

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

**AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE PRÉ-DESENVOLVIMENTO E
EFEITOS PROVOCADOS NO ESCOAMENTO PELA
APLICAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE
INFILTRAÇÃO, PEDOLOGIAS E DE USO E OCUPAÇÃO DO
SOLO NO DISTRITO FEDERAL**

SARA JANICE DUARTE DE CARVALHO

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE

COORIENTADORA: LETÍCIA KARINE SANCHES BRITO

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

BRASÍLIA/DF: MAIO/2021

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE PRÉ-DESENVOLVIMENTO E
EFEITOS PROVOCADOS NO ESCOAMENTO PELA
APLICAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE
INFILTRAÇÃO, PEDOLOGIAS E DE USO E OCUPAÇÃO DO
SOLO NO DISTRITO FEDERAL**

SARA JANICE DUARTE DE CARVALHO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

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

**CONCEIÇÃO ALVES, PhD (ENC/UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)**

**MARCOS HELANO MONTENEGRO, MSc. (ADASA - DF/ SDU)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, MAIO DE 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

CARVALHO, SARA JANICE DUARTE.

AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE PRÉ-DESENVOLVIMENTO E EFEITOS PROVOCADOS NO ESCOAMENTO PELA APLICAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE INFILTRAÇÃO, PEDOLOGIAS E DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO DISTRITO FEDERAL

85 p., 210 x 297mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem Urbana

2. Vazão de Pré-Desenvolvimento

3. PCSWMM

4. escoamento superficial

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Carvalho, S.J.D. (2021). Avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF e efeitos provocados no escoamento pela aplicação de diferentes modelos de infiltração, pedologias e de uso e ocupação do solo no Distrito Federal. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Sara Janice Duarte de Carvalho

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF e efeitos provocados no escoamento pela aplicação de diferentes modelos de infiltração, pedologias e de uso e ocupação do solo no Distrito Federal.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Sara Janice Duarte de Carvalho
sarajanicee@gmail.com

RESUMO

No planejamento do sistema de drenagem urbana de um local, para avaliar o impacto do lançamento das águas coletadas pelo sistema, o projeto deve considerar o cenário de pré-desenvolvimento e compará-lo com o cenário posterior à execução da obra proposta. A vazão de pré-desenvolvimento foi estimada pela CONCREMAT (2009) no Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF (PDDU), com base no método racional, assumindo um valor para o coeficiente de escoamento superficial $C=0,15$, o que levou a um valor de 24,4 L/s/ha. Esse valor foi adotado na Resolução nº 09/2011 da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF (ADASA). No entanto, da forma como foi estimada, essa vazão não levou em consideração os diferentes tipos de solo existentes no DF. De fato, não há como definir, inclusive, para que tipo de solo e vegetação esse valor de C deve ser adotado. Dessa forma, este trabalho teve como foco a avaliação da vazão de pré-desenvolvimento adotada no Distrito Federal (DF) por meio de levantamento de valores na literatura e uma comparação com as vazões obtidas mediante a aplicação dos métodos de infiltração Curva Número (CN) e Horton, considerando-se os diferentes tipos de solos, coberturas vegetativas e condições de umidade. Verificou-se que é importante considerar os diferentes tipos de solo na definição da vazão de pré-desenvolvimento para que seu valor seja melhor estimado.

Além disso, visando a analisar a influência da posição dos loteamentos em relação ao gradiente topográfico, o trabalho se propôs a avaliar a influência da declividade e posição do arruamento na geração de picos de escoamento por meio de simulações utilizando o programa SWMM. As simulações foram realizadas considerando os loteamentos assentados sobre curvas de nível paralelas entre si com angulações à 45° e 90° em relação ao sentido do arruamento principal. Por essas análises foi possível observar, de modo geral, o aumento dos volumes e picos de escoamento superficial com o aumento da declividade. Para avaliar o efeito da ocupação urbana no caminhamento das águas para as redes de drenagem foi realizada uma simulação 2D com o Modelo SWMM. Como esperado, constatou-se que para declividades menores o acúmulo de água foi maior e a posição do loteamento em relação às curvas de nível influenciou no tempo de início de alagamento e na sua duração, sendo para os arruamentos à 45° esse tempo foi menor e a duração do alagamento foi maior.

Palavras-Chave: PCSWMM, Drenagem Urbana, Universidade de Brasília, Vazão de Pré-Desenvolvimento.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1 Hidrologia Urbana	4
3.1.1 Ciclo Hidrológico	4
3.1.2 Etapas do ciclo hidrológico e tipos de escoamento	5
3.1.3 Precipitação efetiva e transformação chuva-vazão	9
3.2 Impactos da Urbanização na Drenagem Urbana	13
3.3 Drenagem Urbana	15
3.4 Gestão e Planejamento Urbano	23
3.4.1 Instrumentos de Gestão, Planejamento Urbano e Manejo de Águas Pluviais no Distrito Federal	25
3.4.2 Vazão de pré-desenvolvimento do DF	27
3.5 Modelagem Hidrológica	29
3.5.1 O modelo SWMM	29
4 METODOLOGIA	31
4.1 Área de Estudo	32
4.1.1 Tipos de solos e vegetação	32
4.1.2 Geomorfologia	35
4.2 Modelagem com o PCSWMM	36
4.2.1 Chuva de projeto	36
4.2.2 Parâmetros de projeto	38
4.3 Avaliação da vazão de Pré-Desenvolvimento do DF	38
4.4 Influência da declividade no escoamento	40
4.5 Influência da ocupação e declividade na propagação de cheia	46
5 RESULTADOS	48
5.1 Avaliação da vazão de Pré-Desenvolvimento do DF	48
5.1.1 Curva Número	48
5.1.2 Horton	54
5.2 Influência da declividade no escoamento	55
5.3 Influência da ocupação e declividade na propagação de cheia	61
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Hidrológico da água. (Fonte: ENADE, 2008)	5
Figura 2. Tipos de escoamento. (Fonte: Souza Filho, 2017)	6
Figura 3. Taxa e capacidade de infiltração. (Fonte: Carvalho e Silva, 2017)	7
Figura 4. Formato dos Padrões Topográficos. Côncavos (1, 2 e 3), Planos (4, 5 e 6), Convexos (7, 8 e 9), Convergentes (1, 4 e 7), Divergentes (3, 6 e 9) e Retangulares (2, 5 e 8). (Fonte: Agnese et al., 2007)	9
Figura 5. Hidrograma Unitário do SCS. (Fonte: Paz, 2004)	13
Figura 6. Impactos da urbanização no escoamento. (Fonte: Tucci, 1997)	14
Figura 7. Exemplos de medidas estruturais e não estruturais. (Fonte: Medina, 2015)	16
Figura 8. Sistema de Drenagem. (Fonte: Meller, 2004)	17
Figura 9. Visualização geral de um sistema clássico de drenagem. (Fonte: Baptista, 2005)	18
Figura 10. Evolução da gestão de drenagem urbana ao longo do tempo. (Fonte: Fletcher et al., 2015)	20
Figura 11. Dispositivos de abatimento de vazão e suas características. (Fonte: Adasa, 2018)	23
Figura 12. Parâmetros para se alcançar a sustentabilidade urbana. (Fonte: Barbosa, 2008)	24
Figura 13. Arranjo Institucional da Gestão de Serviços de Águas Pluviais no DF. (Fonte: Adasa, 2018)	27
Figura 14. Fluxograma metodológico do trabalho.	31
Figura 15. Localização do DF.	32
Figura 16. Mapa pedológico do DF. (Fonte: Embrapa, 2004)	33
Figura 17. Mapa Hidrográfico do DF. (Fonte: Adasa, 2018).	34
Figura 18. Relevo sombreado do DF. (Fonte: ZEE, 2016)	35
Figura 19. Hietograma de projeto para uma chuva com tempo de retorno igual a 10 anos	37
Figura 20. Modelo utilizado para simulações com Curva Número e Horton.	39
Figura 21. Modelo de elevação do terreno com declividade de 5% e curvas de nível à 45° em relação ao sentido dos arruamentos.	41
Figura 22. Modelo de elevação do terreno com declividade de 5% e curvas de nível à 90° em relação ao sentido dos arruamentos.	42
Figura 23. Árvore de casos para análise da influência da declividade.	42
Figura 24. Loteamento RH5 utilizado como base para as modelagens. (Fonte: Brito, 2020)	43
Figura 25. Loteamento RH5 de 20 ha com curvas de nível à 45°.	43
Figura 26. Loteamento RH5 de 20 ha com curvas de nível à 90°.	44

Figura 27. Loteamento RH5 de 60 ha com curvas de nível à 45°.	44
Figura 28. Loteamento RH5 de 60 ha com curvas de nível à 90°.	45
Figura 29. Loteamento RH5 de 100 ha com curvas de nível à 45°.	45
Figura 30. Loteamento RH5 de 100 ha com curvas de nível à 90°.	46
Figura 31. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN II dos solos com pouca cobertura.	51
Figura 32. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores CN II dos solos com média cobertura.	51
Figura 33. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores CN II dos solos com alta cobertura.	51
Figura 34. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN III dos solos com baixa cobertura.	52
Figura 35. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN III dos solos com média cobertura.	53
Figura 36. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN III dos solos com alta cobertura.	53
Figura 37. Hidrogramas das vazões geradas pelo modelo de Horton.	55
Figura 38. Exemplo de dimensionamento de rede de drenagem para loteamento de 20 ha.	56
Figura 39. Exemplo de dimensionamento de rede de drenagem para loteamento de 60 ha.	57
Figura 40. Exemplo de dimensionamento de rede de drenagem para loteamento de 100 ha.	57
Figura 41. Propagação de cheia para curvas de nível à 45° e declividade de 5%.	62
Figura 42. Propagação de cheia para curvas de nível à 45° e declividade de 20%.	62
Figura 43. Propagação de cheia para curvas de nível à 90° e declividade de 5%.	63
Figura 44. Propagação de cheia para curvas de nível à 90° e declividade de 20%.	63
Figura 45. Hidrogramas das declividades de 5% e 20 %, para as curvas de nível à 45°.	64
Figura 46. Hidrogramas das declividades de 5% e 20 %, para as curvas de nível à 90°.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos grupos hidrológicos dos solos Fonte: Tucci, 1995 (Modificado).	10
Tabela 2. Tipos de solo, e enquadramento de acordo com os grupos hidrológicos de solo propostos pelo SCS Fonte: Sartori et al., 2005.	10
Tabela 3. Condições de umidade para cálculo do CN.	11
Tabela 4. Exemplos de valores de CN para diferentes tipos de solo e sua ocupação.	11
Tabela 5. Comparação entre as práticas LID e as práticas convencionais de drenagem.	21
Tabela 6. Parâmetros para escolha das técnicas compensatórias.	22
Tabela 7. Estratégias a serem seguidas na gestão de drenagem e manejo de águas pluviais.	27
Tabela 8. Tipos de solo do DF.	33
Tabela 9. Visualização dos valores de CN tabelados e análise do mais próximo ao valor de CN = 68 obtido na planilha.	49
Tabela 10. Valores obtidos pelas correlações para CN= 68.	49
Tabela 11. Valores de vazões obtidos pelo modelo CN no SWMM.	50
Tabela 12. Valores de vazões obtidos pelo modelo SCS - CN na planilha.	50
Tabela 13. Valores de vazões obtidos pelo modelo CN do SWMM.	52
Tabela 14. Valores de vazões obtidos pelo modelo SCS - CN na planilha.	52
Tabela 15. Parâmetros de Horton.	54
Tabela 16. CN para as diversas coberturas e tipos de solo.	56
Tabela 17. Valores de vazões para o loteamento de 20 ha com curvas de nível à 90°.	58
Tabela 18. Valores de vazões para o loteamento de 20 ha com curvas de nível à 45°.	58
Tabela 19. Valores de vazões para o loteamento de 60 ha com curvas de nível à 90°.	59
Tabela 20. Valores de vazões para o loteamento de 60 ha com curvas de nível à 45°.	59
Tabela 21. Valores de vazões para o loteamento de 100 ha com curvas de nível à 90°.	59
Tabela 22. Valores de vazões para o loteamento de 100 ha com curvas de nível à 45°.	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	7
Equação 2	8
Equação 3	8
Equação 4	10
Equação 5	10
Equação 6	11
Equação 7	12
Equação 8	12
Equação 9	12
Equação 10	13
Equação 11	13
Equação 12	13
Equação 13	36

LISTA DE ABREVIATURAS

Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

ANA- Agência Nacional de Águas

C – Coeficiente de Deflúvio

CODHAB – Companhia de Desenvolvimento Habitacional do Distrito Federal

CORSAP – Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos e das Águas Pluviais da Região Integrada do Distrito Federal e Goiás

cm- Centímetro

CN – *Curve Number*

d – Duração da precipitação

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DF – Distrito Federal

EPA – *Environment Protection Agency*

f – Taxa de infiltração

GDF – Governo do Distrito Federal

h – Hora

ha – Hectare

Ia – Abstração inicial

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasília Ambiental

IDF – Intensidade- Duração- Frequência

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

km - Quilômetro

LID – *Low Impact Development*

LUOS – Lei de Uso e Ocupação do Solo

m – Metro

mm – Milímetro

NOVACAP – Companhia Urbanizadora da Nova Capital

PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana

PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial

Pef – Precipitação efetiva

PGIRH – Plano de Gerenciamento de Recursos Hídricos

QMPD – Vazão Específica Máxima de Pré-Desenvolvimento

Qp – Vazão de pico

RE 1 - Habitação residencial unifamiliar

RE 2 - Habitação residencial uni ou multifamiliar tipologia de casas

RE 3 - Habitação multifamiliar na tipologia de apartamentos

RO 1 - Uso residencial familiar sendo facultada a utilização simultânea para atividade econômica, não permitindo acesso independente

RO 2 - Localiza-se ao longo de vias de conexão entre conjuntos e quadras, onde é obrigatório o uso residencial, na categoria habitação unifamiliar

s – Segundo

S – Potencial de retenção do solo

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SINESP – Secretaria de Estado de Infraestrutura e Serviços Públicos

SWMM – *Storm Water Management Model*

Tb- Tempo de base

Tc – Tempo de concentração

TERRACAP – Companhia Imobiliária de Brasília

Tp – Tempo de pico

TR – Tempo de retorno

ZEE- Zoneamento Econômico Ecológico

1 INTRODUÇÃO

A população urbana vem aumentando significativamente e a concentração acontece especialmente nas metrópoles e suas periferias. Atualmente, mais de 80% da população brasileira reside em áreas urbanas (IBGE, 2015) e esse crescimento em grande parte tem sido caracterizado por não levar em consideração os planos diretores das cidades e nem as condições adequadas de loteamentos.

Ao mesmo tempo em que as cidades se urbanizam ocorre a diminuição das áreas para escoamento e infiltração das águas pluviais e, conseqüentemente, o aumento das vazões máximas devido à ocupação da bacia hidrográfica pela população e impermeabilização do solo (TUCCI, 2008). Como resultado podem ocorrer inundações e alagamentos, fazendo com que a população sofra impactos econômicos, sociais e ambientais.

Os problemas ocasionados pela expansão urbana podem ser evitados ou mitigados quando ocorre uma ordenação adequada do espaço e a adoção de alternativas sustentáveis no processo de planejamento, de forma que as cidades sejam analisadas como um sistema integrado e a problemática ambiental urbana seja o elemento capaz de unificar todas as ações urbanísticas (BARBOSA, 2008).

No que diz respeito às águas pluviais, o planejamento, construção e operação dos sistemas de drenagem devem ter como objetivo a redução das inundações e alagamentos e, ao mesmo tempo, o controle da poluição hídrica. Atualmente, tem sido destacado o conceito de medidas compensatórias de drenagem, que atuam juntamente com as estruturas convencionais e buscam neutralizar os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos. Essa abordagem visa a mitigar a ocorrência de cheias e melhorar a qualidade das águas drenadas, além de restaurar o regime de vazões e estimular o aproveitamento das águas pluviais (BAPTISTA et al., 2011).

No planejamento do sistema de drenagem urbana de um local, o projeto deve considerar o cenário de pré-desenvolvimento e compará-lo com o cenário posterior à execução da obra proposta. De acordo com o Manual de Drenagem Urbana de Curitiba - Paraná, o cenário de pré-desenvolvimento diz respeito à situação da bacia em condições naturais e sua vazão deve ser utilizada como base pelos projetistas, de forma a evitar que os impactos do projeto sejam transferidos para a jusante

No Distrito Federal, as outorgas são estabelecidas levando-se em consideração a vazão máxima gerada pelo empreendimento e área impermeabilizada. A vazão de

pré-desenvolvimento foi estimada pela CONCREMAT (2009) no Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF (PDDU), com base no método racional, assumindo um valor para o coeficiente de escoamento superficial $C=0,15$, o que leva uma vazão de 24,4 L/s/ha. Esse valor foi adotado na Resolução nº 09/2011 da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF (ADASA). No entanto, da forma como foi estimada, a vazão de pré-desenvolvimento não considerou os diferentes tipos de solo existentes no DF. De fato, não há como definir, inclusive, para que tipo de solo e vegetação esse valor de C deve ser adotado. Em alguns casos, para que se atinja a vazão de pré-desenvolvimento proposta devem ser elaborados cenários com a utilização de medidas compensatórias, levando-se em conta o espaço disponível para a alocação destas técnicas. No entanto, o que se percebe é que, em muitos casos, mesmo com uso de medidas de controle na fonte não consegue-se alcançar a vazão de pré-desenvolvimento pretendida de 24,4 L/s/ha. Além disso, em áreas com baixas permeabilidades naturais, como em áreas de cambissolos, essas vazões levam a valores excessivos, provavelmente muito superiores ao que, de fato, ocorre no terreno natural. O método racional apresenta algumas limitações, visto que não considera explicitamente o tipo de solo e sua capacidade de infiltração

A proposta deste trabalho foi avaliar a vazão de pré-desenvolvimento do DF por meio da aplicação dos modelos de infiltração Curva Número e Horton, de modo a analisar os efeitos que diferentes tipos de métodos, solos, ocupações, coberturas vegetativas e condições de umidade antecedente provocam no escoamento.

Além disso, visando a analisar o efeito da posição dos loteamentos em relação ao gradiente topográfico, o trabalho se propôs a avaliar a influência da declividade e posição do arruamento na geração de picos de escoamento por meio de simulações utilizando o programa SWMM. Por fim, foram examinados os impactos que os loteamentos provocam quando a rede de drenagem não funciona adequadamente e ocorre propagação de cheia, considerando diferentes características do terreno.

O trabalho está organizado em sete capítulos, sendo eles: (i) Introdução sobre o estudo; (ii) Objetivos gerais e específicos; (iii) Referencial Teórico utilizado como base para o trabalho; (iv) Metodologia aplicada para obtenção dos resultados e objetivos esperados; (v) Resultados Obtidos e análises; (vi) Conclusões sobre o estudo e recomendações para trabalhos futuros; (vii) Referências Bibliográficas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar a vazão de pré-desenvolvimento estabelecida para projetos de drenagem no DF, por meio de análise da infiltração em diferentes tipos de solos e a influência da posição relativa dos arruamentos de loteamentos em relação à topografia.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a pertinência da adoção de vazão pré-desenvolvimento única para todo o DF, como atualmente regulamentado.
- Comparar a vazão de pré-desenvolvimento com valores obtidos por meio da aplicação de diferentes modelos de cálculo de infiltração.
- Avaliar o efeito que diferentes declividades causam no escoamento, considerando as posições relativas dos arruamentos dos loteamentos em relação às curvas de nível e diferentes declividades.
- Avaliar o efeito que os loteamentos e diferentes declividades causam no alagamento quando a rede de drenagem não funciona adequadamente.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos, ideias e bibliografias utilizadas como base para o desenvolvimento do trabalho. O item 3.1 apresenta as definições gerais de hidrologia urbana, enquanto que o item 3.2 aborda os efeitos da urbanização sobre as bacias hidrográficas e manejo de águas pluviais. O item 3.3 expõe a evolução dos sistemas de manejo de águas pluviais e suas fases ao longo da história. Informações sobre gestão e planejamento urbano, bem como seus instrumentos e a vazão de pré-desenvolvimento regulamentada atualmente no DF podem ser observadas no item 3.4. Por fim, o item 3.5 versa sobre a modelagem hidrológica e seu objetivo, além de apresentar o modelo SWMM, seu funcionamento e suas aplicações.

3.1 Hidrologia Urbana

Neste item são abordados os conceitos básicos de hidrologia urbana, englobando o ciclo hidrológico, suas etapas, tipos de escoamento, precipitação efetiva e transformação chuva-vazão.

3.1.1 Ciclo Hidrológico

A ciência que trata da água na terra, sua ocorrência, circulação, distribuição, suas propriedades físicas e químicas e sua relação com o meio ambiente é chamada de Hidrologia. Essa ciência possui caráter interdisciplinar e tem evoluído ao longo dos últimos anos devido aos problemas que vêm sendo observados nas bacias hidrográficas, tais como ocupação em áreas de várzeas, e gestão de recursos hídricos ineficiente (TUCCI, 1993).

Alguns exemplos de aplicação de hidrologia podem ser observados na escolha de fontes de abastecimento de água para uso doméstico ou industrial, projetos hidráulicos, drenagem, irrigação, aproveitamento hidrelétrico, controle de poluição, regularização de cursos d'água, controle de erosão, dentre outros. Nesse contexto, para os estudos hidrológicos é de suma importância que se entenda o que é e como funciona o ciclo hidrológico.

No ciclo hidrológico acontecem os processos de de evaporação, condensação, precipitação, retenção e escoamento superficial, interceptação vegetal, infiltração, evapotranspiração, percolação da água no solo e nos aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes, conforme observado na Figura 1.

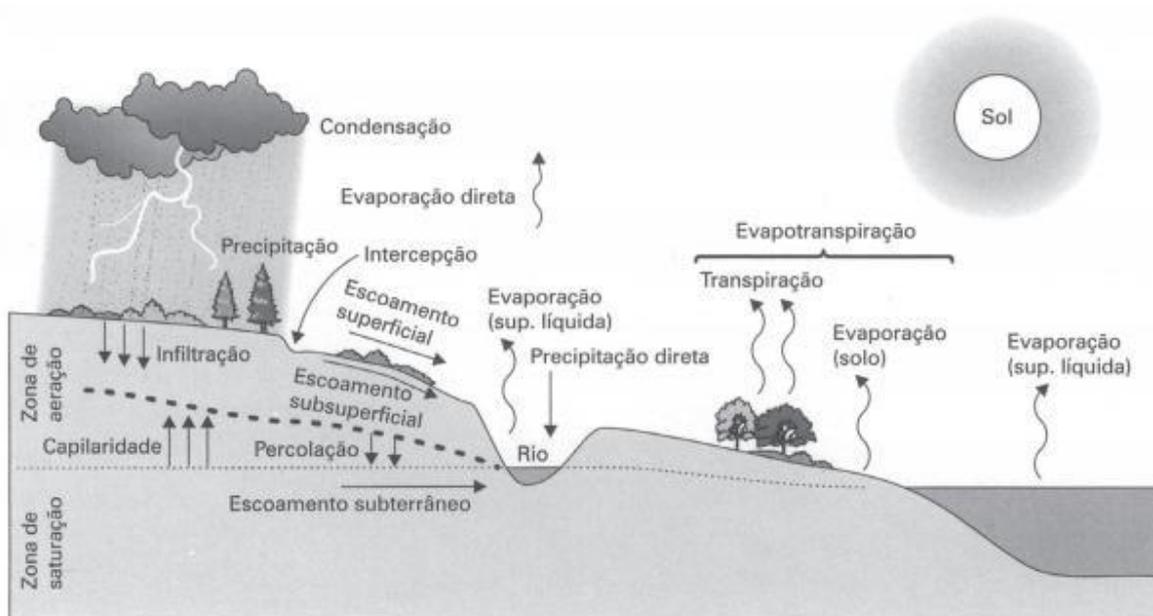


Figura 1. Ciclo Hidrológico da água. (Fonte: Braga, 2005)

3.1.2 Etapas do ciclo hidrológico e tipos de escoamento

O ciclo hidrológico se inicia com a evaporação da água dos oceanos, sendo que o vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar. Esse vapor se condensa, forma as nuvens e ocasiona a precipitação. Inicialmente, a taxa de retenção superficial é alta, devido a interceptação vegetal, evaporação e armazenamento nas depressões do solo. A umidade do solo aumenta na medida em que ocorre o processo de infiltração, onde parte da água é retida por longos períodos de tempo e o restante do volume é detido contribuindo para o efeito de amortecimento do escoamento e para formação do componente subsuperficial ou recarga do lençol subterrâneo.

