

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

MARIANA DE BARROS DLUMOU

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE SOLOS PASSÍVEIS DE
INUNDAÇÕES EM DECORRÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO
ESPAÇO URBANO**

**RECIFE - PERNAMBUCO
2024**

MARIANA DE BARROS DLUMOU

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE SOLOS PASSÍVEIS DE
INUNDAÇÕES EM DECORRÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO
ESPAÇO URBANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

**RECIFE - PERNAMBUCO
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

D111c Dlumou, Mariana de Barros.
Caracterização hidrodinâmica de solos passíveis de inundações em decorrência do uso e ocupação do espaço urbano / Mariana de Barros Dlumou. - Recife, 2024.
85 f.; il.

Orientador(a): Eduardo Soares de Souza.
Co-orientador(a): Marcus Metri Corrêa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Infiltração . 2. Inundações. 3. Urbanização. 4. Hidrodinâmica 5. Escoamento urbano. I. Souza, Eduardo Soares de, orient. II. Corrêa, Marcus Metri, coorient. III. Título

CDD 620.8

MARIANA DE BARROS DLUMOU

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE SOLOS PASSÍVEIS DE
INUNDAÇÕES EM DECORRÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO ESPAÇO
URBANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 30 de agosto de 2024.

Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza
Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Antonio Celso Dantas Antonino
Membro Externo - UFPE

Prof. Willames de Albuquerque Soares
Membro Externo - UPE

*Dedico este trabalho aos meus pais, Sílvia e
Soraya, minha base de tudo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais, Sílvio Dlumou e Soraya Barros, meus maiores incentivadores e principais responsáveis por todas as minhas conquistas, por todo o apoio, paciência, amor e carinho durante essa jornada, especialmente na reta final. Sou muito sortuda por tê-los em minha vida.

À minha querida avó Dilza Mariano (*in memoriam*), que sempre acreditou no poder transformador da educação e enxergou um futuro promissor em mim. Sua dedicação como professora e suas conquistas através do conhecimento são uma inspiração para minha trajetória. Agradeço profundamente por seu exemplo, apoio e fé em meu potencial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Soares, que apesar da distância geográfica durante a maior parte desse trabalho, esteve constantemente presente e disponível durante minha jornada acadêmica. Minha profunda gratidão pela orientação, comprometimento, confiança, paciência e ensinamentos. Foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também a todas as professoras e todos os professores com quem tive o prazer de encontrar e aprender ao longo desta jornada, em especial o Prof. Dr. Marcus Metri, meu coorientador e orientador do estágio de docência. Admiro muito sua forma de transmitir conhecimento.

À Ana Lua, amiga de graduação, de apartamento e de vida, por embarcar nessa jornada comigo e topa todas as aventuras existentes, mesmo que elas signifiquem uma semana realizando análises sob o sol. Sua presença ao longo desses anos foi um verdadeiro alento. Obrigada por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava de mim mesma. À Flávia Gomes, também amiga de graduação e *roomate*, por ter sido a faísca que acendeu a ideia de fazer o mestrado. Mesmo que nossos caminhos tenham se separado antes da conclusão, seu apoio, amizade e disponibilidade foram fundamentais e continuarão sendo lembrados com muito carinho. Sou muito grata às duas por ter tido a oportunidade de compartilhar essa experiência com vocês. Jamais esquecerei das boas (e nem tão boas) memórias do nosso apartamento 207B e dos nossos passeios pela cidade.

À Brenda Viana, cuja companhia e apoio incondicional me auxiliaram a superar os desafios ao longo desse percurso, apesar de ter entrado em minha vida no meio do caminho. Sua compreensão, paciência e incentivo diários foram fundamentais para a conclusão da dissertação e fizeram toda a diferença.

Aos meus colegas de turma, pela parceria e amizade ao longo desta jornada, em especial a Mayara Carolino, que me acolheu tão bem e que levarei para a vida. Lembro que o

início do mestrado aconteceu de forma remota devido à pandemia, com um contato muito limitado, então ter ido ao Recife e conhecido vocês foi uma experiência muito boa e enriquecedora.

Ao Coqueiral Park, Escola Heinz Hering, Paintball Eldourado, Sítio Fruto da Graça, 1º Batalhão Duarte Coelho, Bar do Biu do Pirulito e Sítio do Seu Nem, estabelecimentos que gentilmente abriram suas portas para que eu pudesse realizar meus ensaios. A disponibilidade e o acolhimento demonstrados foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental pela oportunidade de realizar a pós-graduação. Ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco, onde pude realizar as análises no Laboratório de Física dos Solos. Agradeço em especial ao Severino Neto, Sheilane Luz e Marco Holanda pelo auxílio e orientação durante a realização das minhas análises.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de estudos, essencial para minha permanência no Recife nesses anos.

Por fim, expresso minha gratidão a mim mesma por ter persistido e concluído este trabalho. Agradeço-me por não ter desistido, por ter mantido o foco e por ter acreditado na capacidade de concluir este projeto com dedicação e esforço.

RESUMO

DLUMOU, Mariana de Barros, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, agosto de 2024. **Caracterização hidrodinâmica de solos passíveis de inundações em decorrência do uso e ocupação do espaço urbano.** Orientador: Eduardo Soares de Souza. Coorientador: Marcus Metri Corrêa.

A permeabilização urbana, aliada à reabilitação de ecossistemas urbanos e periurbanos, é uma estratégia crucial para mitigar os impactos das inundações em bacias hidrográficas litorâneas passíveis de inundações. Este estudo investiga a restauração de florestas urbanas e a promoção de práticas de agriculturas urbanas autossustentáveis como meios para controlar o escoamento superficial e reduzir a ocorrência de inundações. Inicialmente, foi aplicada uma metodologia semifísica, baseada em medições de infiltração e análise da textura dos solos, para estudar o comportamento hidrodinâmico dos solos na bacia do rio Fragoso, em Olinda – PE. O principal objetivo foi analisar as propriedades hidrodinâmicas dos solos urbanos para avaliar o processo de infiltração da água nessa bacia hidrográfica. Posteriormente, o modelo SWMM (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana) foi utilizado para simular diferentes cenários de permeabilização e impermeabilização, utilizando o método de infiltração de Green-Ampt (GA), com o intuito de avaliar o impacto dessas intervenções nas inundações urbanas, particularmente em condições de precipitação intensa e variações de maré no exutório. Os resultados demonstram que o aumento de áreas com maior capacidade de infiltração, resultante das intervenções não estruturais e sustentáveis, proporciona uma maior taxa de redução do escoamento superficial em comparação com o cenário atual de urbanização. Esses achados confirmam que a permeabilização a partir da restauração ecológica urbana são estratégias eficazes para a atenuação de desastres de inundações em áreas urbanas.

Palavras-chave: Infiltração; BEST; Urbanização; Modelagem hidrodinâmica; SWMM.

ABSTRACT

DLUMOU, Mariana de Barros, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, August, 2024. **Hydrodynamic characterization of soils subject to flooding as a result of the use and occupation of urban space.** Adviser: Eduardo Soares de Souza. Co-adviser: Marcus Metri Corrêa.

Urban permeabilization, when combined with the rehabilitation of urban and peri-urban ecosystems, emerges as a crucial strategy for mitigating the impacts of flooding in flood-prone coastal watersheds. This study, which investigates the restoration of urban forests and the promotion of sustainable urban agricultural practices, provides practical solutions for controlling surface runoff and reducing the occurrence of floods. The study initially applied a semi-physical methodology, based on infiltration measurements and soil texture analysis, to study the hydrodynamic behavior of soils in the Fragoso River basin in Olinda – PE. The main objective was to analyze the hydrodynamic properties of urban soils and evaluate the water infiltration process in this watershed. The study then used the SWMM (Storm Water Management Model) to simulate different scenarios of permeabilization and impermeabilization, utilizing the Green-Ampt (GA) infiltration method. The aim was to assess the impact of these interventions on urban flooding, particularly under intense precipitation conditions and tide variations at the outfall. The results, which demonstrate that the increase in areas with higher infiltration capacity, resulting from non-structural and sustainable interventions, provides the highest rate of surface runoff reduction compared to the current urbanization scenario, have significant practical implications for urban planners, environmentalists, and policymakers.

Keywords: Infiltration; BEST; Urbanization; Hydrological Modeling, SWMM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estágios de desenvolvimento da drenagem urbana.	17
Figura 2 - Mapa de localização da bacia do rio Frágoso.	26
Figura 3 - Mapa geológico da bacia do rio Frágoso.	27
Figura 4 - Mapa geomofológico da bacia do rio Frágoso.	28
Figura 5 - Mapa pedológico da bacia do rio Frágoso.	29
Figura 6 - Mapa de classificação climática (segundo Koppen) da bacia do rio Frágoso.	30
Figura 7 - Mapa de formações vegetais na bacia do rio Frágoso.	31
Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do rio Frágoso.	32
Figura 9 - Evolução temporal do uso e cobertura do solo na bacia do rio Frágoso.	33
Figura 10 - Variação espacial do uso e ocupação do solo na bacia do rio Frágoso entre os anos de 1985 e 2022.	34
Figura 11 - Aspectos das áreas urbanizadas a) não pavimentadas e b) pavimentadas na bacia do Frágoso.	35
Figura 12 - Localização dos pontos de ensaio na bacia do rio Frágoso.	36
Figura 13 - Acondicionamento das amostras coletadas.	37
Figura 14 - Etapas do processo de sedimentação da análise granulométrica.	38
Figura 15 - Etapas do processo de peneiramento da análise granulométrica.	38
Figura 16 - Método do balão volumétrico.	39
Figura 17 - Medição de resistência à penetração por meio do penetrômetro.	40
Figura 18 - Ensaio de infiltração.	41
Figura 19 - Infiltração em área urbana pavimentada utilizando massa de calafetar entre infiltrômetro e superfície.	42
Figura 20 - Situação de pontos da bacia do Frágoso durante evento de chuva em 30/05/2016.	46
Figura 21 - Ilustração da curva de maré e identificação dos parâmetros da expressão analítica.	48
Figura 22 - Curvas de infiltração acumulada para as classes de uso e cobertura do solo.	55
Figura 23 - Valores médios da sorvidade S (A), dos parâmetros de normalização Ks (B), hg (C) e Θ_s (E) e de forma n (F), m (G) e η (H) e para as diferentes classes de uso e ocupação do solo da bacia do Frágoso.	58

Figura 24 - Curvas de retenção de água no solo, $\psi(\theta)$, para as diferentes classes de uso e ocupação do solo, oriundas das análises do BEST. $\psi(\theta_i)$ é o potencial da água para θ_i medido com o Beerkan e assumida como equivalente a θ na frente de molhamento da equação.....	59
Figura 25 - Discretização da bacia do rio Frágoso em sub-bacias.	60
Figura 26 - Layout do modelo SWMM.	61
Figura 27 - Visualização da série temporal de chuva do evento 1 no SWMM.	62
Figura 28 - Visualização do comportamento da curva da maré no exutório (evento 1) no SWMM.	63
Figura 29 - Valores médios de escoamento superficial (A), perdas por infiltração (B), armazenamento superficial final (C) e erro de continuidade (D) simulados com SWMM, para dez eventos extremos de chuva ocorridos na bacia do Frágoso.	64
Figura 30 - Perfil da cota do nível d'água dos canais da bacia do Frágoso em momento crítico da chuva do dia 30/05/2016.....	65
Figura 31 - Síntese de inundações na bacia do Frágoso para diferentes cenários (impermeabilização x permeabilização) para eventos de chuvas intensas ocorridas em 30/05/2016, 13/04/2017 e 06/02/2023.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos analisados na bacia do rio Fragoso.....	36
Tabela 2 - Dados relativos aos períodos simulados.....	45
Tabela 3 - Coordenadas das estações pluviométricas utilizadas nas simulações.	47
Tabela 4 - Caracterização textural média dos solos estudados.....	52
Tabela 5 - Valores de densidade do solo (ρ_s), densidade da partícula (ρ_p), porosidade total (ϕ), resistência do solo à penetração, antes (R _{Pi}) e depois (R _{Pf}) das medidas de infiltração.	53
Tabela 6 - Taxas de infiltração de acordo com o uso.	56
Tabela 7 - Dados de entrada das sub-bacias no modelo SWMM.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de entrada para os métodos de infiltração no SWMM.	50
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo geral	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1. Inundações com o desenvolvimento urbano.....	15
3.2. Dinâmica da água no solo.....	19
3.3. Propriedades hidrodinâmicas do solo	20
3.4. Infiltração da água no solo.....	21
3.5. Modelagem hidrológica	24
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1. Localização e caracterização da bacia do Fragoso	26
4.1.1. Geologia, geomorfologia e pedologia da bacia do Fragoso.....	27
4.1.2. Clima, vegetação e ocupação do solo	29
4.2. Caracterização física e infiltração dos solos	34
4.3. Modelagem hidrológica com o SWMM	43
4.3.1. Variáveis e parâmetros de entrada do SWMM.....	43
4.3.2. Cenários de simulação	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1. Características físicas do solo	52
5.2. Ensaios de infiltração.....	54
5.3. Propriedades hidrodinâmicas dos solos	57
5.4. Modelo SWMM.....	60
5.4.1. Discretização da bacia do Fragoso.....	60
5.4.2. Variáveis e parâmetros de entrada	61
5.4.3. Cenários de simulação	65
6. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A - CURVAS GRANULOMÉTRICAS	80
APÊNDICE B - PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS	81
APÊNDICE C - HIETOGRAMAS	83
APÊNDICE D - CHUVA X CURVA DE MARÉ	84

1. INTRODUÇÃO

O acelerado desenvolvimento urbano, especialmente a partir da segunda metade do século XX, gerou uma competição intensa por recursos naturais, como solo e água, resultando na destruição de parte da biodiversidade natural (Tucci, 2008). Esse crescimento alterou significativamente o sistema hidrológico, diminuindo a recarga dos aquíferos e aumentando o escoamento superficial (Mancuso et al., 2014).

Durante períodos de alta precipitação, o aumento de inundações e suas consequências tornam-se evidentes. O problema se agrava com a frequência crescente de chuvas extremas, como destacado no sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021). O aumento expressivo do escoamento potencializa desastres relacionados a inundações, com sérios impactos sociais, ecológicos e econômicos, incluindo poluição hídrica, danos à infraestrutura e problemas de saúde pública (Hung et al., 2020). Nos últimos anos, o Brasil tem enfrentado desastres recorrentes associados a chuvas intensas, resultando em perdas econômicas significativas e altas taxas de mortalidade (WMO, 2021).

Em áreas urbanas, a redução da infiltração da água devido à impermeabilização do solo aumenta o escoamento superficial, elevando o risco de inundações (Costa et al., 2016). Mudanças na cobertura do solo, que impedem a infiltração, fazem com que a água da chuva escoe rapidamente, agravando os riscos de enchentes (Hung; James; Carbone, 2018).

A bacia hidrográfica do rio Frágoso, em Pernambuco, é um exemplo dessa realidade. Localizada principalmente em Olinda e com uma história de degradação (Melo, 2003), a bacia sofre com inundações frequentes, que causam grandes prejuízos à comunidade local. Esses problemas são exacerbados pela impermeabilização da bacia, destruição de matas ciliares, falhas no sistema de drenagem e deposição de resíduos no rio.

Diante desse cenário, é essencial implementar medidas de controle de inundações que promovam a infiltração e reduzam o escoamento superficial. A escassez de dados sobre os parâmetros hidrodinâmicos na região torna fundamental a realização de estudos de caracterização hidrodinâmica dos solos, essenciais para prever e mitigar riscos de inundações.

A infiltração depende das propriedades hidrodinâmicas do solo, e sua caracterização é complexa (Patriota, 2022). Embora existam diversos métodos para essa caracterização, é necessário simplificar os procedimentos devido a restrições econômicas e de tempo (Aiello et al., 2014; França Neto, 2018). Métodos semifísicos, como o método “Beerkan”, que combina

medidas de infiltração com características físicas do solo, são uma alternativa eficiente (Haverkamp et al., 1996).

Compreender o comportamento hidrodinâmico do solo permite avaliar a eficácia de medidas de controle de inundações. Modelos hidrológicos e hidráulicos, suportados por softwares de simulação, possibilitam a criação de cenários que ajudam a prever os efeitos dessas medidas (Decina; Brandão, 2016).

Desse modo, este estudo visou analisar as propriedades hidrodinâmicas dos solos urbanos na bacia hidrográfica do rio Fragoso, em Olinda-PE, introduzi-las na modelagem hidrológica no software SWMM (*Storm Water Management Model*) e, com base em registros históricos de eventos extremos, verificar a reprodução de inundações em cenários de permeabilização e impermeabilização da bacia urbana.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o comportamento hidrodinâmico de solos sujeitos a frequentes inundações e a influência de medidas de controle de inundações na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Fragoso.

2.2. Objetivos específicos

- I. Aplicar uma metodologia semifísica baseada em medidas de infiltração e de textura dos solos para análise das propriedades hidrodinâmicas dos solos da bacia do Fragoso;
- II. Avaliar a influência de diferentes cenários de mudança no uso e ocupação do solo no comportamento hidrológico da bacia do rio Fragoso, por meio da aplicação de modelagem hidrológica.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Inundações com o desenvolvimento urbano

O processo de urbanização é uma realidade globalmente reconhecida, caracterizada por mudanças rápidas na dinâmica das cidades. No Brasil, esse fenômeno começou a se intensificar a partir de meados do século XX, impulsionado por fatores como a migração do campo para as cidades e a rápida expansão da industrialização nas grandes áreas urbanas (Abiko; Moraes, 2009).

Como resultado da intensificação das atividades industriais, a população urbana brasileira apresentou um crescimento expressivo, apresentando, entre os anos de 1950 e 2010, um aumento populacional de 52 para 160 milhões de habitantes. De acordo com o Censo Demográfico de 2010, 84,4% da população viviam em áreas urbanas (IBGE, 2010).

Em contrapartida, a estrutura urbana brasileira não estava preparada para comportar um crescimento populacional tão elevado, resultando em uma ocupação desordenada sem o adequado planejamento urbano e provocando interferências no meio ambiente natural. À medida em que os centros urbanos cresciam, maior eram os desafios de manter essas localidades “saudáveis” (Silva et al., 2016; MDR, 2021).

As principais interferências no meio ambiente natural ocorrem pela utilização do solo natural como solo urbano; pela utilização, extração e esgotamento dos recursos naturais; e pela disposição dos resíduos urbanos (Abiko; Moraes, 2009). Em consequência a isso, uma série de impactos ambientais negativos são evidenciados: a sobrecarga no sistema de drenagem urbana por meio do aumento da impermeabilização do solo e da diminuição da infiltração; a perda da cobertura vegetal por pavimentos impermeáveis; a escassez e a diminuição da qualidade dos recursos hídricos; e o acúmulo de resíduos sólidos nos elementos do sistema de drenagem, que, por obstruí-los, gera transbordamentos em períodos de chuva (Santos; Rufino; Barros Filho, 2017).

A redução das áreas de infiltração da água no solo associada às intervenções nos leitos dos cursos d’água, como as canalizações, e aos sistemas de drenagem ineficientes, contribui para o aumento e a aceleração do escoamento superficial. Essa combinação leva ao aumento da vazão de pico e dos volumes escoados em um curto período, provocando episódios de inundações recorrentes em bacias urbanas (Cavalcanti, 2020).

Em uma bacia não urbanizada, o sistema natural de controle distribuído regula o fluxo de água. Nesse sentido, elementos como a vegetação, depressões naturais e solos permeáveis

contribuem para o processo de infiltração, retenção temporária e evapotranspiração dentro da bacia hidrográfica. Esses mecanismos naturais ajudam a armazenar e suavizar o escoamento antes de chegar nos cursos d'água. A urbanização, no entanto, interrompe esses processos naturais, resultando em vários impactos negativos (Andoh; Declerck, 1997; Makropoulos; Butler; Maksimovic, 1999).

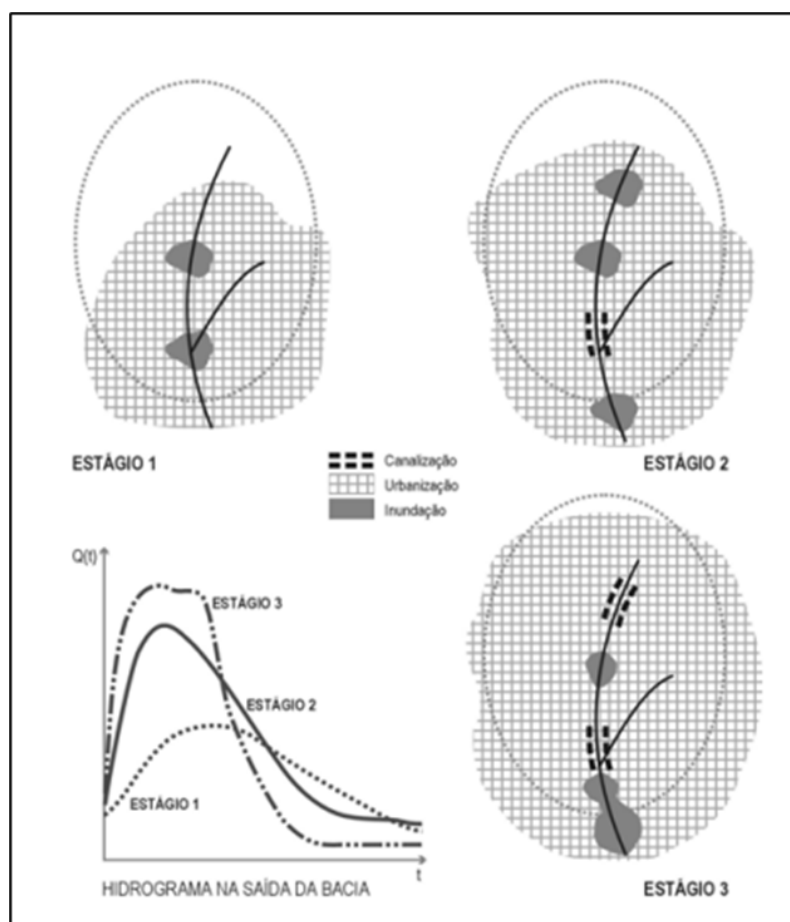
Devido às características do relevo, a direção geral da urbanização ocorre normalmente de jusante para montante da macrodrenagem urbana. No processo de urbanização, é comum que os projetos imobiliários não avaliem o impacto causado pelo aumento da vazão máxima sobre todo o restante da bacia. Os impactos de diferentes edificações, portanto, são combinados e potencializam o cenário de inundações a jusante. Nesse sentido, as áreas mais afetadas por essa tendência são aquelas mais antigas, próximas à foz do rio (Tucci, 2004).

Na macrodrenagem, a tendência de controle da drenagem urbana é de canalizar trechos críticos de rios. Além de onerosas, essas soluções mostram-se ineficazes, uma vez que focam apenas em trechos particulares da bacia, sem considerar toda a sua área e diferentes horizontes de ocupação urbana. Ainda, são responsáveis por agravar e prolongar outros problemas associados, como os esgotos e a decorrente poluição (Bonsucesso et al., 2019).

