



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

**MODELAGEM HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL: ESTUDO DE
CASO DA VILA CAUHY – BRASÍLIA -DF**

ANA PAULA CORDEIRO COSTA

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Número oficial de Dissertação: 195

BRASÍLIA/DF

ABRIL/2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Cm Cordeiro Costa, Ana Paula
 MODELAGEM HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL: ESTUDO DE CASO DA
VILA CAUHY - BRASÍLIA - DF / Ana Paula Cordeiro Costa;
orientador Henrique Llacer Roig. -- Brasília, 2022.
 61 p.

 Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2022.

 1. Modelagem hidráulica. 2. Mapa de inundação. 3. HEC
RAS. 4. Método SCS. 5. Vila Cauhy. I. Llacer Roig,
Henrique, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Henrique L. Roig pela orientação e compreensão durante todo meu tempo no Instituto de Geociências, seus ensinamentos sobre a ciência e sobre a vida foram essenciais para o meu crescimento pessoal e profissional;

Aos doutorandos Maria Elisa Leite, Elton Souza Oliveira e Welber Ferreira pelos ensinamentos em campo;

Às amigas Marina Cangiano e Isabella pela companhia nos monitoramentos, sem elas esse trabalho não teria acontecido;

Às amigas Cinthya Marinho, Raiane, Daniela e Lucélia Barros por terem deixado o mestrado mais feliz com a companhia;

Às amigas Tamara Brandão, Marina Mendonça, Dandara Kokay, Carol Germano e ao amigo Tadeu Mendonça pelo apoio durante esse desafio;

À Defesa Civil do Distrito Federal por compartilharem dados importantes para o prognóstico da Vila Cauhy;

À CPRM pela parceria para coleta de dados campo, à Defesa Civil pelo fornecimento de dados importantes da Vila Cauhy

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os problemas causados pelas enchentes devido às condições extremas de vazão são foco de estudo em vários países do mundo que buscam mitigá-los. Para mapear a localização das planícies de inundação em áreas urbanizadas onde poderiam ocorrer as enchentes, as modelagens hidráulicas são utilizadas como recurso no planejamento territorial urbano. O HEC-RAS é um software feito para cálculos hidráulicos em canais naturais e construídos, foram utilizados dados públicos governamentais coletados com a tecnologia LiDAR para a criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para entrada no modelo apresentado nesse trabalho. A vila Cauhy é um bairro localizado no Distrito Federal – Brasil que cresceu às margens do córrego Riacho Fundo e foi utilizada para estudo de caso. Foram criados cenários em que a urbanização à montante modificaria a dinâmica de infiltração das chuvas, utilizando o método SCS com CN de 75 e 90 em solo úmido, e seus respectivos mapas de inundação. Também foram realizados estudos de geomorfologia da bacia hidrográfica para verificação da drenagem natural e auxiliar o entendimento da hidrodinâmica local. Os resultados do estudo morfométrico mostraram a baixa tendência natural às inundações e que a interferência antrópica é a principal responsável pelas enchentes que acontecem na região. Os cenários da modelagem hidráulica mostraram a necessidade do planejamento urbano para o ordenamento territorial e o aumento significativo da planície de inundação caso a impermeabilização da bacia continue.

Palavras-chave: Modelagem Hidráulica, HEC-RAS, Mapa de inundação

ABSTRACT

The problems caused by floods due to extreme flow conditions are the focus of study in many countries around the world seeking to mitigate them. Hydraulic modeling is used as a resource in urban land planning to map the location of floodplains in urban areas where flooding could occur. HEC-RAS is a software made for hydraulic calculations in natural and constructed channels, public government data collected with lidar technology were used to create a digital terrain model (DTM) for input into the model presented in this paper. Vila Cauhy is a neighborhood located in the Federal District - Brazil that grew along the banks of the stream Riacho Fundo and was used for the case study. Scenarios were created in which upstream urbanization would modify the rainfall infiltration dynamics, using the SCS method with CN of 75 and 90 in wet soil, and their respective flood maps. Geomorphology studies of the watershed were also performed to verify the natural drainage and aid the understanding of local hydrodynamics. The results of the morphometric study showed the low natural tendency for flooding and that anthropic interference is the main responsible for the floods that occur in the region. The hydraulic modeling scenarios showed the need for urban planning for land-use planning and the significant increase of the floodplain if the sealing of the basin continues.

Keywords: Hydraulic modeling, HEC-RAS, Flood mapping

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Zoneamento do DF, área de interesse ambiental, hidrografia e atual tramitação no PDOT/DF. ARIS - Área de Regularização de Interesse Social; ARINE - Área de Regularização de Interesse Específico.....	3
Figura 2 – Inundações na Vila Cauhy em 2016 (Foto: Corpo de Bombeiros/Divulgação)...	4
Figura 3 – Composição da planície fluvial. Fonte: (LUZ e RODRIGUES, 2020).....	5
Figura 4 - Fator de forma de uma bacia hidrográfica. Fonte: (PALARETTI, 2021)	6
Figura 5 - Diferenças entre enchente, inundação e alagamento. Fonte: Defesa Civil/ES	8
Figura 6 – Fluxograma de criação e utilização de um modelo (TUCCI, 2005)	13
Figura 7 – Representação dos termos da Equação da Energia (Fonte: Costa, 2018)	17
Figura 8 – Evolução da ocupação urbana na Bacia do Riacho Fundo ao longo dos anos...	21
Figura 9 - Vila Cauhy (Fonte: Google Earth).....	22
Figura 10 – Fluxograma da metodologia proposta.....	23
Figura 11 - Fluxograma de execução do método SCS	25
Figura 12 – Curvas de intensidade de chuvas.....	25
Figura 13 – Hietogramas de projeto pelo método dos blocos alternados utilizando a equação IDF de Brasília, considerando TR de 3 (a), 10 (b) e 25 (c) anos.....	26
Figura 14 – Referência da sub-bacia do córrego Riacho Fundo utilizada para cálculo de CN	28
Figura 15 – Pontos de monitoramento - Estações linimétricas	32
Figura 16 - Tela do RAS Mapper com as seções transversais	33
Figura 17 - Localização de inconsistência do MDT.....	33
Figura 18 - Curva-chave do córrego Vicente Pires calculada para este trabalho.....	36
Figura 19 – Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo.....	38
Figura 20 - Área de preservação permanente na Vila Cauhy	39
Figura 21 – Mapa de declividade na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo.....	40
Figura 22 – Mapa de altimetria na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo.....	41
Figura 23 – Mancha de inundação para TR = 3 anos e CN = 75	43
Figura 24 – Mancha de inundação para TR = 10 anos e CN = 75	44
Figura 25 – Mancha de inundação para TR = 25 anos e CN = 75	45
Figura 26 – Mancha de inundação para TR = 3 anos e CN = 90	47
Figura 27 – Mancha de inundação para TR = 10 anos e CN = 90	48
Figura 28 – Mancha de inundação para TR = 25 anos e CN = 90	49
Figura 29 - Verificação do modelo a partir dos dados de campo da Defesa Civil/DF.....	50

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Levantamento topográfico para os modelos hidráulicos	9
2.2 Modelos hidráulicos e hidrológicos	11
2.3 HEC-RAS	16
2.4 Método SCS.....	18
3. ÁREA DE ESTUDO	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Estudo da geomorfologia do canal	23
4.2 Aplicação do método SCS para obtenção de vazões de projeto.....	24
<i>Curvas IDF</i>	25
<i>Método SCS</i>	27
<i>Valores de CN</i>	28
4.3 Modelagem no HEC-RAS	31
<i>Condições de contorno</i>	35
4.4 Verificação e cálculo de erro	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo/DF	37
Manchas de inundação.....	41
Cenários para manchas de inundação	46
Verificação do modelo.....	50
Erro calculado.....	50
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	51
7 BIBLIOGRAFIA	53

1. INTRODUÇÃO

O relatório do IPCC de fevereiro de 2022 divulgou dados científicos que evidenciam a certeza dos cientistas que correlacionam as mudanças climáticas e a ação antrópica. As emissões causadas pelo homem são responsáveis por um planeta alterado e com a estabilidade comprometida. As temperaturas globais de superfície aumentaram mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos dos últimos 2000 anos (IPCC, 2022).

Como consequência para os próximos anos, espera-se o aumento dos eventos extremos relacionados ao ciclo hidrológico. Eventos concentrados de chuvas extremas se tornarão mais frequentes e com uma quantidade significativa crescente de água. Eventos extremos de vazão em corpos hídricos serão progressivamente devastadoras a devido ao aquecimento induzido pelo homem e sua consequente mudança no sistema climático (IPCC, 2022).

O ordenamento do território, os componentes ambientais (como a regularização e a utilização dos recursos hídricos), e as questões sociais relacionadas com a proteção civil, estão entre os principais problemas relacionados com as condições extremas de vazão. Nesse contexto, as simulações unidimensionais modeladas em *softwares* especializados surgem como potenciais ferramentas para auxiliar na elaboração dessas análises e representam importantes avanços para o processo de gestão territorial (MASOERO *et al.*, 2013; BRAVO e CARMO, 2005).

A evolução nas técnicas numéricas e do poder de processamento dos computadores possibilitaram que fluxos de água cada vez mais complexos pudessem ser modelados em diversas escalas temporais, resultando em previsões mais fidedignas do comportamento hidráulico do corpo hídrico em estudo.

Os modelos numéricos unidimensionais têm se popularizado pela simplicidade computacional, por oferecerem muita flexibilidade em sua aplicação, fator importante quando se observam as condições reais de aplicação em que há reduzida disponibilidade de dados de campo, e pela razoável precisão na reprodução do comportamento de cheias em planícies de inundação (HORRITT e BATES, 2001).

É importante notar que a prevenção total contra cheias é inviável, mas a avaliação e a gestão de cheias futuras a partir de mapas de inundação são possíveis e necessárias (KOURGIALAS e KARATZAS, 2011).

A maioria dos projetos de mapeamento de enchentes na Europa foram iniciados no final dos anos 1990 como consequência de grandes eventos de cheia naquele período. Após eventos críticos de inundações na Europa (incluindo, Áustria, República Tcheca e Alemanha), os Diretores de Água da União Europeia (*EU Water Directors*) concordaram quanto à necessidade de se trabalhar com sistemas de previsão, prevenção e mitigação de cheias. Um grupo liderado por pesquisadores holandeses e franceses preparou um "Guia de melhores práticas para prevenção, proteção e mitigação de enchentes" e propôs uma diretiva para que todos os países membros produzissem mapas de inundação até 2015 (EXCIMAP, 2007).

A exemplo da Noruega, o processo de planejamento em escala municipal é normalmente dividido em três níveis: Plano municipal - fornecendo as principais estratégias para o uso da terra dentro do município (equivalente ao Plano Diretor de Ordenamento Territorial das cidades brasileiras); Planos de zoneamento - onde áreas específicas são zoneadas para diferentes usos da terra com regramentos detalhados; e Locais de construção – locais identificados como seguros para construções urbanas (PEEREBOOM, 2000).

No âmbito dos Recursos Hídricos, atualmente as Geotecnologias já são utilizadas para o monitoramento de corpos de água em diferentes usos. Nos Estados Unidos, os dados obtidos por LIDAR (*Light Detection and Ranging*) foram utilizados durante a atualização do banco de dados para a criação de modelos hidráulicos para o mapeamento de inundações, com o objetivo de aumentar a precisão no delineamento das informações acerca do corpo hídrico estudado (COOK e MERWADE, 2009).

No Brasil, também existem iniciativas governamentais para o estudo das planícies de inundação e dos mapas de enchente, com o objetivo de criar medidas de caráter preventivo, estruturais e não estruturais para assistir à população em casos de eventos extremos. No entanto, até o momento, poucas cidades receberam esse estudo pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Como exemplo, o Relatório Técnico de Colatina-ES, voltado para a temática, utilizou dados espacializados para a caracterização de bacia hidrográfica e o *software* HEC-RAS para a modelagem hidráulica e mapeamento da mancha de inundação (CPRM, 2014).

O mapeamento de inundações se tornou importante na gestão de riscos de cidades. Segundo o Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT), entre 1990 e 2021 foram registradas cerca de 57 mil mortes no mundo devido a enchentes (EM-DAT, 2021). No Brasil, o IBGE estima que, dos 5.570 municípios brasileiros, mais da metade (59,4%) não contavam com instrumentos de planejamento e gerenciamento de riscos em 2017. Apenas 25% tinham Plano Diretor contemplando prevenção de enchentes e enxurradas e 23% declararam ter Lei de Uso e Ocupação do Solo prevendo essas situações.

Segundo o Perfil dos Municípios Brasileiros de 2017, a proporção de municípios afetados por desastres naturais é mais alta em áreas urbanas, devido à construção de moradias, rodovias e outras obras que interferem na drenagem da água das chuvas e nos processos erosivos. Em números globais, os alagamentos e enchentes são a segunda maior causa de desastres, ficando atrás apenas das secas (IBGE, 2018).

Em relação ao Distrito Federal, existem regiões que sofrem constantemente com enchentes nos períodos de chuva, como por exemplo da Vila Cauhy, que historicamente registra alagamentos.

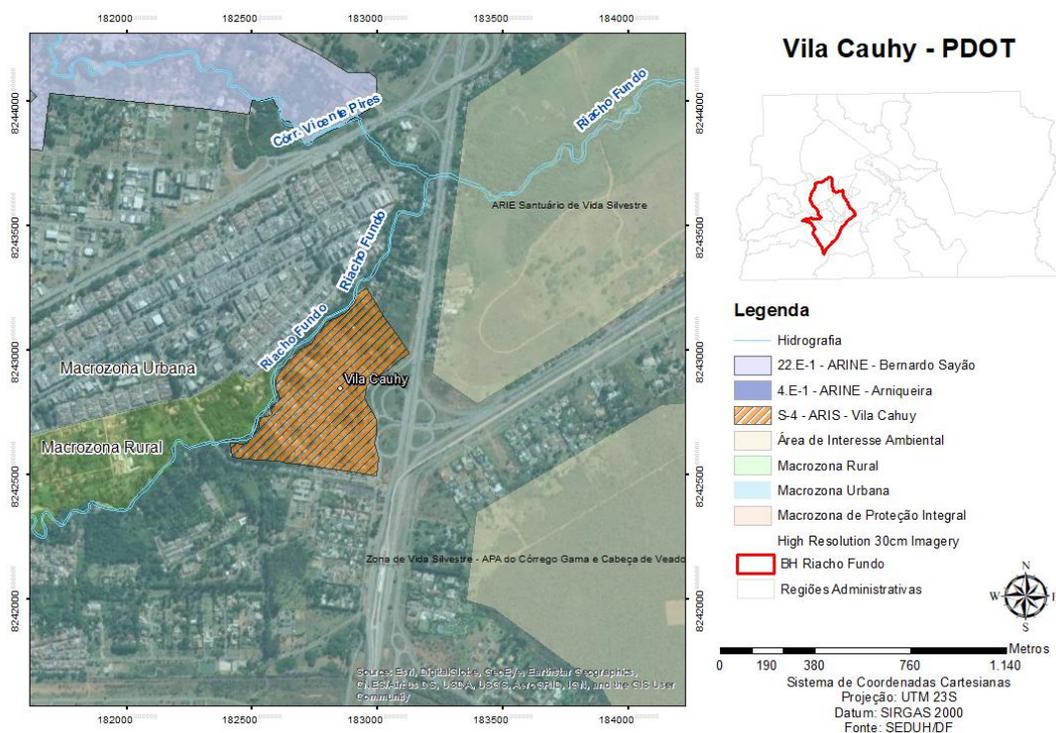


Figura 1 – Mapa de Zoneamento do DF, área de interesse ambiental, hidrografia e atual tramitação no PDOT/DF. ARIS - Área de Regularização de Interesse Social; ARINE - Área de Regularização de Interesse Específico

A área pertencia a uma reserva ambiental, sendo ocupado por pessoas em situação irregular de habitação, que instalaram casas simples de alvenaria e sem saneamento básico.

Atualmente, a área está em processo de regularização no Plano Diretor de Ordenamento Territorial, segundo a SEDUH/DF (Figura 1) (DEFESA CIVIL, 2016).

Observa-se na área o desrespeito às regras de distanciamento do córrego e o acúmulo de resíduos sólidos em diversos locais, inclusive dentro do córrego. Algumas casas se situam em becos estreitos e sem saída (Figura 2), impossibilitando a entrada de veículos em geral e, conseqüentemente, aumentando o risco de fatalidades quando ocorrem os alagamentos (DEFESA CIVIL, 2016).



Figura 2 – Inundações na Vila Cauhy em 2016 (Foto: Corpo de Bombeiros/Divulgação)

Diante dos potenciais riscos de inundação na Vila Cauhy, o objetivo deste trabalho é utilizar um modelo para avaliar o processo de inundação, por meio da análise da dinâmica hidráulica dos corpos hídrico estudados. Deste modo, espera-se que os resultados auxiliem na análise das áreas de risco de inundações da Vila Cauhy.

Para tanto, serão realizados os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar a bacia hidrográfica do Riacho Fundo, a qual está inserida a Vila Cauhy.
2. Aplicar os valores de pico calculados com o método SCS no *software* HEC-RAS para modelagem do mapeamento de inundação.
3. Criar cenários de inundação a partir da simulação de vazões hipotéticas calculadas com base no escoamento superficial produzido pela ocupação da bacia à jusante.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo da história da humanidade, a população de cidades cresceu e se desenvolveu principalmente nos arredores e margens de rios. Mas o que se chama de margem de rio na verdade é um complexo sistema geomorfológico de planície fluvial composto por três subsistemas com hidrodinâmica e características próprias: o canal fluvial, a planície de inundação e os terraços fluviais (Figura 3) (CHRISTOFOLETTI, 1981).

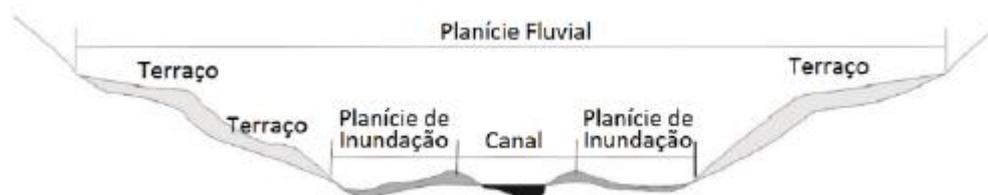


Figura 3 – Composição da planície fluvial. Fonte: (LUZ e RODRIGUES, 2020)

De modo geral, a criação de cidades era feita na área de terraços ou em áreas mais altas, deixando as cidades livres de alagamento quando ocorriam as inundações no período chuvoso. Com a pressão por novos espaços devido à expansão urbana, as planícies de inundação passaram a também a ser ocupadas por construções, além de sofrerem modificações na geomorfologia com a interferência de sistemas de drenagem, retificação e mudança da seção transversal de canais fluviais, construção de margens e diques artificiais, entre outras intervenções antrópicas (LUZ e RODRIGUES, 2020).

Há forte relação entre o crescimento populacional e o aumento do número de desastres naturais (GOERL & KOBİYAMA, 2013). O entendimento dos processos hidrológicos é importante para fundamentar ações que visem a gestão racional de uma bacia hidrográfica, para auxiliar esse entendimento é fundamental o estudo da geomorfologia local (VESTENA *et al*, 2006).

A morfologia é ponto de partida para o entendimento dos demais aspectos do relevo, engloba a morfografia e a morfometria da superfície terrestre. A morfografia refere-se aos aspectos descritivos (ou qualitativos) do relevo, representados por sua forma e aparência (FONTES, 2010). Já a morfometria engloba o estudo quantitativo das formas da bacia hidrográfica (GUERRA e GUERRA, 2003).

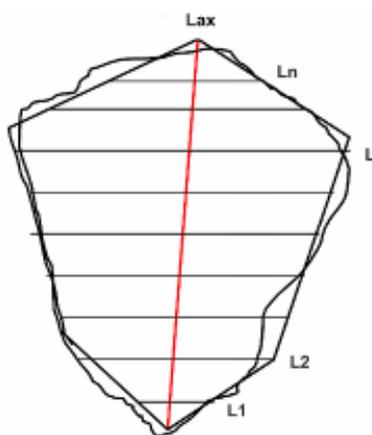
Lindner *et al.* (2007) afirmam que os índices morfométricos são importantes pressupostos para a prevenção de eventos hidrometeorológicos, como enchentes e estiagens. Além disso, podem ser utilizados para apontar áreas de maior suscetibilidade a processos erosivos, configurando importantes instrumentos para o planejamento e gestão territorial.

Como instrumento, os indicadores morfométricos justificam a sua importância na gestão dos espaços urbanos e rurais e podem contribuir para um melhor aproveitamento dos recursos naturais, bem como na prevenção da degradação desses ambientes.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas, segundo Faria *et al.* (2009), pode ser definida como a “análise quantitativa das interações entre a fisiografia e a sua dinâmica hidrológica” que permite um conhecimento da dinâmica fluvial, bem como das relações existentes entre ela e os diversos componentes do meio físico e biótico de uma bacia hidrográfica.

Dentre os parâmetros de análise de morfometria natural de bacias hidrográficas estão área, perímetro, fator de forma, coeficiente de compacidade, índice de circularidade, declividade, altimetria, densidade de drenagem e índice de sinuosidade.

