

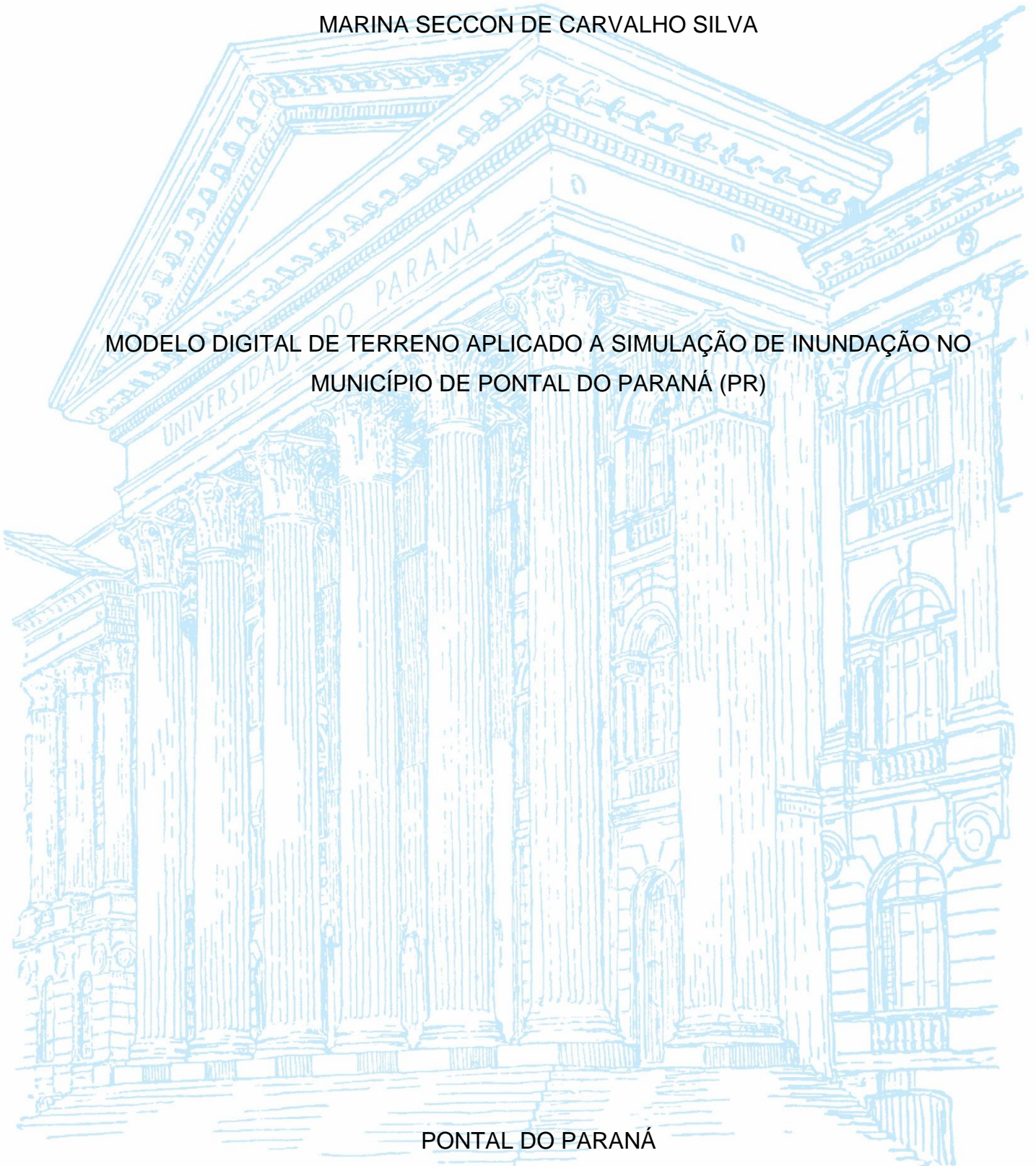
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JÉSSICA BUSATO DE CRISTO
MARINA SECCON DE CARVALHO SILVA

MODELO DIGITAL DE TERRENO APLICADO A SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÃO NO
MUNICÍPIO DE PONTAL DO PARANÁ (PR)

PONTAL DO PARANÁ

2021



JÉSSICA BUSATO DE CRISTO
MARINA SECCON DE CARVALHO SILVA

MODELO DIGITAL DE TERRENO APLICADO A SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÃO NO
MUNICÍPIO DE PONTAL DO PARANÁ (PR)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil, Campus Pontal do Paraná – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas

PONTAL DO PARANÁ
2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
Biblioteca do Centro de Estudos do Mar

Cristo, Jéssica Busato de
C933m Modelo digital de terreno aplicado a simulação de inundação no município de Pontal do Paraná (PR) / Jéssica Busato de Cristo, Marina Seccon de Carvalho Silva. – Pontal do Paraná, 2021.
1 arquivo [62 f.] : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas
Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Curso de Engenharia Civil.

1. Hidrodinâmica – inundação. 2. Solos - inundação. 3. Inundações – Pontal do Paraná. 4. Manchas de inundação. 5. Modelo digital de terreno. 6. Modelo hidrodinâmico. I. Silva, Marina Seccon de Carvalho. II. Lopes, Alexandre Bernardino. III. Tomas, Gustavo Pacheco. IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.

AGRADECIMENTOS

Nós, Jéssica e Marina, agradecemos imensamente aos nossos professores orientadores, Alexandre e Gustavo, que tiveram paciência para responder as inúmeras perguntas, reuniões e saídas de campo oferecendo todo o suporte necessário para que fosse possível ser realizado este trabalho.

Aos nossos amigos em comum que adquirimos durante a faculdade, que estiveram presentes em todos os momentos, sejam eles dividindo o fardo nas matérias mais complicadas ou compartilhando momentos de felicidade. Muito obrigada, Dany e Vitor!

Eu, Jéssica, agradeço aos meus pais Ijoel e Rosmari e as minhas irmãs Joelma e Vanessa por me incentivarem nos momentos difíceis e sempre estarem presentes para me ajudar. Além das pessoas citadas acima agradeço a todos os meus familiares e especialmente a minha melhor amiga Marina que confiou em mim para realizar esse trabalho em conjunto.

Eu, Marina, agradeço em particular aos meus familiares, mas em especial a minha mãe, Margarete, e ao meu pai, Luiz, que são minha base e meus maiores exemplos. Sem eles eu não teria conseguido.

Agradeço também a minha amiga e dupla de TCC, que se tornou uma irmã, me apoiando e acreditando em mim quando eu mesma não acreditava.

“Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos sujeite.”

Simone de Beauvoir

RESUMO

A inundação é um fenômeno natural que ocorre frequentemente no balneário de Praia de Leste, na cidade de Pontal do Paraná (PR). Nos períodos de chuvas intensas ou de longas durações, o canal do DNOS presente nesta região não suporta a vazão solicitada e acaba transbordando, ocasionando transtornos para a população local. O trabalho tem como objetivo caracterizar topograficamente a região de estudo (gerar um MDT com dados GNSS e avaliar o mesmo considerando o Padrão de Exatidão Cartográfica), realizar a modelagem hidráulica e caracterizar as áreas de inundação adjacentes. Para a construção destes mapas de inundação realizou-se levantamentos GNSS, interpolou-se os dados com interpolador melhor classificado considerando o PEC e simulou-se as cotas de inundação considerando vazões de 0,5 m³/s, 1,5 m³/s, 2,5 m³/s, 3,22 m³/s, 4,0 m³/s, 5,0 m³/s e 6,0 m³/s com o software de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS. Os resultados mostraram que as vazões de 0,5 m³/s e 1,5 m³/s representaram bem as inundações para a região, enquanto que a vazão de 6,0 m³/s inundou quase que em sua totalidade toda a área de estudo, demonstrando que a chuva que gera esta vazão está ligada a um evento extremo.

Palavras-chave: Manchas de inundação. Modelo Digital de Terreno. Modelo hidrodinâmico. Inundação.

ABSTRACT

Flooding is a natural phenomenon that occurs frequently in the neighborhood of Praia de Leste, city of Pontal do Paraná (PR). In periods of heavy and long rains the DNOS channel of this region does not support the requested flow and ends up overflowing, causing inconvenience to the local population. Therefore, this study aims to characterize topographically the region of the study (generate a DTM with GNSS data and validate considering the Brazilian Cartographic Accuracy Standard, from Portuguese *Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)*), perform hydraulic modeling and characterize adjacent flood areas. Thus, to the construction of this flooding maps it was executed GNSS survey and the data was interpolated with the greatest interpolator classified according PEC, in this way it was simulated flooding levels taking flows of 0,5 m³/s, 1,5 m³/s, 2,5 m³/s, 3,22 m³/s, 4,0 m³/s, 5,0 m³/s and 6,0 m³/s considering the hydrodynamic modelling software HEC-RAS. The results demonstrated that the flows of 0,5 m³/s and 1,5 m³/s represented well the flooding to the region, meanwhile the flow of 6,0 m³/s flooded almost all the region of the study, indicating that the rains that generate this flow is related with an extreme event.

Keywords: Flooding map. Digital Terrain Model. Hydrodynamic model. Flooding.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – INUNDAÇÕES CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO.....	15
FIGURA 5 - ÁREA DE ESTUDO	17
FIGURA 6 - ZONEAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	18
FIGURA 7 - HIDROGRAMA MÉTODO RACIONAL	24
FIGURA 8 - HIDROGRAMAS SINTÉTICOS DO SCS	25
FIGURA 9 - MODELOS DE SUPERFÍCIE	26
FIGURA 10 - ALTITUDES	28
FIGURA 11 - DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS	29
FIGURA 12 - POSICIONAMENTO DO EQUIPAMENTO	35
FIGURA 13 - TRAJETÓRIA DO LEVANTAMENTO	36
FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE	37
FIGURA 15 - SEÇÕES TRANSVERSAIS	38
FIGURA 16 – EXEMPLO SEÇÃO TRANSVERSAL - LOTE	39
FIGURA 17 - EXEMPLO SEÇÃO TRANSVERSAL LIVRE	40
FIGURA 18 - MODELO DIGITAL DE TERRENO	43
FIGURA 19 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 0,5 M ³ /S	44
FIGURA 20 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 1,5 M ³ /S	44
FIGURA 21 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 2,5 M ³ /S	45
FIGURA 22 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 3,22 M ³ /S	45
FIGURA 23 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 4,0 M ³ /S	46
FIGURA 24 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 5,0 M ³ /S	46
FIGURA 25 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 6,0 M ³ /S	47
FIGURA 26 - SEÇÃO RUA NELSON MEDRADO Q = 0,5 M ³ /S	48
FIGURA 27 - SEÇÃO RUA NELSON MEDRADO Q = 1,5 M ³ /S	48
FIGURA 28 - ELEVAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA.....	56
FIGURA 29 - MODELO DE HIDROGRAMA.....	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS PEC-PCD	30
TABELA 2 - INFORMAÇÕES GERAIS - GEOPEC	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
2 ÁREA DE ESTUDO	17
3 REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 ESTUDOS DE INUNDABILIDADE	20
3.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA	21
3.2.1 Precipitação e chuvas intensas	22
3.2.2 Modelos chuva-vazão.....	24
3.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA	26
3.3.1 DATUM.....	26
3.3.2 Altitude geométrica, ortométrica e normal	27
3.3.3 Levantamento GNSS	29
3.3.4 Modelos Digitais de Terreno (MDT)	29
3.3.5 Padrão de Exatidão Cartográfica	30
3.4 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA.....	31
3.4.1 Hidráulica Fluvial	31
3.4.2 Modelos numéricos hidrodinâmicos unidimensionais.....	32
3.4.3 Modelo hidrodinâmico HEC-RAS	33
4 MÉTODOS E FERRAMENTAS	35
4.1 LEVANTAMENTOS DE CAMPO.....	35
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E HIDRÁULICA	38
5 RESULTADOS	42
5.1 MDT.....	42
5.2 MANCHA DE INUNDAÇÃO	43
6 CONCLUSÃO E DEBATE	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE 1 – ESCOAMENTO SUPERFICIAL E VAZÃO	56
ANEXO 1 – CURVA IDF	59
ANEXO 2 – RELATÓRIO PEC-PCD	60

1 INTRODUÇÃO

As dificuldades encontradas acerca de inundações urbanas estão presentes em diversas cidades ao redor do mundo, afetando principalmente os países em desenvolvimento. Um estudo publicado pelo *World Resources Institute* (2015) indica os 15 países que mais sofrem com inundações, em que lideram o ranking a Índia, Bangladesh e China, o Brasil está em 11º lugar.

Estes problemas são ocasionados, em sua maioria, pela falta de planejamento atrelado ao crescimento desenfreado da população em locais de áreas de risco. A variação dos níveis de água existentes, principalmente nos grandes períodos de chuva, pode ocupar áreas que não correspondem a áreas habituais, dessa forma os transtornos podem ser ampliados devido ao despejo inadequado de entulhos pela população, pela formação de vegetação que é gerada pelo assoreamento e pela maior impermeabilização do solo ocasionada pela urbanização (BRASIL, 2005).

O município de Pontal do Paraná, no litoral paranaense, tem sofrido de forma crônica com esse problema ao longo do tempo. Em 2010 a cidade possuía 20.920 habitantes (IBGE, 2010), com estimativa de 27.915 habitantes em 2020 (IBGE, 2020), dispendo de 200,410km² de área territorial (IBGE, 2021). Além disso, durante a temporada de verão há um aumento significativo na população, devido ao deslocamento de turistas para a região. A economia do município é gerada através do turismo, de atividades pesqueiras, do comércio e de artesanato local (PONTAL DO PARANÁ, 2021). Apesar de bem situada, uma vez que a cidade está localizada a cerca de 25km do porto de Paranaguá, um dos principais portos de importação e exportação do país, o município carece de infraestrutura na área de drenagem urbana e saneamento, afetando diretamente a qualidade de vida e economia local.

