

O estudo tem como o objetivo principal avaliar os danos de impactos econômicos de eventos de inundação no município de Lages/SC, para diferentes cenários, através da análise de redução de risco considerando a aplicação de medidas de mitigação de elevação de estruturas, assim como, aplicar índice de vulnerabilidade nas áreas de domínio do problema, de modo, a avaliar melhores maneiras para gerenciar o risco. Deste modo, foram realizadas análises hidrológicas (HEC-HMS), hidrodinâmicas (HEC-RAS) e econômicas (HEC-FDA), considerando quatro cenários de planos, bem como cenário de evolução do crescimento urbano, referente a ocupação urbana em 2002 e 2022. Ao final, foram obtidos os danos anuais esperados para cada cenário avaliado.

Orientador: Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto

Lages, 2022

ANO
2022

VICTOR HUGO DA CRUZ PRIMO | ANÁLISE DE IMPACTOS
ECONÔMICOS E DA VULNERABILIDADE EM EVENTOS DE
INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE LAGES/SC



UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DE IMPACTOS
ECONÔMICOS E DA
VULNERABILIDADE EM
EVENTOS DE INUNDAÇÕES
NO MUNICÍPIO DE LAGES/SC**

VICTOR HUGO DA CRUZ PRIMO

LAGES, 2022

VICTOR HUGO DA CRUZ PRIMO

**ANÁLISE DE IMPACTOS ECONÔMICOS E DA VULNERABILIDADE EM
EVENTOS DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE LAGES/SC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, no Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto

**LAGES
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

da Cruz Primo, Victor Hugo
Análise de Impactos Econômicos e da Vulnerabilidade em
Eventos de Inundações no Município de Lages/SC / Victor
Hugo da Cruz Primo. -- 2022.
135 p.

Orientador: Silvio Luís Rafaeli Neto
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages,
2022.

1. Inundações. 2. Redução de Danos. 3. Socio-Hidrologia.
4. HEC-FDA. 5. Crescimento Urbano. I. Rafaeli Neto, Silvio
Luís . II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro
de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais. III. Título.

VICTOR HUGO DA CRUZ PRIMO

**ANÁLISE DE IMPACTOS ECONÔMICOS E DA VULNERABILIDADE EM
EVENTOS DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE LAGES/SC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, no Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto

BANCA EXAMINADORA

Orientador:

Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto
Udesc/Lages - SC

Membros:

Dr. Masato Kobiyama
IPH/Porto Alegre - RS

Dr. Flavio José Simioni
Udesc/Lages - SC

Local, 26 de Agosto de 2022.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, assim como aos demais professores que participaram do meu percurso, durante o decurso do programa, sendo fundamentais para meu desenvolvimento acadêmico.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

Agradeço aos meus colegas de laboratório que me auxiliaram durante o desenvolvimento do meu projeto, e com os quais foi possível realizar trocas de saberes.

Por fim, deixo um agradecimento especial ao meu orientador pelo incentivo e orientações precisas ao meu projeto de pesquisa.

“A maior glória de viver não consiste em
jamais cair, mas em reerguermos-nos
sempre que o fizermos.”

(Nelson Mandela)

RESUMO

Devido ao aumento da recorrência e intensidade dos eventos de chuva extrema, os processos de inundação tornam-se cada vez mais prejudiciais as comunidades atingidas, causando impactos de cunho econômico e social. Desse modo, o estudo tem como objetivo principal avaliar os impactos econômicos de eventos de inundações no município de Lages/SC para diferentes cenários, assim como aplicar índice de vulnerabilidade nas áreas de domínio do problema, de modo a avaliar melhores maneiras para gerenciar o risco. Assim, foram considerados quatro planos para avaliação econômica, sendo um referente a condições sem medidas protetivas e três com aplicação de elevação de estruturas em diferentes alturas, bem como dois cenários de ocupação urbana diferentes, com ocupação no ano de 2002 e 2022. As bacias urbanas dos Rios Ponte Grande e Carahá foram adotadas como áreas de domínio do problema. As chuvas foram obtidas por meio da aplicação do modelo probabilístico de Gumbel, para estimativa das chuvas máximas acumuladas de 5 dias, foram adotados os tempos de retornos de 1, 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100 e 500 anos. Ademais, foi realizada modelagem hidrológica, no programa HEC-HMS. A modelagem hidrodinâmica foi executada no *software* HEC-RAS, por meio da simulação de modelo 1D para os TR's escolhidos. O HEC-FDA foi utilizado para a realização da análise de redução de risco de danos causados por inundações, onde foram calculados os danos anuais esperados (EAD) para os quatro planos propostos, bem como para os cenários de crescimento urbano. Em seguida, foi aplicado índice de vulnerabilidade nos setores censitários da área de estudo, sendo considerado para composição do índice parâmetros sociais e econômicos. Quanto aos resultados obtidos, verificou-se que a aplicação de medidas mitigadoras de elevação das estruturas reduziu o EAD em 72,73%, 78,74% e 83,10%, considerando adoção dos Planos 1, 2 e 3, respectivamente. Em relação ao cenário de evolução do crescimento urbano, observou-se um aumento do EAD em 62,09%, no intervalo de 20 anos. Por fim, constatou-se que os setores classificados como mais vulneráveis, correspondem aos locais predominantes de início dos danos simulados no FDA, bem como as áreas de maior evolução de crescimento urbano.

Palavras-chave: Inundações. Redução de Danos. Socio-Hidrologia. HEC-FDA. Crescimento Urbano.

ABSTRACT

Due to the increase in the recurrence and intensity of extreme rain events, floods processes become increasingly harmful to the affected communities, causing economic and social impacts. Thus, the main objective of the study is to evaluate the damages of economic impacts of flood events in the city of Lages/SC for different scenarios, in addition, apply vulnerability index in the problem domain areas, in order to evaluate better ways to manage the risk. Thus, four plans were considered for economic evaluation, one referring to conditions without protective measures and three with the application of elevation of structures at different heights, as well as two different urban occupation scenarios, with occupation in 2002 and 2022. The urban basins of the Ponte Grande and Carahá Rivers were adopted as the problem domain area. The rainfalls were obtained through the application of Gumbel's probabilistic model, to estimate the maximum accumulated rains of 5 days, the return times of 1, 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100 and 500 years were adopted. The hydrological modeling was performed using the HEC-HMS. Subsequently, hydrodynamic modeling was carried out through the HEC-RAS, through the simulation of a 1D model for the chosen TR's. The HEC-FDA was used to carry out the risk reduction analysis of damage caused by floods, where the expected annual damages (EAD) were calculated for the four proposed plans, as well as for the urban growth scenarios. Then, a vulnerability index was applied in the census sectors of the study area, being considered for the composition of the index social and economic parameters. The results indicate that the application of mitigating measures to raise the structures reduced the EAD by 72.73%, 78.74% and 83.10%, considering the adoption of Plans 1, 2 and 3, respectively. Regarding the scenario of evolution of urban growth, there was an increase in EAD by 62.09%, in the 20-year interval, between 2002 and 2022. Finally, it was found that the areas classified as the most vulnerable correspond to the places where the damages simulated in the FDA began, as well as the places with the greatest evolution of urban growth.

Keywords: Floods. Damage Reduction. Socio-Hydrology. HEC-FDA. Urban growth.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração para diferenciação entre enchente e inundação.....	20
Figura 2 - Unidades Básicas de Paisagem Hidrológica.....	21
Figura 3 – As Fases de Gerenciamento de Desastres Naturais.....	24
Figura 4 - Interface do HEC-FDA.	31
Figura 5 - Conceito dos Alcances de Danos (<i>Damage Reaches</i>).	32
Figura 6 - Simulação de Monte Carlo para estimação do EAD.	33
Figura 7 - Mapa Mental sobre inundações e vulnerabilidade social.	38
Figura 8 - Mapa de Localização do Setores CPRM 9, 10, 23 e 24.....	40
Figura 9 – Manchas de inundações dos eventos de 2005, 2008 e 2011, no município de Lages/SC.	40
Figura 10 - Fluxograma do Projeto.....	42
Figura 11 - Localização das estações pluviométricas.	44
Figura 12 – Distribuição da Chuva Observada de 5d, para os eventos observados selecionados.....	48
Figura 13 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Sistema Ponte Velha.	50
Figura 14 – Modelo Conceitual para modelagem hidrológica.....	51
Figura 15 – Geometria 1D, delineada para área de interesse.....	54
Figura 16 – Localização das áreas de alcance de danos.....	61
Figura 17 – Localização espacial dos pontos amostrais, no município de Lages/SC.	69
Figura 18 – Interface de entrada dos dados para o inventário de cada estrutura, com exemplo de estrutura inserida.....	70
Figura 19 – Pontos amostrais da valoração de imóveis, situados no município de Lages/SC.	72
Figura 20 – Pontos Amostrais, subdivididos conforme período de ocupação.	74
Figura 21 – Distribuição das elevações aplicadas nas estruturas, individualmente. .	75
Figura 22 – Localização dos setores censitários utilizados para aplicação do índice de vulnerabilidade.....	78
Figura 23 – Distribuição das Chuvas Máximas acumuladas de 5d.	82
Figura 24 – Polígonos de Inundações para todos os tempos de retornos adotados no estudo.....	84

Figura 25 – Valor dos imóveis, obtido através da aplicação do método evolutivo, considerando período de abril de 2022.	85
Figura 26 – Crescimento das Unidades Imobiliárias na área de interesse.....	86
Figura 27 – Crescimento dos lotes na área de interesse.	86
Figura 28 – Edificações fora da planície inundável, a partir de um dado plano.....	90
Figura 29 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário sem projeto.	91
Figura 30 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário com elevação de 0,305 m.....	92
Figura 31 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário com elevação de 0,610 m.....	93
Figura 32 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário com elevação de 1,000 m.....	94
Figura 33 – Índice de Vulnerabilidade para os setores censitários da área de estudo.	99
Figura 34 – Índice de Vulnerabilidade <i>versus</i> manchas de inundações modeladas.	100
Figura 35 – Índice de Vulnerabilidade <i>versus</i> tempo de retorno de início de danos nas edificações.	101
Figura 36 – Índice de Vulnerabilidade <i>versus</i> localização das edificações amostrais ocupadas após 2002.	102
Figura 37 – Índice de Vulnerabilidade <i>versus</i> evolução de crescimento urbano.	103
Figura 38 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 5 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.	117
Figura 39 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 7 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.	117
Figura 40 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 9 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.	118
Figura 41 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 14 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.	118

Figura 42 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 30 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.	119
Figura 43 – Hidrograma de Projeto para os tempos de retornos, referente a junção 4, situada no rio Caveiras.	120
Figura 44 – Hidrograma de Projeto para os tempos de retornos, referente a junção 8, situada no rio Ponte Grande.	120
Figura 45 – Hidrograma de Projeto para os tempos de retornos, referente a junção 13, situada no rio Carahá.	121
Figura 46 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 3 anos.	122
Figura 47 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 5 anos.	122
Figura 48 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 10 anos.	123
Figura 49 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 15 anos.	123
Figura 50 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 25 anos.	124
Figura 51 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 50 anos.	124
Figura 52 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 100 anos.	125
Figura 53 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 500 anos.	125
Figura 54 – Funções de probabilidade de excedência, nível-vazão e nível-danos, referentes ao Rio Carahá, modeladas no FDA.	126
Figura 55 – Funções de probabilidade de excedência, de nível-vazão e de nível-danos, referentes ao Rio Ponte Grande, modeladas no FDA.	127
Figura 56 – Evolução da Ocupação Urbana, em intervalo de 20 anos, na área de domínio do problema, no município de Lages/SC.	128
Figura 57 – Evolução da Ocupação Urbana, em intervalo de 20 anos, na área de domínio do problema, com destaque para bacia do rio Carahá.	129
Figura 58 – Evolução da Ocupação Urbana, em intervalo de 20 anos, na área de domínio do problema, com destaque para bacia do rio Ponte grande.	130
Figura 59 – Evolução da Ocupação Urbana na área de domínio do problema, com destaque para os lotes cadastrados no município.	131
Figura 60 – Evolução da Ocupação Urbana na área de domínio do problema, com destaque para as unidades imobiliárias cadastradas no município.	132
Figura 61 – Funções de probabilidade de excedência por média total de danos para os planos de mitigação, referentes ao Rio Carahá, modeladas no FDA.	133

Figura 62 – Funções de probabilidade de excedência por média total de danos para os planos de mitigação, referentes ao Rio Ponte Grande, modeladas no FDA.	134
Figura 63 – Espacialização da Variável referente ao número de domicílios por setor censitário.	135
Figura 64 – Espacialização da Variável referente ao número de habitantes por setor censitário.	135
Figura 65 – Espacialização da Variável referente ao número de pessoas responsáveis alfabetizadas por setor censitário.	136
Figura 66 – Espacialização da Variável referente ao número de idosos residentes por setor censitário.	136
Figura 67 – Espacialização da Variável referente ao número de crianças residentes por setor censitário.	137
Figura 68 – Espacialização da Variável referente ao número de pessoa responsável do sexo feminino por setor censitário.	137
Figura 69 – Espacialização da Variável referente ao número de responsáveis sem rendimento por setor censitário.	138
Figura 70 – Espacialização da Variável referente ao número de responsáveis com até 1 salário mínimo de rendimento por setor censitário.	138
Figura 71 – Espacialização da Variável referente à densidade demográfica por setor censitário.	139
Figura 72 – Espacialização dos domicílios com coleta de lixo por setor censitário.	139
Figura 73 – Espacialização dos domicílios com energia elétrica por setor censitário.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Palavras-chaves utilizadas nas pesquisas realizadas no portal de periódicos da CAPES.	25
Tabela 2 – Eventos observados selecionados para desagregação das chuvas de projeto.....	47
Tabela 3 – Dados de entrada do Modelo Calibrado.	51
Tabela 4 – Função de profundidade-percentual de danos, do tipo ocupação de um andar.	65
Tabela 5 – Função de profundidade-percentual de danos, do tipo ocupação de dois andares.....	65
Tabela 6 – Incerteza baseada no método de mensuração do nível do primeiro andar.	66
Tabela 7 – Dados obtidos na pesquisa de amostras.....	72
Tabela 8 – Variáveis do censo do IBGE utilizadas para composição do índice de vulnerabilidade.....	79
Tabela 9 – Chuvas Máximas acumuladas de 5d para os tempos de retornos.	81
Tabela 10 – Nível de Água para cada Tempo de Retorno, considerando as áreas de domínio do problema, referente as bacias dos rios Caveiras, Carahá e Ponte Grande, no município de Lages/SC.....	83
Tabela 11 – Dano Anual Esperado (EAD), por cenário de evolução urbana, referente aos anos de 2002 e 2022.	87
Tabela 12 – Dano Anual Esperado (EAD), por cenário de medida mitigadora.	94
Tabela 13 – Dano Anual Esperado (EAD), por cenário de medida mitigadora, pelas áreas de danos.	95
Tabela 14 – Intervalo de blocos para classificação do Índice de Vulnerabilidade.	98
Tabela 15 – Índice de Vulnerabilidade para os setores censitários da área de estudo.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CUB	Custo Unitário Básico de Construção
d	dias
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAD	Danos Anuais Esperados
ERL	Anos de Registro Equivalente
EM-DAT	The International Disaster Database
FIDE	Formulário de Informação do Desastre
FDA	Flood Damage Reduction Analysis
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
HEC-FDA	Hydrologic Engineering Center – Flood Damage Reduction Analysis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
K	Constante de recessão
Lag time	Tempo de atraso
LiDAR	Light Detection and Ranging
LABHIDRO	Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Ambiental do CAV/UDESC
MDT	Modelo Digital de Terreno
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
SCS	Soil Conservation Service
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SIG	Sistema de Informação Geográfica
S2Id	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
TR	Tempo de Retorno
USACE	U.S. Army Corps of Engineers
UH	Unidade Hidrológica
XS	Seção Transversal
WSE	Water Surface Elevation
WSP	Water Surface Profile

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA/ HIPÓTESES	19
1.2	OBJETIVO GERAL.....	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	ENCHENTES E INUNDAÇÕES	20
2.2	PAISAGENS HIDROLÓGICAS	21
2.3	RISCO, GESTÃO E RESILIÊNCIA.....	22
2.4	CENÁRIO ATUAL DE ESTUDOS SOBRE IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DE INUNDAÇÕES	24
2.5	O MODELO HEC-FDA	30
2.6	VULNERABILIDADE SOCIAL E INUNDAÇÕES	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO	39
3.2	ETAPAS DO PROJETO	42
3.2.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA	43
3.2.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	52
3.2.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA: HEC-FDA	58
3.3	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA	81
4.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	83
4.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	84
4.3.1	CENÁRIO DE CRESCIMENTO DA OCUPAÇÃO URBANA	85
4.3.1.1	<i>Considerações sobre a Hipótese 1.....</i>	<i>88</i>
4.3.2	CENÁRIO DE APLICAÇÃO DA MEDIDA MITIGADORA	89
4.3.2.1	<i>Considerações sobre a Hipótese 2.....</i>	<i>97</i>
4.4	AVALIAÇÃO VULNERABILIDADE	97
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	104
	REFERÊNCIAS.....	106
	APÊNDICE A – ANÁLISE DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE CHUVA ...	117

APÊNDICE B – HIDROGRAMAS DE PROJETO PARA AS JUNÇÕES DE INTERESSE	120
APÊNDICE C – MANCHAS DE INUNDAÇÕES PARA OS TEMPOS DE RETORNO	122
APÊNDICE D – FUNÇÕES OBTIDAS NO HEC-FDA	126
APÊNDICE E – COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO URBANO NA ÁREA DE ESTUDO.....	128
APÊNDICE F – CURVAS DE PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA - MÉDIA DE REDUÇÃO DOS DANOS	133
APÊNDICE G – ESPACIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	135

1 INTRODUÇÃO

Com base em observações dos eventos de inundações, tem-se alta confiança que as mudanças climáticas antropogênicas aumentaram a probabilidade de uma série de grandes eventos de precipitação extrema e inundações, que resultem em impactos danosos no sul e leste da Ásia, na Europa, na América do Norte e na América do Sul (IPCC, 2022).

Diversos estudos indicam que o efeito das mudanças climáticas em conjunto com a crescente urbanização e consequente alteração do uso do solo, contribuem para o aumento do risco de inundações em áreas urbanas (AVASHIA; GARG, 2020; CHEN et al., 2020a; TRAMBLAY et al., 2019).

Neste sentido, nos processos de inundação, sabe-se que as mudanças no uso do solo podem ocasionar tanto impactos negativos quanto positivos. Considerando os impactos positivos, tem-se que eventos de inundação podem ser benéficos para algumas atividades humanas, geralmente relacionadas com manejos de culturas agrícolas, que aproveitam dos sedimentos e nutrientes carregados e do acúmulo de água para se desenvolverem.

Já considerando os impactos negativos, tem-se que as mudanças no uso do solo em zonas urbanas, favorecem o aumento dos impactos de inundações, em razão do solo se tornar mais impermeável (LIU; WANG; LI, 2014; POUR et al., 2020), bem como processos hidrológicos como a infiltração diminuam, em detrimento de um aumento do escoamento em superfície, o que pode modificar o balanço hídrico, sobrecarregar os sistemas de drenagem existentes e potencializar o pico de escoamento (ADNAN et al., 2020; CHEN et al., 2020b).

Assim, percebe-se que o homem está estritamente ligado com a água e seu ciclo, e ciências como a socio-hidrologia buscam entender a dinâmica e a coevolução desse sistema, com intuito de auxiliar na sua gestão (SIVAPALAN; SAVENIJE; BLÖSCHL, 2012; BALDASSARRE et al. 2019).

Desta maneira, sabe-se que as comunidades humanas viveram próximas aos rios desde os primórdios da humanidade, por diversos motivos, e isso embora vantajoso em alguns casos, ocasiona em maiores riscos de

inundações para as populações ribeirinhas, que cada vez mais enfrentam esses tipos de eventos (VIGLIONE et al., 2014).

A resiliência socioecológica é um conceito importante para o entendimento da resposta de comunidades após inundações, pois define que as comunidades estão em constante estado de mudança e sempre buscam melhorar as condições de adaptação para os próximos eventos que podem acontecer dentro de suas realidades (DISSE et al., 2020). Desse modo, a gestão de inundações em áreas urbanas é importante para a proteção das pessoas e de suas atividades econômicas, pois pode auxiliar na criação de comunidades mais resilientes (NOTARO et al., 2014).

Além de que a falta de saneamento básico nas regiões afetadas por inundações pode atuar como potencializador dos impactos gerados sobre as populações. Doenças de transmissão hídrica e por vetores são exemplos que podem ter sua propagação aumentada nesses períodos, como exemplo, a maior ocorrência de casos de diarreia e leptospirose (FARIAS ASMUS et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2014; PATERSON; WRIGHT; HARRIS, 2018; SHOKRI; SABZEVARI; HASHEMI, 2020; PORTELA, KOBIYAMA e GOERL, 2020). Problemas de saúde psicológica, como o estresse pós-evento, o medo de recorrência e a necessidade de lidar com a recuperação ao estado anterior, também representam danos importantes para as comunidades (MENNE; MURRAY, 2013).

No que se refere aos prejuízos financeiros causados por inundações, no norte da Argentina e do Uruguai, somente em janeiro de 2019, foram estimadas perdas de 2,5 bilhões de dólares, devido a eventos ocorridos nesse período, que por sua vez também afetaram a região sul do Brasil (WMO, 2020).

Em Santa Catarina, eventos de inundações foram registrados 2.601 vezes entre os períodos de 1980 a 2010, causando danos significativos nas áreas atingidas. Os prejuízos estimados no estado catarinense, entre os anos 2000 e 2010, estão na faixa de 4,8 bilhões de reais. Nesse cenário, o município de Lages é um dos mais afetados do estado, tanto para eventos graduais quanto bruscos de inundações, tendo alta recorrência desses eventos em seus registros históricos (HERRMANN, 2014).

Em Lages, eventos como os de 1983, 1997, 2005, 2008, 2011 e 2017 causaram impactos sociais e econômicos significativos aos habitantes do município (LIZ, 2018), prejudicando a sua qualidade de vida e proporcionando perdas por vezes irreparáveis. Neste sentido, observa-se que já foram realizados diversos estudos que abrangem como domínio de problema as bacias urbanas do município de Lages, como exemplo, pode-se citar Padilha (2017), Liz (2018), Schier (2020) e Magro (2021), que em suma, avaliaram quesitos inerentes a modelagem hidrológica para os eventos de inundação, a influência do Rio Caveiras nos eventos de inundação nas áreas urbanas de Lages, proposição de classificação do Índice Topográfico de Umidade para detectar as zonas urbanas inundáveis e a aplicação de redes neurais artificiais para a previsão de inundação, respectivamente. Contudo, evidencia-se que até então não existem estudos publicados com enfoque sobre os impactos econômicos dos processos de inundação no município de Lages.