O fator de forma (Kf) relaciona a razão entre a largura média (Ln) e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais distante do divisor de água (Lax)) (CARDOSO *et al.*, 2006). Bacias alongadas apresentam pequenos valores do fator de forma e são menos susceptíveis às inundações, uma vez que se torna menos provável que uma chuva intensa cubra toda a sua extensão (BARBOSA JR, 2021).



Kf	Característica da bacia
1,00 – 0,75	Bacia com alta propensão a grandes enchentes
0,75 – 0,50	Bacia com tendência mediana a grandes enchentes
< 0,50	Bacia não sujeita a grandes enchentes

Figura 4 - Fator de forma de uma bacia hidrográfica. Fonte: (PALARETTI, 2021)

O índice de circularidade relaciona a área da bacia com a área de um círculo. À medida que a bacia se aproxima da forma circular o índice calculado se aproxima de 1. Schumm (1956) classifica o Índice de Circularidade entre valores maiores que 0,51, que mostram que a bacia tende a ser mais circular, favorecendo os processos de inundação. picos de cheias e valores menores que 0,51 sugerem que bacia tende a ser mais alongada, o que contribui para o processo de escoamento.

Villela e Mattos (1975) definem o Coeficiente de Compacidade como um indicador que mostra que, quanto mais irregular a bacia, maior será o coeficiente. Para valores acima de 1, a bacia irá apresentar baixa susceptibilidade de ocorrência de inundações. Caso contrário, quanto menor o valor (números próximos a zero), mais arredondada será a bacia e, conseqüentemente, mais propensa às enchentes. Esse coeficiente é um valor adimensional, que varia com a forma da bacia e independe do seu tamanho. Os autores também apresentam a classificação de densidade de drenagem, pode variar de 0,5 km/km² em bacias de drenagem reduzida 3,5 km/km² em bacias de boa drenagem. Este parâmetro é o resultado da divisão entre o comprimento total dos cursos d'água pela área da bacia. Quanto maior a densidade de drenagem, mais rapidamente o volume d'água originada pelas chuvas chegará ao final da bacia.

O Índice de Sinuosidade (Is), por sua vez, corresponde à relação entre o comprimento do canal principal e a distância vetorial do canal principal. Este índice expressa a velocidade de escoamento do canal principal. Quanto maior a sinuosidade, maior será a dificuldade de se atingir o exutório do canal, portanto, a velocidade de escoamento será menor. Segundo Freitas (1952), valores de Is próximos a unidade indicam canais retilíneos, enquanto valores de Is superiores a 2 indicam canais sinuosos. Por fim, valores intermediários correspondem a formas transicionais.

Além dos conceitos de geomorfologia, também é necessário compreender as diferenças conceituais entre enchente, inundação e alagamento (Figura 5) para um estudo de abrangência de uma inundação. A inundação é a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento acontece de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas na bacia hidrográfica. Já o alagamento é a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana, atingindo ruas, calçadas e outras estruturas urbanas (MIN, 2013).



Figura 5 - Diferenças entre enchente, inundação e alagamento. Fonte: Defesa Civil/ES

Os principais fatores hidrológico-hidráulicos naturais que interferem na ocorrência de enchentes são o relevo da bacia de drenagem, o tipo e a intensidade da precipitação, a cobertura vegetal, a capacidade de drenagem, a geologia e a morfologia fluvial (a extensão do canal e da planície de inundação, a interação canal-planície de inundação e a rugosidade do leito) (MONTE *et al*, 2016).

Chow *et al.* (1988) resumiram os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos de duas maneiras:

- a) a quantidade de água aumenta na mesma proporção em que aumentam as áreas impermeabilizadas e, como consequência, há a redução no volume de água infiltrada;
- b) a velocidade do pico de enchente e do escoamento superficial aumentam devido à maior eficiência do sistema de drenagem e impermeabilização das superfícies que antes dispunham de cobertura vegetal.

Tucci (1995) classificou os impactos provocados pela urbanização em:

- a) impactos ambientais: ocorrem devido ao aumento da produção de sedimentos, degradações da qualidade da água e contaminação dos aquíferos. Suas consequências compreendem o assoreamento da drenagem e o transporte de substâncias poluentes agregadas ao sedimento e à água da chuva;
- b) impacto no balanço hídrico: o balanço hídrico altera-se com o aumento do volume de escoamento superficial e a redução da recarga natural dos aquíferos e da evapotranspiração;

Devido ao modo como sociedade se instalou em relação aos rios, tornou-se complicado impedir a ocorrência de um desastre hidrológico, sendo, portanto, necessárias

medidas preventivas e mitigadoras. Estas medidas podem ser classificadas em estruturais e não estruturais (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

As medidas estruturais são aquelas que envolvem obras de engenharias que modificam o sistema fluvial evitando prejuízos decorrentes das enchentes. Um exemplo desse tipo de medida é a construção de barragens ou reservatórios de retenção. Comumente são obras com alto valor financeiro de execução e usam grandes áreas do terreno urbano (BERTONI & TUCCI, 2003).

Na maioria das ocasiões, as medidas não-estruturais são financeiramente mais viáveis e focam na prevenção e conservação, além de buscarem melhor harmonia entre o meio ambiente e áreas urbanas ribeirinhas (TUCCI, 2007).

Dentre as técnicas não estruturais mais difundidas, destaca-se o mapeamento de áreas inundáveis, sendo uma alternativa viável financeiramente e útil nos estudos de risco. Para a realização do mapeamento de inundações, comumente são utilizados modelos matemáticos hidráulicos 1D e 2D (conceituais ou empíricos) para representar fenômenos envolvidos de ordem hidráulica, os quais determinam as cotas (1D e 2D) e as áreas inundadas (2D) (MONTE *et al.*, 2016).

2.1 Levantamento topográfico para os modelos hidráulicos

O fator mais importante de uma modelagem hidráulica é a topografia dos canais dos rios e planícies de inundação relativo à extensão da área estudada (HORRITT e BATES, 2001). Além do uso na implementação nas rotinas de cálculo de fluxo, o conhecimento da profundidade do rio é fundamental para o monitoramento geomorfológicos (TAURO, *et al.*, 2018).

Segundo Corrêa (2012), o objetivo principal de um levantamento topográfico em corpos hídricos é o conhecimento da morfologia de fundo destes ambientes para a construção de cartas náuticas e fundamentação para planejamentos de projetos de engenharia como pontes, túneis, barragens, portos e outros trabalhos, como as modelagens hidráulicas.

Existem diferentes métodos de aquisição desses dados. Os levantamentos batimétricos realizados de forma tradicional, com uso de ecobatímetro, apresentam custo elevado e demandam bastante tempo. Existe ainda limitação quanto à maioria dos levantamentos não abrangerem corpos hídricos com pouca profundidade, devido à

dificuldade de navegação (LIMA, *et al* 2013). Uma alternativa que vem sendo utilizada na estimativa da batimetria de lagos, rios e estuários é o uso de técnicas de sensoriamento remoto (FLENER, *et al* 2012).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) já são utilizados para a busca de informações acerca dos corpos de água em seus diferentes usos. Nos Estados Unidos, os dados de LiDAR (*Light Detection and Ranging*) foram adicionados durante a atualização do banco de dados na criação da geometria de modelos hidráulicos, tendo como resultado o mapeamento de inundação e com o objetivo de aumentar a precisão no delineamento das informações acerca do rio estudado (COOK & MERWADE, 2009).

O LiDAR, também conhecido como LaDAR ou radar óptico, é uma técnica de sensoriamento remoto ativa que usa energia eletromagnética na faixa óptica para detectar um objeto (alvo), determinar a distância entre o alvo e o instrumento (alcance), e deduzir as propriedades físicas do objeto com base na interação da radiação com o alvo, por meio da interpretação de fenômenos como espalhamento, absorção, reflexão e fluorescência (DIAZ *et al*, 2017).

O LiDAR se tornou um método útil para coletar dados de elevação muito densos e precisos em paisagens, áreas de águas rasas e locais de projetos. O sensor é tipicamente “acoplado” em aviões que podem, rapidamente, coletar pontos em grandes áreas. As coletas podem ser realizadas sobre plataformas terrestres fixas e móveis (NOAA , 2012).

Essas técnicas de coleta são comumente utilizadas em topografia e na engenharia, porque são capazes de produzir levantamentos com alta densidade de pontos e elevada precisão, permitindo assim o desenvolvimento de representações tridimensionais precisas. A coleta de dados de elevação usando LiDAR tem diversas vantagens sobre outras técnicas, principalmente em virtude das resoluções mais altas, precisões centimétricas, aquisição de dados embaixo da água e detecção de solo em terreno florestal (NOAA , 2012).

Os dados adquiridos em LiDAR podem ser transformados em um modelo digital de terreno (MDT) por meio de softwares de geoprocessamento em diferentes tamanhos de pixel para então ser utilizados na modelagem hidráulica. O HEC-RAS é um desses softwares de modelagem hidráulica que suporta o uso de um MDT no formato raster, ele é utilizado para representar adequadamente a área de planície de inundação e desenvolver uma geometria precisa para a análise do rio estudado (USACE, 2016).

2.2 Modelos hidráulicos e hidrológicos

A relação entre precipitação e escoamento superficial tem sido um dos temas centrais da hidrologia há muitos anos. Com o crescimento da capacidade de processamento computacional, a partir dos anos 1950 e 1960, as pesquisas em modelagem foram significativamente impulsionadas (TUCCI, 1998).

Um modelo é, por definição, uma representação simplificada da realidade. O modelo hidrológico pode representar matematicamente o fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície terrestre, voltado para o entendimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (RENNÓ e SOARES, 2003; TUCCI, 1998).

Estima-se que os modelos hidrológicos com sentido matemático começaram a ser utilizados quando Henry Darcy (1856) publicou a sua análise de fluxo com gradiente de pressão a uma taxa determinada pelo meio (condutividade hidráulica) em que está fluindo. Saint-Venant (1871) propôs uma descrição matemática sobre a hidráulica de rios e Richards (1931) aperfeiçoou significativamente a Lei de Darcy, com a adição da lei de conservação de massa e dispersão insaturada (SILBERSTEIN, 2006).

Sherman (1932) introduziu o conceito de hidrograma unitário baseado no princípio da superposição, que é mostrado como um sistema linear invariante no tempo. A introdução desse hidrograma unitário marcou o início de uma era notável na modelagem de escoamento pluvial. Havia surgido, então, uma ferramenta que poderia ser usada para prever o hidrograma de escoamento, porém com algumas dificuldades (LIPORONI, 2012).

Dooge (1973) discutiu a possibilidade de resolver essas dificuldades e do desenvolvimento do método de área-tempo. Esse método sugere levar em consideração os efeitos do armazenamento e que a curva da área-tempo pode ser guiada através de elementos de armazenamento relacionados às características da bacia hidrográfica, levando a um conceito de hidrograma de unidade sintética, para obter uma previsão da resposta da bacia hidrográfica (LIPORONI, 2012).

Muitos dos fenômenos naturais podem ser representados por meio de equações e expressões matemáticas. Essa é uma prática comum nas áreas de engenharia e de recursos hídricos, e que vem evoluindo desde o início do século XX, resultante da necessidade de entender, prever e mitigar problemas relacionados ao meio ambiente (LIPORONI, 2012).

As metodologias computacionais voltadas aos recursos hídricos evoluíram em complexidade e integralidade com o uso do geoprocessamento e do sensoriamento remoto, sendo originadas pela necessidade de prover respostas às diferentes questões práticas e científicas. Inicialmente, explicando componentes da relação precipitação-vazão, como a infiltração, o escoamento em rios, entre outros, para depois buscar integrar os diferentes componentes causais da natureza e dos fatores antrópicos (TUCCI C. E., 2005).

Os modelos são utilizados com três propósitos principais: fornecer estrutura para montar o processo de entendimento e explorar os comportamentos implícitos ao sistema que vêm desse entendimento; ser um mecanismo para testar dados, verificar inconsistências e erros e preencher informações ausentes; e explorar o cenário de opções, sendo a utilização comercial mais difundida (SILBERSTEIN, 2006).

Para desenvolver um modelo hidráulico completo se faz necessário testar o desempenho desse modelo. Em parte dos casos, os testes incluem dois passos: calibração e verificação. Durante a calibração, o *software* escolhido usa a primeira parte da série de dados para encontrar os melhores valores dos parâmetros do modelo. Verificação refere-se ao processo de usar a outra série de dados para verificar a persistência do desempenho do modelo, que opera com os valores dos parâmetros obtidos no período de calibração (LUCAS *et al*, 2009).

A representação mais simples de fluxo na planície de inundação é tratar o fluxo como unidimensional ao longo da linha central do canal do rio (BRUNNER G. , 2016). A rotina de cálculo pode assumir o modelo como unidimensional nos casos que uma solução mais detalhada é desnecessária ou também onde o fluxo é claramente unidimensional, como as situações de canal confinado ou tubos. O modelo unidimensional também pode ser utilizado no caso de canais abertos em que o fluxo da planície de inundação faz parte do canal, em uma direção paralela ao canal principal (TENG, et al., 2017).

Nos cálculos de modelos hidráulicos atuais, um rio é descrito por um conjunto de seções transversais discretas em um modelo 1D e por uma malha contínua em um modelo 2D. A malha 2D pode ser definida por uma grade *raster*, uma malha de células quadradas de mesmo tamanho ou uma rede de células triangulares ou irregulares. Enquanto um modelo 1D assume que a água se move apenas longitudinalmente na direção do rio, um modelo 2D assume que a água se move longitudinalmente e lateralmente, e um modelo 3D assume movimento vertical além do fluxo 2D. Alguns modelos acoplam análises 1D e 2D, a

depende de como a água está fluindo no canal principal e nas planícies de inundação (LIU, 2018).

A Figura 6 apresenta um fluxograma genérico para a elaboração e utilização de um modelo.

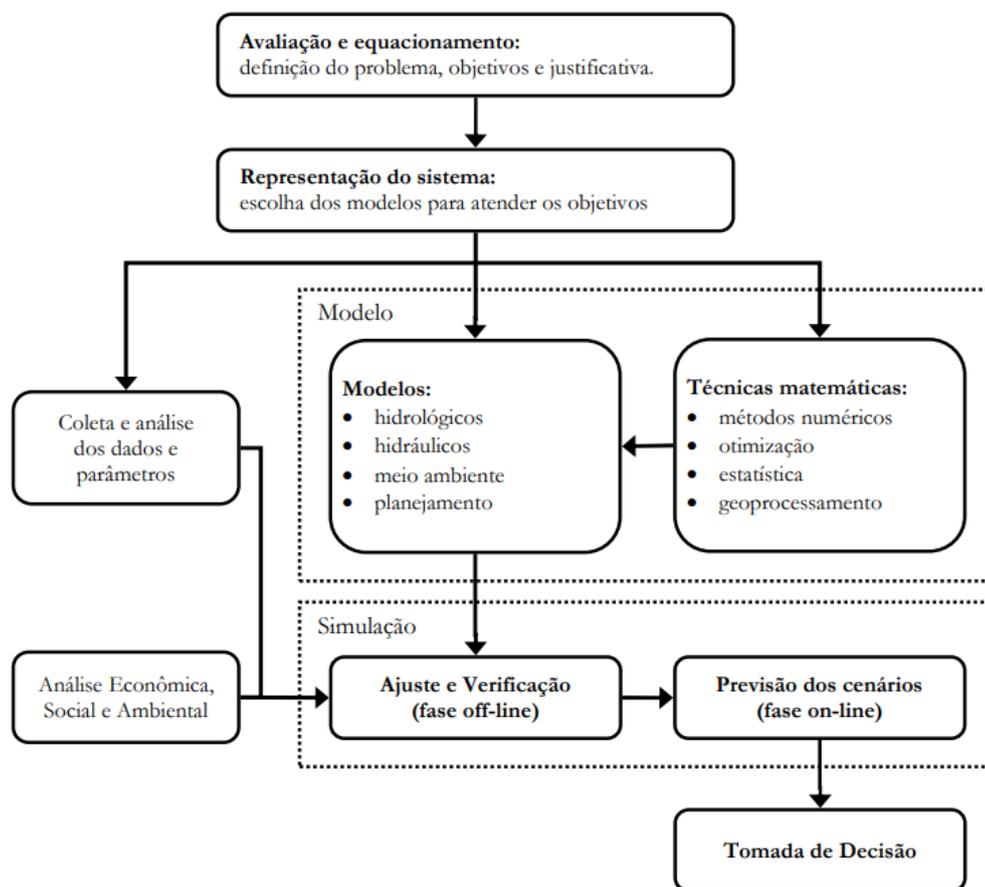


Figura 6 – Fluxograma de criação e utilização de um modelo (TUCCI, 2005)

No entanto, ainda existe ambiguidade em relação à seleção da abordagem da modelagem apropriada (1D ou 2D) para criar uma previsão da extensão da inundação quando outros fatores são limitantes (por exemplo, topografia). Na ausência de dados topográficos detalhados na planície de inundação, um modelo 1D poderia funcionar igualmente bem em comparação com um modelo 2D na produção da extensão da inundação (HORRITT & BATES, 2002).

Ahrens (1999) utilizou os modelos CRWR-PREPRO e o HEC-HMS para gerar um modelo hidrológico (chuva-vazão) para o sistema de canais de Búfalo (Houston - EUA). Os resultados indicaram que a utilização do modelo digital de elevação com resolução de 30 metros é inadequada para lugares que não apresentam significativa variação de altimetria,

como Houston. O estudo também sugeriu que dados de alta resolução do terreno, tais como LiDAR, alcançariam resultados melhores, contribuindo para evidenciar os benefícios da integração de ferramentas SIG e modelos hidrológicos.

Pistocchi e Mazzoli (2002) apresentam a utilização dos modelos HEC-RAS e HEC-HMS no sistema de apoio à decisão da Bacia do rio Romagna (Itália) com o mapeamento da inundação. Foi apresentada a metodologia seguida para integrar dados topográficos e hidrológicos existentes, calibração integrada dos modelos e produção de mapas para serem utilizados no ordenamento territorial. Os autores ainda pontuam os problemas organizacionais envolvidos no desenvolvimento desse sistema de suporte à decisão e esboça as principais questões na análise do planejamento geral de dutos e no projeto de gestão do rio visando a auto atualização do sistema.

A técnica de interpolação linear de mapeamento de inundação (*LITE Flood*), utilizada nos mapeamentos norte-americanos, aproxima-se do delineamento de inundações multifrequenciais. Essa abordagem acontece por meio das ferramentas de *software* GIS, desenvolvido com base na interpolação das elevações da superfície da água para uma inundação intermediária entre os limites superiores e inferiores da superfície. As elevações da superfície da água resultantes são comparadas com topografia para mapear as áreas inundadas efetivas (JAVADNEJAD, 2013).

O *LITE Flood* é uma abordagem simples e rápida para mapear eventos menores de inundação que acontecem dentro dos limites de uma inundação tempos de recorrência maiores (por exemplo, inundação de 100 anos). A técnica é aplicável a áreas onde as elevações da água de um evento de inundação de base foram identificadas por meio de estudos hidrológicos e hidráulicos preliminares (JAVADNEJAD, 2013)

Ícaga *et al.* (2016) fizeram um estudo de caso de modelagem hidráulica utilizando o HEC-RAS para a sub-bacia de Akarcay Bolvadin, na Turquia. A geometria foi construída no software ArcGIS utilizando o plugin HEC-GeoRAS, que transfere os dados de topografia e batimetria de forma detalhada para o formato utilizado pelo modelo. A partir do estudo, foram oferecidas soluções para a cena de inundação encontrada.

Diante da importância de um sistema de alerta de inundação automatizado e do potencial de destruição das inundações, Lamichhane & Sharma (2017) desenvolveram um sistema de alerta de cheias e mapeamento de inundação usando pesquisa de campo e dados

para o Grand River, próximo à cidade de Painesville, Ohio (EUA). O sistema de alerta de inundação para o Grand River foi desenvolvido especificamente para os eventos de cheias, determinando o tempo da passagem de cheia e geração do mapeamento de inundação para 12 diferentes estágios de inundação selecionados, que tiveram aproximadamente 2 a 500 anos de intervalo de recorrência, variando de 10 a 21 pés.

O HEC-RAS foi utilizado para esta modelagem hidráulica, utilizando dados geoespaciais do modelo digital de elevação (DEM) derivado de conjuntos de dados de detecção e alcance de luz (LiDAR), que foram pré-processados e pós-processados no HEC-GeoRAS para, então, produção de mapas de inundação (LAMICHHANE & SHARMA, 2017).

No estudo de Noh *et al* (2018) um código de paralelização híbrido, chamado H12, foi desenvolvido para modelagem de inundação urbana acoplada de 1D e 2D. O código combinou os métodos de paralelização Open Multi-Processing (OpenMP) e Message Passing Interface (MPI) para permitir uma simulação de hiper-resolução do movimento de água em uma grande área urbana. O H12 usou dimensionamento de grade variável para representação geométrica detalhada de superfícies de terrenos urbanos e eficiência computacional. Para avaliar o H12, o código desenvolvido foi aplicado para no córrego Johnson em Arlington, Texas (EUA). A topografia do modelo foi baseada em dados LiDAR de 1m. O estudo concluiu que esse tipo de simulação hiper-realista mostra a distribuição de profundidades da inundação de forma mais precisa do que se fosse utilizado um dado de topografia mais grosseiro.