Os problemas de infraestrutura relacionados à falta de drenagem urbana são comuns no litoral paranaense, principalmente como consequência das baixas declividades existentes. Em Pontal do Paraná, os alagamentos e inundações têm causado prejuízos à população. Além dos danos materiais e privados, outros impactos negativos podem ser vinculados a problemas de drenagem. No município de Matinhos, adjacente a Pontal do Paraná, a ampliação de casos de doenças como leptospirose e dengue é identificado devido a vulnerabilidade gerada pela falta de mobilidade em períodos de inundação (ESTEVEZ, 2011).

O escoamento superficial ao longo do município é direcionado para os rios naturais e para um canal artificial, construído pelo antigo Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), denominado “Canal do DNOS”. Criado para fins de drenagem e navegação, o canal do DNOS sofre atualmente com o descarte irregular de lixo e esgoto (PARANÁ, 2019a). Com o crescimento urbano, o canal tem sofrido inundações sistemáticas, demonstrando a necessidade de uma análise da sua inundabilidade ao longo dos diferentes balneários do município.

O conceito de inundação é o transbordamento de água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes, ou acumulação de água por drenagem deficiente, em áreas não habitualmente submersas (PARANÁ, 2018). A inundabilidade de uma região aborda diferentes efeitos, sendo analisado na engenharia por meio de projetos complexos e multidisciplinares. O desenvolvimento desses estudos de inundabilidade abordam a caracterização hidrológica, topográfica e hidráulica da região e tem como objetivo entender as condições iniciais de inundação e avaliar possíveis soluções.

A caracterização topográfica e hidráulica busca verificar as cotas de inundação local, podendo ser determinadas utilizando modelos físicos ou numéricos. O avanço tecnológico tem impulsionado a utilização de modelos numéricos, tendo como principal vantagem a redução dos custos, tempo de execução e agilidade para desenvolver diferentes cenários. Para garantir um resultado mais fidedigno, o modelo deve ser abastecido com dados medidos em campo (MIGUEZ; GREGORIO; VERÓL, 2018).

A definição das cotas de inundação auxilia no planejamento de obras de drenagem urbana, manejo de águas pluviais, planejamento urbano e obras de infraestrutura. A relação entre modelos topográficos e hidrodinâmicos possibilita a sua determinação.

Os modelos topográficos, como os Modelos Digitais de Terreno (MDTs), são obtidos através da interpolação de dados topográficos (coordenadas planialtimétricas). São diversas as técnicas para a obtenção de levantamentos de dados, em que a escolha é condicionada ao tamanho da área de estudo, acesso e custos, em especial cita-se o método de levantamento por GNSS (*Global Navigation Satellite System*), utilizado neste trabalho.

Em contrapartida, a utilização de modelagem hidrodinâmica permite avaliar o escoamento superficial de canais e rios e pode ter diferentes níveis de complexidade. Conforme o tamanho da área a ser estudada, é possível definir qual modelo será

utilizado, levando em consideração em quantas direções será avaliado o escoamento. É no modelo hidrodinâmico que são estabelecidos os limites do canal, bem como as suas características físicas e hidrológicas.

O objetivo do atual trabalho é a análise de inundabilidade de um trecho do canal do DNOS localizado no município de Pontal do Paraná. Serão abordados os aspectos topográficos e hidráulicos para determinação das cotas de inundação. A caracterização hidrológica será realizada por meio de dados secundários (como a altura do nível da água, precipitação e vazão).

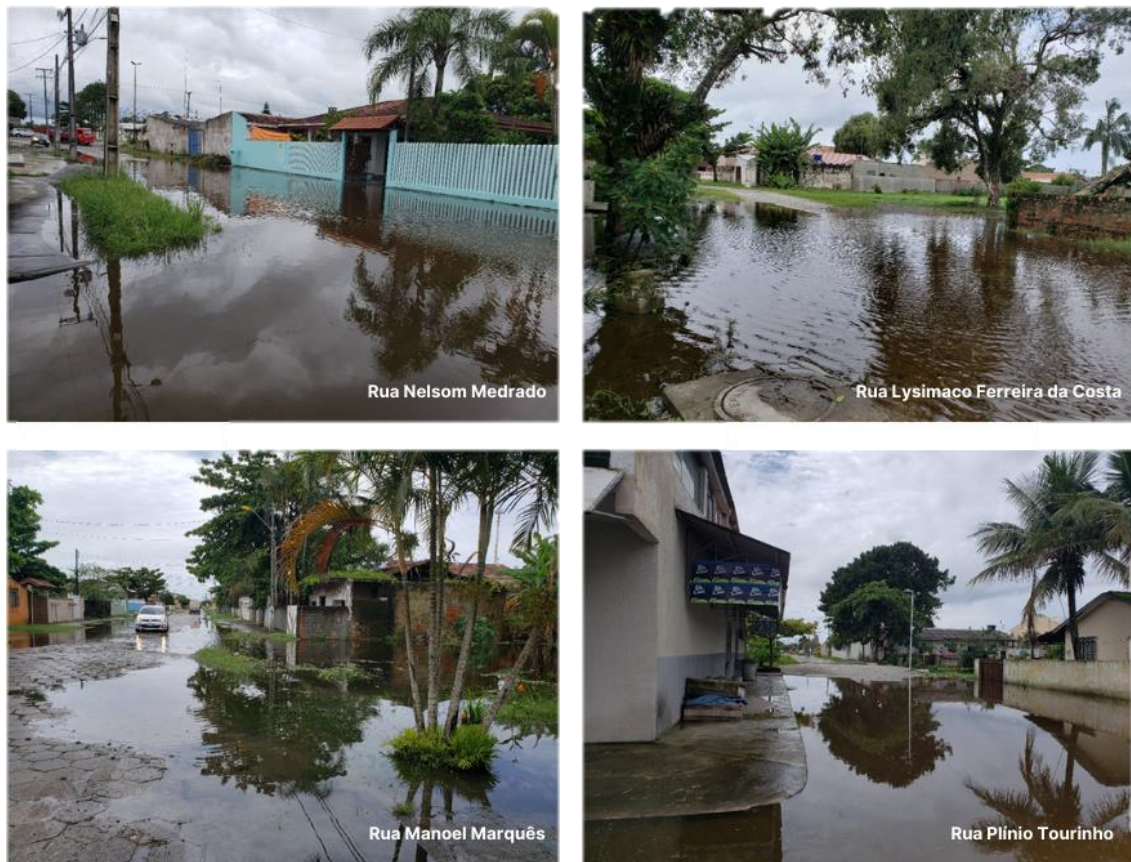
A área de estudo está localizada no balneário de Praia de Leste, no município de Pontal do Paraná, no estado do Paraná. O balneário tem características urbanas bem definidas, apresentando zonas residenciais e de comércio. Além disso, estão localizados importantes pontos de atendimento à população, como o edifício da Prefeitura de Pontal do Paraná, Pátio da Polícia Militar e Unidade de Saúde. O estudo se restringe a uma área de 713.376,7m², conforme observado durante a realização deste trabalho, no balneário de Praia de Leste no entorno do canal do DNOS.

1.1 JUSTIFICATIVA

Pontal do Paraná é um município novo, emancipado de Paranaguá no ano de 1995. Portanto, é comum que não haja tantos estudos relacionados aos problemas encontrados nesta região. O canal do DNOS, por ter sido estabelecido para drenagem do município, sofre com problemas de inundação anualmente em decorrência de fortes chuvas, principalmente no verão.

No litoral paranaense em geral, durante esta estação, acontecem as maiores médias de chuva, sendo no mês de janeiro o período mais expressivo (VANHONI e MENDONÇA, 2008). Durante a terceira semana deste mesmo mês em 2021, ocorreram episódios que afetaram diversas ruas do município no entorno do canal do DNOS. Foram registradas algumas imagens das inundações, especificamente no dia 22, conforme possível observar abaixo.

FIGURA 1 – INUNDAÇÕES CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO



FONTE: As autoras (2021)

O canal se encontra paralelo a rodovia que cruza o município, o acesso à praia se dá por estradas secundárias que cortam o canal. No balneário de Praia de Leste em específico, há diversos pontos em que o acesso fica limitado a outras ruas em razão das inundações que ocorrem, o que causa transtornos para os moradores e veranistas locais. Além disso, como a limpeza do canal não é constante, os habitantes destes locais tornam-se vulneráveis ao desenvolvimento de doenças de veiculação hídrica, culminando assim em um problema de saúde pública.

Portanto, o estudo e o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação, conforme apresentado neste trabalho, possuem grande relevância para o município, tendo em vista que através dele é possível determinar as prioridades e estabelecer metas e planos para o desenvolvimento da infraestrutura da região.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a inundabilidade no entorno do canal do DNOS no balneário de Praia de Leste, em Pontal do Paraná, através de modelagem hidrodinâmica com dados hidrológicos e topográficos.

1.2.2 Objetivos específicos

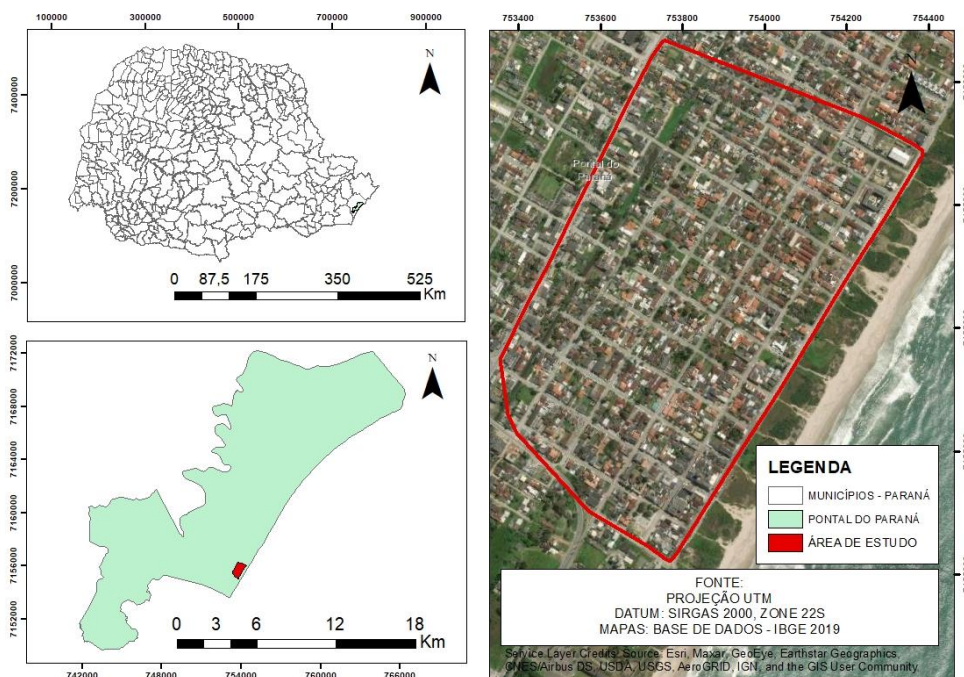
1. Realizar levantamentos GNSS na área de estudo;
2. Gerar um MDT nos Padrões de Exatidão Cartográfica (PEC) com dados GNSS;
3. Caracterizar as condições hidrológica de cheia na área de estudo;
4. Simular cheias com técnicas de modelagem numérica (HEC-RAS) a partir de dados hidrológicos e do MDT;
5. Elaborar o mapa de cota de inundação.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no litoral do Paraná-PR, mais especificamente no Balneário Praia de Leste em torno do canal de drenagem, conforme ilustra FIGURA 2. Na região objeto do estudo (delimitado em vermelho), que compreende 713.376,7m², ocorrem inundações frequentes devido ao transbordamento do canal do DNOS.

A criação do canal do DNOS ocorreu no século passado com o intuito de controlar inundações e melhorar o esgotamento sanitário (PARANÁ, 2019a). Conforme descrito pelo SIMEPAR (2007), a região de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica Canoas Atlântica, e o canal no balneário de Praia de Leste tem seu escoamento direcionado para o município de Matinhos. O canal, caracterizado por apresentar escoamento lento, possui oficialmente largura e profundidade média de 10m e 1,5m, respectivamente (PARANÁ, 2019b), entretanto após a leitura da profundidade em alguns pontos do canal, foram observadas que estas medidas possuem variações ao longo da área de estudo. Além de receber o escoamento superficial ocasionado pelas chuvas, serve como depósito de lixo irregular e lançamentos de esgoto. O canal possui também como característica a presença de plantas aquáticas em grande parte de sua extensão (PARANÁ, 2019b).

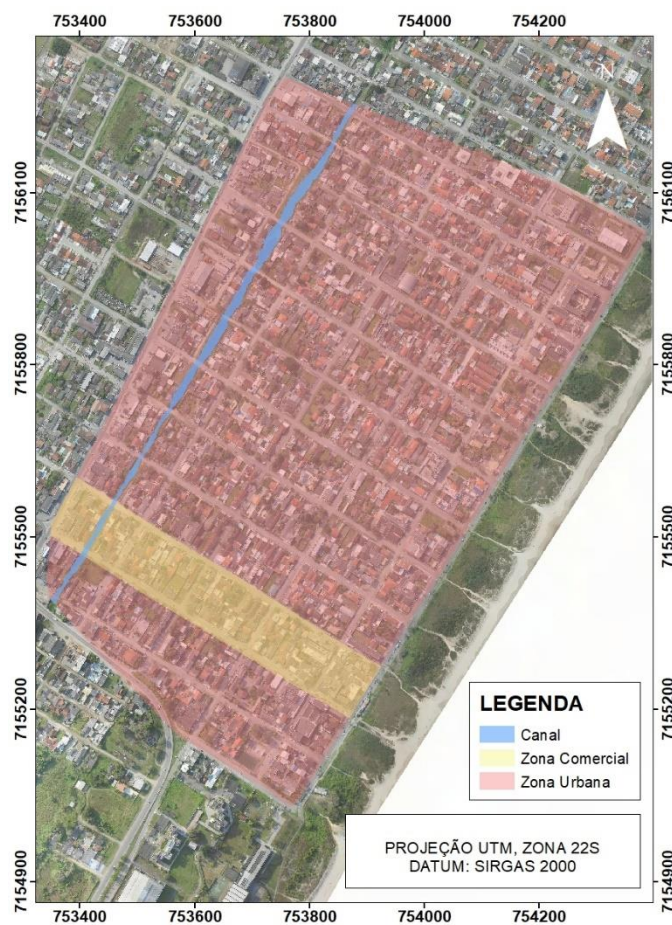
FIGURA 2 - ÁREA DE ESTUDO



FONTE: As autoras (2021)

A região de estudo compreende zona residencial e de comércio, onde constam pousadas, lanchonetes, restaurantes, uma casa noturna, agência dos correios, banco, unidade de saúde, escolas municipal e estadual e uma unidade do campus universitário CPP-CEM-UFPR. Na imagem abaixo é possível observar as delimitações das zonas, bem como o canal de drenagem.