A canalização de rios é uma prática bastante adotada em diversas localidades, como na bacia do rio Frágoso em Olinda - PE, cuja canalização foi aplicada em trecho de seu curso principal (Fonseca Neto, 2020); nas bacias do rio do Peixe e do Rio Santo Anastácio, em Presidente Prudente – SP (Fagundes, 2022); e na bacia do rio Roncador, em Duque de Caxias – RJ (Costa; Fonseca; Silva Junior, 2021). De forma geral, no Brasil, a prática persiste em cidades de todo porte (Ferreira *et al.*, 2023).

Tucci (2008) aponta ainda que a canalização de rios não soluciona o problema das inundações, mas transfere-o para outro lugar da bacia. O mais comum de acontecer no desenvolvimento da drenagem é uma sequência dividida em três estágios: no primeiro, a urbanização ocorre de maneira distribuída na bacia, com inundações justificadas por estrangulamentos naturais; no segundo, há o surgimento de canalizações a jusante, com a bacia não totalmente densificada; no terceiro, por fim, há a continuidade da canalização dos rios, neste caso com uma maior densificação da bacia (Figura 1).

Figura 1 - Estágios de desenvolvimento da drenagem urbana.



Fonte: Tucci (2004).

A abordagem mais adotada no Brasil para o controle de inundações segue princípios higienistas, com vistas à rápida evacuação das águas pluviais por meio de condutos nos locais considerados “geradores” das inundações (Canholi, 2014). Nessa abordagem, os sistemas de drenagem são conhecidos como sistemas tradicionais e são geralmente compostos pela rede de transporte de escoamento. As soluções mais comuns incluem a construção de galerias e condutos subterrâneos, os quais permitem o transporte rápido do excesso de água para áreas a jusante. No entanto, a experiência com a utilização desse tipo de solução evidenciou, ao longo do tempo e da continuidade da urbanização, a obsolescência desses sistemas e a necessidade de soluções adaptadas a um contexto crescente de preservação ambiental (Silva, 2006).

As inundações urbanas, potencializadas pela urbanização, configuram um dos principais desafios das grandes cidades, acarretando inúmeros prejuízos nos setores de habitação, saneamento, transporte, saúde pública, entre outros. Nesse sentido, torna-se imprescindível a busca por soluções sistêmicas e integradas de manejo sustentável das águas

pluviais em detrimento das abordagens tradicionais, as quais possam restaurar padrões de escoamento similares aos de pré-urbanização (Rezende; Miguez; Veról, 2013).

Medidas sustentáveis de drenagem urbana

A transição para um modelo sustentável de drenagem requer um compromisso com as implicações futuras das decisões atuais. Nesse sentido, devem ser flexíveis para permitir ajustes e adaptações durante o desenvolvimento urbano (Canholi, 2014).

As novas concepções de projetos de drenagem buscam uma integração com os planos de desenvolvimento urbano e a gestão do uso e ocupação do solo, além de incorporarem técnicas preservacionistas. Essa abordagem permite uma atuação mais ampla, tanto no tempo quanto no espaço, dos projetos de controle de inundações, focando não nas consequências das chuvas intensas, mas nas causas dos eventos (Rezende; Miguez; Veról, 2013).

Segundo Tucci (2002), nessa nova abordagem alguns princípios modernos de drenagem são considerados: inserção do plano de drenagem no plano de desenvolvimento urbano e ambiental da cidade; consideração da bacia como sistema, com controle do escoamento realizado não mais em trechos isolados; impactos não devem ser transferidos para jusante; controle do volume de escoamento, não apenas das vazões máximas.

Essas soluções alternativas frequentemente apresentam uma estrutura simples e utilizam processos naturais para facilitar a drenagem e o escoamento das águas pluviais. Entre essas práticas, pode-se destacar a implementação de faixas gramadas ao longo de calçadas, que criam áreas para retardar e escoar a água da chuva; o uso de bacias de retenção, poços de infiltração, trincheiras de infiltração, telhados verdes; a aplicação de pavimentos permeáveis; e a instalação de reservatórios de detenção, entre outras (UDFCD, 2002).

É válido ressaltar que essas alternativas também podem desempenhar um papel importante não só no que diz respeito às inundações, como também na melhoria da qualidade da água e da redução da poluição difusa, por meio da detenção e infiltração de parte das águas pluviais antes de atingirem a rede convencional de drenagem. Nesse sentido, além de protegerem contra as inundações, auxiliam na manutenção da qualidade dos corpos d'água (Roesner et al., 2001).

Esses sistemas sustentáveis de drenagem urbana incluem medidas estruturais, caracterizadas como obras de intervenção física que consistem na construção de suportes como parte integrante de sua estrutura, e medidas não estruturais, as quais incluem atividades que

envolvem ações de políticas direcionadas ao planejamento de uso do solo, gerenciamento de zonamento, educação ambiental e planos de defesa civil (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; Parkinson et al., 2003).

3.2. Dinâmica da água no solo

O movimento da água em seu estado líquido ocorre sempre que há diferenças de potencial hidráulico (H) ou potencial total de água (ψ) em diferentes pontos de um sistema. A equação de Darcy foi a primeira equação que permitiu quantificar o movimento de água em condições saturadas, indicando que a densidade de fluxo de água é proporcional ao gradiente de potencial hidráulico no solo. Mais tarde, a equação foi generalizada para solos não saturados, sendo descrita pela Equação 1 abaixo (Reichardt; Timm, 2004):

$$q = -K \cdot \nabla H \quad (1)$$

onde q [$L \ T^{-1}$] é a densidade do fluxo de água, K [$L \ T^{-1}$] é a condutividade hidráulica do solo e ∇H [$L \ L^{-1}$] é o gradiente do potencial hidráulico.

O sinal negativo na equação indica que o sentido da densidade do fluxo é o inverso do gradiente. Por definição, o sentido do gradiente é entendido como aquele no qual o campo potencial cresce (de um valor menor para um valor maior de H) (Reichardt; Timm, 2004).

Posteriormente, Richards (1931), considerou a combinação de conceitos relativos à lei de conservação de massa com processos de transferências de fluidos em meio porosos em condições isotrópicas, obtendo assim uma equação que descreve a transferência de água em solos não saturados para um fluxo vertical z (França Neto, 2018). Conhecida como equação de Richards, a expressão é dada por (Equação 2):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (2)$$

onde $\frac{\partial \psi}{\partial z}$ é o gradiente de potencial total da água no solo, $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ a variação do conteúdo de água no tempo e $\frac{\partial q}{\partial z}$ a variação do fluxo com a profundidade.

Em condições saturadas, a umidade do solo equivale à porosidade total do solo e a condutividade hidráulica atinge o seu valor máximo, sendo chamada de condutividade hidráulica saturada (K_s). As componentes do potencial total consideradas são apenas a gravitacional e a de pressão. Enquanto que em condições não saturadas, o teor de umidade é variável e está abaixo do valor de saturação $K(\theta)$. Essas condições envolvem a maioria dos processos do movimento da água no solo (Bezerra, 2018; Reichardt; Timm, 2004).

3.3. Propriedades hidrodinâmicas do solo

As propriedades hidrodinâmicas do solo que influenciam o comportamento de fluxo estão associadas a duas características, sendo elas a curva de retenção de água no solo, conhecida também por curva característica de umidade no solo, e a curva de condutividade hidráulica (Souza, 2005).

Curva de retenção de água no solo

Caracterizada como a principal relação entre a fração líquida e o solo, relaciona o teor de umidade com o potencial matricial do solo e pode também ser interpretada como a relação entre o teor de água e a energia com a qual ela está retida no solo. Tem um papel essencial no estudo de relações solo-água e, por meio de seus dados, é possível indicar características fundamentais do comportamento hídrico de umedecimento e secamento do solo (Cavalcanti, 2012).

Conforme Alves (2015), a curva de retenção de água no solo é típica para cada tipo de solo e varia de acordo com a classe textural do solo, o grau de compactação, a geometria dos poros, o conteúdo de matéria orgânica, entre outras propriedades físicas do solo. Sua determinação pode ser realizada através de diversos modelos, sendo o modelo de van Genuchten (1980) um dos mais citados na literatura:

$$h(\theta) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad (3)$$

sendo θ a umidade volumétrica, θ_s a umidade volumétrica de saturação, θ_r a umidade volumétrica residual, h o potencial matricial e h_g um parâmetro de ajuste dependente da estrutura do solo. Os parâmetros m e n , podem ser admitidos como $m = 1 - \frac{1}{n}$, para $n > 1$ na hipótese de Mualem (1976) e $m = 1 - \frac{2}{n}$, para $n > 2$ na hipótese de Burdine (1953).

Curva de condutividade hidráulica no solo

A condutividade hidráulica está diretamente relacionada à capacidade do solo em conduzir água e é função da umidade do solo, sendo tão maior quanto mais úmido o solo, alcançando seu valor máximo na saturação. O conhecimento desta propriedade para as variadas profundidades de perfil é de grande relevância para a dinâmica da água em solos (Carvalho, 2003).

Para determinação da condutividade hidráulica do solo, de acordo com a literatura, utilizam-se diversos métodos de laboratório e de campo (Carvalho, 2003). No entanto, há ainda

formulações algébricas que podem ser utilizadas para a determinação da condutividade, como a de Brooks e Corey (1964), dada pela Equação 4 a seguir:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (4)$$

sendo $K(\theta)$ a curva de condutividade hidráulica, K_s a condutividade hidráulica saturada e η é um parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

3.4. Infiltração da água no solo

A infiltração é o processo pelo qual a água passa da superfície para o interior do solo, sendo bastante significativa para avaliação de processos hidrológicos e melhorias na conservação do solo e da água. É responsável por separar a precipitação em duas partes que seguem diferentes trajetórias pelo ciclo hidrológico: uma parcela é escoada superficialmente e a outra atravessa o solo, alimentando os aquíferos, ou retorna para a atmosfera por processos evaporativos (Horton, 1933; Huang *et al.*, 2019).

Segundo Soares (2004), entre os fatores intervenientes na infiltração da água no solo, destacam-se: i) O tipo de solo, uma vez que a capacidade de infiltração varia diretamente com a porosidade e o tamanho das partículas do solo; ii) Umidade do solo, pois em solos mais secos as forças de atração molecular e capilar propiciam uma capacidade de infiltração inicial elevada (gradativamente, ao atravessar o solo, a camada superficial começa a saturar, diminuindo as forças de capilaridade, tendendo a um valor constante à medida que o tempo passa) e iii) Cobertura vegetal, visto que coberturas vegetais densas favorecem maiores valores de capacidade de infiltração, através do sistema radicular das plantas.

À medida que a água infiltra pela superfície, as primeiras camadas do solo começam a se umedecer de cima para baixo, alterando o perfil de umidade. Havendo aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade. No entanto, normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar o solo por completo, criando um perfil onde o teor de umidade decresce com a profundidade (Tucci, 2009).

Quando o aporte de água na superfície do solo é cessado, a umidade no interior do solo é redistribuída, criando então um perfil de umidade inverso, com os menores teores mais próximos da superfície e os maiores teores nas camadas mais profundas. Em solos naturais, o processo de infiltração pode ser bastante complexo se os horizontes do solo forem compostos por texturas e estruturas distintas, resultando em comportamentos hidráulicos diferentes (Tucci, 2009).

A taxa máxima na qual a precipitação pode ser absorvida por um solo em uma determinada condição é chamada de capacidade de infiltração (Horton, 1933). Já a taxa de infiltração refere-se à taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo. Quando uma precipitação atinge o solo com uma intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água é infiltrada no solo, propiciando uma diminuição da capacidade de infiltração à medida em que o solo umedece. Com a continuação da precipitação, a depender da intensidade, a capacidade de infiltração pode até igualar-se à intensidade de precipitação. A precipitação não infiltrada escoar superficialmente para regiões mais baixas (Tucci, 2009).

Soluções analíticas para o processo de infiltração

Várias soluções analíticas foram propostas a fim de expressar o processo de infiltração. A equação de Philip (1957), elaborada a partir de uma série infinita, considera uma infiltração unidimensional vertical e é válida para tempos suficientemente curtos, descrita por:

$$I(t) = S\sqrt{t} + At \quad (5)$$

onde $I(t)$ = lâmina de água infiltrada em função do tempo; t = tempo; A relaciona a contribuição da gravidade para o movimento da água; e S = sorvidade, que indica a capacidade do solo em absorver água e depende da variação do teor volumétrico de água entre o início e o final da infiltração (Lima, 2003; Souza, 2005).

Pesquisas que levam em consideração o fluxo lateral em um processo de infiltração unidimensional foram realizadas, como os de Turner & Parlange (1974), o qual baseou estudos de Smettem et al. (1994) e Haverkamp et al. (1994). Evidenciou-se que essa consideração do fluxo lateral pode ser representada por um termo proporcional ao tempo (Haverkamp et al., 1994), conforme:

$$I_{3D} - I_{1D} = \frac{\gamma S^2}{r(\theta_f - \theta_i)} \quad (6)$$

sendo I_{3D} a lâmina infiltrada tridimensional, I_{1D} a lâmina infiltrada unidimensional, γ a constante que representa os efeitos da gravidade no caráter tridimensional da infiltração, variando entre 0,6 e 0,8 (Souza, 2005), r o raio de uma fonte circular, θ_i a umidade volumétrica inicial, θ_f a umidade volumétrica final e S a sorvidade.

Determinação da infiltração da água no solo no campo

Outras relações também foram propostas por Haverkamp et al. (1994), válidas para uma fonte circular, levando em consideração tempos médios, curtos e longos de infiltração.

Uma das maiores dificuldades associadas ao processo de infiltração é a escolha do método para a sua avaliação. Há uma variedade de métodos, os quais se diferenciam de acordo com a forma de aplicação da água, com a teoria de modelagem e os objetivos finais associados. Eles são aplicados com a intenção de melhor representar as condições de campo, como, por exemplo, o simulador de chuvas, que é o que mais se aproxima de uma precipitação real. No entanto, esse método também apresenta dificuldades relacionadas ao transporte e ao volume de água necessário para o ensaio, abrindo caminhos para outros métodos que demandam menos trabalho e uma menor quantidade de água (Mallmann, 2017; Abdelmoneim, 2021).

Uma alternativa ao método de simulador de chuvas é o infiltrômetro de anel simples, o qual permite um ensaio de infiltração tridimensional axissimétrica em função do tempo. De acordo com Souza (2005), seu uso em campo requer que um cilindro de raio conhecido seja cravado no solo, geralmente a 1cm de profundidade, e que um volume de água conhecido seja adicionado em seu interior de modo a formar uma pequena lâmina d'água. À medida que a lâmina é infiltrada, outro volume de água é adicionado. Os tempos decorridos desde o início do ensaio, entre uma adição e outra, são cronometrados. O fim do ensaio se dá quando a relação entre o volume de água infiltrado e o intervalo de tempo se torna constante.

Vários estudos que retratam a aplicabilidade dos métodos de determinação da infiltração da água no solo foram realizados, como Zhao (2022) que investigou características da infiltração da matriz do solo em diferentes plantios de eucalipto de diferentes idades em área subtropical da China; e Vlček (2022), que comparou o simulador de chuva e o infiltrômetro de anel simples em um cultivo de milho.

Os métodos de determinação da infiltração são utilizados para o cálculo de propriedades hidráulicas do solo, e as medições dessas propriedades, como a sorvidade (S) e a condutividade hidráulica (K), são primordiais para a resolução de questões hidrológicas e ambientais (Moret-Fernández, 2015).

Metodologia Beerkan

O método é fundamentado, principalmente, em ensaios de infiltração simplificados e na análise da distribuição dos tamanhos das partículas do solo (França Neto, 2018). As curvas de retenção e condutividade hidráulica de água no solo, descritas, respectivamente, por van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), possuem cinco parâmetros desconhecidos, sendo dois de forma (m ou n e η), relacionados à textura, e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g), os quais dependem da estrutura dos solos (Haverkamp et al., 1998; Souza, 2005).

Os parâmetros de forma são obtidos pela curva de distribuição do tamanho de partículas e da porosidade, enquanto os três parâmetros de normalização são determinados através de ensaios de infiltração.

Para a aplicação do método, Souza (2005) pontua que é necessário a realização de um teste simples de infiltração tridimensional sob carga de pressão positiva por meio de um cilindro de diâmetro conhecido e a determinação da distribuição do tamanho das partículas, das umidades inicial e final e da massa específica do solo.

Souza (2005) afirma ainda que para cada teste de infiltração, o cilindro é posicionado na superfície do solo a uma profundidade de aproximadamente 1cm, a fim de evitar perdas laterais durante o ensaio e garantir um escoamento lateral simétrico de água na superfície do solo. No início, coleta-se uma amostra do solo próxima ao cilindro para determinação da umidade inicial. Uma outra amostra deformada é coletada também nas proximidades do ensaio para a determinação da curva de distribuição das partículas.

No teste de infiltração, volumes de água (variáveis de acordo com o tipo de solo) são vertidos no cilindro. O tempo é medido a partir do momento em que a água é vertida no cilindro, sendo possível fazer registros dos tempos necessários para a infiltração de cada volume adicionado. Como assume-se no teste, a variação da pressão na superfície não é mais constante. Ao final do teste, uma amostra deformada é coletada dentro da área do cilindro para obtenção da umidade final. Uma amostra indeformada também é coletada por meio de um cilindro de volume conhecido para determinação da massa específica do solo (SOUZA, 2005).

Ao comparar esse método com outros métodos experimentais, o método Beerkan se destaca pela sua eficiência e pelo baixo custo necessário, visto que requer uma quantidade reduzida de equipamentos e de pessoas, além de apresentar a vantagem de demandar uma aplicação simples e rápida (SOUZA, 2005).

Lassabatère et al. (2006) propuseram o algoritmo BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments*) para a determinação dos parâmetros de forma e de normalização.

3.5. Modelagem hidrológica

Os modelos visam representar a concepção de um sistema real. No entanto, é sabido que um sistema real, assim como o ciclo hidrológico, é inerentemente complexo e por mais detalhes que sejam incrementados, há sempre simplificações intrínsecas na representação da dinâmica dos processos chuva-vazão e da hidrodinâmica dos escoamentos (Amaral, 2014).

A modelagem hidrológica surge como uma ferramenta fundamental para a administração e manejo das águas pluviais, possibilitando uma avaliação precisa das vazões de cheias, dos níveis e das áreas de inundação, além de auxiliar na tomada de decisões. O seu uso permite descrever os processos de transformação da chuva em escoamento superficial, através de algoritmos de perdas por infiltração, armazenamento em depressões, interceptação e propagação na superfície. Nesse formato, desconsidera-se os efeitos de atrito levados em conta pela equação do momento e se considera apenas os efeitos do armazenamento na atenuação e no deslocamento da onda de cheia (Righetto, 2009).

A estrutura atual desses modelos baseia-se inicialmente na discretização da bacia hidrográfica e normalmente requer dados de precipitação e evapotranspiração potencial. Dados físicos da bacia também são importantes, tendo em vista a grande variabilidade de características naturais, uso do solo e alguns parâmetros, os quais podem ser estimados com base nas características físicas e/ou ajustados conforme dados observados (Rodrigues, 2021).

Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - SWMM

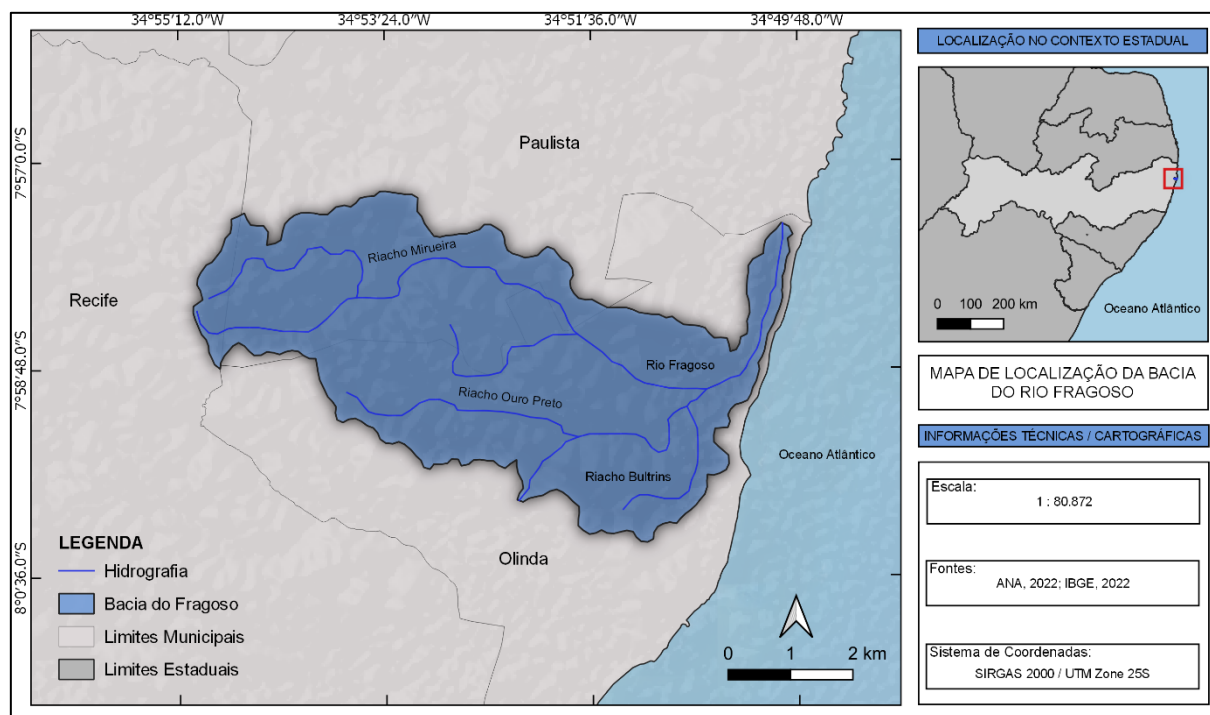
Desenvolvido em 1971 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, o SWMM é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade de escoamento superficial especialmente em áreas urbanas. É uma ferramenta amplamente difundida e de uso consolidado para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas. Possui um ambiente integrado, que permite a entrada de dados direcionada para a área de estudo, a simulação do comportamento hidrológico-hidráulico e a visualização dos resultados da modelagem em uma variedade de formatos (Rossman, 2010).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização da bacia do Fragoso

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Fragoso, situada no litoral do estado de Pernambuco. Com aproximadamente 28 km² de área de contribuição, engloba, em partes, três municípios da Região Metropolitana do Recife: Olinda, Paulista e Recife, com a maior parte compreendida em Olinda, seguida por Paulista e, por último, Recife. Limita-se a norte com a bacia do rio Paratibe, a sul com a bacia do rio Beberibe, a oeste com as mesmas duas bacias e a leste com o oceano Atlântico (Figura 2).

Figura 2 - Mapa de localização da bacia do rio Fragoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 32/2003, que institui a divisão hidrográfica nacional, a bacia está localizada na Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, constituída pelas bacias hidrográficas dos rios que deságuam no oceano Atlântico. Já conforme a divisão hidrográfica estadual, de acordo com a atualização do Plano de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco em 2022, a bacia está inserida na Unidade de Planejamento Hídrico UP 02 – Metropolitana Norte, a qual inclui o grupo de pequenas bacias litorâneas 1 – GL1 (APAC, 2024).