Rincón *et al.* (2018) realizaram análise multicritério utilizando as ferramentas GIS para criar quatro cenários de mapa de risco de inundação em estudo de caso na área da Grande Toronto (Canadá) a partir da já conhecida planície de inundação obtida dos estudos de modelagem hidráulica. Os mapas de risco usam sistemas de informação geográfica juntamente com a aplicação de métodos de Processo de Hierarquia Analítica, (AHP), para definir e quantificar a seleção ideal de pesos para os critérios que contribuem para o risco de inundação

No estudo de Sarchani *et al.* (2020), foi realizada a investigação de campo pós-inundação de um evento de chuva severa em uma pequena bacia não calibrada localizada no noroeste de Creta (Grécia). Um hidrograma de fluxo validado foi calculado e, em combinação com dois modelos de elevação digital de alta resolução, foram aplicados no

HEC-RAS para determinar a extensão da área inundada. A pesquisa concluiu que o modelo 1D e 2D combinados traziam resultados mais detalhados que apenas o modelo 1D com relação às profundidades máximas, velocidade da água e extensão da planície de inundação durante a ocorrência da vazão de pico.

No estudo de Khalaj *et al.* (2020), o modelo de gestão de águas pluviais (SWMM) foi usado para simular o escoamento superficial em Meshed (Irã) na bacia do rio Kashaf Roud. O escoamento simulado no modelo SWMM foi usado como entrada para o modelo HEC-RAS e determinou zonas de risco de inundação em diferentes cenários. Os resultados indicaram que o modelo combinado (SWMM e HEC-RAS) era adequado para analisar inundações urbanas e determinar zonas de risco de inundação.

2.3 HEC-RAS

O *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS) é um *software* de modelagem hidrológica feito para cálculos hidráulicos, em uma ou duas dimensões, para canais naturais e construídos (USACE, 1997). As vantagens do uso desse software incluem a simplicidade de cálculo e a eficácia frente à simulação dos processos hidrológicos, além da gratuidade na sua distribuição e boa documentação, incluindo artigos brasileiros (USACE, 2008).

O cálculo das vazões simuladas é baseado nas equações de Saint-Venant, também conhecidas como Equação de Conservação da Energia e Equação de Momento. Uma vez que esta equação se baseia no movimento unidirecional da massa d'água, ignorando os movimentos convectivos possíveis, este modelo é considerado como unidimensional (USACE, 1997; MELO *et al.*, 2013).

Segundo o manual de referência hidráulica de Brunner (2016), nas modelagens hidráulicas unidimensionais apresentadas pelo HEC-RAS, o perfil de superfície da água é calculado a partir de uma seção transversal até a próxima pela resolução da Equação de Energia (1) com cálculos iterativos.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Onde Z_1 e Z_2 são as cotas do canal central (talvegue) para seção transversal à montante e jusante, respectivamente (m), Y_1 e Y_2 são profundidades da coluna d'água nas seções (m),

V_1 e V_2 são velocidades médias nas seções (m/s), g é aceleração da gravidade (m/s^2) e h_e é a perda de energia (m).

A Figura 7 mostra um diagrama dos termos da Equação de Energia e onde eles se localizam.

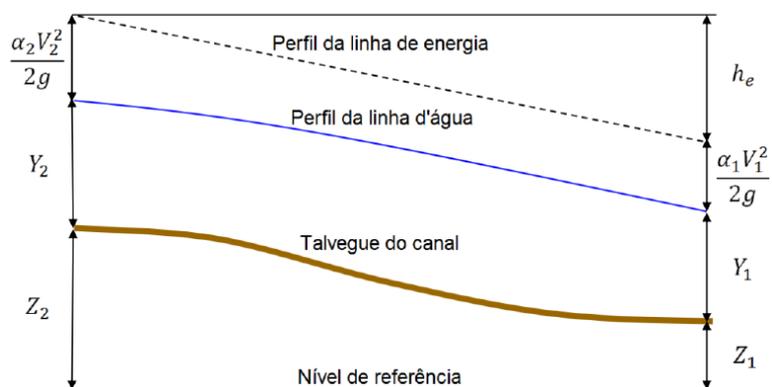


Figura 7 – Representação dos termos da Equação da Energia (Fonte: Costa, 2018)

A perda de energia (h_e) entre duas seções transversais é causada pela contração e expansão do canal. A Equação 2 mostra o cálculo dessa perda.

$$h_e = L\overline{S_f} + C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \quad (2)$$

Onde L é o comprimento de alcance da descarga (m), $\overline{S_f}$ é o declive de atrito representativo entre duas seções/declividade da linha de energia, calculado pela fórmula de Manning (m/m) e C é o coeficiente de perda por contração ou expansão do canal.

O modelo do programa assume que uma contração ocorre quando a energia cinética a jusante é maior que a energia cinética a montante. Caso contrário, é considerada uma expansão. Valores típicos do coeficiente de perda por contração ou expansão (C) são indicados em Brunner (2010), na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores típicos do coeficiente de contração e expansão

Transição	Coefficiente de Contração	Coefficiente de Expansão
Sem perda de transição calculada	0	0
Gradual	0,1	0,3
Seções típicas de pontes	0,3	0,5
Abruptas	0,6	0,8

Estão disponíveis no software três tipos de condição de fluxo: regime permanente, regime não-permanente e regime misto. Para o caso de um simulação de regime permanente, utiliza-se a equação da continuidade, enquanto para os outros dois a equação escolhida é a equação do momento. Independente da metodologia utilizada para o cálculo da vazão, a perda de carga no sistema é calculada por meio da equação de Manning (3) (BRUNNER, 2010).

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde Q é a vazão (m³/s), A e a área molhada da seção (m²), R_h é o raio hidráulico (m), I é a declividade do canal (m/m) e n é o Coeficiente de Manning.

Os dados de entrada necessários incluem conectividade de rede de canal, geometria de seção transversal, coeficientes de perda de energia e declividade do canal. As condições de contorno são necessárias para definir a profundidade de descarga e nível d'água nos pontos finais do sistema, ou seja, a montante e a jusante. Fluxos laterais e uma variedade de estruturas hidráulicas podem ser incluídos no domínio do modelo (WANG *et al*, 2018).

Na modelagem que utiliza a análise Steady Flow, o usuário precisa mostrar ao modelo quantas sessões transversais serão calculadas por meio da geometria. Também é necessário colocar o dado de condições de contorno e de vazão de pico. Pelo menos um valor de vazão deve ser adicionado para cada trecho modelado, o software assume então que a vazão se mantém constante até outro valor de entrada ser colocado em outra sessão.

2.4 Método SCS

O escoamento superficial corresponde a um dos caminhos da água da chuva, dentro do ciclo hidrológico, relativo ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. O escoamento superficial contribui para a vazão quando encontra os corpos hídricos (TUCCI C. , 1998).

O Método CN-SCS (*Curve Number – Soil Conservation Service*) é um modelo chuva-vazão que consiste numa aproximação empírica entre um dado evento de chuva e as condições de ocupação e superfície da bacia hidrográfica para estimativa do escoamento superficial (ALVES, 2016). Foi originalmente desenvolvido para a estimativa do escoamento superficial direto gerado em uma bacia ou área de contribuição (NRCS, 2004).

Desenvolvido pelo *Soil Conservation Service*, do Departamento de Agricultura dos EUA, em 1957, o método baseia-se em estudos que correlacionam as precipitações total e efetiva com a umidade do solo e a quantidade de escoamento superficial em uma bacia hidrográfica, representado nas equações pelo parâmetro CN (SCS, 1957).

Este parâmetro busca descrever o tipo de uso do solo e a condição da superfície do terreno, em relação ao potencial de gerar escoamento superficial. (SOARES et al, 2017). O seu valor varia entre 0 e 100. Quanto maior o valor do CN, menor é o potencial atual de infiltração da bacia, ou seja, a parte da precipitação utilizada no método que esco superficialmente, será maior (NAKAYAMA, *et al* 2011). O escoamento superficial consiste na porção de água que não infiltra nem evapora, dentro do ciclo hidrológico, durante a precipitação (PAZ, 2004).

A fração da chuva ocorrida num evento que gera escoamento superficial é conhecida como chuva efetiva. A chuva efetiva é responsável pelo crescimento rápido da vazão de um rio durante e após um evento de chuva devido ao escoamento superficial gerado. Também pelos eventos de inundação de planícies e consequentes enchentes (COLLISCHONN, 2008).

Até o momento, o método SCS é um dos métodos de cálculo de escoamento superficial mais populares, desde sua criação passou por diversos aprimoramentos tanto na formulação do modelo quanto na interpretação de seus parâmetros (BOUVIER, *et al* 2018).

O resultado do método SCS-CN é adotado por muitos modelos hidráulicos para determinar a entrada de dado que se refere ao escoamento superficial, como nos estudos de Ezz (2017), Prastica *et al* (2018), Costabile *et al* (2020), Zeiger e Hubbart, (2021) e Munna *et al* (2021)

A estimativa do escoamento superficial de chuvas é especialmente importante para projetos de estruturas hidráulicas e rodoviárias, para a gestão do fluxo de cheias, bem como para a análise das mudanças de uso do solo, ou seja, urbanização ou desenvolvimento de baixo impacto de áreas urbanas e modelagens hidráulicas (BANASIK, *et al* 2014).

3. ÁREA DE ESTUDO

No projeto de construção de Brasília, a área norte da bacia do córrego Riacho Fundo era coberta por um cinturão verde com áreas rurais e manchas de vegetação natural. Juntas,

essas áreas deveriam formar um corredor ecológico, ligando o parque nacional de Brasília às áreas preservadas na parte sul da bacia (NETTO, 2001).

O projeto de Lúcio Costa considerava que, apenas no Plano Piloto, seriam abrigados até 500.000 habitantes no ano 2000 (CODEPLAN, 1991; LARA, 2016). No entanto observa-se outra realidade. Houve um vertiginoso crescimento populacional, principalmente nas áreas urbanas, inicialmente impulsionado pelo êxodo rural atrelado ao projeto desenvolvimentista baseado na impulsão da industrialização no país (LARA, 2016).

Apesar de Brasília ter sido fruto de um plano urbanístico rigoroso, a intensa expansão populacional e a condescendência dos governantes fez com que, desde a década de 1970, uma ocupação territorial desordenada e degradante ocorresse, com danos irreversíveis aos recursos hídricos (BRANDÃO, 2016). Cidades satélites nasceram de projetos urbanísticos e/ou invasões, por meio de pressões de demandas por habitação e não de um processo de planejamento, forçando, constantemente, a expansão para uso residencial (OLIVA *et al.*, 2001; CODEPLAN, 2021).

Essa pressão por espaços habitacionais deu início ao rompimento do cordão de proteção do Lago, com o surgimento de projetos governamentais como Guará I e II, Candangolândia, Varjão, Riacho Fundo I e II, Águas Claras, Sudoeste, Taquari e Noroeste, todos situados dentro da bacia do Lago Paranoá (QUEIROZ, 2007).

A ocupação irregular da bacia do córrego Riacho Fundo promoveu diversos impactos, incluindo a destruição da vegetação ripária, com a perda da biodiversidade; a erosão devido à exploração de cascalho e exposição do solo; e modificações na trajetória e no leito do rio devido à sedimentação e deposição de lixo em áreas abertas (SALLES & BREDEWEG, 2009).

Neste cenário de ocupações irregulares, encontra-se a Vila Cauhy, constituída como uma parte descaracterizada do Núcleo Bandeirante e correspondendo à 1/4 da área desta Região Administrativa. Inicialmente, foi consolidada como um setor de chácaras, predominantemente para o plantio de hortaliças. Com o passar dos anos, a população cresceu e o espaço natural foi degradado no processo. (BRANDÃO, 2016)

A Figura 8 mostra a evolução da ocupação da bacia do Riacho Fundo entre 1958 e 2019.

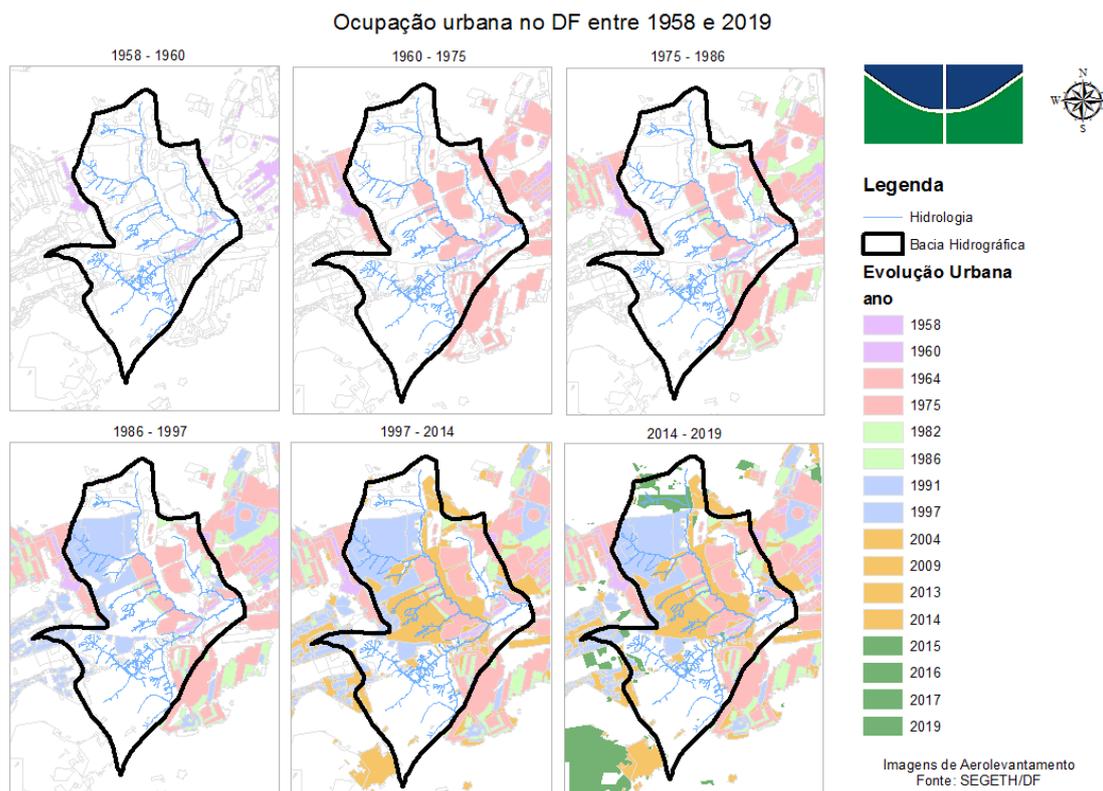


Figura 8 – Evolução da ocupação urbana na Bacia do Riacho Fundo ao longo dos anos. Fonte: SEGETH/DF

O Plano de Uso e Ocupação do Solo da Vila Cauhy feito pela empresa Topocart (2009) mostra que a área foi ocupada na década de 1980 pelo Clube de Regatas do Guará e por várias chácaras com concessão de uso rural cedido pela Fundação Zoobotânica do DF. Também indica que a ocupação foi iniciada próxima ao entroncamento da EPIA com a via de acesso ao Setor de Mansões Park Way e ao Núcleo Bandeirante, por ser uma área com melhores condições de acessibilidade. O adensamento se deu ao longo do tempo em direção ao córrego Riacho Fundo, inclusive em faixas de domínio das rodovias e vias circundantes (EPIA e Via NB3). A expansão da área ao norte não foi afetada devido à resistência dos ocupantes das chácaras ao parcelamento irregular do solo.

A configuração inicial da área referente à atual Vila Cauhy, que se caracterizava pela existência de chácaras, passou a ser configurada progressivamente por uma ocupação de caráter urbano, pela densidade e predominância do uso do solo residencial, tornando-se assim um assentamento urbano informal (RODRIGUES, 2015).

Essa ocupação urbana se deu inicialmente a partir de 1991, próxima ao balão da Estrada Parque Indústria e Abastecimento - EPIA (DF-003), e intensificou-se aproximadamente a partir de 1997, totalizando 60 edificações neste período (RODRIGUES, 2015).



Figura 9 - Vila Cauhy (Fonte: Google Earth)

No decurso dos anos, o bairro se expandiu e adensou. Atualmente, apresenta-se com vielas estreitas e aglomerado urbano intenso. O cenário é de uma comunidade irregular, com casas simples de alvenaria, sem saneamento básico e ocorrências de enchente. Algumas delas estão situadas em becos estreitos, sem saída, o que impossibilita a entrada de veículos em geral, sendo classificada como área de risco, segundo a Defesa Civil, devido às inúmeras inundações (VILLEROY, 2011; DEFESA CIVIL, 2016).

As alterações do meio ambiente causadas pela mudança de configuração do solo em consequência da urbanização causam um problema recorrente de enchente nos períodos chuvosos, em áreas vulneráveis, nas principais cidades do mundo (POLI, 2013).

Para dimensionar o risco de inundação devido à evolução na urbanização de bacias hidrográficas, é necessário desenvolver projeções de uso do solo e modelar seus impactos na extensão da planície de inundação. Existem estudos pelo mundo que já documentam o aumento nos volumes de escoamento superficial associados à urbanização histórica como os de Rose e Peters (2001), Vogel *et al.* (2011), Doubleday *et al.* (2013), Mishra, *et al.* (2017) e Ighile e Shirakawa (2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta metodológica deste trabalho foi dividida em três grandes etapas. Na primeira, foi realizado o estudo da geomorfologia do canal identificando índices e parâmetros e coletando dados importantes para estudo do comportamento hidrológico da bacia.

Em seguida, foram determinados os tempos de recorrência para eventos de precipitação determinados e realizadas campanhas de campo para coleta de informações e posterior validação do modelo. Por fim, foram executadas as simulações no software HEC-HAS. A Figura 10 mostra um esquema de execução do trabalho.

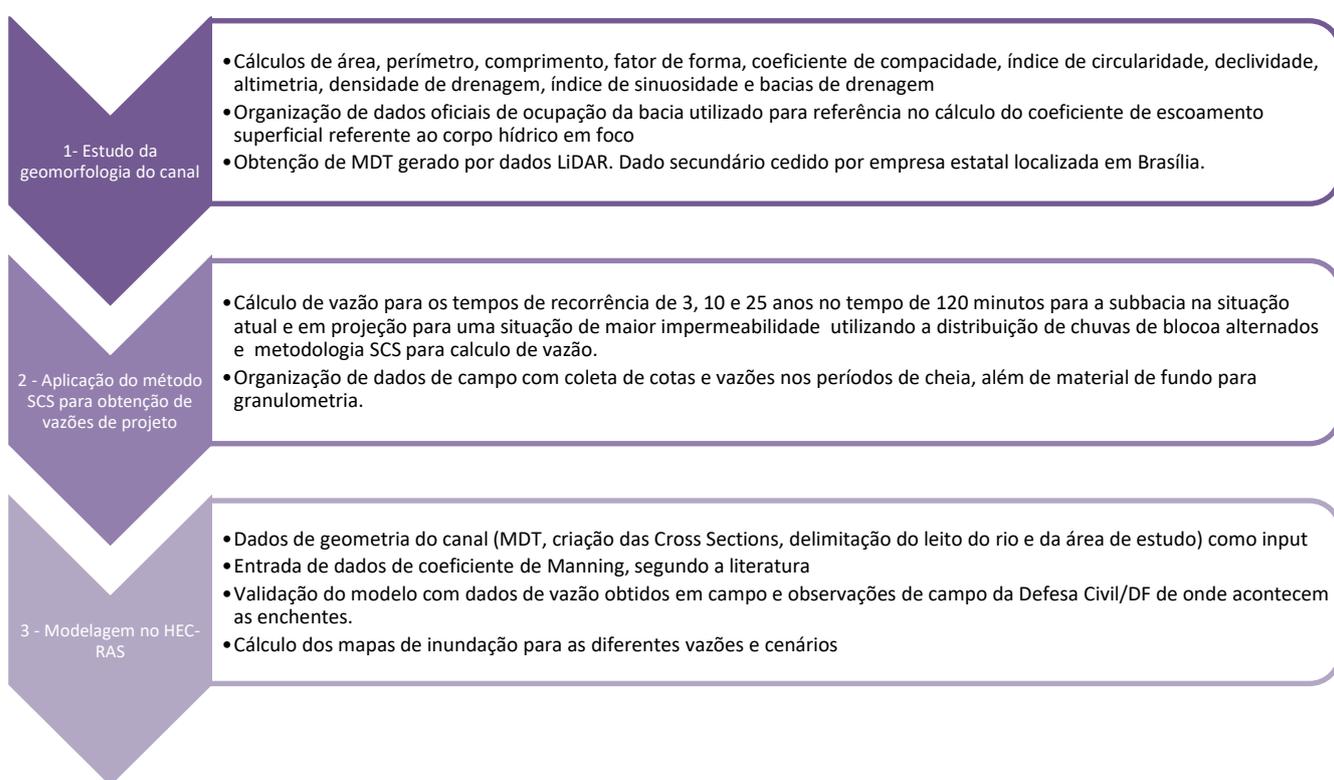


Figura 10 – Fluxograma da metodologia proposta

4.1 Estudo da geomorfologia do canal

A Tabela 2 mostra a forma de obtenção dos cálculos morfométricos realizados para a bacia hidrográfica do Riacho Fundo. Cada valor representa as características relacionadas à drenagem da bacia e auxiliam na compreensão do escoamento superficial natural e das causas de inundações.