FIGURA 3 - ZONEAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: As autoras (2021)

A cidade de Pontal do Paraná faz parte da Bacia Hidrográfica Litorânea (BHL), em conjunto com outros seis municípios do litoral. As inundações no entorno do canal ocorrem em períodos de chuvas intensas, contudo os dados hidrológicos para monitoramento na região são escassos. Atualmente o município não apresenta estações meteorológicas pluviométricas, a última tendo sido extinta em 2016 no balneário de Ipanema, conforme consta no banco de dados do Instituto Água e Terra

(IAT) do Paraná. Não há no canal postos fluviométricos para medição de vazão e velocidade do escoamento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESTUDOS DE INUNDABILIDADE

A inundação ocorre quando a água seja do rio, mar, lagos e açudes transbordam das suas calhas normais. A modelagem de cheias dos canais surgiu no século XIX, através dos trabalhos de Saint Venant e Boussinesq que estabeleceram equa es de escoamento não permanente e variado. Logo após, Massau realizou os primeiros estudos para resolver estas equa es, contudo, o modelo matemático só passou a ser utilizado por Isaacson, Stoker e Troesch entre 1951 a 1953, sendo implementado nos rios de Mississipi e Ohio. Atualmente, embora simplificados, os modelos unidimensionais ainda são os modelos mais utilizados na engenharia em estudos que não há interesse nas diferenças de velocidade nas se es e nas diferenças transversais de níveis (MIGUEZ; GREGORIO; VERÓL, 2018).

Alguns autores utilizaram modelagem unidimensional para determina es de áreas inundáveis, como o trabalho de Batista (2015), em que foi realizado o estudo de indicadores de risco de inunda o no município do Cabo de Santo Agostinho através de modelos de inunda o. No trabalho, foram simulados eventos extremos através do modelo hidrológico HEC-HMS, onde foram construídos hidrogramas para áreas que não possuíam dados de vazões, e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS foi utilizado para simular picos de vazão em regime permanente.

Nele foram realizadas calibra es e valida es em dois postos fluviométricos, sendo que, em um deles, a simula o demonstrou valores próximos ao observado, já no outro apresentou dados superestimados perto dos valores registrados. A simula o de cheias que compreendeu os anos de 2000 e 2010, foi realizada com a modelagem hidrodinâmica, porém, devido   ausência de séries longas de vazão não foi possível determinar o tempo de retorno, como soluço o autor utilizou dados encontrados em bacias vizinhas.

Para delinear o canal foram realizadas interpola es das batimetrias obtidas pelos postos fluviométricos. Os resultados da simula o não permanente não foram satisfatórios, e isso pode ter ocorrido por alguns fatores, como baixa produtividade, mudança de fluxo subcrítico para supercrítico, entre outros.

Lima e Ribeiro (2011) realizaram modelagem hidrológica e hidráulica para simula o de inunda es em uma bacia hidrográfica na área urbana do município de

Juiz de Fora (MG), em que foram analisados os córregos de Humaitá e Milho Branco. Foram calculadas vazões máximas para diversos tempos de retorno e em várias seções de controle ao longo dos córregos, utilizando uma modificação do método racional. As seções transversais foram geradas através da ferramenta Hec-GeoRas no software ArcGis, tendo sido exportadas posteriormente para o HEC-RAS adicionando parâmetros hidrológicos locais nas seções.

No programa HEC-RAS foi elaborado a simulação do nível dos canais e para isso foi utilizado o regime de fluxo permanente e subcrítico. Com a ferramenta RAS Mapper do HEC-RAS foi possível sobrepor os níveis de água para diversos períodos de retorno sobre o MDT, obtendo assim as manchas de inundação. A partir da construção das áreas inundáveis foi possível determinar os locais urbanos que fornecem risco a segurança dos moradores.

3.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

O ciclo hidrológico compreende a relação entre a precipitação, evaporação e escoamento das águas em uma determinada bacia hidrográfica. Este processo ocorre quando há o aquecimento do ar onde a água que está na superfície tende a evaporar, seja ela proveniente de oceanos, rios e córregos, como também da transpiração das plantas. A água que é evaporada, então, retorna para os cursos de água e para o solo através da precipitação (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A rede de drenagem que recebe a precipitação, é definida por um rio principal e seus afluentes, e faz parte da bacia hidrográfica, cuja definição diverge em diferentes áreas do conhecimento. Para a geografia, a bacia é limitada até a foz do rio principal, no entanto, para a análise de obras hidráulicas é possível restringir a região para a área de interesse de estudo (PINTO et. al, 1976).

As condições de solo, tamanho e declividade das bacias hidrográficas determinam alguns parâmetros importantes para estudos hidráulicos-hidrológicos. Especificamente estudos de inundações envolvem variáveis como o tempo de concentração, permeabilidade do solo (infiltração), precipitação, vazão e escoamento superficial (PINTO et. al, 1976).

O tempo de concentração, bastante importante para determinar a vazão de um rio, é definido como o período em que a água leva para escoar do ponto mais distante até o curso de água principal (GRIBBIN, 2014), este valor depende da área

da bacia, da declividade do terreno, tipo de vegetação, entre outros fatores. (PINTO et. al, 1976). O tempo de retorno, ou seja, o período em que há a possibilidade de uma chuva se repetir (BRASIL, 2005), quando relacionado ao tempo de concentração permite a obtenção da intensidade da precipitação (BOTELHO, 2017).

A relação entre a intensidade, a duração e a frequência de uma precipitação são conhecidas como curva IDF ou equação de chuvas intensas. Essas equações são relevantes para o dimensionamento, gestão e planejamento de recursos hídricos (SILVA, 2015), sendo utilizada como recurso para a determinação de vazão de enchente em locais que não possuem referências. Além disso, a intensidade, a duração e a frequência de uma chuva relacionam-se com a probabilidade de inundação. Em eventos extremos, com precipitações intensas, grande quantidade de água é direcionada para os rios e nem sempre a capacidade de drenagem é o suficiente, ocasionando extravasamentos (TUCCI, 2007).

A determinação de áreas inundáveis ameniza transtornos e prejuízos, pois, por meio dela é possível destacar locais carentes de infraestrutura e destinar a melhoria necessária. Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos são utilizados para representação destes fenômenos de cheias. Os modelos hidrológicos simulam as etapas do ciclo hidrológico, por meio de dados locais; em modelos chuva-vazão, por exemplo, a vazão é calculada através de dados de precipitação (MIGUEZ; GREGORIO; VERÓL, 2018).

Ao elaborar projetos de engenharia, em geral, são consideradas as chuvas intensas, pois são condições críticas de precipitação que provocam transtornos, como as inundações.

3.2.1 Precipitação e chuvas intensas

O crescimento desenfreado atrelado a escassez do estudo de uso e ocupação das cidades culmina em moradias em locais inapropriados, situação característica das populações ribeirinhas, por exemplo. Os problemas de inundação são frequentes quando há um grande índice de precipitação, como as chuvas intensas.

As chuvas intensas ocasionam um grande impacto social e humano na sociedade, por isso seu estudo é fundamental (CARMO; MENEZES; VASCONCELLOS, 2019). Uma chuva pode ser caracterizada pela sua altura pluviométrica, pela sua intensidade, duração e tempo de retorno, ou seja, a

probabilidade que um evento de chuva tem de ser igualado em determinado período de tempo. A relação entre estes componentes é denominada de curva IDF (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A curva IDF surge da observação de um período de tempo de chuva intensa, esse intervalo deve ser necessário para representar os extremos locais (FESTI, 2007). O procedimento é realizado para diferentes durações de precipitação, em que o resultado pode ser expresso por uma equação ou gráfico. A equação utilizada para curvas IDF contém variáveis como: t_c – tempo de concentração, t_r – tempo de retorno e parâmetros locais – K, a, c, b.

$$I = \frac{K \cdot t_r^a}{(t_c + b)^c} \quad (1)$$

Os parâmetros locais podem ser obtidos através do software públicos ou privados. Destaca-se aqui o software Plúvio 2.1 (UFV, 2006), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa. A equação IDF para Pontal do Paraná, com os parâmetros encontrados no programa, pode ser encontrada conforme abaixo.

$$I = \frac{2135,966 \times t_r^{0,156}}{(t_c + 23,823)^{0,887}} \quad (2)$$

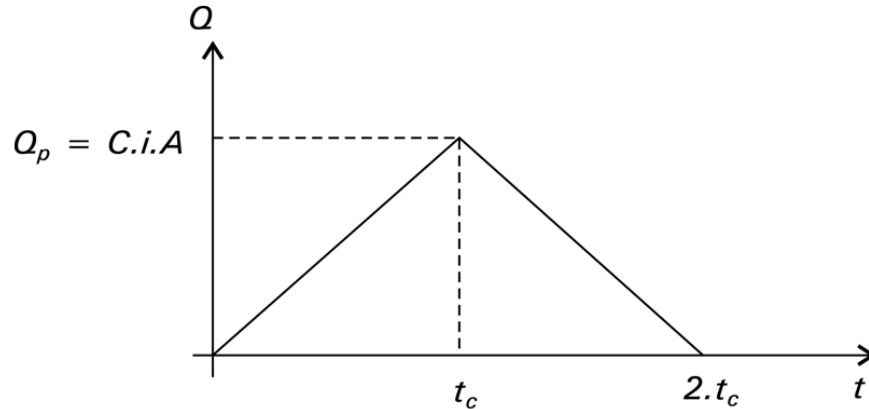
Para antever os problemas ocasionados pela chuva pode-se elaborar mapas de inundação através de modelagem matemática. Este tipo de procedimento é amplamente aplicado. Os modelos matemáticos simulam o escoamento com formulações e soluções matemáticas através de princípios hidráulicos conhecidos. Esta técnica teve origem no século 19, com Saint Venant e Boussinesq, que formularam equações para escoamentos não permanentes. (CUNGE; HOLLY JR; VERWEY, 1980).

3.2.2 Modelos chuva-vazão

Os modelos de chuva-vazão são um tipo de modelo hidrológico que transformam dados de precipitação em vazão através de formulações matemáticas. A utilização destes modelos se faz essencial quando não estão disponíveis dados precisos do local.

Algumas técnicas são utilizadas na modelagem chuva-vazão, como o método racional e métodos baseados no hidrograma unitário. O método racional é indicado para bacias hidrográficas pequenas, para cálculos de redes de drenagem e de pequenos canais. É um método hidrológico simples que relaciona a intensidade da chuva com a área da bacia de contribuição e com o coeficiente de escoamento superficial - que possui valor tabelado de acordo com o uso do solo. O hidrograma gerado no método racional é linear, com a vazão de pico coincidindo com o tempo de concentração, conforme figura abaixo. (MIGUEZ; GREGORIO; VERÓL, 2018).

FIGURA 4 - HIDROGRAMA MÉTODO RACIONAL



FONTE: Miguez, Gregorio e Veról (2018)

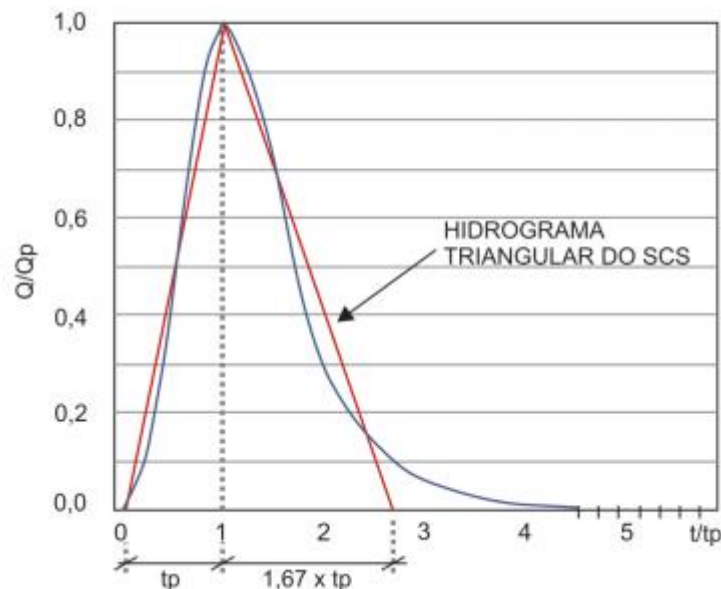
São diversos métodos de elaboração de hidrogramas unitários, como o de Bernard, McCarthy, Snyder, Clark, Taylor e Schwarx, Commons, U.S Soil Conservation Service (SCS), Mitchell, dentre outros. (PINTO *et. al*, 1976). A utilização de hidrogramas elaborados pelo SCS é indicada devido a simplicidade de elaboração em relação aos demais (BRASIL, 2005). Existem dois hidrogramas elaborados pelo SCS, o hidrograma unitário sintético triangular e o hidrograma unitário sintético adimensional.

A vazão de pico no hidrograma unitário sintético triangular do SCS é calculada através da área e do tempo de subida de pico, que por sua vez relaciona-se com o tempo de concentração e de duração da chuva (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

O hidrograma unitário sintético adimensional do SCS relaciona a precipitação com o escoamento superficial e a capacidade de infiltração máxima do solo com o valor de CN. O Número de Curva (CN) corresponde a características físicas do solo, como a permeabilidade, a cobertura vegetal, a textura do solo e a umidade (BRASIL, 2005).

O hidrograma unitário sintético triangular é bastante utilizado, pois a sua resolução é simples, enquanto que o hidrograma unitário sintético tem o formato suave apresentando a resposta como uma curva, sendo assim mais realista que o triangular (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Na figura abaixo é possível observar suas configurações.

