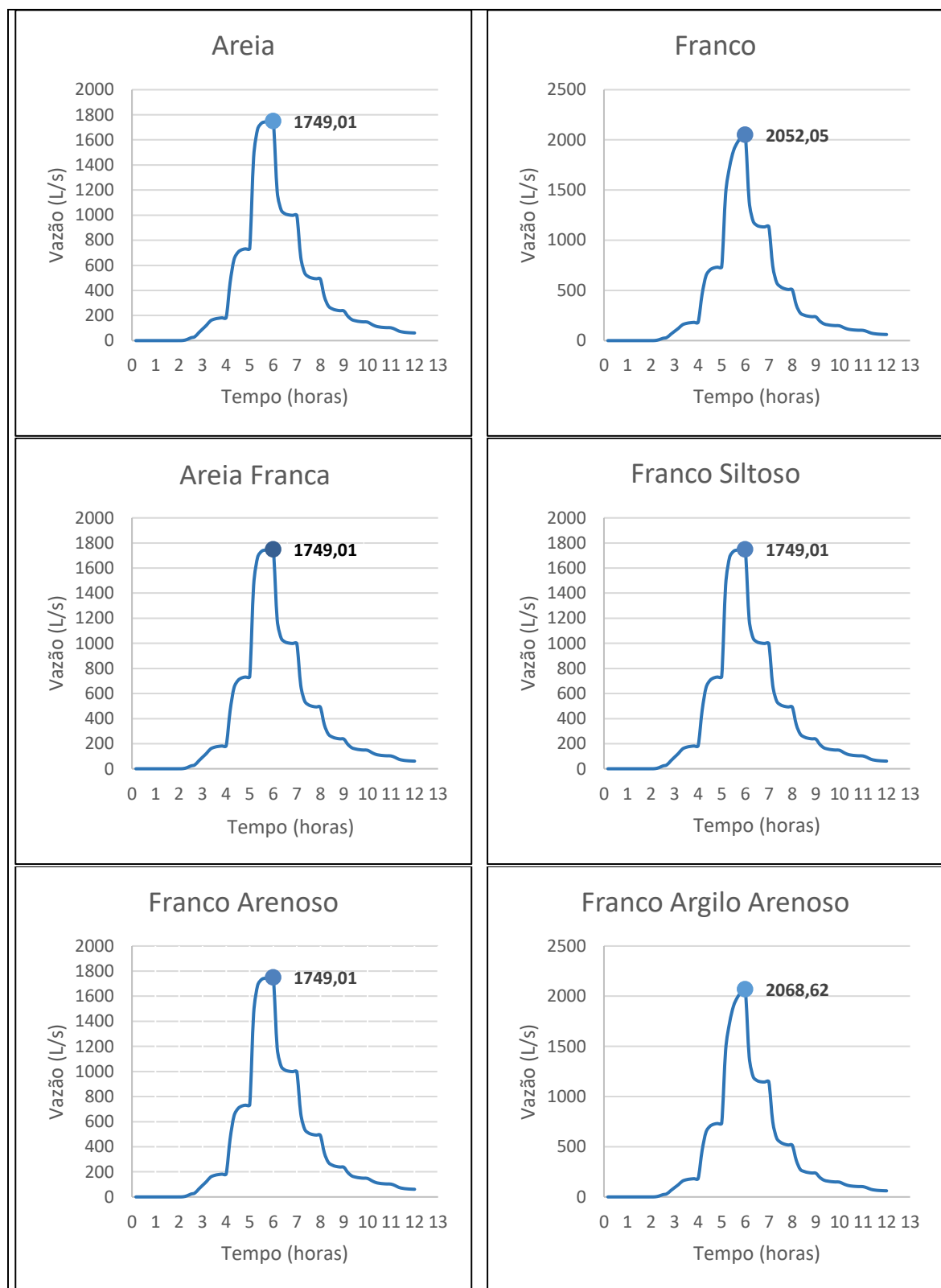
Figura 26. Mensagem de erro da simulação solo de areia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Erros de continuidade com valores maiores que 10%, possuem resultados não confiáveis, sendo necessário rever os parâmetros de entrada. Os gráficos com o comportamento da vazão no exutório em função do tempo para os diferentes tipos de solos são apresentados na Figura 27.