Dessa forma, tem-se que as estimações dos danos causados por inundações no município, concentram-se no trabalho executado pela Defesa Civil, após a ocorrência dos eventos, através dos Formulários de Informações de Desastre (FIDE), sem estudos com análises prévias que considerem diferentes cenários, inclusive com aplicação de medidas mitigadoras para reduzir os impactos gerados sobre a população.

Por conseguinte, as medidas de mitigação têm papel fundamental na gestão do risco de inundações, pois têm potencial na redução dos impactos sobre as comunidades. De modo que podem ser adotadas medidas estruturais, como exemplos o uso de áreas de retenção e a elevação da estrutura das edificações (ARRIGHI et al., 2018; DE RUIG et al., 2019), ou não-estruturais, como exemplo a aplicação de seguros contra enchentes (ROBINSON; BOTZEN, 2020) e sistemas de alerta (SUKHWANI et al., 2019).

Por outro lado, os modelos hidrológicos progrediram bastante nos últimos anos, impulsionados principalmente pelo fácil acesso a recursos de computação, instrumentação sofisticada e recursos de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. De maneira que a integração da hidrologia com áreas afins está acontecendo cada vez mais (SINGH, 2018).

Isto posto, o modelo HEC-FDA desenvolvido pela *U.S. Army Corps of Engineers*, pode ser utilizado com o propósito de quantificar o risco associado a eventos de inundações, e na estimação do valor de dano anual esperado, para diferentes cenários de medidas de mitigação, assim, auxiliando na fomentação de planos para a gestão de riscos de inundações.

Neste íterim, essa pesquisa se torna necessária devida à atual lacuna de trabalhos que avaliem e quantifiquem os impactos econômicos provenientes de eventos de inundações nas bacias urbanas do município de Lages/SC, que considerem diferentes cenários de ocupação urbana, o efeito da aplicação de medidas de mitigação, bem como as áreas mais vulneráveis do município.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA/ HIPÓTESES

- Hipótese 1: O crescimento urbano em planícies inundáveis aumenta os danos econômicos associados em uma dada proporção quantitativa.
- Hipótese 2: Medidas mitigadoras de elevação de estruturas contribuem para diminuir os danos econômicos associados aos eventos de inundações.

1.2 OBJETIVO GERAL

- Avaliar os impactos econômicos de eventos de inundação no município de Lages/SC para diferentes cenários de mitigação e anos de análise, bem como a vulnerabilidade nas áreas de interesse do estudo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Avaliar a evolução da ocupação urbana em áreas inundáveis do município de Lages, e consequentemente, os impactos dos danos econômicos dos eventos de inundação, considerando cenário de ocupação para o ano de 2002 e para o ano de 2022;

b) Analisar a redução dos danos por meio da aplicação da medida mitigadora de elevação das estruturas, considerando a aplicação de três alturas de elevação distintas;

c) Aplicar índice de vulnerabilidade para área de interesse do estudo, com intuito de identificar as áreas mais suscetíveis e confrontar com os dados obtidos nas etapas de modelagem hidrodinâmica e econômica.

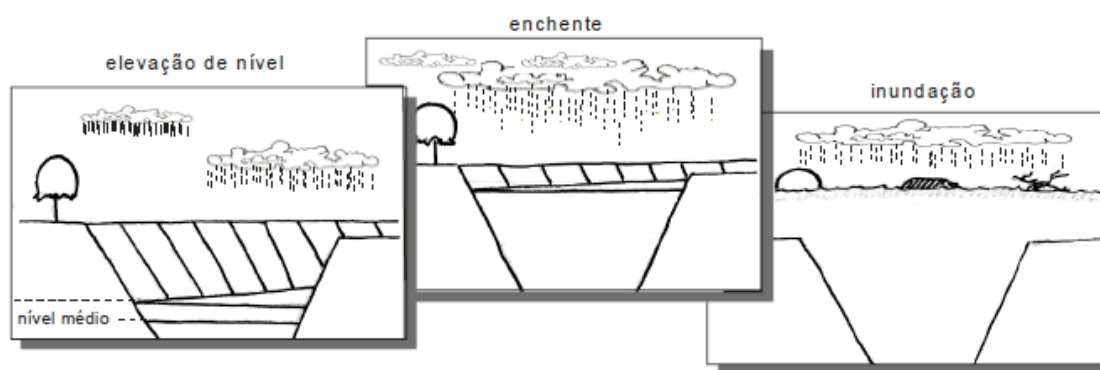
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão conceituados alguns termos de interesse, de modo objetivo e com enfoque no que será trabalhado dentro do estudo, assim como, uma abordagem sobre o modelo utilizado e o cenário de estudos acerca do tema.

2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES

A princípio, uma distinção entre os termos enchente e inundação torna-se necessária devido a comum aplicação inadequada das terminologias, para prosseguimento do entendimento do trabalho. Deste modo, a inundação pode ser definida como o aumento do nível dos rios até seu transbordamento além das margens atingindo as áreas próximas a ele, denominadas planícies de inundação. Neste sentido, enquanto, não ocorre o transbordamento da calha do rio, apenas o aumento do nível, temos uma enchente, conforme Figura 1 (KOBİYAMA et al., 2006; GOERL E KOBİYAMA, 2005).

Figura 1 - Ilustração para diferenciação entre enchente e inundação.



Fonte: Kobiyama et al. (2006).

Definido os conceitos, daqui em diante será utilizado o termo inundação, pois o presente estudo visa o efeito das chuvas extremas e consequente cheias nos corpos hídricos que tenham impacto sobre a população pelo aumento do nível d'água, deste modo, apenas quando houver o

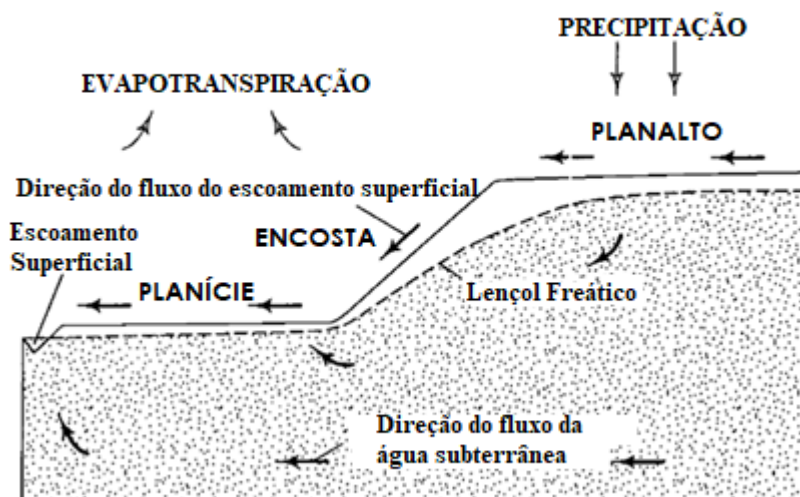
transbordamento da calha para áreas habitadas por comunidades, haverá a ocorrência de impactos significativos sobre a população.

2.2 PAISAGENS HIDROLÓGICAS

O entendimento do conceito de paisagem hidrológica tem papel importante na compreensão dos processos da água e na sua movimentação dentro de diferentes tipos de estruturas de terreno, auxiliando na caracterização do comportamento hidrológico das áreas de interesse e nos impactos sobre a população.

A Figura 2, apresenta as unidades básicas da paisagem hidrológica, que são os componentes básicos para a formação de todas as paisagens hidrológicas. Desta maneira, as unidades fundamentais de paisagem hidrológica podem ser compreendidas como resultado de três características, sendo, a primeira o formato da superfície terrestre, configurado pelos topos de morro, planícies e regiões intermediárias, a segunda sendo a estrutura geológica e a terceira sua configuração climática (WINTER, 2001).

Figura 2 - Unidades Básicas de Paisagem Hidrológica.



Fonte: Winter (2001).

Assim, para o presente trabalho a região da paisagem hidrológica de interesse é a Planície, pois é nela que se encontra a planície topográfica de inundação de Lages e consequentemente onde ocorrem os impactos sobre às

comunidades em decorrência das inundações dos cursos hídricos. Vale salientar que o município de Lages se encontra na região do planalto catarinense, contudo, existem áreas de planície no município, com a presença de cursos hídricos nas áreas urbanas e rurais.

A área de planície de uma paisagem hidrológica, em virtude de sua proximidade com os níveis do lençol freático, tende a ter baixa capacidade de armazenamento e a responder rápido a eventos de precipitação, independentemente de sua localização na bacia (GHARARI et al., 2011).

Logo, esses locais da paisagem hidrológica concentram problemas para a população residente, pois tem por característica o acúmulo de água na superfície e em face a eventos de inundação expõem ao risco essas comunidades.

2.3 RISCO, GESTÃO E RESILIÊNCIA

No que concerne ao risco, pode ser compreendido como a probabilidade de um perigo ocorrer em uma dada região, em conjunto, com o grau de vulnerabilidade e exposição da população local ao dado perigo, sendo o risco o produto destes três fatores (MIANABADI et al., 2020).

Entretanto, ao analisar o risco deve-se considerar a capacidade humana de resistir ou recuperar-se do perigo, sendo que esta capacidade pode ser denominada como resiliência. Logo, infere-se que quanto maior essa capacidade dentro de uma comunidade menor será o risco associado, sendo o risco o produto do perigo por vulnerabilidade, divididos pela resiliência (MARCELINO, NUNES e KOBIYAMA, 2006).

Segundo Furtado et al. (2012), o risco pode ser tratado como a relação entre ameaças e vulnerabilidades, caracterizando-os, como um elemento não fixo, que está em processo de modificação com o tempo, podendo variar conforme medidas são adotadas ou não.

Assim, o gerenciamento de risco torna-se uma ferramenta útil na redução de alguns perigos de inundações, podendo auxiliar na redução das perdas de vidas e prejuízos econômicos à sociedade (DISSE et al., 2020).

A gestão dos riscos de inundação possui papel importante na redução dos riscos, bem como na melhoria da eficiência de preparação e resposta frente a ocorrência de eventos de inundação. Desta maneira, a resiliência urbana às inundações, pode ser definida como um processo adaptativo em que a sociedade aprende a lidar continuamente com as mudanças de uso do solo e das condições climáticas, em que estão inseridas (SÖRENSEN et al., 2016). Deste modo, a resiliência às inundações pode ser compreendida como a capacidade de um dado sistema recuperar-se do evento (LA LOGGIA, PULEO e FRENI, 2020).

No mais, pode-se aplicar o conceito de inundabilidade, definido como a capacidade de um dado sistema resistir às inundações em uma parte ou em todo o sistema, de modo a manter um nível de operação e alcançar um estado de equilíbrio que pode ser tolerado. Portanto, este conceito infere sobre a necessidade da tolerância às inundações serem aplicadas tanto na base física como na social, com medidas de mitigação estruturais e a orientação de ações a serem adotadas pelas pessoas nestes eventos, de modo a aprender continuamente uma maneira de como conviver com as inundações (LA LOGGIA, PULEO e FRENI, 2020).

A utilização de *workshops* é apontada por estudos como uma ferramenta eficaz na comunicação de risco, ajudando a aumentar a consciência da comunidade que reside em zonas inundáveis (HEIDENREICH, MASSON e BAMBERG, 2020).

Além disso, estudos apontam o fato de que pessoas que foram atingidas por eventos de inundações passadas, buscam preparar-se melhor para gerir sua proteção e de seus bens para eventos futuros, muitas vezes desconsiderando a variação de magnitudes entre os eventos, o que pode influenciar na eficiência das medidas adotadas (FOX-ROGERS et al., 2016).

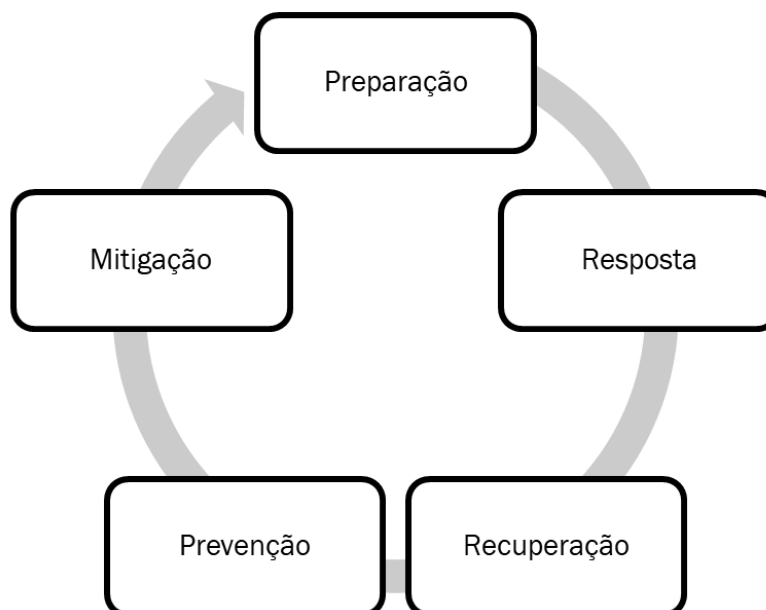
Em esfera nacional, a Defesa Civil atua no auxílio da gestão do ciclo de desastres, buscando reduzir os riscos dos impactos inerentes a população.

O ciclo de gestão dos desastres, pode ser dividido em cinco etapas principais, sendo a prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação. A etapa de prevenção visa impedir a ocorrência de um dado desastre ou evitar os impactos negativos nas comunidades. A fase de mitigação busca diminuir a

vulnerabilidade ao perigo em longo prazo, através de medidas como a realocação, políticas de zoneamento para controle de uso do solo, programas de educação, entre outras. Já a etapa de preparação, visa melhorar a capacidade da comunidade de reagir aos desastres, de modo a torná-las mais resilientes, por meio de ações como preparação de planos de emergência, monitoramento do perigo, adoção de medidas estruturais, como barragens, elevação de estruturas entre outras (CARTER, 2008; RAFAELI NETO, 2000).

Enquanto, a fase de resposta, concerne nas ações para socorrer e auxiliar as pessoas durante a ocorrência do evento, com intuito de reduzir perdas de bens materiais e de vidas. E por último, a fase de recuperação, busca restaurar as comunidades atingidas na volta aos níveis de normalidade. A Figura 3, ilustra as fases de gerenciamento de desastres naturais, na qual observa-se que as etapas não são lineares, tendo natureza cíclica (CARTER, 2008; RAFAELI NETO, 2000).

Figura 3 – As Fases de Gerenciamento de Desastres Naturais.



Fonte: Adaptado de Carter (2008).

2.4 CENÁRIO ATUAL DE ESTUDOS SOBRE IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DE INUNDAÇÕES

Para este tópico, foi realizada uma busca no portal de periódicos da CAPES com intuito de averiguar sobre o cenário de estudos que utilizaram do

modelo HEC-FDA, bem como estudos nacionais que buscaram avaliar quantitativamente os impactos socioeconômicos de inundações. As buscas foram efetuadas nos meses de abril e dezembro de 2020 e complementadas em agosto de 2022, totalizando nove estudos com aplicação do HEC-FDA e treze estudos produzidos no cenário nacional, que abordaram sobre a estimação dos danos econômicos provenientes de inundações. Vale salientar, que na busca realizada outros estudos foram encontrados abordando sobre o HEC-FDA, porém, sem a aplicação do programa.

Ressalva-se, que foram utilizadas as seguintes palavras-chaves, em português, nas buscas: HEC-FDA, impactos socioeconômicos, inundações, enchentes, avaliação de danos, prejuízos, valoração e curvas de danos, de modo que foi utilizada uma combinação de ao menos duas palavras por busca, exceto para as pesquisas com a palavra-chave HEC-FDA, conforme demonstra a Tabela 1. Além disso, salienta-se que a pesquisa 1 foi complementada com buscas no google acadêmico, assim como nos periódicos *ScienceDirect* – *Elsevier*, *SpringerLink* e *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI).

Tabela 1 – Palavras-chaves utilizadas nas pesquisas realizadas no portal de periódicos da CAPES.

Pesquisa	Palavra-Chave 1	Palavra-Chave 2
1	HEC-FDA	-
2	Inundação	Impactos Socioeconômicos
3	Inundação	Prejuízos
4	Inundação	Danos Econômicos
5	Inundação	Avaliação de danos
6	Inundação	Curvas de danos
7	Inundação	Valoração
8	Enchente	Impactos Socioeconômicos
9	Enchente	Prejuízos
10	Enchente	Danos Econômicos
11	Enchente	Avaliação de danos
12	Enchente	Curvas de danos
13	Enchente	Valoração

Fonte: Autor (2022).

Quanto aos estudos que aplicaram o HEC-FDA para avaliação dos danos econômicos de inundação, evidencia-se que não foram encontrados estudos aplicados em bacias hidrográficas do Brasil. Entretanto, observou-se pesquisas brasileiras que citaram o modelo FDA, contudo sem aplicá-lo (ALMEIDA, 2020; BATISTA, 2021).

Isto posto, observa-se que o modelo FDA já foi aplicado na cidade de Peso da Régua em Portugal, sendo avaliado o dano anual esperado para área de estudo, considerando apenas o cenário sem aplicação de medidas de mitigação. Neste estudo, foram utilizados diferentes tipos de ocupação, sendo consideradas as categorias residências, comerciais e edifícios públicos. A valoração das estruturas foi realizada através de pesquisas a campo e em agências imobiliárias locais (CUNHA E TAVARES-PINTO, 2011). Outro estudo, utilizou de abordagem similar a descrita, sendo aplicado na bacia do rio Neka, localizada no Irã (MOHAMMADI, NAZARANHA e MEHRDADI, 2014).

Em prosseguimento, Qi e Altinacar (2011) realizaram uma comparação entre os resultados obtidos com a aplicação combinada dos modelos HEC-RAS e HEC-FDA, com os modelos CCHE2D-flood e *Decision Support System* (DSS), considerando cenários com alta densidade populacional, baixa densidade populacional e com áreas de comércio industrial, em bacia situada no estado da Georgia, Estados Unidos. De maneira que observaram resultados com estimativas de danos próximas e precisas, sendo a principal diferença que a segunda combinação de modelos permite a estimativa das perdas de vida decorrentes dos eventos simulados.

Adiante, identificou-se estudo com aplicação do HEC-FDA, que avaliou o desempenho do plano de gerenciamento de inundações do Projeto Brantas, referente a cidade de Surabaya na Indonésia. Esta pesquisa buscou comparar três alternativas existentes para o projeto, utilizando de três planos distintos no FDA, referentes a diferentes conformações do canal de estudo. A análise de risco foi efetuada para determinar a melhor alternativa entre os três planos em comparação com a condição sem aplicação de medidas mitigadoras (MAS, 2015).

O HEC-FDA já foi aplicado para avaliação de medidas estruturais na redução dos impactos, sendo aplicado em uma bacia da Coreia do Sul, onde

verificou-se o efeito da construção de barragens para o controle de enchentes na área. Este estudo considerou cinco planos diferentes, com cenários de barragens para projetos de 50, 80, 100, 150 e 200 anos de tempo de retorno, sendo que obtiveram os danos anuais esperados para cada cenário e posteriormente, avaliaram o custo-benefício de cada barragem projetada (LEE et al., 2015).

Existem estudos que utilizaram do FDA para avaliar os danos anuais esperados, para cenários de mudanças climáticas. O modelo foi aplicado no estado da Califórnia nos Estados Unidos, com intuito de avaliar o desempenho dos sistemas de gestão de inundações sob o viés de incertezas climáticas, considerando quatro planos de estratégia de gestão distintos, sendo avaliado os riscos climáticos, com base nos resultados do EAD de cada plano (DIFRANCESCO, GITELMAN e PURKEY, 2020).

De modo similar, tem-se estudo que realizou análise referente aos danos anuais causados por inundações em uma bacia hidrográfica, localizada no Vietnã Central, considerando os efeitos das mudanças climáticas nos impactos gerados. Este estudo considerou um cenário futuro, bem como diferentes categorias de danos, sendo utilizadas as categorias residenciais, agrícola, de irrigação, de infraestrutura e industrial (VAN DAU, KUNTIYAWICHAI e PLERMKAMON, 2017).

Por fim, identificou-se estudo que aplicou o FDA na bacia Tehran-Karaj, localizada no Irã, sendo aplicado o modelo HEC-RAS para modelagem hidrodinâmica, enquanto, a avaliação dos danos econômicos visou comparar as estimativas de perda entre os rios Darband, Golab Darreh e no canal Maghsoud Beyk, considerando as categorias de danos residencial e comercial (MOOSAKHAANI, SALIMI e SADATIPOUR, 2020). Outra pesquisa efetuada na mesma região do Irã supracitada, buscou avaliar os danos econômicos de inundações para diferentes cenários de medidas de mitigação, com uso do modelo FDA. De maneira que consideraram cenário sem aplicação de medidas de contenção e mais três cenários com diferentes conformações de aplicação da medida mitigadora de seguros contra enchentes (MOOSAKHAANI, et al., 2021).

No cenário nacional, ressalta-se que não foi encontrado nenhum estudo com utilização do modelo, porém, outras metodologias para quantificação de impactos de inundações foram encontradas na base de dados do portal da CAPES.

Uma das metodologias identificadas para avaliação de danos de inundações, foi aplicada no município de Itajubá/MG. O método consiste na elaboração de curvas de danos de inundação versus a profundidade de submersão, sendo obtidos os danos diretos causados por inundações para os níveis de profundidade atingidos. No estudo em questão, destaca-se que os setores habitacionais foram utilizados como unidade de domínio do problema, enquanto, os dados foram obtidos por meio de amostragem a campo com aplicação de questionários nas comunidades, abordando questões como classe social, as características da habitação, o conteúdo das residências e os danos causados por inundações (MACHADO et al., 2005).

Outra metodologia foi aplicada no município do Rio de Janeiro/RJ, a qual consistiu na proposição de um modelo para estimar os prejuízos de inundações, considerando os benefícios de diferentes aplicações de medidas mitigadoras. Neste trabalho, a metodologia consistiu no cálculo do valor esperado anual, através de curvas de probabilidade-danos, e posteriormente, foram adotados indicadores econômicos para avaliar o custo-benefício de cada medida proposta (NAGEM, 2008).

Adiante, tem-se estudo que avaliou os prejuízos causados por inundações no município de Cruzeiro do Sul/RS para dois eventos distintos, com base nos formulários de avaliação de danos (Avadan's) elaborados pela Defesa Civil. O estudo observou os locais mais atingidos e quantificou os danos materiais, econômicos, ambientais e sociais sobre as populações atingidas pelos eventos avaliados (ALVES et al., 2013). Nota-se que os dados provenientes do AVADAN, foram igualmente utilizados em estudo para valoração dos danos em São Luiz do Paraitinga/SP, sendo utilizada a metodologia DaLa - Damage and Loss Assessment (CORSI, AZEVEDO e GRAMANI, 2012).

