

Rafael Claus Kohn

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA RECONHECIMENTO DE ÁREAS DE  
RISCO DE ENCHENTE NO PERÍMETRO URBANO DE SANTA CRUZ DO SUL**

Trabalho de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Bruno Deprá

Santa Cruz do Sul

2025

*Dedico a mim mesmo, aos 17 anos. Que após desistir de cursar Relações Internacionais, nunca se sentiu tão confuso. Eventualmente, a confusão passa. Mas nem eu sei quando.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família. Meus pais, Luciana e Oziel, e meus irmãos, Caio e Gabriela, por serem meu maior alicerce pela minha vida inteira. À minha namorada, Yasmin, que sempre estava presente nos momentos de estresse e pânico, pra me suportar e me ajudar a seguir em frente. Sem eles tenho certeza que não teria conseguido.

Agradeço também aos professores da Universidade de Santa Cruz do Sul, que me mostraram tudo que a engenharia é capaz. Em especial ao meu orientador Bruno Deprá, que apesar de eu não conhecer antes desse ano, conseguimos nos entender muito bem. Foi ele que, no primeiro modelo funcional do HEC-RAS, disse que eu seria capaz de fazer um mestrado, e motivou essa nova chama dentro de mim.

Por fim, agradeço ao Matheus, meu primeiro chefe de verdade, e maior mentor que eu poderia ter. Se a faculdade me ensinou 10 coisas, ele me ensinou 1.000, e me mostrou a infinidade de coisas possíveis com a engenharia. Que sempre me deu apoio e me deu ideias novas para perseguir.

## RESUMO

Com o fenômeno de urbanização acelerada ocorrendo nas últimas décadas no país, a falta do planejamento de sistemas de drenagem urbana se torna mais evidente, tornando inundações urbanas mais comuns. Além disso, com cada ano apresentando eventos pluviais de volume jamais vistos anteriormente, em específico com as enchentes de 2024 que devastaram boa parte do Rio Grande do Sul, torna-se evidente a urgência de um planejamento institucional do uso do espaço em áreas urbanas, visando minimizar os riscos para a população residente. O presente trabalho pretende criar um modelo hidrológico do perímetro urbano do município de Santa Cruz do Sul, para determinar áreas da cidade que estão propensas a sofrer com enchentes, devido à fatores topográficos e morfológicos. Foi utilizado o software QGIS para o processamento e criação de um modelo planialtimétrico, e a criação do modelo no software HEC-RAS. Esse foi responsável pela criação do modelo hidrológico, utilizando dados do terreno para os cálculos de vazão e escoamento superficial, assim como os valores de precipitação, recriando eventos registrados por estações meteorológicas na enchente de 2024. Com a modelagem finalizada, foi possível compará-la com registros fotográficos de eventos de enchentes ocorridos no passado, para provar a viabilidade do modelo para o planejamento de drenagem urbana. Os resultados obtidos se mostraram similares aos ocorridos na realidade, e sua possível utilidade fica evidente. Contudo, ainda faz-se necessário um estudo mais detalhado e minucioso com a finalidade de maximizar a precisão das manchas de inundação geradas pelo modelo numérico empregado.

Palavras-chave: Modelo Hidrológico. Mapa de Inundação. Drenagem Urbana. Áreas de Risco de Enchente. HEC-RAS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da chuva acumulada média na bacia hidrográfica do rio Guaíba no período de 01 de abril a 15 de maio nos eventos de 1941 e 2024	9
Figura 2 - Localização do Município de Santa Cruz do Sul no estado do Rio Grande do Sul	11
Figura 3 - Corte esquemático de sarjeta e meio fio	18
Figura 4 - Corte esquemático de boca coletora	19
Figura 5 - Corte esquemático de dissipador	20
Figura 6 - Sistema de microdrenagem	20
Figura 7 - Canal artificial localizado em Amsterdã, na Holanda	22
Figura 8 - Reservatórios de retenção e detenção, respectivamente in-line e off-line	23
Figura 9 - Mapa dos bairros de Santa Cruz do Sul	26
Figura 10 - Interface do software QGIS apresentando a região do estudo	27
Figura 11 - Fusos e hemisférios do sistema de projeção UTM para o Brasil	28
Figura 12 - Corte da projeção do satélite Daichi, destacando a zona urbana de Santa Cruz do Sul	29
Figura 13 - Interface do software QGIS após processar a projeção gerada pelo satélite Daichi	30
Figura 14 - Interface do software HEC-RAS exibindo o mapa topográfico de Santa Cruz do Sul	31
Figura 15 - Gráfico dos dados pluviométricos utilizados, registrados em Bento Gonçalves durante as enchentes de 2024	34
Figura 16 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 26/04	37
Figura 17 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 27/04	38
Figura 18 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 28/04	38
Figura 19 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 29/04	39
Figura 20 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 30/04	39
Figura 21 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 01/05	40
Figura 22 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 02/05	40
Figura 23 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 03/05	40
Figura 24 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 04/05	41
Figura 25 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 05/05	42
Figura 26 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 06/05	42

Figura 27 - Inundação de 2019 na rua Irmão Emílio	43
Figura 28 – Acesso Grasel, Rua Vereador Brenno João Kist, Rua João Werlang e Rua Barão do Arroio Grande, em vermelho, amarelo, laranja e lilás, respectivamente	44
Figura 29 - Alagamento no cruzamento da avenida Deputado Euclides Nicolau Kliemann com a rua Barão do Arroio Grande, em 2025	46
Figura 30 - Modelagem do HEC-RAS no mesmo cruzamento, com opacidade alterada para melhor visualização	46
Figura 31 - Alagamento na rua Coronel Oscar Rafael Jost, próximo à BR-471, em 2025	47
Figura 32 - Modelagem do HEC-RAS na mesma região	47

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Valores utilizados para Manning, abstração inicial, déficit máximo e potencial de percolação, para cada tipo de solo determinado	33
Tabela 2 - Precipitação por hora utilizada em cada dia da simulação	35

## SUMÁRIO

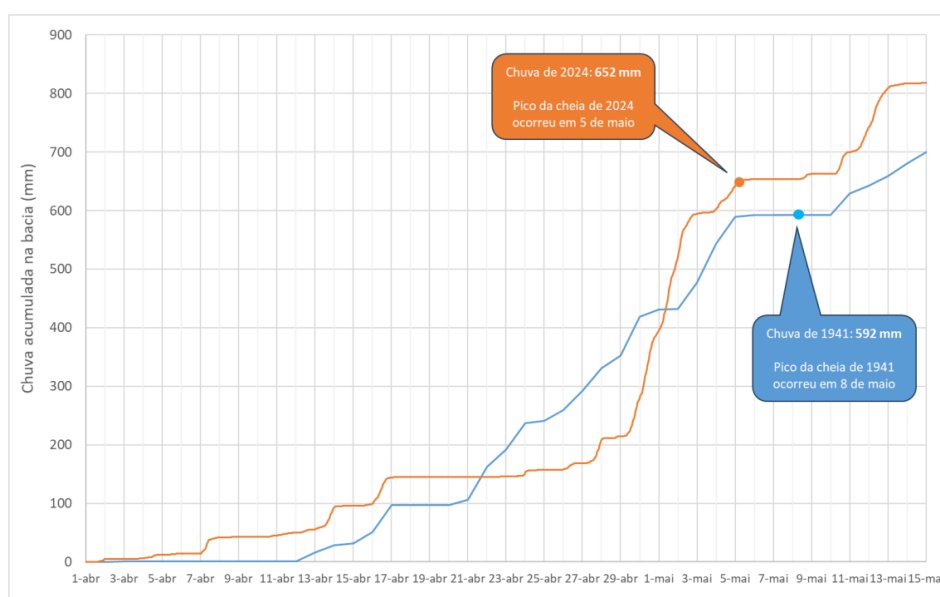
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos foram registrados no Rio Grande do Sul eventos pluviais de volume jamais visto anteriormente. Em 2024, por uma combinação de clima chuvoso causado pelo *El Niño*, fenômeno climático natural que ocorre no oceano pacífico, causando um aquecimento anormal da superfície do mar, levando à um desequilíbrio no sistema global de ventos e correntes, impactando padrões de chuva e temperatura, juntamente com efeitos da mudança climática global, causou o maior evento de enchente já visto pelo estado em quase 100 anos.

Esse evento de 2024 no Rio Grande do Sul foi o maior já registrado no estado, superando o pico anterior de 1941. Na cheia de 1941, o pico foi registrado em 8 de maio. Nos 38 dias que antecederam o auge da cheia, os registros mostram que a chuva foi mais intensa no Oeste da bacia, com valores de 700 a 800 mm. Já na cheia de 2024, o pico ocorreu em 5 de maio. Nos 35 dias que antecederam o auge da mais recente cheia, a precipitação foi mais intensa na parte central da bacia, sobre o rio Guaporé, com uma área em que a chuva superou os 900 mm (Figura 1). Além disso, há outra região com valores acima de 900 mm localizada mais a Oeste, sobre o rio Jacuí (IPH UFRGS - 2024).

Figura 1 - Evolução da chuva acumulada média na bacia hidrográfica do rio Guaíba no período de 01 de abril a 15 de maio nos eventos de 1941 e 2024



Disponível em: [https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-chuva-da-cheia-de-2024-foi-mais-volumosa-e-intensa-que-a-da-cheia-de-1941-na-bacia-hidrografica-do-](https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-chuva-da-cheia-de-2024-foi-mais-volumosa-e-intensa-que-a-da-cheia-de-1941-na-bacia-hidrografica-do-rio-guaiba)

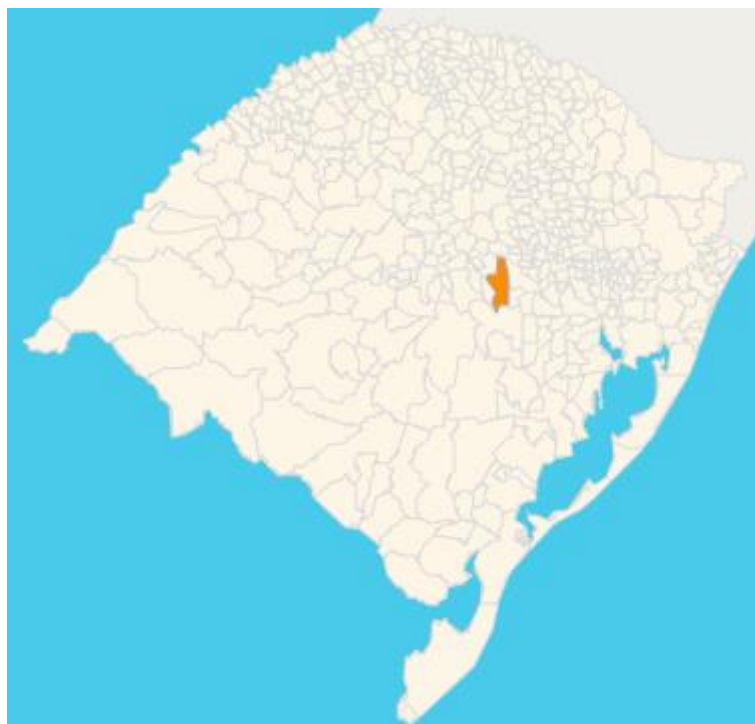
[guaiba/#:~:text=Dados%20de%20medi%C3%A7%C3%B5es%20revelam%20que,de%201941%20em%20Porto%20Alegre](#)

A expansão urbana desordenada altera significativamente o ciclo hidrológico ao aumentar a impermeabilização do solo e reduzir a capacidade natural de infiltração. Em áreas densamente construídas, a ausência ou ineficiência dos sistemas de drenagem potencializa a ocorrência de alagamentos, enxurradas e, em casos extremos, deslizamentos de terra.

Além disso, a falta de planejamento no projeto de drenagem urbana, faz com que os mesmos sejam ineficientes ou subdimensionados, apenas agravando os problemas citados anteriormente. Torna-se evidente a necessidade de um planejamento institucional do uso do espaço em áreas urbanas, visando minimizar os riscos para a população residente. Um exemplo disso, conforme Tucci e Bertoni (2003), é o caso de Porto Alegre. Após sofrer com diversas inundações até 1967, a capital elaborou um banco de dados com os níveis de água atingidos desde 1899. Com base nesse material, realizou uma obra de proteção em 1970, o que resultou na cessação, mesmo que temporária, de eventos desse tipo na cidade. A engenharia hidrológica desempenha um papel decisivo no controle de cheias. Essa realidade ressalta a necessidade de planejar de forma adequada os sistemas de drenagem urbana em municípios como o município a ser estudado, Santa Cruz do Sul.

O município de Santa Cruz do Sul está localizado na região centro-oriental do estado do Rio Grande do Sul, com uma área total de 794,49 km<sup>2</sup>, sendo 156,96 km<sup>2</sup> de área urbana, dividida em 36 bairros, e 637,53 km<sup>2</sup> de área rural (PREFEITURA DE SANTA CRUZ DO SUL - 2017), e uma população de 133.230 pessoas, de acordo com o censo de 2022 (IBGE - 2022). Polo mundial da indústria fumageira, o Município tem no tabaco sua principal fonte de receita, emprego e renda. A figura 2 indica a localização da cidade dentro do estado do Rio Grande do Sul.

Figura 2 - Localização do Município de Santa Cruz do Sul no estado do Rio Grande do Sul



Disponível em: - <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/santa-cruz-do-sul.html>

Nesse contexto, ferramentas computacionais de geoprocessamento e modelagem hidrodinâmica se tornaram essenciais para compreender o comportamento das águas em ambientes urbanos. O QGIS permite o tratamento de dados geoespaciais e a geração de modelos digitais de terreno, enquanto o HEC-RAS possibilita simular a propagação do escoamento e identificar áreas suscetíveis à inundação. A integração dessas tecnologias potencializa a análise de risco e apoia o planejamento urbano. Com a combinação desses dois *softwares*, se torna possível fazer um mapeamento de zonas de risco, utilizando dados topográficos e morfológicos processados pelo QGIS, e registros de eventos pluviais reais através do HEC-RAS, deixando evidente quais zonas da cidade podem ter seu sistema de drenagem alterado ou reforçado.

## **2 OBJETIVO**

Utilizar as capacidades de modelagem hidrológica do HEC-RAS e de processamento morfológico do QGIS para criar um mapa de risco de enchente do município de Santa Cruz do Sul. Com isso, será possível visualizar, utilizando registros de eventos passados, a eficácia desse método para futuros planejamentos de sistemas de drenagem urbanos.

### **2.1 Objetivo geral:**

Desenvolver uma modelagem hidrodinâmica utilizando o software HEC-RAS, com suporte de dados morfológicos processados no QGIS, para identificar e mapear as áreas de risco de inundação no município de Santa Cruz do Sul, avaliando a resposta do sistema de drenagem urbana frente a eventos extremos de precipitação.

### **2.2 Objetivo específico:**

- a) Processar dados topográficos, morfológicos e de cobertura de solo no QGIS, gerando o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo;
- b) Configurar e executar a simulação hidrodinâmica no HEC-RAS com base em eventos reais de precipitação;
- c) Analisar a propagação da onda de cheia e delimitar as áreas suscetíveis a inundação;
- d) Comparar os resultados da modelagem com relatos da população e registros de impactos observados no município;
- e) Produzir mapas temáticos de risco de inundação que subsidiem o planejamento de infraestrutura de drenagem urbana.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nas últimas décadas, a população urbana tem crescido de forma acelerada, passando a crescer em um ritmo de 0,82% ao ano, entre 2010 e 2022 (IBGE - 2022), causando também o crescimento acelerado das zonas urbanas, e essa urbanização tem causado impactos significativos na vida dos cidadãos e na sua interação com as cidades, resultando na deterioração da qualidade de vida da população. Consequências incluem o aumento de inundações, a diminuição da qualidade da água e o acúmulo de materiais sólidos no escoamento da chuva. (TUCCI - 2007)

Esse fenômeno intensificou-se no Brasil após a década de 70, com o crescente número de polos industriais em centros urbanos. Esse desenvolvimento provocou um aumento na degradação ambiental, principalmente pelo desmatamento e ocupação desordenada de áreas ambientais, afetando diretamente o ecossistema e o ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico é o movimento contínuo da água, que é regulado por cinco etapas principais: evapotranspiração, condensação, precipitação, infiltração e escoamento. A água sai da superfície terrestre e da biomassa (evapotranspiração) e, ao alcançar altitudes elevadas, se acumula na atmosfera por meio da condensação, formando nuvens.