Figura 27. Gráficos de vazão sem o uso de trincheiras de infiltração para diferentes tipos de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

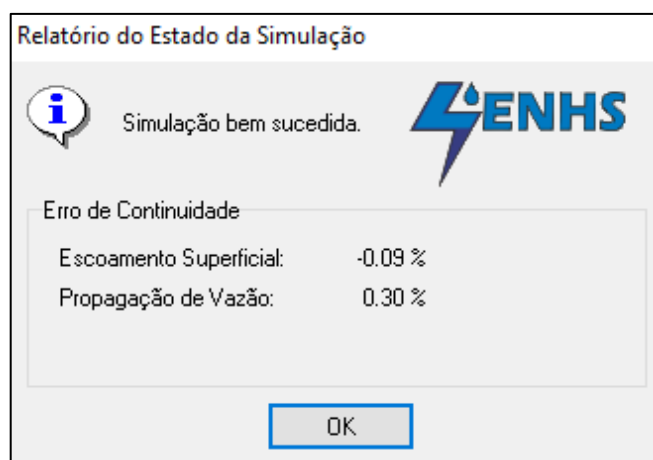
A vazão máxima para todas os seis tipos de solo, ocorreram em 6 horas de simulação. Os solos tipo areia, areia franca, franco arenoso e franco siltoso, apresentaram um pico de vazão de 1749,1 (L/s). O solo franco e o solo arenoso tiveram um pico mais alto de vazão atingindo 2052,05 (L/s) e 2068,62 (L/s), respectivamente.

A pouca variação nos resultados deve-se a parcela pequena de área permeável por subárea, que corresponde apenas a 16%.

5.2 Simulações com as trincheiras de infiltração

O relatório de estado para a simulação do solo tipo areia com trincheiras de infiltração é apresentado na Figura 28. Os pequenos erros de continuidade conferem um resultado confiável a modelagem. Os erros para as outras simulações foram da mesma magnitude.