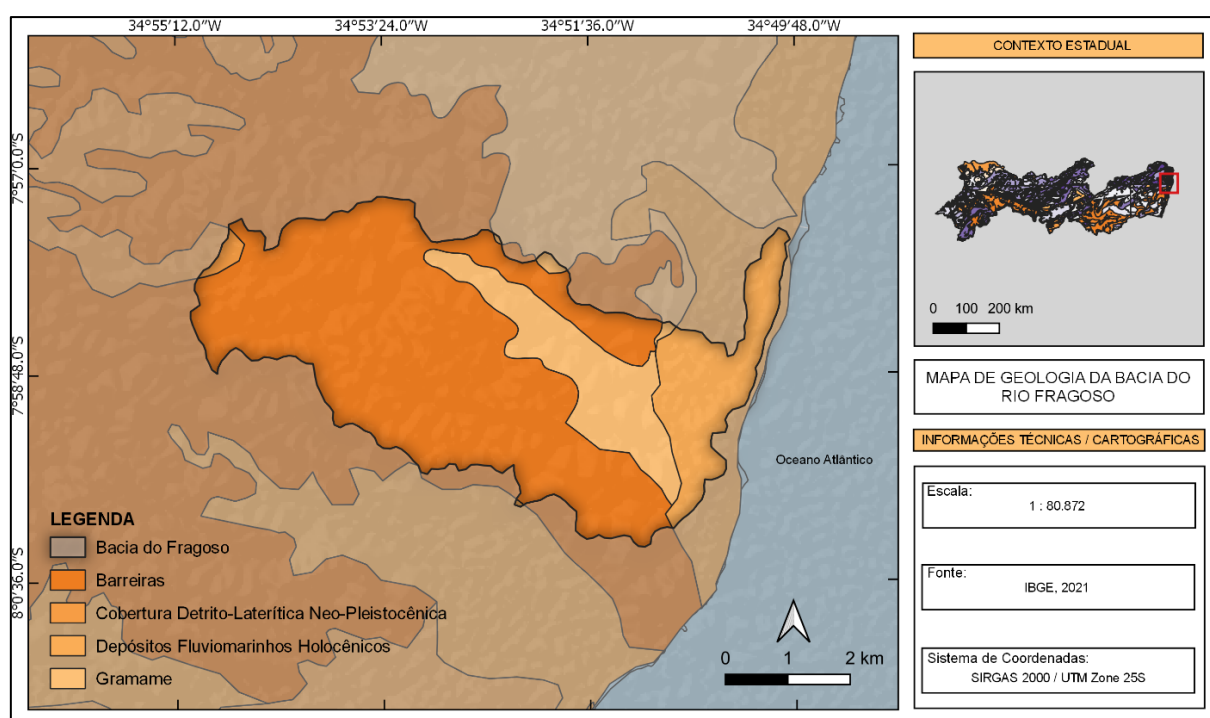
Seu principal rio, o rio Fragoso, possui aproximadamente 9 km de comprimento, iniciado desde a sua nascente até a sua foz em um estuário em conjunto com o rio Paratibe. Tem

como principais afluentes os riachos Bultrins, Ouro Preto e Mirueira e, além de canais naturais, possui um trecho canalizado, fruto de obras de ampliação do sistema viário nos últimos anos na cidade de Olinda. Esse trecho, que também passou pelo processo de alargamento, ficou popularmente conhecido como Canal do Fragoso.

4.1.1. Geologia, geomorfologia e pedologia da bacia do Fragoso

A bacia do Fragoso encontra-se majoritariamente inserida nas formações geológicas de Barreiras, Gramame e Depósitos Fluviomarinhos Holocênicos (Figura 3).

Figura 3 - Mapa geológico da bacia do rio Fragoso.



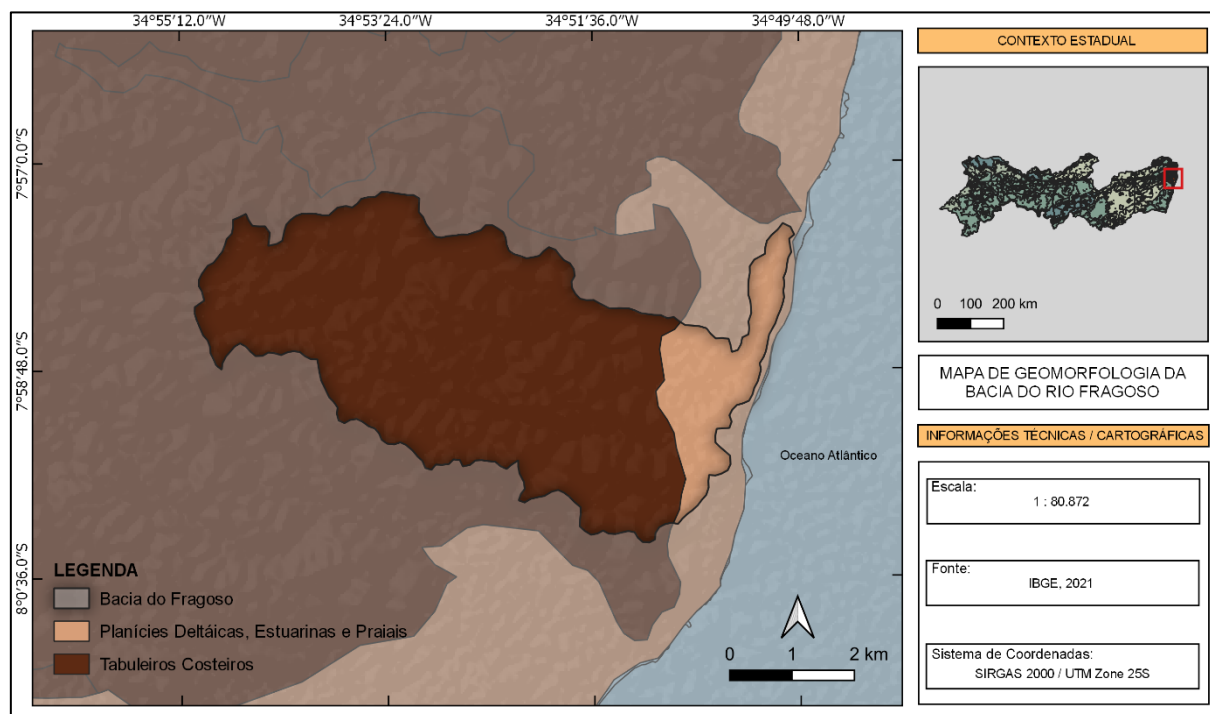
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O grupo Barreiras compreende sedimentos clásticos com baixo conteúdo fóssil, destacados por suas cores vivas e variadas, apresentando-se mal consolidados e ocorrendo de forma quase contínua ao longo da faixa costeira, desde o Amapá até o norte do Rio de Janeiro. É constituído por arenitos, siltitos, argilas e conglomerados, formando falésias extensas especialmente no litoral nordestino (Furrier, 2007). A formação Gramame é uma unidade definida pela existência de muitos fósseis, com a presença de gastrópodes, cefalópodes, equinodermos, escamas de peixes, entre outros (DNPM, 2007). Possui como litologias predominantes o calcário, calcarenito, marga, argila e fosforito (IBGE, 2023). Os Depósitos Fluviomarinhos Holocênicos, comuns em região costeira brasileira em foz de rios sujeitas à influência de marés, possuem como litologias predominantes as areias, siltes, argilas e

cascalhos. Incluem também muita matéria orgânica, restos vegetais e conchas (IBGE, 2023). No mapa é possível visualizar que sua presença de fato se localiza próximo à foz do rio Frágoso.

Geomorfologicamente, a unidade que predomina na bacia do rio Frágoso é a de Planícies Deltaicas, Estuarinas e Praiais, com uma parcela menor representada pelos Tabuleiros Costeiros (Figura 4).

Figura 4 - Mapa geomofológico da bacia do rio Frágoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

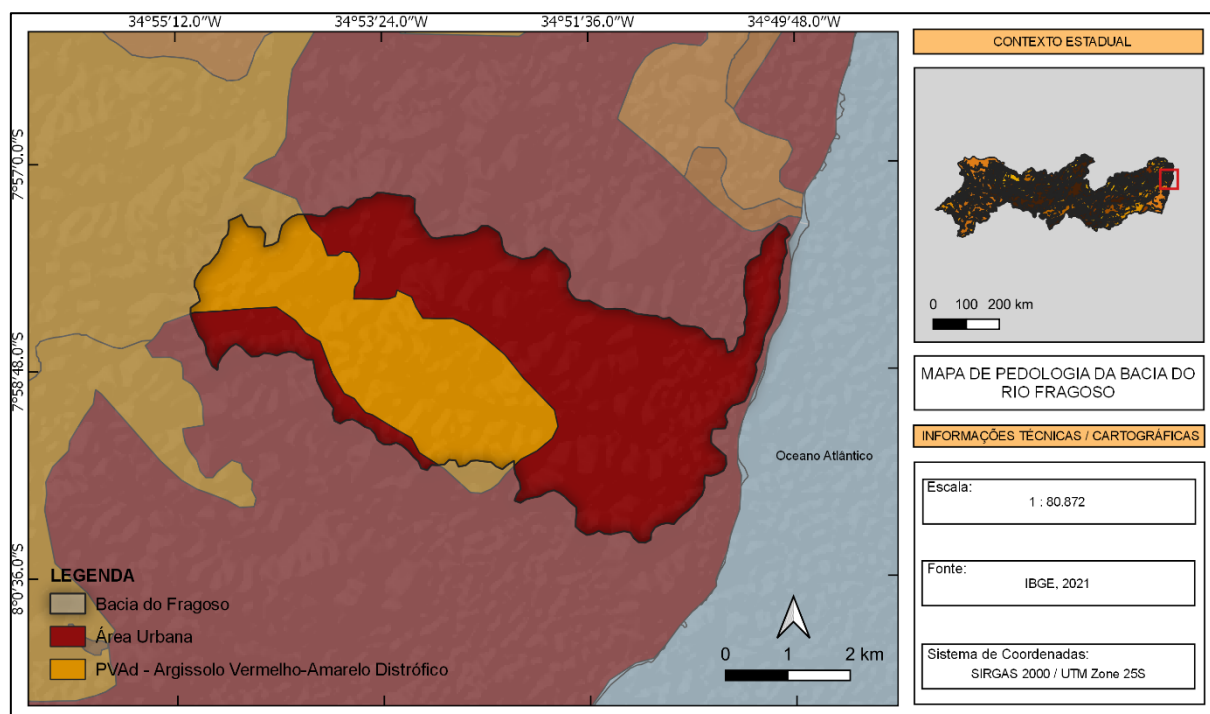
As Planícies Deltaicas, Estuarinas e Praiais são caracterizadas por agrupamentos de formas resultantes de processos marinhos, fluviomarinhos lacustres e eólicos, os quais foram depositados sob a influência de condições ambientais variadas durante o período Quaternário (Ferreira, 1999). Apresentam formas de relevo planas ou suavemente onduladas, comumente posicionadas a baixas altitudes, podendo abranger praias, canais de maré e restingas (IBGE, 2009).

Os Tabuleiros são compartimentos que representam os agrupamentos de formas de relevo de topo plano, formadas em rochas sedimentares e geralmente cercadas por escarpas (IBGE, 2009). Os Tabuleiros Costeiros encontram-se em cotas entre 30 e 100 m, aumentando à medida que essas formas avançam para o interior. As variações de amplitude dos relevos locais oscilam entre 20 e 50 m, resultando em topos com superfícies variando entre planas e suavemente inclinadas (Torres; Pfaltzgraff, 2014). Sua drenagem possui padrão subdentrítico,

com canais largos e que formam planícies coluvionadas, as quais se estendem para outras unidades geomorfológicas (RADAMBRASIL, 1983).

Os solos mais representativos no local da área de estudo são os solos característicos de área urbana e os Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos (Figura 5).

Figura 5 - Mapa pedológico da bacia do rio Fragoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Áreas urbanas são regiões que mais possuem solos modificados por ações antrópicas, apresentando alterações profundas e generalizadas em seus perfis de solo. A intensa urbanização impacta o solo, modificando sua gênese e suas funções, atribuindo-lhes diferentes características físicas, químicas e biológicas (Ladeira, 2012).

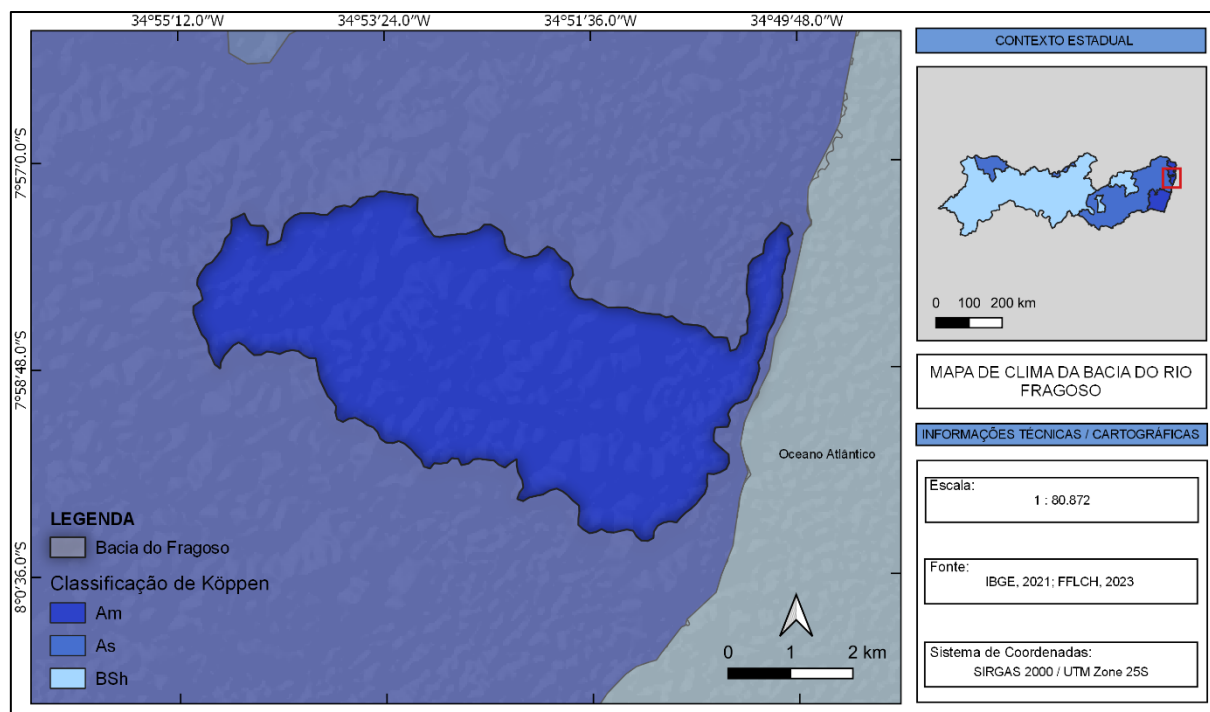
Os Argissolos são solos de grande ocorrência no território brasileiro e possuem como característica marcante o aumento da argila do horizonte superficial A para o subsuperficial B (IBGE, 2015). A classe dos Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos é caracterizada, em certos casos, pela baixa fertilidade e pela susceptibilidade à erosão (Santos; Zaroni; Almeida, 2021).

4.1.2. Clima, vegetação e ocupação do solo

De acordo com base cartográfica digital das zonas climáticas conforme a classificação de Köppen, o clima predominante na bacia do rio Fragoso é o tropical de monções (Am) (Figura

6). De acordo com dados climáticos disponíveis na plataforma Climate-Data.org (2024), a cidade de Olinda, onde a maior parte da bacia se encontra, possui uma temperatura média anual de 25.7° C e uma pluviosidade média anual de 1121 mm.

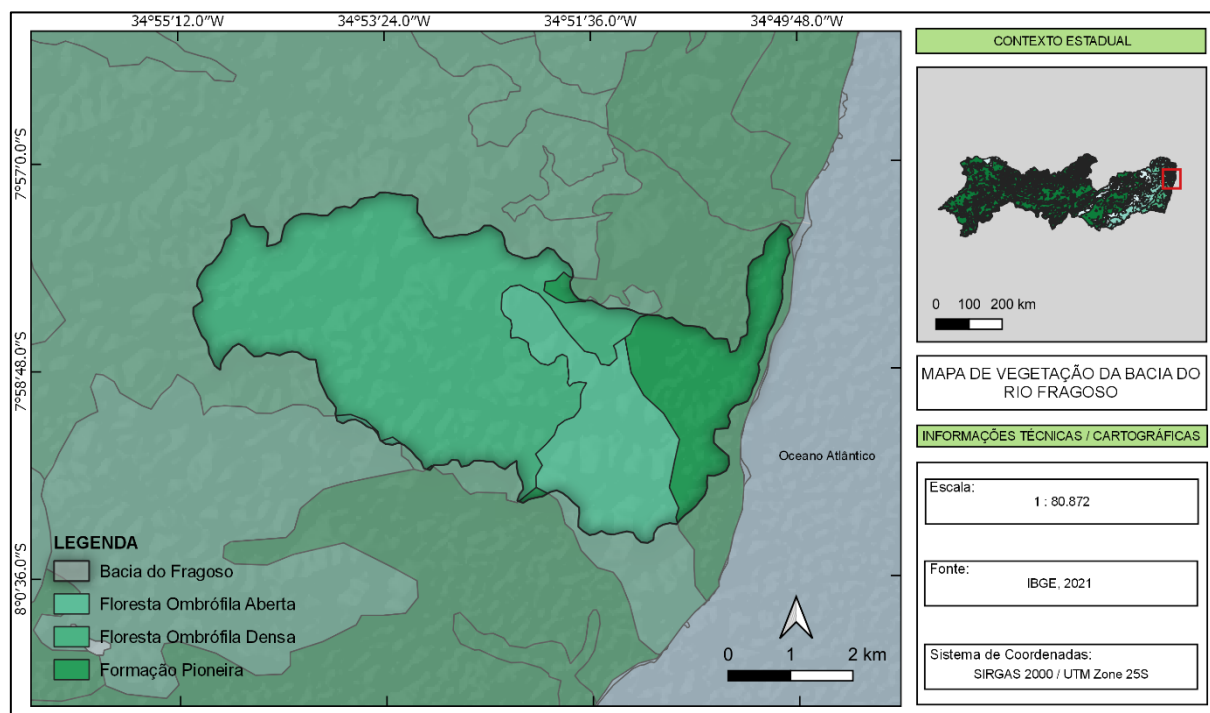
Figura 6 - Mapa de classificação climática (segundo Köppen) da bacia do rio Fragoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As principais formações vegetais originais encontradas na bacia do rio Fragoso são a Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Densa e a Formação Pioneira (Figura 7).

Figura 7 - Mapa de formações vegetais na bacia do rio Fragoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

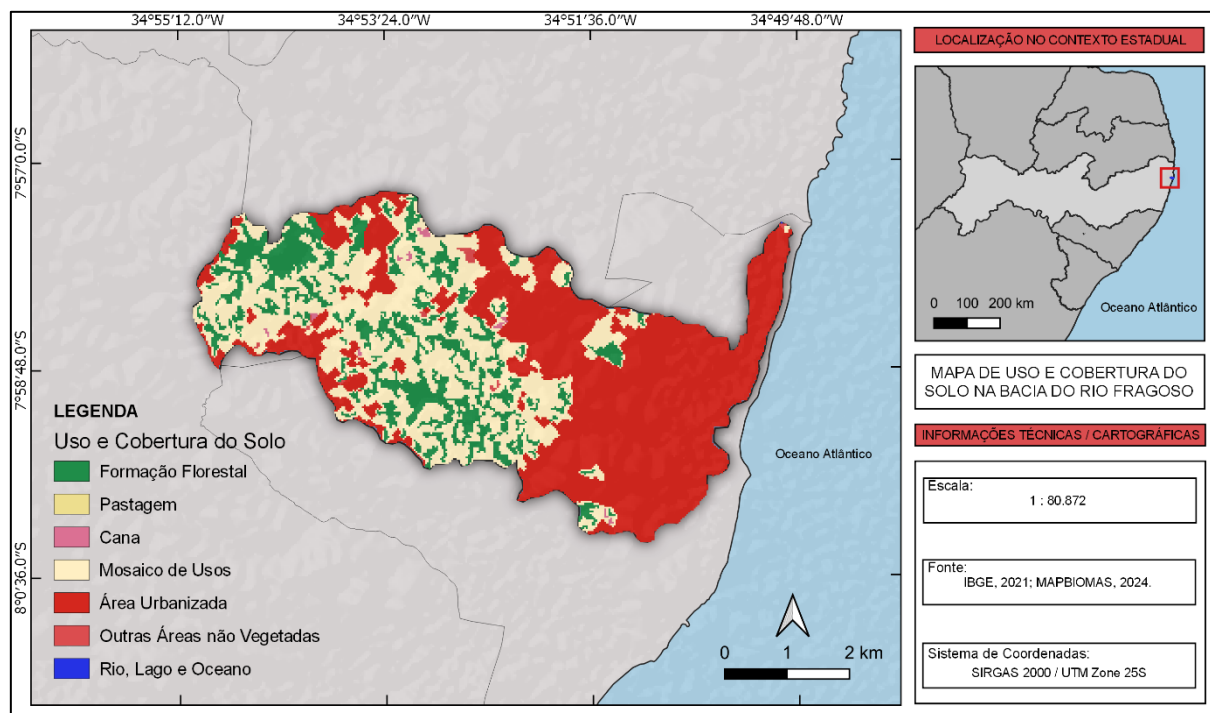
A Floresta Ombrófila é caracterizada por ser uma formação vegetal cujo desenvolvimento é dependente de regimes pluviais abundantes e constantes. Seu subtipo Floresta Ombrófila Densa, também conhecido por Floresta Pluvial Tropical, apresenta uma vegetação densa em todos os estratos (arbóreo, arbustivo, herbáceo e lianas). Ocorre em condições de altas temperaturas (médias de 25° C) e de alta precipitação, praticamente sem período biologicamente seco. Já o subtipo Floresta Ombrófila Aberta é considerado uma variação da Floresta Ombrófila Densa, apresentando quatro faciações florísticas (palmeiras, bambus, cipós e sororocas) e mais de 60 dias secos por ano (IBGE, 2012; SNIF, 2020).

A Formação Pioneira, por sua vez, corresponde à vegetação de primeira ocupação em solos anteriormente sem vegetação, em terrenos instáveis, apresentando constante processo de sucessão. Apresentam diferentes ocorrências de acordo com as diferentes influências recebidas: restingas, sob influência direta da água do mar; manguezais e campos salinos, sob influência fluviomarinha; comunidades aluviais, sob influência fluvial (IBGE, 2012).

De acordo com o mapeamento da cobertura e uso do solo do Brasil disponibilizado pelo projeto MapBiomass, para o ano de 2022, a bacia do Fragoso contempla as classes de Formação Florestal, Pastagem, Cana, Mosaico de Usos, Área Urbanizada, Outras Áreas não

Vegetadas e Rio, Lago e Oceano. No entanto, as classes predominantes na região são Área Urbanizada, Mosaico de Usos e Formação Florestal (Figura 8).

Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do rio Fragoso.