O escoamento superficial é o processo do ciclo hidrológico em que ocorre deslocamento de água sobre a superfície do solo das bacias hidrográficas e pelos seus múltiplos canais. Segundo Horton (1933) apud Chow *et al.* (1988), esse processo corresponde ao escoamento superficial hortoniano, onde quando a intensidade da chuva (i) é menor que a capacidade de infiltração do solo (f) toda a água é absorvida pelo solo e não há escoamento superficial, caso contrário o escoamento superficial (hortoniano) ocorre a uma taxa de $(i - f)$. No entanto, de acordo com Chow *et al.* (1988), com o escoamento superficial ocorre um armazenamento em depressões da superfície e um armazenamento por detenção superficial proporcional à

profundidade do escoamento. O solo armazena a água infiltrada e a libera lentamente como fluxo subsuperficial para entrar nos corpos hídricos na forma de fluxo de base durante períodos de seca. Sendo assim, o escoamento superficial hortoniano é mais aplicável a superfícies impermeáveis em áreas urbanas e superfícies naturais com baixa capacidade de infiltração, como ocorre em regiões áridas e semi-áridas.

Dessa forma, além do escoamento superficial tem-se o escoamento subsuperficial e o escoamento subterrâneo, conforme a Figura 2. O escoamento subsuperficial pode ser definido como o fluxo que se move lateralmente logo abaixo da superfície, na altura das raízes da cobertura vegetal. A água infiltrada na parte subsuperficial do solo é responsável por formar uma zona saturada e uma zona não saturada. Neste caso, ocorre infiltração até que a saturação do solo atinja as camadas mais superficiais, causando o escoamento superficial. Já o escoamento subterrâneo (ou básico) é o que ocorre abaixo da superfície da água subterrânea e acontece nas camadas mais profundas do solo ou em rochas estratificadas.



Figura 2. Tipos de escoamento. (Fonte: Souza Filho, 2017)

Ambos os processos, escoamento subsuperficial e subterrâneo, são proporcionados pela infiltração, que é influenciada pela umidade do solo, precipitação, granulometria das partículas, cobertura e tipo do solo, porosidade, condutividade hidráulica, evapotranspiração, etc. Segundo Carvalho e Silva (2006), à medida que é adicionada água no solo, a frente de umedecimento atinge uma profundidade cada vez maior, diminuindo a diferença de umidade entre essa frente e a camada superficial, que vai se tornando cada vez mais úmida. Quando o teor de umidade do solo aumenta conseqüentemente a capacidade de infiltração - quantidade máxima de água que pode infiltrar no solo - diminui, conforme a Figura 3.

Dessa forma, a taxa de infiltração se reduz substancialmente até um valor praticamente constante, característico de cada tipo de solo. Portanto, a taxa de infiltração depende diretamente da textura e estrutura do solo e, para um mesmo solo, depende do teor de umidade na época da chuva ou irrigação, da sua porosidade e da existência de camada menos permeável ao longo do perfil. Quando a velocidade de infiltração iguala-se à capacidade de infiltração inicia-se o escoamento superficial. Assim que a precipitação termina o solo começa a perder umidade por evaporação/transpiração. A partir deste momento, a capacidade de infiltração começa a aumentar até que uma outra precipitação ocorra, quando o processo descrito se repete.

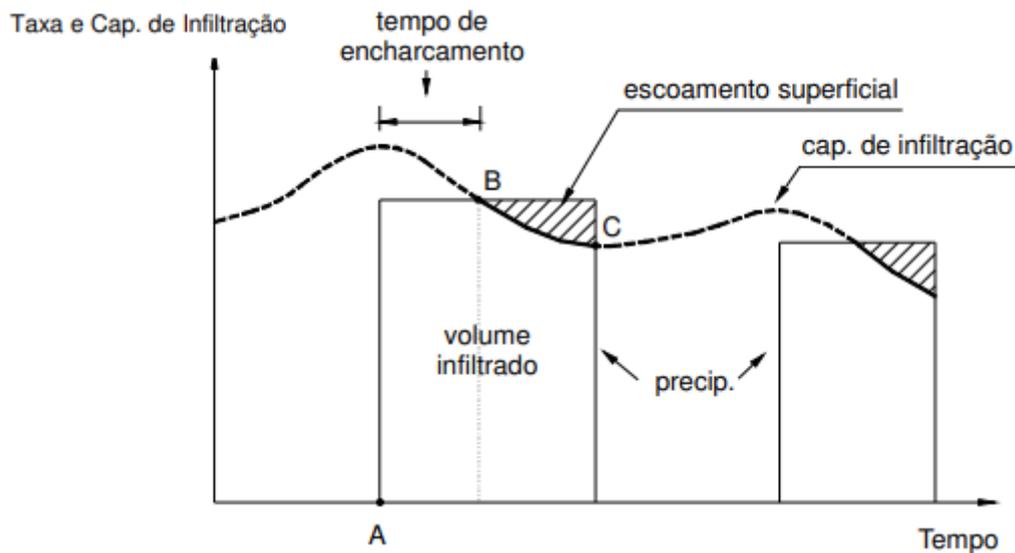


Figura 3. Taxa e capacidade de infiltração. (Fonte: Carvalho e Silva, 2017)

Horton observou que a infiltração começa em uma taxa f_0 e decresce exponencialmente até que alcance uma taxa constante, seguindo as relações descritas na Equação 1.

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-kt} \quad \text{Equação 1}$$

em que: f é a taxa de infiltração (mm/h) ; f_c é a taxa de infiltração em condição de saturação (mm/h); f_0 é a taxa de infiltração inicial (mm/h) ; t é o tempo (h) ; k é a constante, depende do tipo de solo (h^{-1}).

A fórmula de Philip, de 1957, que foi derivada da equação de Richards e solucionada a partir da consideração da condição de contorno de saturação permanente na superfície do solo, determina o volume infiltrado pela Equação 2.

$$f(t) = 0,5 St^{0,5} + K \quad \text{Equação 2}$$

em que: $f(t)$ é a taxa de infiltração (cm/h); K é um parâmetro próximo da condutividade hidráulica saturada (cm/h); S é a capacidade de absorção/adsorção do solo (cm/h^{-1/2}).

O modelo de Green & Ampt (1911) foi desenvolvido com base na equação de Darcy e em algumas premissas, como por exemplo a existência de uma carga hidráulica constante na superfície do solo durante todo o processo de infiltração. Além disso, considera-se que a condutividade hidráulica na zona de transmissão equivale à condutividade hidráulica do solo. Dessa forma, a água penetra no solo resultando em uma região com o teor de água do solo saturado e em outra região com o teor de água igual ao do início do processo, caracterizando o movimento pistão, conforme Equação 3.

$$f(t) = \left(\frac{\Psi (\sigma_s - \sigma_i)}{F(t)} + 1 \right) \times K \quad \text{Equação 3}$$

em que: $f(t)$ é a taxa de infiltração da água no solo (mm x h-1); K é a condutividade hidráulica do solo saturado (mm x h-1); Ψ é o potencial matricial médio na frente de umedecimento (mm); σ_s é a umidade do solo na saturação (cm³ x cm-3); σ_i é a umidade inicial do solo (cm³ x cm-3); $F(t)$ é a infiltração acumulada (mm).

É importante considerar, como mostra a Figura 4, que a geometria do terreno, ou seja, sua altitude, declividade e relevo impactam o escoamento superficial, exercendo controle majoritário sobre a resposta hidrológica da bacia. De acordo com o estudo de Philip (1991), para a topografia côncava e convexa o ângulo de curvatura da superfície é o parâmetro que mais influencia geometricamente a geração do escoamento, sendo que quando o ângulo de curvatura da superfície for menor que dez vezes o comprimento da superfície infiltrante transversal a mudança do fluxo do escoamento deve ser levada em consideração. No caso de topografia convergente e divergente, verificou-se que para o fluxo insaturado os efeitos da mudança do fluxo de escoamento são importantes quando o raio do contorno é menor que dez vezes o comprimento da superfície infiltrante transversal. Dessa forma, conclui-se que o fluxo

do escoamento aumenta ligeiramente com a divergência e convexidade do relevo e diminui com a convergência e concavidade.

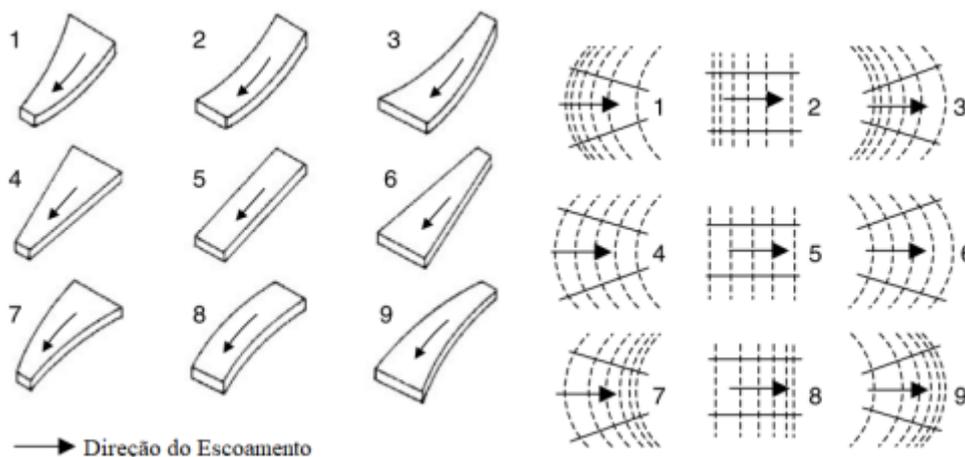


Figura 4. Formato dos Padrões Topográficos. Côncavos (1, 2 e 3), Planos (4, 5 e 6), Convexos (7, 8 e 9), Convergentes (1, 4 e 7), Divergentes (3, 6 e 9) e Retangulares (2, 5 e 8). (Fonte: Agnese et al., 2007)

3.1.3 Precipitação efetiva e transformação chuva-vazão

Para análise do escoamento superficial é de grande valia o traçado de um hidrograma, que apresenta a evolução da vazão ao longo do tempo em uma determinada bacia hidrográfica. Geralmente são adotados métodos gráficos para o traçado da curva de separação do escoamento de base e superficial. Uma característica importante do hidrograma de uma bacia é o tempo de concentração (t_c), que corresponde ao tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia se desloque até a seção que está sendo estudada. Vale ressaltar ainda que fatores como área da bacia, forma, relevo, tipo de solo, uso e ocupação do solo e rede de drenagem influenciam significativamente a resposta do hidrograma.

A parcela da precipitação que corresponde ao escoamento superficial é denominada precipitação efetiva. A quantificação dessa parcela pode ser realizada por meio de métodos que utilizam equações de infiltração e pelo método SCS. O método SCS foi desenvolvido pelo *Soil Conservation Service*, do Departamento de Agricultura dos EUA, em 1957, baseado em estudos que procuraram correlacionar a precipitação total e a efetiva. Nesse caso, a precipitação efetiva pode ser descrita pela Equação 4.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2.S)^2}{(P + 0,8.S)} \quad P > 0,2.S \quad \text{Equação 4}$$

em que: S é a retenção potencial do solo, isto é, a sua capacidade de armazenar água (mm).

A estimativa do valor de S depende do parâmetro Curve Number (CN), que tem seu valor diretamente relacionado ao tipo, umidade do solo e à ocupação da bacia, Equação 5.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 5}$$

A determinação do CN ocorre de acordo com a condição de umidade antecedente, tipo de solo, cobertura e uso e ocupação do mesmo, como pode ser observado nas Tabelas 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1. Classificação dos grupos hidrológicos dos solos.

Enquadramento	Características
A	Solos arenosos com baixo teor de argila (menor que 8%)
B	Solos arenosos com teor de argila variando entre 8 e 15%
C	Solos barrentos com teor de argila de 20 a 30%, mas sem a presença de camadas argilosas impermeáveis
D	Solos argilosos, argila total variando de 30 a 40%

Fonte: Tucci, 1995 (Modificado).

Tabela 2. Tipos de solo, e enquadramento de acordo com os grupos hidrológicos de solo propostos pelo SCS.

Enquadramento	Tipos de solo
A	Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, com textura argilosa, Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média e horizonte superficial não arenoso
B	Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média e horizonte superficial arenoso, Neossolo Quartzarênico, Argissolos Vermelho ou Vermelho e Amarelo de texturas diversas
C	Argissolo de diversas texturas, Cambissolos de textura média, Cambissolo Háplico ou Húmico com características latossólicas, Espodossolos e Neossolos Flúvicos
D	Gleissolos, Chernossolos, Argissolos com mudança estrutural abrupta, Cambissolos que não se enquadrem no Grupo C, Plintossolos distróficos

Fonte: Sartori et al., 2005.

Tabela 3. Condições de umidade para cálculo do CN

Condição	Observações
I	Solos secos – as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm
II	Situação média na época de cheias – as chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40 mm
III	Solo úmido (próximo da saturação) – as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação

Fonte: Tucci, 1995 (Modificado).

Tabela 4. Exemplos de valores de CN para diferentes tipos de solo e sua ocupação

Ocupação do solo	Tipo de solo				
	A	B	C	D	
Áreas florestadas	Pouca cobertura	45	66	77	83
	Grande cobertura	25	55	70	77
Parques e jardins	50 a 75% de área gramada	49	69	79	84
	75% de área gramada	39	61	74	80
Áreas residenciais	30% de área impermeável	61	75	83	87
	65% de área impermeável	77	85	90	92
Áreas industriais	72% de área impermeável	81	88	91	93
Áreas comerciais	85% de área impermeável	89	92	94	95
Área impermeável	Como pavimento com drenagem	98	98	98	98

Fonte: Righetto, 2009 (Modificado).

Os valores de CN tabelados correspondem à condição de umidade II, o que faz com que os mesmos tenham que ser corrigidos caso seja necessário avaliar as outras situações, conforme Tabela 3, e recalculados para as condições de umidade utilizando as Equações 6 e 7.

$$CN_I = \frac{4,2 \times CN_{II}}{(100 - 0,058 \times CN_{II})} \quad \text{Equação 6}$$

$$CN_{III} = \frac{23 \times CN_{II}}{10 + 0,13 \times CN_{II}} \quad \text{Equação 7}$$

A transformação da precipitação efetiva em vazão pode ser feita por meio de métodos simplificados que procuram estimar características do hidrograma ou por modelagem do processo “chuva-vazão”. A modelagem computacional aliada aos métodos simplificados permite a aplicação de diferentes fórmulas de cálculo de infiltração para obtenção de informações sobre o escoamento superficial e vazões geradas nos eventos de interesse, como as obtidas pelas Equações 8 e 12. Nos métodos simplificados são empregadas equações empíricas que estimam parâmetros como a vazão do escoamento gerado e o tempo de pico do hidrograma, sendo os mais utilizados o método racional e do hidrograma unitário.

O método racional estima a vazão de pico do hidrograma para uma determinada bacia, considerando que a vazão é diretamente proporcional à área da bacia e à intensidade da chuva. Além disso, esse método considera que a distribuição espacial e temporal da chuva são uniformes. Nesse caso, a equação envolve um coeficiente de escoamento superficial, que é escolhido conforme o tipo de ocupação do solo, influenciando em uma maior ou menor geração de escoamento superficial, conforme Equação 8.

$$Q_p = C \times i \times A \quad \text{Equação 8}$$

em que: i é a intensidade da chuva (mm/h); A é a área da bacia (km²); C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional).

Em relação aos métodos de hidrogramas unitários, o mais comum para transformação da precipitação efetiva em vazão é o do SCS. A partir de estudos de um grande número de bacias e hidrogramas nos Estados Unidos, técnicos do Soil Conservation Service desenvolveram a teoria do hidrograma unitário sintético, verificando que os hidrogramas podem ser aproximados por relações de tempo e vazão estimados com base no tempo de concentração e na área das bacias (LIMA, 2014). Dessa forma, o hidrograma resultante para precipitação sobre a bacia pode ser dado pela soma de vários hidrogramas triangulares unitários, sendo válidos os princípios da superposição e proporcionalidade. Os cálculos efetuados pelo método SCS podem ser visualizados nas Equações 9, 10, 11 e 12.

$$d = 0,133 \times t_c \quad \text{Equação 9}$$

$$t_p = \frac{d}{2} + 0,6 \times t_c \quad \text{Equação 10}$$

$$t_b = 2,67 \times t_p \quad \text{Equação 11}$$

$$Q_p = 2,08 \left(\frac{A}{t_p} \right) \quad \text{Equação 12}$$

em que: d é a duração da precipitação (h); t_c é o tempo de concentração da bacia (h); t_p é o tempo de pico do hidrograma (h); t_b é o tempo de base do hidrograma (duração do escoamento superficial – h); Q_p é a vazão de pico do hidrograma (m^3/s); A é a área da bacia (km^2).

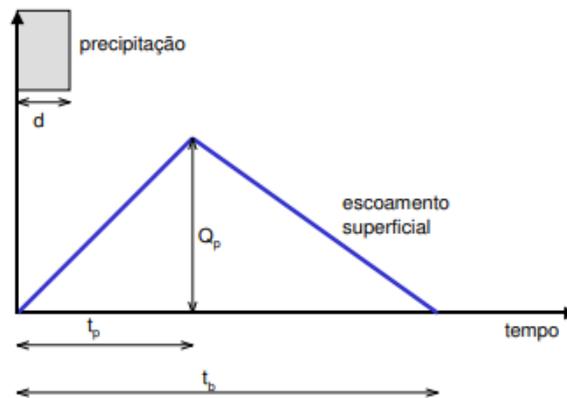


Figura 5. Hidrograma Unitário do SCS. (Fonte: Paz, 2004)

3.2 Impactos da Urbanização na Drenagem Urbana

Nas áreas urbanas, o ciclo hidrológico sofre grandes alterações devido, principalmente, à forma geométrica da bacia hidrográfica, impermeabilização do solo e a canalização do escoamento. Como resultado podem ocorrer alagamentos e inundações, que são classificadas como ribeirinhas, urbanas e localizadas (Tucci, 1999), podendo provocar impactos ambientais, sociais e econômicos.

As inundações em áreas urbanas estão relacionadas com a ocupação e conseqüentemente impermeabilização das bacias hidrográficas. As inundações em áreas ribeirinhas, por sua vez, fazem parte da dinâmica natural de um canal de drenagem e podem afetar a população quando ocorre a ocupação da planície fluvial, área naturalmente inundável. Já as inundações

localizadas podem ser provocadas pelo estrangulamento da seção do rio, erros na execução do projeto, remanso, entre outros.

Segundo Leopold (1968), o desenvolvimento urbano brasileiro é a principal causa para um aumento caótico na frequência das inundações e alagamentos, produção de sedimentos e deterioração da qualidade da água. O maior desenvolvimento urbano no Brasil ocorreu entre 1965 e 1990, onde a população urbana saltou de 55 % para 76% e a concentração aconteceu prioritariamente nas metrópoles e suas periferias.

Dessa forma, à medida que a cidade se urbaniza, ocorre a diminuição das áreas para escoamento e infiltração das águas pluviais e conseqüentemente o aumento das vazões máximas devido à ocupação da bacia pela população, impermeabilização do solo e canalizações, como pode ser observado na Figura 6.

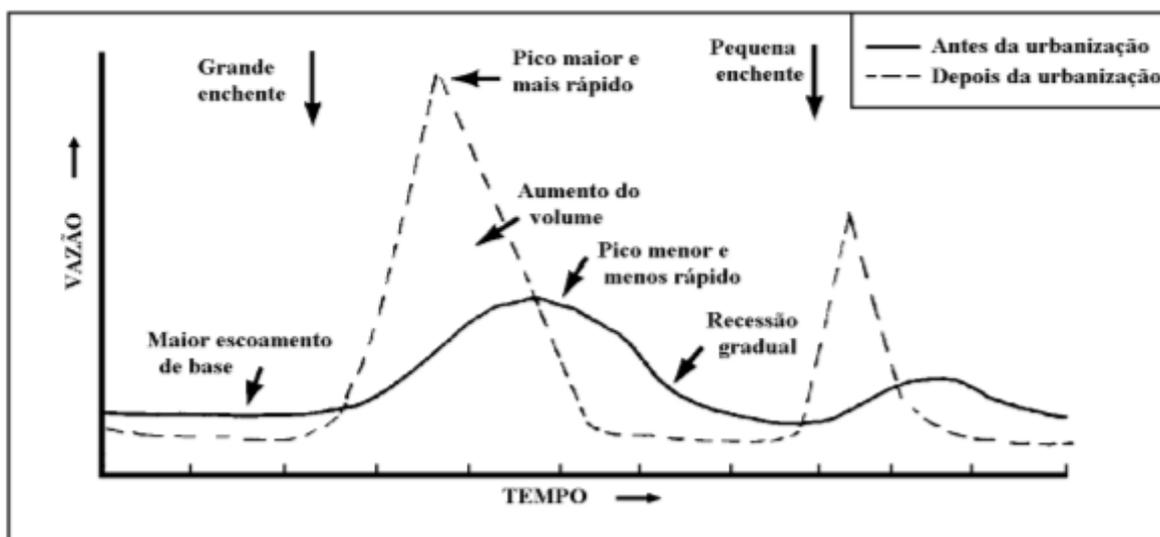


Figura 6. Impactos da urbanização no escoamento. (Fonte: Tucci, 1997)

De acordo com Tucci (2002) esse aumento relativo pode ser superior a seis vezes se comparado com a situação de pré-desenvolvimento e ocorre em detrimento da redução da evapotranspiração, do escoamento subterrâneo e da redução do tempo de concentração da bacia. Com as áreas impermeabilizadas, o objetivo da drenagem urbana é direcionar a água pluvial que foi transformada diretamente em escoamento superficial e não infiltraria no solo para a rede de drenagem (MELLER, 2004).

Para Baptista (2007), como conseqüências das inundações e alagamentos, a população pode ter prejuízos econômicos, perdas materiais ou humanas, contaminação da água de

abastecimento, contaminação por doenças de veiculação hídrica, elevação dos custos de tratamento de água, dentre outras. Os impactos ambientais são visualizados pelo aumento da temperatura, aumento do volume de escoamento superficial e da vazão, aceleração de processos erosivos, assoreamento dos corpos hídricos e deterioração da qualidade da água.

A qualidade da água pode ser comprometida por meio de sedimentos erodidos pelo aumento da vazão, lixo urbano transportado pelo escoamento superficial, ligações clandestinas de esgoto no sistema de drenagem, lavagem das superfícies urbanas contendo contaminantes ou ainda pela poluição presente no ar que pode se precipitar junto com a água. Os contaminantes podem ser de fontes pontuais ou difusas (Righetto, 2009), sendo que os de origem pontuais são de fácil identificação e ocorrem de forma concentrada. Já os contaminantes de origem difusa ocorrem de forma distribuída ao longo da bacia hidrográfica, de acordo com o uso e ocupação do solo de um determinado local.

Em geral, os contaminantes são carreados pelas águas pluviais juntamente com os sedimentos, que representam uma grande preocupação para o sistema de drenagem urbana. Isso acontece, pois uma vez que os sedimentos atinjam o sistema de drenagem urbana irão contribuir para efeitos negativos no ambiente natural ou construído trazendo riscos à saúde da população (Secretaria de Vigilância da Saúde, 2019).

O Manual de Drenagem da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (2018) afirma que os materiais transportados pelas águas pluviais nos corpos hídricos provocam:

- Redução da capacidade hidráulica da rede de drenagem por obstrução de captações e tubulações;
- Redução da capacidade hidráulica dos rios por redução da seção de escoamento;
- Aumento da poluição hídrica;
- Redução dos volumes de reservação de lagos e reservatórios.