A precipitação retorna a água para a superfície, podendo ser em forma de chuva, neve ou granizo. Na superfície, a água possui dois destinos principais que se relacionam diretamente com a drenagem urbana e os impactos hidrológicos: a infiltração, na qual a água penetra o solo e realimenta os aquíferos, e o escoamento, onde ela se move sobre a superfície em direção a corpos d'água como rios, lagos e oceanos (TUNDISI - 2003).

Em ambientes urbanos, a impermeabilização do solo, causada por edificações e pavimentação, reduz drasticamente a infiltração. Esse aumento do escoamento superficial pode levar a inundações e sobrecarga dos sistemas de drenagem, alterando o regime hidrológico natural e intensificando os impactos ambientais associados ao ciclo da água (BENINI; MENDIONDO - 2015).

Estes processos ocorrem dentro de limites definidos, chamados de bacias hidrográficas, que guiam e direcionam o fluxo da água para um corpo central

comum, geralmente um rio. No caso do Rio Grande do Sul, existem 25 bacias hidrográficas, divididas em 3 regiões principais: A região hidrográfica do Uruguai, a região hidrográfica do Guaíba e a região hidrográfica litorânea. A bacia em que Santa Cruz do Sul se encontra é a bacia do Rio Pardo, dentro da região hidrográfica do Guaíba, que aflui no Rio Jacuí.

A bacia hidrográfica do Rio Pardo, com uma área de drenagem de 3.636,79 km<sup>2</sup>, desempenha um papel crucial para a drenagem urbana em seus 13 municípios. Embora represente uma pequena fração do estado (1,3%) e da região hidrográfica do Guaíba (4,3%), seu impacto é significativo, especialmente na porção a jusante, onde se concentram os maiores contingentes populacionais e as principais atividades industriais. A compreensão das suas características hidrológicas é fundamental para a engenharia civil, uma vez que a gestão de recursos hídricos e a mitigação de inundações estão diretamente ligadas a essas particularidades.

A bacia se divide em três áreas com perfis distintos. A montante, que compõe cerca de 20% da bacia, é um planalto com altitudes superiores a 500 metros. A porção intermediária, responsável por 40% da área, situa-se na encosta do planalto, com altitudes entre 200 e 500 metros, e possui importantes remanescentes florestais. No entanto, é na área a jusante, que corresponde aos 40% restantes, que a atenção à drenagem urbana se intensifica. Com altitudes inferiores a 200 metros, essa área de planície é marcada por meandros e várzeas, onde as atividades agrícolas, como o cultivo de arroz e tabaco, se misturam com a densa ocupação urbana de municípios como Candelária, Rio Pardo e Santa Cruz do Sul. Em Santa Cruz do Sul, localizada na porção a jusante da bacia, essas características geomorfológicas favorecem a formação de áreas alagáveis, justificando a necessidade de modelagem hidrodinâmica para subsidiar o planejamento urbano. (COMITÊ PARDO – 2003)

As características hidrológicas da bacia, incluindo a precipitação média anual entre 1600mm e 1800mm e uma vazão média histórica de 3,9m<sup>3</sup>/s, são essenciais para o planejamento e a execução de obras de engenharia civil. No entanto, é a ocorrência de eventos críticos, como as chuvas intensas de curta duração com períodos de retorno superiores a 100 anos, que representam os maiores desafios. Esses eventos, como o ocorrido em abril e maio de 2024, elevaram as vazões para valores de pico de 30.000m<sup>3</sup>/s registrados na Orla do Guaíba, em Porto Alegre

(ZERO HORA - 2024). Eventos como esses vêm causando inundações recorrentes em áreas urbanas e rurais, evidenciando a necessidade de um manejo eficiente das águas pluviais, construção de infraestruturas de drenagem resilientes e medidas de controle de cheias. A crescente impermeabilização do solo em centros urbanos agrava a situação, exigindo soluções de engenharia que integrem a dinâmica natural da bacia com as necessidades de desenvolvimento urbano.

Por conta do estado do Rio Grande do Sul ter um sistema hidrográfico complexo, juntamente com suas características climáticas, o conhecimento da distribuição e variações da chuva, tanto temporal quanto espacial, é de grande importância para estudos hidrológicos e planejamentos hídricos. A precipitação mais comum é a chuva, que se forma quando pequenas gotas d'água nas nuvens, ricas em umidade e contendo núcleos de condensação (como poeira ou gelo), se unem e aumentam de tamanho. Quando essas gotas ficam grandes e pesadas o suficiente, a gravidade as puxa para baixo, superando a turbulência do ar. Caso o vapor d'água se solidifique diretamente em cristais de gelo que crescem até um peso considerável, a precipitação pode se manifestar como neve ou granizo.

As precipitações são classificadas em três tipos principais: Convectivas, Orográficas e Frontais (ou Ciclônicas). As chuvas convectivas, conhecidas como "chuvas de verão", resultam do aquecimento do ar úmido próximo ao solo, o que gera instabilidade e uma brusca ascensão do ar. São caracterizadas por grande intensidade e curta duração, cobrindo áreas concentradas e podendo causar inundações em pequenas bacias. As chuvas orográficas ocorrem quando ventos úmidos encontram uma barreira montanhosa, sendo forçados a subir, resfriar e condensar, sendo de pequena intensidade mas longa duração, restritas à encosta barlavento e criando a "sombra pluviométrica" no lado oposto (sotavento). Por fim, as chuvas frontais ou ciclônicas resultam da convergência de massas de ar quente e fria, onde o ar quente é impulsionado para cima, condensando e gerando precipitação. São chuvas de grande duração, atingem vastas áreas com intensidade média e podem provocar cheias em grandes bacias.

A geografia do Rio Grande do Sul, com sua morfologia diversificada, atua como um catalisador para a intensificação desses fenômenos. A topografia mais elevada, principalmente na Serra Geral, contribui para a elevação do ar úmido, intensificando as chuvas orográficas e potencializando a liberação de grandes volumes de água em curtos períodos. Por sua vez, a dinâmica das chuvas frontais

é influenciada pela posição geográfica do estado, na transição entre massas de ar tropical e polar. O choque dessas massas de ar é uma fonte constante de instabilidade, gerando sistemas frontais que, ao se combinarem com jatos de umidade da Amazônia, estacionam sobre a região e causam precipitações persistentes.

A severidade das enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul é explicada por uma complexa combinação de fatores morfológicos e sinóticos. As chuvas extremas não se limitaram a um único tipo de precipitação, mas foram resultado da interação prolongada de diversos mecanismos hidrológicos. A predominância de chuvas frontais estacionárias, reforçada pela ascensão de ar úmido em áreas de relevo elevado, resultou em volumes pluviométricos sem precedentes. Esse cenário demonstra como a morfologia do território, com suas encostas e bacias hidrográficas, potencializa o impacto de eventos climáticos, transformando chuvas de diferentes origens em um desastre hidrológico multifacetado.

Do ponto de vista da engenharia civil, os dados técnicos das cheias corroboram a dimensão do evento. Em diversos pontos da bacia, foram registrados níveis de pico superiores à 30 metros no rio Taquari, superando as marcas históricas anteriores. O volume total de chuvas, acumulando 1.023mm na cidade de Caxias do Sul, entre o fim de abril e o fim de maio, revela a magnitude do fenômeno. A análise de tempo de recorrência (TR) desses eventos é alarmante, com estimativas de que a cheia de 2024 teve um TR superior a 100 anos. Tais dados são cruciais para o dimensionamento de sistemas de drenagem, indicando que a infraestrutura existente não estava preparada para eventos dessa escala. O desastre hidrológico, com inundações e enxurradas, superou a capacidade de resposta das bacias e da infraestrutura local, ressaltando a urgência de uma reavaliação dos projetos e obras de engenharia baseados em cenários climáticos mais extremos.

Ao todo, foram afetados mais de 96% dos municípios do estado, 478 do total de 497, deixando quase 2 milhões e quatrocentos mil habitantes afetados, e mais de mil feridos, desaparecidos ou falecidos (DEFESA CIVIL DO ESTADO - 2025).

As enchentes urbanas, longe de serem eventos puramente naturais, são, muitas vezes, o resultado da incapacidade do ambiente construído de lidar com os volumes de água da chuva. Para mitigar esse desafio, entra em cena o sistema de drenagem urbana. Esse sistema, que se baseia em uma série de infraestruturas

interligadas, tem como principal objetivo coletar, transportar e destinar de forma adequada o excesso de água pluvial. Através de uma abordagem que equilibra soluções tradicionais e inovadoras, a drenagem urbana busca não apenas evitar inundações, mas também minimizar a poluição das águas e otimizar o ciclo hidrológico dentro das cidades.

O sistema de drenagem urbana é composto por um conjunto de dispositivos, cada um com uma função específica para gerenciar o fluxo de água, como galerias pluviais, sarjetas, bocas de lobo e canais. Tais dispositivos são dimensionados de acordo com normas técnicas específicas, como as ABNT NBR 9649, NBR 12218 e NBR 15527, que estabelecem diretrizes e critérios para o projeto de sistemas de drenagem.

O projeto de um sistema de drenagem exige o cálculo de vazões de projeto, utilizando equações de chuvas intensas e considerando períodos de retorno adequados para cada área. Esses períodos de retorno podem variar de 5 a 100 anos, ou mais, a depender do nível de risco aceitável e do tipo de estrutura a ser protegida. Eles podem ser divididos em soluções de microdrenagem (guias, sarjetas e bocas de lobo) e macrodrenagem (galerias, canais e bacias de retenção), que funcionam em conjunto para uma gestão hídrica eficiente e segura.

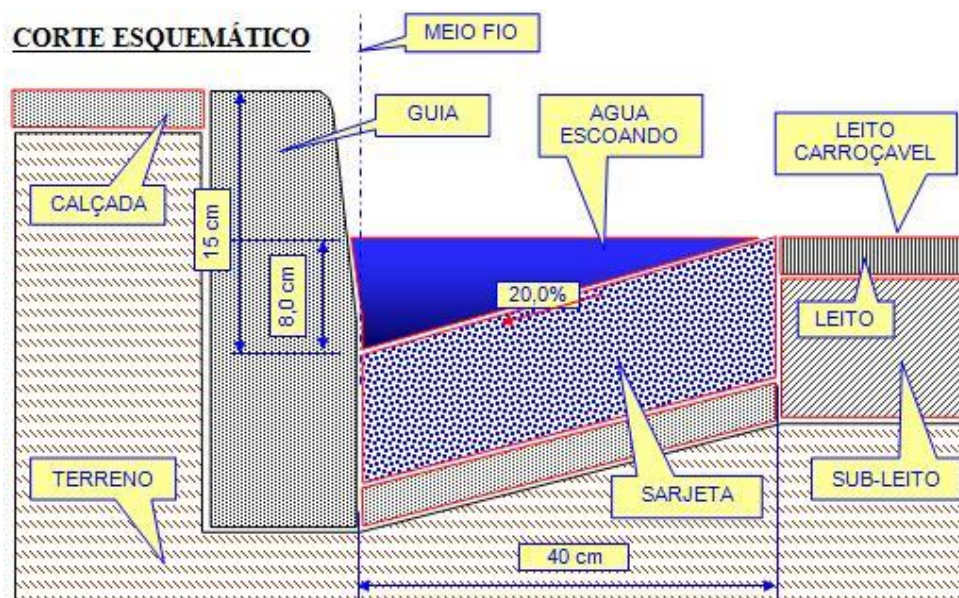
A microdrenagem, denominados também como sistemas iniciais de drenagem, considera a coleta e afastamento das águas superficiais ou subterrâneas através de pequenas e médias galerias, com diâmetros menores de 1,5 metros. Considera todos os componentes para que isso ocorra. Já a macrodrenagem inclui, além da microdrenagem, as galerias de grande porte, com diâmetro maior de 1,5 metros, e os corpos receptores tais como canais e rios canalizados. (FUNASA - 2016).

A microdrenagem é constituída por um conjunto de componentes que deverão ser conectados à macrodrenagem, os principais sendo os seguintes:

- Guias ou Meio-Fio: São elementos construídos por blocos de concreto ou de pedra, situados entre a via pública, ou pista de rolamento, e o passeio, ou calçadas, com sua face superior nivelada com o passeio, formando uma faixa paralela ao eixo da via pública. Podendo ser simples ou conjugados.
- Sarjetas: Denominam-se sarjetas as faixas formadas pelo limite da via pública com a guia ou meio fio, formando uma calha que coleta as águas pluviais oriundas da via pública. Podem estar conjugadas ao meio fio ou podem ser

independentes, devendo apresentar uma declividade de 20% em seu assentamento (Figura 3).

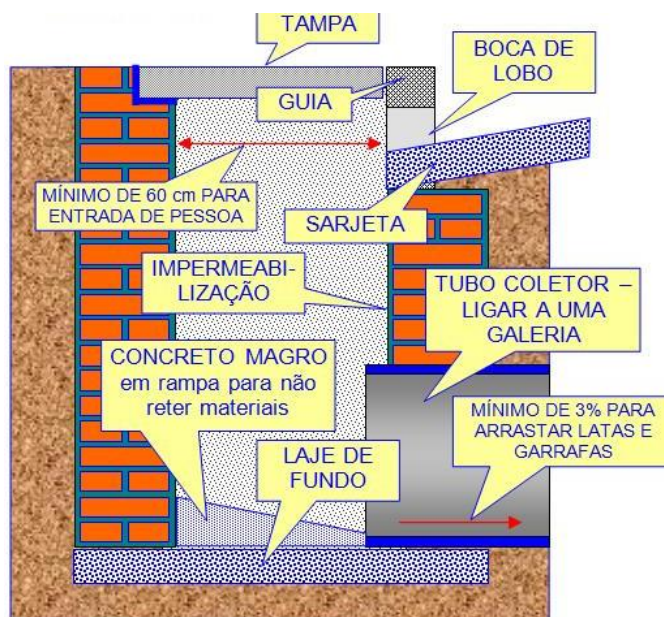
Figura 3 - Corte esquemático de sarjeta e meio fio



Fonte: Disponível em: <https://www.ebanataw.com.br/drenagem/bocadelobo.htm>

- Bocas coletoras: Conhecidas por boca de lobo ou bueiros, são dispositivos de captação das águas escoadas pelas sarjetas. Três métodos construtivos poderão ser utilizados, a depender do volume de água a ser captado, de sua capacidade de engolimento e de sua localização (Figura 4).