Tabela 2 – Cálculos Morfométricos

Características	Forma de Obtenção
Área (A)	Software ArcGIS, cálculo de polígono com a calculadora da tabela de atributos
Perímetro (P)	Software ArcGIS, cálculo de perímetro com a calculadora da tabela de atributos
Fator de Forma (F)	$F = \frac{A}{L^2}$ Onde: L é o comprimento do eixo da bacia (CARDOSO, DIAS, SOARES, & MARTINS, 2006)
Coefficiente de Compacidade (Kc)	$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$ (VILLELA & MATTOS, 1975)
Índice de Circularidade (Ic)	$Ic = \frac{12,57 \times A}{P^2}$ (SCHUMM, 1956)
Declividade	Software ArcGIS, ferramenta Slope
Altimetria	Software ArcGIS
Densidade de drenagem (Dd)	$Dd = \frac{L}{A}$ Onde L é o comprimento total do corpo hídrico (Soma de todos os trechos) (VILLELA & MATTOS, 1975)
Índice de sinuosidade (Is)	$Is = \frac{L}{Dv}$ Onde L é o comprimento do canal principal (comprimento apenas do maior); Dv é a distância vetorial do canal principal (distancia reta de ponta a ponta apenas do rio) (FREITAS, 1952)

Para obter os dados no ArcGIS, foram utilizados o raster SRTM 30m de 2012 obtido no site da USGS, o dado obtido pela tecnologia LiDAR e a ferramenta *Hydrology do Spatial Analyst Tools* para a extração da drenagem e microbacias.

4.2 Aplicação do método SCS para obtenção de vazões de projeto

Foram utilizadas no modelo como entradas de vazões de pico, as vazões de projeto calculadas no método SCS que permite adicionar o fator de escoamento superficial com o CN (*Curve Number*) para que fosse possível a visualização de cenários de inundação em que a bacia foi afetada pela urbanização e consequente impermeabilização do solo. A aplicação deste método segue o complexo fluxo mostrado na Figura 11.

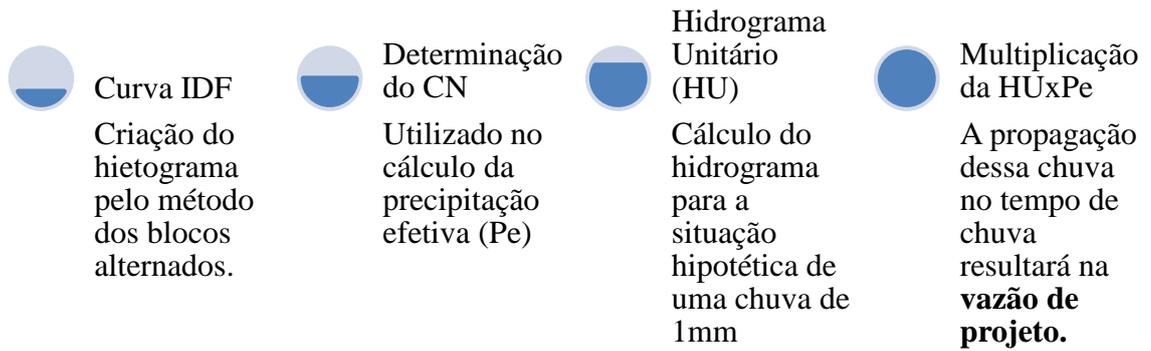


Figura 11 - Fluxograma de execução do método SCS

Curvas IDF

A Intensidade da chuva crítica é calculada pela equação IDF (intensidade - duração - frequência) do Distrito Federal (DF). A curva, que consta no Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF, é definida pela Equação 5.

$$i = \frac{1574,70 \times TR^{0,207}}{(t_c + 11)^{0,884}} \quad (5)$$

Onde i é a intensidade da chuva (mm/h), TR é o tempo de retorno (anos), t_c é o tempo de concentração (minutos).

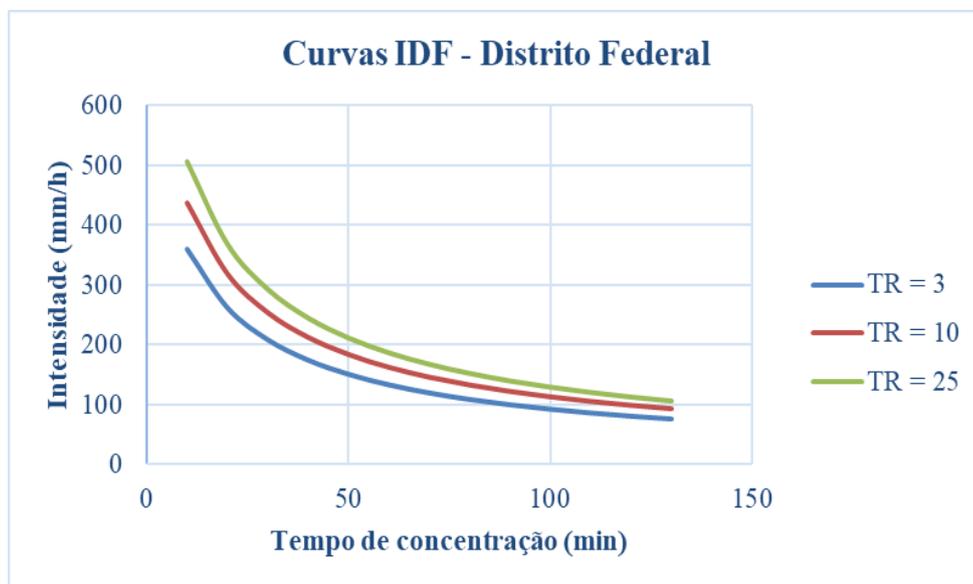


Figura 12 – Curvas de intensidade de chuvas

A partir das curvas IDF (Figura 12), são construídos os hietogramas pelo método de blocos alternados (Figura 13) para a aplicação do método SCS. Os tempos de retorno (TR) utilizados para a projeção de cenários foram de 3, 10 e 25 anos com duração de 120 minutos.

As curvas de intensidade de chuva para os TR escolhidos são apresentadas no gráfico seguinte (Figura 12).

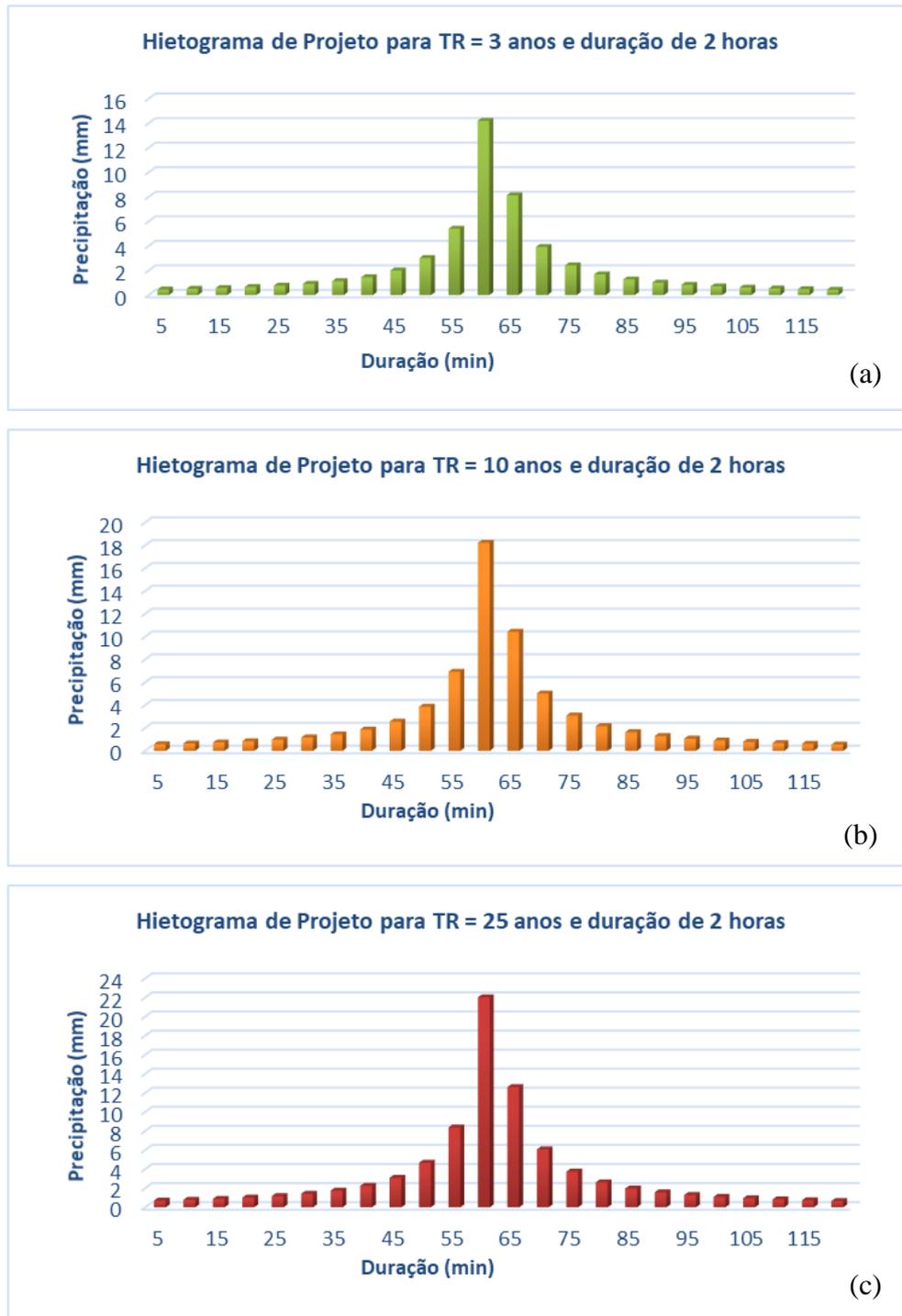


Figura 13 – Hietogramas de projeto pelo método dos blocos alternados utilizando a equação IDF de Brasília, considerando TR de 3 (a), 10 (b) e 25 (c) anos

As curvas de intensidade de chuva dos TR e do tempo de concentração foram baseadas na condição atual de urbanização da bacia. Os tempos de recorrência escolhidos para o cálculo são os mais utilizados para projetos de micro e macro drenagem urbana.

Método SCS

A umidade de solo para as situações de cenário calculadas e para as situações reais levaram em conta a época de chuva, quando as enchentes ocorrem e, portanto, uma condição de solo do tipo III, segundo a classificação SCS (Tabela 3).

Tabela 3 – Condições de umidade do solo segundo a classificação SCS

Condição	Descrição
I	Solos secos: as chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm.
II	Situação média na época das cheias: as chuvas, nos últimos cinco dias totalizaram de 15 a 40 mm.
III	Solo úmido, próximo à saturação: as chuvas nos últimos cinco dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

O tipo de solo encontrado na região se assemelha ao grupo de solos D segundo a classificação do SCS.

Tabela 4 – Grupos de solos segundo a classificação SCS (Fonte: PORTO, 1995)

Grupo	Descrição
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos arenosos, menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,5m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2m. No caso de terras roxas esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30 a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como o do Grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

A sub-bacia do córrego Riacho Fundo apresenta no seu uso e ocupação de solo diferentes atividades econômicas que coexistem com a urbanização e áreas verdes com forte potencial de ocupação urbana e consequente impermeabilização, justificando a criação de cenários para as prováveis futuras enchentes na vila Cauhy, que se encontra muito próxima ao exutório do córrego Riacho Fundo.

Valores de CN

O cálculo do coeficiente CN aconteceu a partir da média ponderada dos tipos de superfícies encontrados atualmente na sub-bacia e de cenários hipotéticos (onde $CN = 90$). Ressalta-se que o método foi escolhido por se tratar do estudo individualizado do córrego Riacho Fundo, onde a sub-bacia é de 72,27 km² de extensão.

A justificativa para a escolha do estudo de CN dentro dessa sub-bacia é a de que a área referente ao córrego Vicente Pires e seus afluentes já existe de forma altamente impermeabilizada devido à ocupação urbana e não faria sentido então a mudança de CN que tem como um dos fatores variantes o tipo e ocupação de solo. A Figura 14 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Riacho Fundo.

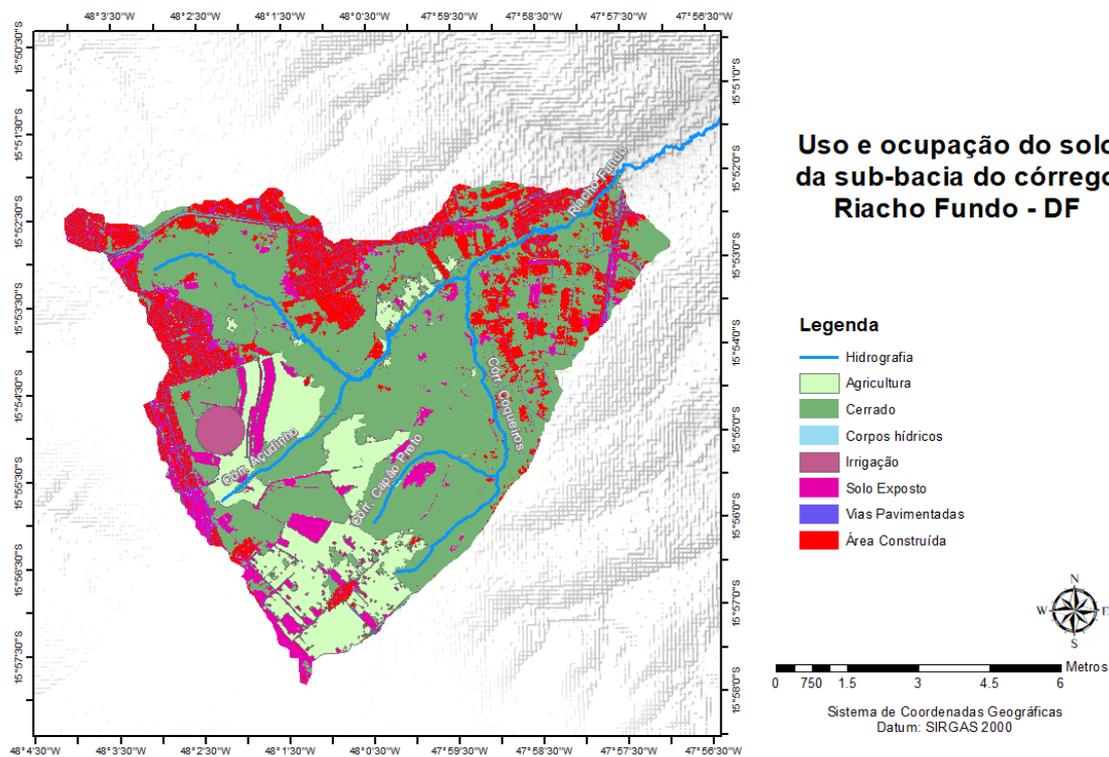


Figura 14 – Referência da sub-bacia do córrego Riacho Fundo utilizada para cálculo de CN

A Tabela 5 mostra os valores de CN utilizados no método para esse trabalho. A intenção de calcular o modelo de uma inundação real justifica os altos valores de CN. A condição de solo tipo III foi escolhida devido ao fato de que para a data do alagamento simulado, haviam chovido mais de 40mm nos últimos 5 dias. A metodologia SCS propõe essa escolha de solo nessa situação de umidade de solo.

Tabela 5 – Valor de CN que corresponde a diferentes ocupações de solo para a condição tipo III. Fonte: Ferrigo (2014) Adaptado

Uso do solo	Grupo Hidrológico D
Lotes com Solo exposto	78
Vias pavimentadas / Estacionamento	87
Zona Comercial / Zona Urbana de Alta Densidade	87
Cerrado	70
Agricultura	70
Lotes vegetados	70

Tucci (2000) uniu o conceito de precipitação efetiva (P_e) com a equação do SCS (1975), que fornece o escoamento superficial da bacia em milímetros. A equação 6 mostra o uso desses fatores no cálculo dessa precipitação válida quando $P > 0,2 S = I_a$ (infiltração inicial).

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{(P + 0,8 \times S)} \quad (6)$$

Onde P_e é a precipitação efetiva (mm), S é potencial máximo de infiltração e P é a precipitação total do evento (mm). A equação 7 mostra como é calculado o fator S .

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Onde CN é número da curva de runoff que depende do tipo de solo e da característica da superfície.

O Hidrograma Unitário é calculado com base no tempo de concentração, duração da chuva, tempo de pico, tempo de base e vazão de pico, A Tabela 6 mostra as equações utilizadas para o cálculo deste hidrograma. Multiplica-se então este hidrograma unitário pelo valor de precipitação efetiva encontrado e propaga-se pelo tempo de precipitação admitido para vazão de projeto, 2h no caso deste trabalho.

Tabela 6 - Equações do cálculo do Hidrograma Unitário

Fator	Cálculo	Dados de entrada
Tempo de concentração (tc)	$tc = 57 \times \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$	L = Comprimento do talvegue (km) H = Desnível total da bacia (m)
Duração da chuva (tr)	$tr = 1/5 \times tc$	
Tempo de pico (tp)	$tr = 0,5 \times tr + 0,6 \times tc$	
Tempo de base (tb)	$tb = 2,67 \times tp$	
Vazão de pico (qp)	$qp = \frac{2 \times P \times A}{tb}$	P = Precipitação efetiva (1 mm) A = Área
Hidrograma de vazão ascendente (qa)	$qa = \left(\frac{qp}{tp}\right) \times t$	t = variável para a construção do gráfico (h)
Hidrograma de vazão descendente (qd)	$qd = -\left(\frac{qp}{tb - tp}\right) \times t + \left(\frac{qp}{tb - tp}\right) \times tb$	

A Tabela 7 mostra os resultados de vazão de projeto obtidos para os diferentes TR utilizados nesse estudo.

Tabela 7 - Vazões calculadas para projeção de cenários e previsão de enchentes

TR (anos)	Vazão (m ³ /s)	CN
3	85,8	75
10	152,9	75
25	220,0	75
3	234,7	90
10	341,0	90
25	444,3	90

O tempo de concentração calculado é de 120 min e as chuvas são de 2h. A Tabela 8 mostra os cálculos de intensidade, obtidos a partir das curvas IDF, a lâmina total precipitada

no tempo calculado e a vazão de projeto para o CN = 75. A Tabela 9 mostra os mesmos dados relacionados ao cenário de ocupação de bacia onde o CN = 90.

Tabela 8 – Intensidades de precipitação para 3, 10 e 25 anos de tempo de retorno e CN = 75

TR	Intensidade (mm/h)	Lâmina total precipitada (mm)	Vazão de projeto (m³/s)
3 anos	53,1	26,6	85,8
10 anos	68,2	34,1	152,9
25 anos	41,2	82,4	220,0

Tabela 9 – Intensidades de precipitação para 3, 10 e 25 anos de tempo de retorno e CN = 90

TR	Intensidade (mm/h)	Lâmina total precipitada (mm)	Vazão de projeto (m³/s)
3 anos	53,1	26,6	235,7
10 anos	68,2	34,1	341,0
25 anos	41,2	82,4	444,28

4.3 Modelagem no HEC-RAS

A Figura 15 apresenta o mapa da região modelada neste trabalho. Os pontos em verde mostram os pontos de monitoramento onde foram coletados os dados de vazão e de sedimentos, que foram parâmetros importantes na atribuição do coeficiente de Manning utilizado na modelagem. Eles foram escolhidos por serem pontos de monitoramento da ADASA e também por fazerem parte de outros estudos da Universidade de Brasília, possuindo, portanto, dados anteriores de coleta e informações a respeito do corpo hídrico.

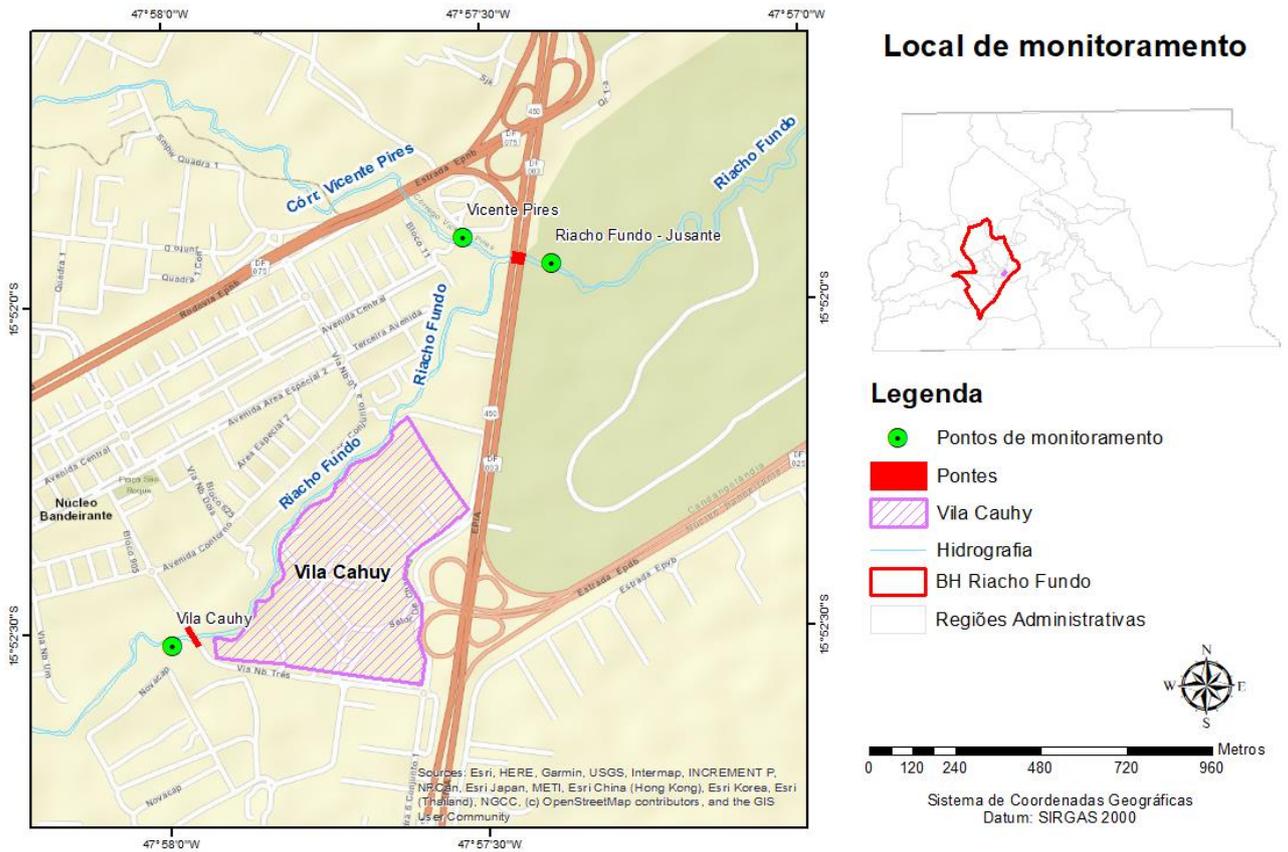


Figura 15 – Pontos de monitoramento - Estações limimétricas

A estação Vila Cauhy está localizada ao longo do córrego Riacho Fundo e a estação Montante Riacho Fundo está localizada ao longo do córrego Vicente Pires. A estação Montante Zoológico está localizada no Riacho fundo após a junção dos corpos hídricos.