O principal modelo de sistema de drenagem empregado no país tem sido exportar os problemas de poluição e inundações para a jusante (TUCCI; BERTONI, 2003). Sendo assim, atualmente o grande desafio está em buscar o controle dos efeitos do desenvolvimento urbano não planejado, por meio de soluções que priorizem medidas a montante e minimizem os impactos sociais e ambientais negativos.

3.3 Drenagem Urbana

A drenagem urbana está relacionada ao gerenciamento das águas pluviais, sendo que o planejamento, projeto, construção e operação desses sistemas devem ter como objetivo a redução das inundações e alagamentos e, ao mesmo tempo, o controle da poluição hídrica (Adasa, 2018).

As medidas de controle de inundações podem ser classificadas como estruturais ou não-estruturais (BAPTISTA et al, 2007), Figura 7. As medidas estruturais dizem respeito às obras de engenharia, sendo que essas medidas podem ser intensivas - aceleração do escoamento, retardamento do fluxo, desvio do escoamento - ou extensivas - pequenos armazenamentos disseminados na bacia, recomposição de cobertura vegetal e controle de erosão do solo. As medidas não-estruturais, por sua vez, procuram disciplinar a ocupação territorial, o comportamento de consumo das pessoas e as atividades econômicas, podendo essas medidas serem agrupadas em: regulamentação do uso e ocupação do solo, educação ambiental, sistemas de alerta e previsão de inundações, dentre outros (TUCCI; BERTONI, 2003).

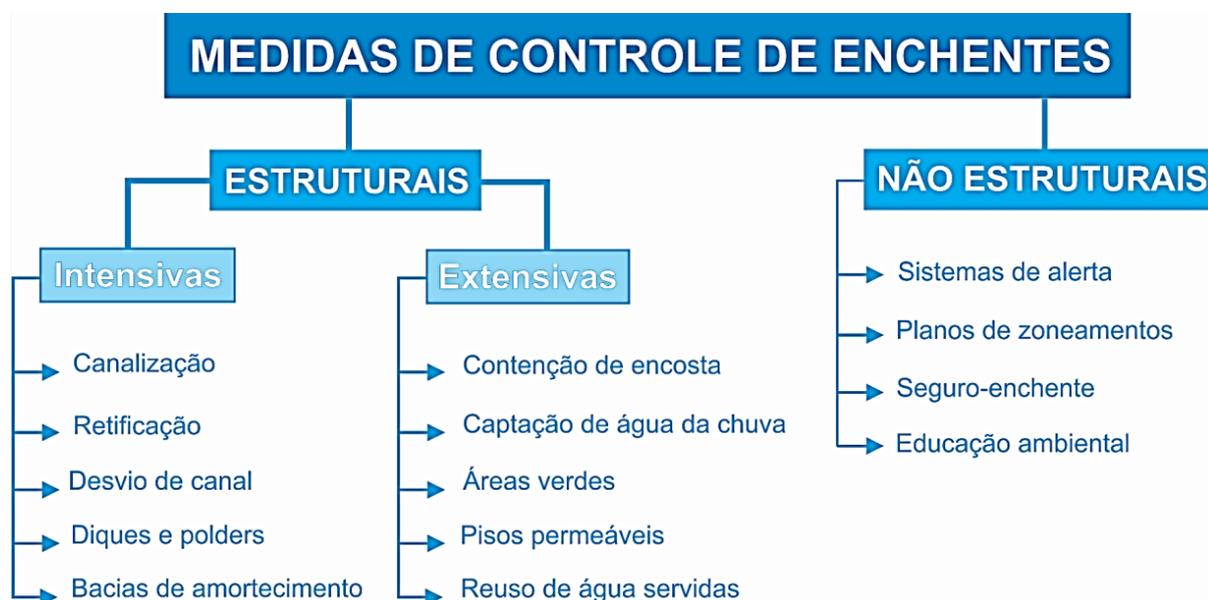


Figura 7. Exemplos de medidas estruturais e não estruturais. (Fonte: Medina, 2015)

Os sistemas de drenagem podem ser definidos na fonte, na microdrenagem e na macrodrenagem (TUCCI; BERTONI, 2003), Figura 8. O Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Adasa-DF (2018) define cada subsistema da seguinte forma:

1) Controle na fonte: composto pelos dispositivos de amortecimento e infiltração instalados junto à origem do escoamento pluvial, geralmente em lotes privados ou em espaços públicos situados próximos às cabeceiras das bacias hidrográficas. Ou seja, a drenagem na fonte está relacionada ao escoamento que acontece nos lotes, condomínios, empreendimentos, estacionamentos, parques e passeios.

2) Microdrenagem: composto tipicamente pelos dispositivos que drenam o sistema viário, como: sarjetas, canaletas, captações (bocas de lobo, bocas de leão), condutos de ligação e tubulações com diâmetro máximo de 0,8 m. Este tipo de sistema de drenagem é projetado para atender à drenagem de precipitações com risco moderado.

3) Macrodrenagem: formado por canais (abertos ou fechados), galerias e tubulações com diâmetro mínimo de 1,0 m, que recebem a vazão de um conjunto de redes da microdrenagem. Este tipo de sistema deve ser projetado para acomodar precipitações superiores às da microdrenagem com riscos de acordo com os prejuízos humanos e materiais potenciais.

No meio técnico não existe um consenso sobre onde termina a microdrenagem e onde começa a macrodrenagem. Na engenharia moderna de drenagem urbana os sistemas de drenagem são estudados por bacia hidrográfica como um único sistema, composto pelos espaços e utilidades por onde transitam as águas pluviais (Adasa, 2018).

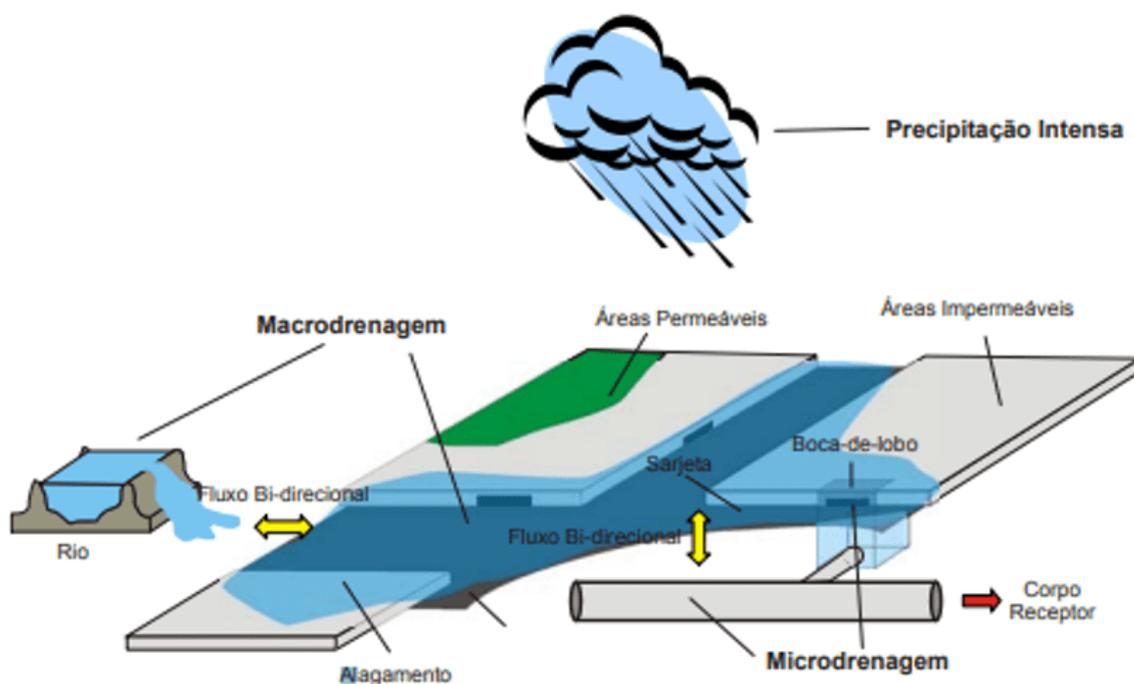


Figura 8. Sistema de Drenagem. (Fonte: Meller, 2004)

Segundo Matos (2003), os primeiros sistemas de drenagem se originaram há aproximadamente 5.000 anos e tiveram desde então poucos avanços. Inicialmente esses sistemas não eram considerados necessários e somente nos últimos 150 anos, devido às consequências do aumento populacional, tem sido notado um avanço na área.

A antiga visão sobre drenagem tinha como princípios a condução das águas pluviais para a jusante e execução de obras como medida para resolução dos problemas. A base de análise era econômica e a única preocupação era retirar das cidades as águas das chuvas o mais rápido possível. Essa abordagem ficou conhecida como higienista e é caracterizada pela evacuação rápida das águas pluviais e residuárias, por meio da impermeabilização de áreas e sistemas de condutos artificiais. A necessidade de proteção do meio ambiente receptor destes lançamentos levou ao emprego de estações de tratamento para minimizar contaminações (TUCCI; SOUZA; CRUZ, 2012).

Seguindo a visão higienista, o sistema de drenagem convencional, exemplificado na Figura 9, tem como finalidade o rápido escoamento nas áreas urbanas das águas pluviais para evitar transtornos. As soluções mais empregadas consistem na construção de canalizações, seja na forma de condutos subterrâneos ou canais abertos, que têm por finalidade a captação e direcionamento da água pluvial para fora do meio urbano no menor tempo possível (CANHOLLI, 2013; RIGHETTO, 2009; TUCCI; MENDES, 2006).

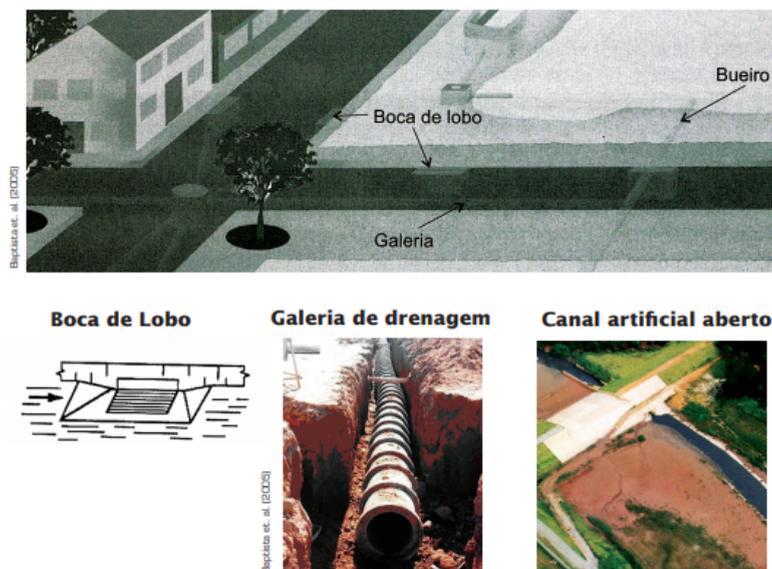


Figura 9. Visualização geral de um sistema clássico de drenagem. (Fonte: Baptista, 2005)

É fundamental destacar que existem dois tipos de sistemas de drenagem: o unitário e o separador absoluto. No sistema unitário, as águas pluviais são transportadas juntamente com o esgotamento sanitário, enquanto o separador absoluto se trata exclusivamente do transporte das águas do escoamento gerado a partir de precipitações. Os sistemas separadores absolutos são os mais utilizados no Brasil, mas é um problema frequente a presença de esgoto nas redes de drenagem.

Moura (2004) expõe que o método clássico apresenta algumas desvantagens, tais como:

- a) o aumento da velocidade de escoamento;
- b) as cheias e inundações nas jusantes e;
- c) a falta de cuidados com a destinação das águas.

Para Baptista et al. (2007), o sistema de drenagem convencional faz com que os corpos receptores fiquem sujeitos ao assoreamento e à poluição. Essa poluição pode acontecer devido ao carreamento de sedimentos junto com o escoamento da pluvial, carreamento de resíduos sólidos ou ainda pelo lançamento de esgotos clandestinos na rede de drenagem urbana. Alguns dos problemas que podem ser encontrados na microdrenagem são: concepção de projeto e dimensionamento de galerias inadequados às condições locais ; obstrução das galerias e bocas de lobo devido ao aporte de resíduos sólidos e falta de manutenção nos dispositivos; empoçamentos e voçorocas, devido à inclinação invertida das ruas em relação ao relevo natural (inversão dos diagramas de corte e aterro).

As soluções convencionais para a drenagem urbana são limitadas, fazendo com que sejam necessárias soluções alternativas que somadas às ideias tradicionais consigam controlar as inundações, mitigar os impactos ambientais e contribuir para uma maior equidade social, ambiental e econômica.

A partir dos anos 70 vem sendo desenvolvido, sobretudo na Europa e América do Norte, o conceito de medidas compensatórias de drenagem, que buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e a preservação ambiental (BAPTISTA, 2005). As medidas compensatórias agem juntamente com as estruturas convencionais. Esta nova abordagem busca não apenas mitigar a ocorrência de cheias, mas também melhorar a qualidade das águas drenadas, restaurar o regime de vazões e aproveitar as águas pluviais.

O sistema de drenagem convencional atua nas situações de cheia, o que demanda custos elevados com canalização e alterações no curso natural dos rios. O sistema sustentável de drenagem urbana, por sua vez, destina-se a diminuição dos impactos da urbanização por meio do aumento das taxas de infiltração da água da chuva no solo e da desaceleração do escoamento superficial das águas, resgatando o hidrograma das condições de pré-urbanização (TUCCI, 1995).

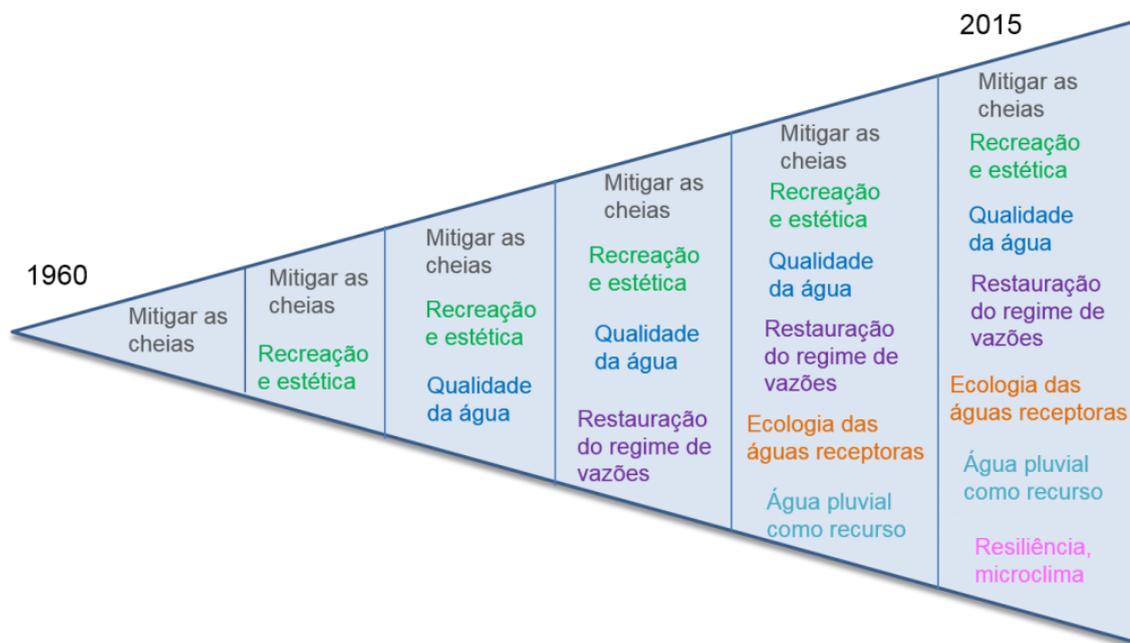


Figura 10. Evolução da gestão de drenagem urbana ao longo do tempo. (Fonte: Fletcher et al., 2015)

Para Baptista et al (2011), as chamadas medidas compensatórias que são utilizadas na drenagem urbana sustentável possibilitam o rearranjo das vazões geradas pelo escoamento superficial no tempo, evitando que grandes volumes de águas sejam transferidos para a jusante rapidamente. Além disso, essas técnicas podem diminuir o volume escoado e promover melhorias na questão quantitativa e qualitativa das águas pluviais.

Dessa forma, a drenagem sustentável tem como focos principais:

- Respeitar o funcionamento natural da bacia hidrográfica;
- Minimizar os impactos da urbanização;
- Melhor controle sobre os riscos de inundações;

- Proporcionar um menor custo com o sistema de drenagem urbana.

Neste trabalho será utilizado o termo inglês *Low Impact Development* (LID) para se referir às medidas de baixo impacto de drenagem. As LIDs, segundo Fletcher et al. (2015), permitem um planejamento urbano feito de forma integrada ao manejo das águas pluviais. Ou seja, tenta-se resgatar as características naturais do ciclo hidrológico, enquanto se agrega valor à própria cidade. A Tabela 5 mostra um comparativo entre as LIDs e o sistema convencional.

Tabela 5. Comparação entre as práticas LID e as práticas convencionais de drenagem

LIDs	Sistema Convencional
<ul style="list-style-type: none"> -Minimização do uso de áreas impermeáveis para reduzir impactos; -Maximização do tempo de concentração para se aproximar das condições de pré-urbanização; -Controle do volume, frequência e duração do escoamento para condições anteriores; -Abstração das chuvas; -Melhoria da qualidade da água que escoa para o corpo hídrico receptor; -Controle do escoamento na fonte. 	<ul style="list-style-type: none"> -Uso de cobertura impermeável para atingir a drenagem efetiva; -Redução do tempo de concentração; -Aumento do volume, da frequência e duração do escoamento; -Redução da abstração das chuvas (interceptação, infiltração, armazenamento); -Redução da qualidade da água que escoa para o corpo hídrico receptor; -Transferência dos problemas para jusante.

Fonte: Jacob, 2015 (Adaptado).

No Brasil, o Ministério das Cidades tem estimulado a utilização de LIDs para implantação e ampliação de sistemas de drenagem urbana sustentáveis. Cruz, Souza e Tucci (2007) afirmam que os elementos chaves para se alcançar os objetivos das LIDs são: conservação, elaboração de projetos locais únicos, direcionamento do escoamento para áreas vegetadas, controles distribuídos de pequena escala, manutenção, prevenção à poluição e educação ambiental.

Os parâmetros que devem ser considerados para a escolha dos tipos de técnicas compensatórias podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros para escolha das técnicas compensatórias

Com relação aos Aspectos Físicos devem ser levados em conta os seguintes parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> •Topografia do local; •Capacidade de infiltração do solo; •Estabilidade do subsolo; •Nível das águas subterrâneas; e •Aporte permanente de água.
Com relação aos Aspectos Urbanísticos e de Infra-estrutura devem ser levados em conta os seguintes parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> •Disponibilidade de espaço; •Inclinação e forma dos telhados; •Redes existentes.
Com relação aos Aspectos Sanitários e Ambientais devem ser levados em conta os seguintes parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> •Risco de poluição; •Risco de água com finos; •Risco sanitário associado à proliferação de doenças
Com relação aos Aspectos Sócio-Econômicos devem ser levados em conta os seguintes parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> •Percepção da população próxima à área com relação à estrutura a ser implantada; •Critérios relativos à manutenção e ao custo.

Fonte: Baptista, 2007 (Adaptado).

Os sistemas compensatórios podem assumir múltiplas formas, tais como trincheiras, valas, fossas, pavimentos filtrantes com túnel linner, poços, telhados armazenadores, bacias de detenção/retenção, dentre outros. As técnicas compensatórias podem ser divididas quanto ao caráter estrutural ou não-estrutural e, dentre as medidas estruturais, podem ser classificadas de acordo com o princípio de funcionamento e quanto ao posicionamento da técnica ou à abrangência (BAPTISTA et al., 2011).

As medidas compensatórias estruturais podem ter controle na fonte ou centralizado. Além disso, o controle na fonte pode ser localizado ou linear. Conforme a ação dos processos hidrológicos, as soluções podem atuar sobre a redução dos volumes ou das vazões. No primeiro caso, elas buscam promover sobretudo o processo de infiltração e percolação, enquanto no segundo caso atuam no armazenamento temporário da água pluvial (BRITO, 2006).

Na Figura 11, extraída do Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Distrito Federal, pode-se observar alguns dispositivos de abatimento de vazão e suas características:

Dispositivo	Processo de abatimento de vazão		Características geométricas	
	Por Infiltração*	Por Armazenamento	Linear	Localizada ou pontual
Pavimento permeável	●	●		●
Trincheira de infiltração	●	●	●	
Vala de infiltração	●		●	
Poço de Infiltração	●	●		●
Microrreservatório		●		●
Telhado reservatório		●		●
Reservatório de detenção aberto	●	●		●
Reservatório de retenção aberto	●	●		●
Reservatório subterrâneo pontual		●		●
Reservatórios subterrâneo linear		●	●	
Faixa gramada	●		●	

* No DF, a utilização de medidas de controle que promovam a infiltração deve ser feita com cuidado, devido a ocorrência de solos colapsíveis, sujeitos ao fenômeno do piping. O projeto de MCs por infiltração deve ser precedido de ensaios de colapsividade conforme especificados na NBR 14.114 - Solos argilosos dispersivos - identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole test). Caso se constate suscetibilidade à colapsividade, a solução por infiltração deve ser abandonada.

Figura 11. Dispositivos de abatimento de vazão e suas características. (Fonte: Adasa, 2018)

3.4 Gestão e Planejamento Urbano

Barbosa (2008) mostra que é de grande importância a busca por alternativas sustentáveis e que incluam qualidade de vida para a dinâmica urbana, consolidando uma referência para o processo de planejamento urbano. A ordenação do espaço urbano se faz por meio da aplicação eficaz das legislações federal, estadual e municipal (RIGHETTO, 2009).

A Política Urbana está presente na Constituição Federal e tem como objetivo o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade. Neste contexto, o Estado, como agente regulador, exerce a função de fiscalização, incentivo e planejamento. Os municípios, por sua vez, passam a ter o papel de executar a política de desenvolvimento urbano, conforme o Art. 182 da Constituição Federal. Ou seja, o município deve “promover, no que couber, adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano” (Constituição Federal, inciso VIII, Art. 30, 1988).

O desenvolvimento urbano está diretamente associado à vida das cidades, tornando primordial a aplicação dos conceitos de sustentabilidade urbana nas atividades de gestão e planejamento. Acselrad (1999) define a sustentabilidade urbana como a capacidade das políticas urbanas se adaptarem à oferta de serviços, à qualidade e à quantidade das demandas sociais, buscando o equilíbrio entre as demandas de serviços urbanos e investimentos em estrutura.

O alcance do desenvolvimento sustentável, conforme a Figura 12, é possível devido a interligação entre justiça socioambiental, desenvolvimento social, inclusão social, desenvolvimento econômico, ecoeficiência, preservação e conservação ambiental. As cidades devem ser analisadas como um sistema integrado e a problemática ambiental urbana deve ser o elemento capaz de unificar todas as ações urbanísticas, visando construir cidades ambientalmente e socialmente justas (BARBOSA, 2008).

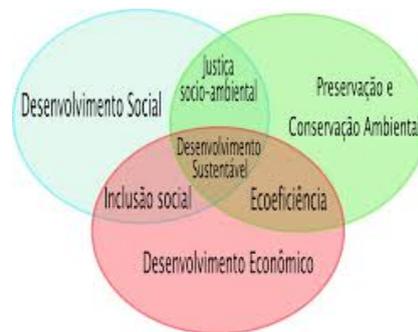


Figura 12. Parâmetros para se alcançar a sustentabilidade urbana. (Fonte: Barbosa, 2008)

Nesse contexto, deve-se considerar ainda nos processos de gestão e planejamento urbano o conceito de direito à cidade, que visa garantir que todos os cidadãos tenham direito de participar das decisões que lhe dizem respeito. Atualmente, em geral, as cidades refletem desigualdades sociais e econômicas, na medida em que quem usufrui dos espaços melhor localizados é quem pode pagar. Dessa forma, a significativa diferença de renda e estilo de vida da população faz com que muitos indivíduos não tenham condições de morarem em locais regularizados e com infra-estrutura urbana. Sendo assim, a cidade deve ser vista como um bem comum e deve ser planejada visando o atendimento das necessidades de todos.