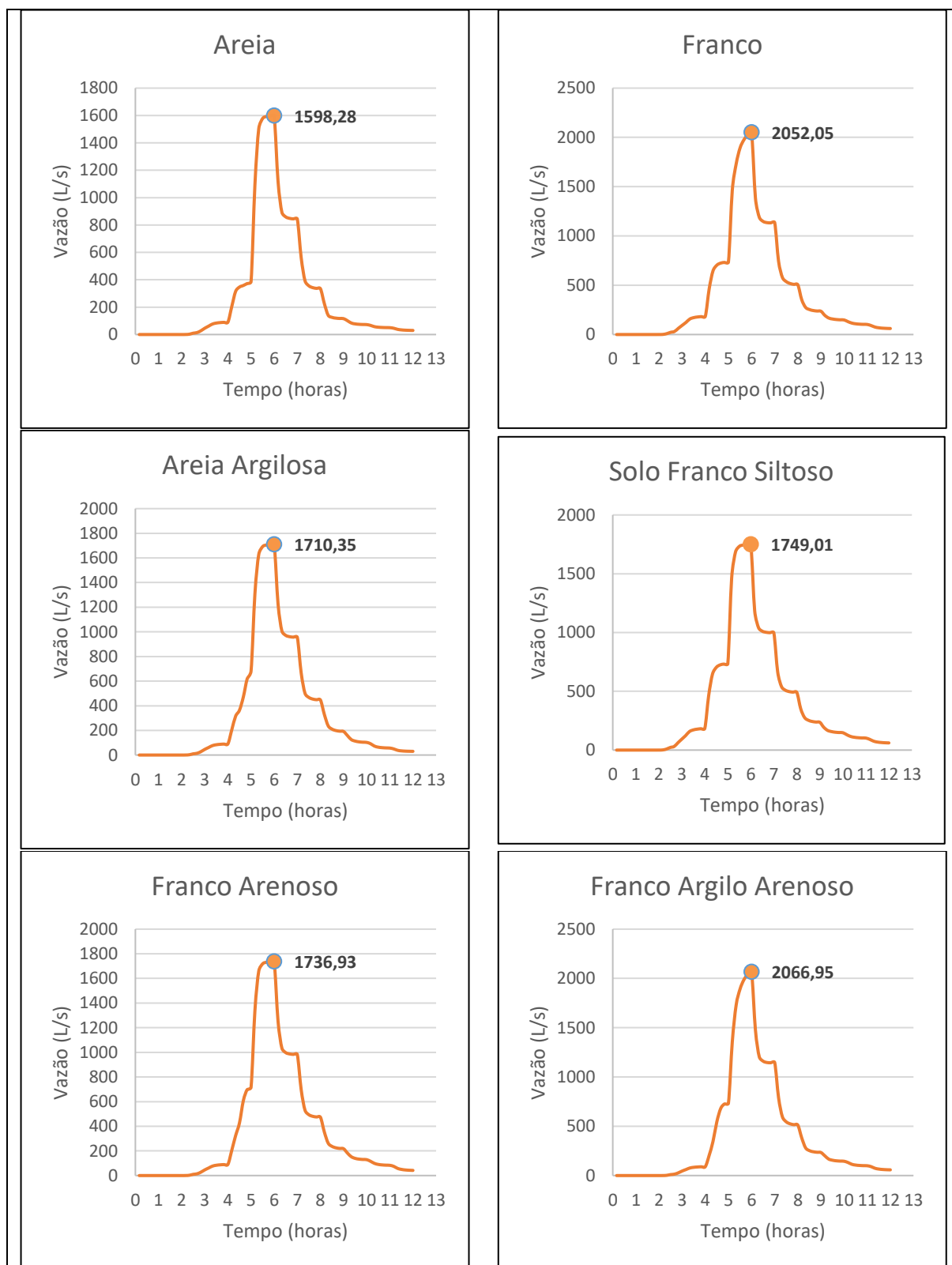
Figura 28. Mensagem de erro da simulação solo de areia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 é mostrado o comportamento da vazão para as simulações da rede de drenagem com trincheiras de infiltração.

Figura 29. Gráficos de vazão com o uso de trincheiras de infiltração para diferentes tipos de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com uma vazão máxima de 1598,28 (L/s), o solo de areia teve o melhor desempenho, já o solo franco argilo arenoso apresentou-se menos eficiente com uma vazão máxima de 2066,95 (L/s). A afluência máxima ocorreu em 6 horas para todas as simulações.

As vazões máximas para as modelagens sem trincheiras de infiltração e com trincheiras de infiltração são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7. Comparativo da vazão máxima na rede para as duas situações de simulações.

Tipo de Solo	Vazão máxima S/trincheira (L/s)	Vazão máxima C/trincheiras (L/s)	Diferença de Vazão (L/s)	Eficiência (%)	Condutividade hidráulica (mm/h)
Areia	1749,01	1598,28	150,73	8,62	117,8
Areia franca	1749,01	1710,35	38,66	2,21	29,9
Franco Arenoso	1749,01	1736,93	12,08	0,69	10,9
Franco	2052,05	2052,05	0	0,00	3,4
Franco Siltoso	1749,01	1749,01	0	0,00	6,5
Franco Argilo Arenoso	2068,62	2066,95	1,67	0,08	1,5