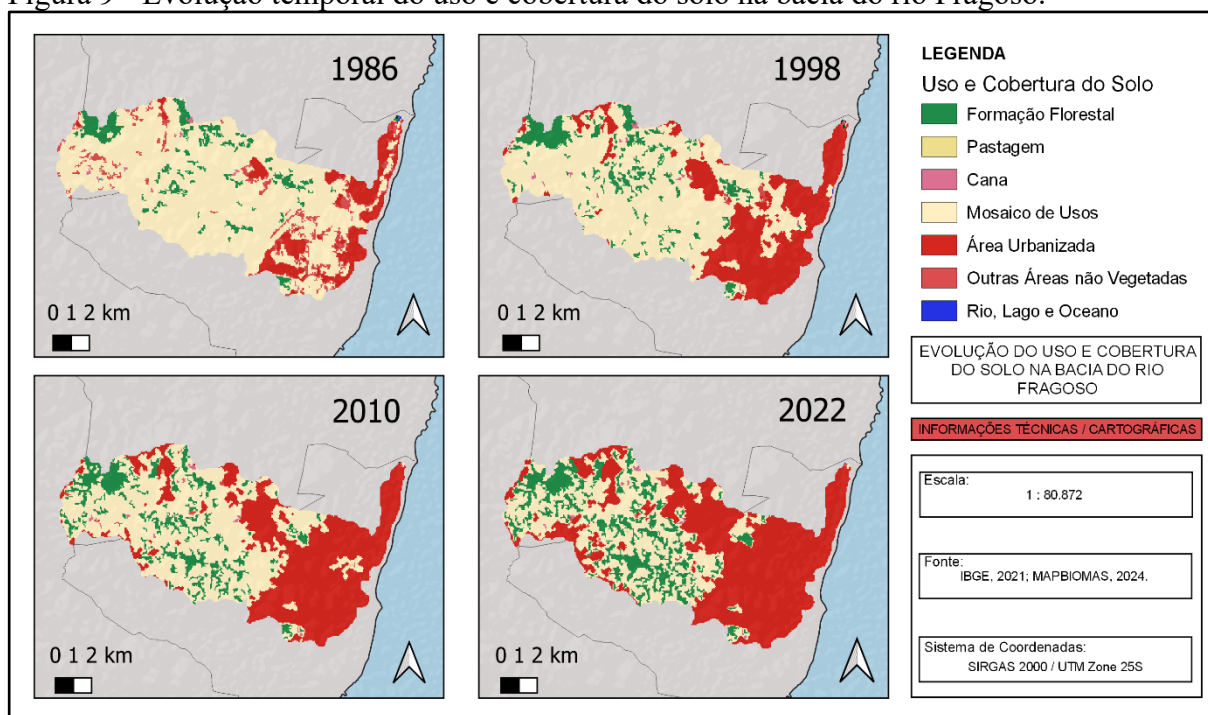
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A classe Área Urbanizada está inserida na classe maior de Área Não Vegetada, caracterizada por apresentar alta densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura. Mosaico de Usos é uma subcategoria de Agropecuária que, para o bioma Mata Atlântica, é caracterizado por áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Em áreas urbanizadas, contempla áreas de vegetação urbana, incluindo vegetação cultivada e vegetação natural florestal e não-florestal.

Já a classe Formação Florestal faz parte da categoria Floresta e apresenta, para o bioma Mata Atlântica, as fitofisionomias Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista, Floresta Estacional Semi-Decidua, Floresta Estacional Decidua e Formação Pioneira Arbórea.

A Figura 9 demonstra como se deu o processo de evolução do uso e cobertura do solo na região, utilizando como referência os anos de 1986, 1998, 2010 e 2022. A Área Urbanizada é a classe que mais evidentemente evoluiu ao longo dos anos. Todas as descrições supracitadas são apresentadas pelo projeto em seu *site* (MapBiomas, 2024).

Figura 9 - Evolução temporal do uso e cobertura do solo na bacia do rio Frágoso.



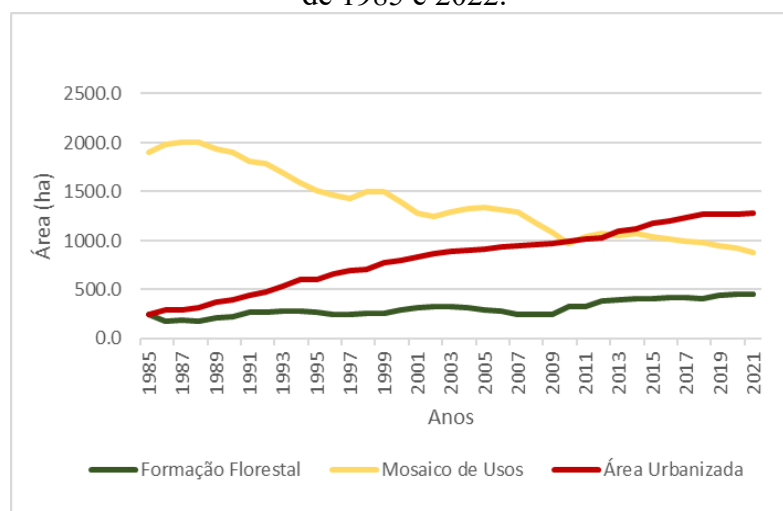
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 10 apresenta a evolução das três classes predominantes em termos quantitativos. Observa-se que o declínio das áreas de Mosaico de Usos ocorre na medida em que há o aumento das Áreas Urbanizadas, sendo a classe de Formação Florestal a que se comporta de maneira mais discreta, com pequenas variações.

O aumento da classe em determinados momentos, como a partir de 2009, mesmo que discreto, pode ser justificado a partir da edição do Decreto nº 6.514, que conferiu maior efetividade ao Código Florestal então vigente, estabelecendo multas para os casos de descumprimento de suas regras (MapBiomas, 2024). A partir disso, houve uma contribuição para a expansão das áreas preservadas e para a recuperação de vegetação nativa em diversas regiões. Vale ressaltar também que a classificação realizada pelo MapBiomas é automatizada e em menor escala, com menos detalhamento, não podendo ser considerada completamente precisa. Pequenas oscilações das áreas podem ser justificadas por essas características.

As variações das classes durante o período analisado foram de aproximadamente -1050 ha para Mosaico de Usos; +1080 ha para Área Urbanizada; e +189,3 ha para Formação Florestal.

Figura 10 - Variação espacial do uso e ocupação do solo na bacia do rio Frágoso entre os anos de 1985 e 2022.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2. Caracterização física e infiltração dos solos

As coletas de solos e os ensaios de infiltração foram conduzidos do dia 24/08/2023 ao dia 05/10/2023, e as análises em laboratório ocorreram em paralelo e se estenderam até o dia 31/10/2023. Ressalta-se que a escolha dos dias para realização dos ensaios levou em consideração as condições climáticas consideradas favoráveis aos experimentos, sem a ocorrência de precipitação em até uma semana antes, resultando em solos com pouca umidade.

Na área de estudo, 17 pontos ao total foram analisados. A seleção destes pontos levou em consideração as classes de cobertura e uso do solo na bacia do rio Frágoso identificadas a partir da plataforma MapBiomas. Nesse sentido, o foco da análise ocorreu nas classes mais predominantes da região: Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbanizada.

Para a classe de área urbanizada, realizou-se uma subdivisão englobando superfícies com diferentes características de pavimentação, de forma a representar toda a extensão de permeabilidade. Essa subdivisão foi categorizada como: i) Área urbanizada – NP (não pavimentadas), representadas por calçadas, ruas, terrenos e praças de terra, contendo vegetação ou não e ii) Área urbanizada – P (pavimentadas), representadas por calçadas, ruas e avenidas pavimentadas (Figura 11).

Figura 11 - Aspectos das áreas urbanizadas a) não pavimentadas e b) pavimentadas na bacia do Fragoso.

a) Área urbanizada - NP

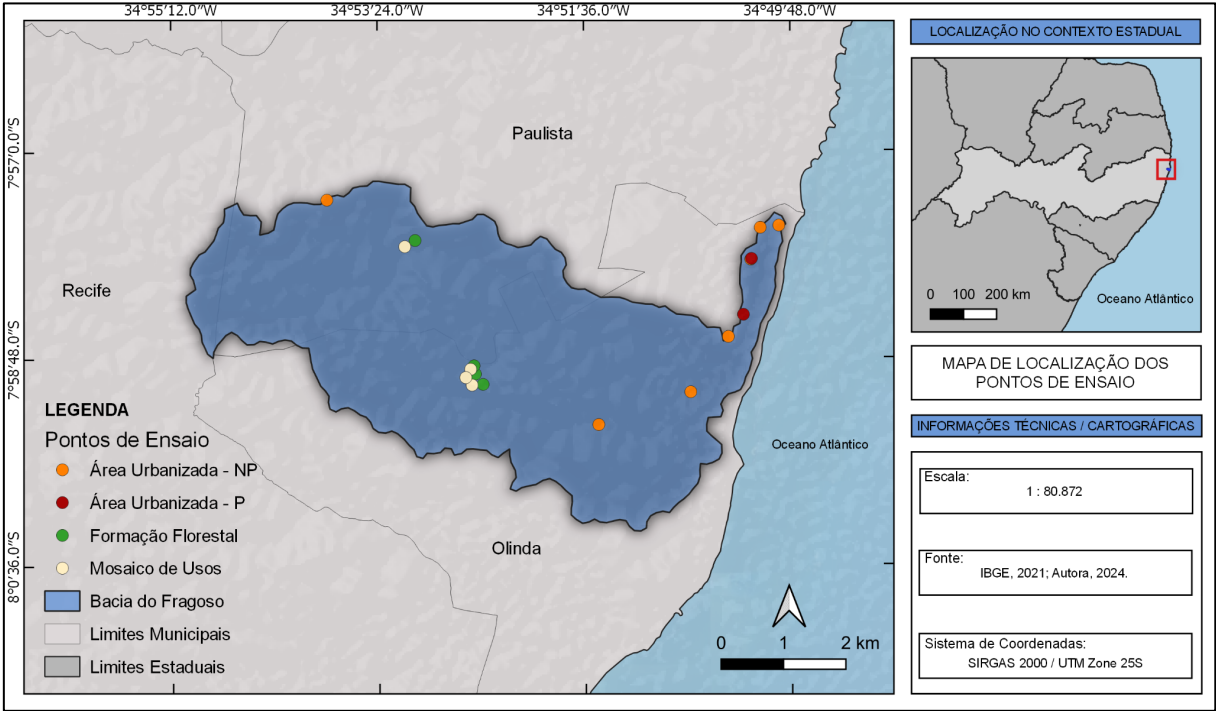
b) Área urbanizada - P



Fonte: Autora (2023).

Ressalta-se que a escolha dos pontos também foi motivada por fatores considerados fundamentais em atividades de campo, como a segurança da equipe e a facilidade de acesso. Apesar da análise prévia dos pontos desejados, em prática algumas situações adversas impossibilitaram a concretização dos ensaios, como a não permissão por parte de proprietários de terrenos, vias de acesso em condições inapropriadas e a consequente vulnerabilidade. A Figura 12 apresenta a localização dos pontos de ensaio na área de estudo e a Tabela 1 apresenta um resumo das principais informações a respeito desses pontos.

Figura 12 - Localização dos pontos de ensaio na bacia do rio Fragoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 1 - Pontos analisados na bacia do rio Fragoso.

Ponto	Classe	Longitude	Latitude	Altitude (m)
1	Formação Florestal	-34.8759	-7.9823	29.33
2	Formação Florestal	-34.8761	-7.9811	22.65
3	Mosaico de Usos	-34.8766	-7.9816	32.8
4	Formação Florestal	-34.8748	-7.9838	47.9
5	Área Urbanizada - NP	-34.8358	-7.9658	7.08
6	Área Urbanizada - P	-34.8357	-7.9657	6.94
7	Área Urbanizada - P	-34.8369	-7.9738	6.91
8	Área Urbanizada - NP	-34.8391	-7.977	6.91
9	Área Urbanizada - NP	-34.8446	-7.985	2.96
10	Área Urbanizada - NP	-34.8974	-7.957	54.91
11	Formação Florestal	-34.8846	-7.9629	32.97
12	Mosaico de Usos	-34.8861	-7.9638	19.46
13	Área Urbanizada - NP	-34.858	-7.9897	8.39
14	Área Urbanizada - NP	-34.8344	-7.9612	5.97
15	Área Urbanizada - NP	-34.8317	-7.9609	4.98
16	Mosaico de Usos	-34.8764	-7.9839	44.99
17	Mosaico de Usos	-34.8773	-7.9828	43.03

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Amostras indeformadas (4,8 cm de diâmetro por 5,1 cm de altura) foram coletadas em cada ponto selecionado, com exceção dos pontos 6 e 7, em razão da impossibilidade de coleta,

visto que em área pavimentada não há amostra disponível. As coletas foram realizadas por meio de um trado tipo Uhland nas camadas de 0-10 cm dos solos, sendo o acondicionamento das amostras feito em latas de alumínio adequadamente identificadas e vedadas com fita isolante. Essas amostras foram utilizadas para determinação da densidade do solo (ρ_s , em g cm^{-3}) e umidade volumétrica final (Θ_f , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Amostras deformadas também foram coletadas na mesma profundidade para análise textural, determinação da densidade de partículas (ρ_p , em g cm^{-3}) e umidade volumétrica inicial (Θ_i , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). A coleta ocorreu nas proximidades dos pontos escolhidos para medição dos testes de infiltração, sendo as amostras acondicionadas em sacos plásticos devidamente lacrados e identificados.

Depois de coletadas (Figura 13), as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Física de Solos do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), preferencialmente no mesmo dia de coleta para melhor preservação da umidade dos solos.

Figura 13 - Acondicionamento das amostras coletadas.

a) Amostras deformadas



b) Amostras indeformadas



Fonte: Autora (2023).

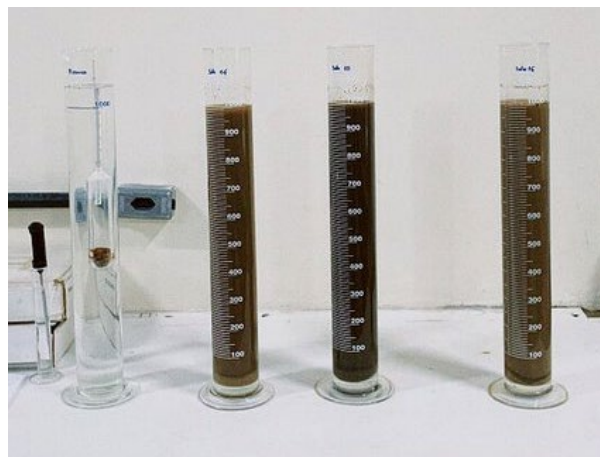
A análise textural ou granulométrica foi realizada com base no método da ABNT (2018), com uma combinação de sedimentação (frações mais finas, passantes na peneira de 2,0 mm) e peneiramento (frações mais grossas, retidas na peneira de 2 mm). A sedimentação foi realizada pelo método do densímetro, e o processo de peneiramento foi realizado de forma

mecânica, fazendo uso de agitador mecânico. Algumas etapas desses processos podem ser vistas na Figura 14 e na Figura 15.

Figura 14 - Etapas do processo de sedimentação da análise granulométrica.

a) Material submetido à ação do aparelho dispersor

b) Sedimentação pelo método do densímetro



Fonte: Autora (2023).

Figura 15 - Etapas do processo de peneiramento da análise granulométrica.

a) Agitação mecânica do material

b) Pesagem de massa retida em peneira



Fonte: Autora (2023).

A densidade do solo, dada pela razão entre a massa de solo seco e o volume total do solo, foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). O anel utilizado tinha um volume conhecido de aproximadamente $90,5 \text{ cm}^3$. Já a densidade das partículas, dada pela razão entre a massa de solo seco e o volume ocupado pelas partículas sólidas, foi determinada pelo método do balão volumétrico, seguindo a metodologia da Embrapa (Teixeira

et al., 2017). Para o ensaio, utilizou-se balões volumétricos de 50 ml e o líquido utilizado foi o álcool etílico. A Figura 16 apresenta a aplicação do método.

Figura 16 - Método do balão volumétrico.



Fonte: Autora (2023).

A umidade volumétrica foi determinada a partir da multiplicação da umidade gravimétrica pela densidade do solo. A umidade gravimétrica, por sua vez, dada pela razão entre a massa de água e a massa de sólidos, foi obtida através de pesagens das amostras, em condições úmidas e secas, e da lata de alumínio utilizada para acondicionamento delas. Ambas as umidades também foram determinadas com base no manual da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017).

Adicionalmente, avaliou-se, para cada ponto de amostragem, exceto para os pontos pavimentados, a resistência do solo à penetração por meio de um penetrômetro digital que permite a obtenção de dados relativos à compactação do solo. O modelo utilizado possui uma base refletora, que serve de referência para a medição de profundidade, e uma haste removível, a qual pode variar em até 3 tipos, cada um com um valor de diâmetro diferente e ideal para condições de solo diferentes (graus de compactação). Para cada ponto, duas medições foram realizadas, sendo uma nas proximidades do ponto, antes do início do ensaio de infiltração, em condições ambientes, e outra ao término do ensaio exatamente no ponto analisado, em condições úmidas. A aplicação do método pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 - Medição de resistência à penetração por meio do penetrômetro.



Fonte: Autora (2023).

Os ensaios de infiltração foram realizados com a metodologia Beerkan, descrita em Lassabatere *et al.* (2006), por meio de um infiltrômetro de anel simples. Para ensaios em áreas não pavimentadas, utilizou-se um cilindro de ferro com aproximadamente 15,4 cm de diâmetro, e para ensaios em áreas pavimentadas utilizou-se um cilindro de PVC com aproximadamente 14,4 cm de diâmetro.

Inicialmente, realizou-se uma rápida limpeza do local, retirando, por exemplo, excesso de vegetação, folhas secas ou qualquer tipo de resíduo que pudesse dificultar a leitura em cada ponto. Em seguida, o infiltrômetro foi inserido na superfície do solo a uma profundidade de aproximadamente 1 cm, para evitar perdas laterais durante o ensaio e garantir um fluxo vertical na superfície do solo (Figura 18).

Figura 18 - Ensaio de infiltração.



Fonte: Autora (2023).

Volumes de água fixados foram vertidos de forma sucessiva por, em média, 20 vezes, no infiltrômetro até que o estado de regime permanente fosse atingido. Os volumes variaram entre 80, 100 e 200 ml, sendo adotados a partir de testes prévios nas proximidades e por análises visuais: quanto mais compactada a superfície, menor o volume vertido (80 ml), por demandar um maior tempo de ensaio, e consequentemente menor a quantidade de repetições; para as superfícies menos compactadas, as quais apresentaram uma maior velocidade de infiltração, maior o volume vertido (200 ml), para que fosse possível formar uma lâmina d'água ocupando todo o espaço interno do infiltrômetro e ainda fosse possível realizar as leituras de forma mais segura; para as superfícies com características médias de compactação, adotou-se um volume de 100 ml.

Registrou-se o tempo que cada volume vertido levou para ser totalmente infiltrado, sendo esse processo repetido até que fosse atingido o regime permanente nas velocidades de infiltração. De forma a padronizar a leitura, adotou-se em cada ensaio um ponto visual fixo como referência, de modo que sempre que o ponto estava descoberto, um novo volume era vertido.

Para as superfícies pavimentadas, com a finalidade de evitar o fluxo lateral, utilizou-se massa de calafetar entre o infiltrômetro e a superfície (Figura 19), conforme utilizado por Castro (2019) e Jabur *et al.* (2015).

Figura 19 - Infiltração em área urbana pavimentada utilizando massa de calafetar entre infiltrômetro e superfície.



Fonte: Autora (2023).

4.2.3. Algoritmo BEST e reamostragem por bootstrap

De posse dos dados de infiltração e das análises físicas dos solos em laboratório (textura, umidade inicial e final), foi possível realizar a estimativa dos parâmetros de forma (m ou n e η) e de normalização (θ_s , K_s , h_g) das curvas de retenção de água no solos - $\Theta(h)$ e da curva de condutividade hidráulica no solo - $K(h)$ no algoritmo BEST, proposto por Lassabatère *et al.* (2006). O algoritmo utiliza os modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks e Corey (1964) para descrição de $\Theta(h)$ e $K(h)$.

Os parâmetros de forma foram estimados a partir da distribuição granulométrica do solo e a sua porosidade. O parâmetro de normalização θ_s é representado pela umidade volumétrica saturada, já os parâmetros K_s e h_g foram obtidos por meio dos ensaios de infiltração tridimensional (Haverkamp *et al.*, 1994).

As médias dos parâmetros (m , n , η , θ_s , K_s e h_g) foram calculadas para as medições realizadas nas classes de Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbanizada - NP. Em seguida, o intervalo de confiança no nível de 95% (IC95%) para a média foi calculado usando a técnica bootstrap. As médias foram consideradas estatisticamente diferentes quando não houve sobreposição entre a média e o IC95% bootstrap (Zanella de Arruda *et al.*, 2016). Todas as análises estatísticas, ajustes de modelo e gráficos foram realizados com R (R Development Core Team, 2019).

4.3. Modelagem hidrológica com o SWMM

O modelo hidrológico utilizado foi o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), na versão 5.00.22 em português. Essa versão foi uma iniciativa do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Devido à ausência de dados suficientes para a calibração do modelo atual do sistema, sua implementação teve como base critérios e parâmetros referenciados em trabalhos similares e no manual técnico do modelo, assim como os dados obtidos nas análises experimentais. Quanto à validação do modelo, esta não foi realizada completamente devido à indisponibilidade de dados observacionais correspondente à época analisada. Optou-se por realizar uma análise por meio de registros fotográficos, matérias jornalísticas e trabalhos referentes aos períodos analisados na área de estudo.

4.3.1. Variáveis e parâmetros de entrada do SWMM

Para a execução das simulações no SWMM, é essencial fornecer dados de entrada e parâmetros específicos, os quais são utilizados para configuração e calibração do modelo hidrológico, de forma a garantir resultados precisos e mais próximos dos objetivos desejados. Esses dados são apresentados a seguir.

Discretização da bacia do Fragoso

O SWMM solicita ao usuário a subdivisão da área de estudo em áreas menores, chamadas de sub-bacias. Essas sub-bacias funcionam como um reservatório, onde a precipitação é armazenada até chegar ao exutório.

Nesse sentido, a bacia hidrográfica do Fragoso foi discretizada de forma a subdividir sua área em sub-bacias com características homogêneas. Para esse procedimento, utilizou-se o *plugin* de pré-processamento simplificado BHO2MGB, o qual faz uso de informações existentes na Base Hidrográfica Ottocodificada, disponibilizada pela Agência Nacional de Águas. O pré-processamento foi realizado por meio de um aplicativo no *Google Earth Engine*, que gera arquivos com descrições do terreno, como a rede de drenagem, a delimitação da bacia e das sub-bacias. Nesses arquivos, é possível visualizar informações a respeito de cada sub-bacia, como o perímetro, a área de drenagem e o comprimento do trecho de rede, essenciais para a calibração do modelo.

O arquivo vetorial de saída foi utilizado como imagem de fundo no SWMM de forma a facilitar a disposição dos elementos. Para melhor incorporação das variações dos parâmetros

no modelo e melhor representar os dados experimentais, realizou-se uma nova subdivisão das sub-bacias em função das classes de uso e ocupação do solo. Nesse sentido, cada sub-bacia foi fracionada em 4 porções (Formação Florestal, Mosaico de Usos, Área Urbanizada - P e Área Urbanizada - NP).

Sub-bacias

Características físicas de cada sub-bacia são necessárias para a simulação hidrológica, como a área de contribuição, percentual de área permeável e impermeável, largura característica do escoamento superficial, declividade, coeficiente de rugosidade de Manning e altura do armazenamento em depressões.