FIGURA 5 - HIDROGRAMAS SINTÉTICOS DO SCS



FONTE: São Paulo (2012)

Além dos métodos apresentados utilizados para gerar modelos de chuva-vazão, existem também modelos hidrológicos que utilizam métodos que simulam as etapas do ciclo hidrológico terrestre, como a infiltração, evapotranspiração, escoamento, etc. No Brasil, os modelos do IPH (Instituto de Pesquisas Hidráulicas da

UFRGS) e o modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) são os mais utilizados (SILVA, 2015).

Para um estudo mais detalhado acerca das equações e procedimentos sugere-se o trabalho realizado por Brasil (2005) que apresenta em formato de Manual Técnico os métodos e considerações a serem efetuados.

3.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA

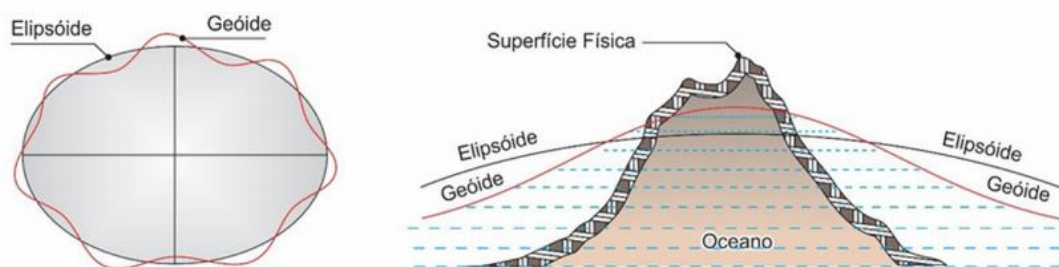
A caracterização topográfica depende de levantamentos topográficos e geodésicos. Estes levantamentos dependem da correta definição de sistemas de referência, *Datum*, utilizado e conceito de altitudes. Assim, serão apresentados os principais conceitos que envolvem levantamento geodésico, uma vez que foram realizados levantamentos geodésicos na área de estudo.

3.3.1 DATUM

No contexto da geodésia, a palavra em latim *Datum*, no plural *Data*, representa um conjunto de parâmetros que constituem a referência de um sistema de coordenadas geodésicas e aceleração da gravidade.

Segundo Silva e Segantine (2015), após adotar um *Datum* geodésico o segundo passo é prover uma rede de pontos referenciados a esse *Datum*, e à essa rede de pontos é dado o nome de Sistema Geodésico de Referência (SGR). O SGR é estabelecido a partir da definição das superfícies de referência, ou seja, das formas da Terra. As principais superfícies de referência são: a superfície física, a superfície geoidal e a superfície elipsoidal, conforme demonstra a FIGURA 6

FIGURA 6 - MODELOS DE SUPERFÍCIE



FONTE: Dompieri *et. al* (2015)

A superfície física é irregular e constantemente alterada por processos naturais como movimentos tectônicos, condições climáticas, entre outros. Nesta superfície são realizados todos os levantamentos geodésicos e topográficos, ou seja, é a superfície que deve ser caracterizada topograficamente.

Já a superfície elipsoidal (elipsoide de revolução que melhor adapta ao modelo da Terra real) é o modelo matemático da Terra. Esta superfície é referência para a altitude geométrica.

A superfície geoidal é a equipotencial que coincide com o nível médio dos mares não perturbados prolongado através dos continentes. Esta superfície é a referência para a altitude ortométrica. Além das superfícies física, geoidal e elipsoidal existe a superfície que é delimitada pelo quase geoide, referência para a altitude normal (FIGURA 7).

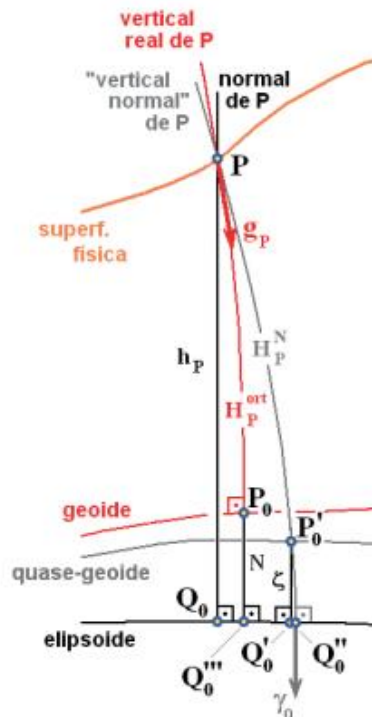
O *Datum* altimétrico brasileiro se encontra em Imbituba (SC) e os levantamentos GNSS estão referenciados ao SIRGAS2000.

O Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) possui um conjunto de informação planimétricas, altimétricas e gravimétricas que auxiliam as atividades de posicionamento em todo o território brasileiro (IBGE, 2021). Atualmente o Brasil conta com a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), a Rede Gravimétrica, a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPPG), a Rede Planialtimétrica, além da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), cujos dados das estações de Curitiba (PR) e Cananéia (SP) foram utilizados neste trabalho. Os dados do SGB são fornecidos gratuitamente pelo IBGE.

3.3.2 Altitude geométrica, ortométrica e normal

No contexto da tecnologia GNSS podemos relacionar a altitude geométrica com a altitude ortométrica e normal, conforme ilustra a FIGURA 7.

FIGURA 7 - ALTITUDES



FONTE: IBGE (2019)

A altitude ortométrica (H) de um ponto é a distância entre a superfície física até a superfície geoidal, passando pela reta vertical. A altitude geométrica (h) é a distância da superfície elipsoidal até a superfície terrestre, passando pela reta normal. A separação entre o geóide e o elipsoide é a ondulação geoidal (N).

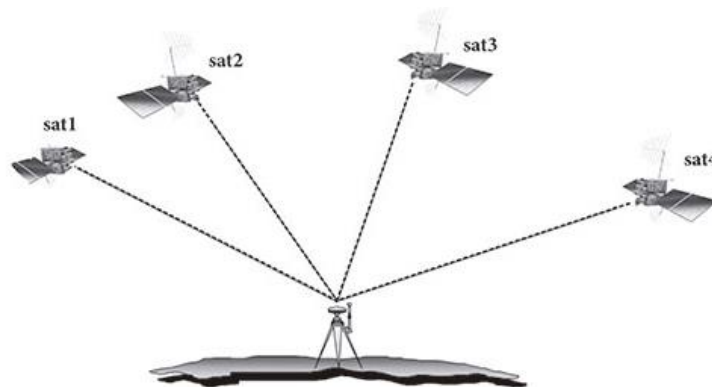
As altitudes ortométricas foram utilizadas como oficial no Brasil até meados de 2018, a partir de então são adotadas as altitudes normais. A altitude normal é calculada ao longo da linha vertical normal, ou seja, a linha ortogonal às superfícies equipotenciais do campo normal. Como a mesma não considera o campo real, ela se refere a uma superfície nomeada quase-geóide (IBGE, 2019). É possível relacionar a altitude normal com a altitude geométrica a partir da anomalia de altitude, vide FIGURA 7.

As coordenadas planimétricas neste trabalho estão em UTM (referenciadas ao SIRGAS2000) e as altitudes que deram origem ao MDT são as altitudes geométricas. A utilização das altitudes geométricas é justificada pela pequena variação do geóide e da anomalia de altitude na região. O cálculo das ondulações geoidais utilizando o MAPGEO2015 (IBGE, 2021) nos pontos de controle mostraram uma variação máxima de 3,0 cm, entre -0,32m a 0,35m.

3.3.3 Levantamento GNSS

A utilização de satélites para o posicionamento tridimensional surgiu em meados da década de 70 com o NAVSTAR-GPS nos Estados Unidos, simultaneamente ao GLONASS da antiga União Soviética, e em 1990 surgia também o GALILEO, um projeto da Agência Espacial Europeia. A sigla GNSS é designada para a utilização de qualquer levantamento posicional por satélite, seja ele GPS ou GLONASS, por exemplo. Os satélites do sistema GPS são distribuídos de maneira que haja no mínimo 4 satélites a disposição do usuário, com um sistema de referência estabelecido e tendo conhecimento da posição dos satélites e de suas distâncias, é possível determinar então as coordenadas da antena (MONICO, 2008).

FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS



FONTE: Silva e Sagantine (2015)

3.3.4 Modelos Digitais de Terreno (MDT)

Modelos Digitais de Terreno são fundamentais em diversos projetos de engenharia (projeto de barragens, obras de drenagem e esgoto, estradas e outros). Também são fundamentais em estudos relacionados a desastres naturais (alagamentos, inundações, enchentes, erosão de encostas, etc.).

A obtenção do MDT depende de levantamentos de campo, cuja escolha do método (levantamentos GNSS, nivelamento trigonométricos ou geométricos, aerofotogrametria ou ainda dados de satélites) depende da área de estudo, orçamento e aplicação. Após o levantamento de campo e processamento dos dados é gerado uma nuvem de pontos cotados (X, Y, Z) que devem ser interpolados considerando a distribuição de pontos e resolução necessária.

A interpolação estima os valores que não foram cotados em campo. Alguns exemplos de interpoladores são: Vizinho Natural, IDW (*Inverse Distance Weighting* – Ponderação pelo Inverso da Distância), TIN (*Triangular Irregular Network* – Rede Triangular Irregular) e Krigagem, neste trabalho o enfoque será no IDW, em que nesta interpolação as cotas dos pontos desconhecidos são encontradas através da média ponderada das cotas dos pontos conhecidos mais próximos (LONGLEY *et. al*, 2013).

3.3.5 Padrão de Exatidão Cartográfica

A garantia de qualidade do MDT se dá através da aplicação do decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 que estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), atualmente modernizado para Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), o qual separa os dados geoespaciais conforme a qualidade dos mesmos.

De acordo com o decreto, 90% dos pontos interpolados devem possuir valores iguais ou inferiores aos estabelecidos pelo PEC, como também valores iguais e inferiores à raiz média quadrática (RMS, do inglês *Root Mean Square*) comparados ao Erro Padrão (EP), levando em consideração a escala ou a equidistância entre as curvas de nível adotada. Com isso é possível classificar em classes A, B, C e D, conforme TABELA 1 abaixo.

TABELA 1 - PARÂMETROS PEC-PCD

CLASSE		PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
PEC	PEC-PCD	PEC (mm)	EP (mm)	PEC	EP
-	A	0,28 x esc	0,17 x esc	0,27 x eq	0,17 x eq
A	B	0,5 x esc	0,3 x esc	0,5 x eq	1/3 x eq
B	C	0,8 x esc	0,5 x esc	3/5 x eq	2/5 x eq
C	D	1 x esc	0,6 x esc	3/4 x eq	1/2 x eq

FONTE: Diretoria de Serviço Geográfico (2016)

3.4 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

3.4.1 Hidráulica Fluvial

O conhecimento de rios e canais desde sempre foi algo de grande interesse e necessidade para as populações. A exploração dos cursos d'água varia desde a utilização para irrigação e navegação (como ocorria no rio Nilo, em que o povoado aproveitava das cheias do rio para irrigar as plantações) até o momento atual, em que é possível aproveitar os cursos de água para geração de energia, como nas hidrelétricas.

Os rios e canais são conhecidos na Hidráulica Fluvial como cursos de água que transportam escoamento com superfície livre, com seu fluxo ocorrendo pela ação pela gravidade (SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2007). Chanson (2004b) define os parâmetros principais de um estudo hidráulico de canal, os quais são: a sua geometria, as propriedades do escoamento e da água.

Um canal aberto, ou um escoamento de superfície livre, pode ser natural ou construído pelo homem. Na natureza, evidentemente, os canais são irregulares e não possuem um tamanho determinado, podem ser classificados desde riachos até estuários, geralmente com a seção transversal variando aproximadamente entre trapezoidal ou parabólica. Os canais artificiais podem ser os canais de navegação, de irrigação, de geração de energia, etc., são elaborados geometricamente e podem possuir diferentes formatos como: trapezoidal (usualmente utilizado pois possuem maior estabilidade), triangular, retangular, circular e parabólico (CHOW, 1959).

As propriedades do escoamento de um canal podem ser classificadas em regime permanente ou não permanente (transiente), uniforme ou variado e laminar ou turbulento. O regime permanente indica que não há variação no escoamento com o tempo, enquanto que no regime não permanente ocorre ao contrário. Um escoamento é dito uniforme quando a velocidade permanece constante em todas as seções transversais ao longo do canal. Por fim, um escoamento laminar é quando a água se move em camadas lisas, suavemente, sendo um escoamento unidimensional, enquanto que no escoamento turbulento o movimento é desordenado e nas três dimensões, podendo, no entanto, apresentar uma direção principal. (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2014).

Outro parâmetro de interesse para estudo hidráulico, principalmente no que diz respeito aos canais abertos, é o número adimensional de Froude. Fox, McDonald e Pritchard (2014) o descrevem como uma razão entre as forças de inércia e de gravidade e, através dele é possível determinar se o escoamento é crítico ($Fr = 1$), subcrítico ($Fr < 1$) ou supercrítico ($Fr > 1$). O escoamento subcrítico trata-se de um escoamento de águas calmas, em que o escoamento consegue se ajustar a uma perturbação. Já o escoamento supercrítico são águas rápidas, desordenadas, que podem responder violentamente a uma perturbação.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (4)$$

Onde:

Fr – Número de Froude [adimensional];

Re – Número de Reynolds [adimensional];

V – Velocidade média [m/s];

g – Gravidade [m/s²];

L – Comprimento característico [m];

ν – Viscosidade cinemática [m²/s].

3.4.2 Modelos numéricos hidrodinâmicos unidimensionais

É possível gerar modelos unidimensionais, bidimensionais e até tridimensionais, em que a principal diferença entre eles são quantas dimensões serão consideradas no deslocamento da água. Para um estudo mais abrangente envolvendo as diferenças, vantagens e limitações para cada modelo dimensional sugere-se o trabalho de análise realizado por Teng *et. al* (2017). Neste trabalho o enfoque se dará na modelagem unidimensional, especificamente o modelo hidráulico HEC-RAS (USACE, 2019).