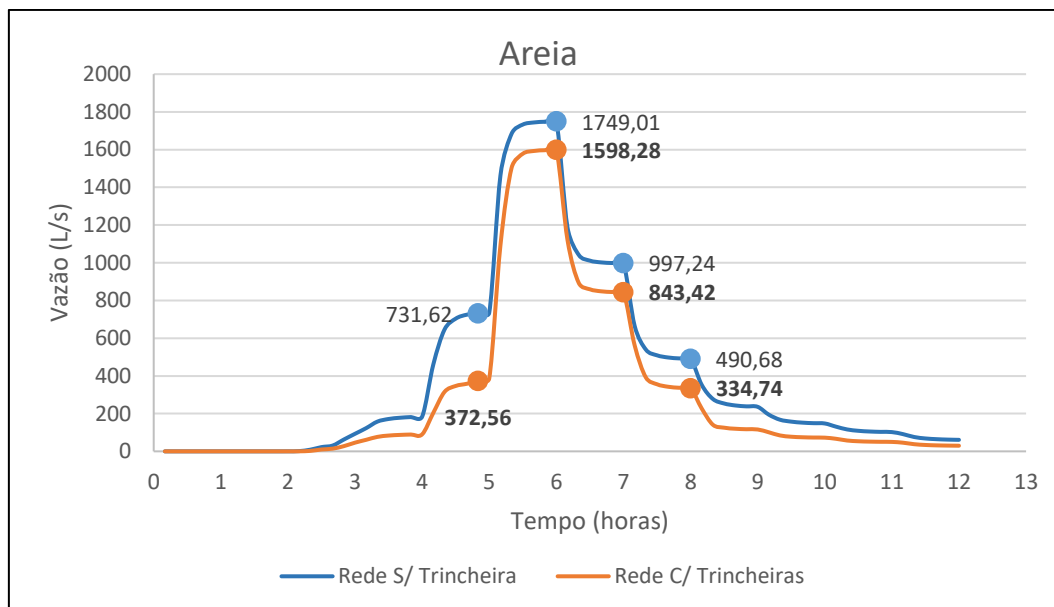
Fonte: Elaborado pelo autor.

A eficiência da trincheira de infiltração calculada na Tabela 7 (coluna 5), é a porcentagem da diferença de vazão (coluna 4) em relação a vazão máxima sem trincheira de infiltração (coluna 2). De forma geral, a eficiência está diretamente ligada a condutividade hidráulica do solo (coluna 6), que por sua vez, reflete taxa de infiltração de cada solo.

O solo de areia teve a melhor eficiência reduzindo 8,62% da vazão de pico da rede simulada. A eficiência foi diminuindo a medida que os solos empregados na modelagem possuíam capacidade de infiltração menores.

No gráfico da Figura 30 é mostrada a variação da vazão em relação ao tempo de duração do evento chuvoso para a rede de drenagem sem trincheira de infiltração e com trincheira de infiltração, modelada com o solo areia.

Figura 30. Rede simulada sem trincheira de infiltração e com trincheira de infiltração para o solo de areia.



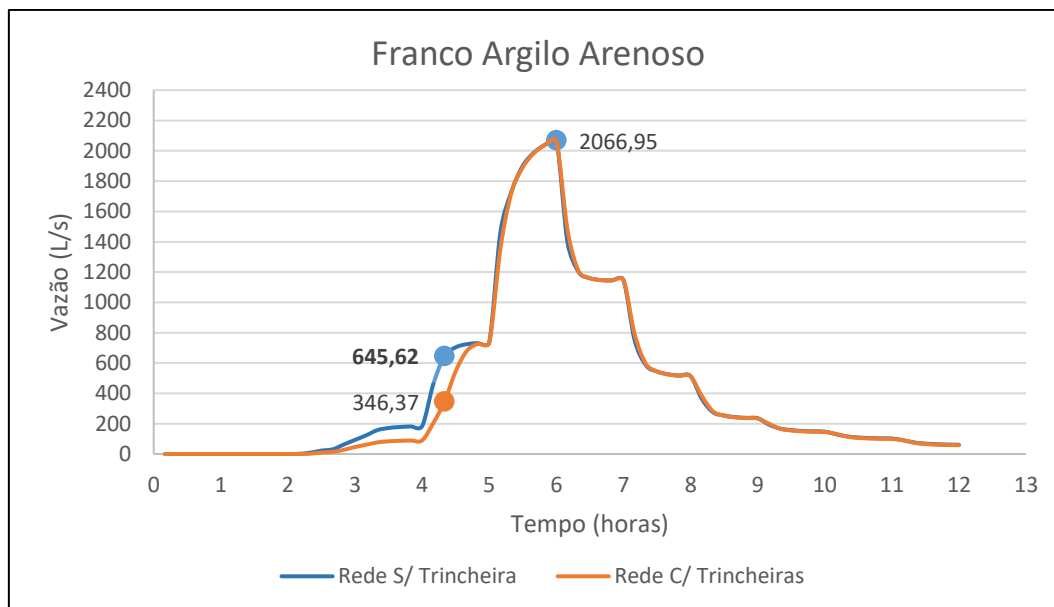
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 30, percebe-se que próximo ao tempo de simulação de 5 horas, a vazão sem trincheira de infiltração é de 731,62 (L/s) e 373,56 (L/s) para modelagem com trincheira de infiltração, resultando em uma eficiência de atenuação de vazão de 49%.