Para as áreas de contribuição, foram utilizadas as áreas obtidas na etapa de discretização da bacia. Já os percentuais de área permeável e impermeável foram adotados a partir do mapeamento de uso e ocupação do solo do MapBiomass, considerando que as áreas impermeáveis eram oriundas de Área Urbanizada. Como essa classe engloba uma fração permeável (Área Urbanizada - NP), optou-se por segregar a classe em P e NP. Para isso, uma reclassificação supervisionada foi realizada no *software* QGis das áreas urbanizadas para obtenção dos valores das áreas para as diferentes superfícies. Desse modo, os percentuais de área permeável foram obtidos a partir da soma das áreas de Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbanizada - NP, e os percentuais de área superficial impermeável foram obtidos por meio da área da classe Área Urbanizada - P.

A largura característica do escoamento superficial foi obtida através da Equação 7, que representa a largura do retângulo equivalente de cada subárea, sendo função do coeficiente de compacidade.

$$L_e = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (7)$$

onde L_e é a largura do retângulo equivalente; K_c é o coeficiente de compacidade, dado pela relação $K_c = 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$; A é área da sub-bacia considerada; e P é o perímetro da sub-bacia.

Para obtenção da declividade média da sub-bacia, considerou-se o valor médio da declividade da área correspondente. Esse valor foi alcançado por meio de ferramentas do QGis, sendo necessário apenas um Modelo Digital de Elevação da área de estudo. Com relação aos coeficientes de Manning, o modelo requer um para a parcela permeável e outro para a parcela

impermeável da sub-bacia. O manual do SWMM apresenta dados tabelados sugeridos para esse parâmetro, a partir das características da superfície. Com base nesses dados, utilizou-se $n = 0,024$ e $n = 0,15$ para as superfícies impermeáveis e permeáveis, respectivamente.

Por fim, foi necessário fornecer uma altura de armazenamento em depressão para as parcelas permeáveis e impermeáveis da sub-bacia. A determinação desse parâmetro também foi baseada no manual do programa, o qual sugere uma altura máxima de 2,54 mm para áreas impermeáveis e um valor médio de 5,08 mm para as demais áreas.

Propagação de fluxo

O SWMM oferece três opções de formas de propagação de fluxo: Regime Uniforme, Onda Cinemática e Onda Dinâmica. Optou-se pelo modelo de Onda Cinemática, que permite que a vazão e a área variem no espaço e no tempo no interior do conduto. Esse fato pode resultar em amortecimento e defasagem nos hidrogramas de saída quando comparados aos hidrogramas de entrada nos condutos. Trata-se de uma alternativa precisa e eficiente para modelos de transporte com longos tempos de simulação (Rossman, 2010).

Período de análise e pluviômetro

Para o estudo, foram adotados três diferentes períodos de análise, cada um correspondente a um evento chuvoso que comprovadamente provocou inundações na bacia. As informações sobre cada um deles são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados relativos aos períodos simulados.

Evento	Data de Ocorrência	Início (h)	Fim (h)	Duração (h)	Chuva média acumulada (mm)
1	30/05/2016	0:00	16:00	16	210.52
2	13/04/2017	1:10	18:10	17	54.97
3	06/02/2023	5:50	17:00	11.17	146.69

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O evento 1 foi considerado como o evento padrão, sendo utilizado na maior quantidade de análises, tendo em vista que foi um evento histórico de grande magnitude, com registros de prejuízos significativos nas esferas econômica, social e ambiental. As inundações provocaram danos a propriedades, com o desabamento de muros e desmoronamentos de imóveis; interrupção de serviços essenciais e atividades comerciais; e comprometimento da mobilidade urbana (Figura 20). Os demais eventos foram selecionados a título de comparação, por estarem associados a curvas de marés com comportamentos distintos.

Figura 20 - Situação de pontos da bacia do Fragoso durante evento de chuva em 30/05/2016.

a) Afundamento de trecho do calçadão



b) Transbordamento do Canal do Fragoso



Fonte: Portal G1 (2016).

Os dados de precipitação utilizados para a simulação foram obtidos no endereço eletrônico do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). A escolha das estações pluviométricas foi baseada na proximidade à bacia e na disponibilidade de dados para os períodos selecionados (Tabela 3). Ressalta-se que na configuração do modelo só é permitido que uma sub-bacia esteja associada a apenas um pluviômetro, logo optou-se por utilizar um único pluviômetro com dados médios de precipitação, de forma a representar todas as estações pluviométricas.

A Tabela 3 apresenta as principais informações a respeito das estações pluviométricas utilizadas.

Tabela 3 - Coordenadas das estações pluviométricas utilizadas nas simulações.

Evento	Estação Pluviométrica	Município	Longitude	Latitude
1	Janga 2	Paulista	-34.8300	-7.9540
	Tabajara	Olinda	-34.8680	-7.9730
	Bonsucesso	Olinda	-34.8510	-8.0080
	Jardim Fragoso	Olinda	-34.8530	-7.9840
	Águas Compridas	Olinda	-34.9120	-7.9830
	Aguazinha	Olinda	-34.8870	-7.9990
	Vila Torres Galvão	Paulista	-34.8760	-7.9580
2	Dois Unidos	Recife	-34.9092	-7.9963
	Tabajara	Olinda	-34.8680	-7.9730
	Bonsucesso	Olinda	-34.8510	-8.0080
	Águas Compridas	Olinda	-34.9120	-7.9830
	Aguazinha	Olinda	-34.8870	-7.9990
	Vila Torres Galvão	Paulista	-34.8760	-7.9580
3	Dois Unidos	Recife	-34.9092	-7.9963
	Tabajara	Olinda	-34.8680	-7.9730
	Bonsucesso	Olinda	-34.8510	-8.0080
	Caixa D'Água	Olinda	-34.9057	-7.9949
	Janga 2	Paulista	-34.8300	-7.9540
	Vila Torres Galvão	Paulista	-34.8760	-7.9580
	Jardim Fragoso	Olinda	-34.8530	-7.9840

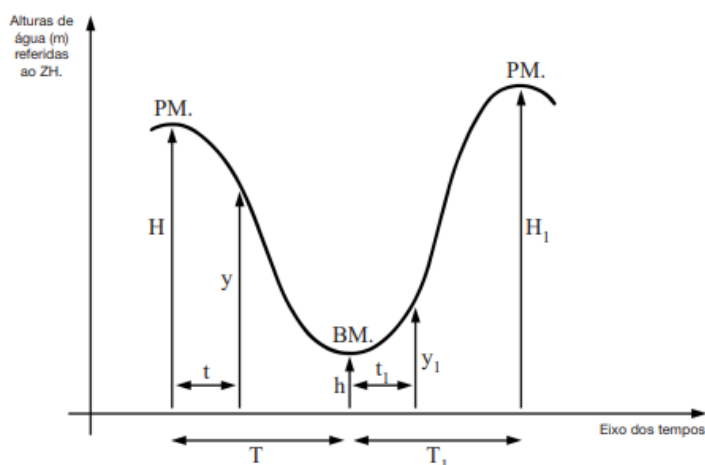
Fonte: Autora (2024), com base no CEMADEN.

Curva de maré

Para obtenção desse parâmetro, utilizou-se informações das tábuas de marés do Porto de Recife, disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), para as datas de simulação analisadas.

Como as tábuas de marés fornecem oito valores, quatro horários e quatro alturas de maré, sendo duas preia-mares (PM) e duas baixa-mares (PM), para a construção da curva completa referente a todo o período analisado, utilizou-se um método analítico (Equações 8 e 9) para extrapolação dos dados. Para o seu uso, é necessário assumir que a forma de onda da maré é senoidal e conhecer os valores apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Ilustração da curva de maré e identificação dos parâmetros da expressão analítica.



Fonte: Instituto Hidrográfico (2018).

Para determinação da altura de água (y) em um instante t depois de uma PM, utilizou-se a Equação 8 e para a determinação da altura de maré (y_1) em um instante t_1 após uma BM utilizou-se a Equação 9:

$$y = \frac{H+h}{2} + \frac{H-h}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad (8)$$

$$y_1 = \frac{h+H_1}{2} + \frac{h-H_1}{2} \cos\left(\frac{\pi t_1}{T_1}\right) \quad (9)$$

onde os valores de H ou H_1 representam as alturas máximas de maré (PM); h a altura mínima de maré (BM); y e y_1 as alturas a serem calculadas para um instante t ; T ou T_1 os intervalos de tempo entre as alturas máximas e mínimas ou mínimas e máximas de maré; t ou t_1 o intervalo entre o evento imediatamente anterior (altura máxima ou mínima) e o instante em que se deseja calcular a altura de maré (Instituto Hidrográfico, 2018).

Infiltração

O SWMM tem as opções de métodos de infiltração de Horton, Green-Ampt e Curva-Número. A adaptação dos resultados obtidos em campo por método tridimensional (*Beerkan*) para esses métodos unidimensionais foi realizada uma vez que não foi possível utilizar um *software* que abrangesse abordagens tridimensionais, sendo esses programas comumente pagos ou limitados sem o uso de uma licença. Além disso, esses tipos de *softwares* exigem uma grande quantidade de dados e recursos computacionais, o que também limita sua aplicação, como no caso desse estudo. Ressalta-se, no entanto, que os métodos tridimensionais fornecem parâmetros que, quando devidamente ajustados, podem ser incorporados em modelos unidimensionais, aplicando simplificações que ainda mantêm uma coerência com a realidade.

O método de Horton baseia-se em observações empíricas e apresenta o decrescimento exponencial da infiltração com o tempo, passando de um valor máximo até um certo valor mínimo (Rossman, 2010):

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k_f t} \quad (10)$$

sendo f a capacidade de infiltração no tempo, f_c a capacidade mínima de infiltração, f_0 a capacidade de infiltração inicial, t o tempo decorrido desde a saturação superficial do solo e k_f o coeficiente experimental de saída exponencial.

O método de infiltração de Green-Ampt assume a existência de uma frente de umedecimento na coluna de solo, separando uma camada do solo com a umidade inicial de outra camada situada na parte superior do solo, onde o solo é saturado (Rossman, 2010):

$$f = K \cdot \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i)\Psi}{F} \right] \quad (11)$$

sendo f a capacidade de infiltração, K a condutividade hidráulica, ϕ a porosidade, θ_i a umidade inicial do solo; Ψ o potencial matricial médio na frente de umedecimento e F a infiltração acumulada.

O método da Curva-Número (CN) é uma proposta do NRCS (National Resources Conservation Service) para estimativa do escoamento superficial. O valor CN é um parâmetro adimensional, variável entre 0 e 100, sendo 0 correspondente a um solo com capacidade de infiltração infinita e 100 corresponde a um solo totalmente impermeável. A partir da tabela de CN, obtém-se a capacidade total de infiltração do solo (Rossman, 2010; Collischonn; Dornelles, 2013).

Os parâmetros de entrada para cada método de infiltração são descritos no Quadro 1. Os três métodos foram testados no SWMM para efeitos de comparação, sendo escolhido aquele que melhor se adequasse aos dados obtidos em campo.

Quadro 1 - Parâmetros de entrada para os métodos de infiltração no SWMM.

Método	Parâmetros
Horton	Taxas de infiltração máxima e mínima
	Coefic. de decaimento: Reproduz o decrescimento da infiltração no tempo
	Tempo seco: Tempo para um solo saturado se tornar totalmente seco
	Volume máximo de infiltração
Green-Ampt	Sucção capilar: Sucção capilar média do solo na frente de umedecida
	Ks: Condutividade hidráulica do solo saturado
	Déficit inicial: Fração de volume do solo inicialmente seco
Curva-Número	CN: Número da curva SCS, valor tabelado
	Tempo seco: Tempo para um solo saturado se tornar totalmente seco

Fonte: Elaborado pela autora (2024), baseado em Rossman (2010).

Nós

Podem ser classificados entre nós de conexão e exutório. Os nós de conexão correspondem aos elementos do sistema de drenagem responsáveis pela conexão entre os trechos e, tratando-se de canais superficiais naturais, podem representar confluências. O excesso de água nesses pontos pode conduzir a uma inundação do terreno acima do nó, podendo voltar ao sistema de forma gradativa (Rossman, 2010). Os principais parâmetros de entrada desses elementos (cota e a profundidade em relação ao terreno) foram adotados com base em perfis de elevação da área de estudo.

Já o exutório representa um nó terminal a jusante do sistema de drenagem. Como parâmetros de entrada, além da cota, foi necessário fornecer uma curva de maré, a qual relaciona a elevação de água com a hora do dia ao longo de um ciclo completo de maré. Nesse sentido, para cada evento simulado, uma curva de maré associada foi introduzida.

Condutos

Os condutos representam os canais que transportam a água de um nó para outro, também chamados de trechos. Nesse sentido, foi necessário informar o nó de entrada e o nó de saída de cada elemento, assim como parâmetros de geometria das seções transversais, comprimento e coeficiente de rugosidade de Manning.

Para todos os condutos instalados, considerou-se que todos eram abertos de modo a representar canais naturais. Os parâmetros de geometria adotados foram baseados nos mesmos parâmetros utilizados por Fonseca Neto *et al.* (2020); os comprimentos foram obtidos na etapa de discretização da bacia; e, por fim, os coeficientes de rugosidade de Manning foram determinados de acordo com o manual do SWMM, sendo igual a 0,035 em canais naturais e igual a 0,013 em canais revestidos (trecho canalizado do rio Fragoso).

4.3.2. Cenários de simulação

O modelo calibrado foi utilizado para simular diferentes cenários de permeabilidade e impermeabilidade na bacia com o intuito de avaliar os impactos dessas intervenções nos eventos de inundações. Para isso, inicialmente realizou-se uma simulação que representasse a condição atual da bacia sob o regime de chuva do dia 30/05/2016 para análise da resposta da bacia antes da aplicação de intervenções.

Em seguida, foram propostos cenários de aumento da impermeabilidade e da permeabilidade em 15%, 30% e 50% para ambos os casos. A representação dessas mudanças no padrão de uso e ocupação da bacia foi realizada pelo ajuste da área em cada sub-bacia e suas respectivas classes. Admitiu-se que o aumento da permeabilidade ocorreu com o aumento das áreas de Formação Florestal e consequente redução das áreas de Mosaico de Usos, de forma a propor cenários de restauração de florestas e a promoção de práticas de agriculturas urbanas autossustentáveis. A série temporal de chuva e os demais parâmetros foram mantidos.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos para os cenários supracitados, realizou-se simulações para diferentes intensidades de precipitação e variações da curva de maré no exutório da bacia sob condições análogas de aumento da impermeabilidade e permeabilidade. Para esses novos cenários, os dados de chuva dos dias 13/04/2017 e 06/02/2023 foram utilizados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características físicas do solo

A partir da análise granulométrica realizada em laboratório, foi possível determinar as frações de areia, silte e argila de cada solo estudado e, conseqüentemente, suas respectivas classes texturais (Tabela 4).

Tabela 4 - Caracterização textural média dos solos estudados.

Classe	Ponto	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classe Textural
Formação Florestal	1	16.07	16.88	67.05	Franco arenosa
	2	20.08	19.61	60.31	Franco argilo arenosa
	4	16.07	4.47	79.46	Franco argilo arenosa
	11	25.48	13.17	61.35	Franco argilo arenosa
Mosaico de Usos	3	20.08	10.47	69.44	Franco argilo arenosa
	12	18.36	3.36	78.29	Franco arenosa
	16	18.37	4.83	76.80	Franco arenosa
	17	14.72	9.59	75.68	Franco arenosa
Área Urbanizada - NP	5	9.38	6.18	84.44	Areia franca
	8	9.18	4.80	86.03	Areia franca
	9	29.46	17.36	53.18	Franco argilo arenosa
	10	22.77	9.60	67.62	Franco argilo arenosa
	13	18.36	3.92	77.72	Franco arenosa
	14	9.38	6.18	84.44	Areia franca
	15	16.07	3.90	80.03	Franco arenosa

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observa-se uma predominância da fração areia em todos os pontos analisados, sendo as classes texturais Franco Arenosa e Franco Argilo Arenosa as classes mais frequentes. A classe do tipo de uso e ocupação do solo que mais apresentou uma variação textural foi a Área Urbanizada - NP. Esse comportamento pode ser justificado pelas várias intervenções humanas que alteram as características naturais do solo, como a mistura do solo com diferentes materiais de origem, seja de construção, demolição ou outro material artificial. Cadorin (2013) também

observou uma variabilidade textural em solos urbanos em Pato Branco - PR, identificando a incorporação de materiais antrópicos e a inversão de horizontes.

As curvas granulométricas dos solos estudados das classes Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbanizada - NP são apresentadas no Apêndice A. É possível verificar visualmente a maior variabilidade nas curvas da classe de Área Urbanizada.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5 revela variações significativas nas propriedades físicas do solo entre diferentes classes de uso da terra, nomeadamente Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbanizada. Observa-se que a densidade do solo (ρ_s) variou de 1,11 a 1,63 g cm⁻³, sendo geralmente mais elevada nas Áreas Urbanizadas (NP), o que indica uma maior compactação nesses locais, possivelmente decorrente de atividades antropogênicas intensivas. A densidade da partícula (ρ_p) apresentou variação de 1,73 a 2,59 g cm⁻³, com valores mais altos associados às áreas de Mosaico de Usos e Área Urbanizada, sugerindo a presença de materiais mais densos ou menos orgânicos nesses pontos.

Tabela 5 - Valores de densidade do solo (ρ_s), densidade da partícula (ρ_p), porosidade total (ϕ), resistência do solo à penetração, antes (RPi) e depois (RPf) das medidas de infiltração.

Classe	Ponto	ρ_s (g cm ⁻³)	ρ_p (g cm ⁻³)	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	RPi (MPa)	RPf (MPa)
Formação Florestal	1	1.39	1.87	0.48	6.62	1.73
	2	1.42	2.47	0.46	2.57	2.22
	4	1.33	2.32	0.50	3.42	0.52
	11	1.33	1.73	0.50	2.21	0.63
Mosaico de Usos	3	1.31	2.27	0.51	2.74	0.80
	12	1.52	2.50	0.43	2.09	0.82
	16	1.32	2.28	0.50	3.34	1.04
	17	1.34	2.33	0.49	4.71	0.97
Área Urbanizada - NP	5	1.63	2.15	0.39	4.45	3.17
	8	1.51	2.49	0.43	5.97	2.10
	9	1.32	2.30	0.50	7.39	4.32
	10	1.54	2.14	0.42	6.07	1.08
	13	1.59	2.35	0.40	4.90	0.74
	14	1.63	2.59	0.39	4.45	2.04

15	1.11	2.05	0.58	2.39	1.48
----	------	------	------	------	------

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A porosidade total (ϕ) variou de 0,39 a 0,58 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, com os maiores valores encontrados na Formação Florestal e os menores em Áreas Urbanizadas (NP), o que pode estar relacionado à redução da macroporosidade devido à compactação do solo. A resistência do solo à penetração antes das medidas de infiltração (RP_i) foi maior nas Áreas Urbanizadas (NP), chegando a 7,39 MPa, indicando solos altamente compactados que podem dificultar o crescimento radicular e a infiltração de água.

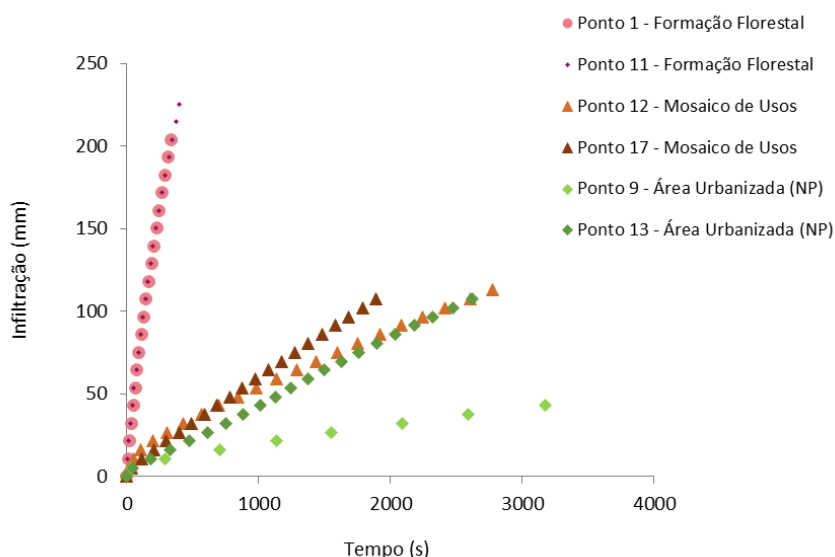
Após as medidas de infiltração, houve uma redução generalizada na resistência do solo à penetração (RP_f) em todos os pontos, com a maior redução observada na Formação Florestal e no Mosaico de Usos, o que sugere uma maior capacidade de recuperação desses solos após a infiltração. Em contraste, as Áreas Urbanizadas (NP) apresentaram uma menor redução na resistência, evidenciando uma menor capacidade de recuperação da estrutura do solo nessas áreas.

Estes resultados indicam que as Áreas Urbanizadas, especialmente aquelas não pavimentadas (NP), apresentam solos mais compactados e com menor porosidade, o que pode comprometer a infiltração de água e o crescimento radicular, além de aumentar o risco de erosão e escoamento superficial. Por outro lado, os solos sob Formação Florestal e Mosaico de Usos mostraram-se mais resilientes, com menor compactação e maior capacidade de recuperação estrutural após a infiltração, destacando a importância de práticas que mantenham ou melhorem a qualidade física do solo em áreas sujeitas a usos mais intensivos.

5.2. Ensaio de infiltração

As curvas de infiltração acumulada de alguns pontos representativos de cada classe de uso e ocupação do solo em função do tempo são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Curvas de infiltração acumulada para as classes de uso e cobertura do solo.



Fonte: Autora (2023).

Observa-se que o par de pontos de Formação Florestal apresenta um comportamento diferente dos demais, evidenciada pela escala utilizada. O tempo decorrido para o ensaio foi de 334 s e 401 s para os pontos 1 e 11, respectivamente. Essa rápida infiltração pode ser justificada pela grande quantidade de matéria orgânica presente e pela baixa compactação desses solos. Os ensaios na classe de Área Urbanizada, em contrapartida, apresentaram comportamentos heterogêneos e duraram um tempo maior. Esse fato pode estar associado à compactação do solo nos pontos analisados.

As taxas de infiltração do solo apresentadas, em função do uso da terra, evidenciam diferenças marcantes entre as classes de uso estudadas (Tabela 6). Na Formação Florestal, as taxas de infiltração tiveram uma amplitude de variação de 1,68 mm/s, com valores médios mais elevados, especialmente no Ponto 11, indicando uma elevada capacidade de infiltração nesses solos. Essa alta infiltração é característica de solos com boa estrutura e cobertura vegetal, que favorecem a percolação da água e a recarga dos aquíferos.

Wang *et al.* (2019) apontam para a maior infiltração do solo para a classe quando comparada a outros tipos de uso do solo, sendo a cobertura vegetal florestal capaz de reduzir o escoamento superficial e o aumento da recarga subterrânea. Ainda, segundo Souza (2000), as maiores taxas de infiltração nessas áreas ocorrem devido à influência que a cobertura vegetal exerce sobre as propriedades físicas do solo, por meio da proteção contra o impacto direto das

chuvas e do efeito cimentante e estabilizador de substâncias orgânicas excretadas pelas raízes (Souza, 2000).