A Lei Federal 11.445/ 2007, Lei do Saneamento Básico, dispõe que os serviços públicos de saneamento básico devem garantir a universalização do acesso ao abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, manejo dos resíduos sólidos e serviços de drenagem e manejo de águas pluviais. No que diz respeito às águas pluviais, uma boa gestão é

fundamental para que sejam evitados os impactos negativos provocados pelo desenvolvimento urbano inadequado.

3.4.1 Instrumentos de Gestão, Planejamento Urbano e Manejo de Águas Pluviais no Distrito Federal

O Manual de Drenagem da Adasa (2018) assegura que o planejamento urbano integrado ao planejamento do sistema de drenagem é essencial para dar sustentabilidade às ações de prevenção e controle de riscos hidrológicos.

A Lei de Uso e Ocupação do Solo é um instrumento legal complementar do ordenamento territorial e expansão urbana do Distrito Federal, atuando em conjunto com a Lei Orgânica – LODF e o Plano Diretor – PDOT (GDF, 2017a). Esse instrumento é responsável pela regulação do uso e ocupação do solo por meio de categorias de uso, como comercial, residencial, uso misto, institucional, industrial e de prestação de serviços.

A categoria de uso residencial é classificada pela LUOS da seguinte forma:

RE 1: Habitação residencial, em categoria unifamiliar;

RE 2: Habitação residencial unifamiliar ou multifamiliar em tipologia de casas;

RE 3: Habitação multifamiliar, em tipologia de apartamentos ou de casas combinadas, ou não, com a tipologia de apartamentos ;

RO 1: Uso residencial unifamiliar obrigatório, sendo facultada a utilização simultânea para atividade econômica, não permitindo acesso independente;

RO 2: localiza-se ao longo de vias de conexão entre conjuntos e quadras, sendo obrigatório o uso residencial, na categoria habitação unifamiliar, sendo facultado, simultaneamente, o uso não residencial exclusivamente no pavimento diretamente aberto para logradouro público e independente da habitação.

O Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT-DF, 2009) é o instrumento que trata sobre a gestão de localidade e expansão urbana e rural no Distrito Federal. O PDOT visa à organização territorial, por meio do aproveitamento da infraestrutura existente e articulação com as legislações ambientais. O PDOT define que a regularização deverá acontecer para três categorias de assentamentos:

1) Parcelamento Urbano Isolado (PUI) apresenta características urbanas, implantado originalmente em zona rural e classificado como Zona de Urbanização Específica;

2) Áreas de Regularização (ARINE e ARIS) – correspondem a unidades territoriais que reúnem assentamentos informais a partir de critérios como proximidade, faixa de renda dos moradores e similaridade das características urbanas e ambientais, com o objetivo de promover o tratamento integrado do processo de regularização dos assentamentos informais com características urbanas;

3) Setores Habitacionais de Regularização – correspondem à agregação de Áreas de Regularização e áreas não parceladas.

Outro instrumento relevante para a gestão urbana no DF é o Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE-DF), que tem como objetivo orientar as políticas públicas distritais voltando-as para o desenvolvimento socioeconômico sustentável. A gestão da drenagem urbana é conduzida pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF (PDDU-DF), Resolução nº09/2011 e pelo Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do DF. Todos estes documentos devem estar interligados, de acordo com a Adasa:

O Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) deve se integrar ao Plano Distrital de Saneamento Básico (Distrito Federal, 2014), ao PDOT (Plano Diretor de Ordenamento Territorial), à LUOS (Lei de Uso e Ocupação do Solo), ao ZEE (Zoneamento Econômico Ecológico), ao PGIRH (Plano de Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos), à legislação que regula o tombamento do conjunto urbanístico de Brasília (Portaria nº 314 de 1992, do Iphan), ao Plano Diretor de Resíduos Sólidos, ao Plano Diretor de Águas e Esgotos e aos Planos Diretores Locais das Regiões Administrativas (Manual de Drenagem da Adasa, 2018).

No Distrito Federal, a gestão e serviços referentes ao manejo de águas pluviais são realizados por um conjunto de órgãos e instituições públicas, não existindo um órgão exclusivo para tratar desta problemática, como pode ser observado na Figura 13.



Figura 13. Arranjo Institucional da Gestão de Serviços de Águas Pluviais no DF. (Fonte: Adasa, 2018)

O controle de inundações e alagamentos deve ser permanente, sendo que o planejamento, o estabelecimento de regulamentos e normas e as obras de proteção são de suma importância para um efetivo manejo das águas pluviais. Para que o sistema de drenagem seja eficiente é essencial que ocorra manutenção das estruturas e fiscalização de acordo com regulamentação. As principais estratégias que devem ser seguidas estão descritas na Tabela 7:

Tabela 7. Estratégias a serem seguidas da gestão de drenagem e manejo de águas pluviais

Estratégias
Evitar os impactos negativos de novos empreendimentos na cidade sobre a drenagem urbana.
Estabelecer metas de melhoria e universalização através da elaboração de programas de medidas de controle de cheias, e de redução da poluição veiculada pela rede de águas pluviais, em cada unidade hidrográfica.
Implantar o zoneamento de inundações estabelecendo restrições de uso do solo de acordo com o risco de inundação, considerando a situação atual e cenários futuros propostos nos programas de controle de cheias.

Fonte: Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do DF, 2018 (Adaptado).

O que se percebe é que ainda ocorre uma falta de sinergia entre as legislações abordadas no que tange o manejo de águas pluviais. Dessa forma, para que o planejamento urbano e a gestão de águas pluviais sejam mais eficientes é necessária uma maior conexão entre as legislações, assim como ações mais eficazes de educação ambiental da população, de forma que os cidadãos percebam a importância do tema e busquem ser conscientes no obediência das normas.

3.4.2 Vazão de pré-desenvolvimento do DF

A Resolução nº 09/11 estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos do DF ou aqueles delegados pela União e Estados. As outorgas são estabelecidas levando-se em consideração a vazão máxima gerada pelo empreendimento, chuvas com tempo de retorno de dez anos e área máxima impermeabilizada pelo empreendimento. O percentual de área permeável pode ser reduzido caso sejam implementadas medidas que favoreçam a infiltração da água. Os novos empreendimentos com mais de 600 m², bem como a vazão de saída das técnicas compensatórias, devem atender a vazão de pré-desenvolvimento que é de 24,4 L/s/ha.

A Lei Complementar nº 929/17, Lei da Permeabilidade, dispõe sobre dispositivos de drenagem para retenção e recarga artificial de aquíferos que devem ser utilizados em novos empreendimentos imobiliários com mais de 600 m². O objetivo é a maximização da infiltração das águas pluviais dentro do próprio empreendimento, de forma que a vazão de saída do local seja menor ou igual a vazão de pré-desenvolvimento do DF, 24,4 L/s/ha. Nos casos de lotes com taxa de ocupação igual a 100% ou lotes com permissão normativa de ocupação de 100% em subsolo é permitido o uso de área pública para a implantação de dispositivos de retardo, infiltração e aproveitamento de águas pluviais. Esses dispositivos de retardo ou retenção podem ser associados ao aproveitamento de águas pluviais, respeitando-se as situações previstas na Lei. A aplicação da Lei de Permeabilidade propicia a infiltração de águas pluviais, contribui com a evapotranspiração, retarda o escoamento superficial e colabora com os aspectos paisagísticos do ambiente urbano.

A vazão de pré-desenvolvimento do DF foi calculada por meio do método racional, considerando-se um tempo de retorno de 10 anos, área de contribuição de 100 ha, tempo de concentração de 60 minutos, curva IDF-DF (CONCREMAT-2008) e coeficiente de deflúvio igual a 0,15. Como resultado, a vazão de pré-desenvolvimento calculada é de 24,4 L/s/ha e

está descrita na Resolução nº 09/11 e Lei Complementar nº 929/17. Em alguns casos, para que se atinja a vazão de pré-desenvolvimento proposta devem ser elaborados cenários com a utilização de medidas compensatórias, levando-se em conta o espaço disponível para a alocação destas técnicas. No entanto, o que se percebe é que em muitos casos, mesmo com uso de medidas de controle na fonte não se consegue alcançar a vazão de pré-desenvolvimento pretendida de 24,4 L/s/ha.

Uma das explicações é a de que o coeficiente de deflúvio igual a 0,15 é equivalente a áreas gramadas com solo de alta permeabilidade, o que leva a valores muito restritivos quando se compara a permeabilidade de solos como o Cambissolo e Argissolo. O método racional apresenta algumas limitações, visto que não considera por exemplo o tipo, uso e ocupação do solo, condição de umidade antecedente e a variabilidade da chuva no tempo e espaço. Esse contexto requer cuidado, pois alguns locais podem gerar vazões maiores que a de pré-desenvolvimento ocasionando em problemas quando as estruturas de drenagem não são projetadas para atenderem todo o volume de água escoado, como por exemplo enchentes e alagamentos, sobrecarga do sistema, riscos de acidentes, riscos à saúde e danos ambientais.

3.5 Modelagem Hidrológica

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície (RENNÓ, 2008). Segundo Tucci (1999), os modelos hidrológicos para drenagem urbana permitem estudar os processos em uma bacia, antecipando os eventos. Esses modelos podem ser utilizados para planejamento, dimensionamento, operação e tomada de decisões.

De acordo com Righetto (2009), o principal objetivo de um modelo de drenagem é a representação do escoamento, precipitação, interceptação, infiltração, evapotranspiração e interação destes processos com a rede. Esses modelos abarcam um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, para ajudar a entender o impacto das mudanças no uso da terra e para prever alterações futuras nos ecossistemas (SILVA, 2017).

Os modelos do tipo chuva-vazão podem ser utilizados em projetos de estrutura, estimativa de enchentes ou na avaliação do impacto da urbanização sobre a drenagem. Esses modelos simulam os processos de escoamento na bacia e o comportamento do sistema de drenagem a partir de determinadas condições de precipitação pluviométrica (CABRAL et al., 2009).

3.5.1 O modelo SWMM

O SWMM é um modelo chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente nas áreas urbanas. Esse modelo é distribuído e foi desenvolvido pela *Environment Protection Agency* (EPA). O programa divide a área de estudo em áreas menores e homogêneas, chamadas de sub-bacias (RIBEIRO,2018).

Riguetto (2009) pontua como principais aplicações do SWMM o dimensionamento do sistema de drenagem urbana, o controle de alagamentos e a análise do efeito da implantação de medidas compensatórias. Além disso, este software pode ser dividido em quatro módulos, sendo eles: camada atmosférica (local onde ocorre a precipitação), superfície do solo (local onde a água precipitada é evaporada, infiltrada ou se torna escoamento superficial), águas subterrâneas (local que recebe a água infiltrada) e transporte e tratamento (onde estão representadas as redes de drenagem).

Dentro de cada sub-bacia é possível acompanhar a evolução da quantidade e da qualidade do escoamento, assim como a vazão, a altura de escoamento e a qualidade da água em cada tubulação e canal, durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo. O componente relativo ao escoamento superficial do SWMM opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações, gerando escoamentos e cargas poluidoras. O módulo de transporte hidráulico simula o percurso destas águas através de um sistema composto por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação (UFPB, 2019).

A infiltração pode ser determinada pelo modelo de Horton, pelo modelo de Green-Ampt ou SCS. O modelo SCS é o mais utilizado por requerer menos dados de entrada, sendo seu uso aconselhável para solos modificados, como é o caso das bacias urbanas (COSTA, 2013). Além do SWMM, atualmente pesquisadores e projetistas podem contar com o apoio do PCSWMM, que é um software com suporte de decisão espacial EPA SWMM5 para águas pluviais, residuais e para modelagem de bacias hidrográficas. O PCSWMM apresenta como vantagem a incorporação do SIG, que permite a importação de dados vetoriais e raster e facilitando o processo de modelagem (RIGHETTO, 2009). Dessa forma, visto a eficiência para a gestão de águas pluviais urbanas, no presente trabalho será utilizado o PCSWMM devido seu acoplamento ao SIG que auxilia na obtenção de informações como uso e ocupação do solo e declividade da área de estudo.

4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi realizada em três etapas. A primeira consistiu na avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF, calculada pelo método racional, em comparação com as vazões obtidas por meio dos modelos Curva Número e Horton.

Na segunda etapa foram feitas análises referentes ao escoamento em função da declividade e na terceira etapa foi realizada uma avaliação da propagação de cheia na situação em que a rede não funciona adequadamente e existem construções. O fluxograma metodológico seguido pode ser visualizado na Figura 14 com as três etapas principais:

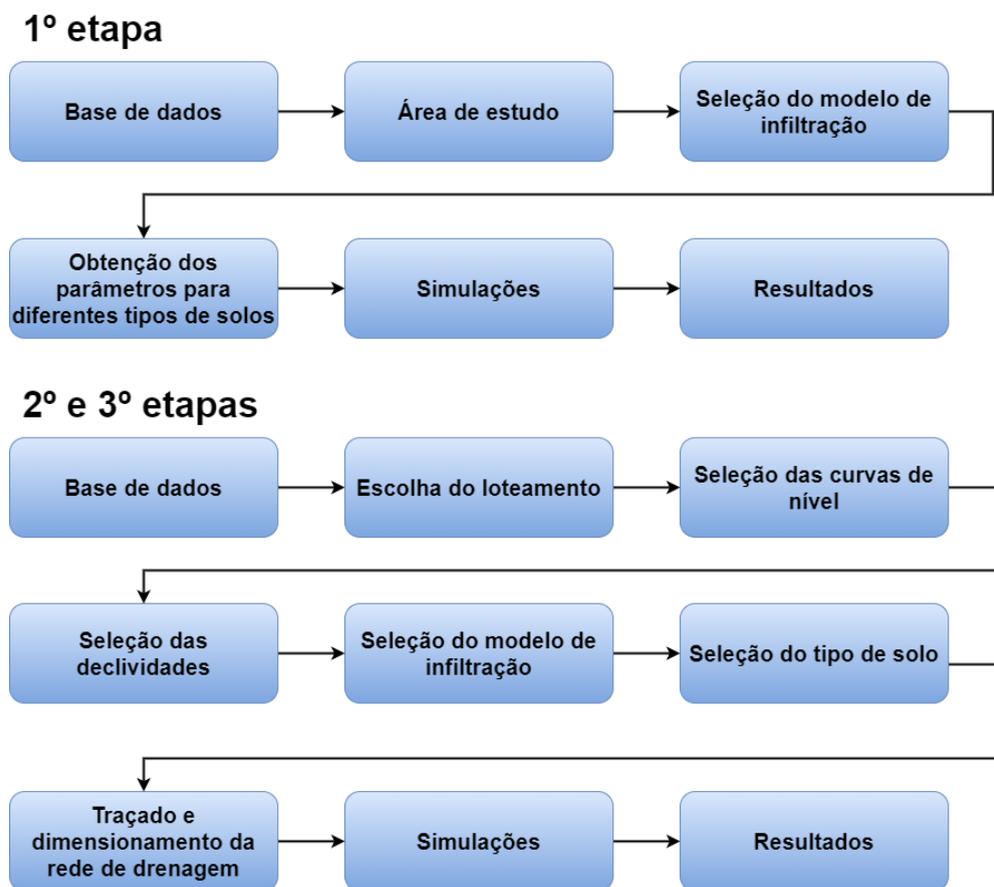


Figura 14. Fluxograma metodológico do trabalho.

O detalhamento dos procedimentos metodológicos está presente nos itens posteriores, onde são abordadas as características da área de estudo, modelagem utilizada no trabalho, chuva de projeto, métodos de infiltração e tipos de solos testados, parâmetros adotados para as redes de drenagem e propostas de loteamentos utilizados.

4.1 Área de Estudo

O Distrito Federal está localizado no Centro-Oeste brasileiro e faz parte do Planalto Central. De acordo com o IBGE (2020), o DF apresenta uma área territorial de 5.760,783 Km² e a população estimada é de 3.055.149 pessoas, sendo que segundo a CODEPLAN, cerca de 97% residem em área urbana. No DF encontram-se as cabeceiras de alguns dos maiores rios do país, sendo eles o rio Maranhão (afluente da bacia do Tocantins/Araguaia), rio Preto (afluente da bacia do São Francisco) e os rios São Bartolomeu e Descoberto (tributários do Rio Paraná). Dessa forma, é primordial que ações de preservação dos recursos hídricos sejam constantemente adotadas, pois o rápido crescimento urbano desordenado aliado à baixa disponibilidade de recursos hídricos podem provocar impactos ambientais negativos.

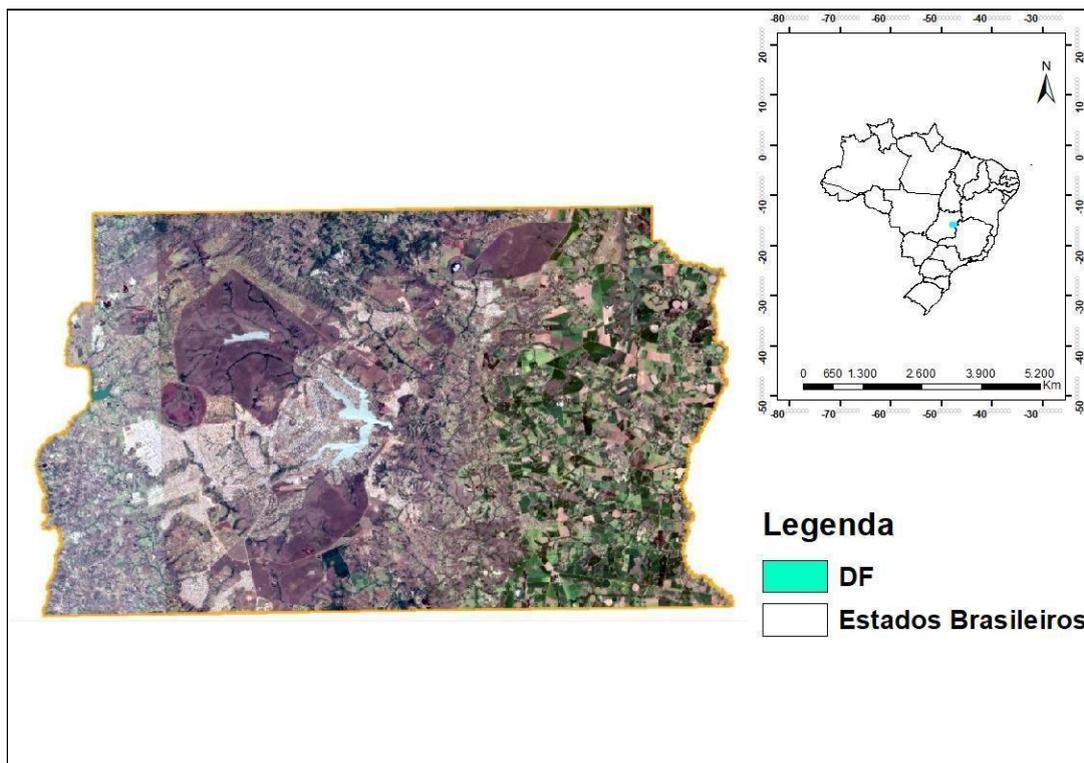


Figura 15. Localização do DF.

4.1.1 Tipos de solos e vegetação

No DF, conforme pode ser notado na Tabela 8, ocorre predominância dos solos dos tipos latossolos e cambissolos, pois ocupam mais de 80% do território do DF. As simulações

utilizaram estes dois tipos de solos para construção dos cenários devido sua representatividade no território.

Tabela 8. Tipos de solo do DF

Tipo de solo	% em relação a área correspondente no DF
Latossolos	54,50%
Cambissolos	30,98%
Gleissolos e espodossolos	3,98%
Argissolos	2,89%
Nitossolos	1,36%
Neossolos Quartzênicos	0,50%
Plintossolos	0,40%
Neossolos Flúvicos	0,18%
Chernossolos	0,08%

Fonte: Reatto et al., 2004; EMBRAPA, 1978.

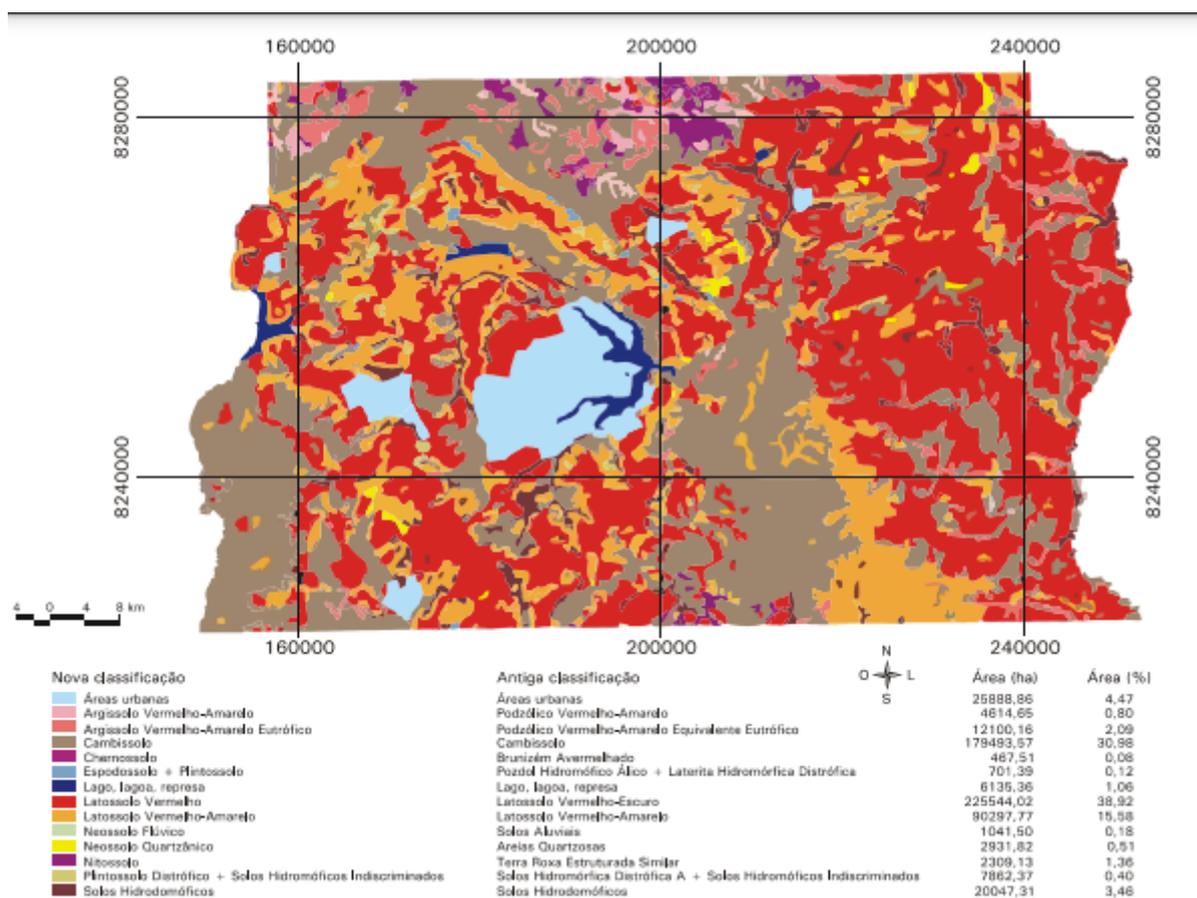


Figura 16. Mapa pedológico do DF. (Fonte: Embrapa, 2004)

O DF está localizado no bioma cerrado, que é o segundo maior bioma da América do Sul. O cerrado possui vegetação diversificada, variando de formas campestres às formações florestais, como por exemplo os campos limpos e cerradões. De acordo com a classificação Cardoso et al (2015), adaptada do estudo de Köppen, o clima no DF é classificado como tropical e apresenta duas estações bem definidas: período de seca (maio a setembro) e período chuvoso (de outubro a abril). Segundo, Fonseca et al. (2001), a temperatura média anual está em torno de 23,4°C e a precipitação média anual varia entre 1200 e 1700 mm, sendo que a estação chuvosa corresponde em média a 84% do total anual e os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro.