Para um evento chuvoso de menor magnitude as trincheiras de infiltração têm um melhor desempenho, uma vez que são compostas por pedras e cascalhos, tendo um índice de vazios de 40%, conferindo armazenamento da água. Quando a capacidade de armazenamento é atingida sua eficiência diminui, pois, a trincheira de infiltração só diminui o escoamento superficial da rede na proporção em que a água infiltra para fora de sua última camada.

A simulação para o solo franco argilo arenoso sem trincheira de infiltração e com trincheira de infiltração, é mostrada no gráfico da Figura 31.

Figura 31. Rede simulada sem trincheira de infiltração e com trincheira de infiltração para o solo franco argilo arenoso.



O uso de trincheiras de infiltração para o solo franco argilo arenoso, tem uma eficiência significativa até 5 horas de simulação, a partir desse tempo a redução de vazão é praticamente nula, pois a trincheira perdeu sua capacidade de armazenamento, e o solo franco argilo arenoso possui uma má capacidade de infiltração. Esse comportamento se assemelha ao uso de trincheiras de infiltração com fundo impermeável e sem dreno.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do uso de trincheiras de infiltração em uma rede de drenagem na cidade do Recife.

Ocupando 2% da área total de cada subárea, foi visto que as trincheiras de infiltração diminuíram até 8,6% do pico de vazão e para eventos chuvosos de menor intensidade, uma eficiência de até 49%.

A partir dos resultados analisados, percebeu-se que a utilização de trincheiras de infiltração para atenuar as vazões máximas em uma rede de drenagem, é mais eficiente para solos com melhor capacidade de infiltração (areia), garantido a trincheira uma rápida recuperação da capacidade de infiltração. Já para os solos argilosos, que, possuem baixa taxa de infiltração, o uso de trincheiras de infiltração é menos eficiente.

De forma geral, as trincheiras de infiltração conferem maior infiltração da água no solo, diminuindo os picos de vazão na região de estudo e nas regiões a jusante.

Como sugestão, fica a realização da simulação na escala bacia, sendo possível analisar a vazão no ponto crítico de alagamento, possibilitando o planejamento e avaliação de técnicas para atenuar essa vazão.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDENFUM, J. A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. RBRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos. Volume 5, 2000. p. 21-29.
- CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. **Controle da Drenagem Urbana no Brasil: Avanço e Mecanismos para a Sua Sustentabilidade**, XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo - SP, 2007.
- FEITOSA, F. F. S. **Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para Atenuação de Picos de Cheia Utilizando o SWMM**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2015.
- GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 27 de julho de 2018.
- GURGEL, G. M.; RIGHETO, A. M. **Crescimento urbano e seus impactos no sistema de drenagem de uma bacia em Natal, RN**. REGA, Porto Alegre - RS, v. 13, n. 1, p. 54-68, 2016.
- HAMANDA, E.; GONÇALVES, R. R. V. **Introdução ao geoprocessamento: Princípios Básicos e Aplicação**, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, 2007.
- IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010. Em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>>. Acesso em 14 de dezembro de 2017.
- LUCAS, A. H; ANGELINA SOBRINHA. L; MORUZZI. R. B; BARBASSA. A. P., **Avaliação da Construção e Operação de Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana: o Transporte de Finos, a Capacidade de Infiltração, a Taxa de Infiltração Real do Solo e a Permeabilidade da Manta Geotêxtil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, 2015.
- MANUAL DO SWMM BRASIL. **EPA 5.0-Modelo de Gestão de Drenagem Urbana**. 2012. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acesso: 15 de julho de 2018.