Uma abordagem diferente foi observada em estudo realizado no município de Belo Horizonte/MG, na qual avaliou-se os danos decorrentes as

edificações originadas por inundações, através de levantamento de campo na área de interesse. Desta maneira, foi realizada vistoria nas residências e identificado os danos causados, possibilitando a elaboração de orçamentos para estimar o custo de recuperação dos danos pelos eventos de inundação nas estruturas (JONOV, NASCIMENTO e SILVA, 2013).

Outro estudo foi aplicado no município de Lajeado/RS, visando a estimação dos danos anuais esperados de inundações, considerando cenários com aplicação de medidas mitigadoras e sem medidas. O estudo utilizou uma atualização da metodologia proposta por Tachini (2010), aplicada no município de Blumenau/SC. Deste modo, o trabalho realizou a estimação de danos através de equações separadas em quatro tipologias, sendo, os danos a edificações, ao conteúdo das edificações, os custos de limpeza e os decorrentes aos dias não trabalhados, com o somatório de todos resultando nos prejuízos estimados para um dado evento (FADEL, 2015).

Esta metodologia foi replicada para avaliação dos danos provenientes de inundações nos municípios de Montenegro/RS e na Bacia do Rio Caí, situada nos municípios de São Sebastião do Caí/RS e de Montenegro/RS (SILVA, 2015; SILVA, 2019).

No mais, identificou-se estudo que avaliou os danos materiais causados na saúde pública e na sociedade em virtude de inundações no Brasil. De modo que utilizaram de dados secundários, provenientes de duas bases de dados distintas, a EM-DAT, base de nível global, e a S2iD, base nacional (MINERVINO e DUARTE, 2016).

Por fim, o trabalho aplicado no município de Cabo de Santo Agostinho/PE, utilizou como metodologia uma combinação das metodologias propostas por Nagem (2008) e Machado et. al (2005), para analisar os danos de inundações na área de estudo (BATISTA, RIBEIRO NETO e COUTINHO, 2020). De modo similar estudos realizados em bacias dos estados de Belo Horizonte (ALMEIDA, 2020) e Pernambuco (BATISTA, 2021) adotaram adaptações das metodologias propostas por USACE (2003) e Nagem (2008), respectivamente, para estimativa de danos dos eventos de inundações.

2.5 O Modelo HEC-FDA

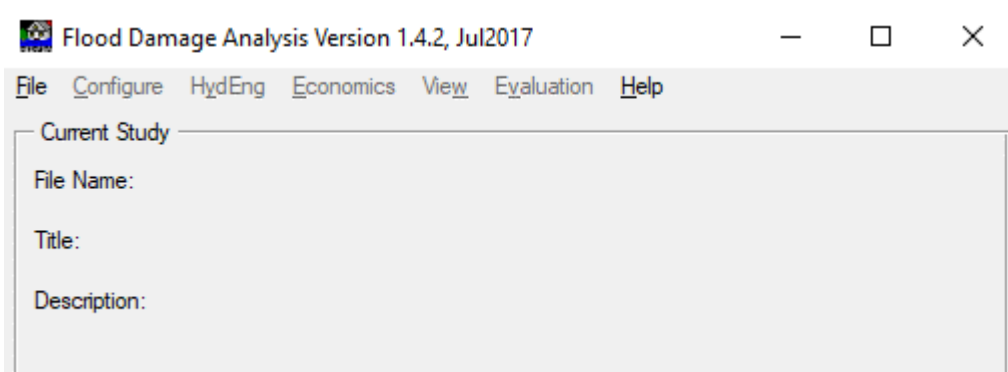
O modelo HEC-FDA (*Hydrologic Engineering Center's Flood Damage Reduction Analysis*) está implementado em um programa desenvolvido pela *U.S. Army Corps of Engineers*, que permite a formulação de planos de mitigação e sua avaliação na redução de danos de inundação, possibilitando a estruturação de estudos para áreas de interesse com recorrência do problema. O FDA possibilita a avaliação tanto dos danos econômicos de inundações como a análise hidrológica, de modo a integrar as duas. O modelo possui três tipos de avaliações principais, que são os danos anuais esperados (EAD), o desempenho do projeto de mitigação por ano de análise e os danos anuais equivalentes (USACE, 2016a).

Por tratar-se de modelo da família HEC, o FDA possibilita o acoplamento entre os demais modelos pertencentes a referida organização, como o modelo hidrológico HEC-HMS e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, de modo que os resultados obtidos em um modelo, podem alimentar as simulações dos outros aplicativos.

O programa permite a definição de um cenário base, onde é considerada a situação sem nenhum tipo de medida de mitigação, como também, o acréscimo de cenários alternativos onde medidas de mitigação são adotadas, como exemplo, a elevação de estruturas, implantação de barragens, o seguro contra enchentes, entre outras. Desta maneira, o aplicativo analisa os danos para cada cenário estabelecido, permitindo a fixação de um ano base e um ano futuro, onde os danos são estimados com as devidas projeções monetárias.

A Figura 4 mostra a interface do programa, que se divide em quatro etapas principais, sendo a configuração do estudo, inserção dos dados hidrológicos (*HydEng*) e dos dados econômicos (*Economics*), bem como o campo para simulação do projeto (*Evaluation*).

Figura 4 - Interface do HEC-FDA.



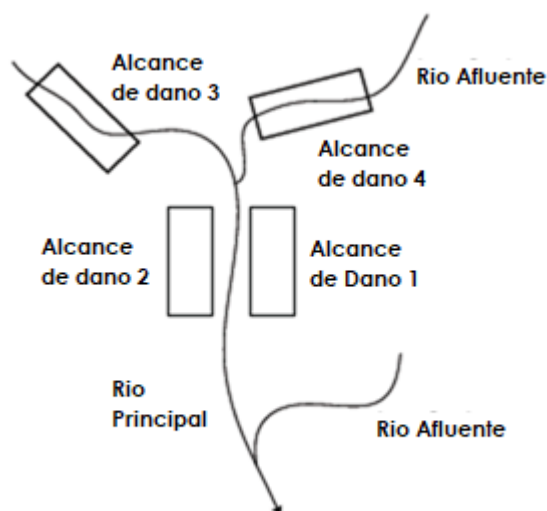
Fonte: Autor (2021).

Deste modo, na configuração, o layout do estudo físico é definido em conjunto com os planos e anos de análise. Além disso, as áreas de alcance de danos (*Damage Reaches*) são estabelecidas, as quais são áreas geográficas específicas dentro da planície de inundação, utilizadas para definir dados consistentes para as avaliações de planos e agregar informações sobre estruturas e danos potenciais, sendo delimitadas pelo começo e término de seções transversais ao longo do curso hídrico, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

A configuração dos dados hidrológicos, é realizada através da entrada dos resultados obtidos na modelagem hidrodinâmica, com a inserção do perfil de água superficial gerado nas simulações, para os diferentes períodos de retorno.

Na configuração dos dados econômicos são definidos todos os parâmetros para avaliação dos planos, como a definição das categorias de dano, tipo de ocupação das estruturas, inclusão do inventário das estruturas. Deste modo, toda a manipulação dos dados econômicos do estudo é realizada nesta área do programa.

Figura 5 - Conceito dos Alcances de Danos (*Damage Reaches*).



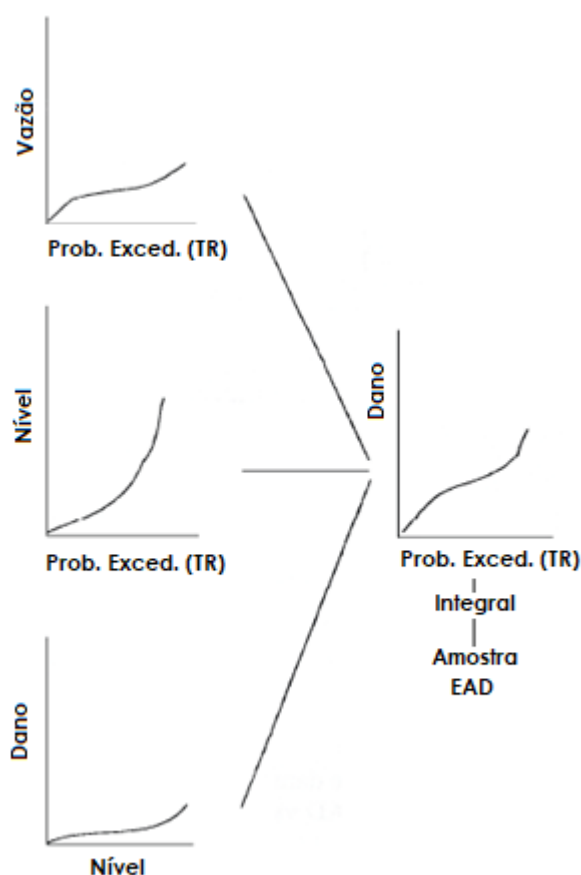
Fonte: Adaptado USACE (2016a).

O modelo realiza o cálculo dos danos anuais esperado (EAD) através da combinação da função de probabilidade de excedência da vazão, da função de nível-vazão e da função de nível-danos. A junção das curvas geradas, resultam em uma curva de probabilidade de excedência versus danos causados, que é acoplada na obtenção dos danos esperados anualmente.

A incerteza proveniente dos processos de geração da probabilidade de excedência da vazão, da função de cota-vazão e cota-danos causadas são quantificadas e incorporadas dentro dos cálculos econômicos e de engenharia.

O processo utiliza da simulação de Monte Carlo, um procedimento de análise numérica que calcula o valor de dano esperado e considera também a incerteza associada aos parâmetros base usados na determinação dos danos de inundações. Basicamente, a simulação gera várias configurações para as curvas citadas, sendo que após inúmeras iterações realizadas, obtém-se resultados satisfatórios para o dano anual esperado dentro da simulação. A Figura 6, demonstra o procedimento descrito pelos parágrafos anteriores.

Figura 6 - Simulação de Monte Carlo para estimação do EAD.



Fonte: Adaptado USACE (2016a).

Quanto aos dados necessários para simulação, tem-se que o HEC-FDA necessita de informações hidrológicas e econômicas para realizar as análises de danos dos cenários propostos.

Deste modo, na parte hidrodinâmica, são necessários os dados do perfil do canal superficial, que podem ser obtidos através de simulações em 1D no *software* HEC-RAS, sendo preciso a introdução de um perfil com oito tempos de retornos distintos para determinado plano de mitigação.

Já na parte econômica, as principais informações necessárias são a definição do tipo de estrutura, o valor das estruturas, nível da estrutura, altura de elevação, profundidade de início de danos, curvas de profundidade-danos percentuais. O programa permite a inserção de informações opcionais, como o valor do conteúdo das estruturas, outros valores associados a estrutura, as coordenadas geográficas, imagens da estrutura, entre outras.

Além disso, observa-se que o FDA possui as seguintes limitações e considerações para performance:

- a) Máximo de inclusão de 20 categorias de danos;
- b) Os anos de análise são limitados ao máximo de dois períodos, sendo obrigatório a definição de um ano base, e tem-se a possibilidade de inserir um ano futuro;
- c) Número de estruturas para o inventário limitado até 500.000 estruturas;
- d) Número de áreas de danos limitados a 200;
- e) Uma determinada estrutura pode ser associada somente com um único plano;
- f) A quantidade de áreas de danos não interfere na computação da função agregada de nível-danos, porém, exige um maior esforço computacional;
- g) Uma maior quantidade de estruturas aumenta a computação da função agregada de nível danos, mas não afeta a performance do EAD;
- h) Uma maior quantidade de cursos hídricos, categorias de dano, tipos de ocupação e módulos não afetam o tempo de computação;
- i) Executa apenas a valoração econômica, de modo que não inclui outros impactos de inundações, como perdas de vidas, danos no meio ambiente, danos em plantações, danos sociais e culturais, entre outros;
- j) Não possui a capacidade de avaliar se uma estrutura colapsa, devido a velocidade da inundação;
- k) Não executa a espacialização das estruturas, bem como dos resultados obtidos;

2.6 VULNERABILIDADE SOCIAL E INUNDAÇÕES

A vulnerabilidade social, pode ser definida como uma medida de sensibilidade de uma determinada população aos perigos naturais e sua capacidade em responder e recuperar-se aos impactos causados (CUTTER e FINCH, 2008).

A determinação da vulnerabilidade social pode ser realizada com base em características socioeconômicas, como a idade, renda, gênero, educação e naturalidade (Goerl, Kobiyama e Pellerin, 2011). Deste modo, a vulnerabilidade de uma área a inundações pode ser compreendida como uma combinação de

fatores socioeconômicos e ambientais, podendo ser muito variável de uma região para outra (KABLAN, DONGO e COULIBALY, 2017).

Dentro disso, a vulnerabilidade social evidencia as diferenças na capacidade humana de se preparar, responder e recuperar-se de desastres naturais (DE LOYOLA HUMMELL, CUTTER e EMRICH, 2016). Portanto, tem-se que uma boa compreensão da vulnerabilidade de comunidades às inundações são essenciais para fornecer uma abordagem mais justa na hora de priorizar os esforços para gerir os riscos de inundações (SAYERS, PENNING-ROWSELL e HORRITT, 2018).

Além disso, a determinação da vulnerabilidade social pode contribuir para quantificar o risco de exposição de comunidades e o grau de danos gerados, bem como auxiliar na recuperação das comunidades mais vulneráveis, que precisam de maior ajuda após os eventos. Nesta senda, os locais com alta vulnerabilidade tendem a possuir baixos níveis de resiliência (BERGSTRAND et al., 2015).

Os indicadores de vulnerabilidade social podem ser utilizados para identificar as populações mais suscetíveis às inundações com base em dados sociodemográficos, sendo observado que a vulnerabilidade social tem papel importante nos prejuízos materiais e de vidas, decorrentes dos eventos de inundações (TELLMAN et al., 2020).

Considerando as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do índice de vulnerabilidade, destaca-se estudo elaborado por Moreira e Kobiyama (2021), o qual avaliou o panorama de estudos que aplicaram índices de vulnerabilidade no Brasil, sendo identificados 21 artigos, no período de 2006 a 2019. Observa-se que estes artigos utilizaram de diferentes métodos para criação do índice.

Nesta senda, nota-se a metodologia proposta por Marcelino, Nunes e Kobiyama (2006), que utiliza de dados censitários do IBGE para composição do índice, a qual foi adaptada para utilização em diferentes estudos (GOERL, KOBİYAMA e PELLERIN, 2011; SOUZA *et al.* 2014; MALAGODI E PELOGGIA, 2015; REIS *et al.*, 2016; MOREIRA, BRITO e KOBİYAMA, 2021). Vale salientar que estes estudos utilizaram o método de normalização por Mín-Max, bem como a ponderação é empregada por pesos iguais.

Estudos sobre a vulnerabilidade em áreas urbanas são um importante instrumento para apontar as áreas mais suscetíveis a desastres e onde há um comprometimento na qualidade de vida da comunidade residente (CHAVES, TAVARES e ANDRADE, 2018).

Assim, tem-se estudo aplicado no município do Rio de Janeiro/RJ, no qual adotou-se um índice para medir a capacidade de recuperação socioeconômica em áreas urbanas atingidas por inundações, através de uma abordagem multicritério. O estudo teve o intuito de identificar as áreas prioritárias de intervenção, onde habitam as comunidades mais vulneráveis, evitando assim a tendência de priorizar as áreas com maior montante de prejuízos gerados, que muitas vezes correspondem as populações de classes mais altas, que possuem maior capacidade de recuperar-se sozinhas (RESENDE et al., 2020).

Dentro disto, pontua-se que a escolha das variáveis para estabelecer as áreas de vulnerabilidade dentro de um município é de valiosa importância, inclusive podem auxiliar o poder público a agir com melhor eficácia na prevenção e planejamento de ações durante o evento, reduzindo as perdas humanas e econômicas (REIS et al., 2016).

As edificações de alta vulnerabilidade, podem ser consideradas como sendo aquelas com infraestrutura precária, geralmente de madeira, e localizadas em cotas menores, com fácil alcance do nível da água sobre a estrutura (OLIVEIRA et al., 2013). Observa-se que os eventos de inundação podem impactar a saúde pública, podendo causar danos nas redes de distribuição de água, hospitais e postos de saúde, bem como gerar epidemias e proliferações de doenças e causar danos psicossociais nas populações das comunidades afetadas (LONDE et al., 2015). Neste sentido, o conceito de vulnerabilidade associado com a saúde coletiva, demonstra, que populações mais vulneráveis tendem a possuir maiores riscos de ocorrência de doenças, lesões ou mortes, devido a eventos de inundação, prejudicando sua qualidade de vida (FREIRE, BONFIM e NATENZON, 2014).

Por fim, a Figura 7 apresenta um mapa mental que engloba os conceitos abordados até aqui, de modo a integrar as ideias discutidas. Dessa forma, o

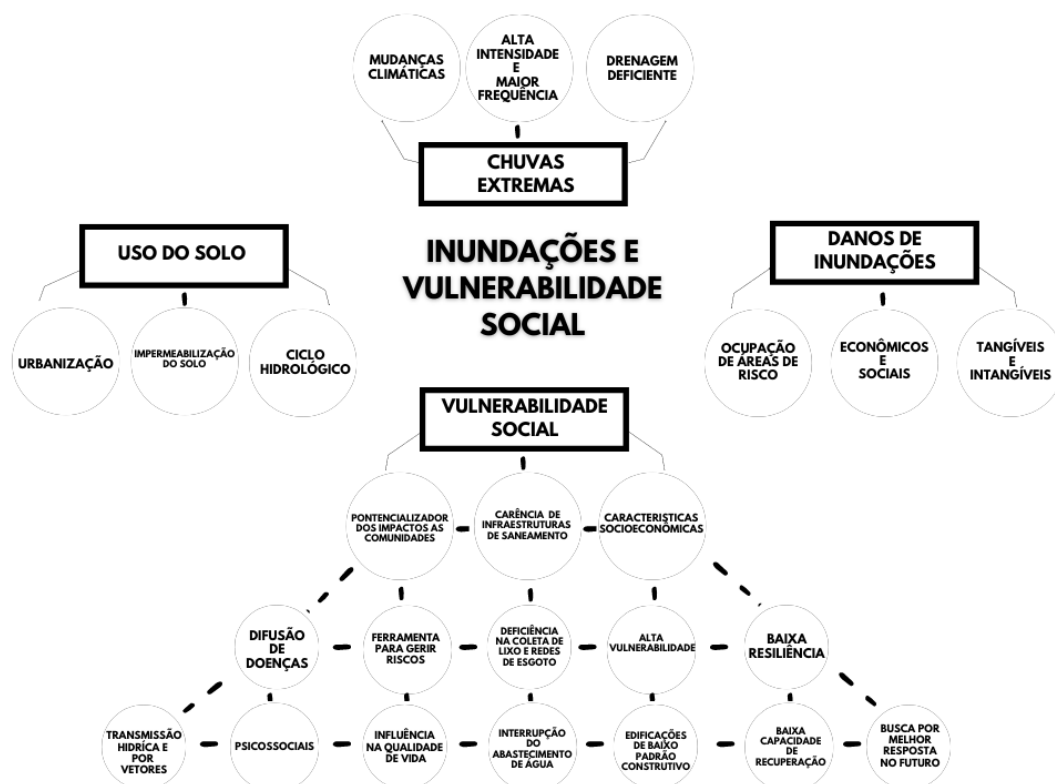
mapa pode ser associado com a teoria dos sistemas apresentada por Rafaeli Neto (2000).

O primeiro princípio de que “um sistema é composto por coisas simples ou compostas com componentes que interagem”, o segundo, que se refere “ao estado do sistema poder ser mapeado pelo estados das variáveis de articulação”, e o terceiro de que “o comportamento do sistema emerge do comportamento e das interações de seus componentes”, convergem com a conexão entre as interações nas camadas principais do mapa, onde, os fatores do uso do solo interferem nas chuvas extremas, que por sua vez, combinados convergem para os danos as inundações, que estão ligados com a vulnerabilidade social, no sentido de potencializar o risco em comunidades mais vulneráveis, na ocorrência de inundações.

Abrindo a questão da vulnerabilidade social, o mapa foi bifurcado em níveis que podem ser associados com o quarto princípio da teoria, no qual “eventos externos desencadeiam a propagação de eventos dentre os componentes via variáveis de estado de articulação”, referente aos itens da segunda camada, como exemplo a difusão de doenças que vai desencadear todos os componentes da camada inferior.

Já o quinto, no qual “o comportamento do sistema deve ser estudado com relação a um dado conjunto de eventos externos”, por ser relacionado com o fato de que a ocorrência de alguns dos componentes das camadas estão condicionadas a acontecer, apenas se houver um estímulo externo, como as elevadas precipitações, ou seja, nessa situação o sistema só vai responder com o acontecimento de determinado estímulo.

Figura 7 - Mapa Mental sobre inundações e vulnerabilidade social.



Fonte: Autor (2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO

O estudo possui como local de interesse o município de Lages/SC, escolhido devido aos recorrentes eventos de inundação que geram impactos negativos sobre seus habitantes, com registros de 20 eventos de cheias significativos, entre o período de 1979 a 2017 (LIZ, 2018).

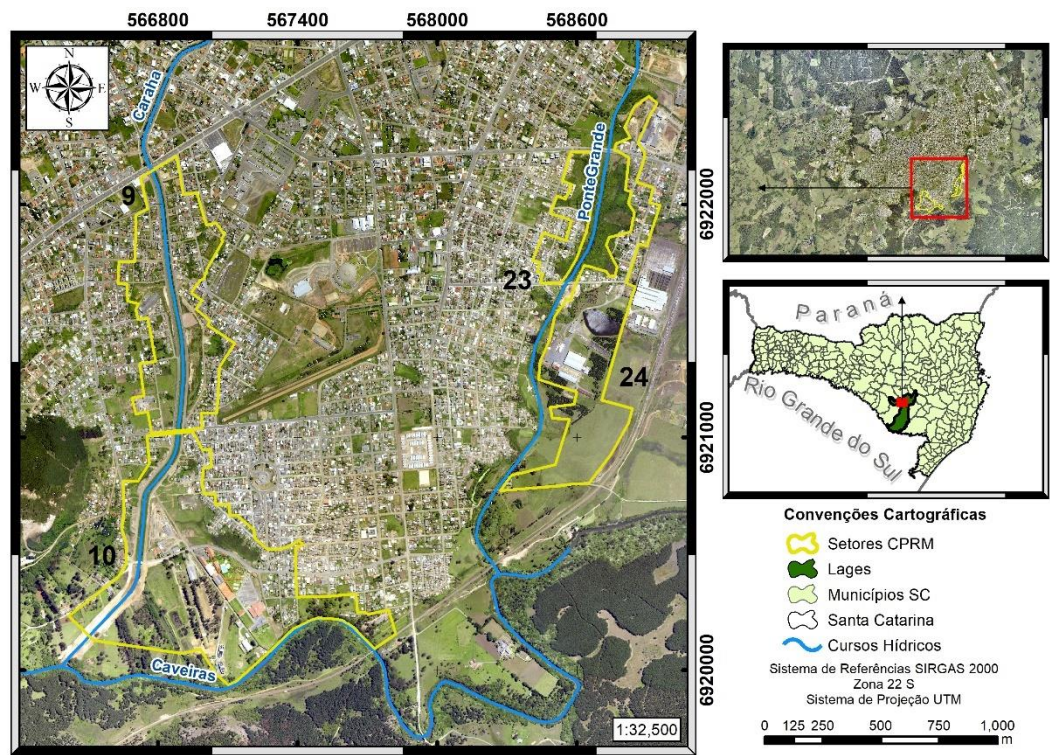
Considerando as características demográficas do município, conforme dados do IBGE (2021), Lages possui uma população estimada em 157.158 pessoas, com IDHM de 0,77, extensão territorial de 2.637,66 km², bem como está situada no planalto serrano do estado.