Com relação à hidrografia, o DF apresenta sete bacias, sendo elas a do Rio Corumbá, Rio Descoberto, Rio Paranoá, Rio São Marcos, Rio São Bartolomeu, Rio Preto e Rio Maranhão, conforme a Figura 17. Os dados pluviométricos que permitem o monitoramento das precipitações e vazões nas unidades hidrográficas são obtidos por meio de estações pluviométricas e fluviométricas, que são controladas por órgãos como INMET e Adasa. Estes dados são públicos e foram utilizados para a simulação de chuva contínua depois de tratados.

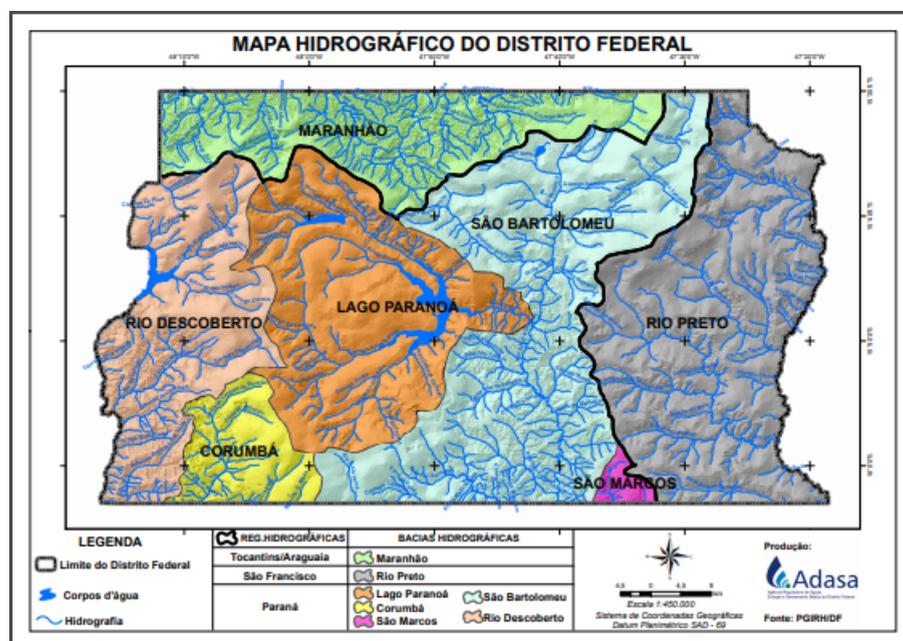


Figura 17. Mapa Hidrográfico do DF. (Fonte: Adasa,2018).

4.1.2 Geomorfologia

O estudo da geomorfologia é crucial na concepção do projeto de drenagem, pois ela dita o caminho da água no terreno, velocidade do escoamento e taxa de infiltração (Brito, 2020). O ZEE DF apresenta classificações de cinco compartimentos geomorfológicos para o DF, que podem ser observados na Figura 18:

(a) Planos Elevados: relevo plano a suave ondulado, com baixa densidade de drenagem, predominância de Latossolos, declividades inferiores a 10% e cotas altimétricas superiores aos 1100 metros.

(b) Planos Intermediários: padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades inferiores a 12% e cotas altimétricas entre 950 e 1050 metros.

(c) Vales dissecados: compreende as áreas com relevo ondulado a forte ondulado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Cambissolos, declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 metros.

(d) Rebordos: relevo ondulado, densidade de drenagem moderada, predominância de Cambissolos, declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1100 metros.

(e) Rampas Íngremes: relevo forte ondulado a escarpado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividade superior a 25% e cota altimétrica entre 800 e 1100 metros.

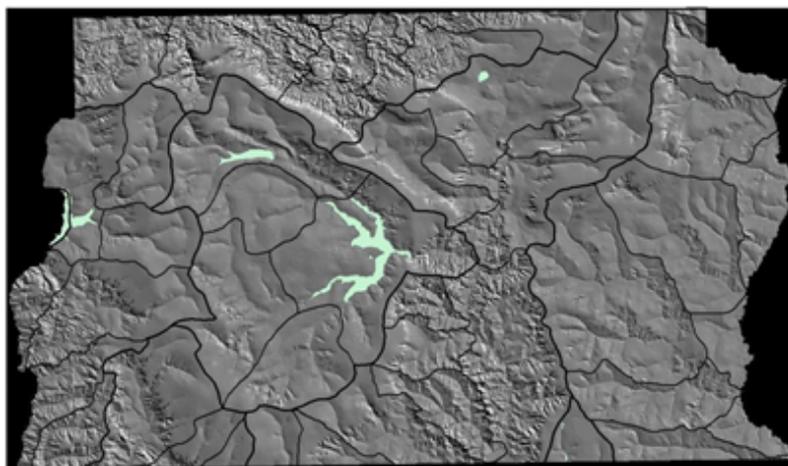


Figura 18. Relevo sombreado do DF. (Fonte: ZEE,2016)

É importante considerar que em regiões de solos menos permeáveis, como cambissolos, a rede de drenagem natural tende a ser mais extensa, devido a maior quantidade de escoamento superficial e ao relevo mais ondulado, que pode ser visto na Figura 18.

4.2 Modelagem com o PCSWMM

As simulações hidráulicas e hidrológicas foram realizadas no PCSWMM, utilizando-se a ferramenta 1D e 2D, de forma a analisar características da rede de drenagem considerando variações de declividades, modelos de infiltração e tipos de solo.

No PCSWMM 1D foram traçadas e dimensionadas as redes de drenagem, considerando as diferentes topografias. Também foram realizados testes para visualização de quais valores de CN e Horton levavam ao resultado mais próximo de 24,4 L/s.ha, o que possibilitou análises e comparações com o método racional. O PCSWMM 2D foi utilizado para possibilitar as simulações hidrodinâmicas da água excedente que escoar pela superfície do terreno, sendo possível visualizar o comportamento do escoamento quando se tem diferentes topografias e a rede de drenagem não funciona adequadamente.

No modelo foram realizadas simulações de eventos com tempos de retorno de 10 anos, para as simulações 1D, e 50 anos, para as simulações 2D referentes aos estudos de propagação de cheia. Além disso, foram utilizados os dados do solo tipo A e B, escoamento por meio de onda dinâmica e modelos de infiltração Curva Número e Horton.

Para a aplicação do modelo Curva Número foi necessário entrar com o valor de CN de acordo com o tipo de solo, considerando a abstração inicial, declividade do terreno, dentre outras informações. Já para o modelo de Horton foi necessário indicar a partir do tipo de solo de interesse a taxa de infiltração máxima, taxa de infiltração mínima, tempo, constante de decaimento, declividade do terreno, dentre outros.

4.2.1 Chuva de projeto

A chuva de projeto adotada foi calculada por meio dos blocos alternados utilizando-se a equação IDF (Intensidade, Duração, Frequência) do Distrito Federal elaborada pela CONCREMAT em 2008:

$$I = \frac{1574,7 \times TR^{0,207}}{(Tc+11)^{0,884}} \quad \text{Equação 13}$$

em que: I é a intensidade da chuva (mm/h), TR é o tempo de Retorno (anos), T_c é o tempo de concentração (minutos).

Para a avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF proveniente do método racional em comparação com as vazões obtidas pelos modelos Curva Número e Horton, utilizou-se um tempo de retorno de 10 anos e duração da chuva de 1 h. A chuva foi discretizada em blocos alternados com intervalos de 5 minutos e a lâmina total precipitada neste caso foi de 58,57 mm.

Já para as análises referentes às declividades, utilizou-se um tempo de retorno de 10 anos e duração da chuva de 24h, pois a adoção desses valores possibilita uma avaliação dos impactos causados por uma cheia de maior duração, o que é importante para verificação do funcionamento de estruturas de amortecimento. A chuva de projeto de 10 anos de tempo de recorrência foi discretizada em blocos alternados de intervalos de 5 minutos e duração de 24 horas, com uma lâmina total precipitada de 97,6 mm, conforme ilustrado na Figura 19.

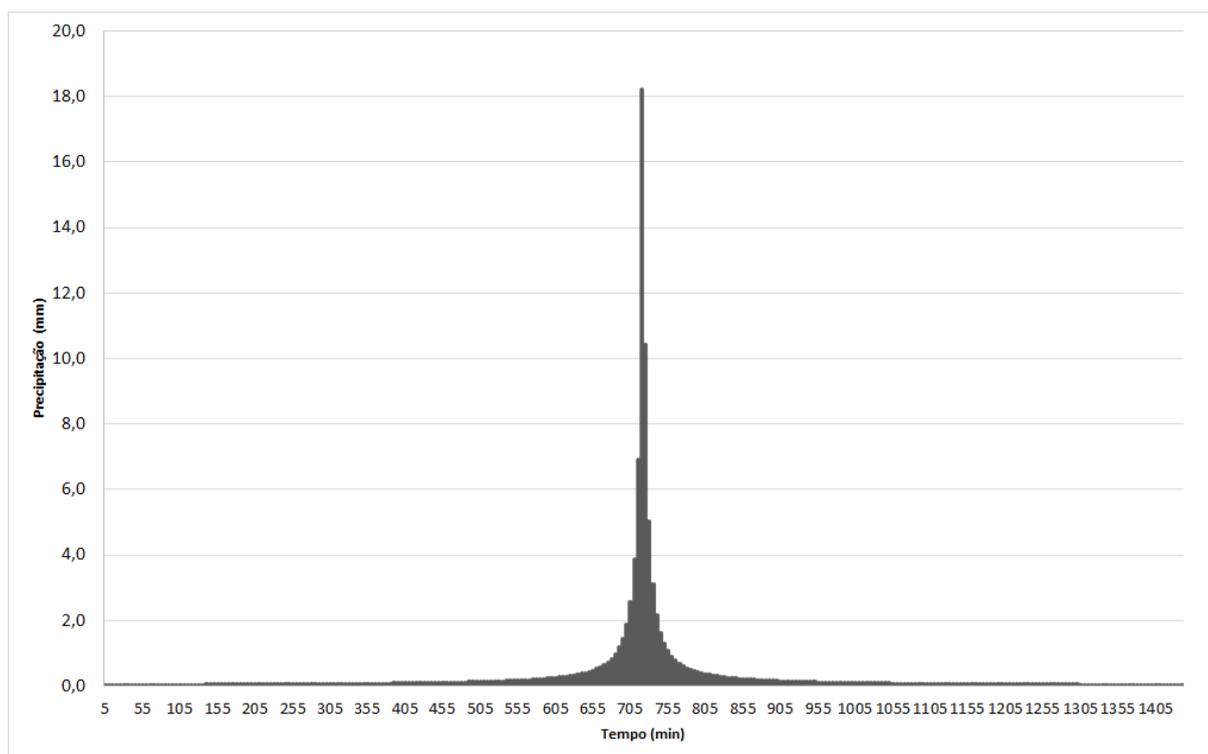


Figura 19. Hietograma de projeto para uma chuva com tempo de retorno igual a 10 anos e tempo de duração de 24 horas, elaborada a partir da IDF sugerida pelo PDDU.

Nas observações referentes a propagação de cheias adotou-se um tempo de retorno de 50 anos e duração da chuva de 24h, de forma a oferecer condições para visualização do que ocorre

quando a rede não consegue suportar toda a quantidade de águas pluviais. Nesse caso, a chuva de projeto foi discretizada em blocos alternados de intervalos de 5 minutos, com uma lâmina total precipitada de 136,14 mm.

4.2.2 Parâmetros de projeto

A rede de drenagem foi traçada de acordo com a topografia obtida para cada declividade de interesse. A inserção dos modelos digitais de elevação do terreno no PCSWMM permitiu o uso de ferramentas que aplicaram a declividade de interesse no terreno do loteamento e as cotas nos poços de visita. Por meio disso, tornou-se possível dimensionar a rede de drenagem para cada situação, buscando-se seguir os parâmetros especificados pelo Termo de Referência da NOVACAP (NOVACAP, 2019) e alguns parâmetros visando ao melhor funcionamento da rede de drenagem, sendo eles:

Declividade mínima da rede: 0,5%

Diâmetro mínimo: 800 mm

Diâmetro máximo: 2200 mm

Profundidade mínima adotada para os poços de visita de 1,50 m

Recobrimento: 1,5 vezes o diâmetro

Rugosidade da Tubulação de Concreto: $n = 0,015$

Rugosidade da Tubulação de Tunnel Liner: $n = 0,023$

Vazão: limitada a 82% da capacidade do conduto

Velocidade máxima: 6,0 m/s

O dimensionamento foi feito por meio da estimativa de um diâmetro inicial e a partir disso verificava-se o atendimento das condições. Caso os critérios não fossem atendidos repetia-se o processo de forma iterativa.

4.3 Avaliação da vazão de Pré-Desenvolvimento do DF

Para a avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF primeiramente foi realizado o cálculo que levou ao valor regulamentado no DF de 24,4 L/s.ha, no qual utilizou-se o método racional.

O próximo passo foi o uso do SWMM para simular a aplicação dos modelos de infiltração Curva Número que resultaram no valor de vazão de pré-desenvolvimento do DF. Com base

nessas informações buscou-se realizar correlações entre os valores obtidos para os diferentes tipos de solo classificados pela USDA e analisou-se os resultados de vazão gerados a partir dessas correlações para condições em que o solo estivesse com umidade média ou próximo à saturação. Em paralelo, as mesmas simulações foram efetuadas em uma planilha de cálculos do modelo SCS-CN, de forma que pudesse ser feita uma comparação com os valores obtidos pelo SWMM.

Para o modelo de Horton buscou-se na literatura referências sobre valores dos parâmetros para os grupos de solos do Cerrado. A partir disso, foram realizadas as simulações no SWMM, observados e analisados os resultados.

Nas simulações, tanto para o modelo CN quanto para Horton, foram consideradas as mesmas condições que foram usadas no cálculo da vazão de pré-desenvolvimento do DF: área de contribuição de 100 ha, tempo de retorno de 10 anos e tempo de duração da chuva de 1 h.

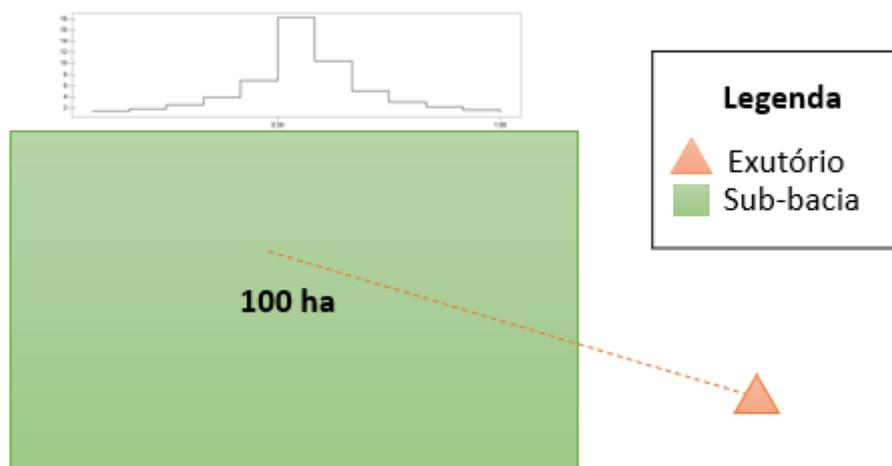


Figura 20. Modelo utilizado para simulações com Curva Número e Horton.

Primeiramente foi testado no SWMM qual valor de CN, com os mesmos requisitos utilizados no método racional, levava ao resultado de 24,4 L/s.ha. Por meio disso, analisou-se a tabela de valores de CN do USDA para vegetação mais próxima do cerrado, verificou-se qual valor de CN para cada tipo de cobertura vegetativa mais se aproximava do CN obtido na simulação do SWMM, observou-se qual tipo de solo correspondia a esse valor e fez-se correlações para encontrar os valores de CN para os outros tipos de solo. Com os valores de CN obtidos para os outros tipos de solo foram feitas novas simulações para visualização das vazões geradas.

O processo foi repetido para o modelo de Horton, de forma que utilizou-se os parâmetros de referência para o cerrado e verificou-se quais foram as vazões provenientes. Essa sistematização permitiu comparar o valor de vazão regulamentado pelo DF, 24,4 L/s.ha, que foi calculado pelo método racional com os valores de vazões obtidos por meio da aplicação de outros modelos de infiltração para diferentes tipos de solo.

4.4 Influência da declividade no escoamento

O estudo foi realizado utilizando modelagem computacional, com o software SWMM, onde foram desenvolvidos o traçado e dimensionamento da rede de drenagem, variação do tipo de solo, declividade do terreno e modelo de infiltração para verificar o impacto de cada uma destas métricas na geração de escoamento superficial.

Para simulação de eventos adotou-se a chuva de projeto com período de retorno de 10 anos obtida através da equação IDF do PDDU e discretizada pelo método dos blocos alternados com intervalos de 5 minutos. Para os dados de entrada do modelo SWMM foram utilizados os dois tipos predominantes de solos do DF, Latossolos (considerado como tipo A da tabela do SCS) - e Cambissolos (considerado, a favor da segurança, como tipo B), que ocupam uma área superior a 80% do território.

O modelo de loteamento utilizado no trabalho foi derivado do modelo RH5 de Brito (2020), que se baseia em um loteamento de classe média com lotes de até 500 m², residências unifamiliares, menos de 70% de taxa de impermeabilização do lote com pequenos parques no centro do loteamento e traçado urbanístico perpendicular. Esse modelo foi elaborado através do desenho das quadras com auxílio do CAD e o mapeamento do uso e ocupação foi realizado com o GIS, utilizando as estruturas urbanas como unidade de planejamento de referência conforme Castro (2017).

O relevo estudado foi do tipo planar, predominante no DF, sendo que as variações na topografia do terreno determinaram o traçado da rede, dimensionamento e o direcionamento das águas. As normas estabelecidas por instrumentos competentes – como o Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF (PDDU- DF) e o Termo de Referência da NOVACAP – foram observadas e aplicadas para o dimensionamento da rede de drenagem. As curvas de nível para representação de diferentes declividades do terreno foram elaboradas por meio de desenhos no CAD e os modelos de elevação foram obtidos com as ferramentas do GIS.

A partir de curvas de nível desenhadas no CAD com angulações à 45° e 90° em relação ao sentido dos arruamentos dos loteamentos foram obtidos os modelos digitais de elevação do terreno no GIS para as declividades de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%. Os diferentes modelos de elevação do terreno utilizados permitiram analisar a influência no escoamento em função da declividade. As curvas de nível com diferentes angulações permitiram estudar a influência no escoamento quando se tem diferentes posições do loteamento em relação às topografias. Exemplos dos modelos digitais de elevação do terreno gerados, com curvas de nível à 45° e 90°, podem ser visualizados nas Figuras 21 e 22.

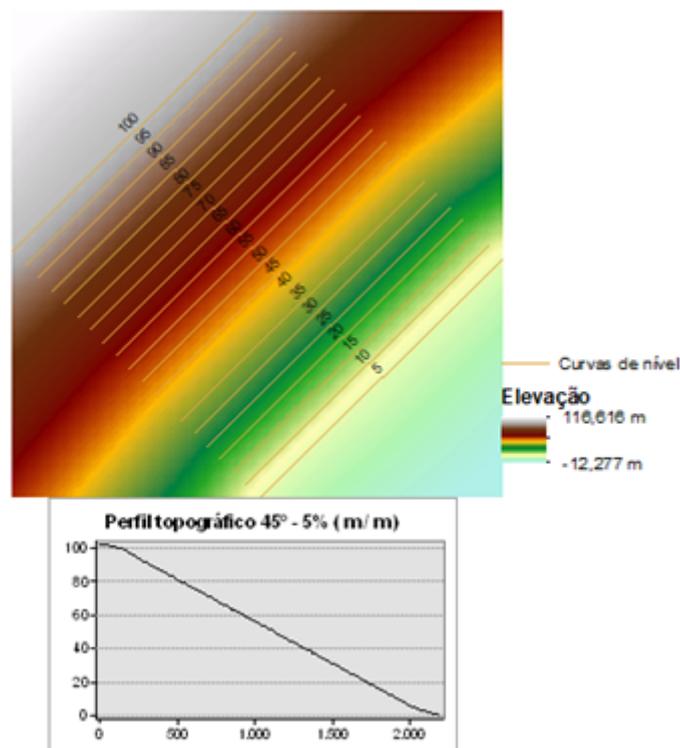


Figura 21. Modelo de elevação do terreno com declividade de 5% e curvas de nível à 45° em relação ao sentido dos arruamentos.

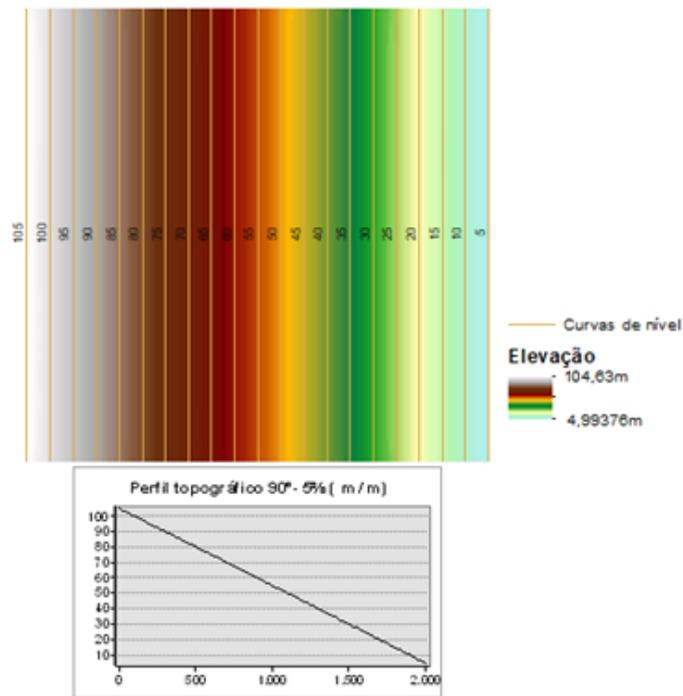


Figura 22. Modelo de elevação do terreno com declividade de 5% e curvas de nível à 90° em relação ao sentido dos arruamentos.

Os modelos digitais de elevação do terreno foram aplicados em loteamentos de 20 ha, 60 ha e 100 ha oriundos de recortes do modelo RH 5 de Brito (2020), Figura 24, sendo realizadas simulações para cenários com o solo tipo A (latossolos) e B (cambissolos) considerando cada uma das declividades de interesse e os modelos de infiltração Curva Número. Dessa forma, para cada loteamento foi derivada uma matriz com com 20 resultados que permitiram visualizar o escoamento gerado em cada situação de interesse. O detalhamento dos arranjos simulados podem ser visualizados na figura 23.

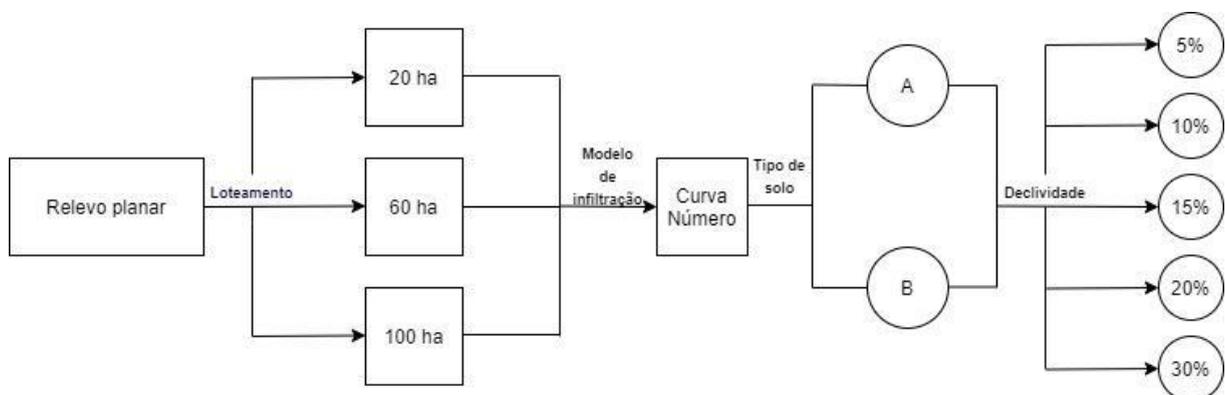


Figura 23. Árvore de casos para análise da influência da declividade.