Tabela 6 - Taxas de infiltração de acordo com o uso.

Classe	Ponto	Taxa de infiltração (mm/s)		
		Mín	Méd	Máx
Formação Florestal	1	0.47	0.64	0.98
	2	0.15	0.17	0.19
	4	0.11	0.20	0.28
	11	0.36	0.65	1.79
Mosaico de Usos	3	0.28	0.33	0.38
	12	0.03	0.06	0.45
	16	0.08	0.10	0.14
	17	0.05	0.06	0.15
Área Urbanizada - NP	5	0.01	0.01	0.04
	8	0.03	0.04	0.15
	9	0.01	0.03	0.15
	10	0.08	0.10	0.13
	13	0.04	0.04	0.12
	14	0.01	0.02	0.14
	15	0.06	0.09	0.49

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os pontos classificados como Mosaico de Usos apresentaram uma amplitude de variação de 0,42 mm/s nas taxas de infiltração, com valores médios intermediários. Esses solos, que estão sujeitos a diferentes tipos de uso e manejo, mostram uma capacidade de infiltração moderada, possivelmente devido à presença de vegetação intercalada com áreas mais compactadas ou de menor cobertura. Como se trata de uma área de difícil distinção entre as atividades de pastagem e agricultura, é coerente pensar que há a presença e a combinação de fatores diferentes na classe. Estradas e caminhos percorridos pelo gado, por exemplo, sofrem a compactação, que por sua vez reduz a capacidade de infiltração, e, em contrapartida, o uso de maquinário agrícola para revolvimento do solo durante o plantio pode aumentar essa capacidade

(Tucci; Clarke, 1997). Há, portanto, um equilíbrio entre os fatores, culminando em um comportamento intermediário.

Por outro lado, as Áreas Urbanizadas, tanto pavimentadas (P) quanto não pavimentadas (NP), exibiram as menores taxas de infiltração. Em áreas pavimentadas (P), a taxa de infiltração foi nula, confirmando a impermeabilidade total desses solos. Nas áreas não pavimentadas (NP), a amplitude de variação foi de apenas 0,14 mm/s nas taxas de infiltração, com a média mais alta observada no Ponto 10 (0,10 mm/s), ainda assim, 550% inferior aos valores médios registrados na Formação Florestal.

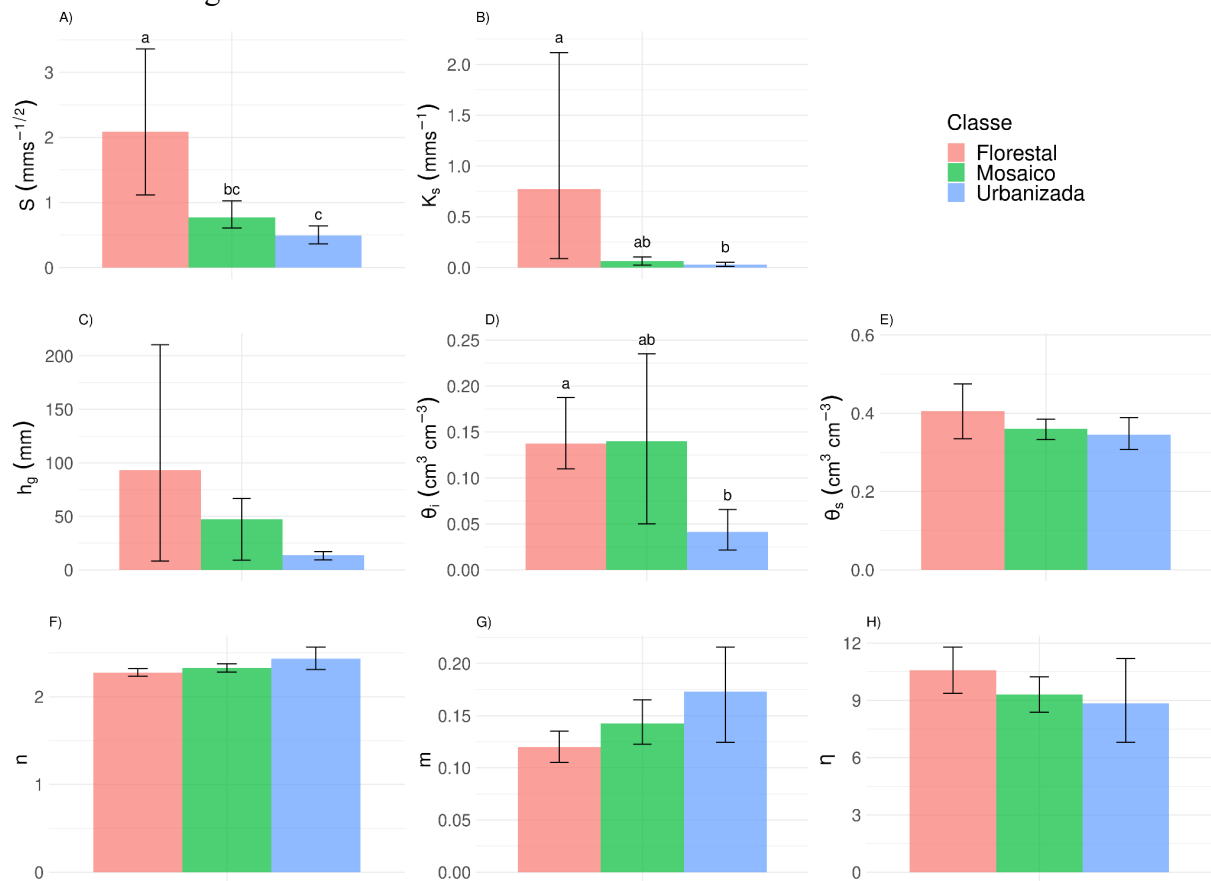
Esses resultados indicam que a urbanização, especialmente nas áreas pavimentadas, reduz drasticamente a capacidade de infiltração do solo, contribuindo para maior escoamento superficial e potencial aumento de inundações. Mesmo em áreas não pavimentadas dentro do ambiente urbano, a infiltração é significativamente limitada, o que pode ser atribuído à compactação do solo decorrente do tráfego de veículos e pedestres, além da ausência de cobertura vegetal adequada. Ao analisar as características da taxa de infiltração do solo em diferentes tipos de cobertura de solo em zona urbana, Mancuso et al. (2014) observaram que as áreas com menor intervenção antrópica resultam em melhores condições de infiltração e reforça a importância de áreas verdes em espaços urbanos construídos, em função da sua capacidade de retenção e infiltração das águas pluviais.

Em contraste, as áreas sob Formação Florestal destacam-se pela sua alta taxa de infiltração, reforçando a importância da conservação e recuperação dessas áreas para a manutenção do ciclo hidrológico, a redução do escoamento superficial e a melhoria da qualidade ambiental. O Mosaico de Usos, com taxas intermediárias, sugere que práticas de manejo adequadas podem mitigar parcialmente os efeitos negativos sobre a infiltração, mas ainda assim, não atingem os níveis de desempenho das formações florestais naturais.

5.3. Propriedades hidrodinâmicas dos solos

Os parâmetros obtidos pelo método Beerkan, apresentados no Apêndice B e ilustrados na Figura 23, fornecem uma análise detalhada das características hidráulicas do solo nas três classes de uso da terra identificadas na bacia do Frágoso. A seguir, segue uma análise realizada levando em consideração os valores obtidos a partir da reamostragem por bootstrap.

Figura 23 - Valores médios da sorvidade S (A), dos parâmetros de normalização K_s (B), h_g (C) e Θ_s (E) e de forma n (F), m (G) e η (H) e para as diferentes classes de uso e ocupação do solo da bacia do Frágoso.



Fonte: Autora (2024).

Na Formação Florestal a sorvidade do solo foi a mais alta entre as áreas, com uma média de 2,09 mm s-1/2 (intervalo: 1,12 a 3,36 mm s-1/2). Esse valor elevado reflete a alta capacidade de absorção de água, atribuída à vegetação densa que melhora a infiltração e a retenção hídrica. No Mosaico de Usos, a sorvidade diminui, com uma média de 0,77 mm s-1/2 (intervalo: 0,61 a 1,02 mm s-1/2), indicando uma capacidade de absorção de água intermediária, inferior à da Formação Florestal, mas superior à da Área Urbanizada. Na Área Urbanizada, a sorvidade foi a menor, com uma média de 0,49 mm s-1/2 (intervalo: 0,37 a 0,64 mm s-1/2), refletindo a compactação do solo e a presença de superfícies impermeáveis típicas de áreas urbanas (Figura 23A).

A Formação Florestal também apresentou a maior condutividade hidráulica, com uma média de 0,77 mm s-1 (intervalo: 0,08 a 2,12 mm s-1), sugerindo uma excelente permeabilidade do solo devido à estrutura solta e menor compactação. No Mosaico de Usos, a condutividade hidráulica foi intermediária, com uma média de 0,06 mm s-1 (intervalo: 0,03 a 0,10 mm s-1), refletindo um solo menos permeável que na Formação Florestal, mas mais do que na Área

Urbanizada. Na Área Urbanizada, a condutividade hidráulica foi a mais baixa, com uma média de 0,03 mm s⁻¹ (intervalo: 0,01 a 0,05 mm s⁻¹), indicando uma baixa permeabilidade associada à compactação e à menor porosidade do solo (Figura 23B).

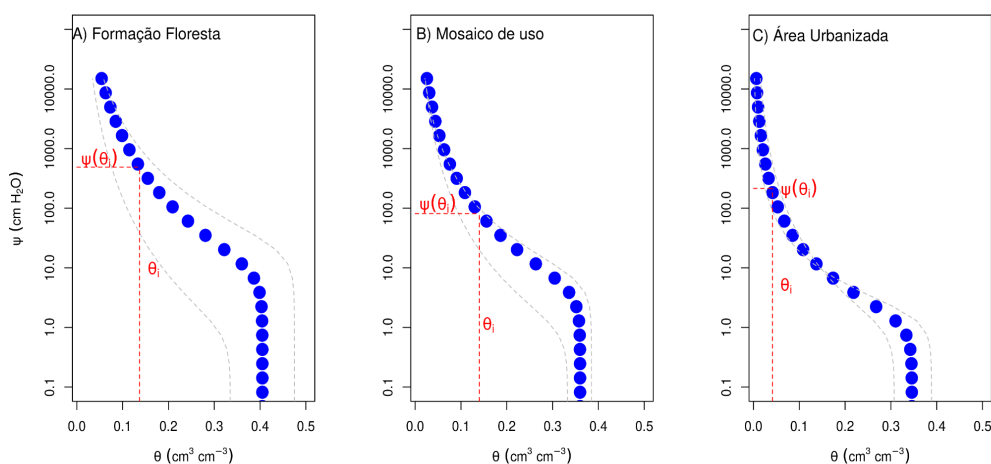
O parâmetro h_g foi o mais negativo na Formação Florestal, com -93,3 mm, o que indica uma capacidade de retenção de água significativamente eficiente. No Mosaico de Usos, o valor de h_g foi intermediário, com -47,16 mm, sugerindo uma capacidade de retenção de água inferior à da Formação Florestal, mas ainda melhor que na Área Urbanizada. Na Área Urbanizada, o valor de h_g foi o menos negativo, com -13,84 mm, indicando uma capacidade reduzida de retenção de água no solo (Figura 23C).

Os valores de Θ_i (Figura 23D) e Θ_s (Figura 23E) foram elevados na Formação Florestal, com médias de 0,14 cm³ cm⁻³ e 0,41 cm³ cm⁻³, respectivamente, indicando excelente capacidade de armazenamento da água infiltrada, beneficiada pela vegetação densa e pela cobertura do solo.

No Mosaico de Usos, esses valores foram intermediários, com Θ_i de 0,14 cm³ cm⁻³ e Θ_s de 0,36 cm³ cm⁻³, refletindo uma capacidade de armazenamento da água infiltrada moderada. Na Área Urbanizada, a umidade volumétrica inicial foi de 0,04 cm³ cm⁻³, e após saturação, de 0,35 cm³ cm⁻³, valores que indicam uma capacidade de armazenamento da água de infiltração relativamente baixa, atribuída a elevada compactação e baixa permeabilidade do solo em áreas urbanizadas.

De posse dos parâmetros obtidos, foi possível construir as curvas de retenção de água no solo para as diferentes classes de uso e ocupação do solo por meio do BEST (Figura 24).

Figura 24 - Curvas de retenção de água no solo, $\psi(\theta)$, para as diferentes classes de uso e ocupação do solo, oriundas das análises do BEST. $\psi(\theta_i)$ é o potencial da água para θ_i medido com o Beerkan e assumida como equivalente a θ na frente de molhamento da equação



Fonte: Autora (2024).

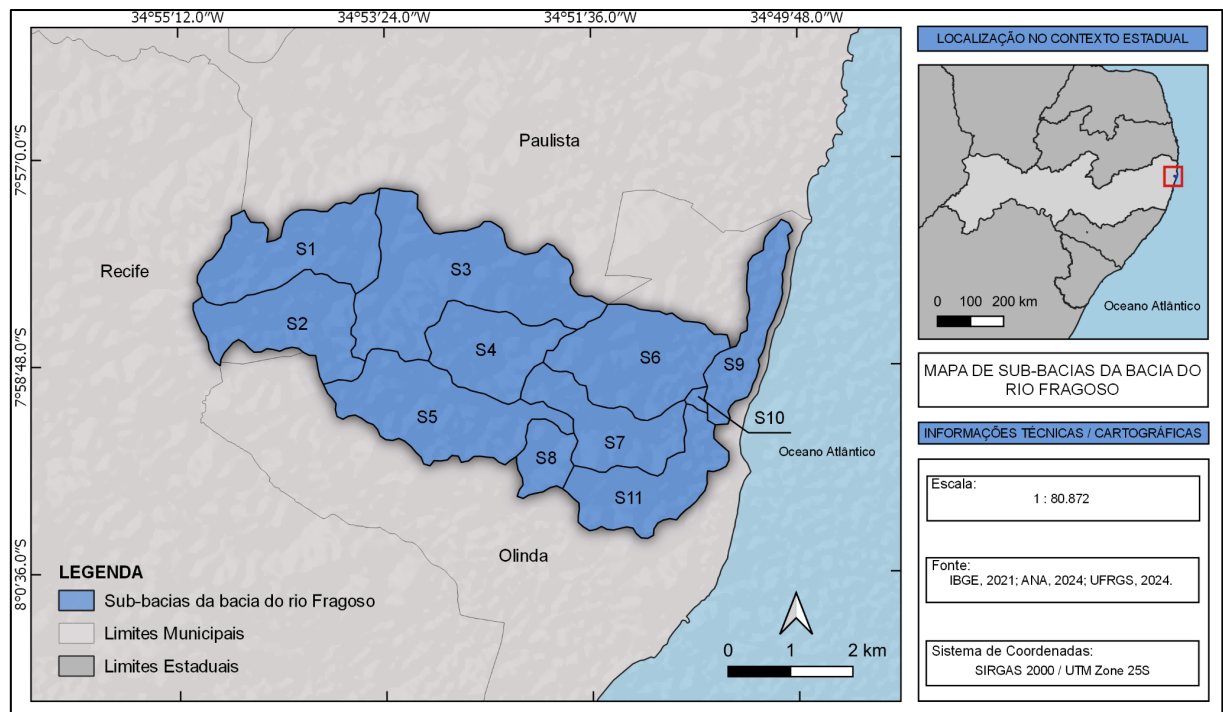
5.4. Modelo SWMM

5.4.1. Discretização da bacia do Frágoso

A Figura 25 apresenta o resultado da discretização da bacia do rio Frágoso em 11 sub-bacias, resultado obtido pelo plugin BHO2MGB. Em seguida, é possível visualizar na Figura 25 uma ilustração da mesma configuração já disposta no modelo SWMM, com a identificação de cada sub-bacia, assim como dos nós, trechos e do exutório da bacia.

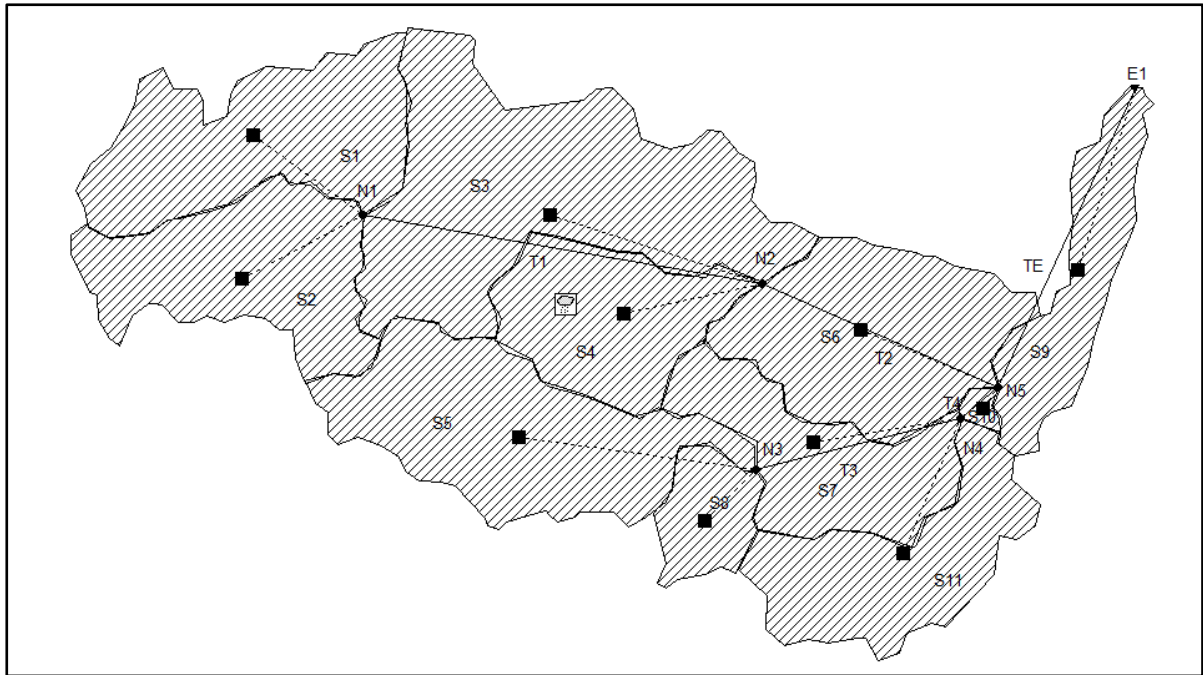
As áreas hachuradas com um quadrado preto no centro e identificadas com siglas iniciadas pela letra “S” correspondem às sub-bacias, os círculos pretos identificados com siglas iniciadas em “N” correspondem aos nós, as linhas contínuas identificadas com siglas iniciadas com “T” representam os trechos/canais, as linhas tracejadas representam a associação da sub-bacia ao seu respectivo nó/exutório e o ícone que ilustra uma nuvem ao meio da bacia corresponde ao pluviômetro, o qual fornece a entrada da precipitação no sistema.

Figura 25 - Discretização da bacia do rio Frágoso em sub-bacias.



Fonte: Autora (2024).

Figura 26 - Layout do modelo SWMM.



Fonte: Autora (2024).

A definição do fluxo da água foi conduzida com base na topografia da bacia, a jusante da bacia, sendo coincidente com os trabalhos de Rodrigues (2021) e Fonseca Neto *et al.* (2020), os quais utilizaram arranjos semelhantes e uma direção de fluxo no mesmo sentido.

5.4.2. Variáveis e parâmetros de entrada

Sub-bacias

Os parâmetros de entrada no modelo SWMM para cada sub-bacia são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de entrada das sub-bacias no modelo SWMM.

Sub-bacia	Área (ha)	Largura superficial (m)	Declividade (m/m)	Área impermeável (%)
1	316.94	813.13	0.063	19.56
2	278.78	782.12	0.071	21.37
3	548.36	937.28	0.072	35.61
4	227.24	947.33	0.070	22.15
5	368.92	830.84	0.068	10.11
6	337.73	1261.37	0.051	78.26
7	221.01	636.19	0.052	73.52
8	84.90	655.26	0.067	71.04

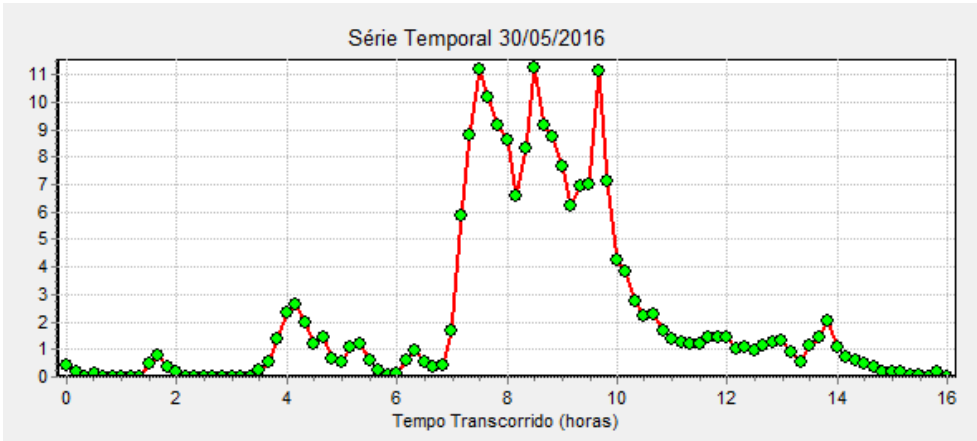
9	168.26	485.81	0.010	92.39
10	9.68	203.99	0.010	69.07
11	242.71	680.33	0.040	84.27

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pluviômetro e curvas de maré

Com relação aos dados pluviométricos, utilizou-se os dados referentes aos dias 30/05/2016 (evento 1), 13/04/2017 (evento 2) e 06/02/2023 (evento 3), os quais registraram pontos de inundação na bacia do Fragoso. De posse dos dados disponibilizados pelo Cemaden, foi possível construir e visualizar a distribuição da chuva em cada estação pluviométrica (Apêndice C). Os eventos registraram chuvas acumuladas de 210, 52 mm, 54,97 mm e 146,69 mm, respectivamente. A Figura 27 apresenta a aplicação da série temporal do evento 1 no SWMM, evidenciando que o período mais intenso do evento ocorreu no intervalo de tempo entre 07h e 10h.

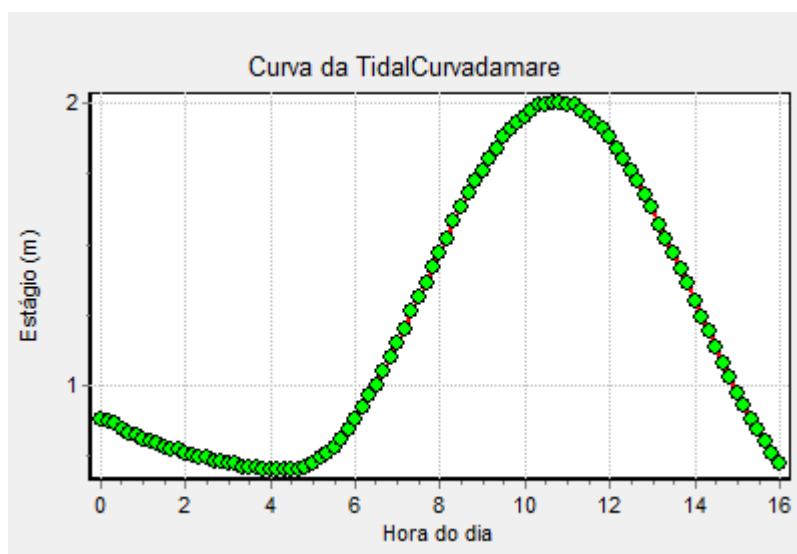
Figura 27 - Visualização da série temporal de chuva do evento 1 no SWMM.