3.4.3 Modelo hidrodinâmico HEC-RAS

O modelo HEC-RAS, desenvolvido pela subdivisão do Centro de Engenharia Hidrológica – *Hydologic Engineering Center* (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano – *U.S Army Corps of Engineers* (USACE), foi lançado inicialmente como HEC-2 para o cálculo de escoamento em regime permanente com fluxo gradualmente variado. Entre os anos 70 e 90 foi extremamente utilizado em comparação a outros programas de modelagem hidráulica, contudo, com a chegada dos anos 90 o software tornou-se desatualizado, ainda com características desenvolvidas para computadores dos anos 70. Então, em 1995 foi lançada a primeira versão que incluía no nome a sigla *River Analysis System* (RAS), tornando-se assim HEC-RAS. Em 2001 foi atualizado para também modelar escoamentos em regime não permanente (SYSTEMS *et. al*, 2007).

O software é disponibilizado gratuitamente através do site do Exército Norte-Americano, com versões atualizadas periodicamente. Atualmente, o programa possibilita a modelagem unidimensional para escoamentos permanentes, modelagem uni e bidimensional para escoamentos não permanentes, modelagem de transporte de sedimentos e de temperatura e qualidade da água (BRUNNER, 2020). Neste trabalho será utilizada a modelagem unidimensional para escoamento permanente.

Os modelos unidimensionais utilizam da equação de Saint Venant, em que são impostas algumas hipóteses, como: escoamento unidimensional e velocidade uniforme em cada seção, a distribuição de pressão é hidrostática, a inclinação do canal é pequena, com densidade da água constante, o transporte de sedimentos é desprezado, com resistência de escoamento e perdas por turbulência sendo tratadas com equações utilizadas para escoamento em regime permanente, como a equação de Chézy ou Manning.(CHANSON, 2004a; CUNGE; HOLLY JR; VERWEY, 1980).

O escoamento unidimensional pode ser determinado por duas variáveis: pela velocidade/vazão e profundidade da água. Assim, é possível utilizar duas equações que definem as propriedades de escoamento não permanente: a de conservação da massa e a de conservação da quantidade de movimento (CHANSON, 2004a).

A equação de conservação da massa estabelece que a variação com o tempo de uma quantidade de massa de água em um determinado trecho do canal é igual a diferença da massa de água que entra para a massa de água que sai do mesmo trecho

(SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2007). A equação com suas simplificações e considerações já aplicadas encontra-se abaixo:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (5)$$

Em que q_L consiste na vazão lateral por unidade de comprimento, representando a contribuição lateral proveniente da chuva que escoar na bacia hidrográfica.

A equação de conservação da quantidade de movimento é baseada na Segunda Lei de Newton, conforme Silva, Mascarenhas e Miguez (2007) descreve que a variação da quantidade de movimento por unidade de tempo de um elemento é igual ao somatório de todas as forças externas que atuam sobre ele, sendo elas as forças gravitacionais, de pressão e atrito.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_o - S_f) \quad (6)$$

Em que S_o e S_f significam declividade do leito e declividade da linha de energia, respectivamente. Estas duas equações apresentadas são comumente chamadas de equações de Saint-Venant (SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2007).

Além disso, outra equação relevante para o estudo de canais é a equação de Manning (utilizada em canais abertos ou em tubulações parcialmente cheias), que relaciona a vazão (Q) com a área molhada (A), raio hidráulico (R_H), declividade do leito (S_f) e coeficiente de Manning (n), conforme observado abaixo.

$$Q = \frac{AR_H^{2/3} \sqrt{S_f}}{n} \quad (7)$$

O coeficiente de rugosidade de Manning (n), comumente conhecido como número de Manning, é um parâmetro importante para o estudo de canais, corresponde a resistência que o canal oferece ao escoamento levando em consideração seu revestimento. O coeficiente de Manning pode ser encontrado experimentalmente ou

através de tabelas com valores padrões para canais com características específicas. O canal do DNOS, objeto de estudo deste trabalho, por exemplo, é um canal de terra escavado, lento, com vegetação e grama presente. Para este trabalho, adotou-se $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, usando o trabalho de Chow (1959) como referência. As ruas no entorno do canal são, em sua maioria, de blocos de concreto, com estado regular de conservação, podendo ser considerado então o valor de Manning de concreto rugoso, de $0,020 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$.

4 MÉTODOS E FERRAMENTAS

4.1 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

O primeiro levantamento para o estudo da região foi realizado com o GNSS, com a técnica do método relativo cinemático (MONICO, 2008). Para este método foi necessário o uso de dois receptores L1/L2 (Base e Rover), onde a base foi instalada nas dependências da Universidade Federal do Paraná no campus de Mirassol, enquanto que o segundo receptor foi instalado sobre a carroceria da caminhonete da Universidade que se manteve em movimento para a coleta dos pontos de interesse. A FIGURA 9 abaixo demonstra a instalação do equipamento.

FIGURA 9 - POSICIONAMENTO DO EQUIPAMENTO



FONTE: As autoras (2021)

O caminho percorrido com o carro para a realização do levantamento está ilustrado na imagem a seguir.

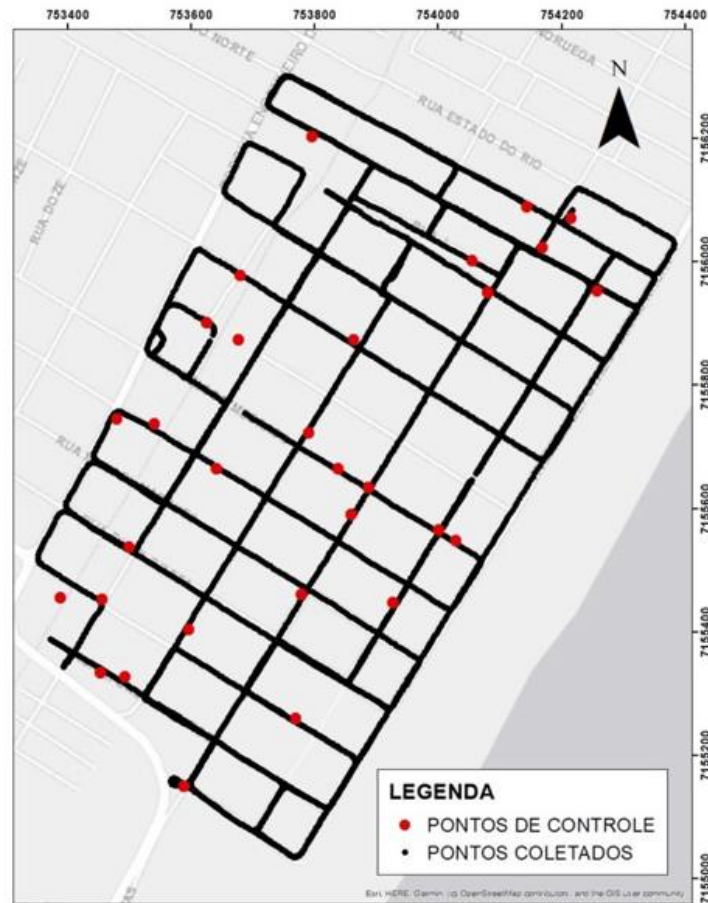
FIGURA 10 - TRAJETÓRIA DO LEVANTAMENTO



FONTE: As autoras (2021)

Os pontos de controle, utilizados para análise da acurácia do interpolador, foram coletados conforme a técnica do levantamento relativo estático, cujas posições estão indicadas na FIGURA 11. Além dos pontos de controle, foram coletados através do mesmo método os pontos das margens e do meio do canal para a obtenção da cota de água.

FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE



FONTE: As autoras (2021)

Para a construção dos mapas de inundação foram necessários o conhecimento da profundidade do canal do DNOS e para isso utilizou-se uma corda graduada com intervalo de 25 cm, com tamanho total de 1,50 m. Nessa corda foi atribuído um peso na extremidade que ficaria em contato com o fundo do canal e com a corda esticada na vertical foi possível verificar a profundidade do mesmo.

As ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho foram: 1) ArcGis (ESRI, 2017) usado na interpolação de dados (licença cedida ao Laboratório de Topografia e Geodésia do CPP-CEM-UFPR pelo Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais - UFPR); 2) Leica Geo Office (LEICA GEOSYSTEMS, 2014), utilizado no pós processamento de dados GNSS (licença pertencente ao Laboratório de Topografia e Geodésia do CPP-CEM-UFPR); 3) GeoPec (SANTOS, 2019), aplicado para a avaliação do MDT de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), disponível gratuitamente; 4) HEC-RAS (USACE, 2019), software gratuito empregado para modelagem hidrodinâmica, onde foram determinadas cotas de

inundação por meio de modelagem unidimensional, através de dados topográficos e hidrológicos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E HIDRÁULICA

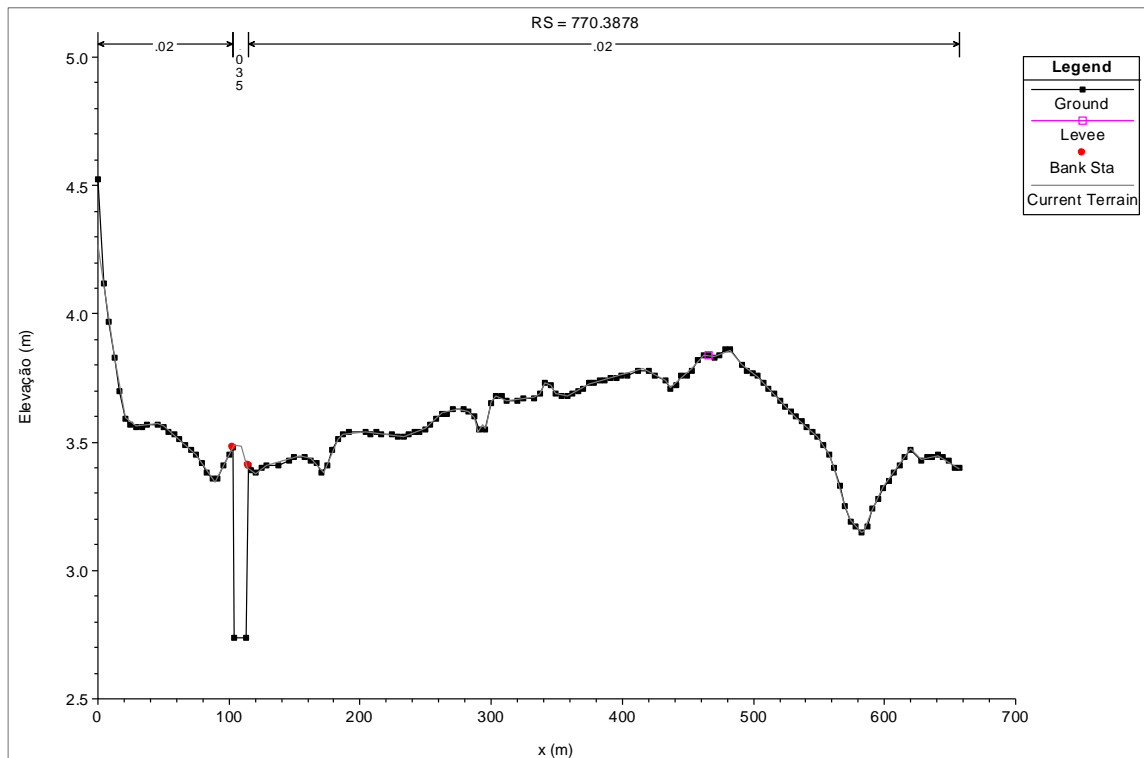
Para a determinação hidráulica da área de estudo foi necessário a utilização da extensão Hec-GeoRas (USACE, 2012) no software ArcGis (ESRI, 2017) para a delimitação do canal, das seções transversais, da margem (*bank stations*) e também direção do escoamento (*flowpaths*).



FONTE: As autoras (2021)

As seções transversais foram estabelecidas entre as quadras e imediatamente à montante e à jusante das pontes, onde são identificados os pontos de inundação que ocorrem na região, totalizando 69 seções transversais. Para a direção do escoamento foi seguido o projeto básico de micro e macrodrenagem do município de Pontal do Paraná (SIMEPAR, 2007), onde indica que a região que

FIGURA 14 - EXEMPLO SEÇÃO TRANSVERSAL LIVRE



FONTE: As autoras (2021)

Devido ao fato do modelo ser unidimensional, foi adicionada uma seção imediatamente após a outra nos pontos à montante e à jusante de cada ponte. Para representar os locais por onde o escoamento não poderia acontecer, como as casas demonstradas na FIGURA 13. Assim, foram adicionados pontos de bloqueio (*obstructions*) nas seções de lote, na qual permitem que o usuário decida quais pontos estarão obstruídos permanentemente (BRUNNER, 2020).

Além disso, foram adicionados *leaves*, que informam onde está e onde ocorre o escoamento de água, não permitindo que haja um escoamento crescente em um ponto mais baixo que tenha altitudes próximas a profundidade do canal. Os *leaves* podem ser ultrapassados caso a superfície de água no canal exceda o ponto nos quais estão inseridos, assegurando uma observação realista da inundação.

As informações hidrológicas necessárias para implementação do modelo hidráulico foram obtidas por meio do Projeto Básico Integrado de Microdrenagem, Macrodrenagem e Controle de Erosão Marinha do município de Pontal do Paraná, elaborado pelo SIMEPAR (2007). Considerando toda a área de drenagem da bacia do Canal do DNOS, o hidrograma relativo apresenta um tempo de recorrência de 3 anos, tendo uma vazão de pico de 37,03 m³/s.

Ponderando que a área de estudo está dentro da área de contribuição total do Canal do DNOS, foi calculado uma vazão de pico para área de estudo de 3,22 m³/s, sendo obtida pela relação direta das áreas de contribuição.

Com o intuito de verificação da evolução da mancha de inundação, foram inseridas outras vazões além da vazão de pico calculada. As vazões utilizadas foram: 0,5 m³/s, 1,5 m³/s, 2,5 m³/s, 3,22 m³/s, 4,0 m³/s, 5,0 m³/s e 6 m³/s.

5 RESULTADOS

5.1 MDT

O MDT é o resultado da interpolação dos dados coletados em campo, neste trabalho, foram levantados 9192 pontos. As coordenadas planialtimétricas utilizadas foram com altitudes geométricas e determinadas em projeção UTM. A interpolação IDW, utilizada para realizar o MDT, tiveram suas propriedades definidas como padrão conforme cálculo estabelecido pelo próprio software ARCGIS (ESRI, 2017).