Os modelos dos loteamentos utilizados nas simulações estão presentes nas figuras 25 a 30.

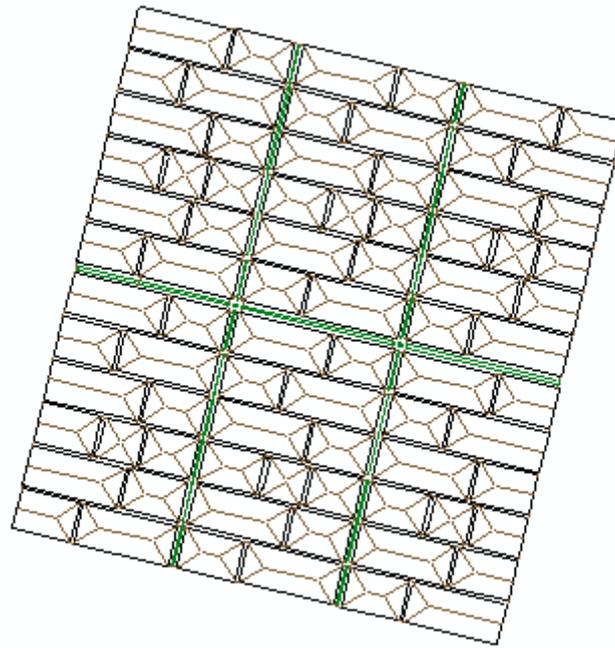


Figura 24. Loteamento RH5 utilizado como base para as modelagens. (Fonte: Brito, 2020)

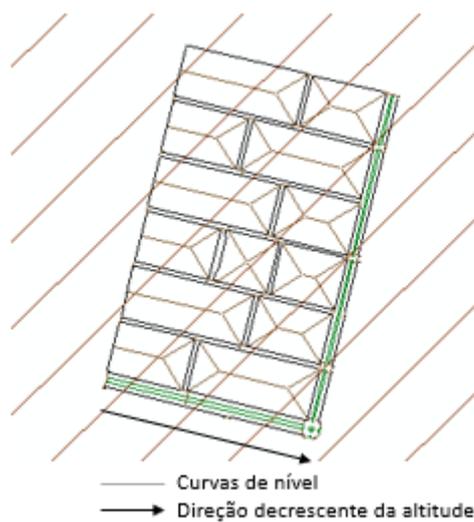


Figura 25. Loteamento RH5 de 20 ha com curvas de nível à 45°.

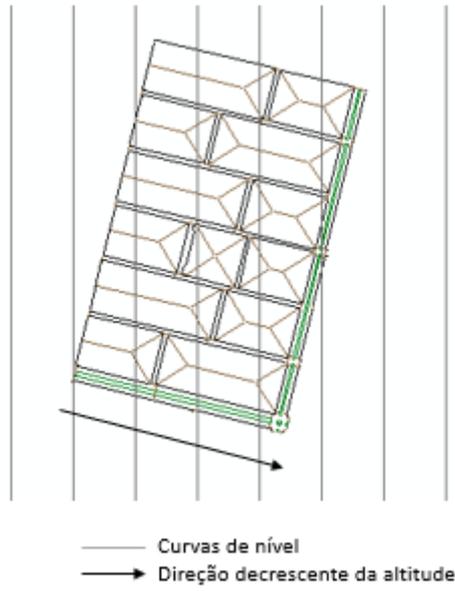


Figura 26. Loteamento RH5 de 20 ha com curvas de nível à 90°.

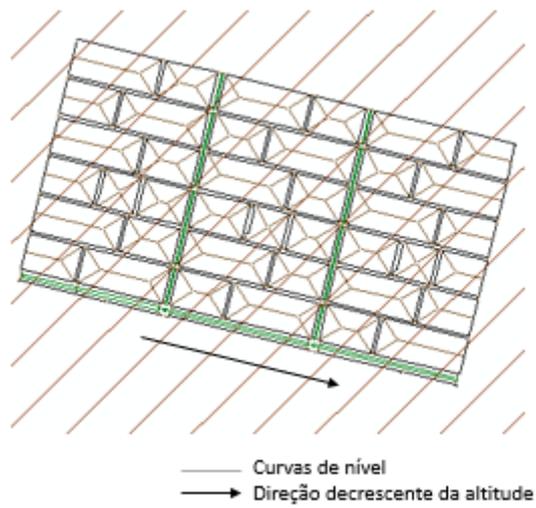


Figura 27. Loteamento RH5 de 60 ha com curvas de nível à 45°.

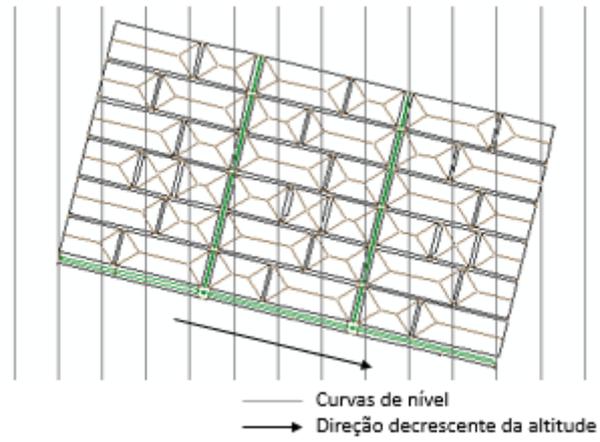


Figura 28. Loteamento RH5 de 60 ha com curvas de nível à 90°.

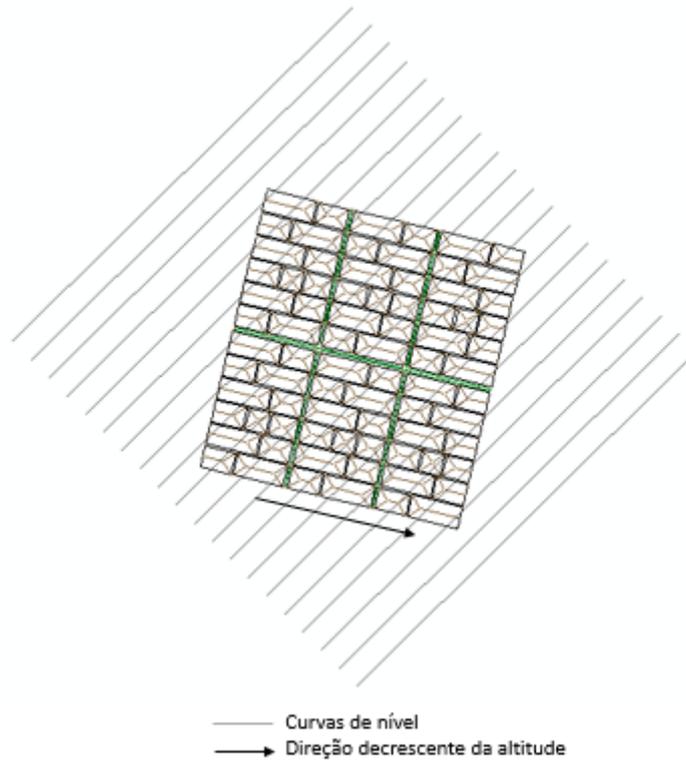


Figura 29. Loteamento RH5 de 100 ha com curvas de nível à 45°.

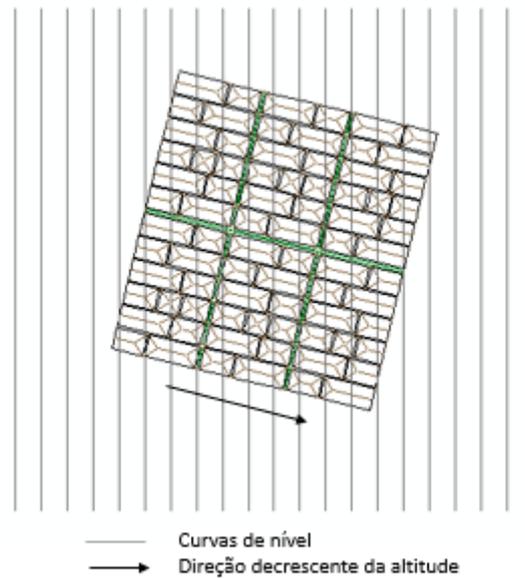


Figura 30. Loteamento RH5 de 100 ha com curvas de nível à 90°.

Ao inserir o modelo digital de elevação do terreno no SWMM e obter para o loteamento a declividade de interesse e a cota dos poços de visita foram dimensionadas as redes de drenagem, buscando-se atender aos critérios exigidos que levassem a um bom funcionamento da rede.

4.5 Influência da ocupação e declividade na propagação de cheia

Utilizando-se o modelo RH 5 de Brito (2020) e considerando-se uma área de 100 ha, Figura 24, foi adotado um tempo de retorno de 50 anos e um redimensionamento da rede de forma a possibilitar a ocorrência de inundações e a visualização da propagação de cheia em função de diferentes declividades e da presença de construções que funcionam como obstruções. Essas simulações foram realizadas por meio da ferramenta 2D presente no PCSWMM, na qual foi preciso apontar para o loteamento, dentre outras coisas, as delimitações, obstruções e modelos de elevação.

A malha de nós do PCSWMM 2D foi definida a partir dos modelos digitais de elevação dos terrenos fornecidos como dados de entrada para o programa. Além disso, foram adotadas outras características da área de estudo como, por exemplo, contorno e obstruções físicas à passagem de água. Com a malha feita foi possível conectar a rede dimensionada no 1D ao 2D por meio de orifícios que ligaram os PVs da rede de drenagem aos nós da malha 2D. Quando um poço atingia sua capacidade máxima, na situação em que a rede não suportava todo

escoamento, a água excedente foi direcionada para a malha e passou a compor o escoamento superficial da área de interesse.

5 RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados provenientes dos estudos e simulações no trabalho. Os resultados estão dispostos nos seguintes itens: avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF, influência da declividade no escoamento e influência da ocupação e declividade na propagação de cheia.

O item 5.1, referente a avaliação da vazão de pré-desenvolvimento do DF, é dividido em dois subitens para facilitar a visualização dos resultados no que diz respeito aos modelos Curva Número e Horton.

A influência da declividade no escoamento é apresentada no item 5.2, no qual mostra-se os resultados para simulações com loteamentos de 20 ha, 60 ha e 100 ha, considerando a aplicação de diferentes declividades no terreno e curvas de nível com angulações à 45° e 90° em relação ao sentido dos arruamentos.

O item 5.3 aborda os resultados que dizem respeito à influência do loteamento de 100 ha quando se tem uma rede de drenagem que não funciona adequadamente, considerando diferentes declividades e curvas de nível com angulações à 45° e 90° em relação à orientação das quadras.

5.1 Avaliação da vazão de Pré-Desenvolvimento do DF

Esta seção discorre sobre os resultados obtidos para as vazões de pré-desenvolvimento considerando os modelos de infiltração Curva Número, item 5.1.1, e Horton, item 5.1.2. São expostos os resultados considerando diferentes tipos de solos, condições de umidade e coberturas vegetativas.

5.1.1 Curva Número

Para as simulações adotou-se uma área de 100 ha com exutório a jusante, chuva de projeto da equação IDF da CONCREMAT (2008) com tempo de retorno de 10 anos, duração da chuva de 1h e lâmina precipitada de 58,57 mm. Além disso, utilizou-se uma planilha contendo os cálculos do SCS-CN de forma a se ter um maior apoio nas simulações do SWMM e uma comparação entre os resultados obtidos. Na planilha, o valor de CN II igual a 68 foi o que resultou em uma vazão mais próxima dos 24,4 L/s.ha, enquanto que pelo SWMM o valor de CN II foi igual a 69, o que mostra grande proximidade entre os resultados. A partir disso,

explorou-se a tabela de valores de CN da USDA, observou-se o tipo de solo que mais se adequava às características do cerrado e apurou-se o valor que mais se aproximava do CN II igual a 68 para as condições de pouca cobertura do solo (< 50 %), média cobertura (50% a 75% de cobertura do solo) e boa cobertura (> 75% de cobertura do solo). Depois de feita essa observação identificou-se o tipo de solo correspondente ao valor de CN II de maior aproximação e realizou-se correlações, com base nos valores da tabela, para encontrar os valores de CN II referentes aos outros tipos de solo. Os valores de CN obtidos por meio dos cálculos na planilha podem ser observados nas Tabelas 9 e 10, sendo que esses valores foram próximos e condizentes com os resultados encontrados no SWMM.

Tabela 9. Visualização dos valores de CN tabelados e análise do mais próximo ao valor de CN = 68 obtido na planilha.

Tipo de solo	CN tabelado (USDA) Vegetação arbustiva misturada ao mato e erva-daninha				CN mais próximo do CN=68
	A	B	C	D	
Baixa cobertura	48	67	77	83	67 - Solo B
Média cobertura	35	56	70	77	70 - Solo C
Alta cobertura	30	48	65	73	65 - Solo C

Tabela 10. Valores obtidos pelas correlações para CN= 68.

Vegetação arbustiva	CN II				CN III			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Baixa cobertura	49	68	78	84	69	83	89	92
Média cobertura	33	54	68	75	53	73	83	87
Alta cobertura	33	51	68	74	53	70	83	86

Com os valores de CN II obtidos pelas correlações foram realizadas novas simulações no PCSWMM e na planilha para analisar os valores de vazões geradas, o que permitiu uma

comparação com o valor de 24,4 L/s.ha adotado no DF. A maior parte dos valores foram próximos aos obtidos pela planilha, sendo que os resultados podem ser verificados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11. Valores de vazões obtidos pelo modelo CN no SWMM.

CN II	Vazão (L/s . ha)			
	A	B	C	D
Tipo de solo				
Baixa cobertura	-	21,3	57,11	80,8
Média cobertura	-	-	21,3	43,6
Alta cobertura	-	-	21,3	39

Tabela 12. Valores de vazões obtidos pelo modelo SCS - CN na planilha.

CN II	Vazão (L/s . ha)			
	A	B	C	D
Tipo de solo				
Baixa cobertura	0,37	24,31	52,70	76,68
Média cobertura	-	3,15	24,31	42,82
Alta cobertura	-	1,17	24,31	39,81

Percebe-se que para o solo tipo A (latossolo), e B (cambissolo), as simulações no PCSWMM não geraram escoamentos para a maioria dos tipos de ocupação. Segundo Brito (2020), um dos motivos é a alta permeabilidade do solo e consideração do parâmetro de abstração inicial, que se refere à capacidade de retenção de água pelo solo, ser muito alto mesmo ao considerar uma condição de solo úmido para esses casos. Ou seja, os valores de CN mais baixos resultam em maiores abstrações iniciais, mesmo ao considerar uma condição crítica, fazendo com que no programa toda a lâmina de água se infiltre.

No caso da planilha, o solo tipo A não gerou escoamentos para as situações de média cobertura e alta cobertura vegetativa, pois nesses casos não foi obedecida a condição do modelo SCS-CN de que a precipitação total acumulada deve ser maior que a abstração inicial ($P > 0,2.S$). Já para o solo tipo B, nos casos em que não foi gerado escoamento nas simulações do PCSWMM, os resultados da planilha se mostram abaixo dos 24,4 L/s.ha. Os hidrogramas

gerados para cada condição no PCSWMM considerando a condição de umidade média podem ser visualizados nas Figuras 31, 32 e 33.

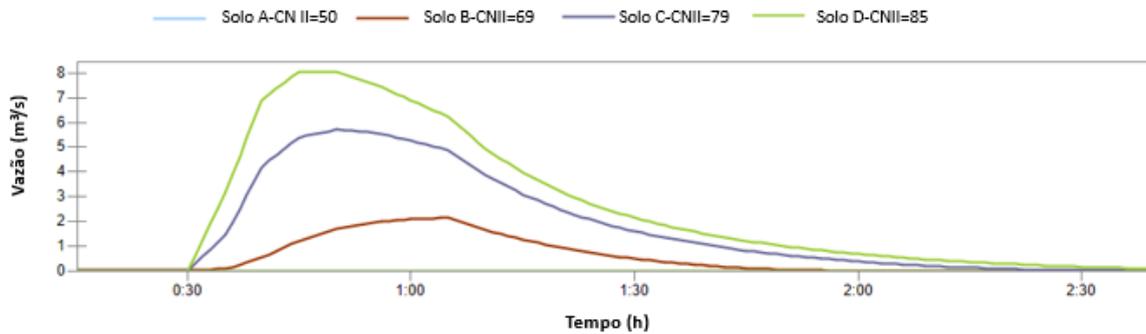


Figura 31. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN II dos solos com baixa cobertura.

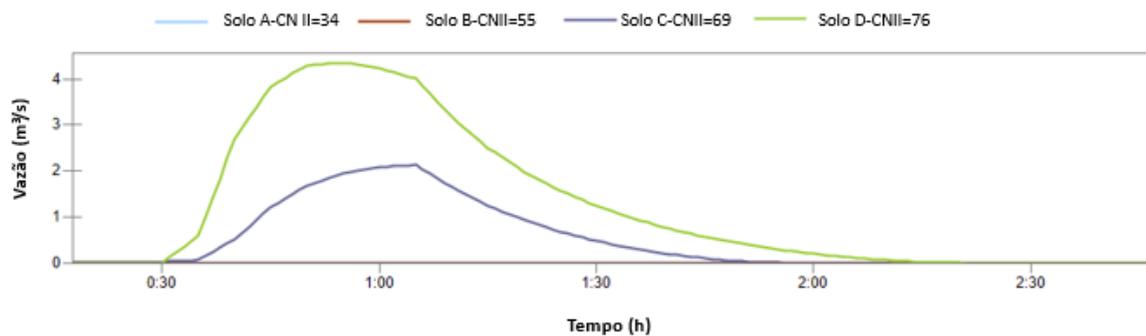


Figura 32. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores CN II dos solos com média cobertura.

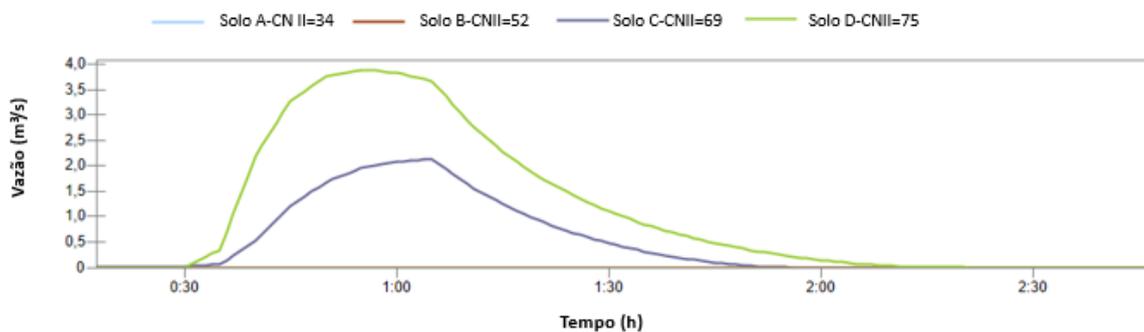


Figura 33. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores CN II dos solos com alta cobertura.

Com os valores de CN III para cada situação de interesse, Tabela 10, foram simuladas as vazões geradas quando o solo está saturado ou próximo da saturação. Os valores podem ser reparados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13. Valores de vazões obtidos pelo modelo CN do SWMM.

CN III	Vazão (L/s . ha)			
Tipo de solo	A	B	C	D
Baixa cobertura	22,70	60,40	110,20	141,20
Média cobertura	0,60	36,60	60,50	90,80
Alta cobertura	0,60	26,50	60,50	82,30

Tabela 14. Valores de vazões obtidos pelo modelo SCS - CN na planilha.

CN III	Vazão (L/s . ha)			
Tipo de solo	A	B	C	D
Baixa cobertura	26,60	72,24	101,95	120,01
Média cobertura	15,7	36,92	72,24	91,18
Alta cobertura	2,39	29	72,24	86,13

Os hidrogramas oriundos dessas simulações no SWMM constam nas Figuras 34, 35 e 36.

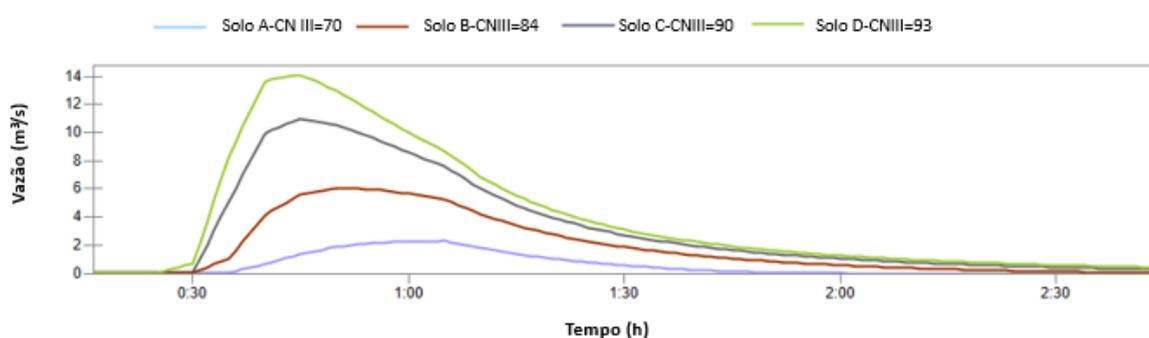


Figura 34. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN III dos solos com baixa cobertura.

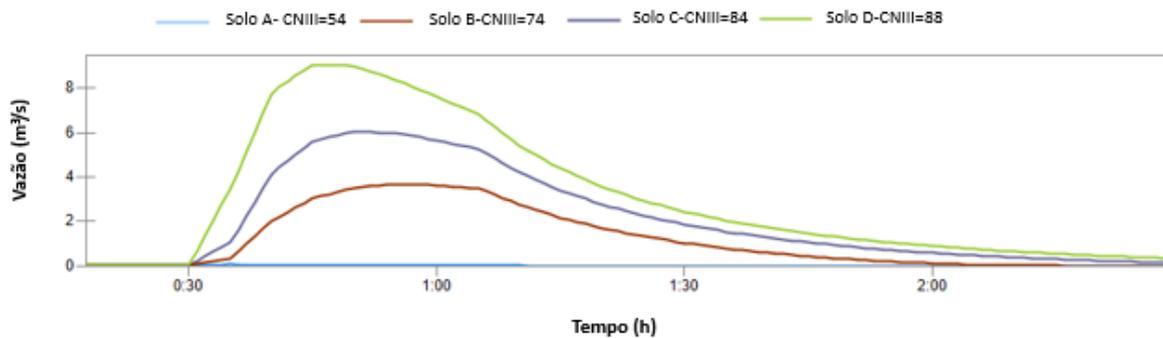


Figura 35. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN III dos solos com média cobertura.

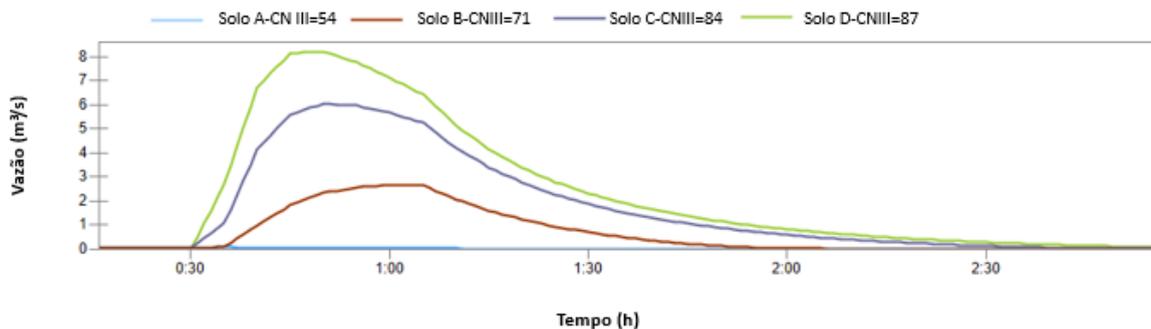


Figura 36. Hidrogramas de vazões obtidos para os valores de CN III dos solos com alta cobertura.