O clima, conforme classificação de Köppen é do tipo Cfb caracterizado temperado, com temperatura média no mês mais frio menor que 18° C e no mês mais quente inferior a 22°C, e com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, sem estação de seca (WREGGE et al., 2012).

Deste modo, inicialmente, para seleção das áreas de interesse do estudo, foram pré-selecionadas as áreas correspondentes aos setores 9, 10, 23 e 24, propostos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), para aplicação da análise de risco dos impactos causados por inundações.

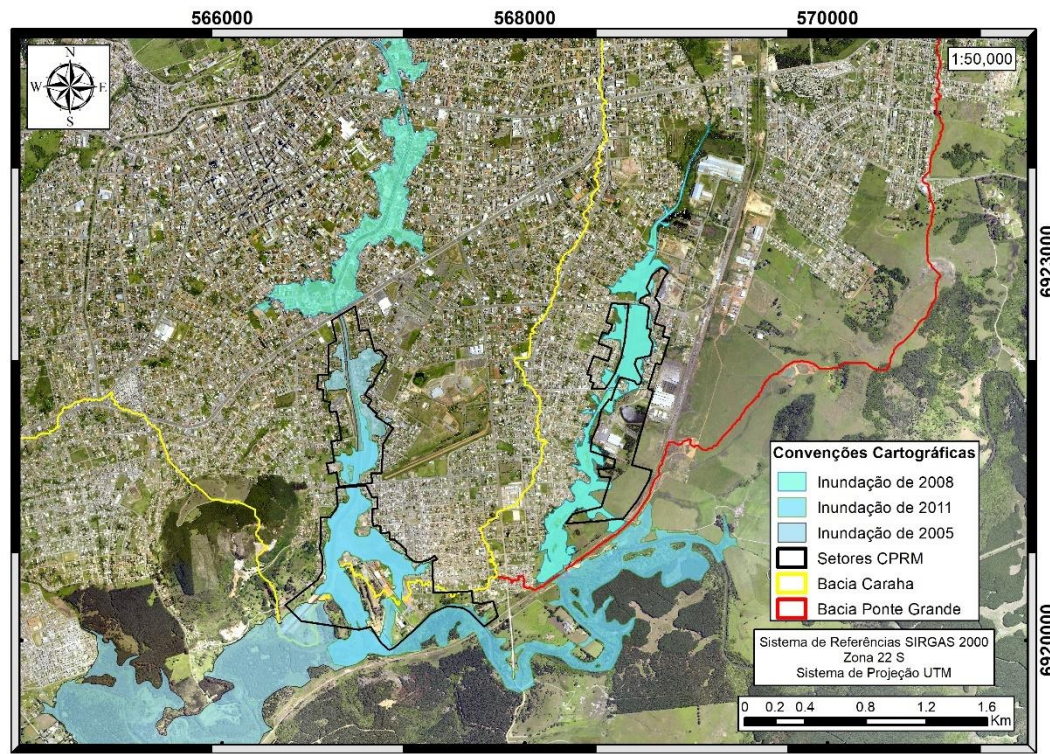
A Figura 8 apresenta o mapa de localização desses setores, os quais compreendem dentro de seus limites os bairros Habitação e Caça e Tiro (Setor 10), Ferrovia e Várzea (Setor 24), Vila Nova e Universitário (Setor 9) e Popular (Setor 23). A Figura 9 mostra as manchas de inundações dos eventos registrados em 2005, 2008 e 2011, disponíveis na base de dados do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Ambiental do CAV/UDESC – LABHIDRO, sendo estas informações geradas pelo município de Lages. Assim sendo, percebe-se que as áreas pré-selecionadas foram atingidas por estes eventos.

Figura 8 - Mapa de Localização do Setores CPRM 9, 10, 23 e 24.



Fonte: Autor (2022).

Figura 9 – Manchas de inundações dos eventos de 2005, 2008 e 2011, no município de Lages/SC.



Fonte: Autor (2022).

Esses setores foram escolhidos por serem classificados pela CPRM, com grau alto de vulnerabilidade e grau muito alto de risco aos processos de inundações. A região do setor 10 está sujeita a inundações provenientes do Rio Carahá e do Rio Caveiras (Figura 8), caracterizadas, respectivamente, por ocorrerem de forma mais brusca e de modo mais gradual. O setor 9 está situado na planície de inundação do rio Carahá e as inundações ocorrem de forma brusca (LAMBERTY; MENDONÇA, 2018).

Já nos setores 23 e 24, as inundações são provenientes do Rio Ponte Grande (Figura 8) e ocorrem de forma brusca e com alta energia. É perceptível que todos os setores se situam dentro da planície de inundação do município.

A insuficiência das redes de macro e micro drenagens pluviais existentes nas áreas durante os picos de cheias, resulta que as comunidades residentes nesses locais ficam suscetíveis aos eventos de inundações. Assim, estima-se para os setores, um total de 1.261 imóveis e 5.044 pessoas em zona de risco, distribuídas da seguinte maneira: a) para o setor 9, 485 imóveis e 1.940 pessoas; b) para o setor 10, 344 imóveis e 1.376 pessoas; c) para o setor 23, 108 imóveis e 432 pessoas; d) para o setor 24, 324 imóveis e 1.296 pessoas em zona de risco (LAMBERTY; MENDONÇA, 2018).

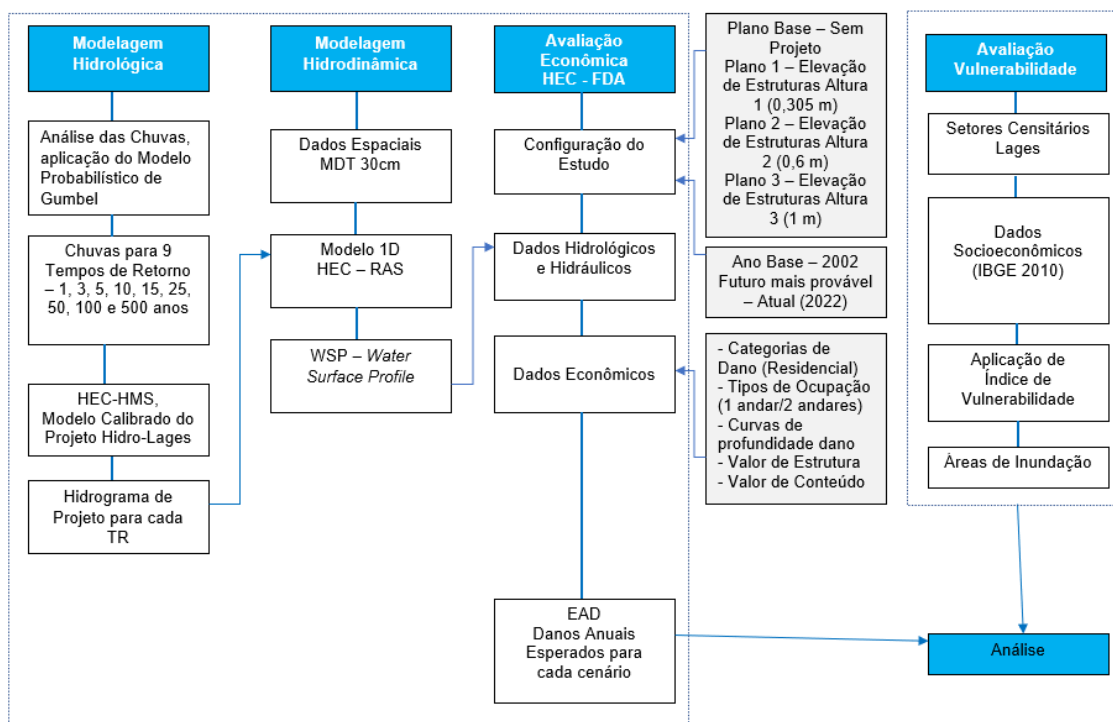
Ademais, cabe pontuar sobre a metodologia utilizada pela CPRM para setorização. O trabalho de setorização consiste em três etapas, sendo elas: 1ª) a coleta de informações prévias, em especial, sobre as características geológicas e histórico de ocorrência de desastres naturais, entre outras; 2ª) Realizadas as atividades de campo nas áreas, onde, segundo a defesa civil municipal, há histórico de ocorrência de desastres naturais ou que estão situadas em zona de risco, sendo que em relação aos casos de enchentes e inundações, verificam a frequência dos eventos nos últimos cinco anos, bem como aplicam a classificação proposta pelo Ministério das Cidades e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas; 3ª) Consiste na definição e descrição de áreas de risco geológico alto e muito alto, sendo estas áreas denominadas setor de risco (LAMBERTY; MENDONÇA, 2018).

Sobre a classificação proposta pelo Ministério das Cidades e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2007), destaca-se que o grau de risco é determinado conforme a presença de certos parâmetros na área avaliada, e pode variar de risco baixo (R1) até risco muito alto (R4). Por conseguinte, pontua-se que as áreas de alto risco são aquelas onde a drenagem ou compartimentos de drenagem estão sujeitos a processos com alto potencial de causar danos, bem como possuem alta frequência de ocorrência, com pelo menos três eventos significativos em cinco anos, e envolvendo moradias com alta vulnerabilidade.

3.2 ETAPAS DO PROJETO

A Figura 10 apresenta o fluxograma das etapas seguidas para a execução do trabalho, identificando os procedimentos necessários de cada fase principal. Isto posto, tem-se o início com as modelagens hidrológica e hidrodinâmica, prosseguindo para a avaliação econômica através do HEC-FDA, e posterior caracterização social, findando para a análise dos resultados obtidos por meio de constatações e análises.

Figura 10 - Fluxograma do Projeto.



Fonte: Autor (2021).

3.2.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica do estudo tem o objetivo de calcular os hidrogramas de entrada na área das bacias de interesse, de modo, que foram gerados nove hidrogramas, referentes a nove tempos de retornos distintos, necessários para o prosseguimento do estudo. Assim, optou-se por utilizar o método das chuvas máximas de 1 dia de duração, por meio do modelo probabilístico de Gumbel, para estimativa da chuva de projeto para cada TR. Considerando o Hidrograma de Projeto, optou-se por utilizar o software HEC-HMS (USACE, 2016c), para transformação da chuva-vazão nos sistemas de bacias hidrográficas de interesse.

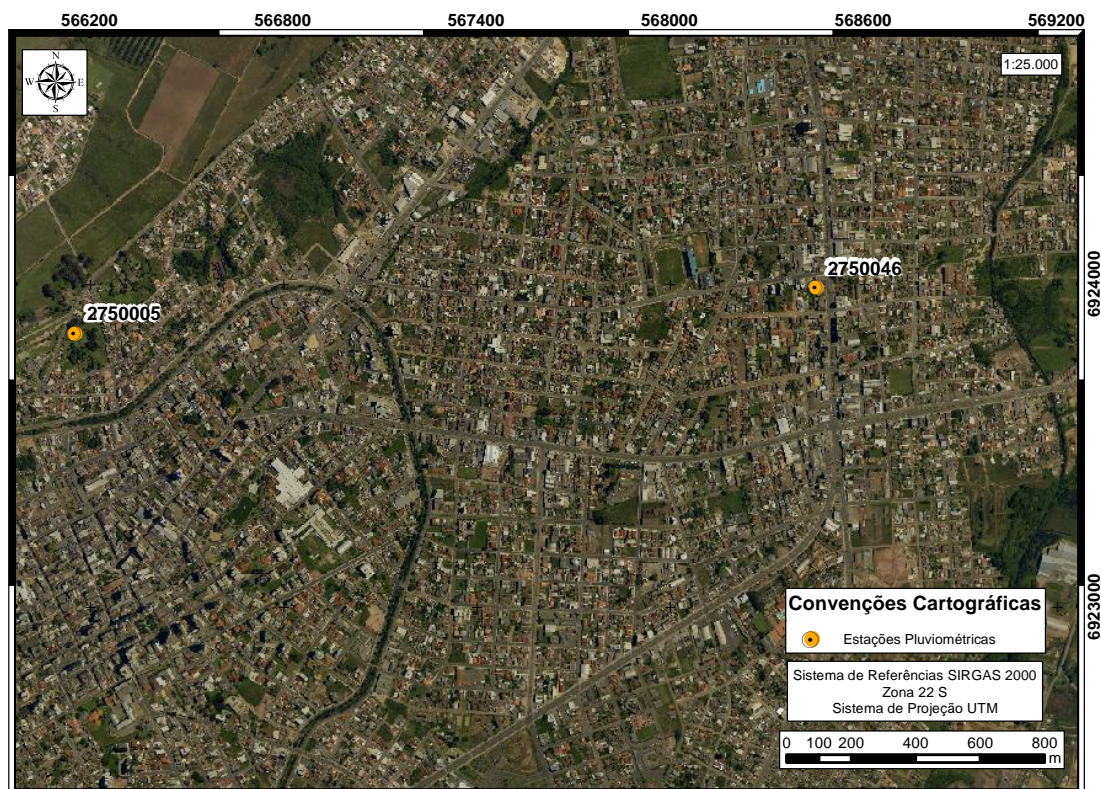
Neste sentido, tem-se que a maioria dos eventos hidrológicos extremos que ocorrem em Lages estão associados às chuvas máximas diárias, de maneira que foram analisadas as chuvas máximas diárias de 5, 7, 9, 14 e 30 dias de duração. Estes períodos foram pré-selecionados considerando como referências os eventos de 2005, 2017 e 1983.

Entretanto, para prosseguimento das etapas seguintes do estudo, optou-se por utilizar as chuvas de 5 (cinco) dias de duração, por já terem sido estudadas no município, bem como por diversos eventos de inundações estarem relacionados a este tipo de evento. Além disso, foi considerado que o modelo de Gumbel adere bem para as chuvas de 1 a 5 dias de duração (RAFAELI NETO, 2021).

Deste modo, foi utilizada a base de dados proveniente do Laboratório de Hidrologia – LABHIDRO do CAV/UDESC, a qual possui série de dados históricos de precipitação consistidos para o município de Lages (RAFAELI NETO, 2019a).

Assim sendo, foram utilizados os dados referentes a Estação Experimental da Epagri em Lages (Código 2750005, Coordenadas Geográficas: latitude -27°48'30", longitude -50°19'42"), que possui dados entre março de 1941 até março de 2014, e da Estação Coral (Código 2750046, Coordenadas Geográficas: latitude -27°48'25", longitude -50°18'18"), a qual compreende o período de abril de 2014 a junho de 2019, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Localização das estações pluviométricas.



Fonte: Autor (2022).

Sobre o intervalo da série histórica, para os anos de 1943, 1945, 1947, 1987 e 1990 foram observadas inconsistências nos dados observados, de modo que estes períodos foram descartados. Assim, tem-se uma amostra de 74 anos de dados de série histórica de precipitação.

A partir da série disponibilizada de dados de chuvas diárias, através de planilha eletrônica, foram acumuladas as chuvas diárias para os períodos de duração de 5, 7, 9, 14 e 30 dias. Posteriormente, com estes valores acumulados, foram selecionadas as máximas diárias, considerando as durações de 5, 7, 9, 14 e 30 dias, para cada ano da série histórica.

A partir disto, os eventos de precipitação observados foram organizados em ordem crescente, separadamente, para cada período de duração das chuvas máximas. Deste modo, foi calculado o Modelo Probabilístico de Gumbel (Equação 1), para as chuvas diárias máximas de 5d, 7d, 9d, 14d e 30d, sendo que os parâmetros do modelo, beta e alfa, foram calculados pelo Método dos Momentos (Equações 2 e 3, respectivamente).

$$P = 1 - e^{-e^{\frac{-(h_i - \alpha)}{\beta}}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * Sh \quad (2)$$

$$\alpha = \bar{h} - 0,5772 * \beta \quad (3)$$

onde:

P é a probabilidade de uma chuva ser igualada ou superada;

h_i é chuva observada em dado período i, em milímetros;

α e β são parâmetros do modelo, adimensionais;

S_h é o desvio padrão das chuvas máximas, em milímetros;

\bar{h} é a média de chuva das máximas, em milímetros.

Na sequência, foi calculada a Frequência Empírica por meio da equação de Kimbal (Equação 4), bem como o fator D (Equação 5) e o Tempo de Retorno (Equação 6), para as chuvas máximas acumuladas de 5d, 7d, 9d, 14d e 30d, para cada ano da série histórica.

$$F = \frac{m}{n + 1} \quad (4)$$

$$D = |P - F| \quad (5)$$

$$Tr = \frac{1}{P} \quad (6)$$

onde:

P é a Probabilidade de Gumbel;

F é frequência empírica acumulada;

D é o valor para o teste Kolmogorov-Smirnov;

Tr é o Tempo de Retorno de um dado evento, em anos;

m é o número da ordem de uma dada amostra;

n é o número total de amostras.

Posteriormente, com intuito de verificar se as séries de dados de chuvas máximas anuais de 5d, 7d, 9d, 14d e 30d se ajustavam à Distribuição de Gumbel, foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Deste modo, foi realizada a análise de D, onde comparou-se o valor do $D_{\text{máximo}}$ em

relação ao valor do $D_{\text{crítico}}$, este último obtido através da tabela com valores críticos de D para o teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo o número de amostras equivalente a 74 e o nível de confiança adotado em 1%.

Após a realização da análise das séries históricas, foram calculadas as chuvas de projeto para os Tempos de Retorno de 1, 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100 e 500 anos, através do Modelo Probabilístico Inverso de Gumbel (Equação 7), considerando as chuvas máximas com duração de 5 dias.

$$h = \bar{h} - Sh \{0,45 + 0,7797 * \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \} \quad (7)$$

onde:

h é chuva calculada para um dado Tempo de Retorno, em milímetros;

\bar{h} é a média das chuvas máximas de 5d, em milímetros;

S_h é o desvio padrão das chuvas máximas de 5d, em milímetros;

α e β são parâmetros do modelo, adimensionais;

TR é o Tempo de Retorno, em anos.

A seguir, com as chuvas de projeto calculadas, foi realizada a desagregação das chuvas máximas de 5d. Deste modo, considerando que as relações de desagregação para o estado de Santa Catarina, abrangem apenas chuvas de até 1 dia de duração (CETESB, 1986), optou-se por utilizar dos eventos observados como parâmetro para desagregação das chuvas máximas de 5d.

A metodologia adotada consistiu em avaliar os eventos observados de chuvas máximas de 5 dias de duração, com Tempo de Retorno equivalentes às chuvas de projeto calculadas. Exemplificando, para a chuva de projeto com TR de 3 (três) anos, foi selecionado um evento observado nas chuvas máximas de 5d com TR equivalente (3 anos), e a partir do comportamento de distribuição das chuvas desse evento foi realizada a desagregação da chuva de projeto.

Deste modo, foi calculado o percentual de chuvas em cada dia do evento observado, e utilizado este fator para distribuição da chuva de projeto no tempo, tendo como base o comportamento da distribuição de chuvas do evento observado, escolhido para um dado TR .

Este procedimento foi repetido para cada uma das chuvas de projeto, sendo que para as chuvas de projeto, em que não havia chuvas observadas equivalentes, utilizou-se da chuva observada com o tempo de retorno mais próximo da chuva de projeto em questão. Neste sentido, a Tabela 2 mostra os eventos selecionados para desagregação das chuvas de projetos de cada TR.

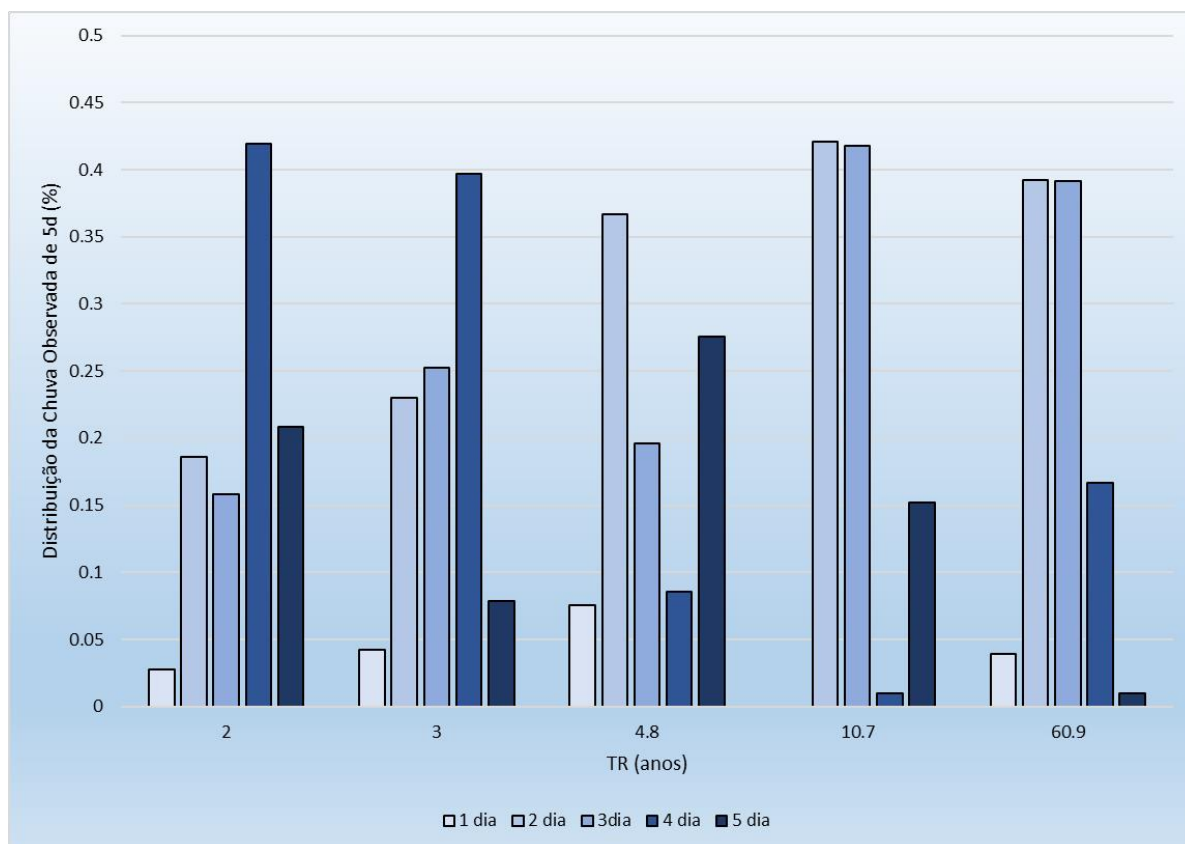
Tabela 2 – Eventos observados selecionados para desagregação das chuvas de projeto.