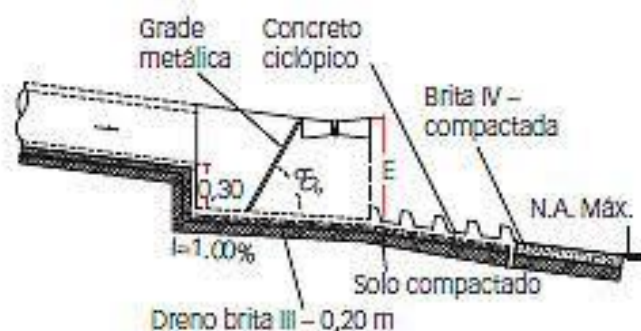
Figura 4 - Corte esquemático de boca coletora



Fonte: Disponível em: <https://www.ebanataw.com.br/drenagem/caixa.htm>

- Poços de visita e caixas de interligação: Denominam-se poços de visitas e caixas de interligação os dispositivos colocados em pontos estratégicos do sistema. Como destinam-se a manutenção do sistema devem ter dimensão suficiente para a entrada de um operador.
- Galeria: dispositivos destinados à condução das águas coletadas pelas bocas-de-lobo que, normalmente, são formados por tubos com seções circulares, preferencialmente instalados sob passeios ou canteiros anexos ao pavimento. Para maiores vazões, ou em casos particulares, empregam-se outros tipos de seção, como retangular ou quadrada.
- Dissipador: Dissipador é um condutor construído de concreto e pedra que tem por função diminuir a velocidade da água quando sai da tubulação que, caso fosse lançada diretamente ao solo, seu forte impacto poderia provocar erosões. É o ponto da conexão entre a micro e macro drenagem (Figura 5)

Figura 5 - Corte esquemático de dissipador



Fonte:

Disponível

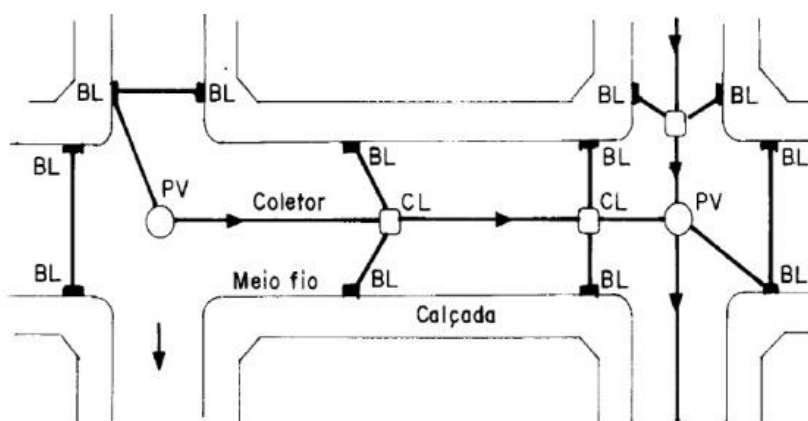
em:

<http://www.funasa.gov.br/documents/20182/300120/Drenagem+e+Manejo+das+%C3%81guas+Pluviais+Urbanas.pdf/72c03623-99ee-40d8-b1e8-107c182daf8e?version=1.0>

- Sarjetão: Calhas formadas pela própria pavimentação e concreto nos cruzamentos das vias públicas, servem para orientar o fluxo das águas que escoam pelas sarjetas. Os sarjetões são de grande importância, principalmente no período de chuvas, pois acabam conduzindo de forma correta as águas precipitadas sobre a via para sua lateral, as sarjetas, e bocas coletoras, além de evitar que a água fique sobre a rua, provocando o desgaste do pavimento e o surgimento de buracos. Ainda reforçam a segurança no trânsito evitando acidentes, já que não é necessário diminuir bruscamente a velocidade do veículo em função do desnível do asfalto.

A ligação e conexão de todos os dispositivos apresentados conformam a microdrenagem em área urbana, como na figura 6.

Figura 6 - Sistema de microdrenagem



Fonte: Disponível em: <https://profmbacelar.blogspot.com/2013/03/microdrenagem-cosanpa-2013.html>

No caso da macrodrenagem, este sistema existe sempre, mesmo quando não projetado, constituindo-se dos fundos de vale, córregos e cursos d'água. Obras para a macrodrenagem visam “otimizar” o escoamento do sistema, melhorando suas características hidráulicas (FUNASA - 2016).

A macrodrenagem em seus componentes, destina-se à condução final das águas captadas pela microdrenagem (drenagem primária), dando prosseguimento ao escoamento das descargas fluviais oriundas das ruas, sarjetas, sarjetões, valas e galerias. Via de regra a macrodrenagem comporta obras de grande porte, pois promove a retirada do excesso de água do solo, acumulada em áreas relativamente grandes, ou de microbacia hidrográfica. Sua ausência é a grande responsável por enchentes, empoçamentos, inundações, assoreamentos, erosões e ravinamento, entre outras catástrofes.

Em terrenos planos e deficientes de dispositivos de macrodrenagem, ou quando há o dispositivo e o mesmo encontra-se obstruído, em períodos de grandes precipitações, ocorrem enchentes. Enchentes também podem ocorrer por subdimensionamento dos dispositivos, pela não utilização da equação apropriada para as chuvas intensas e até pelo uso indevido do período de retorno da chuva. O problema do subdimensionamento em cidades brasileiras é frequentemente citado em estudos. Em Campinas (SP), o próprio plano diretor de drenagem da cidade identifica que as tubulações em diversos pontos são insuficientes para lidar com o volume de chuvas, resultando em alagamentos (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS - 2023). Já em Belo Horizonte (MG), a canalização de córregos e a urbanização acelerada de bacias como a do Córrego Jatobá sobrecarregaram o sistema de drenagem, que não foi projetado para o aumento de escoamento (OLIVEIRA - 2022). Em Fortaleza (CE), a expansão urbana sobre o leito de riachos como o Pajeú é um fator crucial, fazendo com que as enchentes "ressuscitem" o curso d'água em avenidas e ruas, demonstrando que o sistema de macrodrenagem é incapaz de absorver a vazão (SANTOS; PAULA - 2021).

A macrodrenagem constitui-se em um conjunto de componentes artificiais, além daqueles naturais (fundos de vale e cursos d'água) que deverão ser construídos ou executados conforme a necessidade verificada. Assim conformam o sistema:

Galerias de grandes dimensões: As galerias de grandes dimensões, são

condutos destinados ao transporte das águas captadas pelo sistema de microdrenagem até os pontos de lançamento. Normalmente são utilizadas em áreas muito urbanizadas, devido às restrições impostas pelo sistema viário e limitação de espaço.

**Canais artificiais:** Canais artificiais são valas escavadas que podem ou não estar revestidas de material que lhes dê sustentação e que se destina à passagem das águas. A escolha da seção, declividade longitudinal e inclinação dos taludes, depende de fatores fundamentais, como natureza do solo, topografia do terreno e tipo de escoamento (Figura 7).

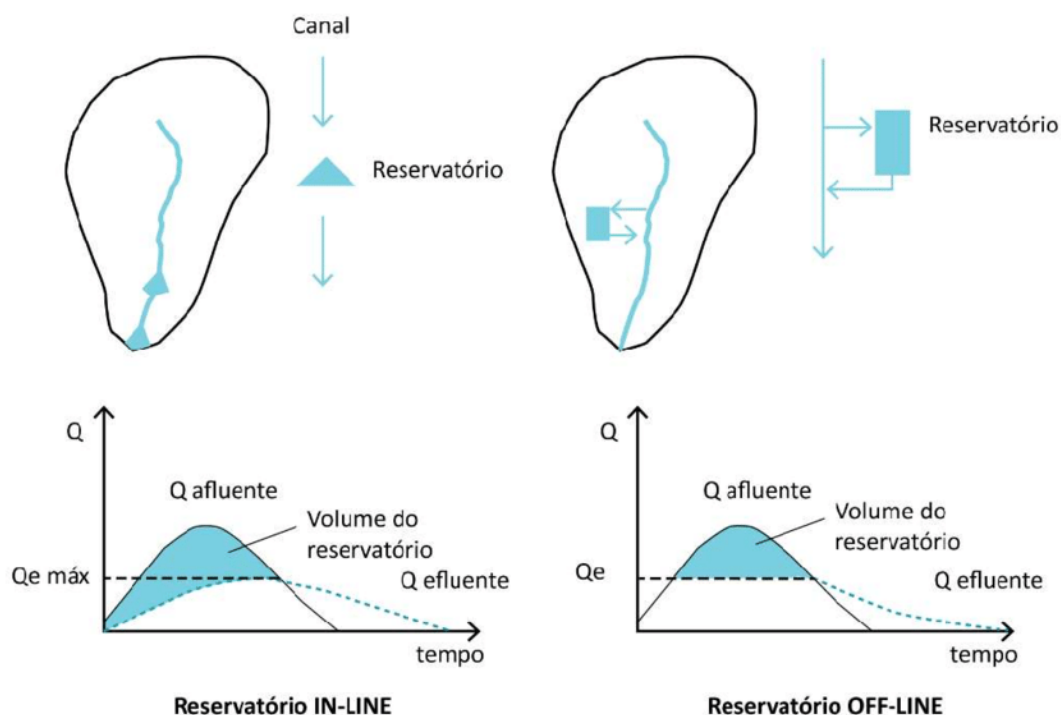
Figura 7 - Canal artificial localizado em Amsterdã, na Holanda



Fonte: Disponível em: <https://www.360meridianos.com/canais-de-amsterdã/>

- **Modificação morfológica de canais naturais:** Um canal tem sua geometria controlada pela carga e descarga de água submetidas ao clima e à geologia da bacia hidrográfica. A alteração da capacidade do canal incide diretamente na ampliação da forma e tamanho da seção transversal.
- **Reservatórios de retenção:** Reservatório de retenção, também chamado de piscinão, é um reservatório aberto ou fechado que tem por função regular a vazão de saída num valor desejado, de maneira a atenuar os efeitos a jusante da vazão de entrada. Os reservatórios de retenção podem ser em linha (*"in line"*) ou fora de linha (*"off line"*) (Figura 8).

Figura 8 - Reservatórios de retenção e detenção, respectivamente in-line e off-line



Fonte: Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/347523992\\_Eixos\\_multifuncionais\\_infraestrutura\\_verde\\_e\\_servicos\\_ecossistemicos\\_urbanos\\_aplicados\\_ao\\_corrego\\_Mandaqui\\_Sao\\_Paulo\\_SP](https://www.researchgate.net/publication/347523992_Eixos_multifuncionais_infraestrutura_verde_e_servicos_ecossistemicos_urbanos_aplicados_ao_corrego_Mandaqui_Sao_Paulo_SP)

Os reservatórios em linha são executados ao longo do curso fluvial, com a função de retardar o tempo de escoamento, amortecendo as vazões de pico. O volume de água armazenado é devolvido ao canal por meio de gravidade.

Já os reservatórios fora de linha são executados fora do curso do canal fluvial, geralmente em cotas mais baixas, e retiram os volumes que excedem a capacidade de escoamento do canal. Parte do volume de água armazenado é devolvido ao canal por gravidade ou por meio de bombas.

Também existem outras estruturas para auxiliar no controle das águas no contexto da macrodrenagem, como dissipadores de energia, proteção de cortes e aterros, proteção contra erosão e assoreamento, travessias, e estações de bombeamento (FUNASA – 2016).

Apesar do planejamento e da engenharia dedicados aos sistemas de drenagem urbana, a realidade nem sempre corresponde à teoria. O dimensionamento inadequado ou a modificação de dispositivos, causados por alterações na paisagem urbana ou por conexões clandestinas, criam um cenário

complexo e perigoso. Nesse contexto, o sistema de drenagem pluvial, projetado para coletar a água da chuva, pode se misturar com a rede de esgoto. Um exemplo prático disso ocorre em Belo Horizonte (MG), onde a Copasa alertou que ligações irregulares de água da chuva na rede de esgoto podem aumentar em até 40% os vazamentos durante o período chuvoso, resultando em refluxo de dejetos dentro das residências e no comprometimento da rede de saneamento (AGÊNCIA MINAS - 2023).

Este problema, comum em diversas cidades, não é apenas uma falha técnica, mas uma violação grave que compromete a saúde pública, o meio ambiente e a própria eficácia do saneamento básico. Em locais com esse sistema, quando ocorre uma chuva de maior volume, o sistema não suporta toda a quantidade de água e transborda, causando mal cheiro na região. Em diversos casos, moradores ou frequentadores da área decidem selar o bueiro clandestinamente, para acabar com o mau cheiro. Porém, isso afeta diretamente a eficiência do sistema, facilitando casos de alagamento na região afetada.

O alagamento é apenas um dos tipos de inundações que pode afetar a população, e acontece quando a água da chuva fica acumulada nos perímetros urbanos em pontos isolados, que é agravado por sistemas de drenagem pluvial ineficientes ou insuficientes nas cidades. Também tem sido frequente a ocorrência de enchentes, quando a água sobe temporariamente em um rio ou canal por causa do aumento do fluxo, alcançando seu ponto máximo sem transbordar, inundações, quando a água de um rio ou canal transborda, alcançando as áreas próximas, como planícies ou várzeas.

Todos os tipos de inundações geram impactos significativos na vida da população, como a perda de lares, bens materiais e vidas humanas, interrupção de atividade econômica em áreas afetadas, além da contaminação facilitada de doenças de veiculação hídrica, como leptospirose, gastroenterite e febre tifoide, e a contaminação da própria água pela inundação de depósitos de material tóxico e estações de tratamento (TUCCI, 2001).

Diante dos desafios complexos impostos pelas inundações urbanas e pela ineficiência dos sistemas de drenagem, torna-se crucial a adoção de ferramentas que permitam uma análise detalhada e a elaboração de planos de mitigação eficazes. Para uma análise aprofundada de riscos de enchente em áreas urbanas, a integração de ferramentas geoespaciais e modelos hidrológicos é fundamental.

Nesse estudo de caso, será utilizado o QGIS (Sistema de Informações Geográficas) e o REC-HAS (modelo hidrológico) de forma complementar para mapear e simular cenários de inundação.

O QGIS será a ferramenta principal para o processamento de dados de satélite, fundamental para a criação do modelo. Com ele, será possível criar um modelo digital de elevação (MDE), fornecendo dados sobre a altitude e as variações do relevo, permitindo a identificação das áreas mais baixas e naturalmente propensas à acumulação de água. Com o geoprocessamento, também será possível definir a cobertura do solo, diferenciando áreas impermeáveis, como asfalto e construções, das áreas permeáveis, como solo exposto e vegetação.

Com essas camadas preparadas no QGIS, o HEC-RAS permite a criação de mapas de risco que mostram as áreas mais vulneráveis a alagamentos, combinando fatores de como baixa altitude, taxa de impermeabilidade do solo. A simulação é feita com dados de precipitação inseridos pelo usuário, permitindo a recriação de eventos reais, para visualizar o comportamento da água em cenários de precipitação intensa. Essa modelagem pode ser crucial para a tomada de decisões, permitindo o planejamento de intervenções em áreas críticas e a implementação de medidas de mitigação mais eficazes.

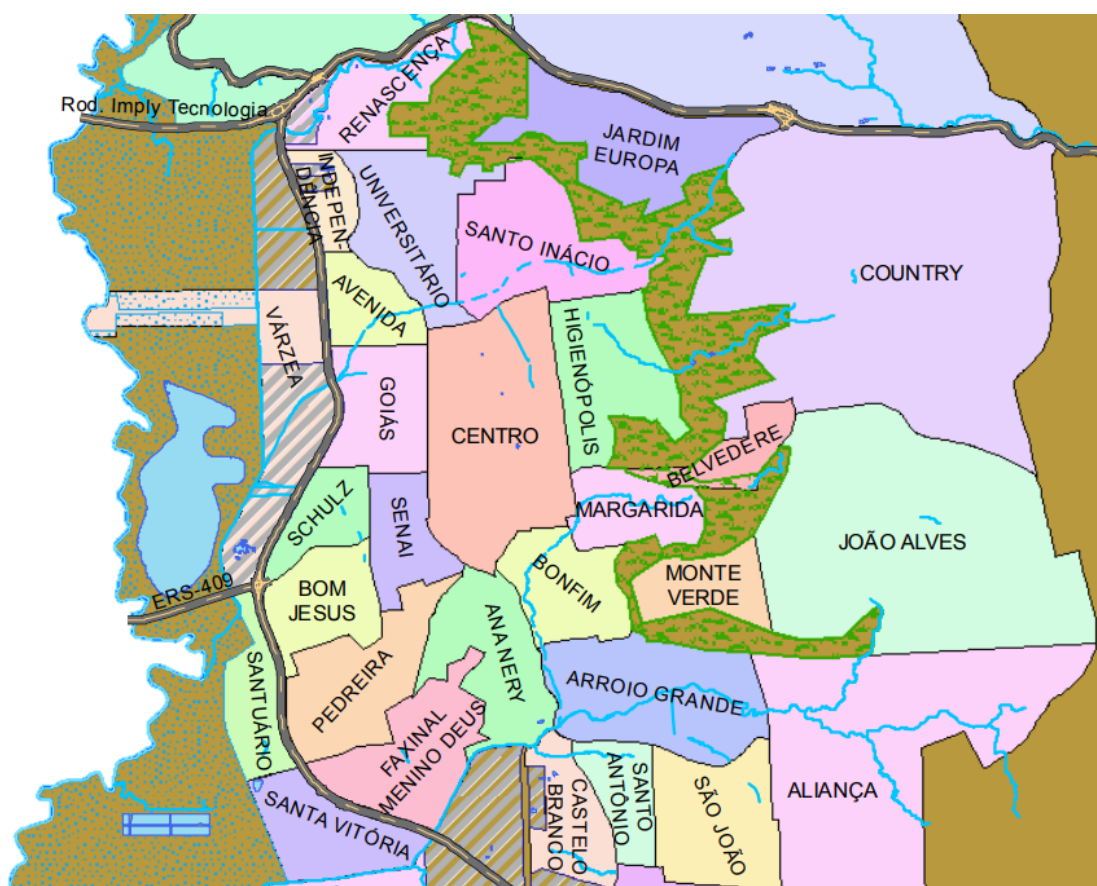
## 4 METODOLOGIA

Este estudo visa representar o comportamento hidrológico da cidade de Santa Cruz do Sul, identificando potenciais áreas de risco de inundação a partir de modelagem realizadas no software HEC-RAS, com base em dados morfológicos e topográficos obtidos e tratados no QGIS.