Por meio dos resultados, considerando-se as condições de solo com umidade média e alta, observou-se que cada tipo de solo e cobertura gerou um valor de vazão diferente, sendo que solos mais permeáveis resultaram em vazões menores. Dessa forma, tanto para os valores obtidos pela planilha quanto para os valores obtidos no SWMM, a vazão de pré-desenvolvimento igual a 24,4 L/s.ha foi atendida para o solo A e B em condições de umidade média. Já para os solos do tipo C e D em alguns tipos de ocupação a vazão resultante se mostra bem acima da vazão de pré-desenvolvimento adotada no DF. Na condição de solo úmido, foi possível notar que para a maioria das situações as vazões são superiores ao valor da vazão de pré-desenvolvimento do DF. Dessa forma, com a aplicação do modelo SCS - CN na planilha e CN no PCSWMM verificou-se que o tipo de solo, sua ocupação, cobertura, bem

como a condição de umidade antecedente desse solo influenciam de maneira significativa no escoamento superficial gerado pela precipitação.

5.1.2 Horton

Um estudo de Fiori *et al.* (2010) apresentou resultados sobre o comportamento médio da condutividade hidráulica dos solos do cerrado goiano e propôs uma classificação de grupos de solos com comportamento hídrico homogêneo. Para o grupo 1 e 2, que se referem basicamente aos solos do tipo A, a condutividade hidráulica média para superfície é de 120 mm/h. Para o grupo 3, correspondente aos solos do tipo B, a condutividade hidráulica média é de aproximadamente 50 mm/h. De acordo com o estudo, o grupo 4, que diz respeito aos solos do tipo C, apresenta uma condutividade hidráulica próxima aos 4 mm/h. Por fim, o grupo 5, associado aos solos do tipo D, apresentou uma condutividade hidráulica saturada de 0,4 mm/h.

Neste trabalho, foi considerada a condição de solo úmido próximo à saturação e foi seguida a recomendação do manual do SWMM de que para essa condição o indicado é a adoção de um valor de taxa de infiltração máxima (f_o) próximo ao valor da taxa de infiltração mínima (f_c). Os valores de vazões bem como seus hidrogramas oriundos das simulações podem ser visualizados na Tabela 15 e na Figura 37.

Tabela 15. Parâmetros de Horton

Parâmetros da fórmula de Horton	Classificação hidrológica do solo			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Taxa de infiltração final do solo úmido: f_c (mm/h)	120	50	4	0,4
Fator de forma-expoente $k (h^{-1})$	2	2	2	2
Vazão (L/s.ha)	15,7	78,6	191,5	203,60

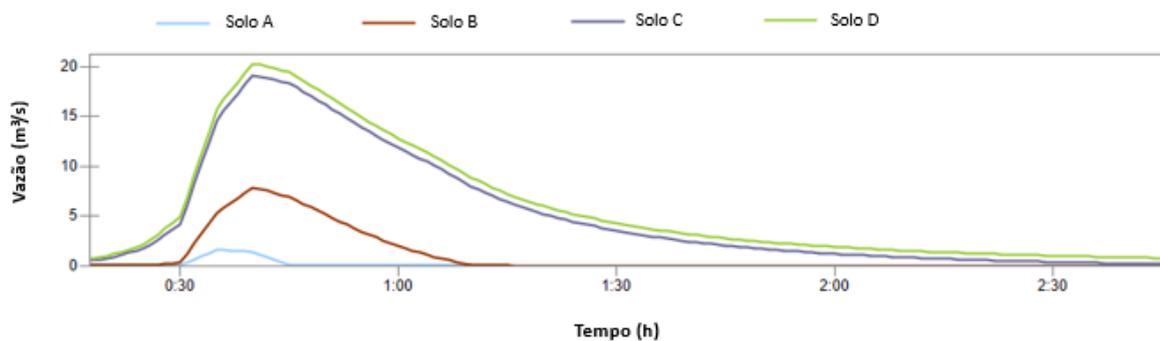


Figura 37. Hidrogramas das vazões geradas pelo modelo de Horton.

Considerando que os resultados foram feitos com base na condição do solo próximo à saturação, os valores de vazões alcançados para o solo B, C e D foram bem superiores ao valor regulamentado pelo DF. Esses valores, embora sejam diferentes especialmente para os solos C e D, estão na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos pelas simulações com o modelo Curva Número.

Dessa forma, com a aplicação de diferentes modelos para estudo da infiltração verificou-se que é fundamental considerar as diferentes condições e tipos de solos, na fixação das vazões de pré-desenvolvimento para que essas características sejam incorporadas nos parâmetros de projeto. Em concordância com os estudos de Brito (2020) confirma-se a hipótese de que um valor único de vazão de pré-desenvolvimento estabelecido no Distrito Federal não é representativo para todos os tipos de solos, especialmente os menos permeáveis, o que leva à necessidade de obras e medidas superdimensionadas para atender a condições pouco realísticas de pré-desenvolvimento.

5.2 Influência da declividade no escoamento

Para a análise da influência da declividade sobre o escoamento foi empregada uma chuva com tempo de retorno de 10 anos e duração de 24 h, de forma a se ter uma melhor avaliação dos impactos causados por uma chuva de maior duração. Os valores de CN adotados para os solos A e B foram 77 e 85, correspondentes a bairros com mais de 65% de cobertura, conforme a tabela 16. A concepção de projeto de traçado de redes dimensionadas para cada loteamento constam nas Figuras 38, 39 e 40.

Tabela 16. CN para as diversas coberturas e tipos de solo.

Cobertura	Solo A	Solo B	Solo C	Solo D
Espaço aberto				
Cobertura gramada <50%	68	79	86	89
Cobertura Gramada entre 50% e 75%	49	69	79	84
Cobertura Gramada maior que 75%	39	61	74	80
Áreas Pavimentadas				
Distrito Urbano Comercial com 85% de área Impermeável	89	92	94	95
Distrito Industrial com 72% de área impermeável	81	88	91	93
Bairros residenciais com 65% de impermeabilização	77	85	90	92
Bairros residenciais com 38% de impermeabilização	61	75	83	87

Fonte: USDA, 1986.

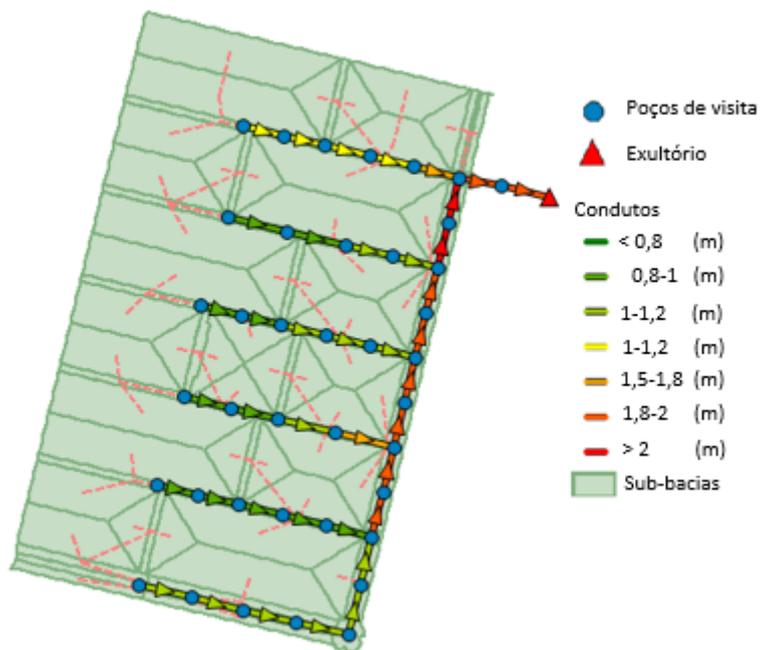


Figura 38. Exemplo de dimensionamento de rede de drenagem para loteamento de 20 ha.

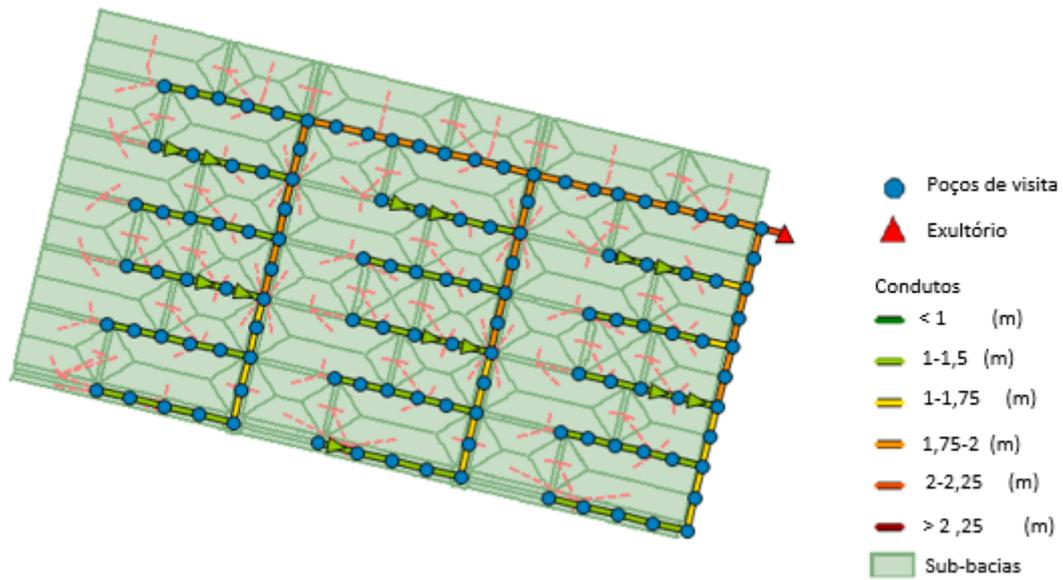


Figura 39. Exemplo de dimensionamento de rede de drenagem para loteamento de 60 ha.

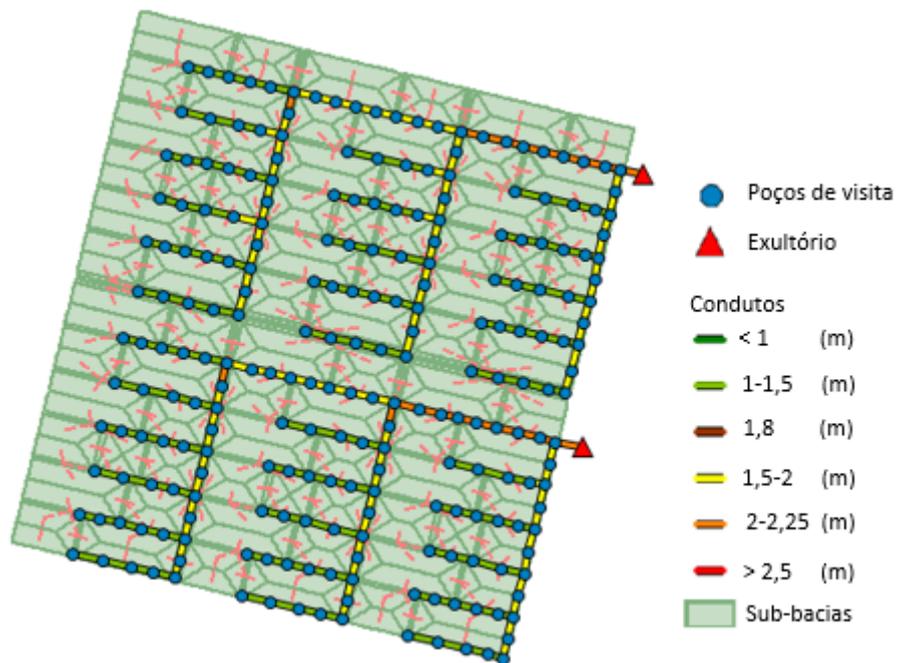


Figura 40. Exemplo de dimensionamento de rede de drenagem para loteamento de 100 ha.

Foram realizadas simulações para as declividades de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, de acordo com a árvore de casos apresentada na Figura 23, sendo que as redes de drenagem foram dimensionadas de acordo com as características de cada declividade de interesse. Os resultados obtidos para os loteamentos de 20 ha, 60 ha e 100 ha podem ser verificados nas Tabelas 17 a 22.

Tabela 17. Valores de vazões para o loteamento de 20 ha com curvas de nível à 90°.

Declividade	CN	
	Solo A (L/s.ha)	Solo B (L/s.ha)
5 %	284	337,7
10%	285,6	338,9
15%	285,7	339,1
20%	285,75	339,4
30%	285,85	339,45

Tabela 18. Valores de vazões para o loteamento de 20 ha com curvas de nível à 45°.

Declividade	CN	
	Solo A (L/s.ha)	Solo B (L/s.ha)
5 %	289,30	345,30
10%	288,65	343,80
15%	288,50	343,80
20%	288,40	343,35
30%	288,50	343

Tabela 19. Valores de vazões para o loteamento de 60 ha com curvas de nível à 90°.

Declividade	CN	
	Solo A (L/s.ha)	Solo B (L/s.ha)
5 %	376,50	463,67
10%	398,33	464
15%	402,50	464,83
20%	404,67	467,50
30%	405	470

Tabela 20. Valores de vazões para o loteamento de 60 ha com curvas de nível à 45°.

Declividade	CN	
	Solo A (L/s.ha)	Solo B (L/s.ha)
5 %	386	468,33
10%	393,67	467,17
15%	395,5	467,5
20%	396,17	467,83
30%	396,17	470

Tabela 21. Valores de vazões para o loteamento de 100 ha com curvas de nível à 90°.

Declividade	CN	
	Solo A (L/s.ha)	Solo B (L/s.ha)
5 %	431,30	541,40
10%	453,60	550,20
15%	464,70	552,,90
20%	468,40	555,10
30%	468,90	564,30

Tabela 22. Valores de vazões para o loteamento de 100 ha com curvas de nível à 45°.

Declividade	CN	
	Solo A (L/s.ha)	Solo B (L/s.ha)
5 %	452,80	554,50
10%	473,30	554,70
15%	473,80	555,90
20%	474	556,70
30%	474,60	558,30

Pelos resultados foi possível perceber que as ocupações impactam no escoamento superficial, pois segundo Brito (2020) em uma bacia hidrográfica natural, com maior presença de cobertura vegetal e capacidade de infiltração, as vazões de escoamento superficial são menores. Além disso, a vegetação favorece a recarga dos aquíferos através da infiltração das águas pluviais, garantindo o escoamento de base dos corpos d'água.

De modo geral, percebeu-se que conforme a declividade aumentou o escoamento também se elevou, mas em pequenas magnitudes nas situações em que existem estruturas de drenagem. Como explicação tem-se o fato de que para topografias menos íngremes a água tende a infiltrar mais, enquanto para topografias mais acentuadas o fluxo de água apresenta maior velocidade, fazendo com que a água infiltre menos e o escoamento gerado seja maior. Essa resposta apresentou concordância com os estudos de Sharma et al. (1983), Chaplot & Le Bissonnais (2000) e Wang et al. (2018). Sharma et al. (1983) afirmaram que a infiltração vertical decresce com o aumento da declividade, pois ocorre um tempo menor para infiltração. Chaplot & Le Bissonnais (2000) defenderam que a infiltração vertical decresce com o aumento da declividade de maneira significativa, aumentando a velocidade do escoamento. Já para Wang et al. (2018), a infiltração vertical decresce com o aumento da declividade devido ao tempo de detenção.

Além disso, aconteceu um grande aumento do escoamento do solo tipo B em comparação com o solo tipo A, o que reforçou a ideia de que é necessário considerar nas análises referentes a infiltração o tipo de solo, ocupação, condição de umidade antecedente, características das chuvas locais, dentre outros fatores.

Um detalhe observado é que para o loteamento menor, 20 ha, o modelo SWMM não conseguiu ter uma boa sensibilidade quando comparado com as simulações para áreas maiores, 60 ha e 100 ha. Um dos motivos é que o intervalo de tempo de 5 minutos utilizado para chuva de projeto se mostrou elevado no caso do loteamento de 20 ha, pois em áreas menores o escoamento superficial é mais rápido, o que faz com que o intervalo de tempo da chuva de projeto precise ser menor nessas situações. Dessa forma, adotando-se um intervalo de tempo de 5 minutos o modelo aplicado para o loteamento com área menor não conseguiu captar de forma concisa o que realmente aconteceu com os escoamentos gerados quando se tinha diferentes declividades e posições do loteamento em relação ao terreno.

Devido às altas declividades, algumas velocidades obtidas após o dimensionamento das redes de drenagem foram superiores a 6 m/s, o que expôs a dificuldade de projetar redes de drenagem para locais com topografias íngremes. Além disso, verificou-se que para o solo tipo B, por ser menos permeável que o solo tipo A, a rede de drenagem requer maiores diâmetros devido às maiores vazões geradas.

5.3 Influência da ocupação e declividade na propagação de cheia

Para uma área de 100 ha foram executadas simulações para visualizar a propagação de cheia no caso em que a rede não funcionasse adequadamente e que a chuva fosse mais intensa, com tempo de retorno de 50 anos. Nos estudos foram utilizadas as características do solo tipo A, mais predominante no DF, com CN igual a 77. Os resultados obtidos estão expressos nas Figuras 41, 42, 43 e 44.

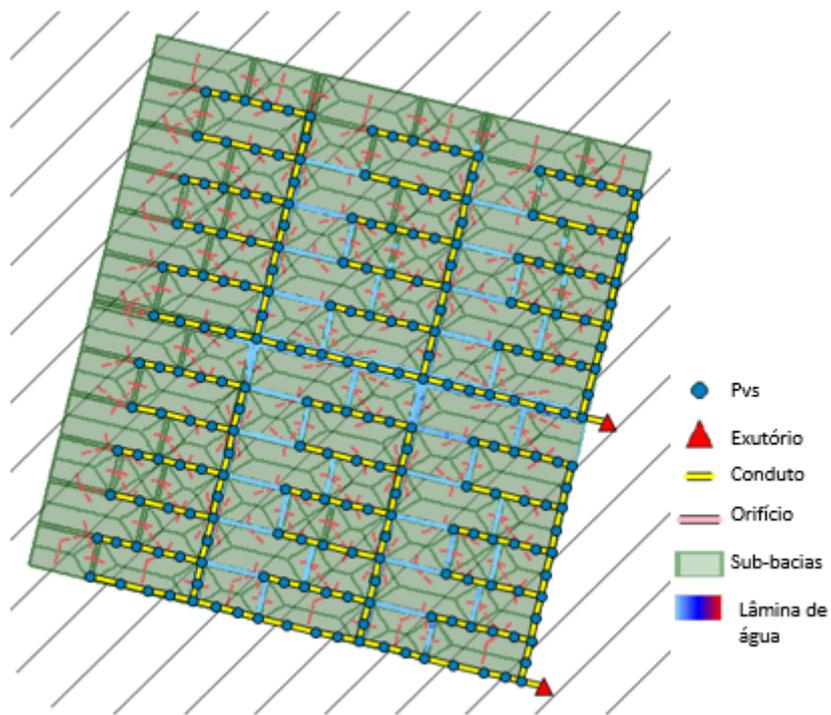


Figura 41. Propagação de cheia para curvas de nível à 45° e declividade de 5%.

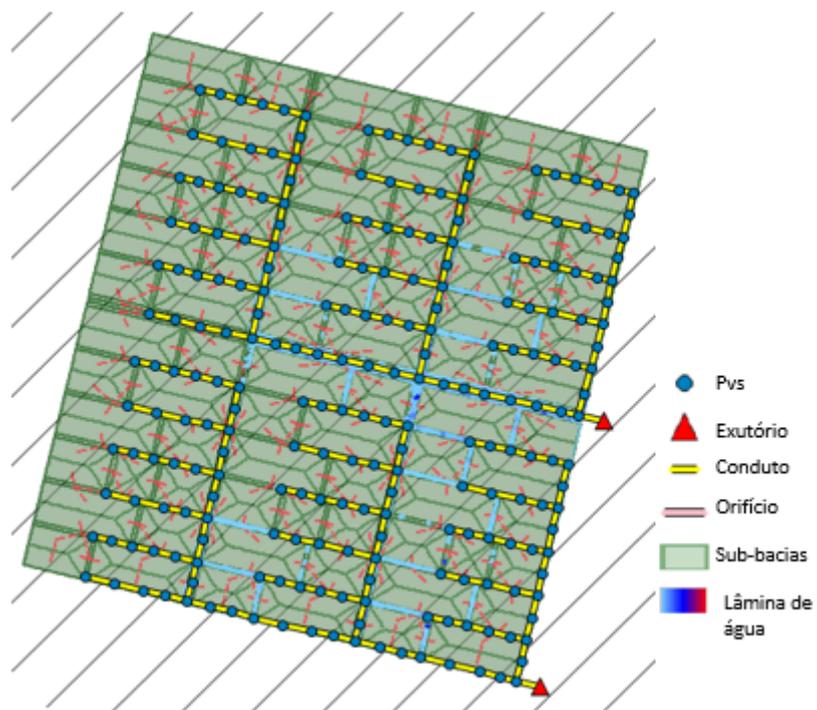


Figura 42. Propagação de cheia para curvas de nível à 45° e declividade de 20%.

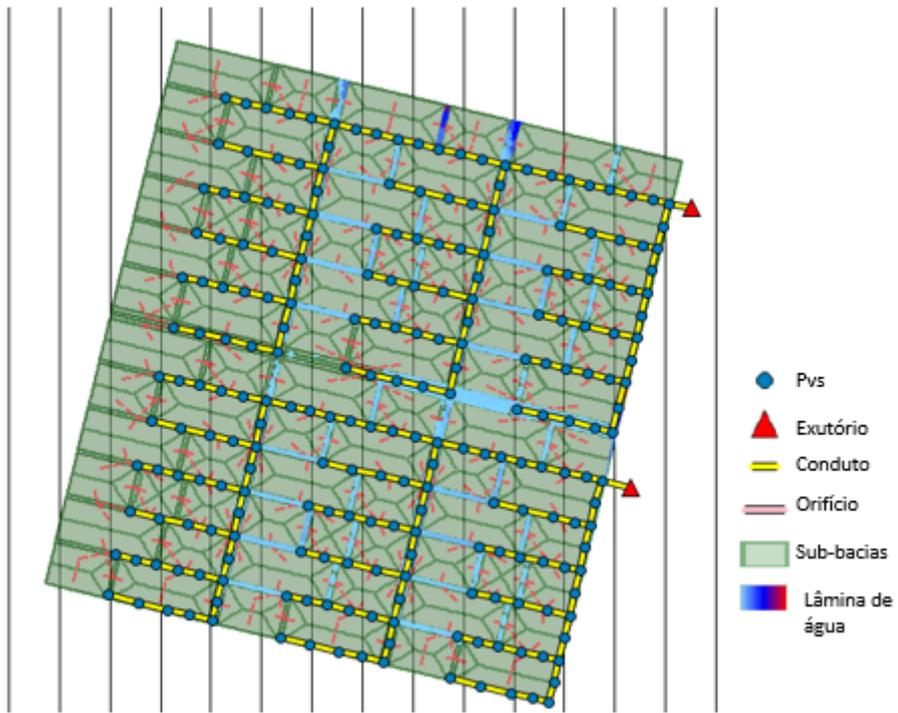


Figura 43. Propagação de cheia para curvas de nível à 90° e declividade de 5%.