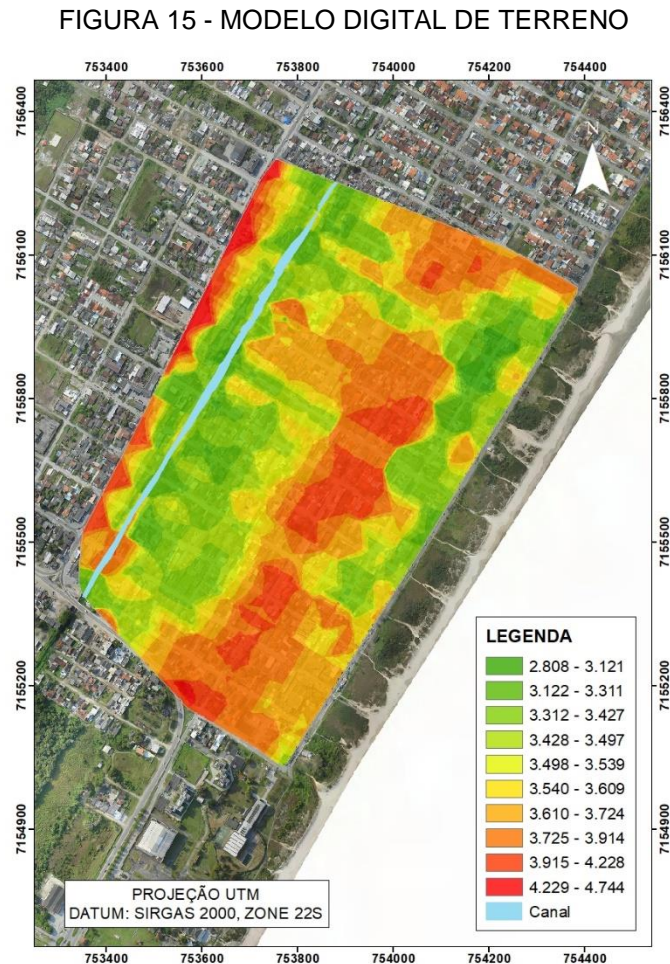
A análise do geoPEC (SANTOS, 2019) para a acurácia do interpolador foi utilizada na geração do modelo conforme definido anteriormente, onde o interpolador IDW se mostrou satisfatório de acordo com o PEC. É possível observar os resultados obtidos pelo programa na tabela abaixo. O relatório final completo encontra-se no ANEXO 2 – RELATÓRIO PEC-PCD deste trabalho.

TABELA 2 - INFORMAÇÕES GERAIS - GEOPEC

Teste de Normalidade Shapiro-Wilk:	
Wcalc (h) = 0,9955	p-value (h) = 1
Nível de confiança: 95%	
Amostra Normal	
Teste de precisão	
Decreto: 89.817	
PEC = 0,27	EP= 0,1667
Resultado: Classe A	
Teste de Tendência	
Teste t de <i>Student</i>	
tcalc(h) = -1,131	ttab=1,6991
Resultado: Não tendencioso	
Estatísticas Descritivas	
Média (h) = -0,021	
RMS (h) = 0,1022	
Desvio-padrão (h) = 0,1017	

FONTE: As autoras (2021)

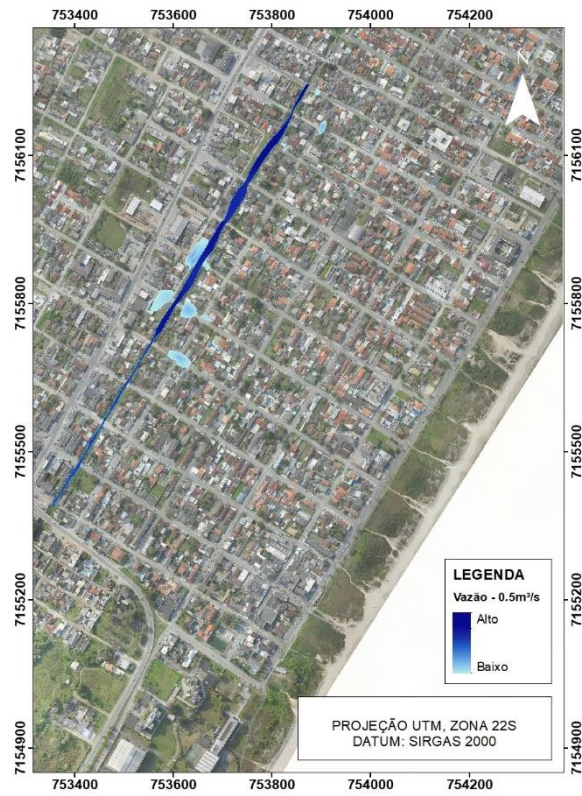
Na FIGURA 15, que ilustra o MDT da área de estudo, é possível observar que as regiões mais baixas estão concentradas ao redor do canal, evidenciando o fato de que as inundações ocorrem nestas regiões.



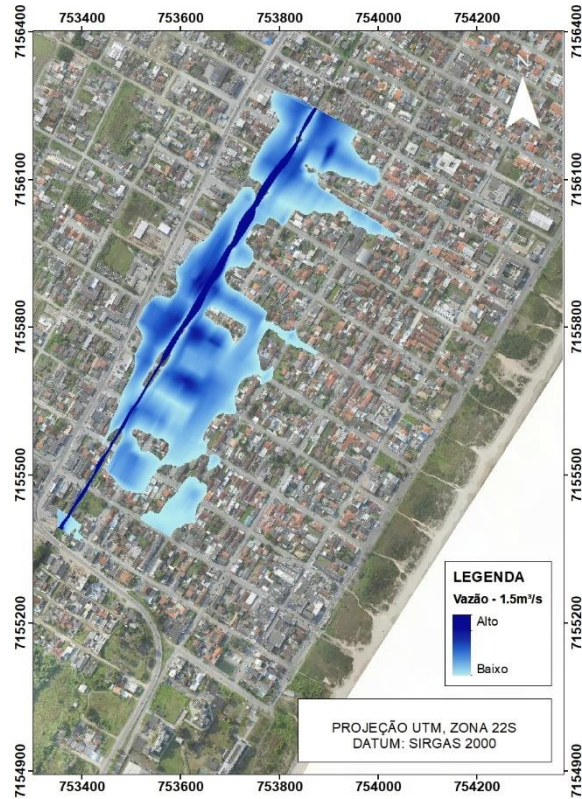
FONTE: As autoras (2021)

5.2 MANCHA DE INUNDAÇÃO

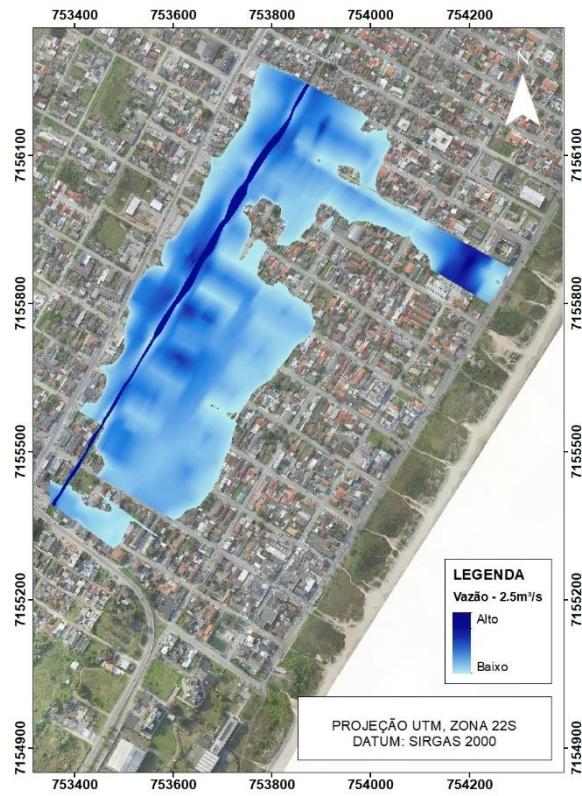
As manchas de inundação para a região de estudo foram elaboradas para diferentes cenários, com diferentes vazões, sendo de 0,5 m³/s, 1,5 m³/s, 2,5 m³/s, 3,22 m³/s, 4,0 m³/s, 5 m³/s e 6 m³/s. A seguir são apresentadas as imagens para cada situação.

FIGURA 16 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 0,5 M³/S

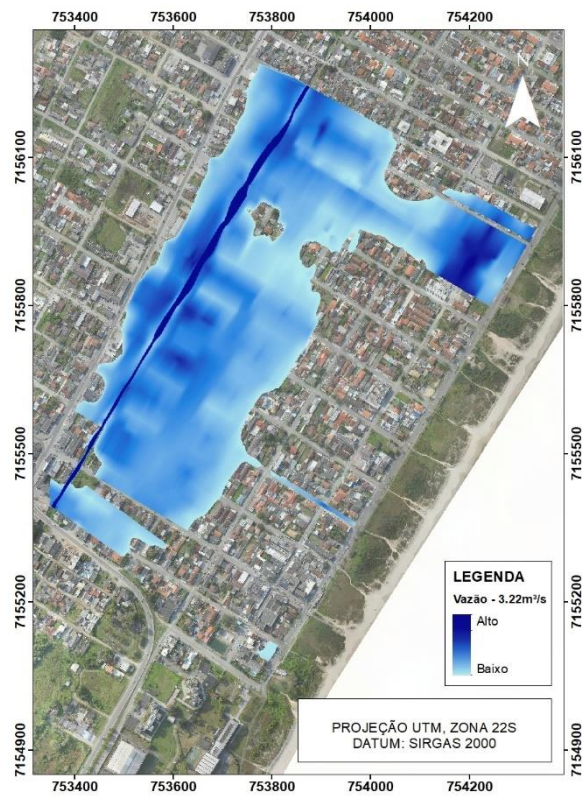
FONTE: As autoras (2021)

FIGURA 17 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 1,5 M³/S

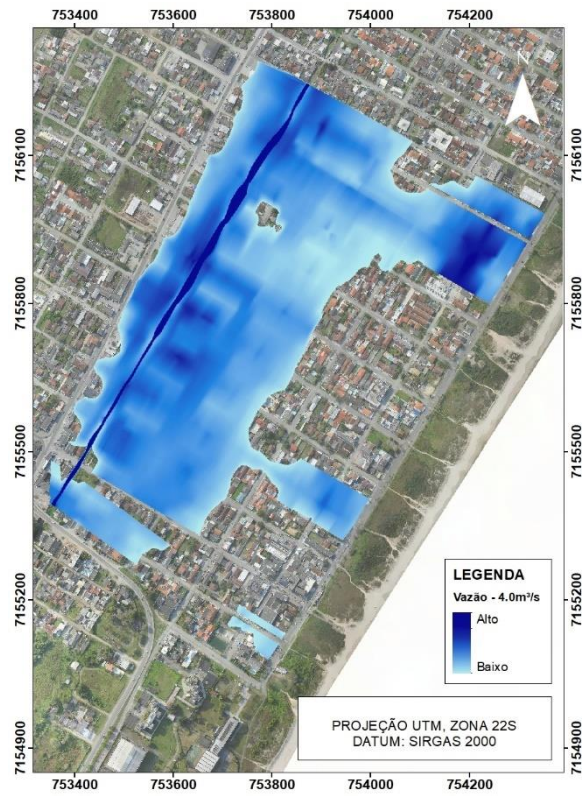
FONTE: As autoras (2021)

FIGURA 18 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 2,5 M³/S

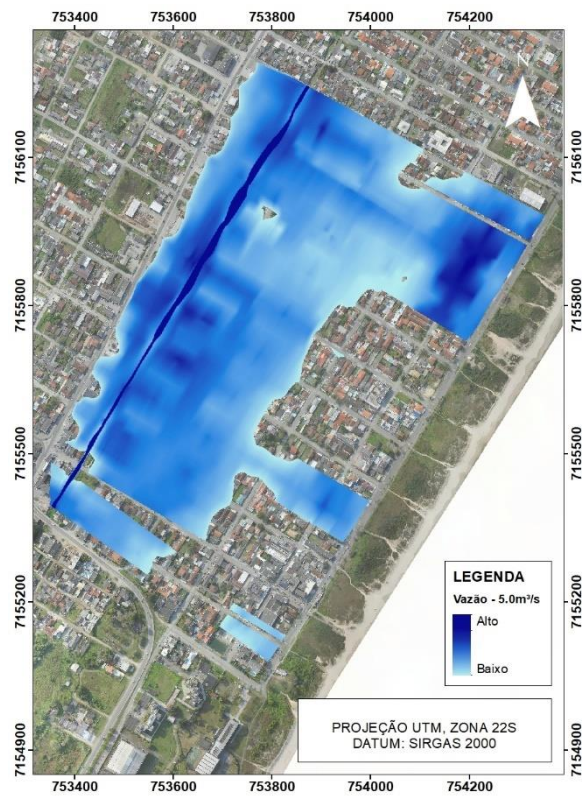
FONTE: As autoras (2021)

FIGURA 19 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 3,22 M³/S

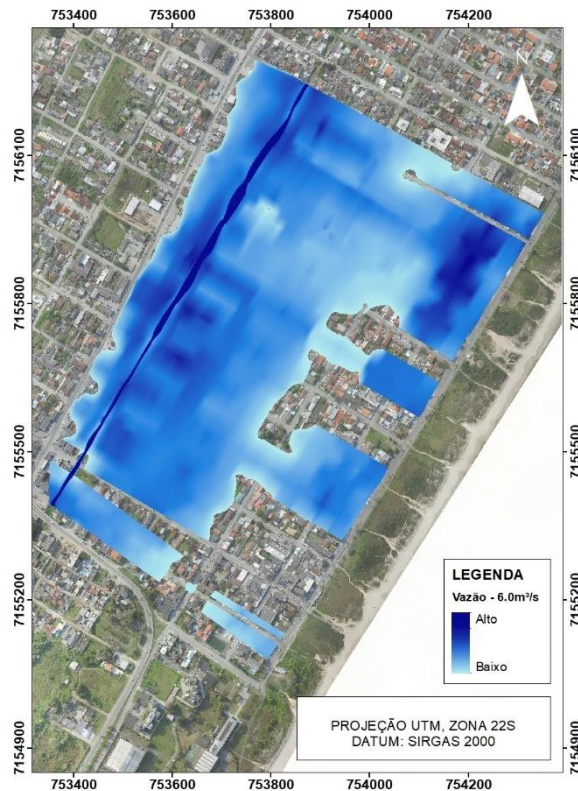
FONTE: As autoras (2021)