Foi utilizado o RAS Mapper (Figura 16) para a criação das seções transversais que utilizam as informações do próprio MDT de entrada para captar as informações de elevação. Devido ao modelo digital do terreno apresentar um degrau (Figura 17), inconsistência que não pôde ser reparada remodelando os dados originários do campo, uma aproximação foi utilizada na região da Vila Cauhy por meio da manipulação de uma das seções transversais.

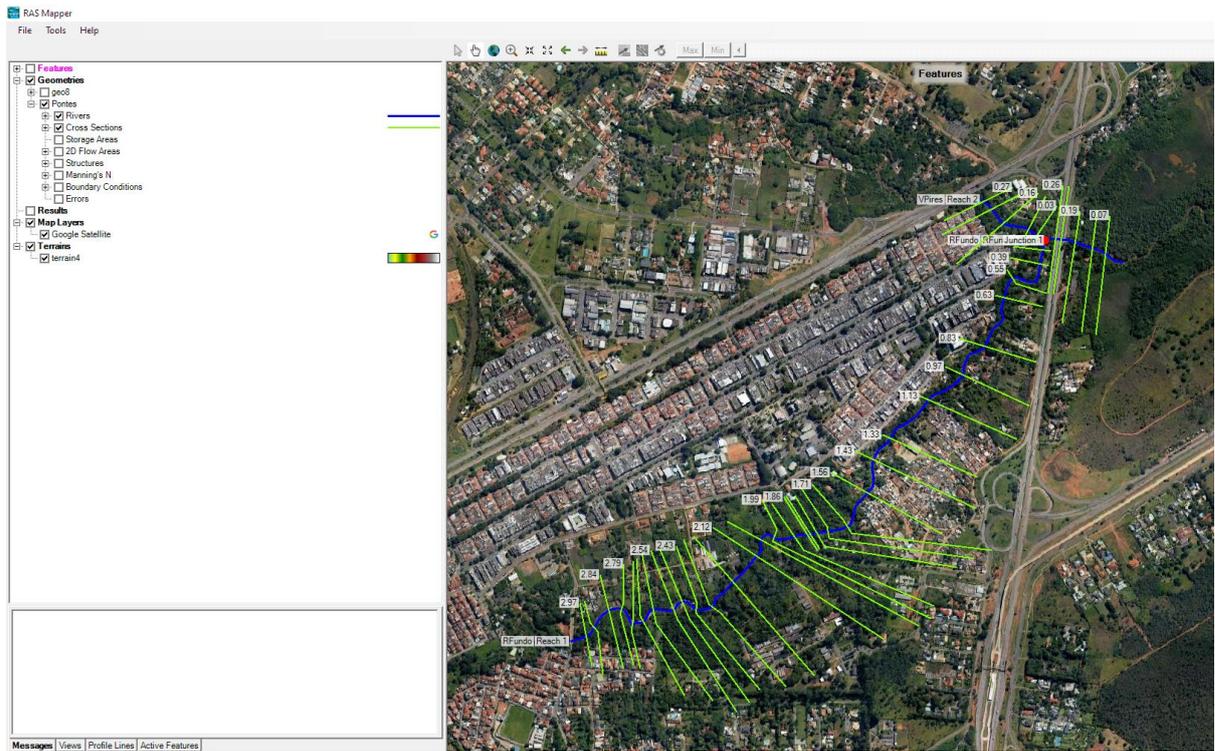


Figura 16 - Tela do RAS Mapper com as seções transversais

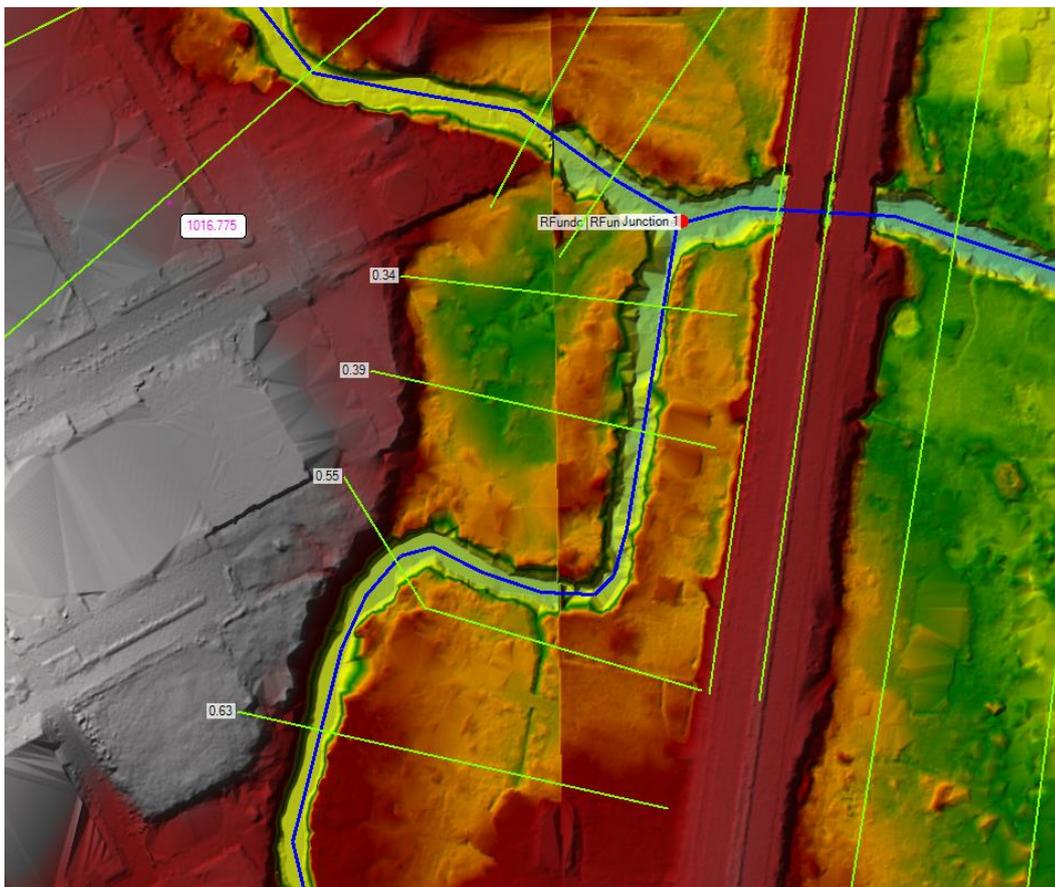


Figura 17 - Localização de inconsistência do MDT

Os dados de LiDAR utilizados nesse trabalho foram coletadas com uma densidade de 4 pontos/m² e os produtos de entrega foram derivados em Modelo Digital de Superfície - MDS e Modelo Digital do Terreno - MDT. Esses dados foram coletados em 2016, pela Terracap.

Foram modeladas duas pontes (Figura 15) pertencentes ao trecho de estudo que poderiam interferir no comportamento do fluxo durante uma cheia.

Para esta entrada de dados, fez-se necessário informar ao modelo os coeficientes de contração e expansão do canal nas seções transversais imediatas às pontes e às respectivas áreas inefetivas, que são áreas onde a água permanece retida por um tempo maior devido à obstáculos. Dessa forma, foram utilizados os valores indicados pelo manual do modelo, que surgiu 0,3 para contração e 0,5 para expansão.

As atualizações da batimetria da seção foram coletadas com o ADCP SonTek M9 ou com o SonTek FlowTracker a cada medição de vazão, dependendo da profundidade do ponto de medição.

Para a escolha dos coeficientes de Manning (Tabela 10) adequados a cada tipo de rugosidade encontrada nos canais foram utilizadas as literaturas de Chow (1959), Barnes Jr. (1967), McCuen (1998) e De Roo (1999).

Tabela 10 – Valores de Manning utilizados na modelagem deste trabalho

Descrição	Manning	Córrego	Fonte Bibliográfica
O leito é composto de areia, cascalho e pedregulhos	0,030	Vicente Pires	(BARNES Jr, 1967)
O leito consiste em areia e argila	0,030	Riacho Fundo Jusante	(BARNES Jr, 1967)
O leito consiste em areia e pedregulho	0,032	Riacho fundo montante/Vila Cauhy	(BARNES Jr, 1967)
Árvores de grande porte	0,15	Área urbana de inundação	(CHOW V. , 1959)
Gramma em área construída	0,259	Área urbana de inundação	(DE ROO, 1999)
Asfalto	0,011	Área urbana de inundação	(McCUEN, 1998)

Condições de contorno

As estações escolhidas para o trabalho são controladas pelas instituições públicas relacionadas a saneamento de Brasília. Os dados anteriores de séries históricas registrados para cada estação podem ser encontrados no site do SNIRH, controlado pela ANA, pelo programa hidroweb. A Tabela 11 mostra os nomes, códigos das estações para serem encontradas no site no SNIRH - Hidroweb e a localização geográfica (SNIRH, 2020).

Tabela 11 – Nomes e códigos das estações encontradas no Hidroweb

Nome da Estação	Código	Localização
Montante Zoológico - EPIA 003 – Riacho Fundo	60478200	15°51'57,4"S 47°57'23,1"W
Vicente Pires Montante Riacho Fundo	60477900	15°51'53,9"S 47°57'30,0"W
Vila Cauhy	60478185	15°52'32,9"S 47°57'59,5"W

As campanhas de amostragem foram planejadas de acordo com a previsão de precipitação. Esta foi acompanhada pelos radares meteorológicos, disponibilizados pelos sites da REDEMET e CPTEC/INPE e também pelo Gestor PCD, da ADASA.

Estação montante zoológico

Esta estação está localizada após a confluência dos dois Córregos, chamada de Riacho Fundo - Jusante na Figura 15. O trabalho de Aquino *et al.* (2018), os autores produziram a curva-chave da seção transversal dessa estação. A série de dados para o cálculo da curva foi obtida a partir de observações em campo, com a coleta de dados de vazão e cota em momentos de cheia e os dados disponibilizados pela CAESB e pela ADASA. A curva-chave obtida a partir desses dados foi inserida no modelo HEC-RAS como condição de contorno à jusante da junção dos córregos (*Rating curve*).

Estação Vicente Pires (montante)

A partir de observações de campo e dados coletados pela CPRM em campo, foi possível calcular a curva-chave do local. Utilizou-se então esse dado como condição de contorno local (*Rating curve*). Pelo fato de que houveram poucas medições em condições de cheia, foram extrapolados os dados de vazão entre as cotas de 2,5 e 5m para o cálculo da curva.

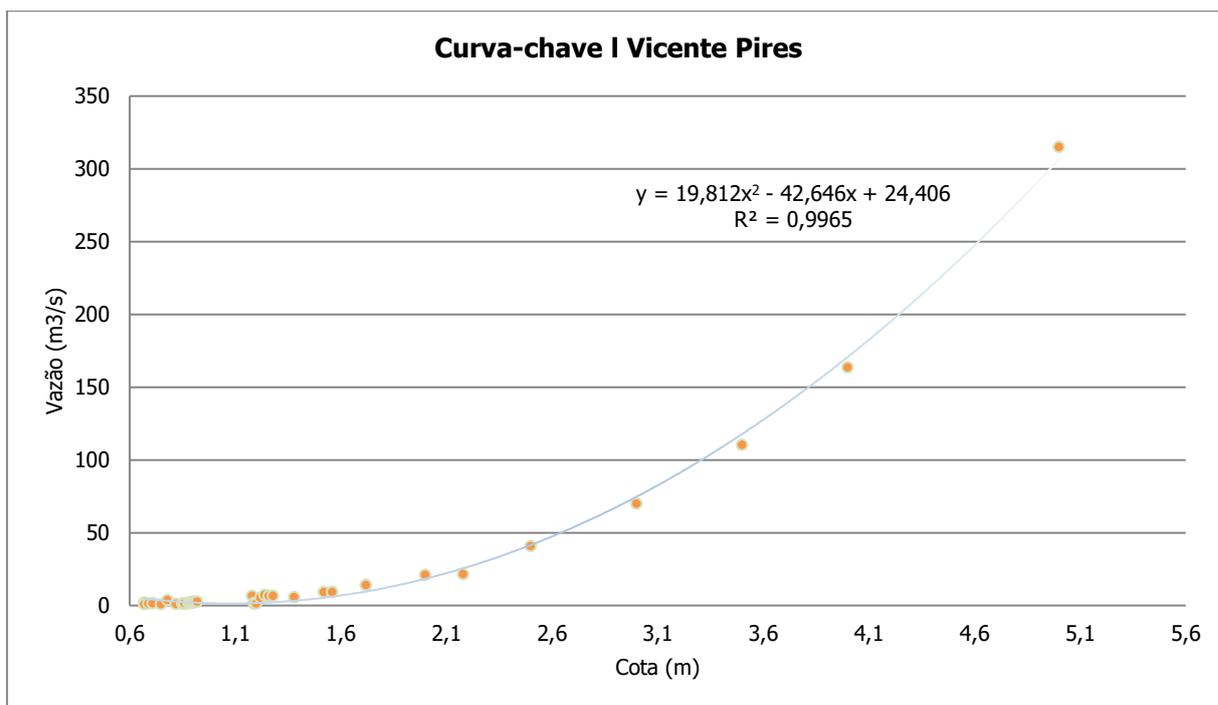


Figura 18 - Curva-chave do córrego Vicente Pires calculada para este trabalho

Estação Vila Cauhy

No ponto de controle da Vila Cauhy, foi utilizada a declividade do canal, calculada a partir dos dados obtidos no software ArcGIS, para completar os dados necessários à modelagem como condição de contorno (*Normal depth*). O cálculo da declividade utilizada de 0,0053m/m do canal foi realizado de acordo com a Equação (4).

$$D = \frac{C_1 - C_2}{L} \quad (4)$$

Onde C_1 é Cota mais alta do trecho (m), C_2 é Cota mais baixa do trecho (m) e L —é Comprimento do córrego (m).

Para a verificação da acurácia do modelo, foram utilizadas as observações de campo da Defesa Civil/DF para uma enchente que aconteceu em fevereiro de 2021 no Córrego Riacho Fundo e dados de vazão coletados nas seções de controle.

4.4 Verificação e cálculo de erro

A experiência de campo da Defesa Civil mostrou os pontos que sofrem com as enchentes de forma recorrente. Essa experiência foi importante para verificar se o modelo conseguiu mostrar o que é interessante para a organização territorial, que são os pontos de interesse para as ações voltadas para o a drenagem urbana local.

O cálculo do erro utilizou dados de vazão coletados em campo para uma simulação no modelo e comparou por meio da curva-chave gerada qual seria o erro de acordo com a raiz quadrada do erro médio (RMSE).

O RMSE é calculado de acordo com a Equação (5) abaixo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Y - X_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Onde n é o tamanho da amostragem, Y é o valor de vazão dado pelo modelo e X_i é o valor de vazão medido em campo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo/DF

O valor de Fator de Forma obtido foi de 0,76, que indica risco médio/baixo de enchentes por ser menor do que 1. O Coeficiente de Compacidade (K_c) obtido foi de 1,463, corroborando a condição de risco de enchentes encontrado no Fator de Forma.

O Índice de Circularidade (I_c) aplicado à classificação proposta por Schumm (1956), Para a bacia do Riacho Fundo, o I_c calculado foi de 0,46, reiterando a bacia como risco médio/baixo na formação de picos de cheias.

A Densidade de Drenagem obtida alcançou o valor de 0,45 km/km², indicando uma bacia de drenagem reduzida. O Índice de sinuosidade calculado resultou no valor de 2,12, sugerindo um canal de alta sinuosidade. O córrego não apresenta grandes meandros, mas sim pequenas sinuosidades distribuídas ao longo do canal. Essa distribuição reduz a velocidade de escoamento.

A partir dos dados de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Riacho fundo (Figura 19), é possível perceber que a urbanização não respeitou as margens dos corpos hídricos e as áreas urbanizadas cresceram para dentro das calhas dos córregos, impermeabilizando as áreas de infiltração e, conseqüentemente, contribuindo para o escoamento superficial.

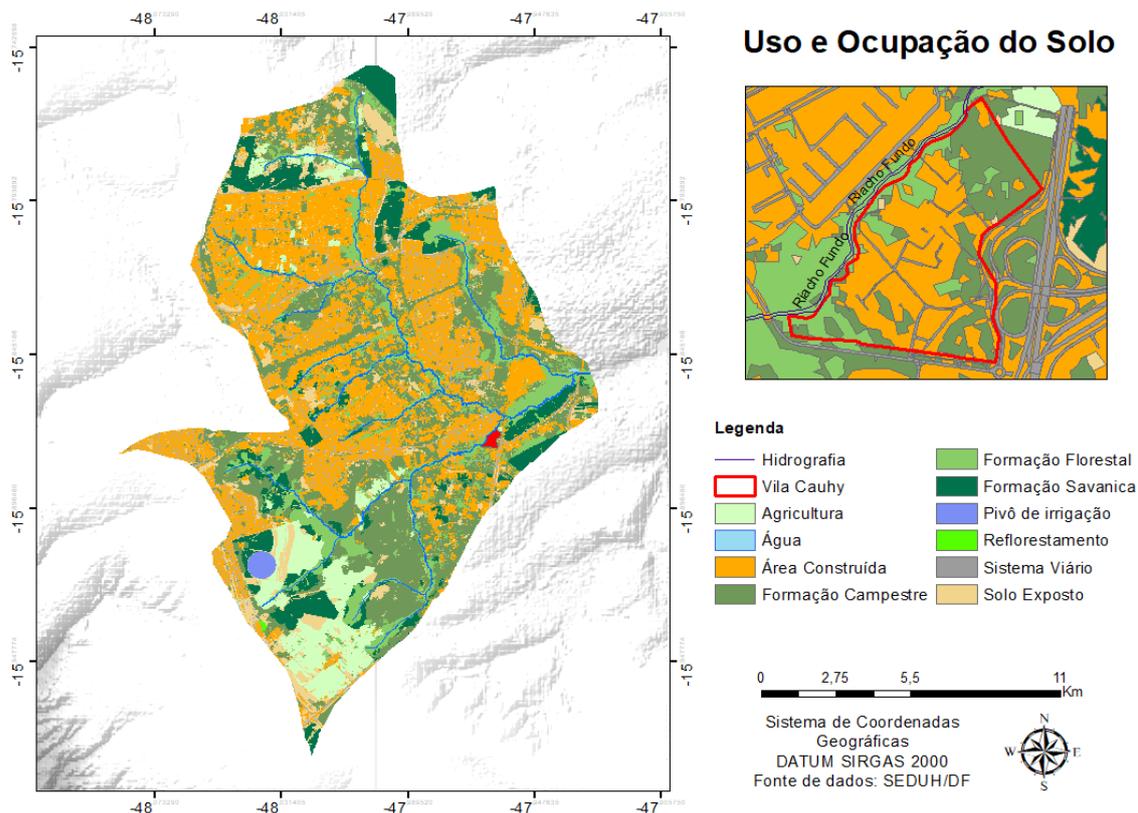


Figura 19 – Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo

Mais especificamente, na Vila Cauhy, a área de impermeabilização por áreas construídas segue a mesma linha de crescimento desordenado nas demais áreas da bacia.

A partir desse dado fornecido pela SEDUH/DF, estima-se que cerca de 40% da área da bacia está impermeabilizada por áreas construídas e sistema viário. Cerca de 9% das áreas destinadas à preservação permanente (APP) de corpos hídricos, de acordo com o código florestal brasileiro (LEI 12.651/2012), está degradada por algum tipo de antropização como construções, vias ou agricultura. A área de APP próxima à vila Cauhy está quase totalmente ocupada por construções (Figura 20).