Fonte: SWMM (2024).

Com relação às curvas de maré, seus comportamentos foram relacionados com as chuvas no Apêndice D. Observou-se que no evento do dia 30/05/2016, no momento mais intenso de chuva, a maré estava alta e muito próxima de seu nível mais alto. No início do evento do dia 13/04/2017, a maré estava elevada e coincidiu com um pico de chuva, porém no momento mais intenso de chuva, entre 9h30 e 11h10, a maré estava em sua altura mínima. Já no evento do dia 06/02/2023, a maré estava baixa, com altura mínima, no momento de chuva mais intensa, comportamento contrário ao evento 1. A Figura 28 apresenta a aplicação dos dados encontrados por meio das Equações 8 e 9 para a construção da curva de maré ao longo do evento do dia 30/05/2016.

Figura 28 - Visualização do comportamento da curva da maré no exutório (evento 1) no SWMM.

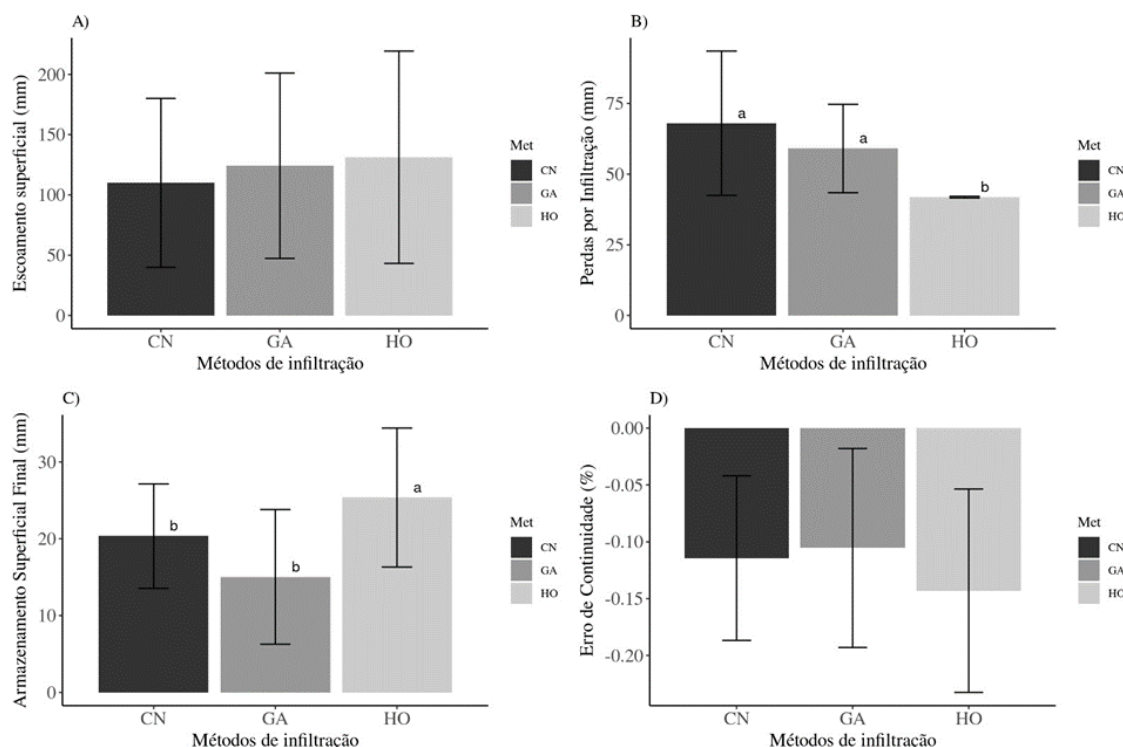


Fonte: SWMM (2024).

Infiltração

Para escolha do método de infiltração, dez eventos de chuvas intensas foram selecionados para efeito de comparação de respostas das principais variáveis do balanço hídrico. Foi possível perceber que para o escoamento superficial e os erros obtidos, não foram observadas diferenças entre os métodos. No entanto, analisando as perdas por infiltração e o armazenamento superficial, o método de Horton foi estatisticamente diferente dos demais, como apresenta a Figura 29.

Figura 29 - Valores médios de escoamento superficial (A), perdas por infiltração (B), armazenamento superficial final (C) e erro de continuidade (D) simulados com SWMM, para dez eventos extremos de chuva ocorridos na bacia do Fragoso.



Fonte: Autora (2024).

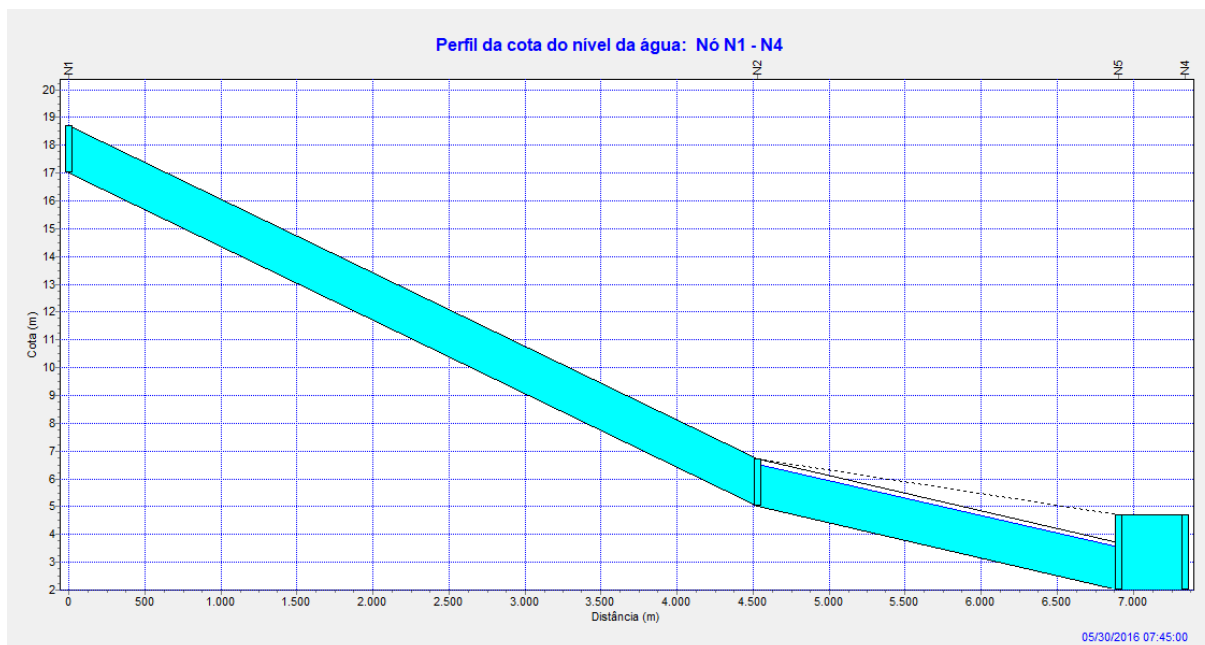
Nesse sentido, o método de Green Ampt foi escolhido por permitir uma caracterização mais precisa dos parâmetros de entrada necessários. No modelo, para o parâmetro de sucção capilar, utilizou-se os valores equivalentes de h_g , já o K_s foi determinado a partir das curvas de $\theta(h)$ (Equação 3) e $K(\theta)$ (Equação 4), ambos obtidos com o BEST. Por fim, como sugerido no manual do programa, o déficit inicial de volume do solo foi determinado pela diferença entre os valores médios da porosidade total (ϕ) e conteúdo volumétrico de água inicial do solo (θ), obtidos durante as medidas de infiltração.

Nós e Condutos

Seis nós, sendo cinco de conexão e um exutório, e cinco condutos foram inseridos no sistema. Vale ressaltar que o nó 5 ficou localizado muito próximo do nó 4 (Figura 25), em função da pequena área da sub-bacia S10. Na realidade da bacia, o trecho que os liga, representado por parte canalizada do Fragoso, é de fato muito pequeno. As cotas desses nós também são iguais.

A Figura 30 apresenta o perfil longitudinal dos canais que representam a bacia do Fragoso em uma situação de nível máximo de água, evidenciando sobrecarga nos nós e a capacidade máxima dos condutos em instante durante o evento do dia 30/05/2016.

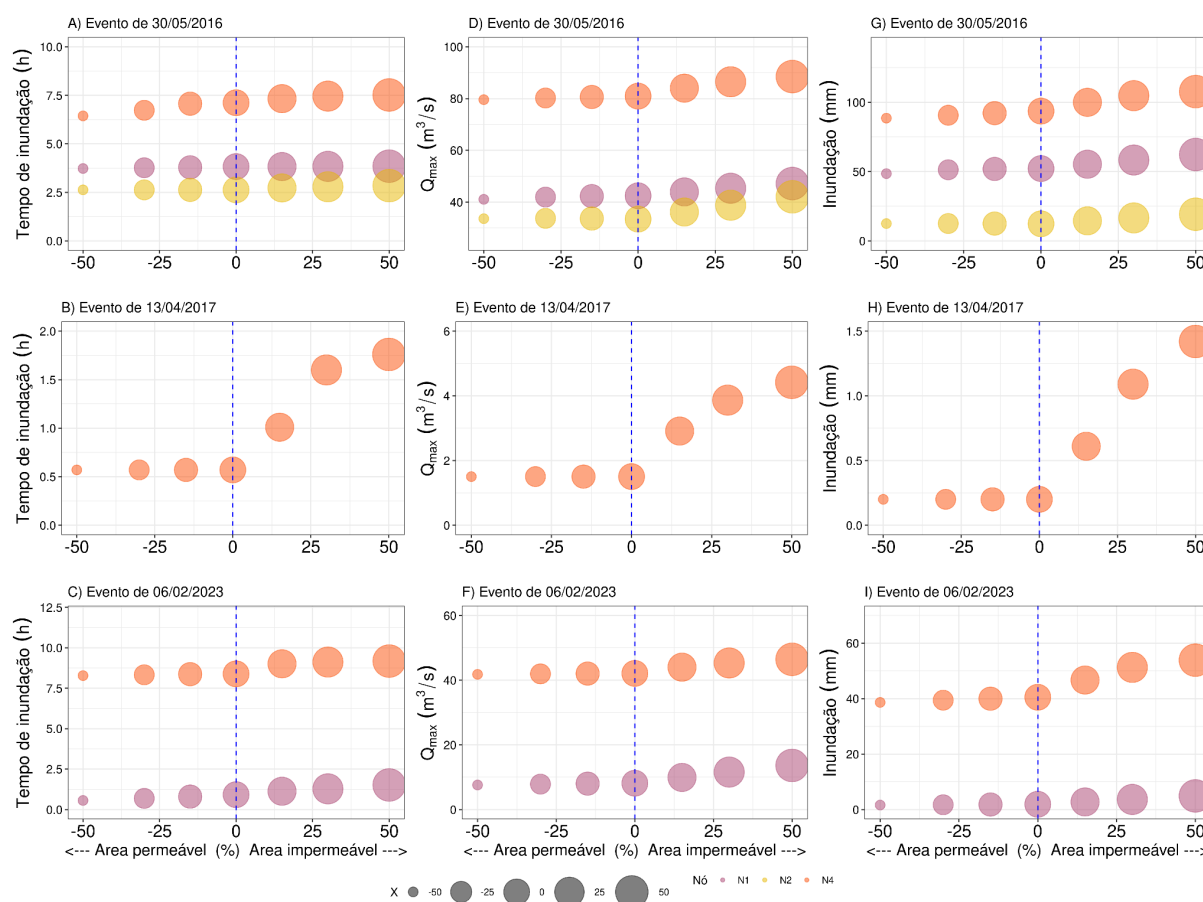
Figura 30 - Perfil da cota do nível d'água dos canais da bacia do Fragoso em momento crítico da chuva do dia 30/05/2016.



5.4.3. Cenários de simulação

A análise dos impactos dos diferentes cenários de urbanização e reflorestamento na bacia do Fragoso revela variações significativas na lâmina total inundada, na vazão máxima e no tempo de inundação para os eventos de chuva analisados. Estes cenários são representados por X, onde valores positivos indicam aumento das áreas impermeáveis e valores negativos sugerem um aumento da permeabilidade do solo, similar à Formação Florestal (Figura 31).

Figura 31 - Síntese de inundações na bacia do Fragoso para diferentes cenários (impermeabilização x permeabilização) para eventos de chuvas intensas ocorridas em 30/05/2016, 13/04/2017 e 06/02/2023.



Fonte: Autora (2024).

O evento de 30/05/2016 apresentou uma chuva média acumulada de 210,52 mm, resultando em diferentes comportamentos de inundação nos nós avaliados (N1, N2 e N4). Para o nó N1, à medida que as áreas impermeáveis aumentam ($X = 50\%$), observou-se um aumento de 19,41% na lâmina total inundada (de 52,19 mm para 62,31 mm) em relação ao cenário atual (Figura 31G). Por outro lado, um aumento da permeabilidade ($X = -50\%$) resultou em uma redução de 7,04% na inundação. Este padrão de redução na lâmina total inundada foi acompanhado por uma diminuição da vazão máxima de 3,25% (de 42,44 m^3/s para 41,06 m^3/s) (Figura 31D).

No nó N2, o efeito do aumento da impermeabilidade foi menos pronunciado, mas ainda significativo, com a lâmina total inundada aumentando 56,28% (Figura 31G) e a vazão máxima aumentando 25,83% (Figura 31D). Uma maior permeabilidade reduziu a inundação em 1,28% em comparação com o cenário atual.

No nó N4, a resposta às mudanças de permeabilidade foi mais acentuada. O aumento da impermeabilidade ($X = 50\%$) resultou em um aumento de 15,05% na lâmina total inundada (de 93,64 mm para 107,73 mm) e um aumento de 9,33% na vazão máxima. Por outro lado, o aumento da permeabilidade ($X = -50\%$) resultou em uma redução de 5,46% na lâmina total inundada.

O evento de 30/05/2016 coincide com a elevação do nível do mar (Figura 31A, D e G e Apêndice D). Nessas circunstâncias, o escoamento para o exutório perde força, prolongando a duração das inundações mais do que nos eventos de 13/04/2017 e 06/02/2023, espalhando-as mais amplamente pela bacia do Frágoso, como detectado nas três interseções (N1, N2 e N4), mesmo no cenário de maior permeabilização da bacia.

Para o evento de 13/04/2017, com uma chuva acumulada de 54,97 mm, as mudanças foram mais discretas sendo constatado inundação apenas em N4 (Figura 31H). No nó N4, o aumento da impermeabilidade ($X = 50\%$) resultou em um aumento de 610% na lâmina total inundada (de 0,20 mm para 1,42 mm), enquanto o aumento da permeabilidade ($X = -50\%$) não apresentou alterações significativas na lâmina total inundada. O nó N4 é a interseção mais urbanizada da rede de drenagem do Frágoso e onde os fluxos de água dos Bultrins e Ouro Preto, sub-bacias também bastante urbanizados, são descarregados.

O evento de 06/02/2023 (Figura 31C, F e I), com uma chuva média acumulada de 146,69 mm, apresentou variações significativas na lâmina total inundada no nó N1. Um aumento na impermeabilidade resultou em um aumento de 158,42% na lâmina total inundada (de 1,90 mm para 4,91 mm) e um aumento de 67,59% na vazão máxima (de 8,13 m³/s para 13,63 m³/s). O aumento na área permeável ($X = -50\%$) resultou em uma redução de 15,26% da inundação.

No nó N4, o aumento da impermeabilidade aumentou a lâmina total inundada em 33,00% (de 40,49 mm para 53,88 mm) e a vazão máxima em 10,34% (de 42,085 m³/s para 46,433 m³/s). O aumento da permeabilidade resultou em uma redução de 4,6% na lâmina total inundada em comparação com o cenário atual.

Esses resultados demonstram a importância da gestão da impermeabilidade das superfícies urbanas para mitigar os riscos de inundação. Em todos os cenários, o aumento das áreas impermeáveis resultou em um aumento considerável da lâmina total inundada e da vazão máxima, enquanto o aumento da permeabilidade proporcionou reduções significativas, especialmente em eventos de maior magnitude. Isso enfatiza a necessidade de estratégias de

planejamento urbano que integrem soluções baseadas na natureza para aumentar a resiliência das bacias hidrográficas em áreas urbanizadas, principalmente nas extrapolações de cenários futuros de mudanças climáticas.

6. CONCLUSÕES

O ensaio de infiltração demonstrou ser um método eficiente para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos dos solos, representando uma importante ferramenta para o entendimento da permeabilidade da região. A metodologia *Beerkan* apresentou valores razoáveis de propriedades hidráulicas para os usos de Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbanizada. Os resultados dos parâmetros obtidos para a Área Urbanizada demonstraram que a urbanização intensiva tem um efeito significativo na capacidade de infiltração do solo e, consequentemente, no aumento do escoamento superficial na área de estudo.

Com relação ao uso de modelagem hidrológica, a falta de dados precisos de cotas, propriedades geométricas dos condutos e outros parâmetros adotados foi um fator limitante durante o estudo, porém os resultados foram condizentes com o esperado na medida em que, ao serem comparados com registros fotográficos e jornalísticos, apresentam uma coerência. Vale ressaltar que os resultados das simulações ajudam a entender as dimensões das inundações, mas não devem ser considerados uma representação exata dos eventos.

Apesar disso, o modelo SWMM foi essencial para observar os impactos de diferentes cenários de uso do solo. A simulação dos cenários de impermeabilização e permeabilização permitiu avaliar as potenciais melhorias no manejo das águas pluviais e a mitigação dos riscos de inundação, indicando que intervenções não estruturais voltadas para permeabilização, como a restauração de florestas urbanas e práticas de agricultura urbana sustentáveis, apresentam um desempenho satisfatório.

Em áreas não pavimentadas, a implementação das intervenções foi mais relevante na redução das vazões máximas, volumes inundados e horas de inundação, fatores de suma importância para o cotidiano da população local. Já o aumento da expansão urbana potencializou ainda mais os eventos de inundação, principalmente no que diz respeito aos volumes inundados.

Apesar da limitação relacionada à ausência de dados para calibração do modelo para o sistema proposto, os resultados do estudo são promissores. As medidas de controle adotadas, como a expansão de áreas verdes, são eficazes na atenuação das inundações e consequentemente dos riscos associados em áreas urbanas. A intensa urbanização já estabelecida na bacia do Fragoso configura um maior desafio na mitigação desses eventos. Nesse sentido, sugere-se a aplicação de técnicas complementares para o maior controle das

inundações urbanas, sobretudo aquelas que conservam e aproveitam as características de vegetação ambientes.

Além disso, espera-se que esse estudo forneça subsídio para a revitalização e a conservação da bacia hidrográfica do rio Fragoso, que há anos vivencia degradações intensas, minimizando os cenários de inundações e buscando a proteção do meio ambiente e da comunidade local.

REFERÊNCIAS

- ABDELMONEIM, A. A. et al. Internet of Things (IoT) for double ring infiltrometer automation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, set. 2021, p. 106324. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169921003410>>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- ABIKO, A; MORAES, O. B. **Desenvolvimento urbano sustentável**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. 29 p.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Bacias hidrográficas**. Disponível em: <<https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas>>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- AIELLO, R. *et al.* An assessment of the Beerkan method for determining the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Geoderma**, v. 235-236, dez. 2014, p. 300-307, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001670611400295X>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- ALVES, E. M. **Fluxos de energia, vapor d'água e CO2 entre a vegetação e a atmosfera no agreste meridional de Pernambuco**. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- AMARAL, D. P. B. Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- ANDOH, R. Y. G.; DECLERCK, C. A cost effective approach to stormwater management? Source control and distributed storage. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 8-9, 1997. p. 307-311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122397005817>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
- BEZERRA, P. H. L. **Dinâmica da água em trincheira de infiltração em lote urbano**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- BRASIL. Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 dez. 2003.
- BROOKS, R. H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers**, Fort Collins, Colorado State University, v. 24, n. 3, mar. 1964, p. 37. Disponível em:

<https://www.engr.colostate.edu/ce/facultystaff/yevjevich/papers/Yevjevich_n3_1964.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **America Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, n. 3, mar. 1953, p.71-77. Disponível em: <<https://onepetro.org/JPT/article/5/03/71/162358/Relative-Permeability-Calculations-From-Pore-Size>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

CADORIN, D. A. **A arborização viária no município de Pato Branco – PR e suas relações com solos urbanos e percepção dos moradores**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 302 p.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: As simplificações do método do perfil instantâneo**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CASTRO, M. H. de. **Estudo do processo de infiltração em superfícies permeáveis a partir de um simulador de chuva por aspersão**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

CAVALCANTI, A. A. **Utilização do software SWMM na modelagem hidrológica da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta–Poços de Caldas/MG**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em em Ciência e Engenharia Ambiental) - Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2020.

CAVALCANTI, G. I. F. **Caracterização hidrodinâmica de solos de unidades geoambientais de Pernambuco a partir da metodologia Beerkan**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima**: Olinda. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/olinda-5041/>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

COLLISCHONN, W. DORNELLES, F. 2013. Hidrologia para engenharias e ciências ambientais – 2ª edição. ABRH.

COSTA, A. M. M. da. et al. Análise inicial do uso e ocupação em trecho do riacho Ouro Preto – Olinda/PE - e sua influência para a potencialização de eventos de inundações. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, n. especial, 2016, p. 143–151. Disponível em: <<https://periodicos.ufrr.br/revistadoregna/article/view/10433>>. Acesso em: 11 set. 2023.

DECINA, T.G.T., BRANDÃO, J.L.B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, set. 2015, p. 207–217. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/esa/a/zJ5MvDthtHkxY7hvFvHCGSc/?lang=pt&format=html>>. Acesso em: 14 abr. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Síntese da geologia de Pernambuco**. Disponível em: <https://www.dnpm-pe.gov.br/Sint_PE/SintesePE_03.htm#Forma%C3%A7%C3%A3o_Gramame>. Acesso em: 14 abr. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FAGUNDES, B. Rios urbanos e a política de canalização. **Sociedade & Natureza**, v. 32, jan. 2022, p. 396-406. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sn/a/SJBMHgLMpHwJw4YzH4mGq5m/?lang=pt>>. Acesso em: 12 mar. 2024.

FERREIRA, A. B. R. *et al.* As modificações antrópicas na paisagem fluvial da cidade São João Del-Rei -Minas Gerais, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 35, fev. 2023, p. e66435. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sn/a/bKBdR3WMwF9gvBqrBGkdKny/?lang=pt>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

FERREIRA, R. V. **Geomorfologia da região de Japaratinga - AL**. Dissertação (Programa de pós-graduação em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1999.