O município se encontra dentro da bacia do Pardo, subdivisão da região hidrográfica da bacia do Guaíba, e possui influência direta no sistema hidrográfico da região com a influência do Rio Pardo e suas afluentes locais, assim como com o Lago Dourado, reservatório artificial para o abastecimento da cidade em épocas de estiagem (PREFEITURA DE SANTA CRUZ DO SUL - 2023).

A região definida para o estudo foi a parte central da Sede Municipal, também chamado de primeiro distrito, onde se encontra a zona urbana da cidade, indicada no mapa abaixo (Figura 9).

Figura 9 - Mapa dos bairros de Santa Cruz do Sul



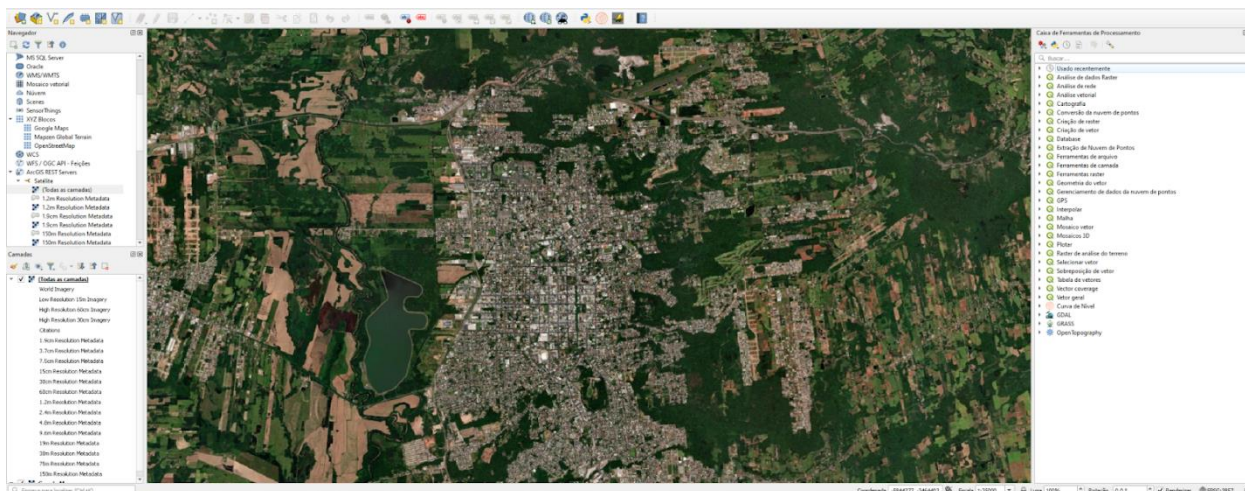
Fonte: Disponível em: [https://www.santacruz.rs.gov.br/geo/mapas/Bairros\\_A4.pdf](https://www.santacruz.rs.gov.br/geo/mapas/Bairros_A4.pdf)

O mapeamento foi feito utilizando o software QGIS, anteriormente conhecido como Quantum GIS. O QGIS é um software GIS (*geographic information system*, ou sistema de informação geográfica), utilizado para o processamento e visualização de dados geoespaciais e georreferenciados, compondo mapas a partir de camadas raster e/ou vetoriais.

O programa teve seu desenvolvimento iniciado em julho de 2002, sendo atualizado frequentemente, com a última versão sendo lançada em junho de 2025, e tendo a próxima grande atualização, a versão 4.0, programada para lançamento no primeiro trimestre de 2026. É um software FOSS (*free and open source*, ou livre e de código aberto), permitindo que os usuários utilizem e modifiquem o programa como necessário para o uso, e é utilizado diretamente por organizações públicas e privadas, como a NSA (*National Security Agency*, a agência de segurança nacional dos Estados Unidos da América) e o The Economist, jornal britânico de notícias e assuntos internacionais.

Através do QGIS, foi possível gerar o mapeamento planialtimétrico da região, utilizando uma imagem *raster* para criar as curvas de nível desejadas. Primeiramente, foi determinada a área selecionada, conforme destacado anteriormente no mapa dos bairros e distritos. A imagem gerada abaixo foi gerada pelo plugin *ArcGIS REST Server*, que permite obter imagens básicas de satélite nativas no próprio software, como aparente na Figura 10.

Figura 10 - Interface do software QGIS apresentando a região do estudo



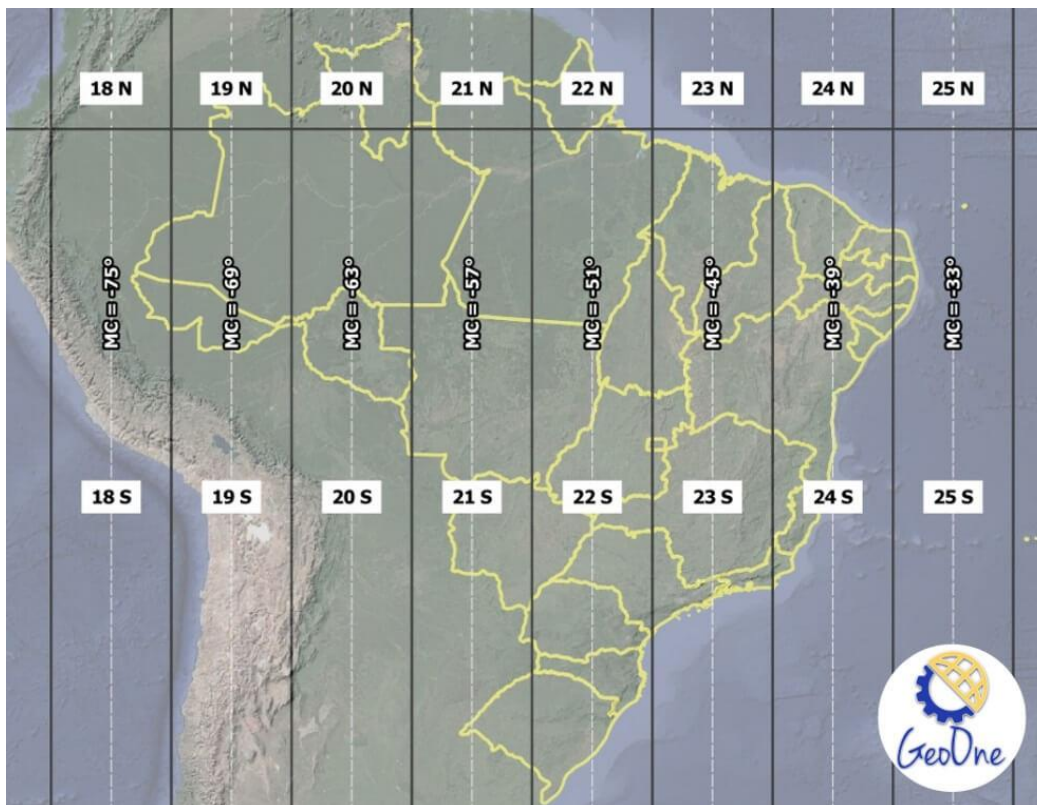
Fonte: KOHN - 2025

Para simplificar a obtenção de dados, foi decidido utilizar como base o

Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, o SIRGAS. Criado em 1993, é um sistema de referência resultado de um levantamento de dados realizados por uma rede de estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*, ou Sistema Global de Navegação por Satélite) de alta precisão distribuídos pelo continente. O levantamento do ano 2000 foi definido como o sistema padrão de referência oficial do IBGE em 2005, substituindo o SAD69 e o Córrego Alegre, utilizados anteriormente.

Cada sistema de referência é determinado por um código específico, plano determinado pelo *European Petroleum Survey Group* (Grupo Europeu de Pesquisa de Petróleo), dando origem aos códigos EPSG, cada entidade sendo assinalada um código entre 1024 e 32767. O código dado ao SIRGAS 2000 foi 31982. O sistema do SIRGAS 2000 separa a região coberta por hemisférios e zonas, coberto pelo SRC (Sistema de Referência de Coordenadas). A região específica do estudo é coberta pelo UTM zona 22 sul, com a divisão completa do país apresentada na imagem 11.

Figura 11 - Fusos e hemisférios do sistema de projeção UTM para o Brasil

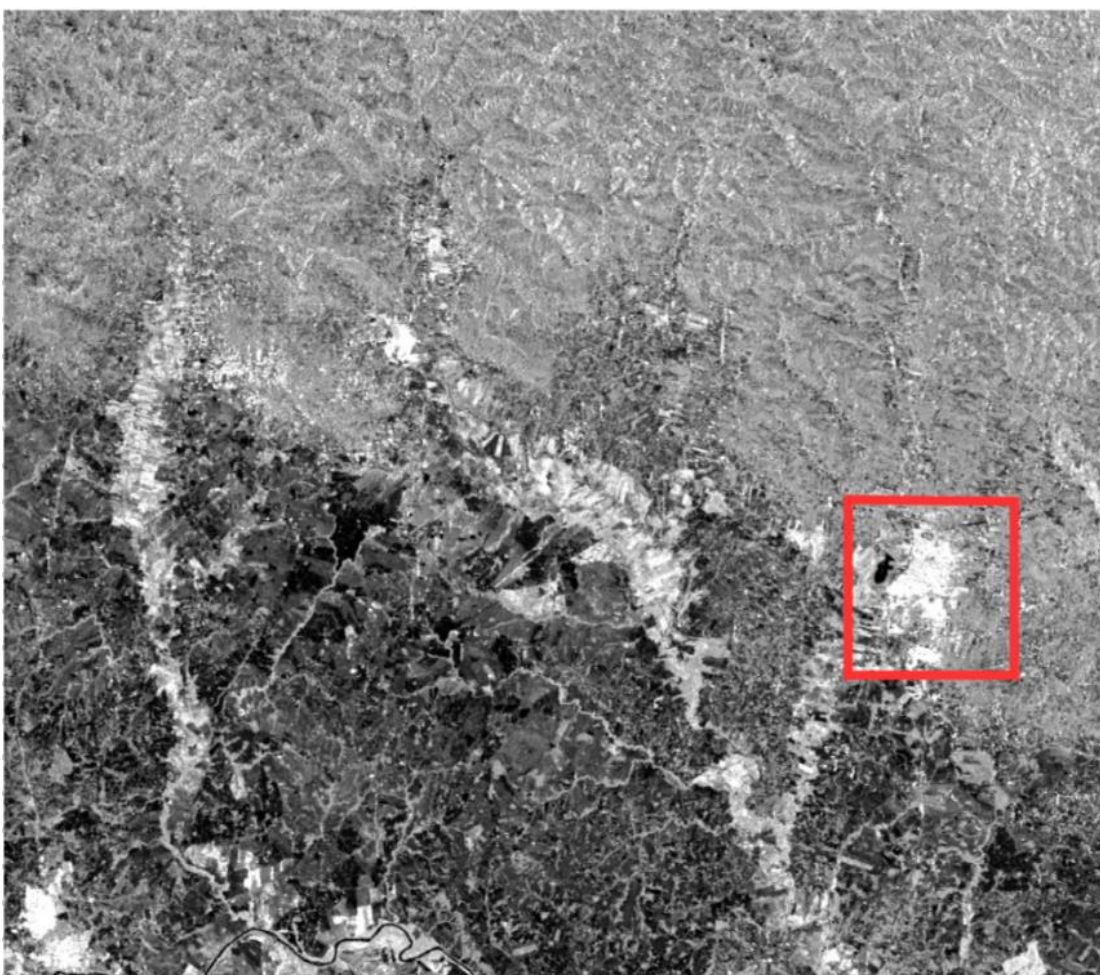


Fonte: Disponível em: <https://geoone.com.br/qual-src-devo-utilizar-em-meu-mapa/>

Os dados de elevação foram obtidos a partir do sensor PALSAR (ALOS/Daichi), cuja cena ALPSRP270446580, de 21/02/2011, foi selecionada por apresentar adequada resolução altimétrica para a área de estudo.

A imagem 12 representa a imagem gerada diretamente pela cena selecionada, que inclui os municípios de Novos Cabrais, Candelária, Sinimbu, Santa Cruz do Sul e Vale do Sol. Em vermelho foi destacada a área de Santa Cruz do Sul.

Figura 12 - Corte da projeção do satélite Daichi, destacando a zona urbana de Santa Cruz do Sul

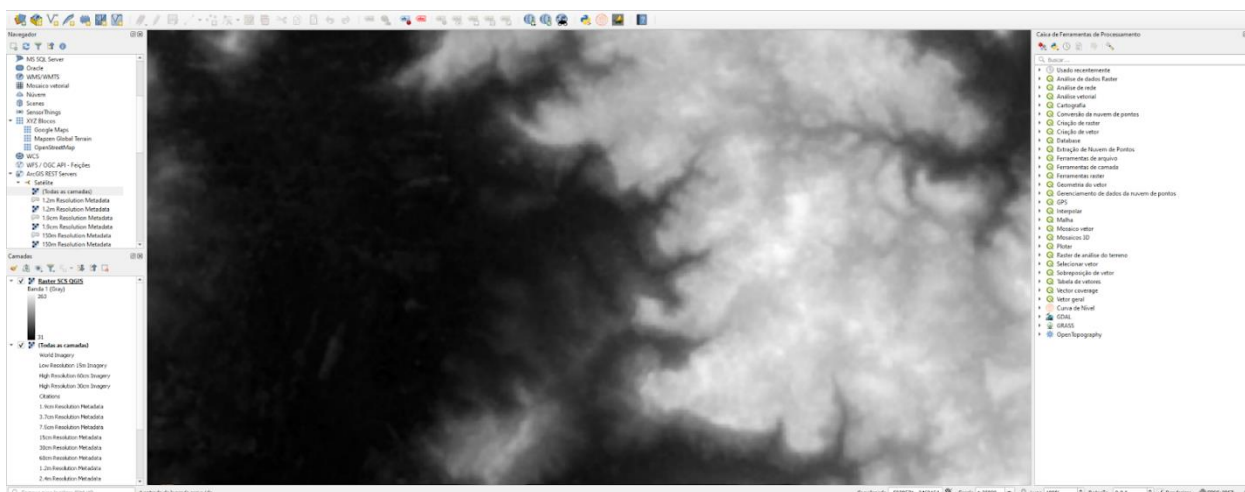


Fonte: KOHN - 2025

Após processar os dados pelo QGIS e ter selecionado a área desejada para o estudo, foi gerado o modelo digital de elevação, indicado na imagem X, que foi o resultado de ter sobreposto os dados do satélite Daichi diretamente na área selecionada representada na imagem 13. Representando a topografia da cidade, a área mais clara indica os pontos de altitude elevada, como os bairros Country e

João Alves e Jardim Europa, na parte leste e norte da cidade.

Figura 13 - Interface do software QGIS após processar a projeção gerada pelo satélite Daichi



Fonte: KOHN - 2025

Com o modelo digital de elevação gerado pelo QGIS, foi possível migrá-lo para o programa definido para a simulação em si, o HEC-RAS.