FIGURA 20 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 4,0 M³/S

FONTE: As autoras (2021)

FIGURA 21 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 5,0 M³/S

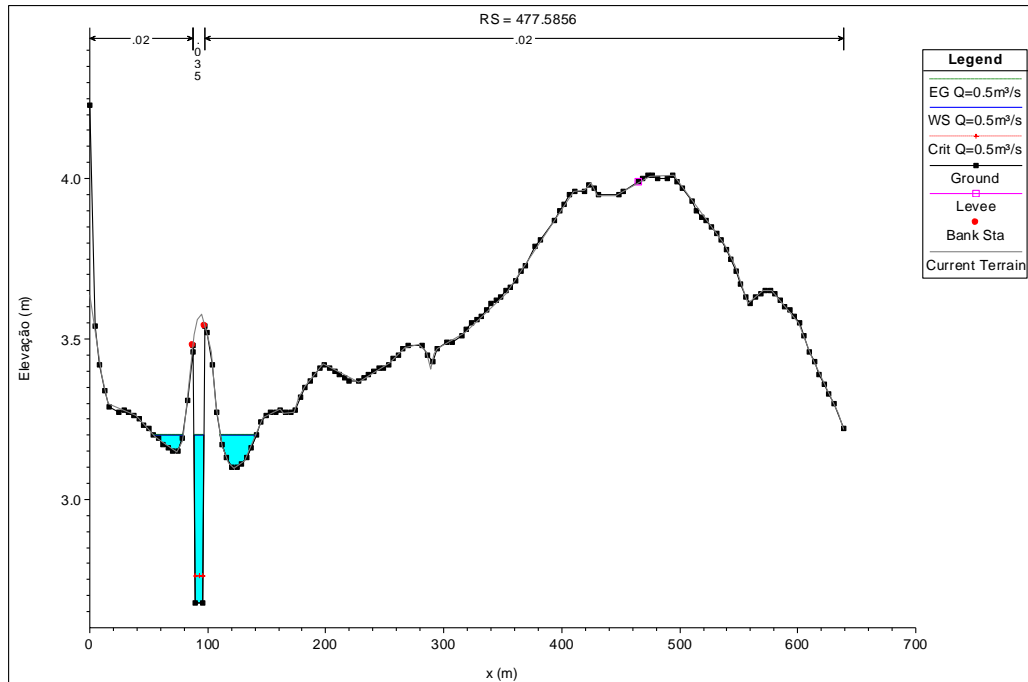
FONTE: As autoras (2021)

FIGURA 22 - MANCHA DE INUNDAÇÃO 6,0 M³/S

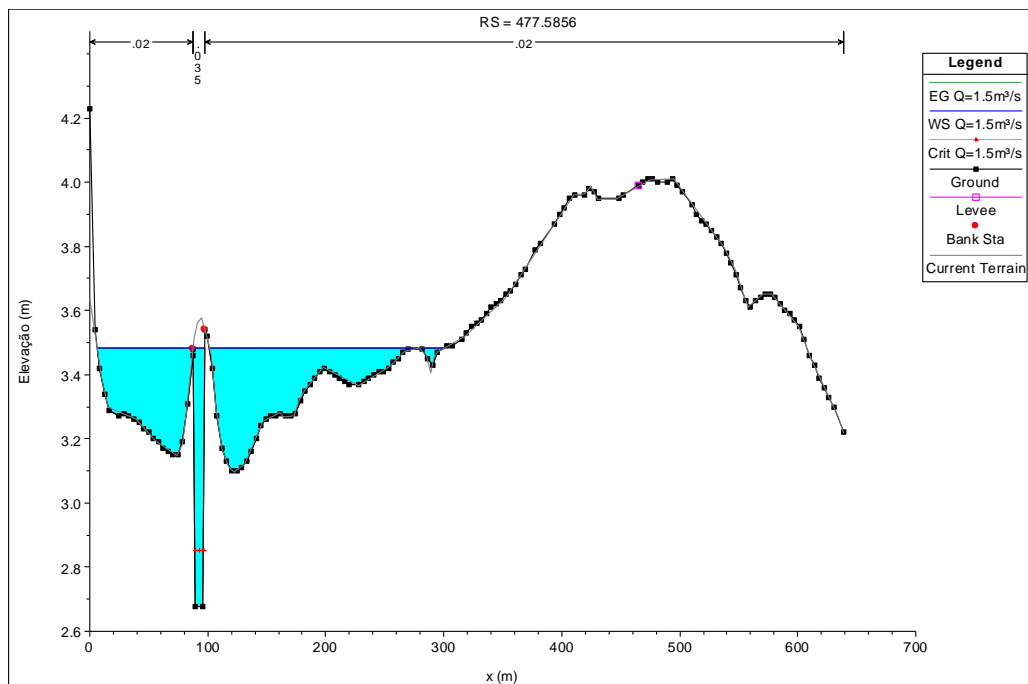
FONTE: As autoras (2021)

Os efeitos de vazão que a chuva provoca são representados por estes mapas. Observa-se que uma chuva que gera uma vazão de 6 m³/s chega a inundar quase por completo toda a área de estudo, inclusive ultrapassa os pontos de maiores altitudes. Este fato estaria ligado a um evento extremo, visto que durante os casos frequentes de inundação estas áreas não chegam a ser atingidas.

As vazões de 0,5 m³/s e 1,5 m³/s representam adequadamente as áreas de inundação na região, onde é possível comparar com as imagens apresentadas durante este trabalho. As figuras abaixo demonstram como ocorre o desenvolvimento da inundação para estas vazões na rua Nelsom Medrado.

Figura 23 - SEÇÃO RUA NELSON MEDRADO $Q = 0,5 \text{ M}^3/\text{S}$ 

FONTE: As autoras (2021)

Figura 24 - SEÇÃO RUA NELSON MEDRADO $Q = 1,5 \text{ M}^3/\text{S}$ 

FONTE: As autoras (2021)

Além disso, como a vazão de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ provocou inundabilidade em algumas regiões da área de estudo, torna-se implícito o fato de que o canal possui escoamento bastante lento.

6 CONCLUSÃO E DEBATE

Conforme enfatizado durante este trabalho, a inundação recorrente na região do balneário de Praia de Leste ocasiona diversos contratempos para os moradores, onde a falta de infraestrutura como o assoreamento do canal é um dos principais fatores que promovem as inundações.

Estas áreas afetadas puderam ser determinadas através da utilização de modelos topográficos e hidrodinâmicos abastecidos de dados reais da região coletados em campo. Foram avaliadas diferentes vazões, visando a evolução da inundação na região.

A topografia foi caracterizada por um Modelo Digital de Terreno, onde foram utilizados dados obtidos pelo método relativo cinemático coletados na área de estudo. Para a verificação e validação do modelo foram obtidos pontos de controle através do levantamento relativo estático. Através do MDT foi possível observar os pontos de altitude mais baixos, sendo comprovado que as áreas no entorno do canal possuem menor elevação em relação às ruas vizinhas.

Para a análise do canal, foi utilizado um modelo hidrodinâmico no qual os dados topográficos da região foram integrados. Os dados hidrológicos, como a vazão de pico que fundamentou a escolha das outras vazões, foram retirados de estudo secundário já realizado pelo município. Além disso, as seções transversais do modelo foram posicionadas estrategicamente, de modo a separar as quadras das ruas, bloqueando os locais pelo qual o escoamento não poderia passar. Com isto, o modelo hidrodinâmico para a região pode ser gerado.

Ao realizar a modelagem para as diferentes vazões, foi possível observar a evolução da mancha de inundação. Além disso, foi verificado que a vazão de pico inundou a região, este fato pode indicar que o canal está subdimensionado. O tempo de retorno para um canal de drenagem, conforme Brasil (2005) indica é de 10 anos, no canal do DNOS foi utilizado o TR de apenas 3 anos.

É possível observar ainda que mesmo a vazão de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ inundou alguma parte da região de estudo, este fato evidencia que a vazão em condições normais no canal está abaixo de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como sugestão para trabalhos posteriores são propostas diferentes metodologias para estudo da região, como: a inserção de dados batimétricos obtidos em levantamentos com equipamentos adequados para retorno de um modelo

hidráulico mais fidedigno à realidade; utilização de escoamento não permanente para observar como o escoamento se comporta conforme a passagem do tempo e quais locais ele atinge, sendo possível também realizar a elaboração de planos de evacuação; estudo com coleta de dados altimétricos dos lotes para verificar quais terrenos são inundados; realização de estudo hidrológico para determinação de vazão com tempos de recorrência diferentes ou até mesmo o dimensionamento de dispositivos de drenagem para suportar a vazão solicitada pelo canal.

REFERÊNCIAS

BATISTA, L. F. D. R. **Estudo de indicadores de risco de inundação do município do Cabo de Santo Agostinho**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife (PE), 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/14243/1/Vers%C3%A3oBiblio_LarissaBatista_Diss_UFPE_PPGEC_GRH_2015.pdf> Acesso em: 20 fev. 2021.

BRASIL. **Decreto nº 89.917, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 22 de junho de 1984. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em: 21 novembro 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília, 2005. Disponível em: <capacidades.gov.br/media/doc/acervo/06906898a257ceb3ec8687675e9e36c8.pdf>. Acesso em: 21 fevereiro 2021.

BRASIL. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia, Diretoria de Serviço Geográfico. **NORMA DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS GEOESPACIAIS VETORIAIS DE DEFESA DA FORÇA TERRESTRE (ET-ADGV-Defesa F Ter)**. 2ª edição. Brasília-DF, 2016.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2005.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS: River Analysis System – User’s Manual**. Davis (CA), 2020. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS_6.0_UsersManual.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2021.

BOTELHO, M. H. C. **Águas de chuva: engenharia de águas pluviais na cidade**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

CARVALHO, D. F.; MELLO, J. L. P.; SILVA, L.; D.B. **Irrigação e drenagem: hidrologia**. Rio de Janeiro, 2007. Apostila digitada. Disponível em: <<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/jorge/downloads/APOSTILA/LICA%20Parte%201.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

CHANSON, H. **Environmental hydraulics of open channel flows**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004a.

CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow: an introduction**. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004b.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1959.

COLLISCHONN, F.; DORNELLES, W. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.

CUNGE, J. A.; HOLLY JR, F.M.; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. Massachussets: Pitman, 1980.

DOMPIERI, M. H.; SILVA, M. A. S. da; NOGUEIRA JUNIOR, L. R. **Sistemas de referência terrestre e posicionamento por satélite**. Aracaju: EMBRAPA, 2015.

Disponível em:

<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042182/1/Doc197.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2021.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGis Desktop** versão 10.6. Redlands (CA), 2017. Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/buy>>.

ESTEVEVES, C. J. de O. **Vulnerabilidade socioambiental na área de ocupação contínua do litoral do Paraná – Brasil**. 2011. 354 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/33907/R%20-%20T%20-%20CLAUDIO%20JESUS%20DE%20OLIVEIRA%20ESTEVEVES.pdf>> Acesso em: 23 fev. 2021

FESTI, A. V. Coletânea das equações de chuva no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007. Disponível em:

<<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=19&SUMARIO=267>>. Acesso em: 13 mar. 2021

FOX, R. W.; McDONALD, A.T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluídos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 871p.

GRIBBIN, J. E. **Introdução a hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. 2. ed. São Paulo: CENGAGE, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área territorial brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Modelo de ondulação geoidal**

- **MAPGEO2015**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html?edicao=16272&t=sobre>>. Acesso em: 24 fev. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 18 jan. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Relatório Técnico.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Relatório Técnico.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica Geo Office**. Heerbrugg (SG), 2014.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

MIGUEZ, M. G.; GREGORIO, L. T. di; VERÓL, A. P. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. Rio de Janeiro: Gen LTC, 2018. 348p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

PARANÁ. Instituto Água e Terra (IAT) e Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (COBRAPE). **Plano da bacia hidrográfica litorânea**. Produto 06: eventos críticos, 2018.

PARANÁ. Instituto Água e Terra (IAT) e Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (COBRAPE). **Plano da bacia hidrográfica litorânea**. Produto 07: cenários, 2019a.

PARANÁ. Instituto Água e Terra (IAT) e Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (COBRAPE). **Plano da bacia hidrográfica litorânea**. Produto 08: proposta de enquadramento, 2019b.

PAZ, A. R. da. **Hidrologia aplicada**. Caxias do Sul, 2004. Apostila digitada. Disponível em:

<http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UE_RGS.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Blucher, 1976.

PONTAL DO PARANÁ. Prefeitura de Pontal do Paraná. **Nossa cidade/a cidade.**

Disponível em:

<<http://www.pontaldoparana.pr.gov.br/index.php?sessao=b054603368ncb0&id=1842>

> Acesso em: 01 mar. 2021

RIBEIRO, C.; NEVES, R. de S. L. Modelagem hidrológica e hidráulica para simulação de inundações em uma bacia hidrográfica na área urbana do município de Juiz de Fora (MG). In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió.

Anais... Maceió: ABRH, 2011. Disponível em:

<https://www.abrhydro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=4115&ST=modelagem_hidrologica_e_hidraulica_para_simulacao_de_inundacoes_em_uma_bacia_hidrografica_na_area_urbana_do_municipio_de_juiz_de_fora_mg>.

Acesso em: 13 mar. 2021

SANTOS, A. de P. dos. **GeoPEC**, versão 3.5.2. Viçosa, MG, 2019. Disponível em:

<<http://www.geopec.com.br/p/software-geopec.html>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

SÃO PAULO (Município). Prefeitura de São Paulo. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos, fundamentos.** São Paulo: SMDU, 2012. v. 2, 220p.