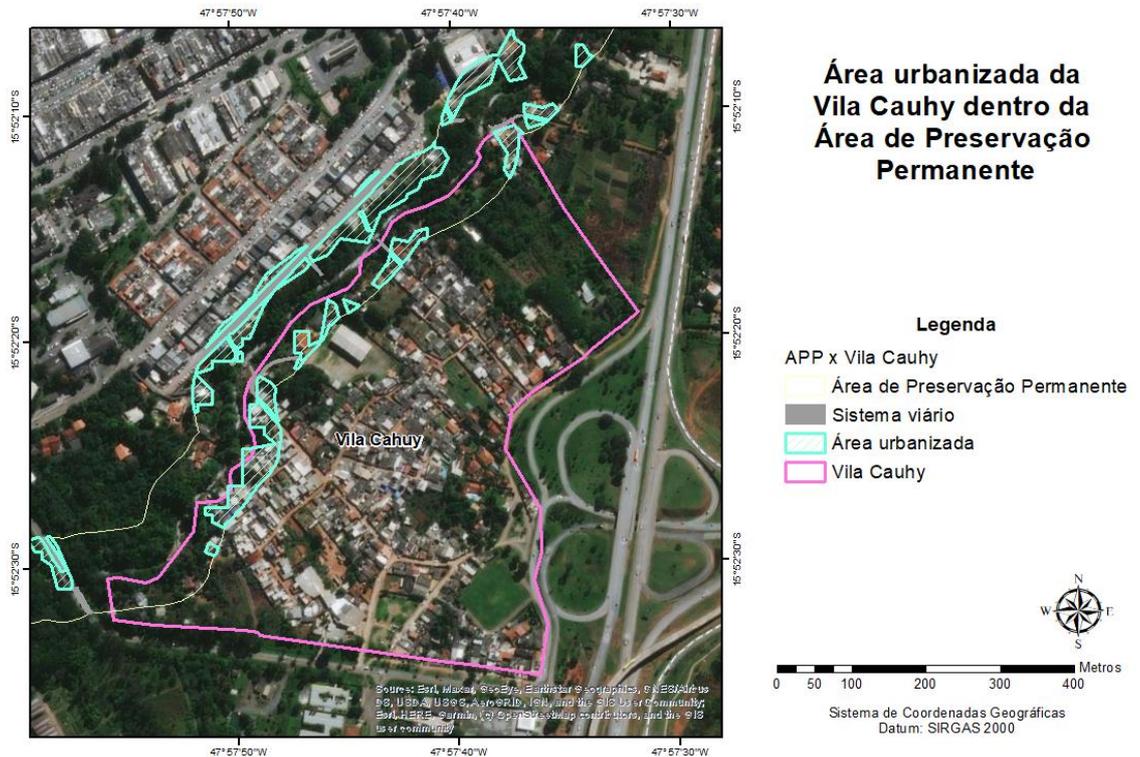


Figura 20 - Área de preservação permanente na Vila Cauhy

A área foi considerada prioridade para receber o benefício de obras de drenagem segundo o Plano Distrital de Saneamento Básico (SERENCO, 2017).

O mapa de declividades mostra as porcentagens de inclinação da bacia estudada (Figura 21). Os pontos em vermelho mostram a tendência de aumento de velocidade no escoamento superficial.

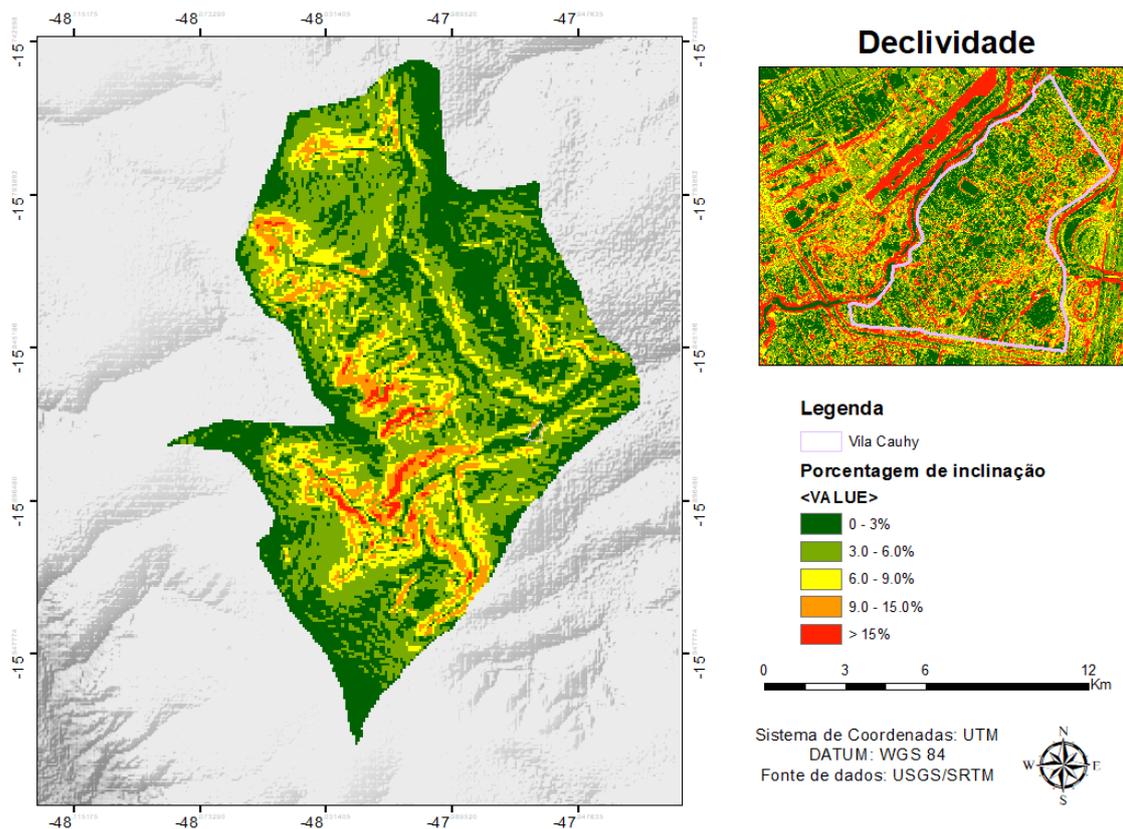


Figura 21 – Mapa de declividade na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo

O detalhe do recorte da Vila Cauhy tem maior precisão, por isso as inclinações se mostram mais variadas. No entanto, a partir dessa imagem é possível perceber que as margens do córrego são bem inclinadas, expondo a característica do corpo hídrico de apresentar degradação e erosão, tornando-as encaixadas e aproximando a seção transversal a um formato retangular.

Por fim, o mapa de altimetria (Figura 22) mostra a Vila Cauhy nos pontos mais baixos da bacia, com grande potencial de ser uma planície natural de inundação do córrego Riacho Fundo. A altimetria mínima da bacia é de 1010m, a máxima é de 1275m e a média de 1142m.

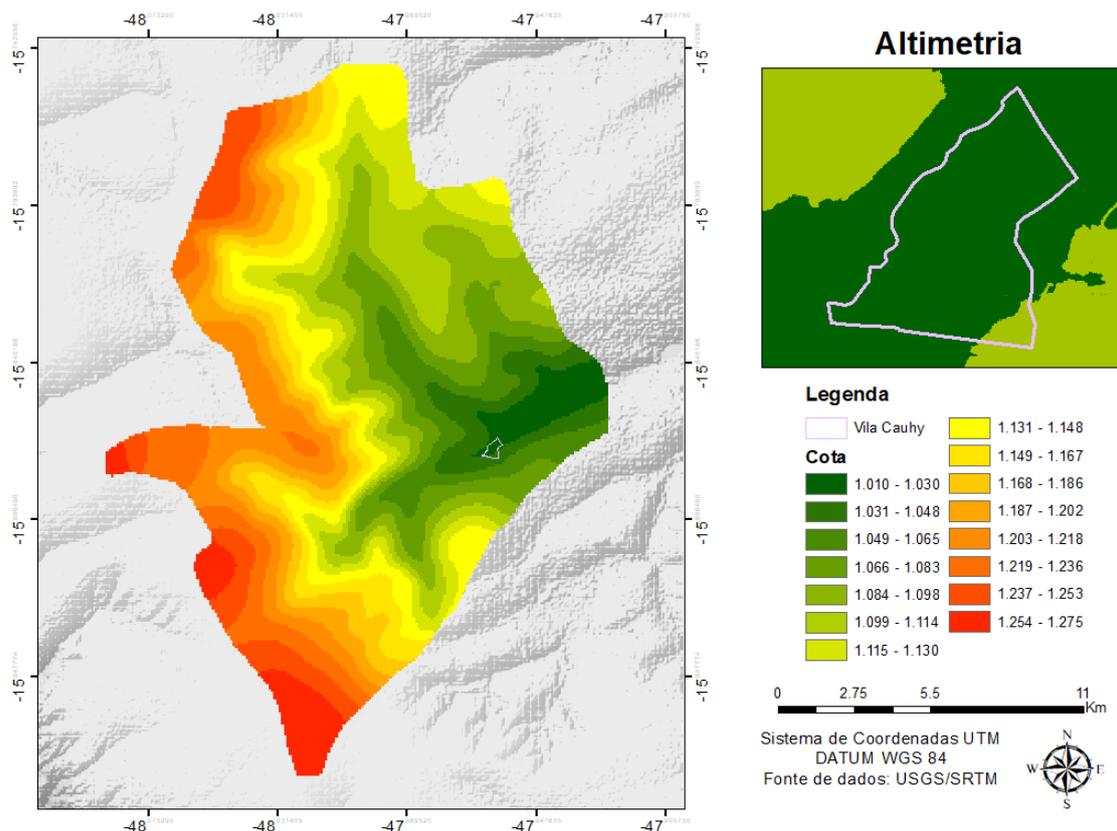


Figura 22 – Mapa de altimetria na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo

Manchas de inundação

O MDT gerado pelos dados de LiDAR utilizado para modelagem de vazões não prejudicou o resultado final, apesar da inconsistência. No entanto, recomenda-se a utilização de novo estudo aprofundado a partir das informações de alerta levantados nesse estudo. A opção de se utilizar esse mesmo MDT, apesar dessa inconsistência, se deveu à captação de dados LiDAR ser dispendiosa e a região estar em rota de pouso de aviões, dificultando a coleta de dados por outros meios e em tempo hábil.

O mapa de inundação com TR = 3 anos foi simulado para uma vazão de 85 m³/s e altura d'água de aproximadamente 4m (Figura 23). Essa altura foi a registrada durante a chuva de janeiro de 2021 que causou inundação na vila Cauhy segundo relatório de campo da Defesa Civil.

O modelo ilustrou bem o que seria o problema atual de inundação da vila Cauhy, com a enchente chegando a aproximadamente 1m de altura na área das casas. Não foi percebida a influencia do córrego Vicente Pires para esse evento nem da ponte sobre a EPIA,

que fica logo após a confluência dos dois córregos. A velocidade da água nesses eventos de enchente é maior dentro da calha do córrego.

A título de estudo para embasamento de obras de drenagem, foram geradas mais duas situações onde a ocupação da bacia é a mesma, mas o tempo de recorrência é maior. No mapa de simulação com tempo de recorrência de 10 anos e CN 75 (Figura 24), ficou clara a importância da ponte antes da vila Cauhy, localizada no bairro Núcleo Bandeirante. Ela reduz a velocidade da água, o que controla um pouco do volume que chega na vila Cauhy.

No caso de um evento dessa dimensão, a velocidade da água começa a aumentar na área de casas, essa observação é importante para o dimensionamento do poder de destruição da água enquanto a inundação acontece.

Para a simulação com 25 anos de tempo de recorrência (Figura 25), os resultados indicaram que há um transbordamento expressivo do nível d'água para fora do canal principal do rio. A velocidade da água nessa situação atinge aproximadamente 10km/h na área residencial.

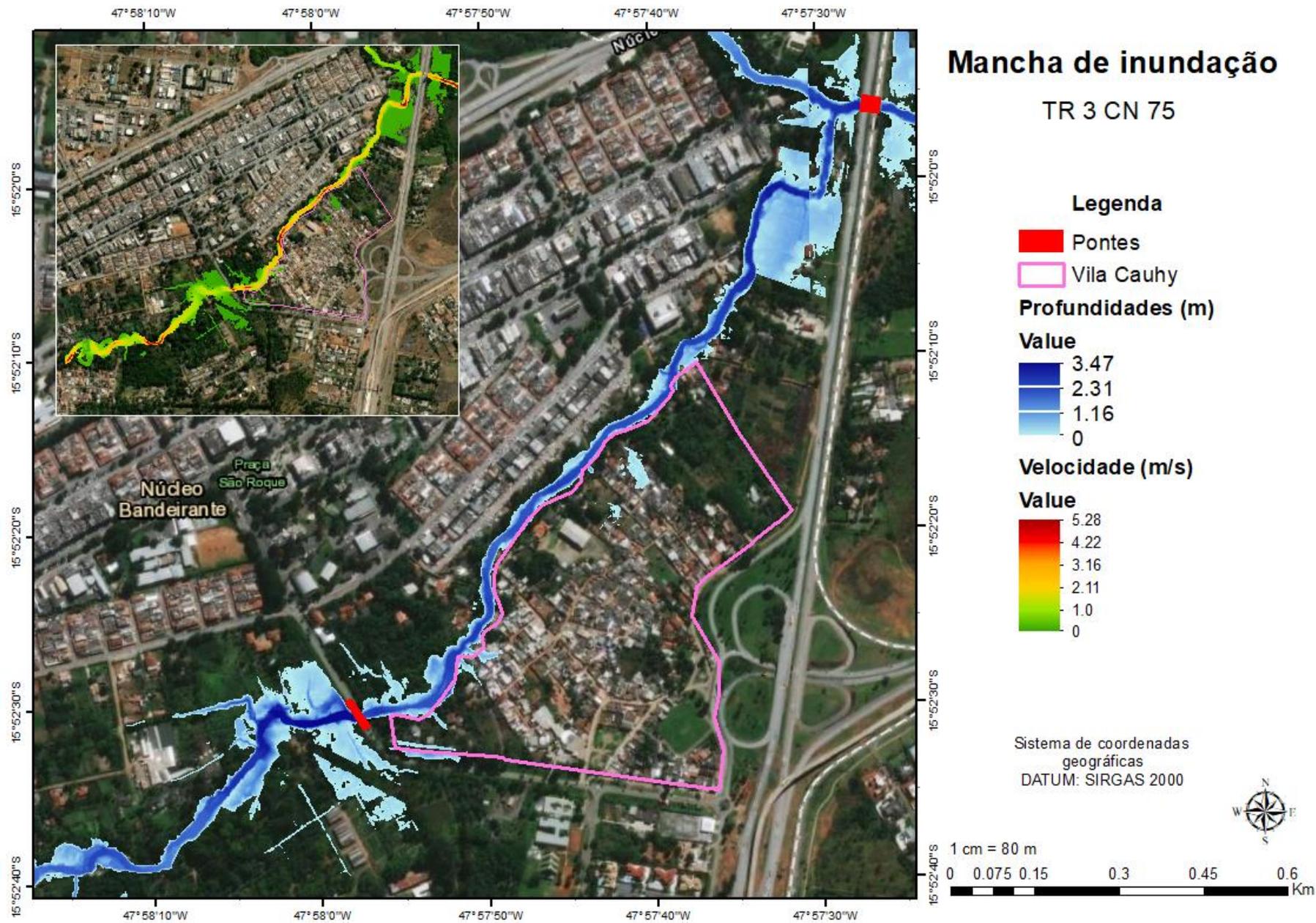


Figura 23 – Mancha de inundação para TR = 3 anos e CN = 75

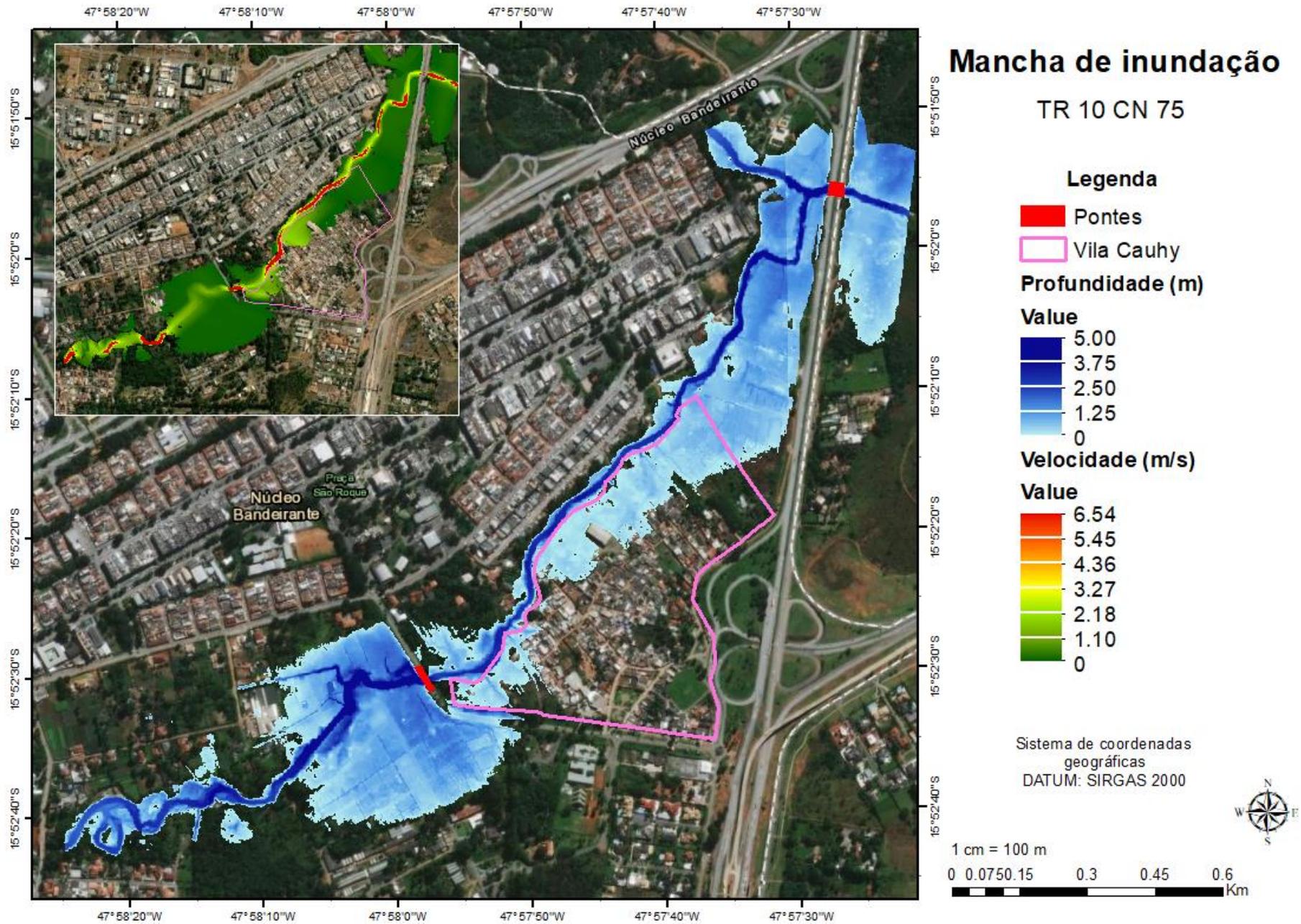


Figura 24 – Mancha de inundação para TR = 10 anos e CN = 75

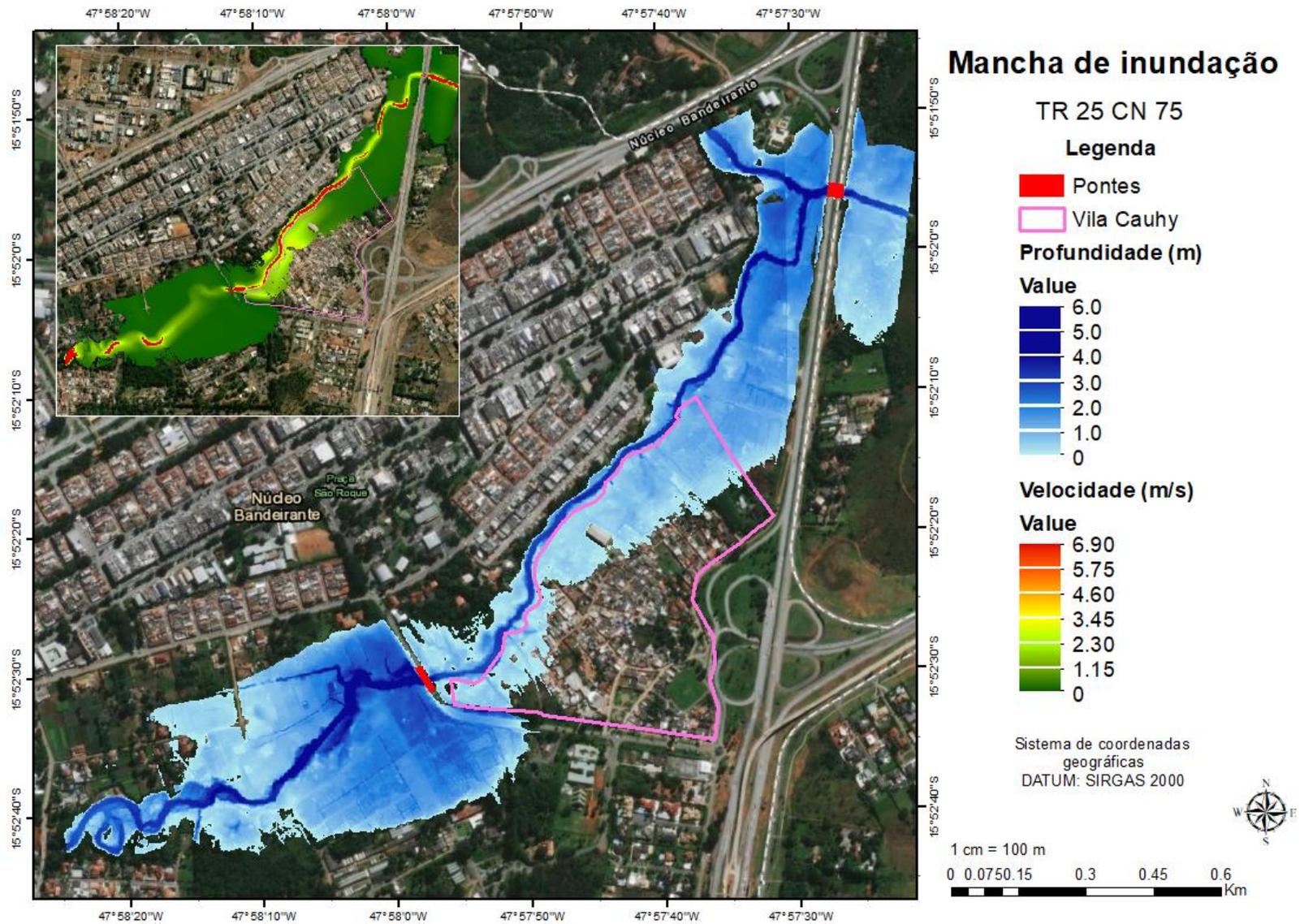


Figura 25 – Mancha de inundação para TR = 25 anos e CN = 75

Cenários para manchas de inundação

Foram simulados cenários para o caso em que a bacia expanda para uma dinâmica de urbanização em que o solo passe a ser mais impermeabilizado à jusante da Vila Cauhy e se aproxime de um $CN = 90$, que corresponde a uma zona urbana densamente ocupada. Esse cenário já acontece à montante do córrego Vicente Pires, que também sofre com enchentes devido à precariedade das redes de drenagem urbana.