O HEC-RAS é um software de simulação, utilizado na fluidodinâmica computacional, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), especificamente para modelação hidráulica de fluxo de água através de rios e canais. Foi desenvolvido pelo USACE (*United States Army Corps of Engineers*, o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos), no *Hydrologic Engineering Center*, o centro de engenharia hidrológica, na Califórnia, como um sistema de análise de rios (*River Analysis System*).

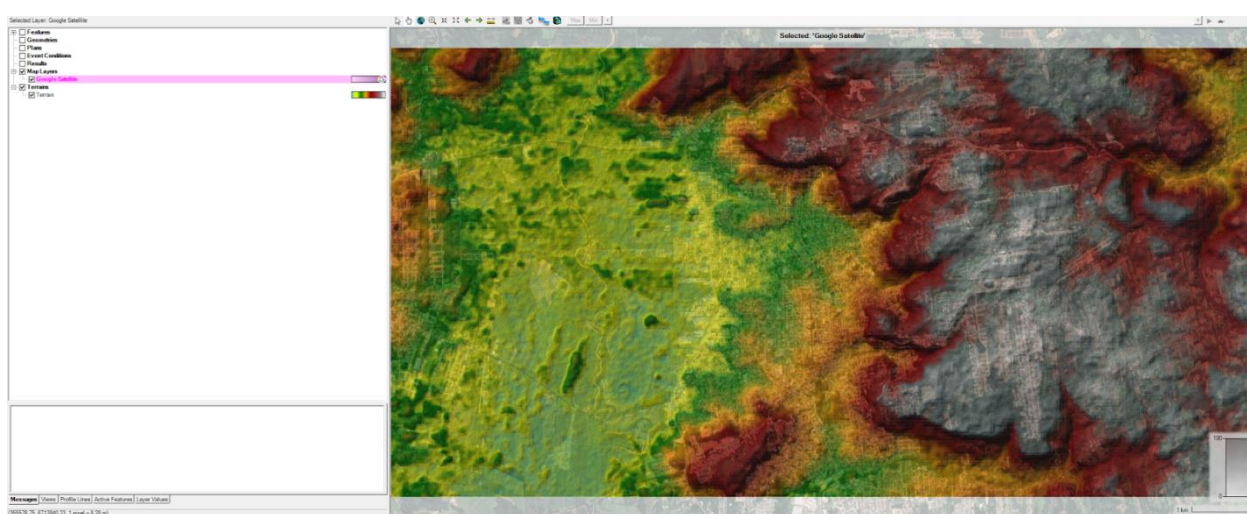
O sistema foi criado para auxiliar os engenheiros hidráulicos na análise de escoamento em canais e na determinação de planícies de inundação (*floodplains*). Ele inclui inúmeras funcionalidades de inserção de dados, componentes de análise hidráulica, capacidades de armazenamento e gerenciamento de dados, além de recursos de geração de gráficos e relatórios.

Originalmente lançado em 1995, vem sendo frequentemente atualizado e tendo sua quinta versão oficial lançada em 2016. Antes da atualização de 2016 para a versão 5.0, o programa era unidimensional, o que significa que não havia modelagem direta do efeito hidráulico de mudanças na forma da seção transversal, curvas e outros aspectos bidimensionais e tridimensionais do fluxo. O lançamento

da versão 5.0 introduziu a modelagem bidimensional do fluxo, bem como recursos de modelagem de transferência de sedimentos.

Após importar o modelo digital de elevação gerado pelo QGIS, foi possível ter a visualização inicial do terreno no HEC-RAS. Foi sobreposta uma imagem de satélite do Google, facilitando o entendimento de cada região da cidade, apresentado na imagem 14.

Figura 14 - Interface do software HEC-RAS exibindo o mapa topográfico de Santa Cruz do Sul



Fonte: KOHN - 2025

Para a simulação dos eventos climáticos, foi necessário também adicionar os dados da cobertura do solo, necessários para representar corretamente o comportamento da água devido à permeabilidade e rugosidade diferente de cada área.

Os dados de terreno foram obtidos com base nos dados disponibilizados pela ferramenta *Esri Sentinel-2 Land Cover Explorer*. Esta aplicação utiliza imagens de satélite da missão *Copernicus Sentinel-2* (*Sentinel-2A* e *Sentinel-2B*) como fonte primária, processando-as por meio de modelos de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina. O produto final consiste em mapas globais de LULC com alta resolução espacial de 10 metros, atualizados anualmente. O conjunto de dados categoriza a cobertura terrestre em 10 classes temáticas distintas, permitindo a análise de mudanças temporais na paisagem. O acesso e o download dos dados foram realizados através do *ArcGIS Living Atlas of the World*, sob licença de uso

aberto. O território foi separado em 5 categorias:

- Área desenvolvida, zonas urbanas, dominando grande parte do território analisado;
- Área de cultivo, zonas dedicadas à agricultura;
- Campo aberto, zonas como praças, campos esportivos, terrenos baldios e outras áreas livres de infraestrutura, mas também não cultivadas;
- Área florestada, zona principalmente tomada pelo cinturão verde, ocupada por mata fechada;
- E água, sendo os lagos, açudes, rios e arroios espalhados pelo município.

Tendo obtido a categoria de cada zona, foi possível determinar os valores de coeficiente de rugosidade de Manning, responsável por quantificar a resistência ao escoamento pelo atrito da água contra a superfície; a abstração inicial, correspondente ao volume de precipitação retido pelo solo antes do início efetivo do escoamento superficial; o déficit máximo, representando o volume máximo de água que a camada do solo pode armazenar; e a taxa de percolação potencial, que define a velocidade máxima vertical que a água pode se mover através do perfil do solo, da superfície para as camadas mais profundas. Os valores atribuídos seguem recomendações técnicas presentes utilizadas por um estudo da ABRHidro por Monte, Zanandrea, Abatti, Tavares e Silveira, de 2019.

Os valores determinados para cada região do solo estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Valores utilizados para Manning, abstração inicial, déficit máximo e potencial de percolação, para cada tipo de solo determinado

Tipo de solo	Manning	Abstração Inicial (mm)	Déficit Máximo (mm)	Potencial de Percolação (mm/h)
Área desenvolvida	0,2	1	50	5
Área de cultivo	0,1	15	120	15
Campo aberto	0,1	30	125	20
Área florestada	0,2	40	150	30
Espelho d'água	0,01	0	0	0

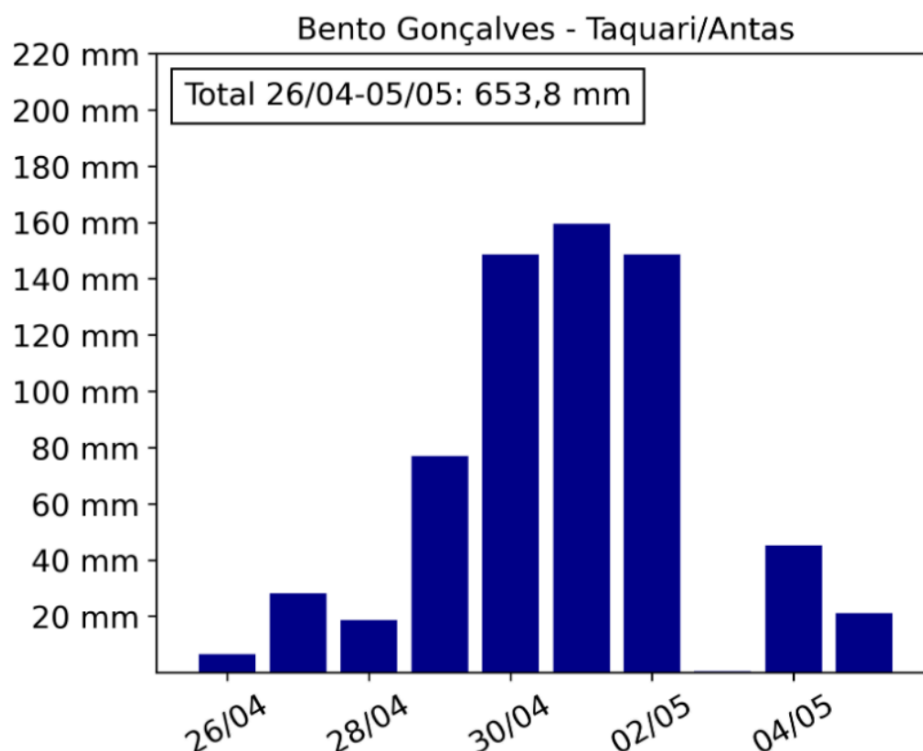
Fonte: Autoral

A simulação da resposta da bacia aos eventos de chuva foi conduzida utilizando-se a premissa de fluxo instável, essencial para representar a dinâmica hídrica real. O fluxo instável é caracterizado pela variação contínua das propriedades do escoamento (vazão e profundidade) ao longo do tempo, sendo crucial para simular a formação e a propagação da onda de cheia resultante da precipitação. Esta abordagem permite incorporar o efeito fundamental de armazenamento do canal e da planície de inundação, que causa a atenuação do pico de cheia.

Para tal, foi empregado o software HEC-RAS, cujo módulo de fluxo instável opera resolvendo numericamente as equações de Saint-Venant (conservação de massa e momentum). O modelo utiliza como dado de entrada principal o hidrograma de vazão (resultado do seu modelo hidrológico de chuva-vazão) e, a partir da geometria do canal, avança a simulação em passos de tempo discretos. Este procedimento dinâmico garante que a elevação do nível d'água e a extensão da área inundada sejam determinadas em função do tempo, fornecendo uma base precisa para o mapeamento de risco.

Para os dados de precipitação, não foi possível utilizar dados específicos da região durante as enchentes de 2024, devido à danos na estação meteorológica da UNISC. Foi então utilizado como referência a precipitação acumulada de 10 dias na cidade de Bento Gonçalves, com um total acumulado de 653,8mm, como mostrado na figura 15. Essa série de eventos foi escolhida por ter sido a mais intensa registrada pelas estações disponibilizadas do INMET, através do estudo do INPE. Cidades como Santa Maria tiveram um volume diário máximo maior, mas a quantidade acumulada total acabou sendo inferior às registradas em Bento Gonçalves, sendo esse preferido por permitir uma modelagem capaz de representar os efeitos de volumes diferentes de chuva ao decorrer de um período mais longo.

Figura 15 - Gráfico dos dados pluviométricos utilizados, registrados em Bento Gonçalves durante as enchentes de 2024



Fonte: Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/relatorio-do-inpe-explica-evento-meteorologico-que-causou-a-tragedia-no-rs/chuvas-rio-grande-do-sul.pdf>.

A simulação hidrodinâmica foi executada empregando um passo de tempo de entrada de precipitação de 1 hora, sendo essa a resolução temporal fornecida ao modelo para a aplicação da carga hídrica. Com o intuito de analisar os efeitos de um carregamento pluviométrico uniforme no sistema, os dados de precipitação diária foram distribuídos uniformemente ao longo de cada período de 24 horas, permitindo avaliar as respostas hidráulicas do terreno sob condições de chuva constante, conforme detalhado nos dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Precipitação por hora utilizada em cada dia da simulação

Dia	26/04	27/04	28/04	29/04	30/04	01/05	02/05	03/05	04/05	05/05
Precipitação por hora (mm)	0,20	1,25	0,83	3,33	6,25	6,66	6,25	0,00	1,66	0,83

Fonte: KOHN - 2025

O período total de simulação foi estendido para 11 dias, abrangendo os 10 dias necessários para o evento pluviométrico completo e a inclusão de 1 dia subsequente sem a aplicação de precipitação. Este período adicional foi incorporado para garantir o completo escoamento da água acumulada e a estabilização das condições hidráulicas na área de estudo, assegurando assim a convergência do modelo ao seu estado final de equilíbrio.

Em complementação à modelagem hidráulica do sistema de drenagem urbana de Santa Cruz do Sul, foi conduzida uma pesquisa de campo com o objetivo de capturar a perspectiva da população sobre a eficácia do sistema e o impacto das cheias. Esta etapa metodológica de caráter exploratório e descritivo buscou correlacionar os dados técnicos de simulação com a experiência real dos moradores e trabalhadores do município, especialmente em face dos eventos de grande magnitude, como as chuvas de 2024. O instrumento de coleta foi um questionário estruturado, aplicado digitalmente via *Google Forms*, garantindo a abrangência e a facilidade de resposta (ANEXO 01).

A pesquisa foi realizada durante o mês de outubro, e divulgada através de contatos de conhecidos como familiares, colegas de estudo, colegas de trabalho, vizinhos e afins. Ao todo, foram obtidas 84 respostas. Foram questionadas as seguintes informações à população:

- Mora ou trabalha em Santa Cruz do Sul?
- Qual bairro mora?
- Qual bairro trabalha?
- Quais bairros transita frequentemente?
- Foi afetado pelas chuvas de 2024?
- Já foi afetado por alagamentos menores?
- Já sentiu mau cheiro saindo de bocas de lobo em períodos muito chuvosos?
- Acha que a maior frequência de chuvas e enchentes estão relacionadas com mudanças climáticas?
- Percebeu alguma anomalia específica do sistema de drenagem de Santa Cruz do Sul?

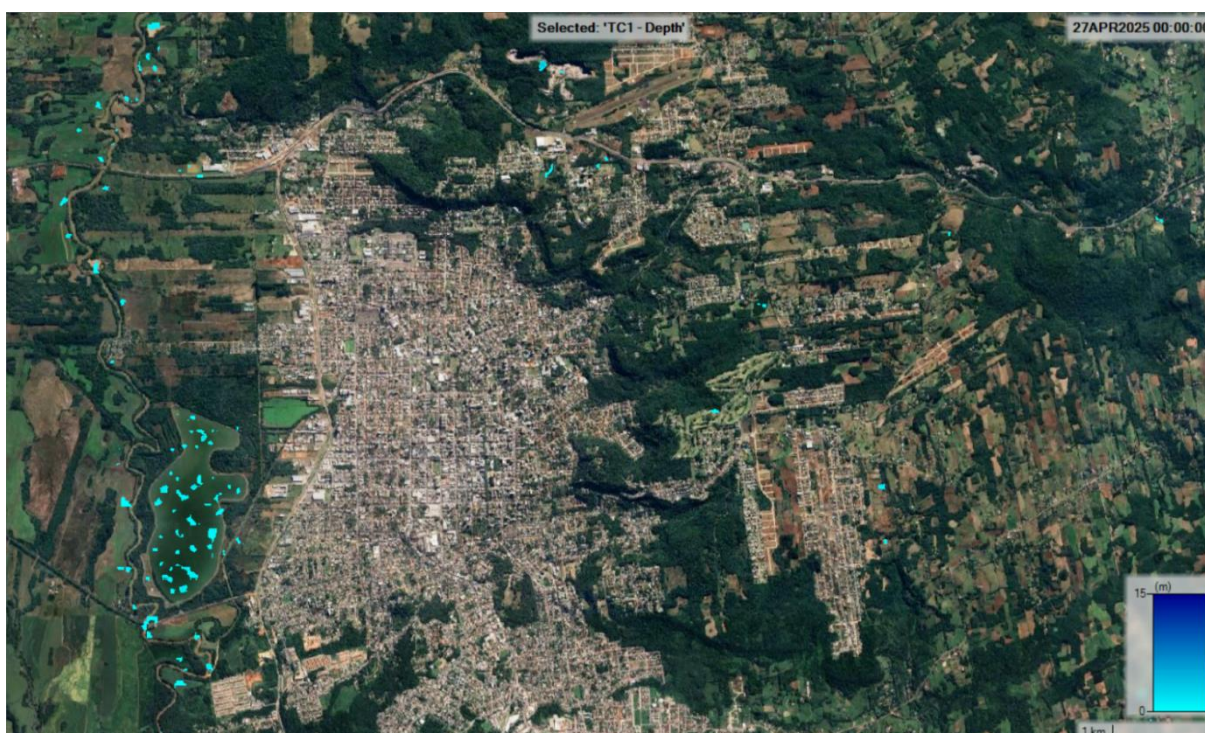
As experiências narradas, como a localização de pontos de alagamento, a frequência de inundações menores e a ocorrência de mau cheiro, permitem identificar falhas operacionais, problemas de manutenção, e ligações indevidas, como a rede esgoto na rede pluvial, que os modelos matemáticos podem

negligenciar. Enquanto a modelagem em software fornece uma análise técnica e quantitativa da capacidade da rede, os relatos da população oferecem uma perspectiva diferente, atuando como uma validação empírica. Desta forma, a metodologia mista adotada enriquece o diagnóstico, mapeia as vulnerabilidades sociais de forma mais precisa, e assegura que as propostas de melhoria sejam embasadas tanto na viabilidade de engenharia quanto na necessidade real e no bem-estar da comunidade local.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