SILVA, L. P. da. **Hidrologia – engenharia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, R. C. V. da; MASCARENHAS, F. C. B; MIGUEZ, M. G. **Hidráulica fluvial.** 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007. v. 1. xxii, 306p.

SILVA, I. da; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia para engenharia – teoria e prática de geomática.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SIMEPAR. Sistema Meteorológico do Paraná. **Projeto básico integrado de micro drenagem, macro drenagem e controle de erosão marinha.** Pontal do Paraná: 2007. Memorial técnico.

SYSTEMS, B.; DYHOUSE, G.; HATCHETT, J.; BENN, J. **Floodplain modeling using HEC-RAS.** Pennsylvania: Bentley, 2007.

TENG, J.; JAKEMAN, A.J.; VAZE, J.; CROKE B.F.W.; DUTTA, D.; KIM, S. **Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis**, Environmental Modelling & Software, v. 90, p. 201-216, 2017. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216310040?via%3Dihub>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: ABRH, 2007. 943 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Engineering Center. **HEC-GeoRAS**, versão 10.1. Davis, CA, 2012. Disponível em: <

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/downloads.aspx>>. Acesso em: 2 fev. 2021.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Engineering Center. **HEC-RAS**, versão 5.0.7. Davis, CA, 2019. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>>. Acesso em: 2 fev. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). Grupo de Pesquisas de Recursos Hídricos. **Plúvio 2.1**, versão 2.1. Viçosa, MG, 2006. Disponível em: <<http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. **O clima do litoral do estado do Paraná. Revista Brasileira de Climatologia**. [S.l.], v. 3, p. 49-63, ago. 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25423>>. Acesso em: 28 outubro 2021.

VASCONCELLOS, E. C.; VASCONCELLOS, F. C.; CARMO, L. F. R. do; MENEZES, W. F. **Análise de índices de instabilidade em casos de chuva intensa, chuva moderada e chuva fraca/sem chuva nas regiões sul e sudeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências – UFPR [Rio de Janeiro], v. 42, p. 769-782, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/30845/17445>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). World's 15 countries with the most people exposed to river floods. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.wri.org/blog/2015/03/world-s-15-countries-most-people-exposed-river-floods>> Acesso em: 14 fev. 2021

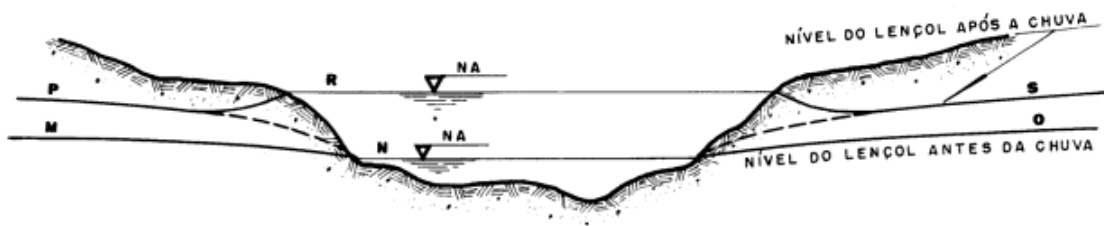
APÊNDICE 1 – ESCOAMENTO SUPERFICIAL E VAZÃO

O ciclo do escoamento, de acordo com Paz (2004), começa quando precipitação se inicia, parte da chuva é retida pela vegetação e a chuva que chega ao solo é infiltrada. Nessa etapa as chuvas que incidem nos cursos d'água não fazem nenhuma contribuição para o escoamento e parte da precipitação que fica retida na vegetação é evaporada.

Com o tempo a precipitação não é mais retida pela vegetação devido a sua constância, assim a quantidade de chuva que chega ao solo se torna superior. Dessa forma o solo pode se saturar, ou seja, o limite de infiltração pode ser ultrapassado fazendo com que essa água comece a ser armazenada nas pequenas depressões dos terrenos. No instante que o nível de água a montante da depressão se eleva ela não é mais capaz de manter a água retida, com isso um filme de água começa a se mover como escoamento superficial (CARVALHO; MELLO; SILVA, 2007).

A água infiltrada também pode percorrer para os aquíferos subterrâneos onde posteriormente escoar para os corpos d'água. Pode acontecer também do lençol freático se elevar e com isso o escoamento ganhará uma quantidade a mais de água subterrânea. O escoamento subterrâneo contribui para o escoamento superficial quando a precipitação já finalizou, pois, esse escoamento possui uma velocidade baixa (PAZ, 2004).

FIGURA 25 - ELEVAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA



FONTE: Pinto *et. al* (1976)

Na figura anterior é possível observar a dinâmica que envolve o curso de água e o solo devido a uma precipitação. O ponto N indica o ponto do canal original, antes do início da chuva, conforme ocorre a precipitação o nível do lençol freático aumenta dos pontos M e O para os pontos P e S. O nível do rio sobe também para o ponto R

devido ao escoamento superficial e a baixa capacidade de infiltração do solo, levando em consideração o aumento do nível do lençol (Pinto *et. al*, 1975).

Quando a precipitação é finalizada e o escoamento superficial é suspenso, as poças e águas retidas nas vegetações são eliminadas aos poucos com auxílio da evaporação e da infiltração. Os níveis dos corpos d'água ficam mais elevados do que no início da precipitação, e, com o tempo a água que se infiltrou é lentamente liberada e o nível da água volta a se estabilizar (PAZ, 2004).

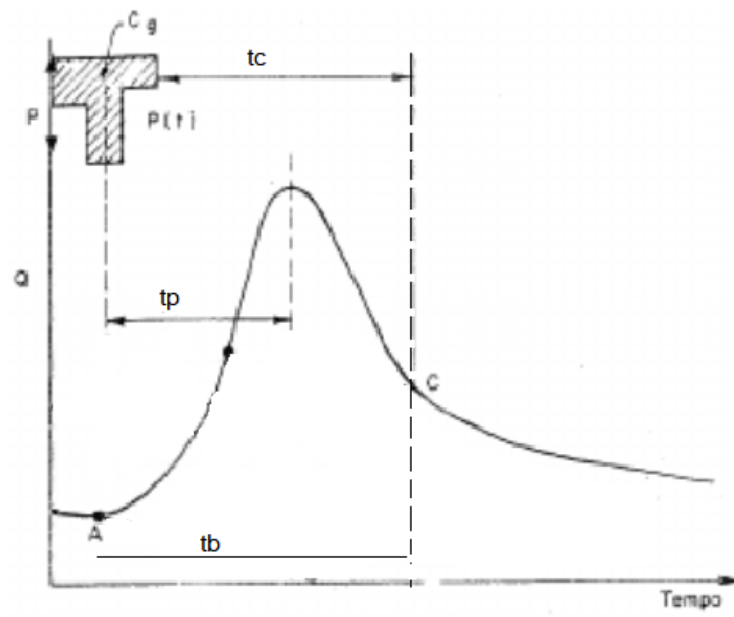
O escoamento pode ser representado por um hidrograma, que graficamente demonstra a vazão que passa por uma seção em função do seu tempo. Ele é o produto obtido de todos os componentes do ciclo hidrológico que se inicia na precipitação e finaliza na vazão na bacia hidrográfica.

Conforme Tucci (2007), no hidrograma é possível observar o espaçamento no tempo para que o nível de água comece a se elevar, esse tempo retardado é devido à interceptação vegetal juntamente com o armazenamento da água nas depressões, nele também está associado o tempo de resposta da bacia a essa precipitação. Após ocorrer um pico de vazão no hidrograma acontece a recessão, nesse aspecto pode ser observado um ponto de inflexão onde o escoamento superficial é finalizado e o escoamento subterrâneo predomina.

Vários fatores podem interferir na forma do hidrograma, os mais relevantes são o relevo, o solo, a cobertura da bacia (seja vegetal ou urbana), modificações artificiais, a distribuição, duração e intensidade da chuva.

Para auxiliar a caracterização do hidrograma são empregados alguns valores de tempos importantes na abcissa do gráfico, como: o tempo de pico (t_p) que é o intervalo do centro de massa da precipitação e o tempo de concentração (t_c) que demonstra o tempo necessário da água precipitada no ponto mais distante da bacia para se deslocar até a seção principal, o tempo de recessão (t_e) tempo para a vazão baixar onde demonstra o fim do escoamento superficial e o (t_b) que é o tempo de base de onde se iniciou a precipitação até a volta das condições iniciais antes da precipitação (TUCCI, 2007).

FIGURA 26 - MODELO DE HIDROGRAMA

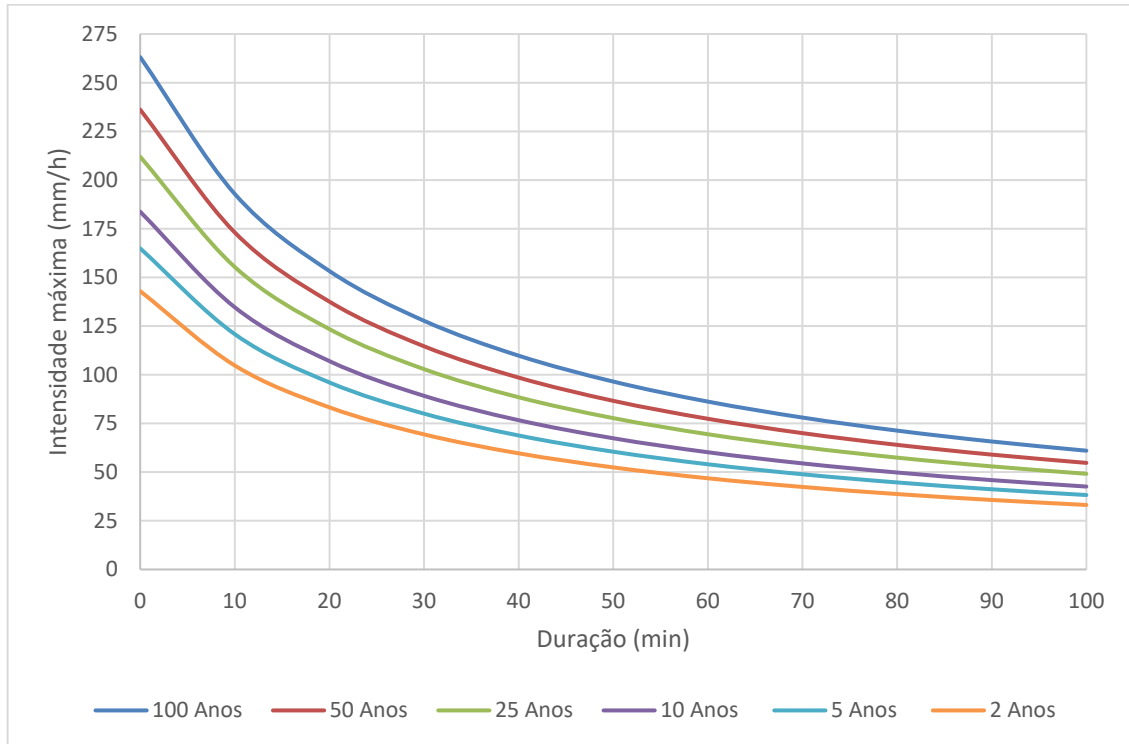


FONTE: Modificado de TUCCI (2007)

ANEXO 1 – CURVA IDF

O gráfico de Curva IDF para a equação de Pontal do Paraná, apresentada ao longo deste trabalho, com tempos de precipitação de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 minutos e de retorno de 100, 50, 25, 10, 5 e 2 anos é apresentado abaixo.

GRÁFICO 1 - CURVAS IDF DE PONTAL DO PARANÁ



FONTE: As autoras (2021)

ANEXO 2 – RELATÓRIO PEC-PCD

GeoPEC

Avaliação do Padrão de Acurácia Posicional em Dados Espaciais

RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

(completo)

DADOS DO PRODUTO

Produto: IDW

Local: Pontal do Paraná

Data: Setembro/2021

Responsável Técnico: Jéssica e Marina

CLASSIFICAÇÃO FINAL DO PRODUTO

Padrão de acurácia utilizado: Decreto n. 89.817/1984 - Análise Altimétrica

Metodologia: Santos et al. (2016) com as tolerâncias PEC-PCD da ET-CQDG

O produto "IDW", **É ACURADO** para a equidistância vertical de **1 m**. O resultado do PEC-PCD foi "**Classe A**", de acordo com o Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.

O produto foi submetido a análise de precisão e tendência em suas componentes posicionais, onde os resultados foram: **É Preciso e Não Tendencioso**.

Pontos de checagem utilizados: 30

RMS das discrepâncias (m): 0,1022

INFORMAÇÕES GERAIS**Padrão de acurácia utilizado: Decreto n. 89.817/1984**

Análise Altimétrica

PROCESSAMENTO

Equidistância vertical: 1

Pontos de checagem inseridos: 30

Pontos de checagem utilizados: 30

OUTLIERS

>> Outliers detectados: 0
>> Valor limite - detecção: 0,9999

ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS

>> Média(h)= -0,021
>> Desv-pad(h)= 0,1017
>> RMS(h)= 0,1022

TESTE DE NORMALIDADE

>> Teste de Normalidade Shapiro-Wilk :
Wcalc(h)= 0,9955 p-value(h)= 1
Nível de Confiança = 95%
Amostra Normal

TESTE DE PRECISÃO

>> Decreto 89.817:
PEC= 0,27 EP= 0,1667
Resultado: Classe A

TESTE DE TENDÊNCIA

>> Teste t de Student
tcalc(h)= -1,131 ttab= 1,6991
Resultado: Não Tendencioso

DISCREPÂNCIAS - PONTOS DE CHECAGEM

ID	di(H)
1	-0,0547
12	-0,1074
17	0,0128
18	-0,0536
20	0,0714
22	-0,1
23	-0,0908
3	0,1422
30	0,037
33	0,0207
34	-0,2512
37	0,048
40	-0,0286
41	0,1331
42	0,2055
46	-0,0163
47	-0,1724
50	0,0411
54	0,0774
59	-0,0445
62	0,1097
63	-0,0985

65	-0,0059
66	0
67	0,0127
73	-0,1251
78	-0,1348
79	-0,0648
80	-0,1504
81	-0,0434