MELLER, A.; PAIVA, E. M. C. D. **Simulação Hidrodinâmica 1 D de Inundações em Sistema de Drenagem Urbana**, Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2007

MOURA, E. F. S.; SILVA, S. R. **Estudo do Grau de Impermeabilização do Solo e Propostas de Técnicas de Drenagem Urbana Sustentável em Área do Recife-PE**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, 2015.

PÔMPEO, C. A. **Drenagem urbana sustentável**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre - RS, v. 5, 2000.

REIS, R. P. A.; OLIVEIRA, L. H.; SALES, M. M. **Sistemas de Drenagem na Fonte por Poço de Infiltração de Águas Pluviais**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 99-117, 2008.

ROSA, R. **Geotecnologias na Geografia aplicada**. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, v. 16, p. 81-90, 2005.

ROSSMAN, L. A. **Storm water management model users' manual version 5.0**. U.S. Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Div., National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati. 2004.

SILVA JUNIOR, M. A. B. **ALTERNATIVAS COMPENSATÓRIAS PARA CONTROLE DE ALAGAMENTOS EM LOCALIDADE DO RECIFE-PE**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA JUNIOR; M. A. B.; SILVA, S. R. **Impactos da Urbanização e das Alterações Climáticas no Sistema de Drenagem do Recife/PE**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, 2016.

SILVA, F. J. L. T.; ROCHA, D. F.; AQUINO, C. M. **Geografia, Geotecnologias e as Novas Tendências da Geoinformação: indicação de estudos realizados na região Nordeste**. Revista de Geografia e Interdisciplinaridade, Maranhão, 2017.

SILVA, J. X. **O que é Geoprocessamento?** Revista do Crea-RJ, 2009

SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. S. P. **Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouro e em Grande Área da Bacia**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 19, 2014.

SILVA, S. R. **Os Impactos da Urbanização na Drenagem Urbana**. Recife - PE, 2015.

SMITH, A. A. **Theory - Calculating Effective Rainfall - The Green and Ampt Method**. Disponível em: < <http://www.alanasmith.com/theory-Calculating-Effective-Rainfall-The-Green-Ampt-Method.htm> > Acesso: 29 de julho de 2018.

SOUZA, F. P.; BALBINO, L. G.; COSTA, M. E.; KOIDE, S.; REIS JUNIOR, D. S. **Avaliação do Modelo SWMM com Diferentes Equações de Infiltração e Propagação de Ondas de Cheia em Galerias de Drenagem de Águas Pluviais na Sub-Bacia do Iate Clube no Lago Paranoá**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

SOUZA, V. C. B. **Gestão da Drenagem Urbana no Brasil: Desafios para a Sustentabilidade**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologia Ambiental, v. 1, 2013.

TOMAZ P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. 2013. Disponível Em: <www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo.../capitulo02.pdf> Acesso em: 28 de julho de 2018.

TUCCI, C. E. M. **Água no Meio Urbano**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Capítulo 14 do Livro Água doce, 1997.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. V. 2, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre – RS, 2003.

TUCCI, C. E. M. - **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**, Curso de Gestão das Inundações Urbanas, Porto Alegre – RS, 2005.