Vale ressaltar que a importância dessas simulações se encontra no auxílio à alocação eficiente dos recursos visando a otimizar a prevenção e mitigação das enchentes.

A mancha de inundação resultante para um $TR = 3$ anos (Figura 26), neste cenário, se assemelha muito à mancha de inundação para um $TR = 25$ anos na situação de ocupação atual da bacia. Esta conclusão expõe o risco de aumento significativo da inundação caso não sejam tomadas medidas governamentais que controlem as ações de impermeabilização da bacia.

As manchas de inundação resultantes dos cenários com TR de 10 e 25 anos indicam maiores áreas de influência do transbordamento e níveis d'água mais elevados. É possível notar que, em alguns trechos do talvegue do rio, a altura da água passa de, aproximadamente, 6 metros no TR de 3 anos, para 10 metros considerando o TR de 25 anos.

Nesse contexto, o potencial destrutivo da onda de cheia poderia provocar uma série de danos no local e a jusante da Vila Cauhy, incluindo a danificação de residências, o carreamento de materiais para o leito do rio, a obstrução de locais de estreitamento do canal, entre outros. A velocidade da água chama a atenção nessa situação por atingir aproximadamente 22km/h na área residencial.

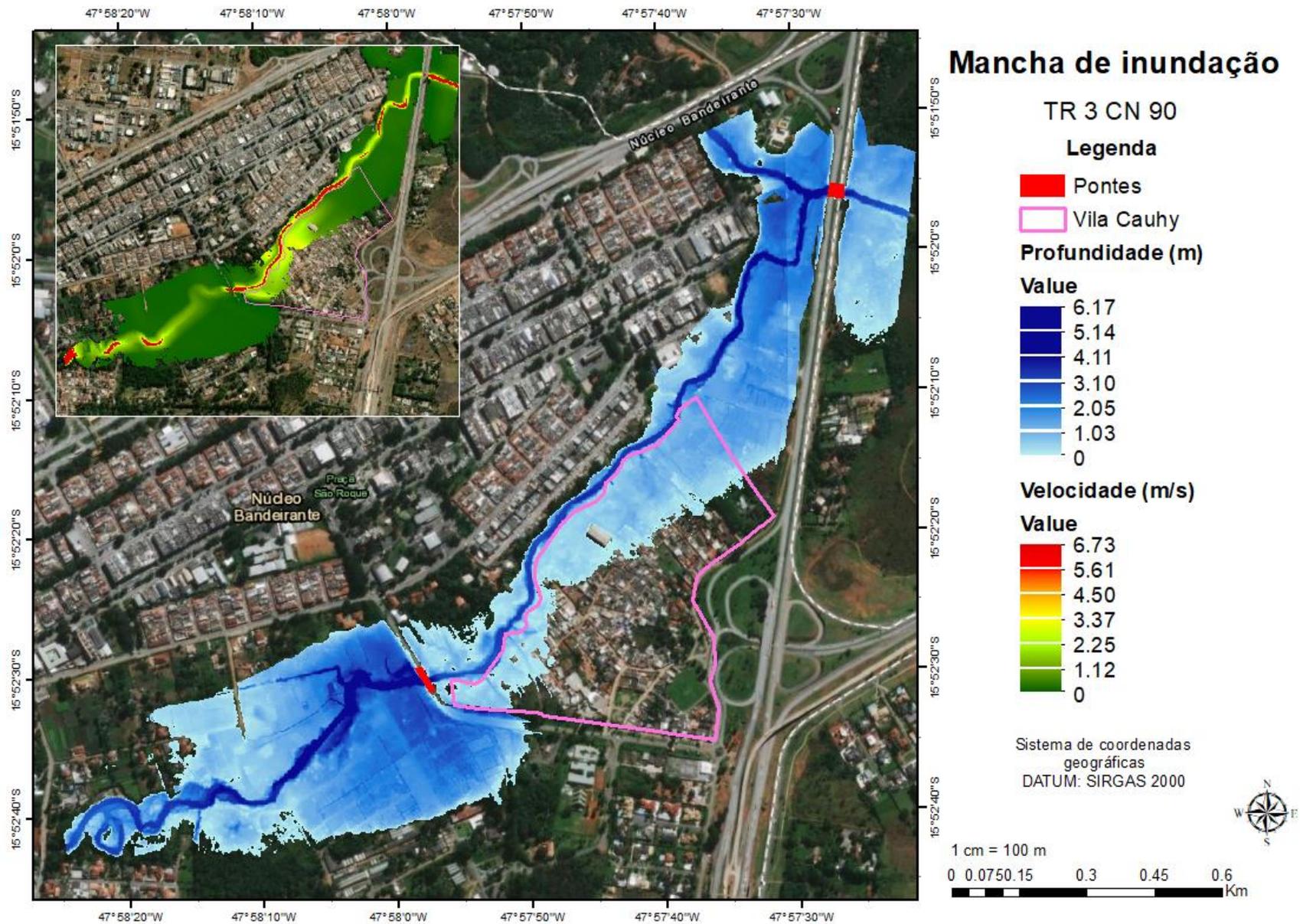


Figura 26 – Mancha de inundação para TR = 3 anos e CN = 90

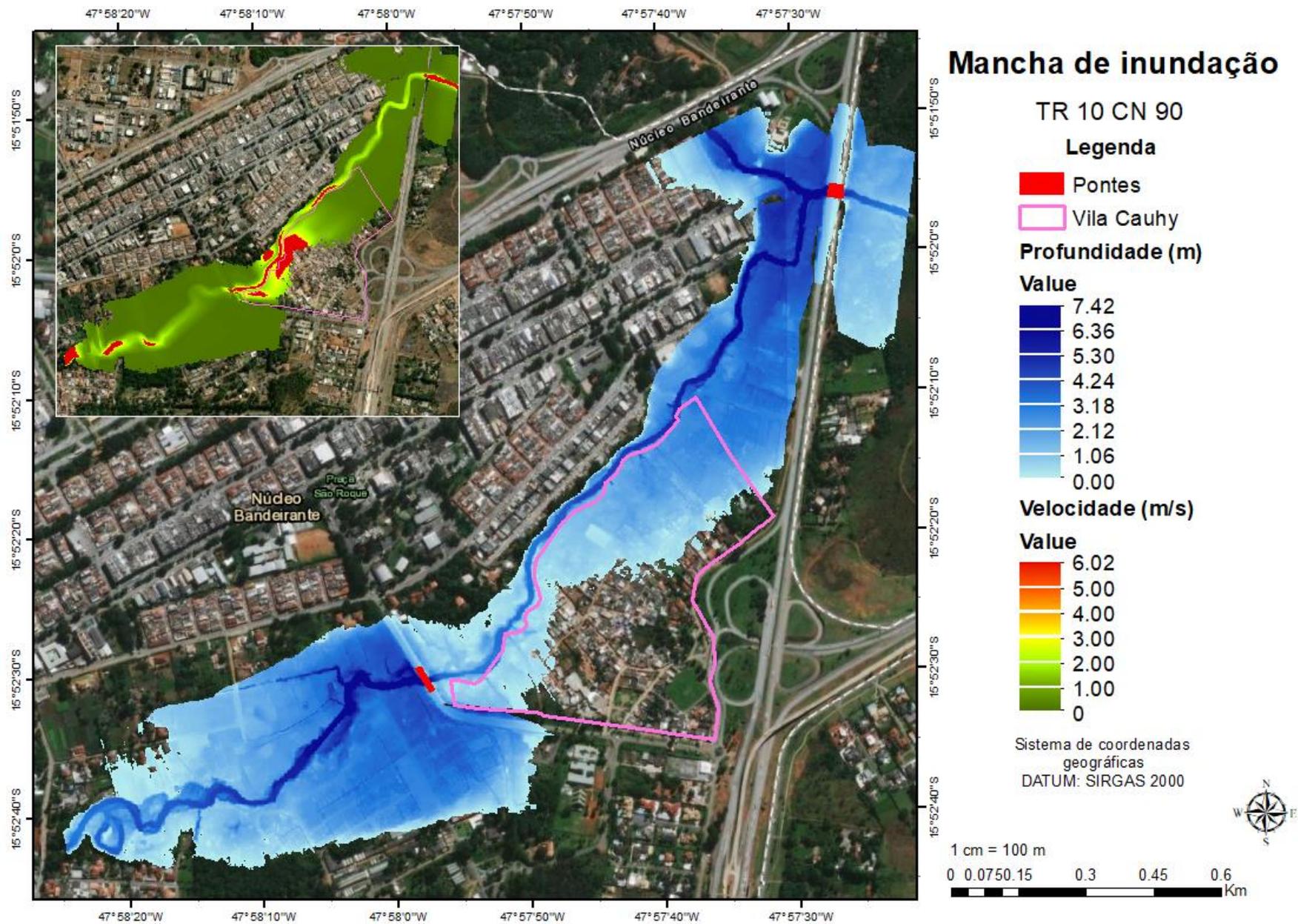


Figura 27 – Mancha de inundação para TR =10 anos e CN = 90

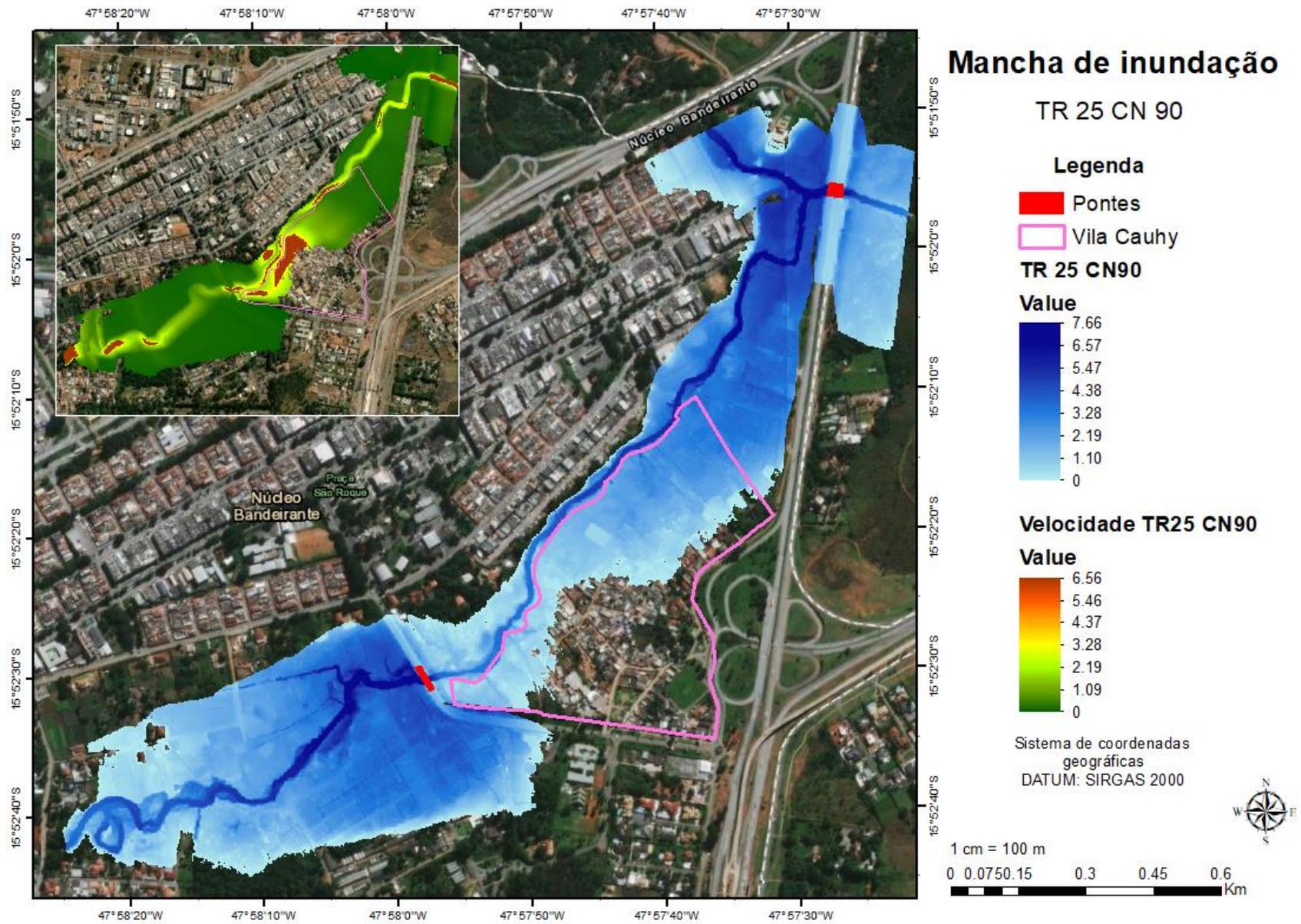


Figura 28 – Mancha de inundação para TR = 25 anos e CN = 90

Verificação do modelo

A verificação de modelo feita a partir das observações de campo fornecidas pela Defesa Civil/DF em pontos que alagam continuamente estão representadas pelos pontos vermelhos na Figura 29. Foi adicionado ao mapa a simulação do cenário em que a planície de inundação chega aos locais onde são notificadas as enchentes e alagamentos.

Os alagamentos acontecem em maior parte na beirada do córrego e em partes específicas assinaladas do bairro em alturas médias de 1m.

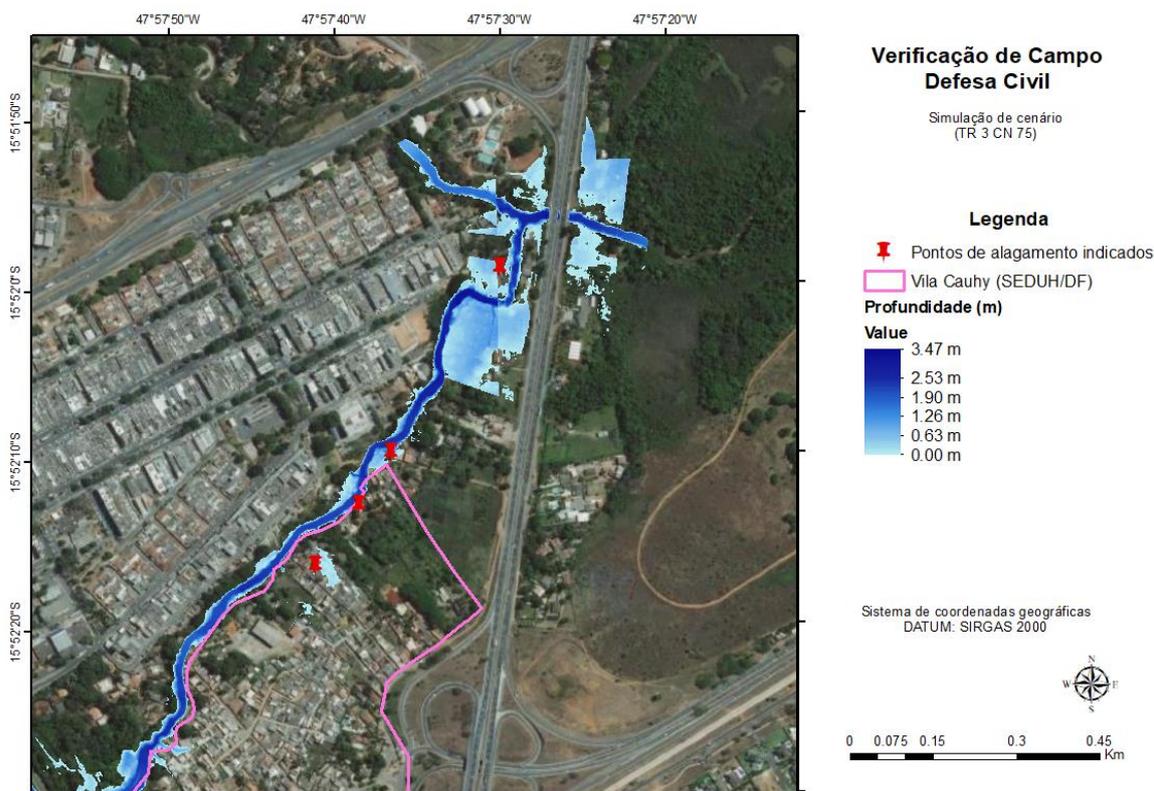


Figura 29 - Verificação do modelo a partir dos dados de campo da Defesa Civil/DF

Erro calculado

O RMSE calculado para esse modelo foi de 2,14 e é um bom comparativo para as futuras simulações que utilizem mais dados de vazão, posto que os dados do córrego Riacho Fundo foram pontuais e a adição de mais dados do tipo aumentaria a certeza do modelo, quanto menor o valor de RMSE calculado, melhor o cenário criado pela modelagem se encaixaria à uma situação real.

A Figura 30 mostra uma comparação de resultados das vazões pontuais coletadas em campo em um ano hidrológico e os resultados calculados na simulação. A partir do desvio

padrão desse resultado é que o RMSE foi calculado. Por se tratar de um dado difícil de conseguir, foram poucos os eventos registrados.

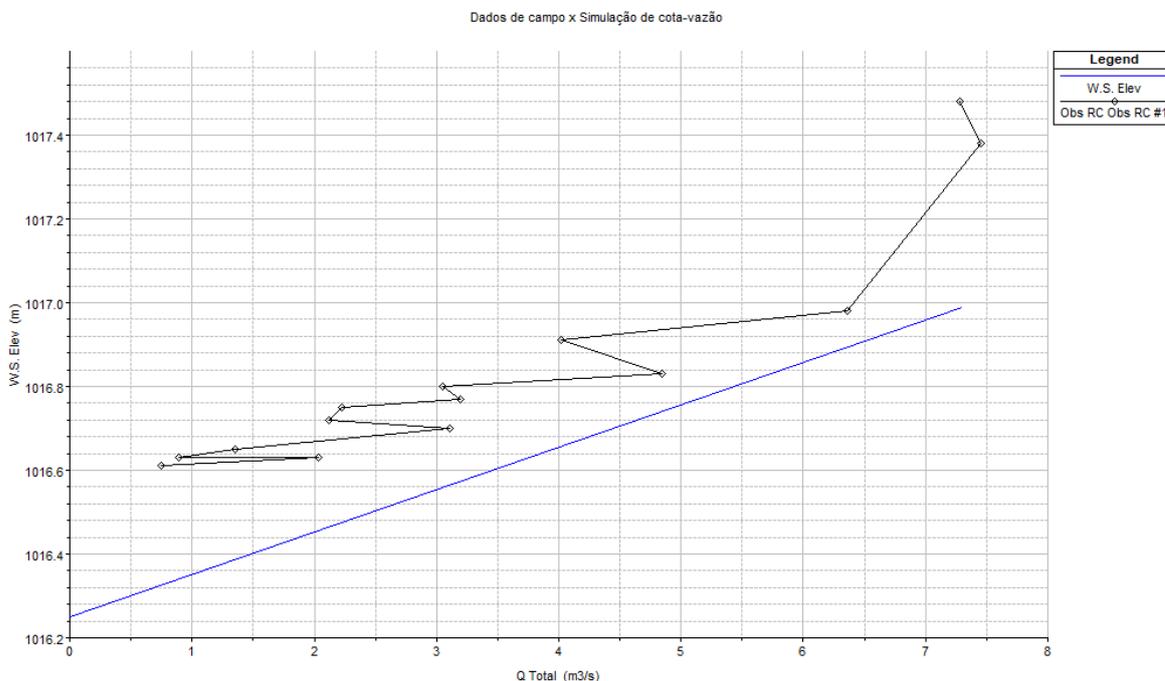


Figura 30 - Comparação de dados de vazão coletados em campo com os resultados da simulação

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Nesse estudo foi avaliada a tendência da bacia do córrego Riacho Fundo à inundação e aonde estavam localizadas as manchas de inundação desse corpo hídrico com foco na vila Cauhy que sofre com enchentes recorrentes.