TR Chuva de Projeto (anos)	TR Chuva Observada (anos)	Evento de Chuva observada selecionado
1	2	24/09/2015 à 28/09/2015
3	3	21/12/1968 à 21/12/1968
5	4,8	13/01/1996 à 17/01/1996
10	10,7	17/05/2005 à 21/05/2005
15	10,7	17/05/2005 à 21/05/2005
25	10,7	17/05/2005 à 21/05/2005
50	60,9	31/01/1997 à 04/02/1997
100	60,9	31/01/1997 à 04/02/1997
500	60,9	31/01/1997 à 04/02/1997

Fonte: Autor (2022).

A Figura 12 mostra a distribuição temporal das chuvas selecionadas, de modo que demonstra o percentual de chuva para cada dia de duração, para um dado evento observado.

Figura 12 – Distribuição da Chuva Observada de 5d, para os eventos observados selecionados.



Fonte: Autor (2022).

Além disso, foi calculado o erro associado a aplicação do Modelo Gumbel, para tanto, foram calculadas as chuvas observadas, a partir do Modelo de Gumbel, sendo utilizado o seu respectivo tempo de retorno como dado de entrada, além da média e desvio padrão das chuvas máximas de 5d. Deste modo, para o cálculo do erro relativo ao modelo, utilizou-se da Equação 8, sendo calculado o erro para cada evento observado e posteriormente foi calculada a média da série.

$$E = \left(\frac{|h_{obs} - h_{cal}|}{h_{obs}} \right) * 100 \quad (8)$$

onde:

E é o erro relativo do Modelo Gumbel, em percentual;

h_{obs} é a chuva observada para um dado evento, em milímetros;

h_{cal} é a chuva calculada para um dado evento, a partir do Modelo de Gumbel, em milímetros.

Na sequência, com as chuvas de projetos calculadas e desagregadas para cada um dos TR's adotados, avançou-se para próxima etapa, que consiste na obtenção dos hidrogramas de projeto para cada uma das chuvas de projeto.

Deste modo, optou-se por utilizar o *software* HEC-HMS 4.6.1 para realização do processo de transformação chuva-vazão no sistema de bacia hidrográficas de estudo. A escolha do HEC-HMS para modelagem hidrológica, foi pautada pelos seguintes preceitos, por tratar-se de aplicativo amplamente utilizado em estudos hidrológicos, possuir vasta documentação técnica auxiliar, bem como por tratar-se de modelo da família HEC, de maneira que permite o acoplamento entre os demais modelos utilizados neste estudo, que também pertencem a referida organização. Logo, os resultados obtidos em um modelo, alimentam as simulações dos outros aplicativos utilizados.

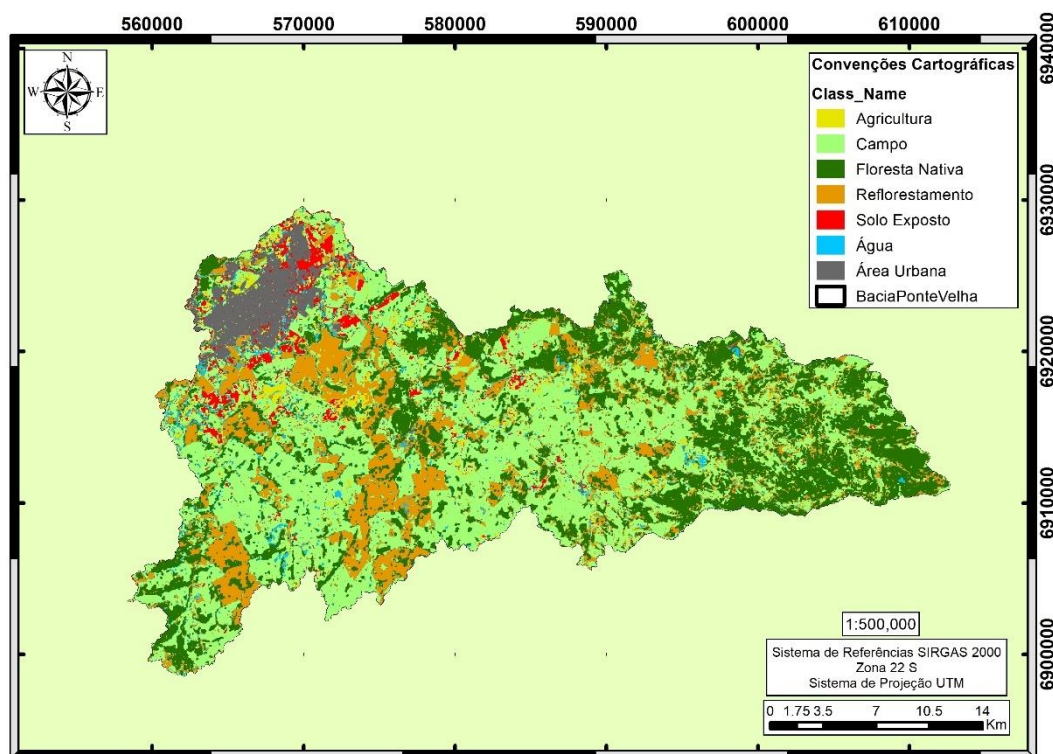
Outro fator fundamental para escolha do *software* HEC-HMS, foi devido a existência na base de dados do LABHIDRO, do Modelo Calibrado para o Sistema Ponte Velha, o qual foi desenvolvido no Projeto Hidro-Lages (RAFAELI NETO, 2019b). Deste jeito, optou-se por utilizar desse modelo calibrado para simulação da transformação chuva-vazão para os nove eventos de chuva do estudo. Vale observar que o modelo não foi validado para período posterior a 2019, uma vez que a estação fluviométrica utilizada não se encontra mais em operação.

Neste sentido, pontuam-se algumas considerações quanto ao Modelo Calibrado utilizado. O modelo teve o pré-processamento realizado no *software* ArcGis 10.5, por meio da extensão HEC-GeoHMS, quanto aos parâmetros adotados, destaca-se que foi utilizado 10 km² como área de contribuição mínima para as unidades hidrológicas, bem como foi usado o MDT de 1 metro, proveniente do aerolevanteamento realizado pelo Estado de Santa Catarina entre o período de 2010 a 2012, o qual possui boa resolução espacial. Quanto ao ponto do exutório, nota-se que adotaram a ponte que atravessa o rio Caveiras, na antiga BR-2, em Lages, uma vez que é o local onde esteve situada a estação fluviométrica Ponte Velha (RAFAELI NETO, 2019b).

O Modelo Calibrado do Sistema Ponte Velha, utilizou como dados de entrada para as precipitações, os registros das estações pluviométricas Bocaina do Sul (Código: 02749035), Lages (Código: 02750005), Coxilha Rica (Código: 02850004), Paineira (Código: 02750007) e Vila Canoas (Código: 02749031), as quais foram selecionadas por possuírem dados sem falhas, no período em que as simulações foram efetuadas. O evento utilizado para as simulações do modelo, foi o referente ao ano de 2005, sendo escolhido devido ao fato de existirem dados de monitoramento fluviométrico confiáveis para este evento, bem como por ter sido um evento significativo em termos de comportamento dos eventos extremos que ocorrem na região (RAFAELI NETO, 2019b).

Adiante, pontua-se que para transformação da chuva em vazão foi utilizado o Método do Hidrograma Unitário do SCS (*Soil Conservation Service*), sendo que o CN da bacia foi ponderado conforme o uso e ocupação do solo na área (RAFAELI NETO, 2019b). A Figura 13, apresenta mapa de uso e ocupação do solo do Sistema Ponte Velha, sendo o vetor obtido na base de dados do LABHIDRO.

Figura 13 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Sistema Ponte Velha.

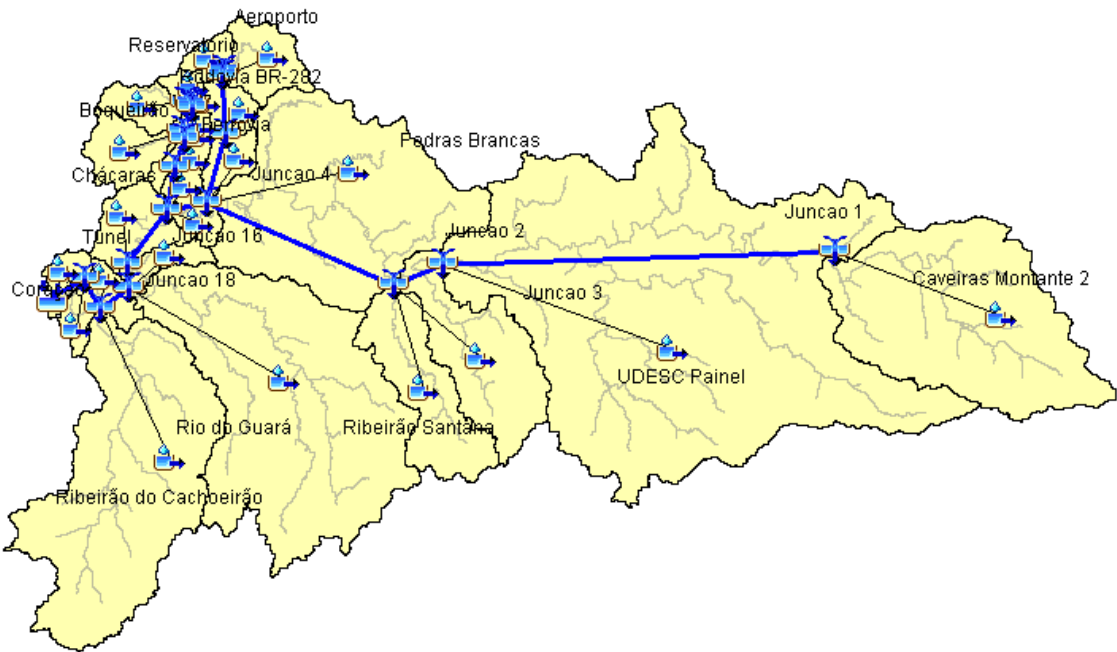


Fonte: Adaptado Rafaeli Neto (2019b).

A partir do modelo calibrado foram obtidos os hidrogramas de projeto para cada um dos nove TR's de interesse. O procedimento consistiu na entrada de uma dada chuva de projeto no modelo, e posterior computação do modelo, sendo assim obtido o seu respectivo hidrograma de projeto, sendo este processo repetido para cada TR.

A Figura 14 mostra o Modelo Conceitual Calibrado para a aplicação da modelagem hidrológica no estudo. A Tabela 3 apresenta os demais dados de entrada adotados, referentes aos parâmetros do modelo calibrado. Além disso, pontua-se que o parâmetro de Armazenamento Inicial (*Initial Storage*) foi considerado zero para todas as UH's, bem como para aplicação do método de propagação de onda cheia de *Muskingum-Cunge*, foi adotado 0,066 como valor de *Manning's*, para todas as UH's.

Figura 14 – Modelo Conceitual para modelagem hidrológica.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 3 – Dados de entrada do Modelo Calibrado.

Unidade Hidrológica	Área (km²)	Abstração Inicial (mm)	CN	Taxa de Impermeabilização (%)	Lag Time (min)	Max. Canopy Storage (mm)	Max. Storage	k
Aeroporto	11,68	0,871	65,75	14,69	143,3	4,44	8,87	0,7245
Batalhão	0,38	0,484	66,13	64,10	28,2	1,78	2,11	0,7307
Boqueirão	10,95	0,581	78,88	42,85	105,1	2,69	4,24	0,7261
Caveiras	87,73	0,454	79,13	2,01	304,9	3,82	11,31	0,8479

Montante 2								
Chácaras	12,58	0,339	93,77	20,27	124,2	2,91	4,43	0,6385
Coração	4,47	0,097	71,97	1,93	90,4	2,84	10,27	0,7441
Cotovelo	5,13	0,290	61,51	11,46	120,8	2,79	4,14	0,8720
Duque de Caxias	1,57	0,532	88,02	63,75	47,8	4,68	2,60	0,8371
Entre Rios	3,55	0,774	64,39	10,14	80,0	5,11	8,84	0,9396
Ferrovia	6,09	0,968	80,75	43,48	89,8	3,79	9,03	0,7751
Fórum Nereu Ramos	0,70	0,628	71,05	63,73	40,1	2,21	4,18	0,8958
Passo Fundo	6,93	0,387	81,88	13,19	94,8	4,26	4,47	0,5234
Pedras Brancas	89,89	1,016	56,46	3,70	392,0	7,67	13,04	0,8025
Ponte Velha	4,38	0,048	65,85	5,36	54,8	2,04	10,49	0,7256
Presidente Vargas	3,84	0,677	67,69	64,06	61,5	2,32	5,30	0,8759
Reservatório	2,58	0,435	76,87	29,41	57,5	2,42	4,88	0,6981
Ribeirão da Cutia	34,44	1,064	78,21	1,94	221,9	7,59	12,38	0,7026
Ribeirão do Cachoeirão	95,31	0,193	53,05	3,11	340,9	4,23	11,57	0,7364
Ribeirão Santana	28,68	1,113	75,38	1,72	205,1	7,40	11,13	0,7725
Rio do Guará	118,9	0,242	73,62	2,50	431,2	4,39	4,79	0,7991
Rodovia BR-282	5,49	0,919	90,32	40,09	99,5	3,67	8,99	0,7121
SC LA SR 03 CRPM	3,20	0,726	76,59	51,44	66,6	2,55	6,58	0,9044
Tributo	3,87	0,822	81,11	20,36	70,1	3,68	8,30	0,7494
Túnel	4,71	0,145	63,51	8,15	87,2	2,15	9,83	0,8798
Udesc Painel	251,3	0,378	70,16	2,26	474,9	3,37	10,78	0,9906

Fonte: Autor (2022).

Quanto ao escoamento de base, pontua-se que a maioria das unidades hidrológicas (UH) neste estudo são regidas por escoamento predominantemente originado superficialmente, sendo que pouca contribuição do escoamento de base é observada nas UHs urbanas (RAFAELI NETO, 2019b).

3.2.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Realizada a modelagem hidrológica parte-se para a modelagem hidrodinâmica, que no presente estudo foi efetuada através do *software* HEC-RAS 5.0.3. Optou-se por utilizar este aplicativo, por pertencer a família HEC, o

que conforme mencionado anteriormente, propícia um bom nível de acoplamento entre os aplicativos utilizados no estudo, de modo que facilita a alimentação de dados no HEC-FDA. Além disso, o HEC-RAS é amplamente utilizado para modelagens hidrodinâmicas, sendo inclusive bastante aplicado por estudos aplicados na bacia de interesse (LIZ, 2018; SCHIER, 2020; MAGRO, 2021).

A modelagem hidrodinâmica tem por objetivo gerar o *Water Surface Profile* (WSP) para os diferentes tempos de retorno necessários para análise de risco realizada no HEC-FDA, assim como, gerar as manchas de inundação para todos os tempos de recorrência de estudo.

Optou-se pela aplicação de modelo 1D para delineamento da geometria da área de simulação. Vale salientar que a modelagem 1D é utilizada em detrimento da 2D, devido a compatibilização de leitura das informações na versão do modelo HEC-FDA utilizada, que necessita das informações contidas nas seções transversais provenientes da modelagem 1D, como entrada dos dados hidrológicos no FDA. Desta maneira, o programa faz a leitura das informações provenientes da modelagem hidrodinâmica através das seções transversais, de modo que não realiza a leitura dos dados por meio das informações contidas nas células, fato que dificulta a realização de modelagem 2D.

A etapa de pré-processamento do modelo foi realizada no próprio HEC-RAS, através da ferramenta *Ras Mapper*, onde o primeiro passo consistiu na configuração do projeto, com a definição do sistema de unidades a ser adotado, bem como do sistema de coordenadas do projeto para a área de interesse.

Em seguida, foi adicionado o arquivo *raster* da área das bacias de interesse, sendo optado pelo uso do Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 30 cm, o qual foi disponibilizado pelo Laboratório de Hidrologia da UDESC/CAV, constando em seu acervo o referido modelo. Desse modo, considera-se essa uma boa resolução para obtenção de resultados consistentes na modelagem de processos de inundações.

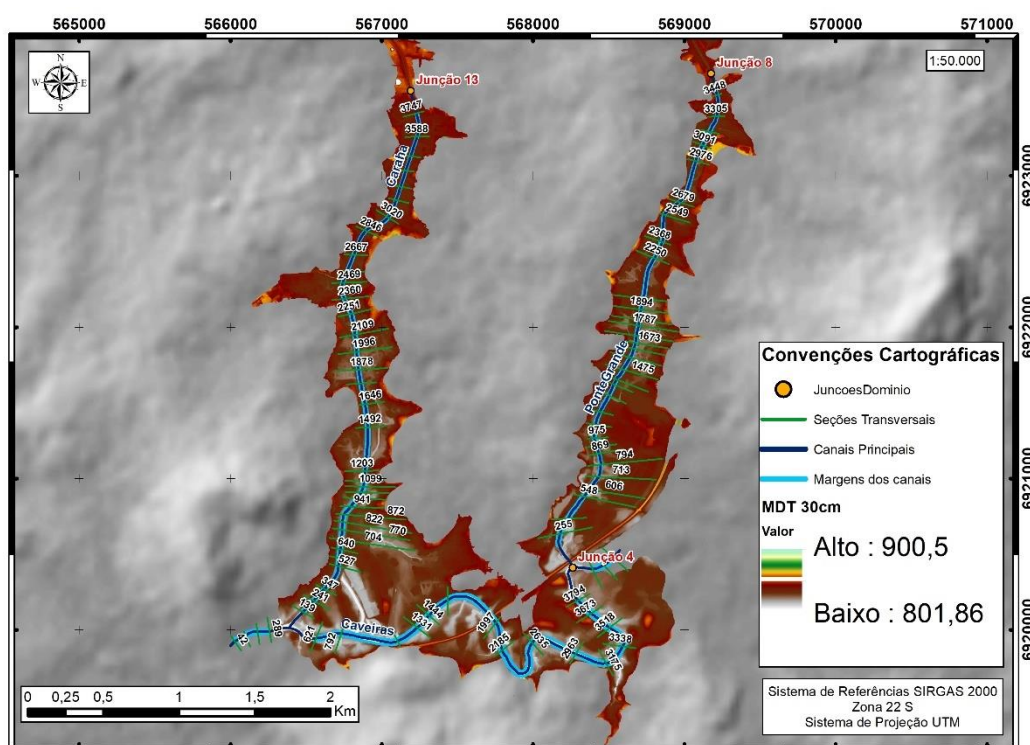
Acerca do MDT de 30 cm utilizado, destaca-se que abrange toda área da planície topográfica de inundação do município de Lages, sendo um dos

produtos do projeto Hidro-Lages. O MDT foi obtido por meio de levantamento aerofotogramétrico da planície topográfica de inundações, realizado no ano de 2019, sendo utilizado a tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e da técnica de ortorretificação, em uma área de 25 km² (RAFAELI NETO, 2019c).

O próximo passo consistiu na conversão do MDT para o formato *Terrain*, para prosseguimento da modelagem. Desta maneira, na extensão *Ras Mapper*, uma nova geometria foi criada para a área de interesse, sendo em seguida delineados os seus atributos com base nas características do terreno.

Desta maneira, foram criados os rios (*river*) da área de estudo, representando os rios Ponte Grande, Caraha e Caveiras, bem como suas margens (*river banks*), caminhos de fluxos de água (*river flow path*), junções (*junction*), além das seções transversais (*cross sections*), conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Geometria 1D, delineada para área de interesse.



Fonte: Autor (2022).

Assim, cabe pontuar sobre a finalidade desses atributos inseridos, sendo que as linhas dos rios servem para indicar o leito central do canal, as margens dos rios são usadas para distinguir o canal principal das áreas de planície de

inundação. Já as linhas de caminhos de fluxo da água servem para determinar os comprimentos de alcance entre as seções transversais, sendo que foram delimitadas de modo a localizarem-se nos limites estimados da planície de inundação. No mais, as junções são utilizadas para conexão dos canais principais.

As seções transversais são utilizadas para extrair os dados de elevação do terreno, com intuito de criar um perfil de fundo para modelação do fluxo do canal. Observa-se, que as seções transversais foram construídas de modo a ficarem perpendiculares ao canal, bem como que cruzassem a linha central do canal, as margens e as linhas de fluxo apenas uma vez.

No que se refere a quantidade de seções transversais criadas por curso hídrico, foram inseridas com maior nível de detalhamento nas áreas urbanas de interesse do estudo, ou seja, nos locais de interesse foi adotado um menor espaçamento entre as seções. Assim, foram criadas um total de 93 seções transversais, sendo 37 no Rio Ponte Grande, 34 no Rio Caraha e 22 no Rio Caveiras. Após a inserção de todas as seções, foi realizada análise das mesmas, por meio da ferramenta *Plot Terrain Profile*, com intuito de verificar se estavam adequadas, e quando necessário ajustá-las.

Após a criação da geometria, foram definidas as informações do coeficiente de rugosidade dos canais principais e de suas respectivas margens, as quais foram definidas de acordo com o uso e ocupação do solo dos cursos e de dados da literatura. Assim sendo, foi considerado o valor de n equivalente à 0,035 para os canais principais, enquanto para as margens adotou-se valor de n igual a 0,05, para todas as seções transversais.

Prosseguindo para inserção dos dados hidrológicos, foi considerada para a simulação a análise de escoamento não permanente (*Unsteady Flow Data*), uma vez que se utilizou de hidrogramas de projeto para alimentação dos dados de vazão. Nesta etapa foram definidas as condições de contorno (*Boundary Condition*) do estudo. O aplicativo necessita de ao menos 2 (duas) condições de contorno, uma de entrada e outra de saída, sendo que neste estudo optou-se por utilizar de 3 (três) seções de entrada, referentes aos rios Ponte Grande, Caraha e Caveiras, bem como 1 (uma) seção de saída (Figura 15).

Quanto a localização das condições de contorno de entrada e de saída, foram utilizadas como pontos de entradas as junções J4, J8 e J13, representadas no modelo 1D pelas seções transversais XS 4331, 3528 e 3747, referentes aos rios Caveiras, Ponte Grande e Caraha, respectivamente.

Optou-se pela escolha destas junções, em virtude de estarem situadas a montante das regiões urbanas de interesse do município de Lages, bem como por possuírem hidrogramas obtidos na simulação hidrológica, que abrangem as sub-bacias do Passo Fundo, Reservatório, Batalhão, Duque de Caxias, Boqueirão e do Fórum Nereu Ramos (J13), as sub-bacias do Tributo, Aeroporto e Rodovia BR-282 (J8) e as sub-bacias Caveiras Montante, Udesc Paineel, Ribeirão Santana, Ribeirão da Cutia e Pedras Brancas (J4). No mais, pontua-se que a condição de contorno de saída está localizada a jusante do Rio Caveiras (seção transversal 42), conforme ilustra a Figura 15.