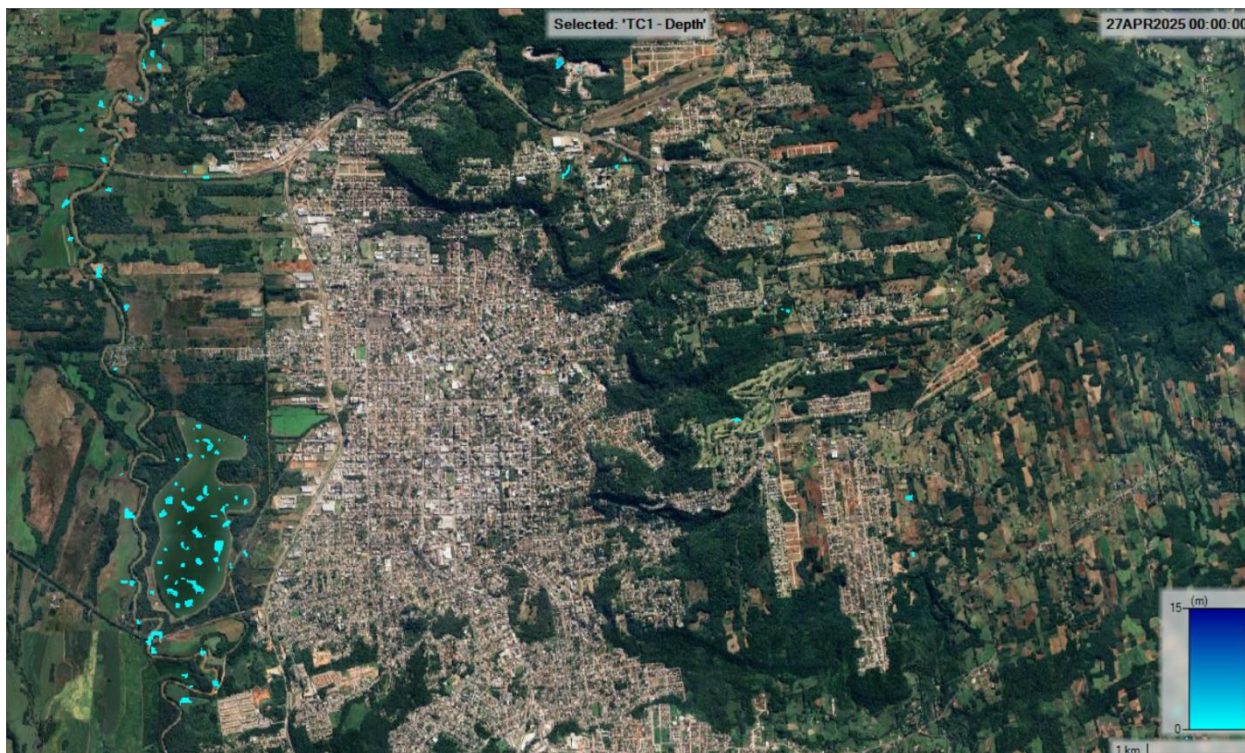
A análise dos resultados obtidos pela modelagem hidrodinâmica permite avaliar o comportamento da água nas áreas críticas de Santa Cruz do Sul ao longo do evento simulado. Para esta etapa, foram considerados os principais produtos da simulação, como a amplitude das manchas d'água, a velocidade de escoamento superficial e a extensão das áreas inundadas em cada intervalo temporal. Esses elementos possibilitam compreender a progressão do alagamento, identificar pontos críticos e relacionar a resposta hidrodinâmica com características topográficas e estruturais do município.