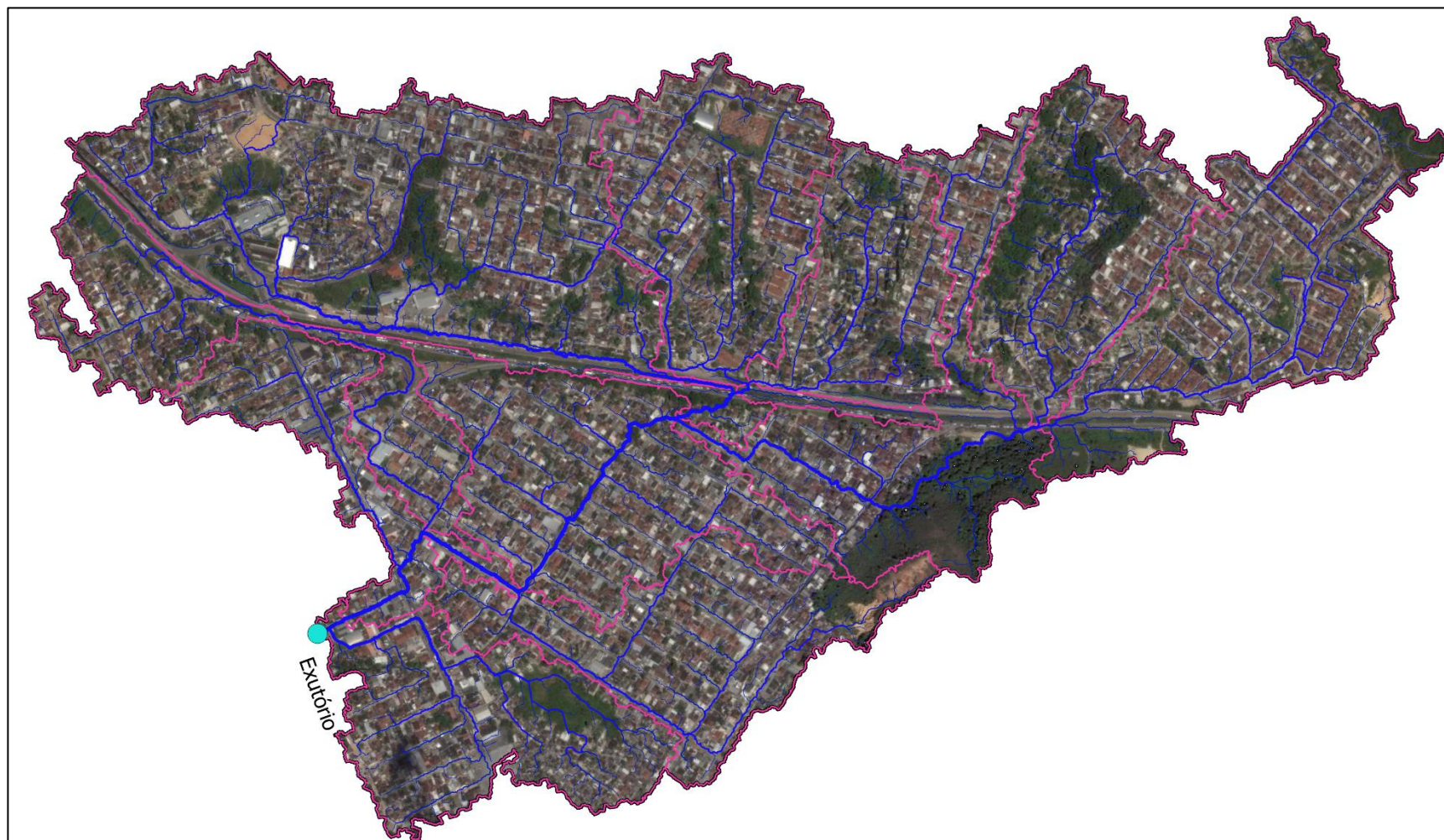
TUCCI, C. E. M. **Águas Urbanas**. Estudos Avançados, FapUNIFESP (SciELO), v. 22, 2008.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. McGraw-Hill do Brasil Ltda. 2ª ed. São Paulo 1980.

XAVIER, J. S. **Geoprocessamento para Análise Ambiental**. Rio de Janeiro, 1ª Ed, 2001.

APÊNDICE A – LINHAS DE FLUXO

Figura 32. Linhas de fluxo para a bacia delimitada



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – ELEVAÇÃO DE SUPERFÍCIES

Figura 33. Elevação da superfície da bacia delimitada com o *plugin Qgis2threejs*.



Fonte: Elaborado pelo autor.