O estudo morfométrico de toda a bacia mostrou uma média/baixa tendência natural às inundações, o que leva à conclusão que a ocupação da bacia, ou seja, a interferência antrópica na hidrodinâmica da bacia está entre os maiores responsáveis pelas enchentes que acontecem não só na vila Cauhy mas em toda a região. Existem registros de enchentes à montante do córrego Vicente Pires, pouco discutidos nesse trabalho, que corroboram para essa conclusão.

Na região do córrego Vicente Pires a urbanização é bem mais intensa e se mostra consolidada, por isso o CN local não seria muito variado, deixando o foco para a porção sul onde se encontra o córrego Riacho Fundo, que ainda tem grande potencial de expansão

populacional devido à posição geográfica favorável às atividades econômicas e proximidade do Plano Piloto.

A simples variação do CN da subbacia do córrego Riacho Fundo alertou para a importância de obras de mitigação de enchentes futuras. O modelo mostra grandes áreas urbanas afetadas por uma passagem de cheia onde a bacia está significativamente impermeabilizada.

As enchentes na vila Cauhy são um problema recorrente e poucos estudos sobre a situação dessa parte fragilizada da cidade foram encontrados. A partir das manchas de inundação é possível tomar medidas de precaução para que não ocorram mais fatalidades ou perdas materiais como vêm acontecendo. Apesar de ser uma área reservada para preservação por motivos de estar justamente no espaço de inundação do córrego, hoje é uma área urbana consolidada.

Recomenda-se a renovação de trabalho no modelo incluindo as poucas obras de drenagem que já foram realizadas na região.

Propõe-se o aumento da coleta de dados de vazão nos eventos extremos por equipamentos automatizados em razão da velocidade da passagem da onda de cheia e seu poder de arraste de sedimentos e materiais que estejam na direção da passagem.

7 BIBLIOGRAFIA

- AHRENS, S. R. (1999). Flood Forecasting for the Buffalo Bayou Using CRWR-PrePro and HEC-HMS. Centro de Pesquisa em Recursos Hídricos, Austin/TX: Disponível em <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/6796> Acesso 10/08/2021.
- ALVES, G. J. (2016). *Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos no Sul de MG*. Lavras: UFLA.
- AQUINO, I. G., ROIG, H. L., OLIVEIRA, E. S., GARNIER, J., GUIMARÃES, E., & KOIDE, S. (Jun de 2018). Variação temporal da descarga sólida em suspensão e identificação de minerais a partir de aperfeiçoamento de método de amostragem automática no Córrego Riacho Fundo, Brasília, Distrito Federal. *Geologia USP, Sér. cient., São Paulo, v. 18, n. 2, DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-140500*, pp. 171-185.
- BANASIK, K., KRAJEWSKI, A., SIKORSKA, A., & HEJDUK, L. (2014). Curve number estimation for a small urban catchment from recorded rainfall-runoff events. *Archives of Environmental Protection, Vol. 40(4)*, 16.
- BARBOSA JR, A. R. (26 de 10 de 2021). *PUCGOIÁS.EDU*. Fonte: Notas de aula - Bacia Hidrográfica:
http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17403/material/Cap2%20-%20Bacia%20Hidrografica_UFOP.pdf
- BAUMANN, C. A., & HALASEH, A. A. (2011). Utilizing Interfacing Tools for GIS, HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS, and ArcHydro. *World Environmental and Water Resources Congress. Bearing Knowledge for Sustainability*, pp. 1953-1962.
- BERTONI, J. C., & TUCCI, C. E. (2003). *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BOUVIER, C., BOUCHENAKI, L., & TRAMBLAY, Y. (2018). Comparison of SCS and Green-Ampt Distributed Models for Flood Modelling in a Small Cultivated Catchment in Senegal. *Geosciences* 8, 122, MDPI, 14.
- BRANDÃO, A. (2016). *Brasília Resiliente*. Brasília: CODEPLAN.
- BRAVO, N., & CARMO, J. S. (2005). Study of fluvial processes using Geographic Information Systems. *WIT Transactions on Ecology and the Environment, vol 83, ISSN 1743-3541*, pp. 525-533.
- BRUNNER, G. (2016). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0. *US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 547* .

- BRUNNER, G. W. (2010). *River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. v. 4.1*. Davis: USACE.
- CARDOSO, C. A., DIAS, H. C., SOARES, C. P., & MARTINS, S. V. (2006). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 30, n. 2*, pp. 241-248.
- CARVALHO, A. T., SILVA, O. G., & CABRAL, J. J. (2017). Efeitos do revestimento de canal e impermeabilização do solo à dinâmica de inundação do Rio Arrombados-PE. *Geociências. UNESP. v. 36, n. 1*, 76-88.
- CHOW, V. (1959). *Open Channel Hydraulics*. NY: Mc Graw Hill international editions.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. Nova York: McGraw-Hill. 572p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981). *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Edgar Blücher.
- CODEPLAN. (1991). *Relatório do Plano Piloto de Brasília*. Brasília: Secretaria de Economia do Distrito Federal.
- CODEPLAN. (2021). *Consumo de água tratada no Distrito Federal: Um retrato pós crise hídrica*. Brasília: Secretaria de Economia do DF.
- COLLISCHONN, W. (2008). O hidrograma unitário. Em *Introduzindo hidrologia* (p. 151). IPH UFRGS.
- COOK, A., & MERWADE, V. (10 de Agosto de 2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping . *Journal of Hydrology, 377*, pp. 131 - 142.
- CORRÊA, I. (s.d.). Topografia aplicada à engenharia civil. 2012. UFRGS. Notas de aula.
- COSTABILE, P., CONSTANZO, C., FERRARO, D., MACCHIONE, F., & PETACCIA, G. (2020). Performances of the New HEC-RAS Version 5 for 2-D Hydrodynamic-Based Rainfall-Runoff Simulations at Basin Scale: Comparison with a State-of-the Art Model . *Water 2020, 12, 2326*, 19.
- CPRM. (2014). *Sistema de Alerta de Eventos Críticos*. Acesso em 27 de Agosto de 2020, disponível em https://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php#
- DARCY, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont.
- DE ROO, A. (In: Balabanis, P. et al. de 1999). LISFLOOD: a rainfall-runoff model for large river basins to assess the influence of land use changes on flood risk. *RIBAMOD: river basin modelling, management and flood mitigation; concerted action* , pp. 349–357.
- DEFESA CIVIL. (Jan de 2016). Relatório Diário nº 009/2016.

- DIAZ, J. C., CARTER, W. E., SHRESTHA, R. L., & GLENNIE, C. L. (2017). LiDAR Remote Sensing. Em M. S.-L. Pelton J., *Handbook of Satellite Applications* (pp. 929-980). https://doi.org/10.1007/978-3-319-23386-4_44: Springer.
- DOUBLEDAY, G., SEBASTIAN, A., LUTTENSCHLAGER, T., & BEDIENT, P. B. (2013). Modeling hydrologic benefits of low impact development: A distributed hydrologic model of the woodlands, Texas. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol 49 n 6, 1444-1455.
- EMBRAPA. (2004). Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Documentos Embrapa Cerrados. Brasília.
- EM-DAT. (s.d.). *Banco de Dados Internacional de Desastres*. Acesso em 18 de 04 de 2021, disponível em <https://public.emdat.be/data>
- EXCIMAP. (2007). *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*.
- EZZ, H. (2017). Integrating GIS and HEC-RAS to model Assiut plateau runoff. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 9.
- FARIA, M. M., ZACCHI, R. C., & FERREIRA, E. S. (Viçosa-MG de 2009). Caracterização morfométrica e biológica da Bacia Hidrográfica do Córrego Serafim, Sub-Bacia do Rio Paraibuna, Juiz de Fora MG. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA*, 13, p. Editora da UFV.
- FERRIGO, S. (2014). *Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática - Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto - DF*. Brasília: Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- FLENER, C., LOTSARI, E., ALHO, P., & KAYHKO, A. (2012). Comparison of empirical and theoretical remote sensing based bathymetry models in river environments. *River Research and Applications*, Chichester, v.28, pp. 118-133.
- FONTES, A. L. (2010). *Geomorfologia Fluvial*. São Cristóvão/SE: CESAD.
- FREITAS, R. O. (1952). Textura de drenagem e sua aplicação geomorfológica. *Boletim Paulista de Geografia* V. 11, pp. 53-57.
- GOERL, R., & KOBIYAMA, M. (2013). Redução dos desastres naturais: desafio dos geógrafos. *Ambiência*. v. 9, pp. 145-172.
- GUERRA, A. T., & GUERRA, A. J. (2003). *Novo Dicionário Geológico-geomorfológico*. 3a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

- HORRITT, M. S., & BATES, P. D. (2001). Predicting floodplain inundation: raster-based models versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, vol 15, DOI: 10.1002/hyp.188, pp. 825-842.
- HORRITT, M. S., & BATES, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268 (1–4), pp. 87 - 99.
- IBGE. (05 de 07 de 2018). Acesso em 18 de 04 de 2021, disponível em Perfil dos Municípios Brasileiros 2017: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101595.pdf>
- ÍCAGA, Y., TAS, E., & KILIT, M. (2016). Flood Inundation mapping by GIS and a Hydraulic Model (HEC-RAS): A case study of Akarcay Bolvadin subbasin, in Turkey. *Acta Geobalcánica. Vol 2* DOI: <https://doi.org/10.18509/AGB.2016.12>, pp. 111-118.
- IGHILE, E. H., & SHIRAKAWA, H. (2020). A study on the effects of land use change on flooding risks in Nigeria. *Geographia Technica. Vol 15 Issue 1*, 91-101.
- IPCC. (27 de fev de 2022). IPCC. Fonte: Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- JAVADNEJAD, F. (2013). *Flood inundation mapping using HEC-RAS and GIS for Shelby County, Tennessee*. Dissertação de Mestrado. : The University of Memphis.
- JR, H. H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. Washington: UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE.
- KHALAJ, M. R., NOOR, H., & DASTRANJ, A. (10 de Ago de 2020). Investigation and Simulation of Flood Inundation. *Research Square*, p. 23.
- KOBIYAMA, M., MENDONÇA, M., MORENO, D., MARCELINO, I., MARCELINO, E., GONÇALVES, E., . . . RUDORFF, F. (2006). Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos. *Organic Trading*, p. 109.
- KOURGIALAS, N. N., & KARATZAS, G. P. (21 de Abril de 2011). Flood Management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas - a case study. *Hydrological Sciences Journal– Journal des Sciences Hydrologiques*, 56:2, DOI: 10.1080/02626667.2011.555836, pp. 212-225.
- LAMICHHANE, N. &. (14 de Apr de 2017). Development of Flood Warning System and Flood Inundation Mapping Using Field Survey and LiDAR Data for the Grand River near the City of Painesville, Ohio. *Hydrology* 2017, 4, 24; doi:10.3390/hydrology4020024, p. 15.
- LARA, H. (2016). *Brasília, uma cidade centenária*. Texto para discussão. 56 p.

- LIMA, J. R., MENDES, R. A., & ALMEIDA, A. Q. (set/out de 2013). Estimativa da batimetria do Açude do Saco-PE com auxílio de dados orbitais. *Engenharia Agrícola*. v.34. n.5, pp. 1017-1023.
- LINDNER, E. A., GOMIG, K., & KOBIYAMA, M. (INPE Florianópolis de 2007). Sensoriamento remoto aplicado à caracterização morfométrica e classificação do uso do solo na bacia rio do Peixe/SC. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13. , pp. 3405-3412.
- LIPORONI, L. M. (2012). Estudo preliminar da qualidade da água do Lago Paranoá, Brasília-DF, utilizando um modelo de qualidade da água bidimensional. Em *Dissertação de Mestrado - PTARH/UnB*. (p. 188). Brasília: Universidade de Brasília.
- LIU, Z. (August de 2018). Assessment of Epistemic Uncertainty in Flood Inundation Modeling. *Doctor Thesis. Lyles School of Civil Engineering. West Lafayette, Indiana*, p. 134p.
- LUCAS, E. W., SOUSA, F. A., SILVA, F. D., & LUCIO, P. S. (2009). Modelagem Hidrológica Determinística e Estocástica Aplicada à Região Hidrográfica do Xingu-Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.3, 308-322.
- LUZ, R. A., & RODRIGUES, C. (2020). O processo histórico de ocupação e de ocorrência de enchentes na planície fluvial do rio Pinheiros de 1930 até os dias atuais. *GeoUSP. Espaço e tempo. Volume 24 n° 2*, 340-360.
- MASOERO, A., CLAPS, P., ASSELMAN, N. E., MOSSELMAN, E., & DI BALDASSARRE, G. (Jan de 2013). Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951. *Hydrological Processes*. vol. 27 n.9 - ISSN 085-6087. DOI:10.1002/hyp.9558, pp. 1341-1348.
- McCUEN, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design*. 2a ed. 819p: Editora Prentice Hall.
- MELO, L. P. (2013). *Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos [manuscrito] : caso hipotético da Barragem Tico-Tico/ Leonardo Pires Reis de Melo. – 2013. xi, 183 f., enc.: il.* Belo Horizonte: Escola de Engenharia - Dissertação de mestrado.
- MIN. (24 de 12 de 2013). *Portaria conjunta N° 148/2013*. Acesso em 04 de 12 de 2019, disponível em Ministério da Integração Nacional. Diário Oficial da União N°249: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/12/2013&jornal=1&pagina=58&totalArquivos=168>
- MISHRA, B. K., EMAM, R., MASAGO, Y., KUMAR, P., REGMI, R., & FUKUSHI, K. (2017). Assessment of future flood inundations under climate and land use change

- scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta. *Journal of Flood Risk Management* Volume 11, Issue S2, 1105-1115.
- MONTE, B. E., COSTA, D. D., CHAVES, M. B., MAGALHÃES, L. O., & UVO, C. B. (jan/mar de 2016). Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol 21 n°1, Porto Alegre, pp. 152-167.
- MUNNA, G. M., ALAM, M. J., UDDIN, M. M., ISLAM, N., & ORTHEE, A. A. (2021). Runoff prediction of Surma basin by curve number (CN) method using ARC-GIS and HEC-RAS. *Environmental and Sustainability Indicators* 11, 7.
- NAKAYAMA, P. T., MENDES, J. B., LOBO, G. A., & SILVEIRA, G. M. (2011). Avaliação do parâmetro CN do método de Soil Conservation Service (SCS) nas bacias do ribeirão dos Marins e córrego Bussocaba - Estado de São Paulo. *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 16.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- NOAA. (2012). *LiDAR 101: An Introduction to LiDAR Technology Data, and Applications*. Charleston, SC: National Oceanic and Atmospheric Administration - Coastal Services Center - Coastal Geospatial Services Division - Coastal Remote Sensing Program.
- NOAA. (set de 2011). *National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA Partnered Guidelines for the Development of AHPS Flood Inundation Mapping*. Acesso em 12 de 12 de 2020, disponível em https://water.weather.gov/ahps/NOAA_AHPS_Guidelines_Final_2011_v3.pdf
- NOH, S. J., LEE, J. H., LEE, S., KAWAIKE, K., & SEO, D. J. (2018). Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization. *Environmental Modelling & Software* 103, 131-145.
- NRCS. (2004). Chapter 10 - Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Em N. R. Service, *Hydrology National Engineering Handbook* (p. 79p).
- OLIVA, A. Q., CAVALCANTE, C. V., FONSECA, F. O., NETTO, P. B., & OGLIARI, T. C. (2001). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Brasília - DF: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, 1a edição Cap. 10, p. 213-272.
- PALARETTI, L. F. (30 de 10 de 2021). *UNESP*. Fonte: Notas de aula - Manejo de Bacias Hidrográficas:

<https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/engenhariarural/luizfabianopalaretti/bacia-hidrografica.pdf>

- PAZ, A. R. (set de 2004). *Hidrologia Aplicada*. Acesso em 27 de 12 de 2020, disponível em CT UFPB: http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UE_RGS.pdf
- PEEREBOOM, I. O. (2000). *Identification of areas exposed to flooding in Norway at a national level*. Oslo: Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), Section for Geoinformation.
- PISTOCCHI, A., & MAZZOLI, P. (2013). Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. *International Environmental Modelling & Software Society - IEMSS*, v.332, 305-310.
- POLI, C. M. (2013). As causas e as formas de prevenção sustentáveis das enchentes urbanas. *2º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis*.
- PORTO, R. L. (1995). Escoamento superficial direto. Em *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: UFRGS.
- PRACTICA, R. M., MAITRI, C., HERMAWAN, A., NUGROHO, P. C., SUTJININGSIH, D., & ANGGRAHENI, E. (2018). Estimating design flood and HEC-RAS modelling approach for flood analysis in Bojonegoro city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 316, 9.
- QUEIROZ, E. P. (2007). *A formação histórica da região do Distrito Federal e entorno: dos municípios-gênese à presente configuração territorial*. Brasília-DF: Dissertação de mestrado. Departamento de Departamento de Geografia, Instituto de Ciências Humanas.
- RENNÓ, C. D., & SOARES, J. (2003). Cap. 2 - Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. Em I. -I. Espaciais, *Curso de Modelagem* (p. 33). http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf.
- RICHARDS, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics. New York. Vol. 1*, 318-333.
- RINCÓN, D., KHAN, U. T., & ARMENAKIS, C. (27 de Jul de 2018). Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis: A Greater Toronto Area Case Study. *Geosciences - MDPI. DOI: 10.3390/geosciences8080275*, p. 27.

- RODRIGUES, A. A. (2015). *Segregação residencial na Vila Cauhy: uma rugosidade espacial?* Brasília-DF: 175 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Geografia.
- ROSE, S., & PETERS, N. E. (2001). Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, 15, 1441-1457.
- SAINT-VENANT, A. (1871). Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux vagues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 73, 147-154.
- SARCHANI, S., SEIRADAKIS, K., COULIBALY, P., & TSANIS, I. (27 de Mai de 2020). Flood Inundation Mapping in an Ungauged Basin. *Water* 2020, 12, 1532; doi:10.3390/w12061532, p. 21.
- SCHUMM, S. A. (Mai de 1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. *Geological Society of America Bulletin*. New York, v. 67, n. 5, pp. 567-646.
- SCS. (1957). Use of Storm and Watershed Characteristics in Synthetic Hydrograph Analysis and Application: V. Mockus. . *US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington DC*.
- SERENCO. (2017). Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Em G. d. Brasília, *TOMO V - Produto 3 - Prognóstico* (p. 227p).
- SILBERSTEIN, R. P. (2006). Hydrological models are so good, do we still need data? *Environmental Modelling & Software* 21, pp. 1340-1352.
- SNIRH. (2020). Hidroweb. disponível em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.
- SOARES, M. R., FIORI, C. O., & KAVISKI, E. (<https://doi.org/10.4215/rm2017.e16001> de 2017). Efficiency of the curve number method of rainwater retention. *Mercator, Fortaleza*, v. 16, e16001, p. 16p.
- TAURO, F., SELKER, J., VAN DE GIESEN, N., ABRATE, T., UIJLENHOET, R., PORFIRI, M., . . . AL, E. (2018). Measurements and Observations in the XXI century (MOXXI): innovation and multidisciplinary to sense the hydrological cycle. *Hydrological Sciences Journal* 63:2 , pp. 169-196.
- TENG, J., JAKEMAN, A. J., VAZE, J., CROKE, B. F., DUTTA, D., & KIM, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, p. 16p .
- TOPOCART. (2009). *Plano de Uso e Ocupação do Solo da Vila Cauhy*. Brasília-DF.

- TUCCI, C. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Editora Universitária UFRGS.
- TUCCI, C. E. (2005). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. - 2.ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH.
- TUCCI, C. E. (2007). *Inundações urbanas*. Porto Alegre - RS: ABRH/RHAMA, 389p.
- TUCCI, C. P. (1995). *Drenagem urbana*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS-ABRH.
- USACE. (1997). *HEC RAS River Analysis System*. USACE.
- USACE. (2008). Dam Break Analysis for Reservoir. *Tetra tech. Final Report*, p. 83.
- USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System. *User's Manual*, 960.
- VESTENA, L. R., CHECCHIA, T., & KOBIYAMA, M. (2006). Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*.
- VILLELA, S. M., & MATTOS, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil. 245p.
- VILLEROY, G. (2011). *Um relato de vivência com a educação integral numa escola pública do Distrito Federal: : CAIC Juscelino Kubitschek de Oliveira – Núcleo Bandeirante – DF* . Brasília-DF: Trabalho de Conclusão de Curso (Pedagogia). Universidade de Brasília.
- VOGEL, R. M., YAINDL, C., & WALTER, M. (2011). Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the United States. *Journal of the american water resources association*. Vol 47 n 3, 464-474.
- WANG, J., Zhonglong, Z., Greimann, B., & Huang, V. (2018). Application and evaluation of the HEC-RAS – riparian vegetation simulation module to the Sacramento River. *Ecological Modelling* 368, 158 - 168.
- ZEIGER, S. J., & HUBBART, J. A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *Journal of Environmental Management* 285, 11.