Figura 16 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 26/04



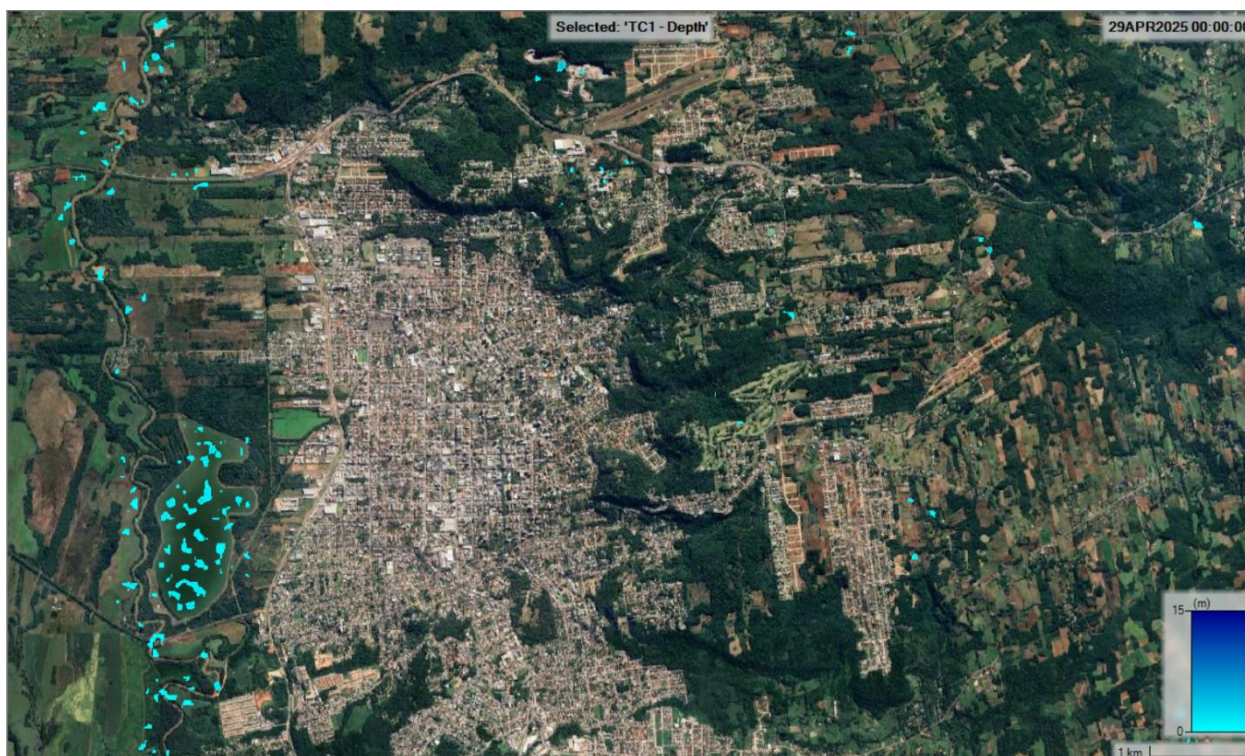
Fonte: KOHN - 2025

Figura 17 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 27/04



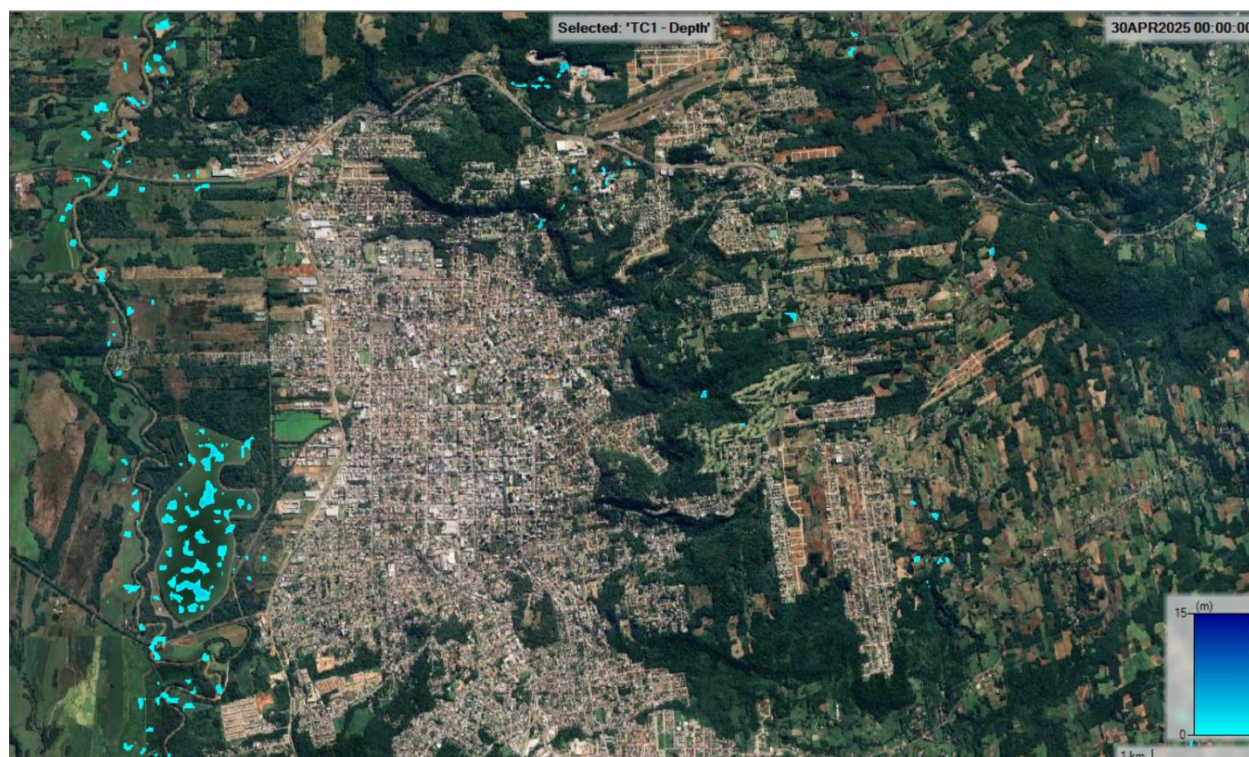
Fonte: KOHN - 2025

Figura 18 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 28/04



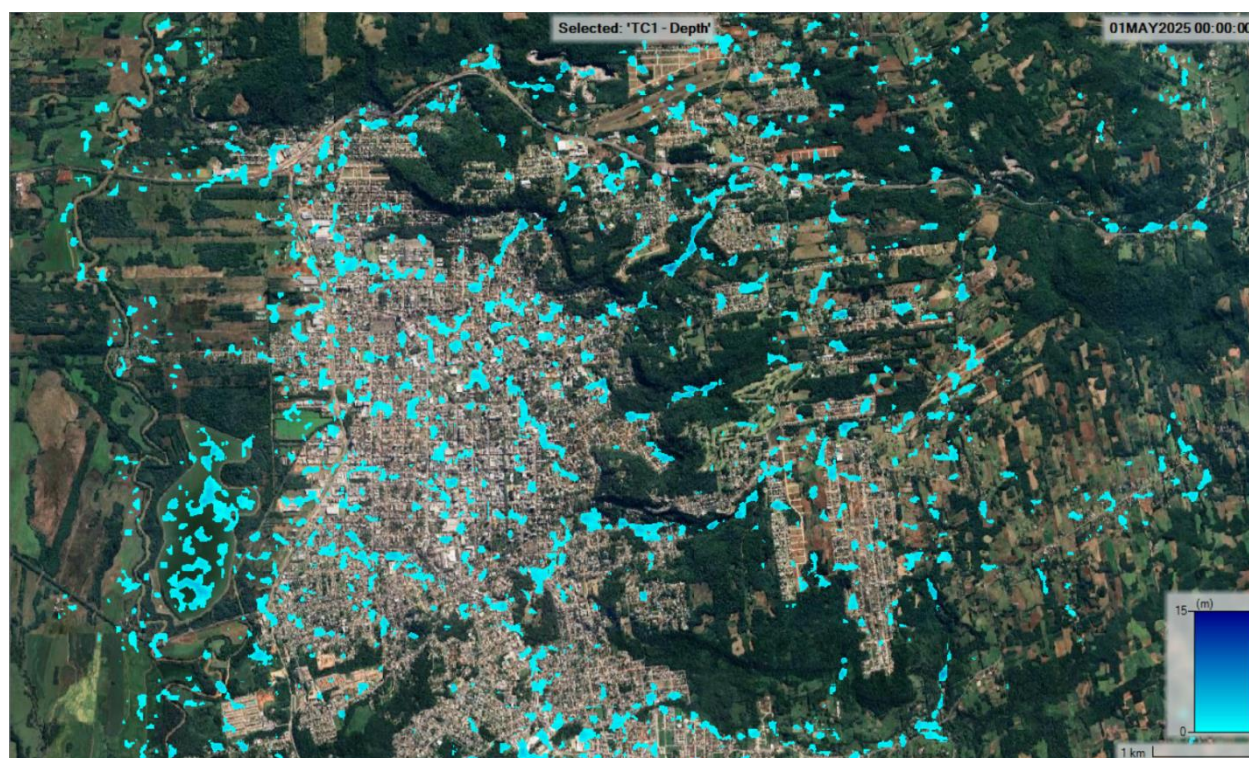
Fonte: KOHN - 2025

Figura 19 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 29/04



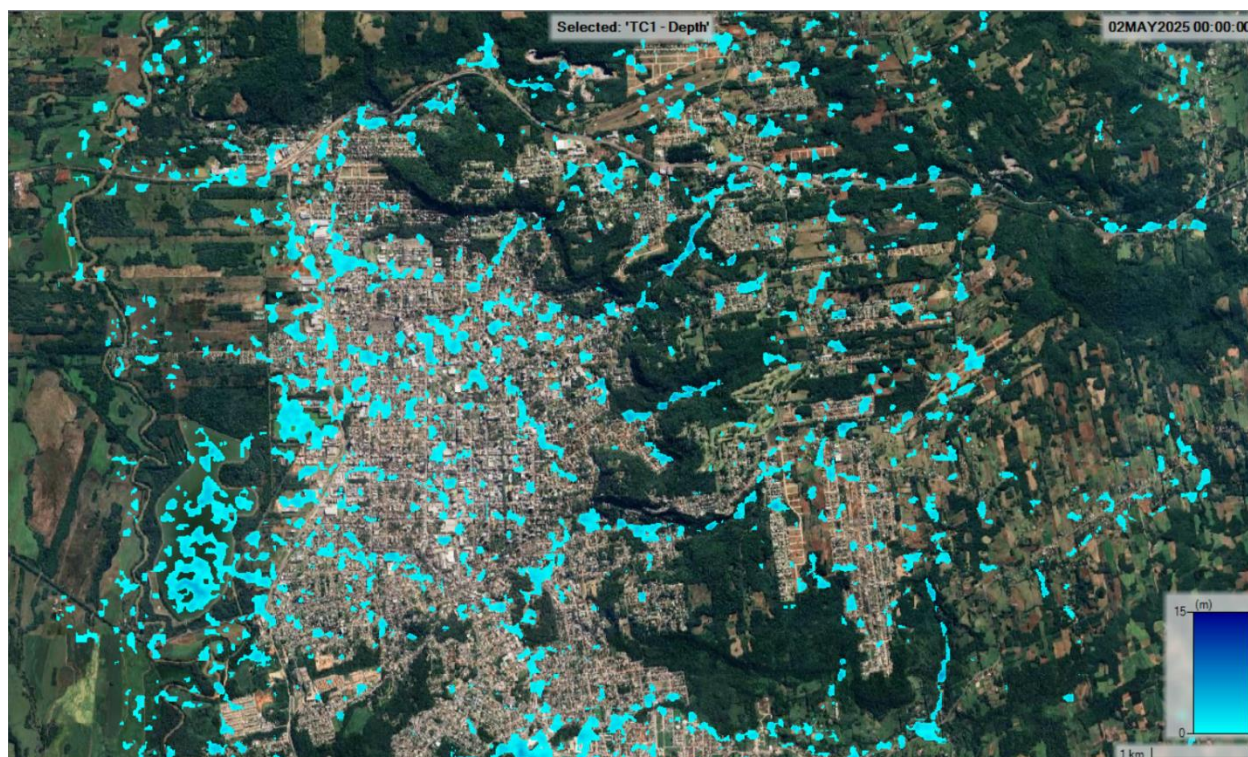
Fonte: KOHN - 2025

Figura 20 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 30/04



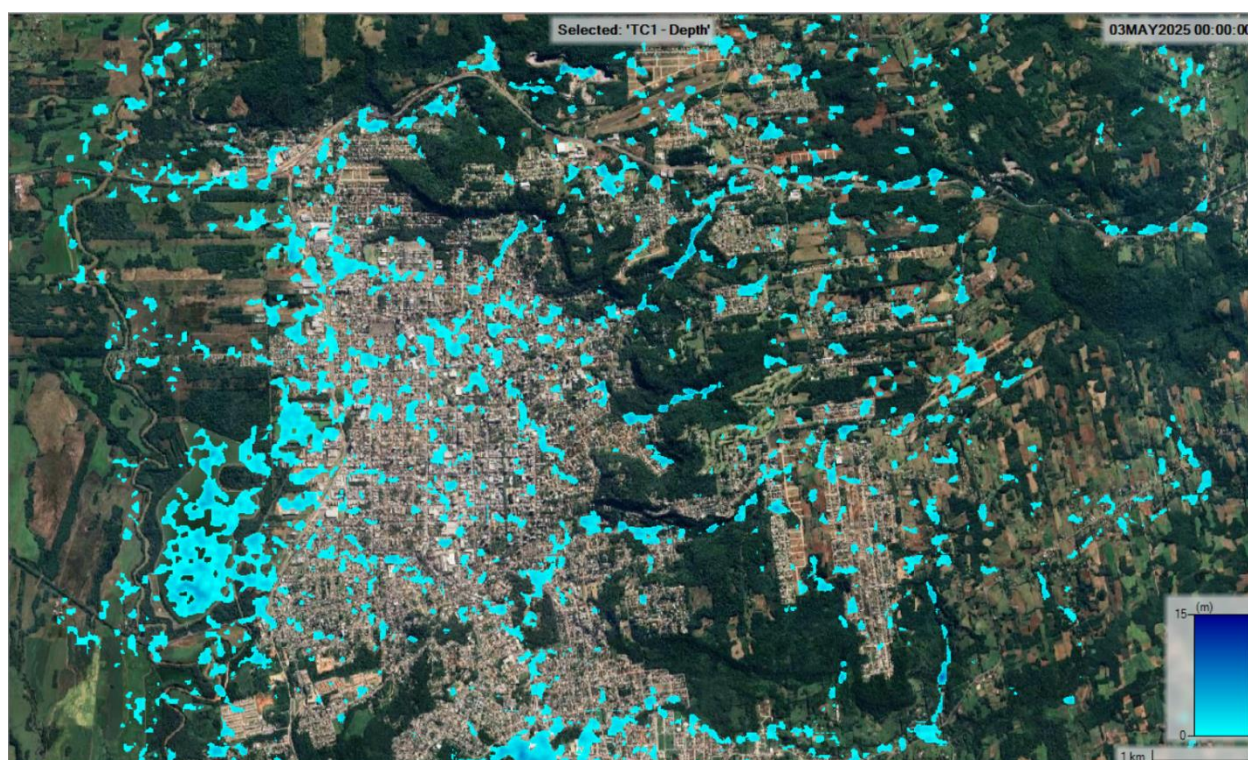
Fonte: KOHN - 2025

Figura 21 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 01/05



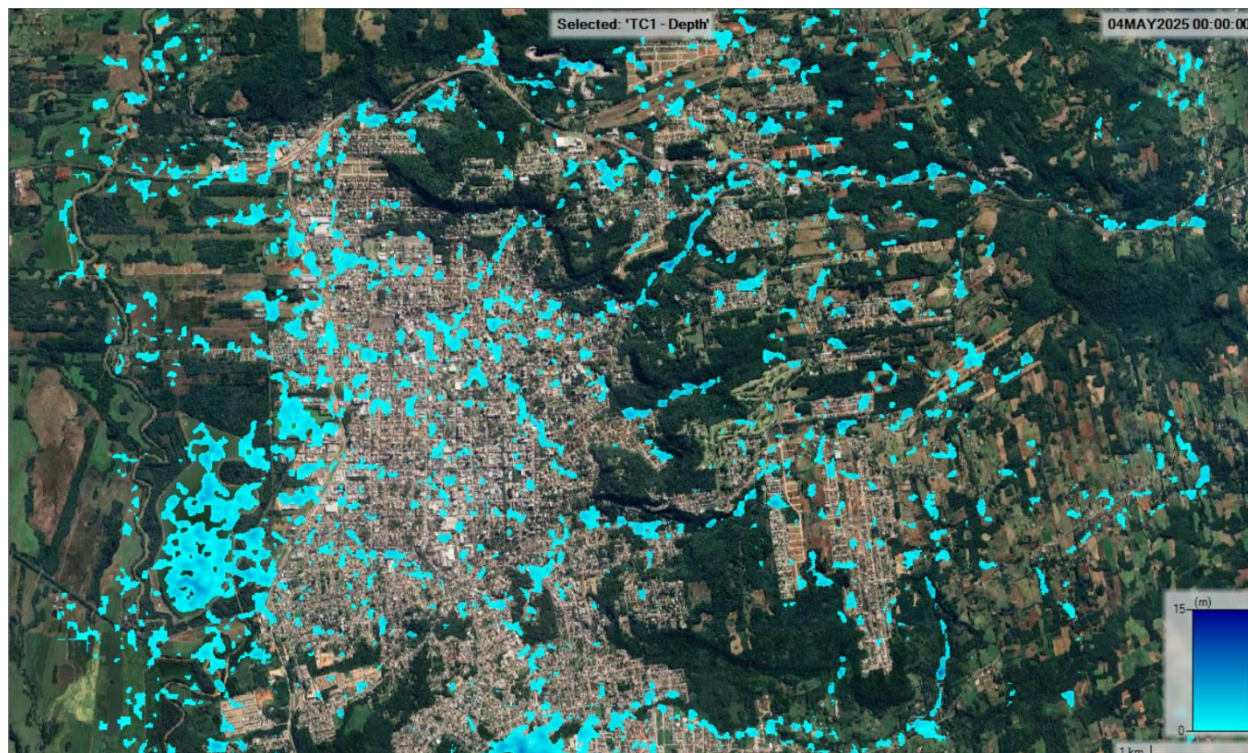
Fonte: KOHN - 2025

Figura 22 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 02/05



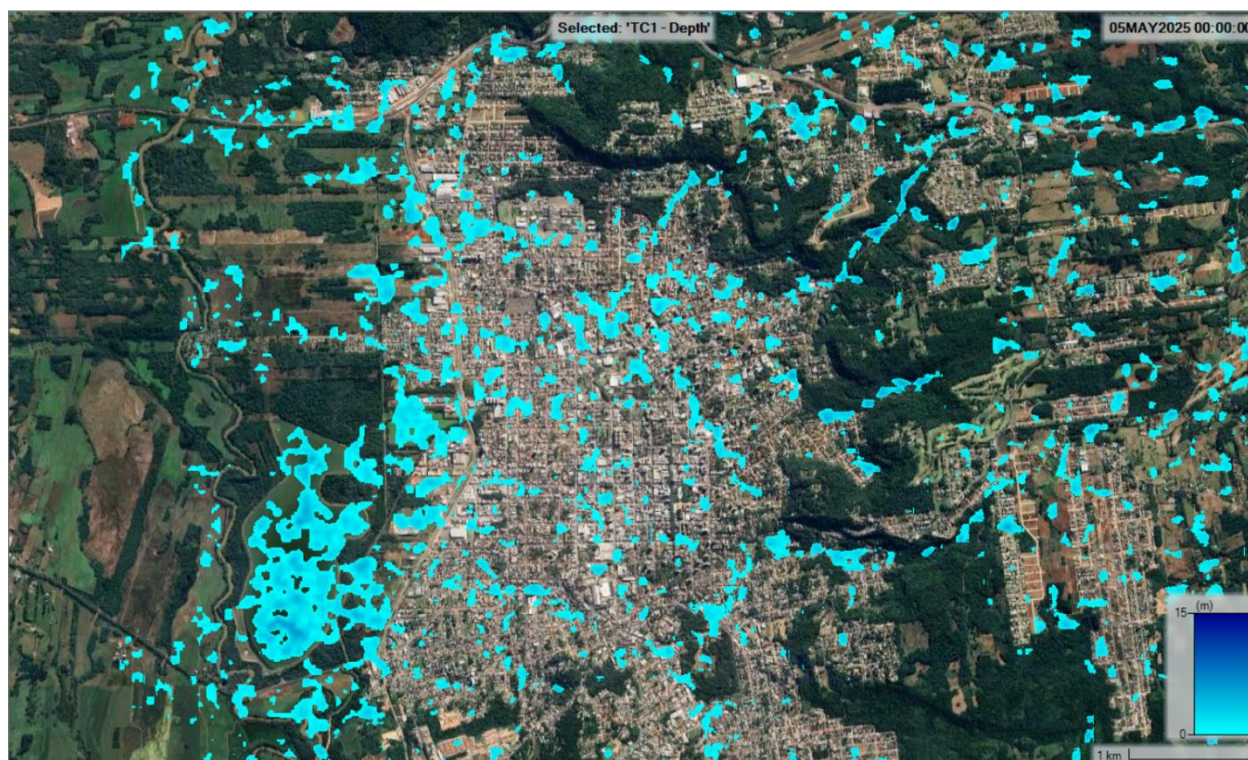
Fonte: KOHN – 2025

Figura 23 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 03/05



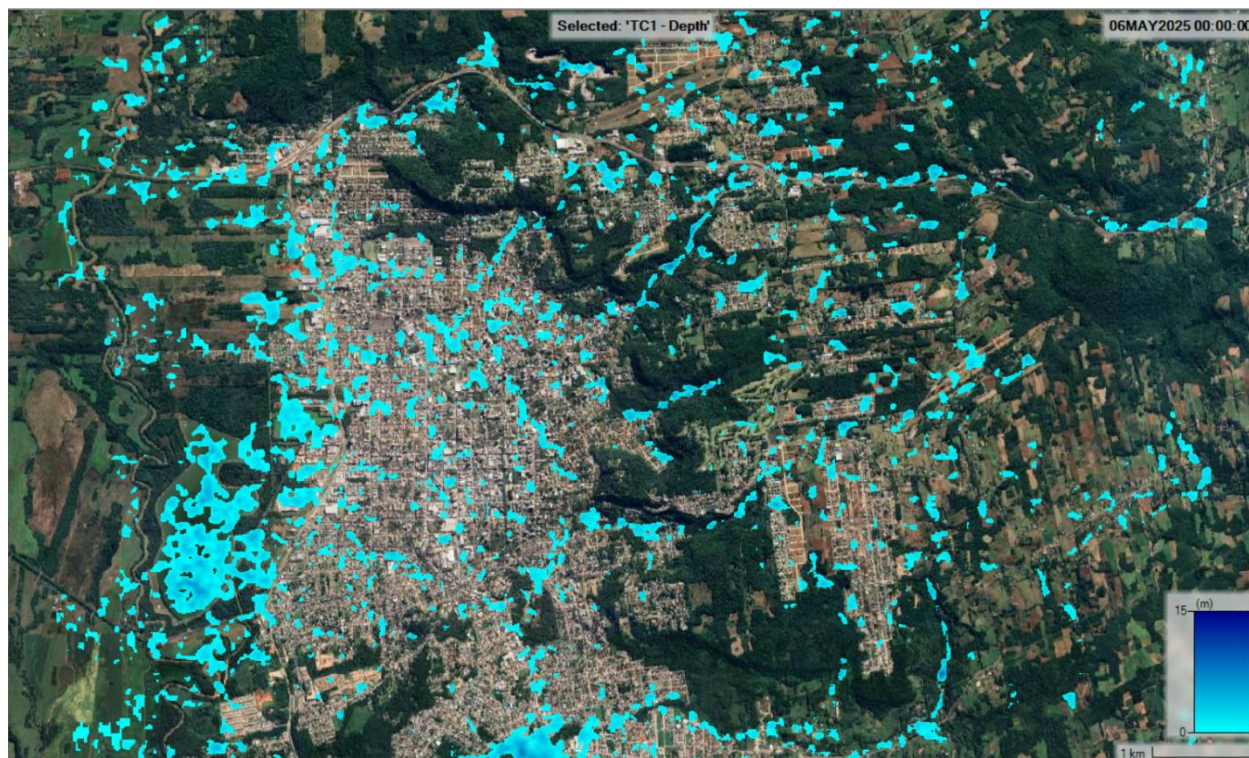
Fonte: KOHN - 2025

Figura 24 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 04/05



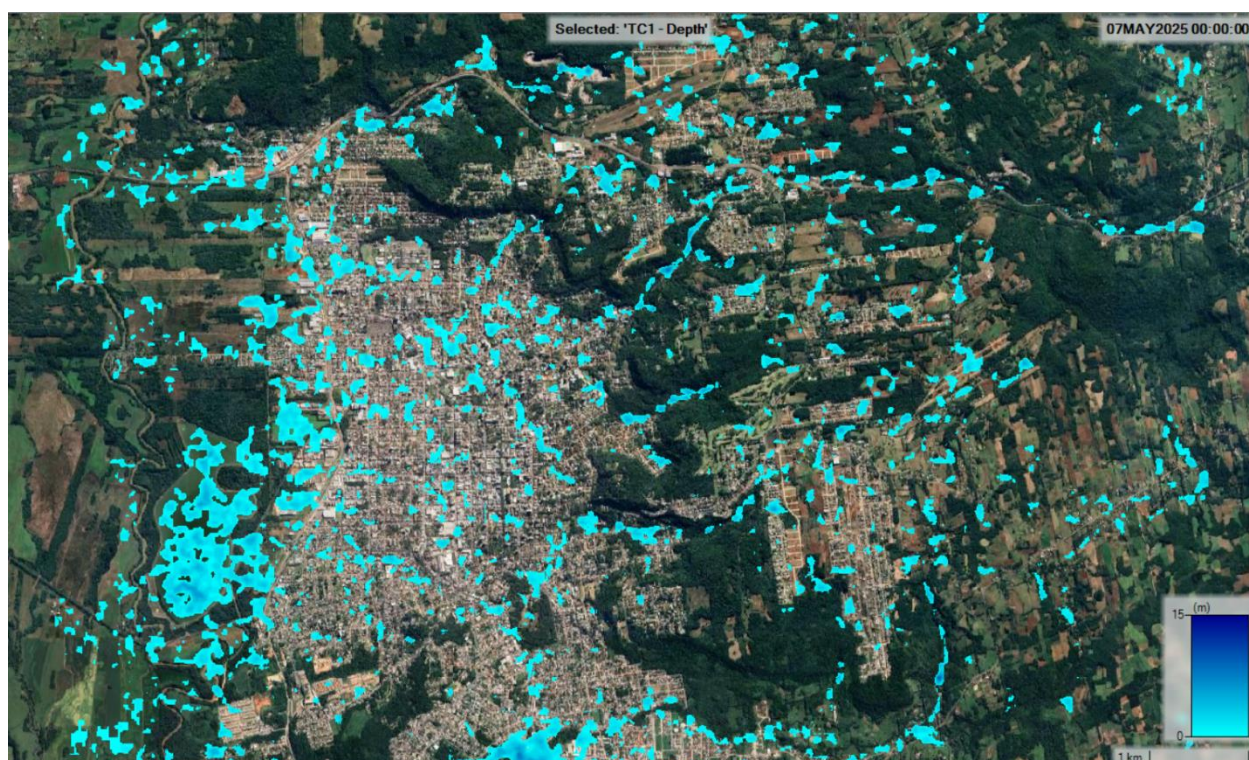
Fonte: KOHN - 2025

Figura 25 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 05/05



Fonte: KOHN - 2025

Figura 26 - Modelagem do HEC-RAS ao fim do dia 06/05



Fonte: KOHN - 2025

Os resultados da simulação indicam que, entre os dias 26 e 28 de abril,

mesmo com precipitações de menor intensidade, a água começou a se acumular em zonas naturalmente deprimidas do relevo urbano. Nessas áreas, a falta de vegetação e a impermeabilização do solo aumentaram a velocidade com que o escoamento se concentrava, formando poças e áreas de alagamento inicial. Esse comportamento está de acordo com o que ocorre na realidade, como apresentado na figura 27. Bairros como a Várzea sofrem com inundações frequentes, por estarem tão próximos ao Rio Pardinho.