Acerca dos tipos das condições de contorno, optou-se por utilizar para as condições de entrada os hidrogramas de projeto (*Flow Hydrograph*), enquanto para condição de saída foi utilizado a profundidade normal (*Normal Depth*). Neste sentido, para as condições de entrada foram inseridos os hidrogramas de projeto, referentes as junções J4, J8 e J13 para um determinado tempo de retorno, os quais foram obtidos através da simulação hidrológica.

Enquanto, para os dados de saída de vazão do modelo, foi considerada a condição limite de profundidade normal, com valor adotado de $0,001 \text{ m.m}^{-1}$, definido conforme estabelecido no Manual de Usuário do HEC-RAS (USACE, 2016b).

Sobre aos dados de entrada, cabe pontuar o motivo da escolha dos tempos de retorno utilizados no estudo. Portanto, optou-se por utilizar os TR's de 3, 5, 10, 15, 25, 50 e 100 anos, conforme os critérios de período de retorno para as obras de microdrenagem e macrodrenagem, estabelecidos no Manual de Hidrologia Básica (DNIT, 2005). Enquanto, o TR de 500 anos foi selecionado para representar eventos localizados na extremidade das caudais, sendo recomendado no manual do HEC-FDA a inclusão uma vazão para o nível de probabilidade de excedência de 0.002 (500 anos) ou 0.001 (1000 anos). Ainda, pontua-se que o TR de 1 ano foi inserido por exigência do

aplicativo, que necessita para computação das funções de probabilidade de excedência, de um evento adicional com probabilidade de excedência equivalente a 0,999 (TR de 1 ano).

Na sequência, após a definição das geometrias e dos dados hidrológicos na área de interesse, a simulação foi realizada para determinado tempo de retorno, sendo gerado as cotas máximas de nível água para cada uma das seções transversais. Neste sentido, ressalta-se que o mesmo procedimento foi repetido para todos os demais tempos de retorno, variando apenas os hidrogramas de entrada na simulação, obtendo-se as cotas máximas das seções transversais para cada tempo de retorno de estudo, totalizando 9 (nove) simulações hidrodinâmicas.

Ademais, cabe informar sobre as configurações adotadas para execução da modelagem. Deste modo, optou-se por utilizar de Intervalo Computacional (Computation Interval) período de 30 segundos, conforme recomendações do Manual do RAS. Enquanto, foi utilizado para o Intervalo de saída do Mapeamento (*Mapping Output Interval*) o valor de 1 minuto. Já para o Intervalo de saída do Hidrograma (*Hydrograph Output Interval*) e Intervalo de saída detalhado (*Detailed Output Interval*), optou-se por utilizar o período de 1 hora.

Após a computação de todos os tempos de retorno, foi realizada a preparação dos dados no HEC-RAS para exportação para o HEC-FDA. Assim sendo, observa-se que os dados provenientes do RAS são importados para o HEC-FDA, por meio de tabelas com a extensão *wsp*.

Neste sentido, pontua-se que o HEC-FDA se limita a leitura de apenas um único curso hídrico quando importado do RAS, sendo necessário a criação de arquivos separados para cada curso hídrico, assim foram criados três arquivos, contendo os dados das seções transversais do Rio Caraha, Rio Ponte Grande e Caveiras, separadamente.

Desta maneira, ressalta-se que no HEC-RAS foi utilizada a ferramenta *Profile Output Table*, na qual foi selecionada o padrão de tabela do HEC-FDA, sendo selecionado os perfis dos níveis máximos nas seções transversais, referentes aos TR's de 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100 e 500 anos, totalizando os oito tempos de retornos necessários para realização da análise de risco no FDA.

Nota-se que os dados para alimentação do modelo econômico, referentes ao TR de 1 ano, são inseridos posteriormente na própria interface do FDA.

Neste íterim, observa-se que são importados para o HEC-FDA a compilação das seguintes informações do RAS, sendo elas: 1) a vazão total em m^3/s ; 2) a elevação mínima do canal em m; 3) e a superfície de elevação da água (WSE) em m, para cada uma das seções transversais, em todos os oito tempos de retorno.

Em complemento, salienta-se que estas informações são utilizadas para alimentação da simulação econômica, referente ao cenário base e aos três cenários de elevação de estruturas (Planos Altura 1, Altura 2 e Altura 3).

Além disso, ressalta-se que foi gerada a mancha de inundação com os resultados obtidos para cada um dos tempos de retorno simulados, as quais foram exportadas em formato *shapefile* e *raster*, para posterior geração de mapas no ArgGis 10.5.

3.2.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA: HEC-FDA

Os danos econômicos gerados por inundações foram calculados com a utilização do *software* HEC-FDA 1.4.3. O aplicativo foi escolhido por ser capaz de integrar modelagem hidrológica e análise econômica, sendo que pode ser utilizado na formulação e avaliação de diferentes cenários de riscos de inundações, bem como por computar os danos anuais esperados (EAD), para um dado cenário.

Outro fator ponderado para a escolha dessa ferramenta, em detrimento de outros aplicativos de avaliação econômica de inundações, deu-se em virtude de pertencer a família de aplicativos do Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, de modo que se acopla aos demais modelos utilizados pelo estudo.

Quanto a metodologia para aplicação do programa, tem-se cinco etapas principais para geração dos resultados finais, sendo as seguintes: 1) definição do estudo; 2) configuração do estudo; 3) entrada dos dados hidrológicos e hidráulicos; 4) entrada dos dados econômicos; 5) execução da simulação para obter-se o dano anual esperado.

A primeira etapa consistiu no ajuste das condições do estudo, onde foi definido o título do projeto, a unidade monetária, o índice de valoração e o sistema de unidades adotados.

Neste sentido, optou-se por utilizar a unidade monetária em \$'s, sem fatores de multiplicação (Ex. \$ 1000's), frisa-se que este parâmetro serve apenas como legenda para os resultados, não interferindo nos resultados do FDA. De resto, foi adotado o sistema de unidades internacionais (S.I.), de modo a manter o padrão dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Ainda, pontua-se que para o índice de preços atualizado (*uptated price index*), optou-se por manter o valor padrão do FDA, equivalente a 1,0.

A segunda etapa consistiu na configuração do estudo, onde foram incluídos os cursos hídricos atribuídos no estudo, as áreas de alcance de danos, os anos de análise e os planos do estudo. Dessa forma, foram inseridos no estudo os Rios Carahá, Ponte Grande e Caveiras.

Na sequência, foram inseridas as áreas de alcance de danos (*Damage Reachs*), que são áreas geográficas específicas dentro de uma planície de inundação. Estas áreas são usadas na definição e armazenamento de dados consistentes para os planos, bem como para as informações referentes as estruturas, sendo delimitadas por meio das seções transversais, devendo ser selecionada uma seção para o início dos danos e outra para o término, em um dado trecho do canal. Ademais, pontua-se que as áreas de danos são únicas para cada curso hídrico.

Isto posto, optou-se por inserir duas áreas de danos, uma para o Rio Carahá (*Reach 2*) e outra para o Rio Ponte Grande (*Reach 1*), considerando que abrangem a área de domínio de problema do estudo, enquanto, para o Rio Caveiras não foi inserida área de danos, uma vez que no trecho deste curso hídrico existe baixa ocupação urbana, com poucas edificações presentes, portanto, optou-se por não inserir área de danos no local, de modo a reduzir o esforço computacional.

Desta maneira, sobre a delimitação das áreas de danos para os Rios Carahá e Ponte Grande, pontua-se que foi pautada pelas manchas inundáveis geradas na modelagem hidrodinâmica, bem como pela presença de ocupação urbana nas áreas. Deste modo, para o *Reach 1* (Rio Ponte Grande),

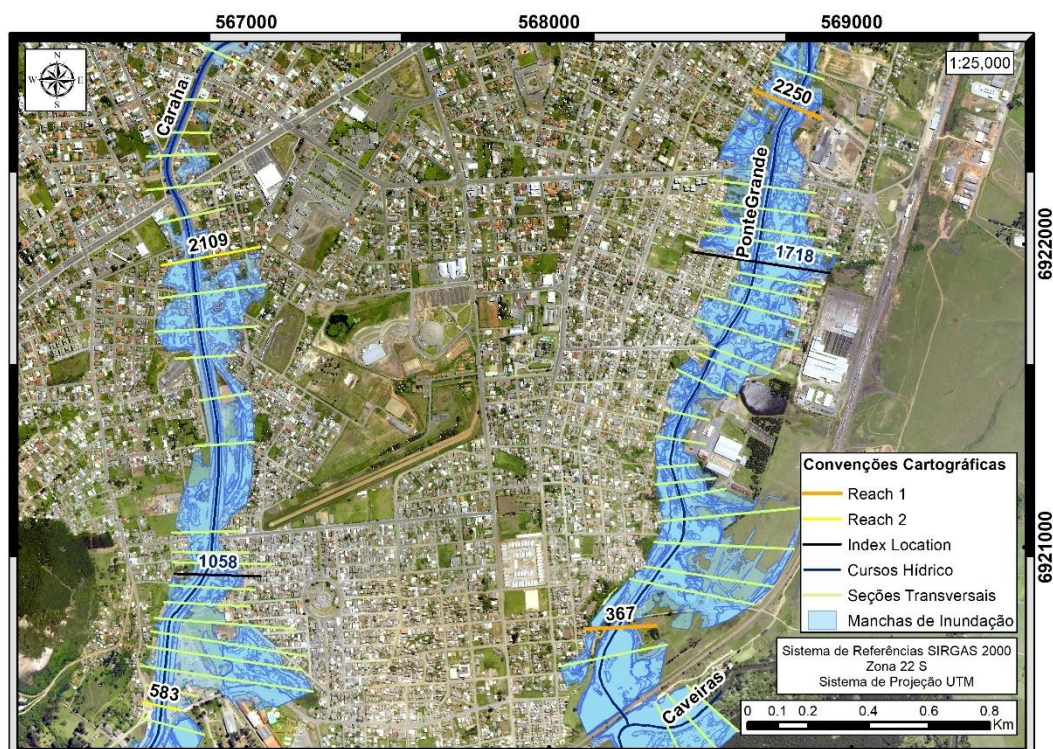
considerou-se como fronteiras de danos as seções transversais 367 (Jusante) e 2250 (Montante), sendo consideradas ambas as margens do canal. Já para o *Reach 2* (Rio Carahá), foram adotadas como fronteiras de danos as seções transversais 583 (Jusante) e 2109 (Montante), sendo igualmente consideradas ambas as margens do curso hídrico.

Além disso, o FDA precisa que seja definida uma seção transversal índice (*index location*) para cada área de dano criada. Deste jeito a seção transversal escolhida serve como local índice, com o intuito de facilitar a recuperação dos dados de vazão provenientes do WSP, bem como as informações das curvas de vazão-nível do WSP. Ainda, tem-se que são utilizadas para possibilitar a agregação da função de nível-dano das estruturas individuais.

A seção transversal índice pode ser escolhida para qualquer seção transversal dentro do trecho da área de danos, contudo, é recomendado a escolha de uma seção transversal que tenha períodos de retorno mais frequentes. Ou seja, caso para uma dada “seção x” o tempo de retorno para alcance da mancha inundável nas edificações seja de 25 anos, enquanto, para uma “seção y” o tempo de retorno que atinge edificações seja de 10 anos, deve-se optar pela “seção y” como local índice.

Dito isto, para *Reach 2* (Rio Carahá) foi adotada como local de índice a seção transversal 1058, enquanto, para o *Reach 1* (Rio Ponte Grande), foi selecionada a seção transversal 1718, considerando as recomendações citadas. A Figura 16, mostra as seções transversais de fronteira das áreas de dano, bem como os locais de índice, para cada um dos cursos hídricos.

Figura 16 – Localização das áreas de alcance de danos.



Fonte: Autor (2022).

Nesta etapa, foram criados os planos de estudo, sendo definidos o plano para o cenário base, sem condições de projeto, e três planos considerado condições de projeto, ou seja, com aplicação de medidas mitigadoras. Deste modo, optou-se por utilizar como medida mitigadora para o estudo, a elevação das estruturas, sendo consideradas três alturas diferentes de elevação.

Estas alturas foram escolhidas de acordo com a propagação da mancha de inundação para as regiões dos rios Ponte Grande e Carahá, geradas na modelagem hidrodinâmica. Em vista disso, inicialmente, observou-se a partir de qual tempo de retorno modelado, havia o alcance da mancha em edificações, e em seguida o respectivo nível da água nos pontos observados.

Desta maneira, observou-se que para o TR de 10 anos a mancha de inundação começava a alcançar as edificações em alguns trechos dos cursos hídricos, sendo constatado um nível máximo aproximado de 0,29 metros, nas imediações das residências observadas. Assim sendo, optou-se por utilizar como primeira altura de elevação o valor de 0,305 metros, equivalente à um pé. Enquanto, para as demais, optou-se por manter o padrão de unidade, sendo

adotadas elevações de 0,61 metros (2 pés) e 1 metro (aproximadamente 3 pés).

Assim, o Plano 1, corresponde a elevação de estruturas à 0,305 metros, o Plano 2, a elevação à 0,61 metros e o Plano 3, a elevação de 1 metro das estruturas. No mais, optou-se pelo uso da medida mitigadora de elevação de estrutura, por tratar-se de medida que já é aplicada por parte da população das áreas de risco de inundações no município, conforme observações das áreas de domínio do problema.

Considerando os anos de análise, optou-se pela adoção de dois cenários, sendo definido como o ano base, o cenário de ocupação em 2002 e o ano de futuro mais provável, o cenário atual, referente ao ano de 2022. Aqui, cabe pontuar que o ano de 2002 foi escolhido, em virtude de haver na base de dados do LABHIDRO, dados espaciais referentes a este ano, como arquivos vetoriais dos lotes e edificações existentes, bem como ortofotos da época, que auxiliam na avaliação da evolução de ocupação urbana das áreas de interesse.

A próxima etapa consistiu na entrada dos dados hidrodinâmicos, os quais foram importados do *software* HEC-RAS. Deste modo, foi inserido no estudo os arquivos de texto, gerados no RAS, que contém as informações das simulações hidrodinâmicas realizadas. Estes arquivos foram adicionados individualmente no FDA e atribuídos aos seus devidos cursos hídricos, planos e anos de análise criados anteriormente.

Na sequência, foi computada a função de probabilidade de excedência com incerteza, com base nos dados de perfil de água inseridos, esta função demonstra a relação entre a magnitude da inundação e a probabilidade de exceder essa magnitude, e pode ser compreendida como uma curva de frequência. A função de probabilidade de excedência possui papel importante para a performance da análise de danos de inundação, uma vez que considera eventos de inundação de todos os tamanhos.

Estas funções devem ser geradas para cada combinação de ano, plano, curso hídrico e área de danos, sendo que podem ser utilizadas para diferentes áreas de danos, anos de análise e planos, contudo, não pode ser utilizada uma mesma função para diferentes cursos hídricos. Neste estudo, foram computadas duas funções de probabilidade de excedência com incerteza,

sendo uma atribuída ao Rio Carahá e outra ao Rio Ponte Grande, essas funções foram replicadas para cada combinação possível de seu respectivo curso hídrico. Ademais, observa-se que não foi computada função de probabilidade de excedência para o Rio Caveiras, uma vez que o estudo não considerou área de danos para este curso hídrico.

Desta maneira, optou-se pelo uso do método da função gráfica de probabilidade de excedência, o qual é recomendado quando a função não se aderir a distribuição de Log de Person tipo III, bem como é o método que deve ser utilizado quando usado os dados da modelagem de escoamento não permanente do RAS. Assim, a função gráfica é definida pela ordem dos pares de probabilidade de excedência versus os seus respectivos dados de vazão, enquanto a incerteza desta função é baseada nos anos de registro equivalentes (ERL), sendo definida por uma aproximação da estatística de ordem denominada “*Less simple*”.

Neste sentido, a função de cota-vazão foi gerada no FDA com base nos valores dos oito perfis de água superficial adicionados. Quanto as outras, informações necessárias para o programa calcular estas funções, pontua-se que foi inserido o valor do ERL, igual a 74 anos, bem como foi inserida a vazão observada para o período de retorno de 1 ano, conforme recomendação do manual do aplicativo (USACE, 2016a). No mais, salienta-se que foram atribuídas as funções para cada combinação de plano, ano de análise, curso hídrico e alcance de danos.

Posteriormente, foram calculadas as funções de vazão-nível com incerteza, a qual é necessária quando a função de probabilidade de excedência é definida a partir da vazão, sendo preciso a transformação da vazão em cota para cada probabilidade. De mesmo modo que a função de probabilidade de excedência, é necessário que sejam atribuídas funções de vazão-nível para cada combinação de plano, ano de análise, área de danos e curso hídrico, sendo que devem ser distintas para os canais.

Deste modo, foram calculadas duas funções de vazão-nível no FDA, referentes ao Rio Carahá e ao Rio Ponte Grande, sendo geradas a partir dos dados do WSP. Ainda, para definição da incerteza da função, optou-se pelo uso da distribuição normal, sendo necessário para o cálculo efetuado pelo

software, a inserção da cota onde o erro se torna constante e o desvio padrão do erro para cota inicial. Assim, pontua-se que foi adotada para o primeiro parâmetro, a cota do evento de 100 anos de período de retorno, conforme sugestão do manual do aplicativo (USACE, 2016a), enquanto, o desvio padrão foi gerado pelo programa.

A próxima fase, consistiu na entrada dos dados econômicos, a qual pode ser subdividida em cinco etapas principais de execução, sendo a definição das categorias de dano, o tipo de ocupação, o módulo, o inventário das estruturas e a computação da função de dano-nível.

Quanto a definição de categorias, observou-se a ocupação na área de interesse, sendo optado por inserir apenas a categoria residencial. Os tipos de ocupação de estruturas, foram definidos considerando observações da área de domínio do problema, bem como os dados disponíveis de função de profundidade-percentual de dano na literatura. Desta maneira, optou-se por utilizar de dois tipos de ocupação de estruturas, sendo residências de um andar e residência de dois andares.

Após a definição dos tipos de ocupação, foram inseridas as informações necessárias para cada um deles. Assim sendo, inicialmente, foram inseridos os valores das funções de profundidade-percentual de dano, atribuídas a estrutura e ao conteúdo, para cada um dos tipos de ocupação adotado. A Tabela 4 mostra os dados da função para o tipo de ocupação de um andar, enquanto, a Tabela 5, mostra a função para o tipo de ocupação de dois andares, salienta-se que estes dados foram obtidos por meio das funções genéricas disponibilizadas pelos manuais técnicos do FDA, que consideram profundidades negativas e positivas, ou seja, abaixo do nível do solo (edificações com porões) e acima do nível do solo, respectivamente. Vale ressaltar que estas equações foram obtidas com base em estudos realizados pela equipe técnica do USACE, que utilizaram dados registrados de eventos ocorridos em partes dos Estados Unidos entre 1996 e 1998 (USACE, 2003).

Tabela 4 – Função de profundidade-percentual de danos, do tipo ocupação de um andar.

Estrutura			Conteúdo		
Profundidade (m)	Média de Danos	Desvio Padrão de Danos	Profundidade (m)	Média de Danos	Desvio Padrão de Danos
-0,610	0%	0%	-0,610	0%	0%
-0,305	2,50%	2,70%	-0,305	2,40%	2,10%
0,000	13,40%	2,00%	0,000	8,10%	1,50%
0,305	23,30%	1,60%	0,305	13,30%	1,20%
0,610	32,10%	1,60%	0,610	17,90%	1,20%
0,914	40,10%	1,80%	0,914	22,00%	1,40%
1,219	47,10%	1,90%	1,219	25,70%	1,50%
1,524	53,20%	2,00%	1,524	28,80%	1,60%
1,829	58,60%	2,10%	1,829	31,50%	1,60%
2,134	63,20%	2,20%	2,134	33,80%	1,70%
2,438	67,20%	2,30%	2,438	35,70%	1,80%
2,743	70,50%	2,40%	2,743	37,20%	1,90%
3,048	73,20%	2,70%	3,048	38,40%	2,10%
3,353	75,40%	3,00%	3,353	39,20%	2,30%
3,658	77,20%	3,30%	3,658	39,70%	2,60%
3,962	78,50%	3,70%	3,962	40,00%	2,90%
4,267	79,50%	4,10%	4,267	40,00%	3,20%
4,572	80,20%	4,50%	4,572	40,00%	3,50%
4,877	80,70%	4,90%	4,877	40,00%	3,80%

Fonte: Adaptado USACE (2003).

Tabela 5 – Função de profundidade-percentual de danos, do tipo ocupação de dois andares.

Estrutura			Conteúdo		
Profundidade (m)	Média de Danos	Desvio Padrão de Danos	Profundidade (m)	Média de Danos	Desvio Padrão de Danos
-0,610	0%	0%	-0,610	0%	0%
-0,305	3,00%	4,10%	-0,305	1,00%	3,50%
0,000	9,30%	3,40%	0,000	5,00%	2,90%
0,305	15,20%	3,00%	0,305	8,70%	2,60%
0,610	20,90%	2,80%	0,610	12,20%	2,50%
0,914	26,30%	2,90%	0,914	15,50%	2,50%
1,219	31,40%	3,20%	1,219	18,50%	2,70%
1,524	36,20%	3,40%	1,524	21,30%	3,00%
1,829	40,70%	3,70%	1,829	23,90%	3,20%
2,134	44,90%	3,90%	2,134	26,30%	3,30%
2,438	48,80%	4,00%	2,438	28,40%	3,40%
2,743	52,40%	4,10%	2,743	30,30%	3,50%
3,048	55,70%	4,20%	3,048	32,00%	3,50%
3,353	58,70%	4,20%	3,353	33,40%	3,50%
3,658	61,40%	4,20%	3,658	34,70%	3,50%
3,962	63,80%	4,20%	3,962	35,60%	3,50%
4,267	65,90%	4,30%	4,267	36,40%	3,60%
4,572	67,70%	4,60%	4,572	36,90%	3,80%
4,877	69,20%	5,00%	4,877	37,20%	4,20%

Fonte: Adaptado USACE (2003).

Na sequência, foi inserido o valor do percentual da relação conteúdo/estrutura, que é utilizado no programa para estimar o valor dos conteúdos de uma dada estrutura baseado no percentual do valor da estrutura. Deste modo, foi adotado 100% como relação de conteúdo/estrutura, o qual dever ser utilizado quando utilizadas as funções de danos genéricas fornecidas pelas tabelas apresentadas acima, conforme recomendação do manual do programa (USACE, 2016a).