FRANÇA NETO, J. M. **Variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas de um solo com vegetação de caatinga**. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

FONSECA NETO, G. C. *et al.* Modelagem bidimensional para a verificação hidráulica da canalização de um trecho do Rio Fragoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 6, nov. 2020, p. 2963-2977. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Silva-Junior/publication/347438377_Modelagem_Bidimensional_para_a_Verificacao_Hidraulica_da_Canalizacao_de_um_Trecho_do_Rio_Fragoso_em_Olinda_Pernambuco_Brasil/links/5fdb871e92851c13fe93157a/Modelagem-Bidimensional-para-a-Verificacao-Hidraulica-da-Canalizacao-de-um-Trecho-do-Rio-Fragoso-em-Olinda-Pernambuco-Brasil.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2023.

FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa – 1: 100.000**. 2007. 213f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, FFLCH, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HAVERKAMP, R. *et al.* Threedimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v. 30, n. 11, nov. 1994, p. 2931-2935. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/94wr01788>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

HAVERKAMP, R. *et al.* **Hydrological and thermal behaviour of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): experimental study, analysis and modeling**. Final

integrad report EFED II Spain, Project EU no EV% C - CT 92 00 90. Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, BP 53, 38041. Grenoble, France, 1996.

HAVERKAMP, R. et al. **Grenoble Soil Catalogue: Soil survey of field data and description of particle size, soil water retention and hydraulic conductivity functions.** Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE). Grenoble, France, 1998.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, jun. 1933, p. 446-460. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/tr014i001p00446>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

HUANG, Z. *et al.* Alfalfa planting significantly improved alpine soil water infiltrability in the Qinghai-Tibetan Plateau. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 285, dez. 2019, p. 106606. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880919302221>>. Acesso em 28 jun. 2023.

HUNG, C. J.; JAMES, L. A.; CARBONE, G. J. Impacts of urbanization on stormflow magnitudes in small catchments in the Sandhills of South Carolina, USA. **Anthropocene**, v. 23, set. 2018, p. 17-28. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213305418300377>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 04 set. 2023.

_____. **Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA):** Mapeamento de Recursos Naturais (MRN). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/23382-banco-de-informacoes-ambientais.html?=&t=notas-tecnicas>>. Acesso em 20 abr. 2024.

_____. **Manual Técnico de Geomorfologia.** 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66620.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

_____. **Manual Técnico de Pedologia.** 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=295017>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

_____. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira.** 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 272 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=263011>>. Acesso em: 18 abr. 2024.
INSTITUTO HIDROGRÁFICO. Tabela de Marés – Generalidades. Lisboa: Portugal, 2018. cap. 1, p.199.

IPCC (2021). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y.

Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press.

JABUR, A. S. *et al.* Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **Revista Brasileira De Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 20, n. 4, out./dez. 2015, p. 937-945. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/226176>>. Acesso em 18 abr. 2024.

LADEIRA, F. S. B. A ação antrópica sobre os solos nos diferentes biomas brasileiros – terras indígenas e solos urbanos. **Entre-Lugar**, Dourados, MS, v. 3, n. 6, dez. 2012, p. 127-139. Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/entre-lugar/article/view/2450>>. Acesso em 15 abr. 2024.

LASSABATERE, L. *et al.* Beerkan estimation of soil transfer parameters through Infiltration Experiments-BEST. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, mar. 2006, p. 521–532. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2005.0026>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

LIMA, L. J. D. S. **Transporte de água e de soluto em um latossolo do brejo paraibano**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MAKROPOULOS, C.; BUTLER, D.; MAKSIMOVIC, C. GIS suported evaluation of source control applicability in urban areas. **Water Science e Technology**, vol. 39, n. 9, 1999. p. 243-252. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122399002383>>. Acesso em 04 mar. 2023.

MALLMANN, M. S. *et al.* **Infiltração de água no solo condicionadas pelo uso de plantas de cobertura**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2017.

MANCUSO, M. A. *et al.* Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 1, fev. 2014, p. 2890-2998. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/287358127.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2023.

MAPBIOMAS. **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: <<http://brasil.mapbiomas.org>>. Acesso em: 17 fev. 2024.

MAPBIOMAS. **Em 2023, a perda de áreas naturais no Brasil atinge a marca de 33% do território**. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/2024/08/21/em-2023-a-perda-de-areas-naturais-no-brasil-atinge-a-marca-historica-de-33-do-territorio/>>. Acesso em: 17 out. 2024.

MELO, M. J. V. **A bacia do rio Frágoso em Olinda-PE: drenagem e gestão ambiental**. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

_____. **Medidas estruturais e não-estruturais de controle de escoamento superficial aplicáveis na Bacia do Rio Fragoso na cidade de Olinda.** Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Do SNIS ao SINISA:** Informações para planejar o saneamento básico. Brasília: Ministério de Desenvolvimento Regional, 2021. 49 p.

MORET-FERNÁNDEZ, D. et al. A modified hood infiltrometer to estimate the soil hydraulic properties from the transient water flow measurements. **Journal of Hydrology**, v. 530, nov. 2015, p. 554-560. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169415007738>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, n. 3, jun. 1976, p.513-522. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR012i003p00513>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

PARKINSON, J. *et al.* Drenagem Urbana Sustentável no Brasil. **Relatório do Workshop em Goiânia-GO**, Goiânia, 2003.

PATRIOTA, M. D. R. A. **Métodos alternativos para modelagem hidrodinâmica de solos: aplicação para um solo franco arenoso vegetado com caatinga no semiárido pernambucano.** Dissertação (Programa de pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, v. 84, n. 3, set. 1957, p. 257-265. Disponível em: <https://journals.lww.com/soilsci/citation/1957/09000/THE_THEORY_OF_INFILTRATION__4__SORPTIVITY_AND.10.aspx>. Acesso em: 28 jun. 2023.

RADAMBRASIL. **Folhas SF. 23/24 Rio de Janeiro/Vitória:** Levantamento de Recursos Naturais. v. 32. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983. 775 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/pt/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=217129>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera:** conceitos, processos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Ed: Manole, 2004. 478 p.

REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. Manejo de águas urbanas e sua relação com o desenvolvimento urbano em bases sustentáveis integradas - estudo de caso dos rios Pilar-Calombé. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, abr./jun. 2013. p. 149-163. Disponível em: <<https://biblat.unam.mx/hevila/RBRHRevistabrasileiraderecursoshidricos/2013/vol18/no2/12.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2024.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1, 1931, p. 328-333.

RIGHETTO, A. M. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 398 p.

RODRIGUES, A. B. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de inundações na bacia do Fragoso – Olinda/PE. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

ROESNER, L. A.; BLEDSOE, B. P.; BRASHEAR, R. W. Are best-management-practice criteria really environmentally friendly? **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 3, mai./jun. 2001, p. 150-154. Disponível em: <https://bledsoe.engr.uga.edu/wp-content/uploads/2017/11/Roesner_etal_2001_take_down.pdf>. Acesso em: 14 out. 2023.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5. U.S.EPA. Cincinnati: OH, 2010, p.295.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M.J.; ALMEIDA, E. P. C. **Solos Tropicais**: Argissolos Vermelho-Amarelos. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos/argissolos-vermelho-amarelos>>. Acesso em: 19 abr. 2024.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande-PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 05, set./out. 2017, p. 943-952. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/yMBFbMh7WdYMfw9H9KH9bhn/?lang=pt>>. Acesso em: 21. set. 2023.

SILVA, G. B. L. **Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, M. M. N. *et al.* Segregação socioespacial: os impactos das desigualdades sociais frente a formação e ocupação do espaço urbano. **Revista Monografias Ambientais e Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, Santa Maria, RS, v. 15, n. 1, jan-abr. 2016, p. 256-263. Acesso em: 14 abr. 2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Tipologias Florestais**. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/en/knowning-forests/168-tipologias-florestais>>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SMETTEM, K. R. J. Soil-water residence time and solute uptake: 3. Mass transfer under simulated winter rainfall conditions in undisturbed soil cores. **Journal of hydrology**, v. 67, n. 1-4, jan. 1984, p. 235-248. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022169484902439>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SOARES, W. A. **Caracterização hidrodinâmica de solos em campo e em laboratório: análise numérica e fractal**. Dissertação (Programa de pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SOUZA, E. S. **Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do Estado da Paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente**. Tese (Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SOUZA, Z. M. **Propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro de Selvíria (MS) sob diferentes usos e manejos**. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017. 573 p.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p.

TORRES, F. S. M.; PFALTZGRAFF, P. A. S. **Geodiversidade do Estado de Pernambuco**. Recife: CPRM, 2014. 282 p.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, jan. 2008, p. 97–112. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10295>>. Acesso em: 5 ago. 2023.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, vol. 2, n. 1, jun. 1997, p. 135-152. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/233443>>. Acesso em: 21 ago. 2023.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, v. 7, n. 1. jan./mar. 2002, p. 5-27. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/231957>>. Acesso em: 10 set. 2023.

_____. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Rega/Global Water Partnership South América**, v. 1, n. 1, jan./jun. 2004, p. 59-73. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/63/2ad4eedd7a7c343e9e3761021390984_7960253b5475402462f2cae2b731c23f.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

_____. **Hidrologia: Ciências e aplicações**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

TURNER, N. C.; PARLANGE, J.-Y. Lateral movement at the periphery of a onedimensional flow of water. **Soil Science**, v. 118, n. 2, ago. 1974, p. 70-77. Disponível em: <https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1974/08000/Lateral_Movement_At_the_Periphery_of_A.2.aspx>. Acesso em: 28 jun. 2023.

URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT. Drainage Criteria Manual. v. 3. Stormwater Quality Management, Denver, EUA, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, n. 5, set/out. 1980, p.892- 898. Disponível em:
<<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

VASCONCELOS, G. L. M. B. **Caracterização hidrogeofísica de sedimentos típicos do leito seco do rio Capibaribe: Experimentação e modelagem**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

VLČEK, L. et al. Water retention and infiltration affected by conventional and conservational tillage on a maize plot; rainfall simulator and infiltrometer comparison study. **Agricultural Water Management**, v. 271, set. 2022, p. 107800. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837742200347X>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

WANG, W. et al. Is returning farmland to forest an effective measure to reduce phosphorus delivery across distinct spatial scales? **Journal of environmental management**, v. 252, dez. 2019, p. 109663. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479719313817>>. Acesso em 28 jun. 2023.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)**; WMO: Geneva, Switzerland, 2021.

XIA, C. *et al.* Quantitative hydrological response to climate change and human activities in North and South Sources in upper stream of Qiantang River Basin, East China. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 44, dez. 2022, p. 101222. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221458182200235X>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

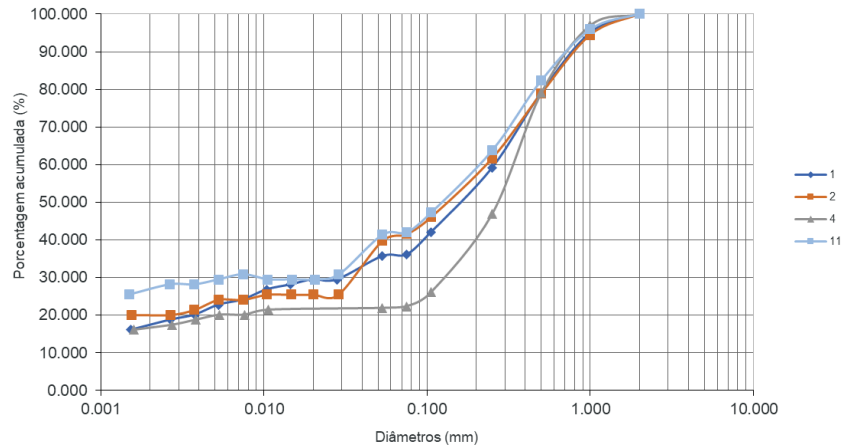
ZANELLA *et al.* Large net CO₂ loss from a grass-dominated tropical savanna in south-central Brazil in response to seasonal and interannual drought. *J Geophys Res-Bioge.* 2016;121:2110-24. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JG003404>

ZHAO, M. et al. Soil matrix infiltration characteristics in differently aged eucalyptus plantations in a southern subtropical area in China. **CATENA**, v. 217, out. 2022, p. 106490. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837742200347X>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

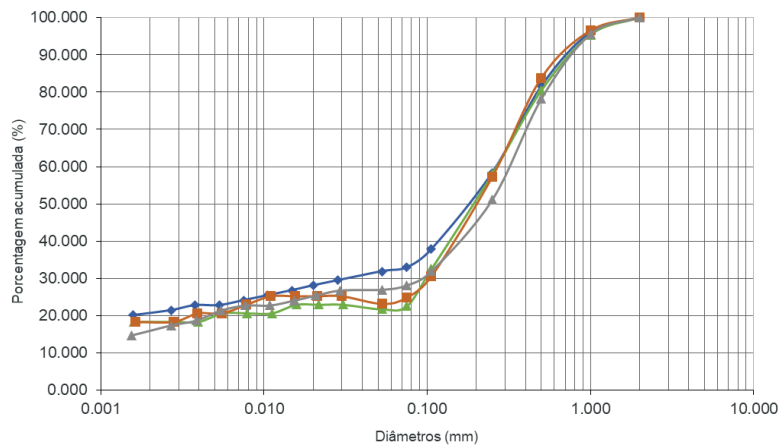
APÊNDICE A - CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Figura A.1 - Curvas granulométricas dos solos estudados.

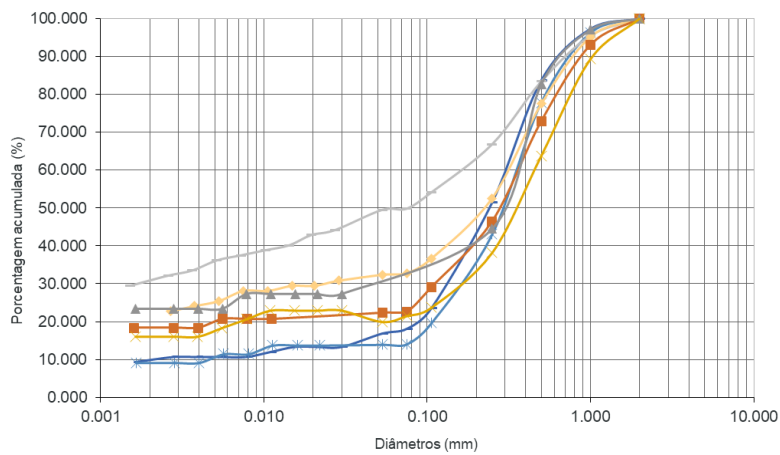
a) Formação Florestal



b) Mosaico de Usos



c) Área Urbanizada - NP



APÊNDICE B - PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS

Tabela B.1 - Parâmetros de forma para as classes de uso e ocupação do solo.

Classe	Ponto	n	m	η
Formação Florestal	1	2.26	0.12	10.62
	2	2.27	0.12	10.55
	4	2.34	0.14	8.95
	11	2.22	0.10	12.21
Mosaico de Usos	3	2.26	0.12	10.70
	12	2.35	0.15	8.80
	16	2.40	0.17	7.95
	17	2.30	0.13	9.75
Área Urbanizada - NP	5	2.63	0.24	6.17
	8	2.61	0.23	6.27
	9	2.16	0.07	15.51
	10	2.25	0.11	11.01
	13	2.34	0.15	8.85
	14	2.63	0.24	6.17
	15	2.41	0.17	7.85

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela B.2 - Parâmetros de normalização e a sorvidade para as classes de uso e ocupação do solo.

Classe	Ponto	K_s (mm s ⁻¹)	h_g (mm)	Θ_s (mm ⁻³ mm ⁻³)	S
Formação Florestal	1	0.06	-210.43	0.28	1.792
	2	0.122	-8.145	0.44	1.116
	4	2.783	NA	0.4	NA
	11	0.118	-61.37	0.5	3.361
Mosaico de Usos	3	0.102	-65.732	0.34	1.024
	12	0.01	-66.723	0.33	0.606
	16	0.105	NA	0.39	NA
	17	0.04	-9.037	0.38	0.679

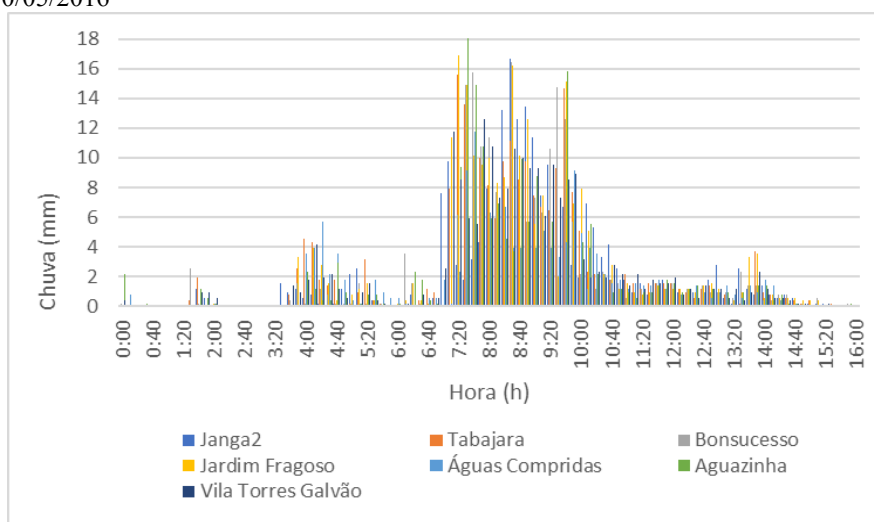
Área Urbanizada - NP	5	0.005	-14.186	0.27	0.225
	8	0.018	-20.214	0.32	0.532
	9	0.006	-14.975	0.34	0.317
	10	0.093	-2.131	0.47	0.555
	13	0.027	-12.64	0.3	0.575
	14	0.011	-15.361	0.35	0.405
	15	0.037	-17.355	0.37	0.854

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

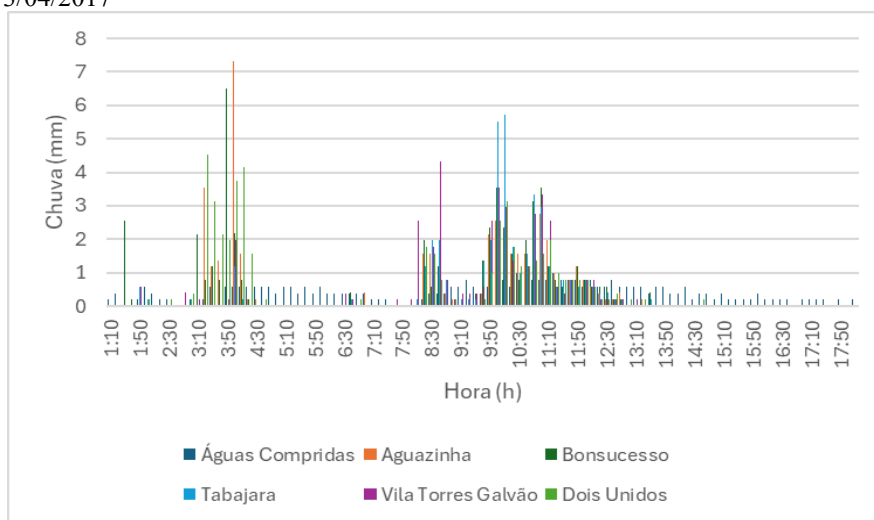
APÊNDICE C - HIETOGRAMAS

Figura C.1 - Variabilidade temporal da chuva nas estações pluviométricas da bacia.

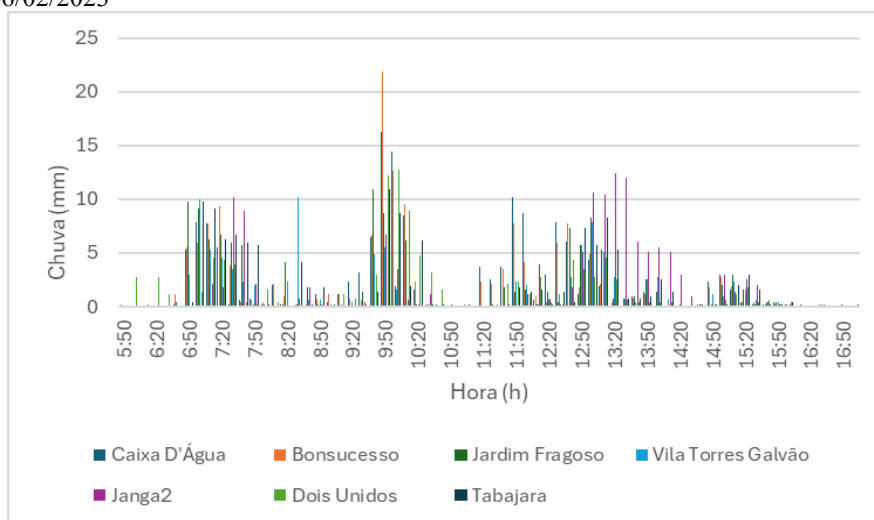
a) Evento 1 - 30/05/2016



b) Evento 2 - 13/04/2017



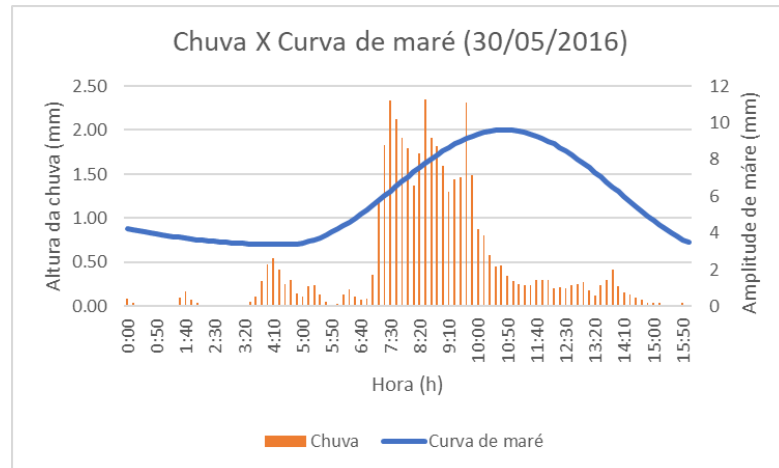
c) Evento 3 - 06/02/2023



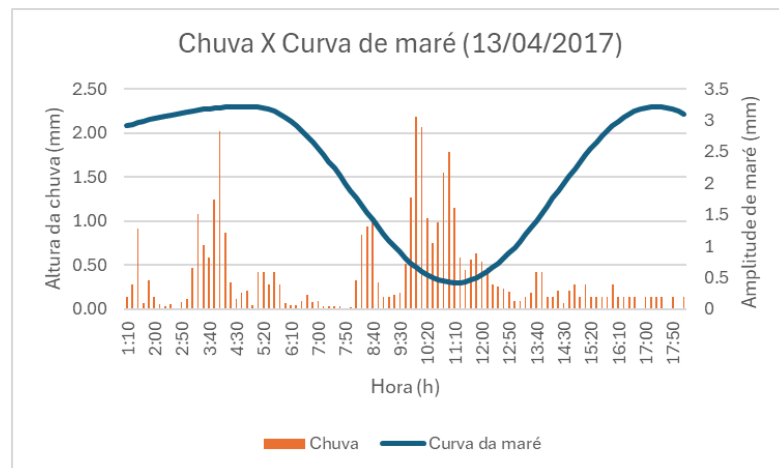
APÊNDICE D - CHUVA X CURVA DE MARÉ

Figura D.1 - Comportamento da chuva X curva de maré nos eventos analisados.

a) Evento 1 - 30/05/2016



b) Evento 2 - 13/04/2017



c) Evento 3 - 06/02/2023