Figura 27 - Inundação de 2019 na rua Irmão Emílio



Fonte: Disponível em: <https://www.gaz.com.br/conheca-as-areas-de-risco-de-santa-cruz-do-sul/>

Limitações inerentes ao modelo, como a representação reduzida de obstáculos urbanos (muros, árvores, meio-fio), podem gerar pequenas imprecisões na profundidade da lâmina d'água; ainda assim, o padrão geral de comportamento mostrado pelo HEC-RAS se mantém coerente com a dinâmica real do município. A partir do dia 29, observa-se uma expansão gradual das áreas alagadas, com maior intensidade nos pontos de convergência natural do escoamento superficial.

A partir de 30 de abril, o volume de chuva apresentou um aumento significativo, atingindo uma média de 6,25mm/h, momento em que a inundação

passou a afetar um conjunto mais amplo de bairros. Observou-se, então, o acúmulo de água em zonas de depressão, seguido, nos dias subsequentes, por uma clara convergência do escoamento para os canais naturais e vias de drenagem definidas.

Essa convergência foi particularmente evidente nos trechos que interligam a parte central da cidade aos bairros Country e João Alves, seguindo o traçado do Acesso Grasel, Rua Vereador Benno João Kist, Rua João Werlang e Rua Barão do Arroio Grande, conforme ilustrado na figura 28. Essa convergência ocorre pelos acessos cortarem o trecho do cinturão verde, área sem urbanização, portanto, sem sistema de drenagem pluvial. Isso faz com que a água siga o trajeto natural guiado pelos canais ditados pela morfologia da região.

Figura 28 – Acesso Grasel, Rua Vereador Brenno João Kist, Rua João Werlang e Rua Barão do Arroio Grande, em vermelho, amarelo, laranja e lilás, respectivamente



Nos dias 01 e 02 de maio, a situação de risco se agravou ainda mais, com intensidades pluviométricas elevadas, alcançando médias de 6,67mm/h e 6,25mm/h, respectivamente. Com o decorrer dos dias seguintes, com a ausência completa de chuva no dia 3 de maio, e com uma precipitação de menor volume nos dias 4 e 5 de maio, 1,66mm/h e 0,83mm/h, é possível ver o estado final de equilíbrio resultante do modelo. Manchas de inundação de caráter significativo se manifestaram em bairros centrais e adjacentes, incluindo Centro, Avenida, Goiás e Independência, ao mesmo tempo em que as áreas já afetadas na Várzea e no Jardim Europa tiveram sua situação agravada. Em contrapartida, as zonas topograficamente mais elevadas, como a porção norte dos bairros Santo Inácio e Universitário, a área sudeste do bairro Higienópolis e grande parte do bairro Pedreira, apresentaram uma resiliência maior e foram menos impactadas pela severidade do evento.

O evento extremo ocorrido em 17 de julho de 2025 oferece uma oportunidade relevante para comparar os resultados da modelagem com observações reais. Os pontos que sofreram alagamentos durante esse episódio coincidem amplamente com as áreas críticas identificadas pelo modelo, especialmente em trechos de acúmulo natural do relevo e em cruzamentos onde a drenagem superficial é limitada. As imagens registradas durante o evento reforçam a coerência da simulação, mostrando que a dinâmica observada no campo se assemelha ao padrão hidrodinâmico previsto, validando assim as projeções obtidas.

Figura 29 - Alagamento no cruzamento da avenida Deputado Euclides Nicolau Kliemann com a rua Barão do Arroio Grande, em 2025



Fonte: Disponível em: <https://www.gaz.com.br/videos-santa-cruz-tem-quase-200-milimetros-de-chuva-e-registra-alagamentos-em-diversos-pontos/>

Figura 30 - Modelagem do HEC-RAS no mesmo cruzamento, com opacidade alterada para melhor visualização



Fonte: KOHN - 2025

Figura 31 - Alagamento na rua Coronel Oscar Rafael Jost, próximo à BR-471, em 2025



Disponível em: <https://www.gaz.com.br/videos-santa-cruz-tem-quase-200-milímetros-de-chuva-e-registra-alagamentos-em-diversos-pontos/>

Figura 32 - Modelagem do HEC-RAS na mesma região



Fonte: KOHN - 2025

Em complementação à análise técnica e quantitativa fornecida pela modelagem hidrodinâmica, os resultados da pesquisa de campo com a população trouxeram uma visão empírica dos eventos, com diversos aspectos convergentes com os resultados obtidos pelo HEC-RAS. A pesquisa obteve um total de 84 respostas válidas, sendo que mais de 90% delas provêm de indivíduos que residem ou trabalham no município. A diversidade nas respostas referentes aos bairros de residência e trabalho permitiu obter múltiplos pontos de vista e abrangência da área estudada.

Em relação ao fluxo de trânsito frequente na cidade, 89,3% dos entrevistados indicaram o Centro como parte de seu trajeto habitual, seguido pelo bairro Universitário, com 63,1%. Os bairros Independência e Santo Inácio foram conjuntamente mencionados por 45,2% dos respondentes. A movimentação nos bairros restantes manteve-se constante, variando entre 10% e 35% do trânsito frequente dos entrevistados. Os bairros com menor incidência de trânsito habitual foram Bonfim e Monte Verde, ambos com 7,1%, e o bairro Pedreira, com 4,8%.

No que tange aos impactos das enchentes de 2024, dois terços dos participantes foram afetados direta ou indiretamente, seja pela inundação de suas residências ou locais de trabalho, seja por interrupções nos serviços essenciais, como energia elétrica ou água, ou por alterações em seus trajetos diários. Adicionalmente, 31% dos entrevistados relataram já ter sofrido com alagamentos menores em outras ocasiões, com a maioria descrevendo-os como eventos raros, mas com uma fração significativa sofrendo com tais ocorrências frequentemente.

A percepção dos moradores quanto aos impactos das enchentes de 2024 demonstra que a população está diretamente exposta aos prejuízos decorrentes das falhas na drenagem urbana. A elevada proporção de entrevistados que relatou danos materiais e dificuldades de deslocamento coincide com as áreas apontadas pela modelagem como mais vulneráveis, reforçando que os efeitos observados não são pontuais, mas estruturais.

Um achado relevante na pesquisa diz respeito às anomalias do sistema de drenagem: mais de 75% dos entrevistados afirmaram ter sentido mau cheiro proveniente das bocas de lobo, sendo o Centro o local mais destacado nessa percepção. Foram ainda frequentes os comentários sobre bueiros e bocas de lobo estarem subdimensionados, ou serem facilmente obstruídos e entupidos, indicando falhas operacionais e de manutenção. Isso reforça o contexto de ligações

clandestinas e impróprias, locais onde os sistemas de drenagem pluvial e de esgoto se misturam, que aumenta o risco de alagamento e poluição da via com dejetos de esgoto, além de causar o mau cheiro. Também é possível que bueiros com essa mesma situação tenham sido selados no passado, para acabar com os problemas do odor, e assim afetando diretamente a eficiência do sistema.

Por fim, 77,4% dos entrevistados demonstrou a crença de que a maior frequência de eventos extremos, como as chuvas e enchentes de 2024, está relacionada às mudanças climáticas, afetando diretamente o ciclo hidrológico e o comportamento meteorológico regional.

Com estes dados, fica evidente que os problemas causados pela falta de planejamento do sistema de drenagem urbano não é algo exclusivo de certas regiões da cidade, mas afeta boa parte do município, e com frequência é alvo de críticas dos moradores. Além disso, a modelagem criada pelo HEC-RAS também mostra como a maioria da cidade é suscetível à risco de enchente. Observou-se que diversas áreas foram submersas não apenas em grandes eventos pluviais, como as enchentes de maio de 2024, mas também em episódios curtos e intensos, como em 17 de julho de 2025, e até mesmo sob condições de chuva consideradas normais, ou seja, fora de volumes extremos.

Ao relacionar os dados coletados com a pesquisa de moradores e os registros fotográficos de eventos passados com a modelagem gerada pelo HEC-RAS, que este consegue providenciar resultados realistas, mesmo utilizando informações com certas limitações quanto à interpretação do terreno. Apesar da falta de representação de obstáculos urbanos, como construções, ou estruturas de drenagem superficial, como meio-fio, sarjetas e valetas, o HEC-RAS demonstrou um comportamento fiel à dinâmica hidrológica observada no município.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou desenvolver um modelo hidrológico da cidade de Santa Cruz do Sul para analisar a viabilidade do uso do mesmo para futuros estudos, planejamentos e projetos de sistema de drenagem urbana. O uso de modelos digitais de elevação e modelagem hidrológica vem se popularizando nos últimos 15 anos, devido ao constante desenvolvimento de cada ferramenta e por ter bases de dados amplamente disponíveis.

Ao analisar os dados do modelo da região processados pelo software HEC-RAS, comparando-os com resultados de eventos passados e com opiniões e experiências de moradores da região, fica claro que, mesmo utilizando dados rudimentares de terreno e tipo de solo, que a modelagem já consegue apresentar uma simulação realista, refletindo efeitos que a chuva causa na realidade.

Com isso, fica evidente que o uso de mapeamentos hidráulicas utilizando modelos digitais de elevação pode ser uma grande ferramenta para o planejamento e revisões de projetos de drenagem pluvial urbana, apontando facilmente os pontos de risco, que podem sofrer mais facilmente com alagamentos e enchentes, assim como outras possíveis catástrofes desencadeadas pelo sistema de drenagem falho, como deslizamentos.

É possível ainda desenvolver um estudo mais aprofundado e detalhado, utilizando ferramentas nativas dos softwares para modelar obstáculos urbanos como construções e muros, a estrutura das vias públicas, e o próprio sistema de drenagem superficial com meio-fio, sarjetas e valetas. Aumentando o número de detalhes, seria possível maximizar a precisão das manchas de inundação geradas pelo modelo numérico utilizado, criando um resultado mais confiável para se utilizar de referência para o futuro desenvolvimento de novos projetos de drenagem urbana.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15527: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AGÊNCIA MINAS. **Ligações irregulares aumentam em 40% vazamentos de esgoto durante período chuvoso na RMBH**. Agência Minas, Belo Horizonte, 2023. Disponível em <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/ligacoes-irregulares-aumentam-em-40-vazamentos-de-esgoto-durante-periodo-chuvoso-na-rmbh>. Acesso em: 18/11/2025

ANDRIOLO, GUILHERME. **VÍDEOS: Santa Cruz do Sul tem quase 200 milímetros de chuva e registra alagamentos em diversos pontos**. Portal Gaz, Santa Cruz do Sul, 18/06/2025. Disponível em: <https://www.gaz.com.br/videos-santa-cruz-tem-quase-200-milimetros-de-chuva-e-registra-alagamentos-em-diversos-pontos/> Acesso em: 17/11/2025

BENINI, RUBENS; MENDIONDO, EDUARDO: **Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho**. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/loram/a/Z6Tf4Krs6qgnSrTp4ZXY3Vx/?format=html&lang=pt> Acesso em: 11/12/2025

COMITÊ PARDO: **A Bacia Hidrográfica do Rio Pardo**. Universidade de Santa Cruz do Sul, 2003. Disponível em: [http://www.comitepardo.com.br/bacia\\_riopardo.html](http://www.comitepardo.com.br/bacia_riopardo.html) Acesso em: 11/12/2025.

DEFESA CIVIL DO ESTADO: **Balanço das enchentes de maio de 2024 no Rio Grande do Sul**. SOS Enchentes, Porto Alegre, 19/08/2025. Disponível em: <https://sosenchentes.rs.gov.br/situacao-nos-municipios#:~:text=Balan%C3%A7o%20das%20enchentes%20de%20maio%20de%202024%20no%20Rio%20Grande%20do%20Sul&text=Munic%C3%ADpios%20afetados%3A%20478,Desaparecidos%3A%2023>. Acesso em: 17/11/2025

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Plano municipal de saneamento básico**. FUNASA, 2016. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/documents/20182/300120/Drenagem+e+Manejo+das+%C3%81guas+Pluviais+Urbanas.pdf/72c03623-99ee-40d8-b1e8-107c182daf8e?version=1.0>. Acesso em: 18/11/2025

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Santa Cruz do Sul**. IBGE Cidades, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/santa-cruz-do-sul/panorama>. Acesso em: 18/11/2025

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Evento extremo no Rio Grande do Sul entre final de abril e início de maio de 2024**. INPE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/relatorio-do-inpe-explica-evento-meteorologico-que-causou-a-tragedia-no-rs/chuvas-rio-grande-do-sul.pdf>. Acesso em: 18/11/2025

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS. **Chuva da cheia de 2024 foi mais volumosa e intensa que a da cheia de 1941 na bacia hidrográfica do Guaíba**. IPH – UFRGS, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/06/Comparacao-2024-e-1941-final.pdf> Acesso em: 18/11/2025

MONTE, BENÍCIO; ZANANDREA, FRANCIELE; ABATTI, BRUNO; TAVARES, MATHEUS; SILVEIRA, ANDRÉ. **Capacidade do modelo HAND na representação de uma mancha de inundação comparado ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/216292>. Acesso em: 18/11/2025

OLIVEIRA, GABRIELA R. **Modelagem hidrológica com o uso de infraestruturas verdes: estudo de caso do Córrego Jatobá, em Belo Horizonte**. Tese. (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

PREFEITURA DE SANTA CRUZ DO SUL. **Santa Cruz Hoje**. Santa Cruz do Sul, 22/05/2017. Disponível em: <https://www.santacruz.rs.gov.br/municipio/santa-cruz-hoje> Acesso em: 18/11/2025

PREFEITURA DE SANTA CRUZ DO SUL. **Lago Dourado**. Santa Cruz do Sul, 21/09/2023. Disponível em: <https://www.santacruz.rs.gov.br/municipio/lago-dourado> Acesso em: 18/11/2025

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. Campinas, 2023. Disponível em: <https://portal-api.campinas.sp.gov.br/sites/default/files/secretarias/arquivos-avulsos/142/2023/07/05-121719/p1-diagnostico-7%20-%20Drenagem.pdf> Acesso em: 18/11/2025

POLO, FERNANDA. **Com quase 8 milhões de litros por segundo, Guaíba atinge menor vazão desde o pico da enchente**. Zero Hora, Porto Alegre, 31/05/2024. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/ambiente/noticia/2024/05/com-quase-8-milhoes-de-litros-por-segundo-guaiba-atinge-menor-vazao-desde-o-pico-da-enchente-clwv30nbn002a013ujuj3mq3u.html>. Acesso em: 18/11/2025

SANTOS, JULIANA; PAULA, DAVIS. **Análise espacial das ocorrências de alagamentos urbanos na microbacia do riacho Pajéu em Fortaleza, Ceará**. Brazilian Geographical Journal, Ituiutaba, v. 12, n. 1, p. 109–128, 2021. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/59497>. Acesso em: 18/11/2025

TUCCI, CARLOS E. M. **Inundações Urbanas**. 1ª. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, CARLOS E. M. **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, v. 7, p. 23, 2001.

TUCCI, CARLOS E. M.; BERTONI, JUAN C. **Precipitação**. In TUCCI, Carlos E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 5, p. 177-234.

TUNDISI, JOSÉ. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. Ciência e Cultura, São Paulo, 2003. Disponível em: [http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S0009-67252003000400018&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S0009-67252003000400018&script=sci_arttext&tlng=en) Acesso em: 11/12/2025.