Além do mais, foi executada a definição dos parâmetros de incerteza, sendo definidos os erros associados ao nível do primeiro andar e ao valor da estrutura. Desta maneira, para o valor do erro associado ao nível do primeiro andar, optou-se pelo uso da distribuição normal, sendo inserido como parâmetro de entrada o valor do desvio padrão do erro, equivalente a 0,091 metros, estipulado a partir da Tabela 6 proveniente do manual do aplicativo (USACE, 2016a), que leva em consideração a metodologia aplicada para estimação do nível do primeiro andar de uma dada estrutura. Assim sendo, pontua-se que os valores foram medidos por meio do modelo digital de terreno de 30 cm, desenvolvido por aerolevantamento (RAFAELI NETO, 2019c).

Quanto aos parâmetros necessários para o cálculo da incerteza associada ao valor da estrutura, foi inserido como dado de entrada o valor do desvio padrão de danos em percentual (Tabela 4 e 5), para cada um dos tipos de ocupação.

Tabela 6 – Incerteza baseada no método de mensuração do nível do primeiro andar.

Método	Intervalo de contorno	Erro (m)	Desvio padrão (m)
Pesquisa de campo			
Nível do solo	NA	+/- 0,06 a 15,14'	0,03
<i>Stadia</i>	NA	+/- 0,12 a 151,4'	0,06
Nível convencional	NA	+/- 0,01 a 242,24'	0,009
Nível automático	NA	+/- 0,009 a 242,24'	0,006
Aerolevantamento	0,61	+/- 0,178	0,091
	1,51	+/- 0,357	0,182
	3,02	+/- 0,890	0,454
Mapa Topográfico	0,61	+/- 0,357	0,182
	1,51	+/- 0,890	0,454
	3,02	+/- 1,780	0,908

Fonte: Adaptado USACE (2016).

O próximo passo consistiu na definição dos módulos para o estudo, que servem para possibilitar a variação de 1 (uma) ou mais características de uma dada estrutura por plano e/ou ano, bem como incluir/excluir uma determinada estrutura para planos e anos de análise. Em síntese, estes módulos permitem a avaliação de diferentes cenários no estudo.

Portanto, foram definidos quatro módulos para o estudo, de modo a permitir que variasse as características de uma mesma estrutura para diferentes planos, auxiliando na análise das medidas mitigadoras contra inundações propostas. Dessa forma, foram criados os módulos *Base*, *Raise 1*, *Raise 2* e *Raise 3*.

Desta maneira, pontua-se que o módulo base, o qual é padrão do FDA, foi utilizado para atribuir as estruturas em suas condições normais, ou seja, sem a aplicação de medidas mitigadoras. Já o módulo *Raise 1* foi atribuído para as estruturas com elevação de 0,305 metros, conforme Plano 1. Enquanto os módulos *Raise 2* e *Raise 3*, foram atribuídos para as estruturas que foram elevadas a 0,61 e 1 metro, respectivamente.

A próxima etapa, consistiu na inserção do inventário das estruturas, sendo que os atributos de cada edificação devem ser inseridos manualmente um por um no FDA ou importados de arquivo em formato de texto. Ademais, tem-se que cada estrutura deve ser associada a uma categoria de dano, tipo de ocupação, curso hídrico e módulo, sendo este último importante para especificar em qual plano e ano a estrutura será usada para análise de danos. Ainda, cabe pontuar que as informações atribuídas as edificações são utilizadas para computar uma função agregada de nível-dano por categoria de danos, na seção transversal índice de alcance de danos.

Para construção do inventário das estruturas, foi utilizada base de dados atualizada da Prefeitura Municipal de Lages, na qual consta arquivo vetorial das unidades imobiliárias, sendo utilizados os seguintes atributos: Área, Localização, Idade da construção, Ocupação da Unidade, Estrutura, Instalações Sanitárias, Tipo de Cobertura do Telhado, de Vedações prediais, de Instalações elétricas, de Piso, de Esquadrias, de forro, além da situação do Acabamento e Estado de Conservação da estrutura. Ademais, foi utilizado o

arquivo dos lotes cadastrados, em especial, os atributos: Área do lote, Pedologia e Topografia. Além disso, pontua-se que foi utilizado o MDT de 30 cm para atribuição dos dados de nível do solo das estruturas.

Quanto a quantidade de estruturas a serem analisadas, optou-se por realizar amostragem da área de interesse. Deste modo, foi utilizada fórmula de Cochran para determinação do tamanho da amostra, com um nível de confiança de 95% e precisão de 0.07, sendo estimada uma amostra prévia de 196 unidades imobiliárias (Equação 9).

Desta maneira, optou-se por aplicar o fator de correção de pequenas amostras (Equação 10), para tanto consolidou-se a base de dados utilizada, com a seleção apenas das unidades imobiliárias com ocupação residencial, e posteriormente, manteve-se apenas as residências situadas na área de interesse e que estavam nas imediações das manchas de inundação geradas, totalizando 822 unidades imobiliárias.

$$n_o = \frac{Z^2 * p * q}{e^2} \quad (9)$$

$$n = \frac{n_o}{1 + \left(\frac{n_o - 1}{N}\right)} \quad (10)$$

onde:

n_o é o tamanho da amostra inicial;

Z é o valor da tabela Z, para um dado nível de confiança;

p é a proporção da população que possui o atributo em questão;

q é 1-p;

e é o nível de precisão;

n é o tamanho da amostra corrigido;

N é o tamanho da população.

Após a aplicação do fator de correção, obteve-se uma amostra de 158 unidades imobiliárias, as quais foram consideradas na análise de danos. Para espacialização destas unidades na área de interesse, foi utilizado o *software*

ArcGis, através da ferramenta de amostragem aleatória, com a inclusão de 158 amostras no local de domínio do problema. Os locais de pontos amostrais indicam as edificações que foram consideradas na análise de danos (Figura 17).

Figura 17 – Localização espacial dos pontos amostrais, no município de Lages/SC.



Fonte: Autor (2022).

Dito isto, pontua-se que as edificações foram inseridas manualmente no FDA, sendo atribuídos os dados para cada uma das estruturas avaliadas dentro da área de interesse (Figura 18). Deste modo, para construção da base de dados utilizada, foram considerados os parâmetros descritos na sequência.

Figura 18 – Interface de entrada dos dados para o inventário de cada estrutura, com exemplo de estrutura inserida.

Fonte: Autor (2022).

Desta maneira, pondera-se que foram adotados nomes padrões para as estruturas individuais, definidos de acordo com o número de identificação dos pontos amostrais gerados. Nesta senda, cabe pontuar que no FDA uma edificação pode ser atribuída para um único plano, de modo que para os cenários propostos de elevação de estruturas, foi necessário a criação de duplicatas da estrutura em questão, sendo alterado somente o atributo de elevação da estrutura, bem como o módulo associado a estrutura.

Neste sentido, quanto ao módulo associado a estrutura, nota-se que foi atribuído conforme a aplicação de determinada medida mitigadora ou não. Exemplificando, caso se trate de edificação sem condições de projeto, o módulo associado era o *Base*, já se fosse atribuído a elevação de 0,305 m, a dada estrutura era associada ao módulo *Raise 1*, e assim consequentemente para as outras alturas de elevação. Portanto, o FDA compreende em que plano

do estudo uma determinada estrutura está associada, para agregá-la na análise de danos, referente ao plano em questão.

Adiante, observa-se que os atributos do curso hídrico, margem e seção transversal foram inseridos conforme a localização espacial da edificação em quesito, bem como o tipo de ocupação foi definido de acordo com o observado na edificação, ou seja, se era de um andar (sigla adotada ROS) ou de dois andares (sigla adotada RTS).

Na sequência, foi inserido o atributo do valor da estrutura em reais, para tanto optou-se pela aplicação do Método Evolutivo, descrito na Norma Técnica NBR 14653 (ABNT, 2001), como um dos métodos que podem ser utilizados para avaliação de imóveis. O método consiste na avaliação conjunta de duas metodologias distintas, assim sendo, optou-se por utilizar da combinação do Método Comparativo Direto e do Método de Quantificação de Benfeitorias. Pontua-se que o valor de cada imóvel foi obtido através da média dos valores calculados por estes dois métodos (Equação 11).

$$VI = \frac{V_{CD} + V_{QB}}{2} \quad (11)$$

onde:

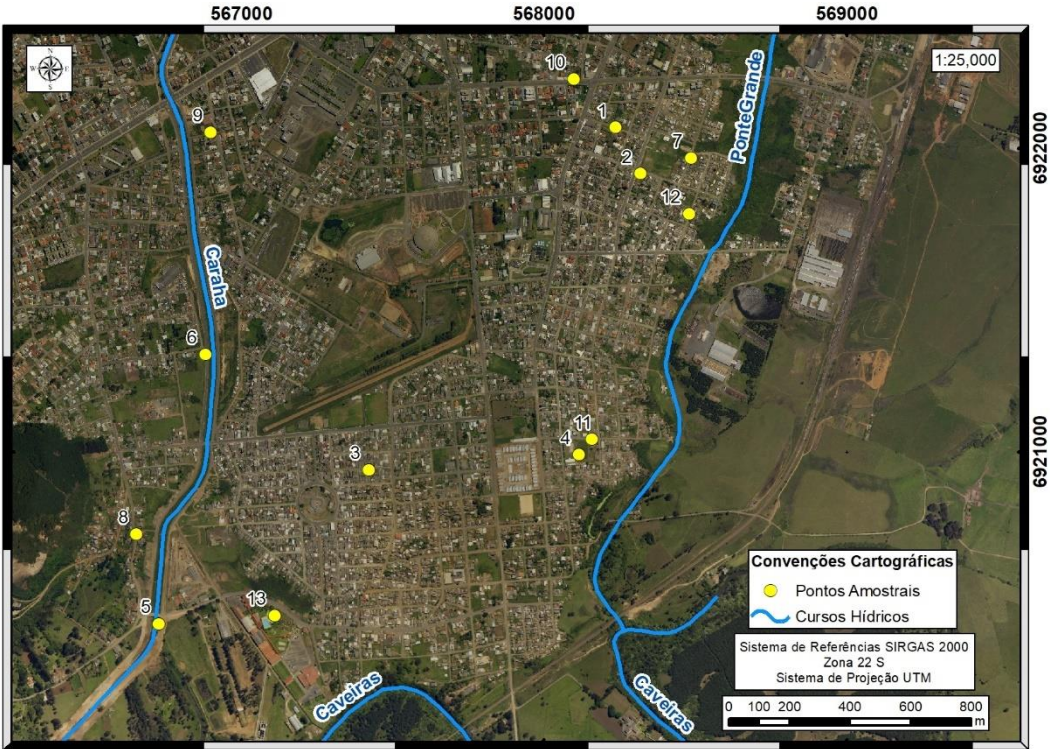
VI é o valor total do imóvel, em R\$;

V_{CD} é o valor do imóvel, pelo método comparativo direto, em R\$;

V_{QB} é o valor do imóvel, pelo método de quantificação de benfeitorias, em R\$.

Por conseguinte, para aplicação do primeiro método, foi realizada uma busca de dados do mercado imobiliário, com intuito de se obter o valor do metro quadrado em reais, na área de estudo. Para tanto, foram avaliados os imóveis que estavam à venda na região, através de consulta as imobiliárias locais, no período de abril de 2022. Dessa forma, foram identificados 13 imóveis à venda na região de interesse e imediações, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Pontos amostrais da valoração de imóveis, situados no município de Lages/SC.



Fonte: Autor (2022).

A partir do valor do metro quadrado desses imóveis (Tabela 7), foi realizada a média aritmética do valor do m² na região, sendo obtido um valor de R\$ 674,40. Após, com o valor do metro quadrado estimado, foi possível calcular o valor de cada estrutura, através da multiplicação pela área do imóvel.

Tabela 7 – Dados obtidos na pesquisa de amostras.

Pontos Amostrais (Fig. 19)	Bairro do imóvel	Valor pedido (R\$)	Área do imóvel (m²)	R\$/m²
1	Popular	300.000,00	302,5	991,73
2	Popular	500.000,00	326,0	1533,74
3	Habitação	200.000,00	200,0	1000,00
4	Várzea	1.800.000,00	6705,4	268,44
5	Bom Jesus	140.000,00	542,0	258,30
6	Bom Jesus	790.000,00	1672,0	472,49
7	Várzea	250.000,00	300,0	833,33
8	Bom Jesus	180.000,00	412,8	436,05
9	Universitário	735.000,00	644,0	1141,30
10	Popular	380.000,00	480,0	791,67
11	Várzea	130.000,00	429,6	302,61
12	Popular	180.000,00	300,0	600,00
13	Caça e Tiro	550.000,00	4000,0	137,50

Fonte: Autor (2022).

Considerando a aplicação do segundo método, adotou-se o valor do Custo Unitário da Construção Civil – CUB/m², para valoração dos imóveis. Deste modo, optou-se por utilizar o valor do CUB Residencial médio de Santa Catarina, referente ao mês de abril de 2022, uma vez que foi o período em que a pesquisa imobiliária do método anterior foi realizada, sendo obtido o valor de R\$ 2.461,35. De mesmo modo, após a estimativa do valor do metro quadrado, foi possível calcular o valor de cada estrutura, através da multiplicação pela área do imóvel.

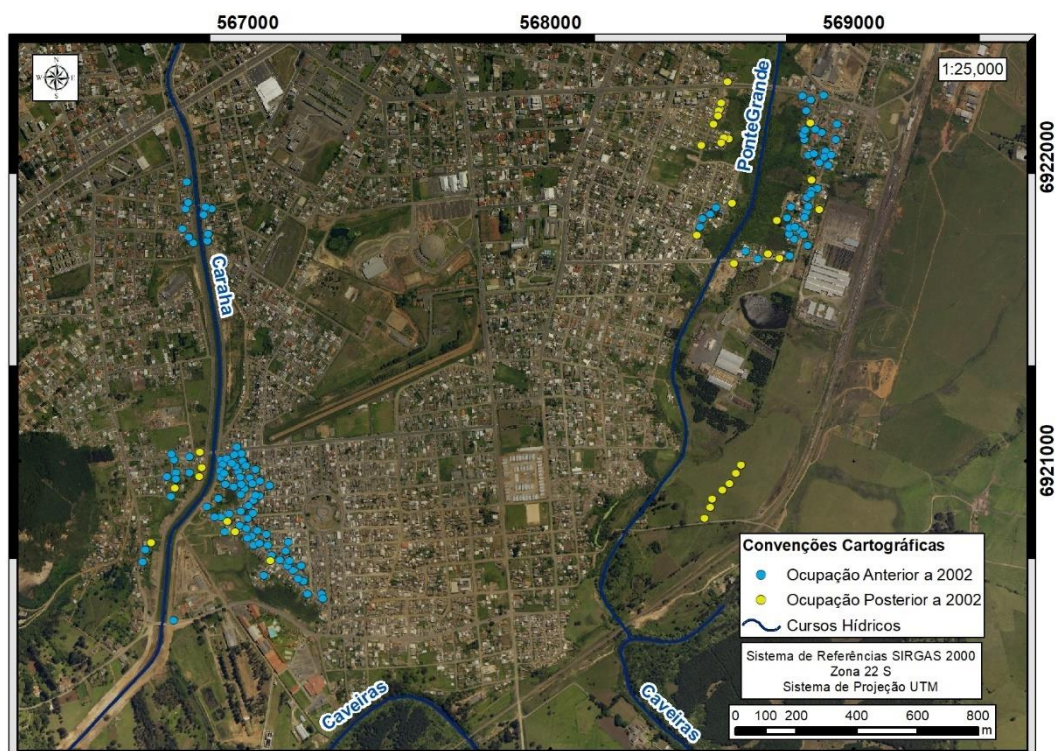
Neste sentido, salienta-se que após a determinação desses parâmetros, foi realizado o cálculo do valor dos imóveis individualmente, através da equação 11, sendo estes valores atribuídos a respectiva estrutura.

Em prosseguimento, quanto as informações adicionais, optou-se por preencher somente os dados das coordenadas da estrutura, o ano de serviço e o campo de notas, este último serviu apenas como campo de texto para descrever as principais características da estrutura. Ademais, pontua-se que o ano de serviço se demonstrou um parâmetro importante para análise dos cenários de evolução de ocupação, uma vez que indica o ano em que uma estrutura foi construída e ocupada, por padrão o FDA adota o ano de 1900 como ano de serviço.

À vista disso, ressalta-se que este ano padrão foi adotado para todas as estruturas de estudo que já eram ocupadas em 2002, enquanto, para as estruturas ocupadas posteriormente à 2002, adotou-se como ano de serviço um ano subsequente. Portanto, o FDA compreende que esta estrutura não existe em 2002, e assim não deve ser considerada para análise de danos no cenário de 2002, apenas no cenário de ocupação atual (2022).

A Figura 20 mostra as edificações amostrais, subdivididas entre as estruturas ocupadas anteriormente a 2002 e as ocupadas posteriormente a 2002, em um total de 124 e 34 edificações, respectivamente. Ressalta-se que as estruturas com ocupação posterior a 2002, foram agregadas apenas para o cenário de 2022.

Figura 20 – Pontos Amostrais, subdivididos conforme período de ocupação.



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que para cada estrutura foi necessário a inserção dos valores do nível do solo, altura de elevação e profundidade de início de danos. Desta maneira, pontua-se que o valor do nível do solo das estruturas foi obtido por meio do Modelo Digital de Terreno de 30 cm, enquanto o campo de início de profundidade de danos foi mantido em branco, uma vez que o próprio FDA estima este valor, no momento da computação da função agregada de nível-dano.

Já para o atributo de altura de elevação da estrutura, primeiramente, foi avaliado se a estrutura amostrada possuía algum tipo de elevação, sendo observadas por meio da base de dados do setor de geoprocessamento da prefeitura de Lages, disponibilizada na plataforma Geolages, na qual tem-se imagens das unidades imobiliárias, além de verificar-se as imagens disponíveis no *Google Street View*. Logo, caso a estrutura não tivesse elevação, era atribuído valor de 0 m, enquanto, nas situações que as edificações possuíam

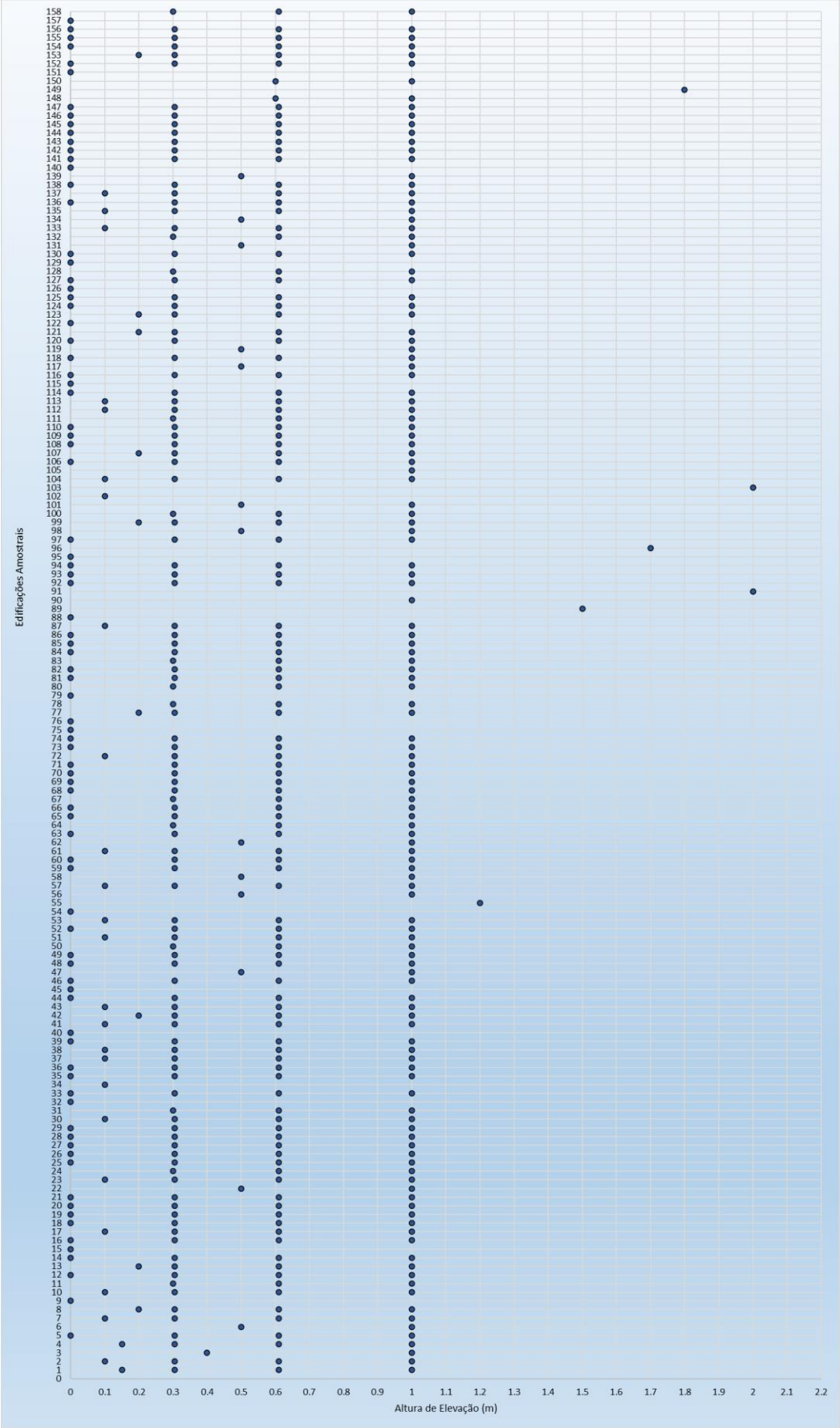
elevação, era inserido o valor estimado da elevação, com base nas observações.

Neste ponto, cabe informar que nas situações em que uma dada edificação possuía elevação, caso a altura elevada fosse superior ou muito próxima a proposta por um determinado plano, a estrutura não era considerada na análise de danos para o plano em questão. Exemplificando, caso fosse observado que uma dada estrutura tinha uma elevação de aproximadamente 0,5 metros, esta edificação não era considerada nos Planos 1 e 2, apenas nos cenários sem projeto e para elevação de 1 metro (Plano 3). Ademais, pontua-se que para as estruturas de dois andares dentro da amostra, optou-se por não considerar aplicação das medidas mitigadoras de elevação de estruturas.

A Figura 21, apresenta todas as edificações inseridas no inventário, na qual pode-se observar as alturas as quais cada uma das estruturas fora elevada, e conseqüentemente para qual plano cada estrutura foi associada.

Neste sentido, tem-se que as estruturas na primeira faixa (0,305 m) pertencem ao Plano 1, na segunda faixa (0,61 m) ao Plano 2 e na terceira faixa (1 m) ao Plano 3. Enquanto, as estruturas situadas as faixas intermediárias são referentes ao Plano Base, e consideram a elevação observada aproximada das edificações amostrais. Assim sendo, nota-se que o Plano sem condições de projeto possui 158 estruturas atribuídas, enquanto, os Planos 1, 2 e 3, possuem 100, 114 e 130 edificações associadas, respectivamente, totalizando um inventário de 502 estruturas.