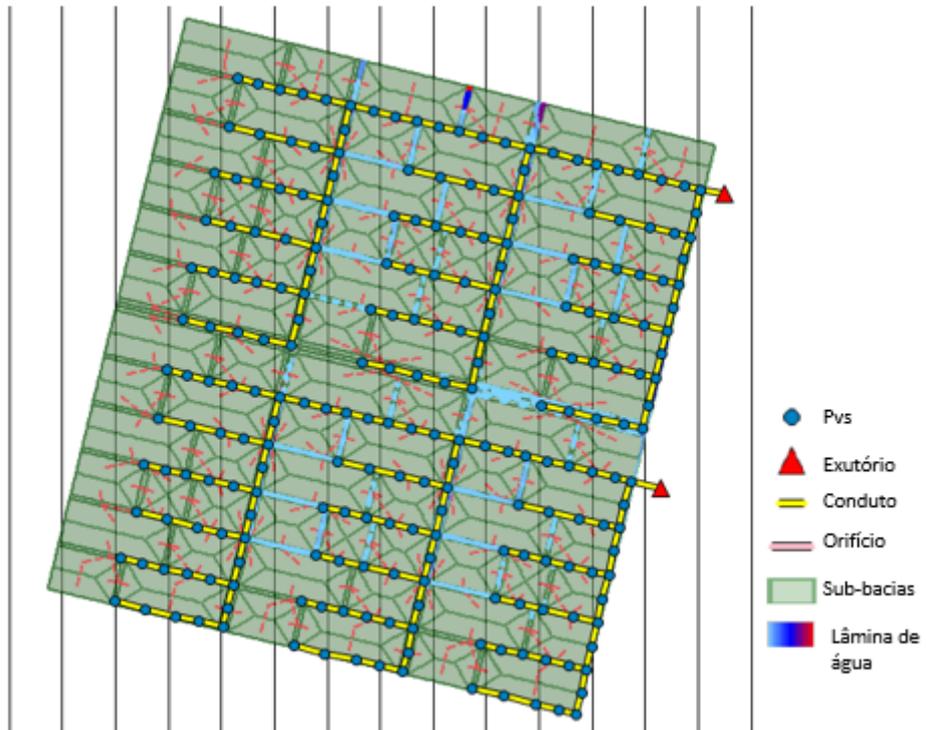


Figura 44. Propagação de cheia para curvas de nível à 90° e declividade de 20%.

Em ambos os casos, para curvas à 45° e 90° em relação ao sentido dos arruamentos dos loteamentos, foi percebido que para a declividade de 5% ocorreu um maior acúmulo de água, enquanto que para a declividade de 20% o acúmulo foi menor. Isso aconteceu porque para as maiores declividades a água escoar mais rapidamente devido a própria topografia do terreno. Outra observação importante é que a posição do loteamento em relação às curvas de nível influenciou no tempo em que a cheia começou a se propagar e na sua duração sendo para as curvas à 45° esse tempo foi menor e a duração da propagação foi maior. Um dos motivos para tal situação foi a própria topografia do terreno, que fez com que a água se acumulasse na avenida principal, cuja tubulação estava na mesma direção do exutório. Dessa forma, a água levou mais tempo para escoar. No caso do loteamento posicionado mais paralelamente em relação às curvas de nível também ocorreu acúmulo de água na avenida principal, mas devido a topografia do terreno e como o exutório estava na direção oposta da avenida principal o escoamento foi mais rápido. As Figuras 45 e 46 mostram que também aconteceu um pequeno deslocamento dos tempos de pico da chuva conforme a declividade do terreno, sendo que declividades maiores ocasionaram em tempos de pico menores.

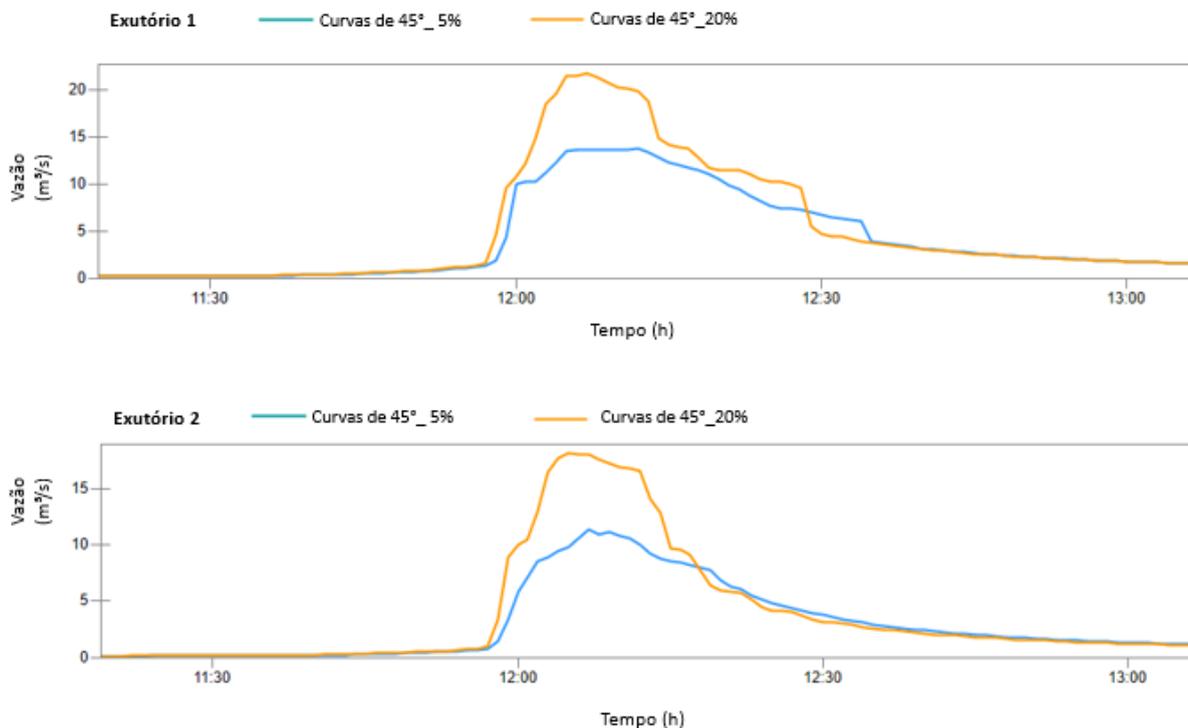


Figura 45. Hidrogramas das declividades de 5% e 20 %, para as curvas de nível à 45°.

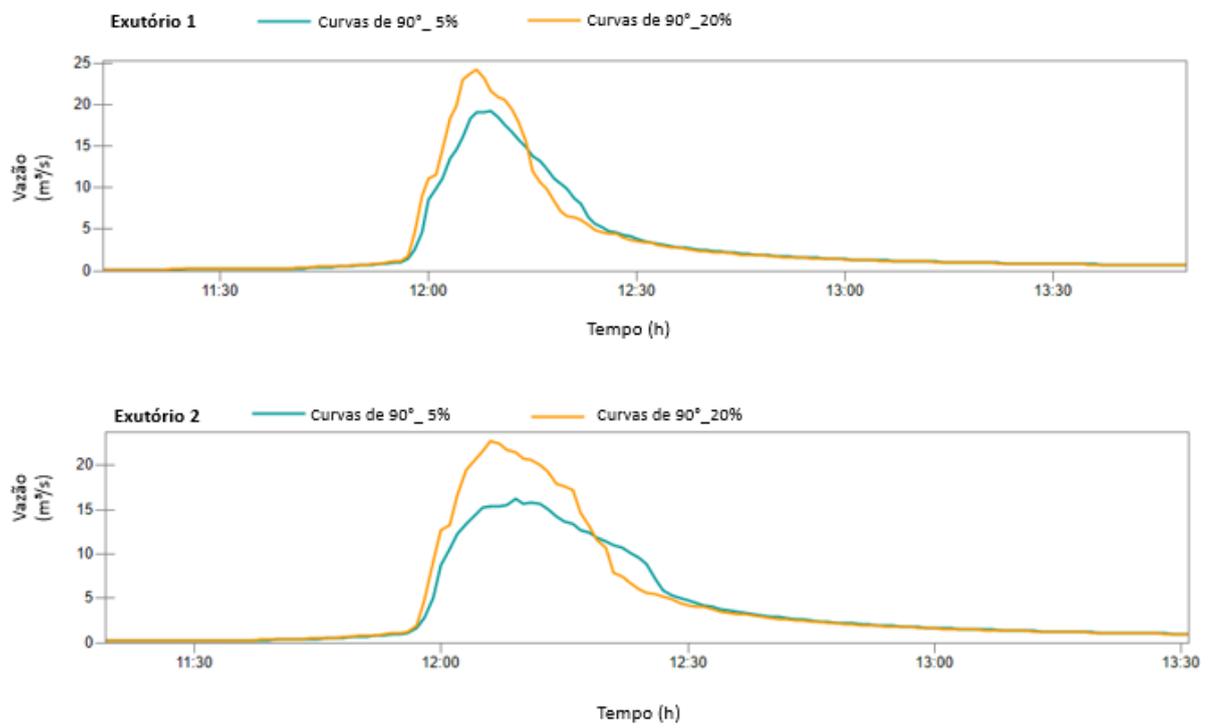


Figura 46. Hidrogramas das declividades de 5% e 20 %, para as curvas de nível à 90°.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito principal de avaliar a vazão de pré-desenvolvimento do DF com base na aplicação dos modelos Curva Número e Horton. Para atingir esse objetivo utilizou-se o modelo SWMM e planilhas de cálculos, de forma a analisar os parâmetros de cada modelo de infiltração que mais se aproximavam das características dos solos do DF e a obter os valores de vazões para cada situação.

Foi possível concluir que a adoção de um valor único para vazão de pré-desenvolvimento do DF não é compatível com os diferentes valores de infiltração correspondentes aos tipos predominantes de solo, como demonstrado com a aplicação dos modelo de infiltração, pois os valores de vazões se diferenciam de acordo com os tipos de solos e coberturas vegetativas entre outros fatores. Dessa forma, a adoção de um valor único de vazão de pré-desenvolvimento deveria ser revisada, pois é necessário considerar que para os diferentes tipos de solo as vazões naturais são distintas e essa questão deve ser considerada nos processos regulatórios locais que dizem respeito à drenagem urbana, sob risco de levar a superdimensionamento de obras e custos. Ressalta-se, portanto, a necessidade da ampliação dos estudos de cenários de pré- desenvolvimento de forma mais aprofundada, visando a obter valores mais compatíveis com as realidades dos locais de implantação dos empreendimentos e, assim, levando a medidas que sejam menos restritivas para zonas onde o solo é menos permeável.

Outro ponto abordado no estudo foi a influência da declividade no escoamento, considerando um relevo do tipo planar, comum no DF, e diferentes posições do loteamento em relação às curvas de nível do terreno. Neste estudo, foram gerados modelos de elevação do terreno com o apoio do CAD e GIS e foram feitas simulações no SWMM considerando loteamentos de 20 ha, 60 ha e 100 ha.

Foi mostrado que a declividade influencia pouco no escoamento resultante de loteamentos dotados de infraestrutura de drenagem. Com o aumento do gradiente de declividade observou-se um pequeno aumento das vazões de escoamento superficial, o que pode ser explicado pelo fato de que para declividades maiores a velocidade nas redes tende a ser maior e a infiltração tende a ser menor. O estudo mostrou que a posição do padrão de ocupação em relação às curvas de nível influenciou nas vazões de pico geradas. Foi verificado que para simulações com áreas menores o modelo SWMM não apresentou a mesma sensibilidade em relação a áreas maiores, não se verificando alterações significativas no escoamento.

Por fim, foi analisada a influência da presença do loteamento no alagamento, para diferentes declividades, quando a rede de drenagem não suporta todo o fluxo de água. Nesse caso, foi verificado que para declividades menores ocorre um maior acúmulo de água, pois a velocidade do fluxo é menor devido à topografia do terreno.

Como recomendações para futuros estudos indica-se a necessidade de obtenção de parâmetros experimentais representativos dos solos nas zonas de planejamento territorial do DF, de modo a permitir a aplicação de modelos de infiltração como forma de se obter uma melhor estimativa das vazões geradas em áreas urbanizadas. Para avaliação da influência da declividade no escoamento é interessante um aprofundamento sobre os impactos causados por diferentes declividades e posições do loteamento em relação a topografia, pois um melhor desenho urbano pode levar a redução nos custos das redes de drenagem. Também podem ser efetuados estudos em mais tipos de relevo e considerada a aplicação de medidas compensatórias nos casos em que as vazões superam a vazão de pré-desenvolvimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACSELRAD, Henri e LEROY, Jean P. Novas premissas da sustentabilidade democrática. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 1, 1999.
- ADASA, AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, E. E S. B. DO D. F. Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas no Distrito Federal. Brasília, DF: Superintendência de Drenagem Urbana, v. I, Adasa, 2018.
- AGNESE, C.; BAIAMONTE, G. & CORRAO, C. Overland flow generation on hillslopes of complex topography: analytical solutions. In: *Hydrological Processes*, 21, 1308 – 1317. 2007.
- ALMEIDA, G.H.T.D.; MASINI, L.S.; MALTA, L.R.S. Hidrologia e Drenagem. Disponível em:
<https://www.passeidireto.com/arquivo/47042336/livro-unico-hidrologia-e-drenagem>.
Acesso em: 31 de março de 2020.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Design and construction of urban stormwater management systems. New York: ASCE, p. 724. 1992.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F.N.; ALFAKIH, E. Techniques Alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, realisation et entretien. Paris: Lavoisier, p.372. 1994.
- BALADES, J. D.; BERGA, P.; BOURGOGNE, P. Impact d'une tranchée drainante par temps de pluie. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 3., 1998, Lyon. Lyon: GRAIE, p.551-558. 1998.
- BAPTISTA, M. B., BRASIL L. S. S., FREITAS I. C., DIAS R. F. C. Águas Pluviais Técnicas Compensatórias para o Controle de Cheias Urbanas. 1. ed. Belo Horizonte, BH: ReCESA, 2007.
- BAPTISTA, M., NASCIMENTO, N., BARRAUD, S. Técnicas Compensatórias em Drenagem urbana. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- BAPTISTA, M, NASCIMENTO, N., BARRAUD, S. (2011) Técnicas compensatórias em drenagem urbana. 2ª edição.
- BARBOSA, G. S. O desafio do desenvolvimento sustentável. *Visões*, v. 4, n. 4, p. 63–72. 2008.

- BEUX, F. C., OTTONI, A. B. Métodos Alternativos de Drenagem A Partir da Retenção e Infiltração das Águas de Chuva no Solo, visando a Redução das Enchentes Urbanas. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v.3, n.17, p. 1-13. 2015.
- BICHANÇA, M. F. Bacias de retenção em zonas urbanas como contributo para a resolução de situações extremas: cheias e secas. Dezembro de 2006. Tese –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2006.
- BRAGA, B. Introdução à engenharia ambiental. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2005. Disponível em: <https://riachobodocongo.blogspot.com/2019/05/a-agua-do-nosso-planeta-continuana.html>. Acesso em: maio de 2021.
- BRITO, L. K. S. Avaliação das características geomorfológicas e padrões de uso e ocupação do solo urbano no Distrito Federal no manejo de águas pluviais. (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.
- BUTLER, D.; DIGMAN, C. J.; MAKROPOULOUS, C.; DAVIES, J. W. Urban Drainage. 4. Ed. London: CRC Press, Taylor & Francis Group. p. 587. 2018.
- CABRAL, J. J. S. P.; MASCARENHAS, F. B.; CASTRO, M. A. H.; MIGUEZ, M. G.; PEPLAU, G. R.; BEZERRA A. A. Modelos Computacionais para Drenagem Urbana. In: RIGHETTO, A. M. (Org.). Manejo de águas pluviais urbanas. Natal: Editora Abes, p. 112-148. 2009.
- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes / Aluísio Pardo Canholi. – São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CARDOSO, M. R. D.; Marcuzzo, F. F. N. & Barros, J. R. Classificação Climática de Köpen-Geiger para o Estado de Goiás e Distrito Federal. In: ACTA Geografia, Boa Vista – RR, 8(16), 40 – 55. 2004.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Apostila completa de hidrologia. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>. Acesso em: 07/12/2020.
- CHAPLOT, V.; BISSONNAIS, Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25 (2), ISSN 0197-9337, p. 145-153, 2000.
- CHOW, V. T. Maidment, D. R., Mays, L. W. Hidrología Aplicada. -McGraw-Hill Interamericana, 2000.

- CIRIA C697. The SUDS manual. ISBN 978-0-86017-697-8. London, 2007.
- COLLINS, K.A.; HUNT, W.F.; HATHAWAY, J.M. Evaluation of various types of permeable pavement with respect to water quality improvement and flood control. In: NATIONAL LOW IMPACT DEVELOPMENT CONFERENCE, 2, 2007, Wilmington, N.C. Proceedings. North Carolina: American Society of Civil Engineers, p. 275-289. 2007.
- COSTA, M. E. L. Monitoramento e modelagem das águas da drenagem urbana na bacia do lago Paranoá. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.
- CREACO, E.; FRANCHINI, M. A Dimensionless Procedure For the Design on Infiltration Trenches. American Water Works Association, v. 104, n. 9, p. 501-509. 2012.
- DA PAZ, A.R. Hidrologia básica. Texto básico da Disciplina Ministrada na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, para o curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia na unidade de Caxias do Sul, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, RS, 2004.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1978). Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos, Boletim Técnico nº 53. Rio de Janeiro – RJ, 472 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2004). Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Documento 120. Planaltina–DF: Embrapa Cerrados.
- FONSECA, F. O. (2001). Olhares sobre o lago Paranoá. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília – DF.
- FIORI, J. P. de O.; Campos, J. E. G. & Almeida, L. (2010). Variabilidade da Condutividade Hidráulica das Principais Classes de Solos do Estado de Goiás. In: Geociências, UNESP, São Paulo – SP, 9(2), 229 – 235.
- FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal, v. 12, n. 7, p. 525–542. 2015.
- HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. American Geophysical Union, Transaction, v. 14, p. 446-460, 1933.

- IAT. Manual de Drenagem Urbana de Curitiba- Paraná. Disponível em:http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf. Acesso em: maio de 2021.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil em Síntese: Distrito Federal – Levantamento populacional, área territorial e densidade demográfica. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/panorama>>. Acesso em: outubro de 2020.
- IPH (INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS/UFRGS). Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre. Porto Alegre: Departamento de Esgotos Pluviais, Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2005.
- JACOB, A.C.P. Bmp, LID, SUDS, WSUD e Infraestrutura verde- Práticas que Revolucionam a Drenagem Urbana. Disponível em: <https://www.aquafluxus.com.br/bmp-lid-suds-wsud-e-infraestrutura-verde-praticas-que-revolucionam-a-drenagem-urbana/> . Acesso em: 02 de abril de 2020.
- LEOPOLD, L.B. Hydrology for Urban Planning. A guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use. USGS. Circ 554, p.18. 1968.
- LIMA, N.A. Comparação entre métodos de dimensionamento de sistemas de drenagem em aeródromos. Trabalho de graduação em Engenharia Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2014. Disponível em: http://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/2014/TG-IEI-2014_Nathana_.pdf. Acesso em: maio de 2021.
- LIMA, J. E. F. W.; Silva, E. M.; Strauch, M. & Lorz, C. (2013). Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do Bioma Cerrado. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves – RS, p.8.
- LUK, G. K. (1999). Evaluation of dual-purpose detention pond designs with the storm water management model (SWMM). Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne des ressources hydriques.
- MATOS, J. S, Aspectos históricos e atuais da evolução da drenagem de águas residuais em meio urbano. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico, 2003.
- MEDINA, S.B. Infraestrutura verde como prática sustentável para subsidiar a elaboração de planos de drenagem urbana; estudo de caso da cidade Tupã-SP. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, SP, 2015.

- MELLER, A. Simulação hidrodinâmica integrada de sistema de drenagem de Santa Maria – RS. 2004. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFMS, Santa Maria, 2004.
- MOURA, Priscilla Macedo. Contribuição para a avaliação global de sistemas de drenagem urbana. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- NAKAZONE, L.M. Implantação de Reservatórios de Detenção em Conjuntos Habitacionais: A experiência da CDHU. Dissertação (Mestrado) - USP, São Paulo, p. 97-138. 2005.
- OLIVEIRA, C. Critérios de Projeto para Estruturas de Reservação em Drenagem Urbana. Dissertação (Mestrado)- USP, SP, p.149. 2004.
- PACHECO, Elisa Ferreira. Avaliação Quali-quantitativa de uma Vala de Infiltração Pluvial em Termos de Retenção de Contaminantes. Estudo de Caso: Distrito do Campeche - Florianópolis Santa Catarina. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- PAULA, A.C.V. Drenagem urbana- Análise de problemas de novos loteamentos- Estudo de caso no setor habitacional Vicente Pires. (Projeto Final em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2015.
- PHILIP, J. R. Infiltration and Downslope Unsaturated Flows in Concave and Convex Topographies. In: Water Resources Research, 27(6), 1041 – 1048. 1991b.
- PHILIP, J. R. Hillslope Infiltration: Divergent and Convergent Slopes. In: Water Resources Research, 27(6), 1035 – 1040. 1991c.
- IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html#:~:text=De%20acordo%20com%20dados%20da,brasileiros%20vivem%20em%20%C3%A1reas%20rurais>. Acesso em: maio de 2021.
- RENNÓ, C.D. Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. Disponível em: <http://www3.inpe.br/crs/crectalc/pdf/camilo.pdf>. Acesso em: 06 de abril de 2020.
- RIBEIRO, Cristiano Cavalcanti Barros. Aplicabilidade Do Modelo Swmm No Planejamento Da Drenagem De Bacias Urbanas Brasileiras. Revista Científica Multidisciplinar

- Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 12, Vol. 07, pp. 100-112 Dezembro de 2018.
ISSN:2448-0959
- RIGHETTO, A. M. Manejo De Águas Pluviais Urbanas. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2009.
- SÃO PAULO (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana. São Paulo: SMDU, 2012. ISBN 978-85-638-01-6.
- SANTOS, E.H.M. Pavimentos Permeáveis. Disponível em: <http://www.arboreo.net/2014/10/pavimentos-permeaveis.html> . Acesso em: abril de 2020.
- SANTOS, T. B. Análise do sistema de microdrenagem da Avenida Doutor Renato Azeredo No Município De Machado – MG. 2016. 53f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, Varginha, 2016.
- SARTORI, A. Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.
- SHARMA, K. D.; SING, H. P.; PAREEK, O.P., YADAV, R.C. Infiltration in Relation to Slope Characteristics, Antecedent Soil Moisture and Other Soil Properties. Disponível em: <http://epubs.icar.org.in/ejournal/index.php/AAZ/article/view/63989>. Acesso em: 10 de maio de 2021.
- SILVA, L. P. E. Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), UFPB/CT, 114p. 2007.
- SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Controle da Drenagem Urbana no Brasil: Avanços e Mecanismos para sua Sustentabilidade. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/931f07c4c229bbc1b9c1603fa24b7e12_6826f37881689d99197aef832b946486.pdf . Acesso em: 02 de abril de 2020.
- SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, p. 9–18. 2012.

- SOUZA FILHO, F.A. Escoamento superficial. Disponível em: <https://www.slideshare.net/HidrologiaUFC/escoamento-superficial-76389672>. Acesso em: outubro de 2020.
- TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana e Controle de Inundações. In: CAMPOS, Heraldo & CHASSOT, Attico (Org). Ciências da Terra e meio ambiente. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 1999.
- TUCCI, C.E.M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. Disponível em: http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outras_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-territorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/geren.PDF. Acesso em: 30 de março de 2020.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações Urbanas Na América Do Sul. 1. ed. Porto Alegre, RS: ABRH, 2003.
- TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. Avaliação Ambiental Integradas de Bacia Hidrográfica. Brasília, DF: Ministérios do Meio Ambiente, 2006.
- TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana. Ciência e Cultura, v. 55, 2003.
- UFPB. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento: SWMM. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=1017. Acesso em: 06 de abril de 2020.
- UM. Assessment of Stormwater Best Management Practices, 2008. Water Resources Center, University of Minnesota. Disponível em: . Acesso em: 02 de abril de 2020.
- WANG, B.; STEINER, J.; ZHENG, F.; GOWDA, P. Impact of rainfall pattern on interrill erosion process. Earth Surface Processes and Landforms, v.42, p.1833-1846, 2017. <https://doi.org/10.1002/esp.4140>