Figura 21 – Distribuição das elevações aplicadas nas estruturas, individualmente.



Fonte: Autor (2022).

Na sequência, após a conclusão de todas as etapas supracitadas, foram calculadas as funções de profundidade-dano com incerteza, sendo que o FDA computa uma função para cada combinação de Plano e Ano de Análise. Estas funções são a relação dos custos econômicos diretos causados por inundações para uma faixa de níveis de água, para um dado rio ou área de danos.

Quanto as opções de computação, observa-se que foi alterado o número de simulações de Monte-Carlo para computação das funções de nível-dano agregado, sendo alterado o valor padrão de 100 para 500, conforme recomendações do manual do programa (USACE, 2016a).

Por fim, a última etapa consistiu na computação dos danos anuais esperados (EAD) para todas as combinações de cenários estipulados no estudo. De modo que foi possível analisar os potenciais de redução de risco com a aplicação das medidas de mitigação definidas no estudo.

Para computação do EAD, o FDA combina as funções de probabilidade de excedência, vazão-nível e os dados do inventário das estruturas. Ademais, tem-se que as análises dos planos e áreas de danos são realizadas com base em um “*target*” padrão, definido para as condições sem projeto do estudo.

Neste sentido, quanto a definição dos parâmetros para computação do EAD, pontua-se que foi utilizado como “*target*” para performance do modelo, o valor de dano residual de 5% associado ao evento de probabilidade de excedência de 0,01 (TR de 100 anos), sendo considerado uma boa combinação de critérios, com base na experiência do HEC, portanto, sendo a configuração padrão adotada pelo FDA, e mantida por este estudo (USACE, 2016a).

3.3 INDICE DE VULNERABILIDADE

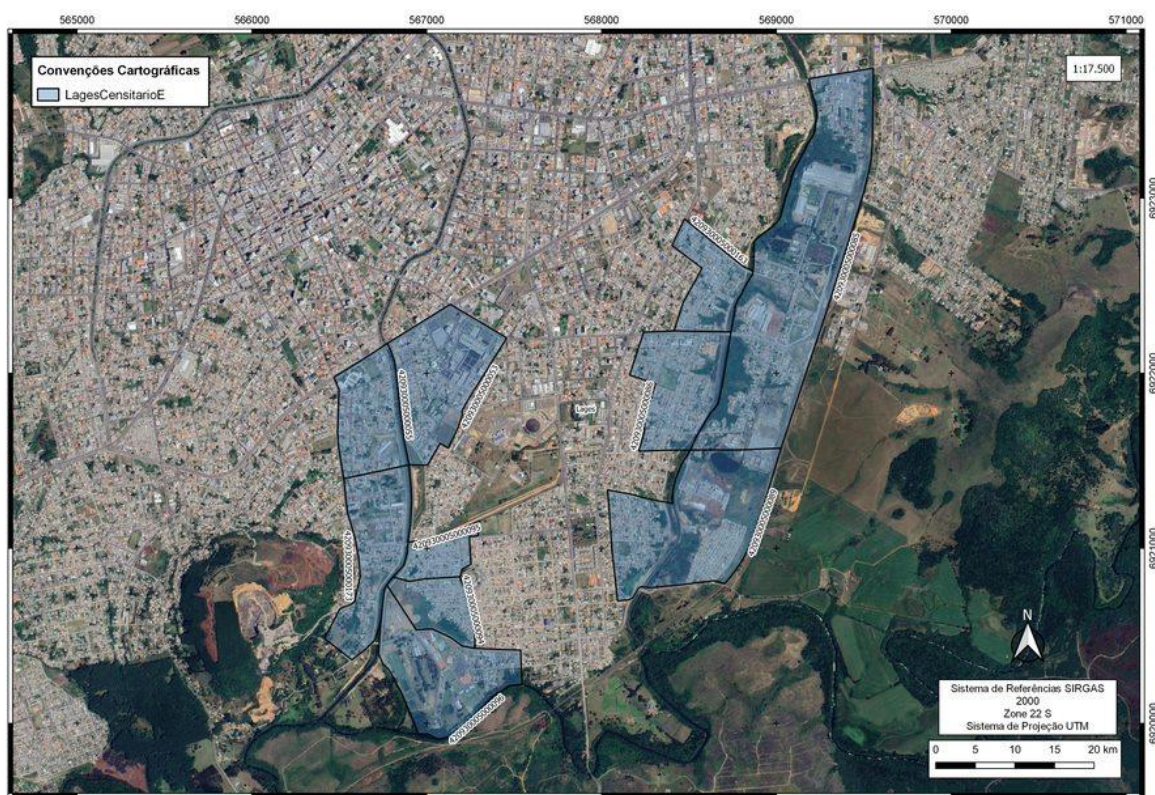
A avaliação de vulnerabilidade foi realizada como forma de complementar os resultados obtidos no HEC-FDA e possibilitar um foco sobre os aspectos da vulnerabilidade dentro das comunidades inseridas na área de domínio do problema. Para tanto, optou-se pela aplicação de índice de vulnerabilidade pautado por parâmetros sociais e econômicos.

Quanto a unidade territorial do domínio, foi escolhido a utilização dos setores censitários do Município de Lages/SC disponíveis na base de dados do IBGE, pois trata-se de uma porção territorial menor que armazena dados censitários, além de respeitar os limites da divisão político-administrativa do Brasil.

Quanto aos dados socioeconômicos, optou-se pelo uso dos dados referentes ao último censo demográfico realizado pelo IBGE em 2010, uma vez que constam no levantamento, dados relevantes para aplicação do índice de vulnerabilidade. No mais, pontua-se que o município de Lages não possui base consolidada de dados censitários.

Além disto, observa-se que para aplicação do índice foram considerados apenas os setores censitários que abrangiam os pontos amostrais utilizados na avaliação econômica, totalizando 10 setores, sendo 4 situados na bacia do Rio Ponte Grande e 6 na bacia do Rio Carahá (Figura 22).

Figura 22 – Localização dos setores censitários utilizados para aplicação do índice de vulnerabilidade.



Fonte: Autor (2022).

Quanto a avaliação do índice de vulnerabilidade, optou-se por utilizar como base os estudos referidos no capítulo da revisão bibliográfica sobre a vulnerabilidade social, em especial, o estudo elaborado por Goerl, Kobiyama e Pellerin (2011). Assim sendo, foram utilizadas 9 variáveis censitárias para construção do índice de vulnerabilidade, referentes a dados econômicos e sociais, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Variáveis do censo do IBGE utilizadas para composição do índice de vulnerabilidade.

Dimensão	Variável	Unidade
Social	Número de moradores do Setor Censitário	Hab.
	Média de Moradores por domicílio	Hab./domicílios
	Densidade demográfica	Hab./km ²
	% da população idosa (acima 60 anos)	Hab. (%)
	% da população de crianças (abaixo de 12 anos)	Hab. (%)
	% de pessoas analfabetas acima de 12 anos	Hab. (%)
	% de mulheres responsáveis pela casa	Hab. (%)
Econômica	% de responsáveis sem rendimento	Hab. (%)
	% de responsável com rendimento até 1 Salário Mínimo	Hab. (%)

Fonte: Autor (2022).

Deste jeito, cabe ponderar que se optou por não utilizar para composição do índice de variáveis de dimensão física, como residências sem acesso à energia elétrica, sem coleta de lixo e com serviço de esgotamento sanitário. Em virtude dos setores censitários de análise possuírem acesso em sua totalidade à energia elétrica, serviço de coleta de lixo, bem como por não possuírem acesso ao serviço de esgotamento sanitário, conforme os dados do último censo do IBGE (2011) e da Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico de Lages (LAGES, 2020).

Posto isto, foi utilizada a Equação 12, adaptada do estudo supracitado, para determinação do Índice de Vulnerabilidade.

$$IV = \frac{Dd + Nm + Mm + TD + E + R + Mr}{IDHM} \quad (12)$$

onde:

IV é o Índice de Vulnerabilidade;

Dd é a densidade demográfica;

Nm é o número de moradores do setor;

Mm é a média de moradores por residência;

TD é a taxa de dependência, sendo a soma do percentual de idosos e crianças;

E é a educação, sendo o percentual de analfabetos acima de 12 anos;

R é a renda, sendo a soma do percentual das variáveis de dimensão econômica;

Mr é o número de responsáveis do sexo feminino;

$IDHM$ é o Índice de Desenvolvimento Humano do Município, sendo para Lages igual a 0,77.

Observa-se que as variáveis foram padronizadas para mesma unidade, sendo escalonadas entre 0 e 1, com valor mínimo representado por 0 e valor máximo pelo 1, conforme demonstra a Equação 13 (MARCELINO, NUNES e KOBIYAMA, 2006).

$$\text{Índice} = \frac{(V_{\text{observado}} - V_{\text{mínimo}})}{(V_{\text{máximo}} - V_{\text{mínimo}})} \quad (13)$$

Outrossim, ressalta-se que para classificação do Índice de Vulnerabilidade, optou-se por dividir as quatro classes (baixa, média, alta e muito alta), por meio de intervalos igualmente distribuídos, considerando os valores máximos e mínimos do índice.

Ao fim, os resultados obtidos pela aplicação do índice de vulnerabilidade foram confrontados com as manchas de inundações geradas na modelagem hidrodinâmica, assim como com os resultados obtidos nas simulações do FDA. De modo a possibilitar análise para verificar se as áreas mais vulneráveis se encontram dentro de área inundável e abrangem as edificações com danos observados por simulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O Apêndice A, apresenta os resultados obtidos a partir da análise da série histórica, considerando as chuvas de 5d, 7d, 9d, 14d e 30d. Deste modo, evidencia-se que as chuvas máximas acumuladas de 5, 7, 9, 14 e 30 dias seguem a Distribuição de Gumbel, uma vez que o D calculado encontra-se abaixo do D crítico, ao nível de 1% de probabilidade.

Por conseguinte, os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov indicam que as séries de dados de chuvas máximas acumuladas se ajustam a Distribuição de Probabilidade de Gumbel ao nível de 1% de probabilidade.

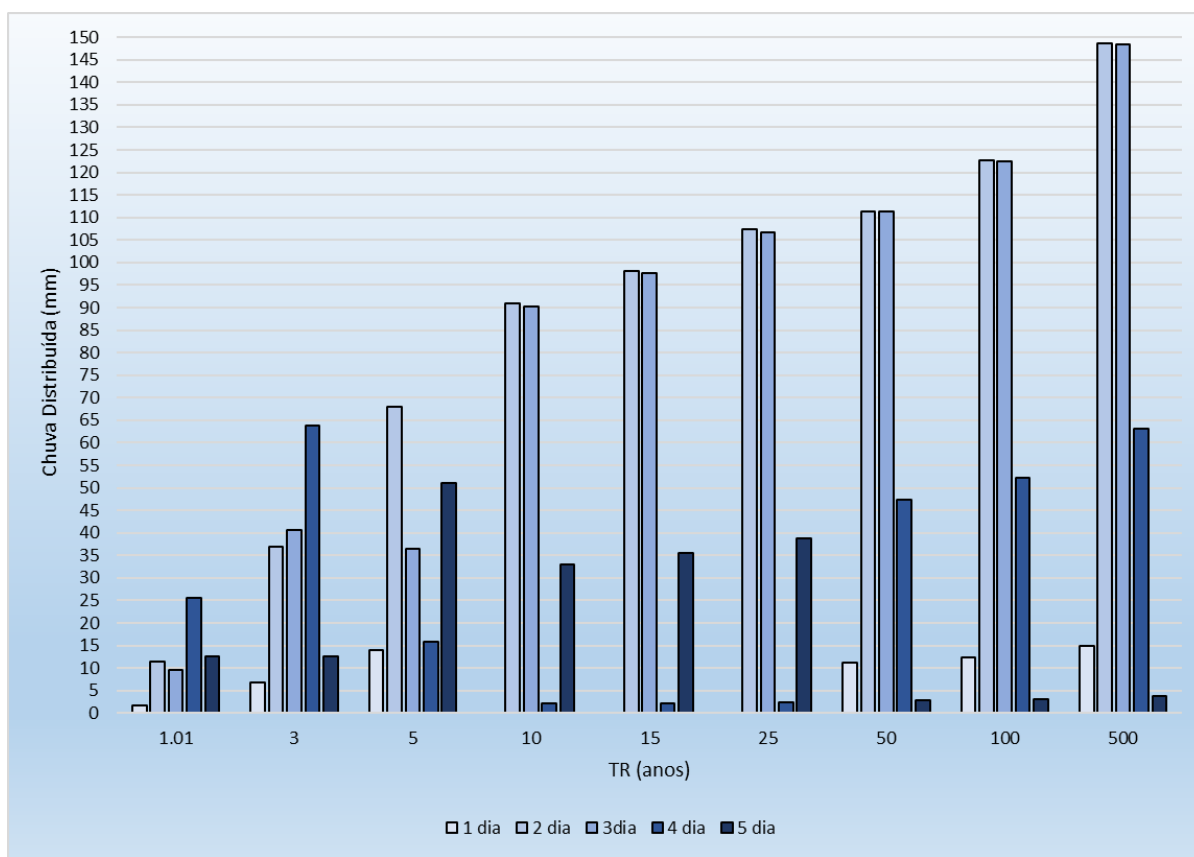
A Tabela 9 mostra as chuvas máximas acumuladas de 5 dias calculadas pelo Modelo Probabilístico Inverso de Gumbel. Já a Figura 23 apresenta a distribuição das chuvas para cada período de retorno avaliado no estudo.

Tabela 9 – Chuvas Máximas acumuladas de 5d para os tempos de retornos.

TR (anos)	Chuvas 5d (mm)
1,01	60,84
3	160,77
5	185,31
10	216,15
15	233,54
25	255,11
50	284,01
100	312,70
500	379,00

Fonte: Autor (2022).

Figura 23 – Distribuição das Chuvas Máximas acumuladas de 5d.



Fonte: Autor (2022).

Na sequência, em complemento, pontua-se que foi calculado o erro relativo do Modelo de Gumbel, sendo obtido um erro médio de 0,033 %, para estimativa da série observada, a partir do modelo de probabilidade. Portanto, observa-se que o modelo se demonstrou adequado para estimativa das chuvas de projeto, considerando os resultados obtidos no teste de Kolmogorov-Smirnov e o erro relativo associado ao modelo baixo.

Dessarte, com as chuvas de projeto obtidas foi realizada a transformação chuva-vazão, através do modelo calibrado do Sistema Ponte Velha no HEC-HMS.

Neste sentido, o Apêndice B apresenta os hidrogramas de projetos obtidos na simulação hidrológica, referentes as junções J4 (Rio Caveiras), J8 (Rio Ponte Grande) e J13 (Rio Carahá), para os diferentes tempos de recorrências estudados.

4.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Em prosseguimento, após a geração dos hidrogramas de projeto, foi realizada a modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS. Desta maneira, a Tabela 10 resume os níveis de água mínimo e máximo modelados para cada um dos tempos de retorno do estudo.

Tabela 10 – Nível de Água para cada Tempo de Retorno, considerando as áreas de domínio do problema, referente as bacias dos rios Caveiras, Carahá e Ponte Grande, no município de Lages/SC.

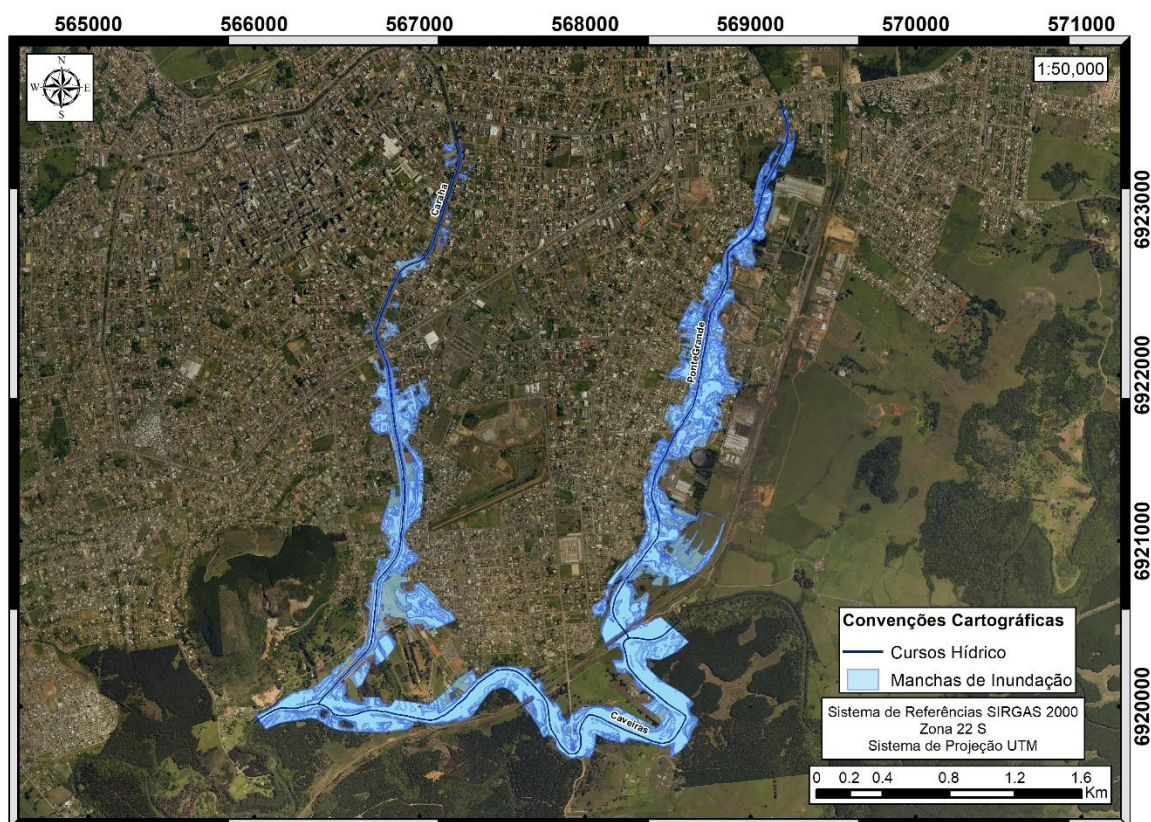
TR (anos)	Nível Mínimo	Nível Máximo (m)
1.01	0,01	2,205
3	0,01	5,116
5	0,01	5,613
10	0,01	6,251
15	0,01	6,378
25	0,01	6,700
50	0,01	7,104
100	0,01	7,461
500	0,01	8,194

Fonte: Autor (2022).

Enquanto, a Figura 24 mostra as fronteiras das manchas de inundações modeladas, sendo possível observar o espalhamento da água nas bacias urbanas.

O Apêndice C apresenta as manchas de inundação para cada um dos tempos de retorno, de modo individual. Desta forma, salienta-se que os resultados obtidos na modelagem hidrodinâmica foram organizados em formato de tabela dentro do RAS, para posterior exportação das informações de interesse para o FDA, sendo a vazão total, a elevação mínima do canal e a superfície de elevação da água, para cada uma das seções transversais, em todos os oito tempos de retorno.

Figura 24 – Polígonos de Inundações para todos os tempos de retornos adotados no estudo.

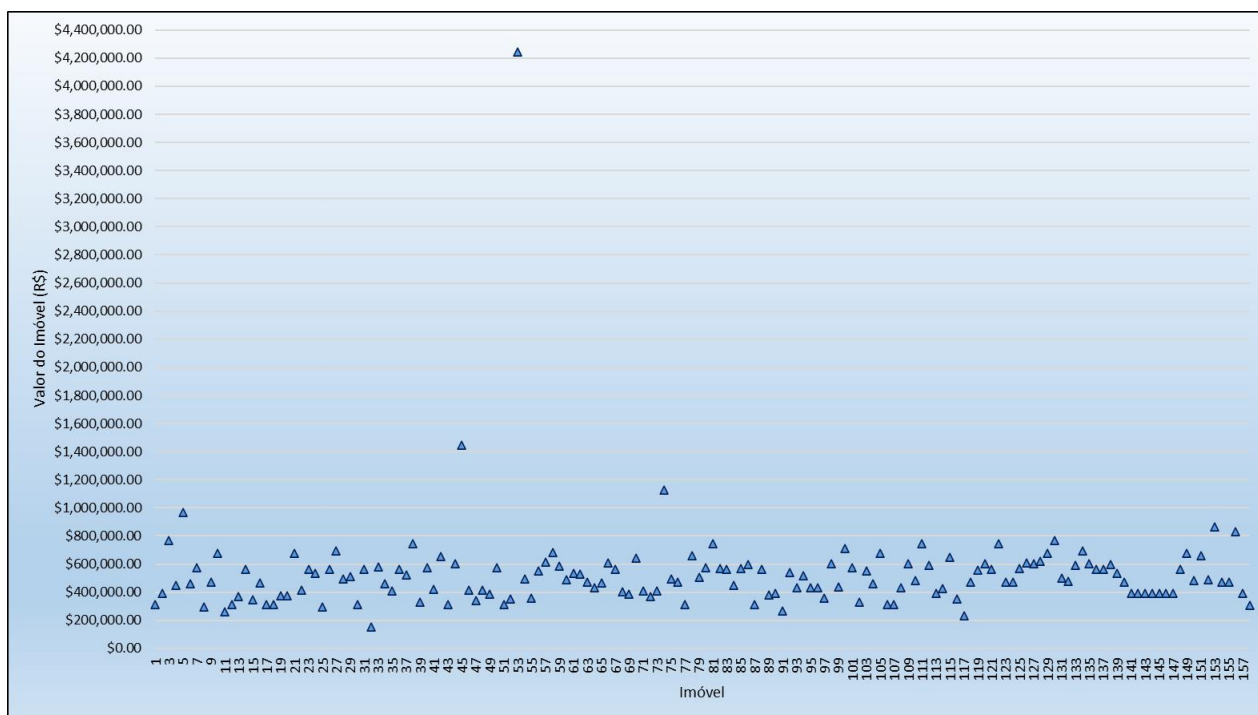


Fonte: Autor (2022).

4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Quanto aos resultados obtidos na avaliação econômica, primeiramente, cabe apresentar a Figura 25, que demonstra o valor de cada uma das estruturas amostradas, obtido através da aplicação do método evolutivo (Equação 11). Dessa forma, observa-se que os valores dos imóveis amostrais, apresentaram valor médio de R\$ 531.454,36, com edificação de menor preço na faixa de R\$ 151,252,90, enquanto, a maior valor está na faixa de R\$ 4.242.528,64.

Figura 25 – Valor dos imóveis, obtido através da aplicação do método evolutivo, considerando período de abril de 2022.



Fonte: Autor (2022).

No Apêndice D constam as funções de probabilidade de excedência de vazão, as funções de nível-vazão e as funções agregadas de nível-dano, para cada curso hídrico. As quais foram utilizadas para computação do EAD.

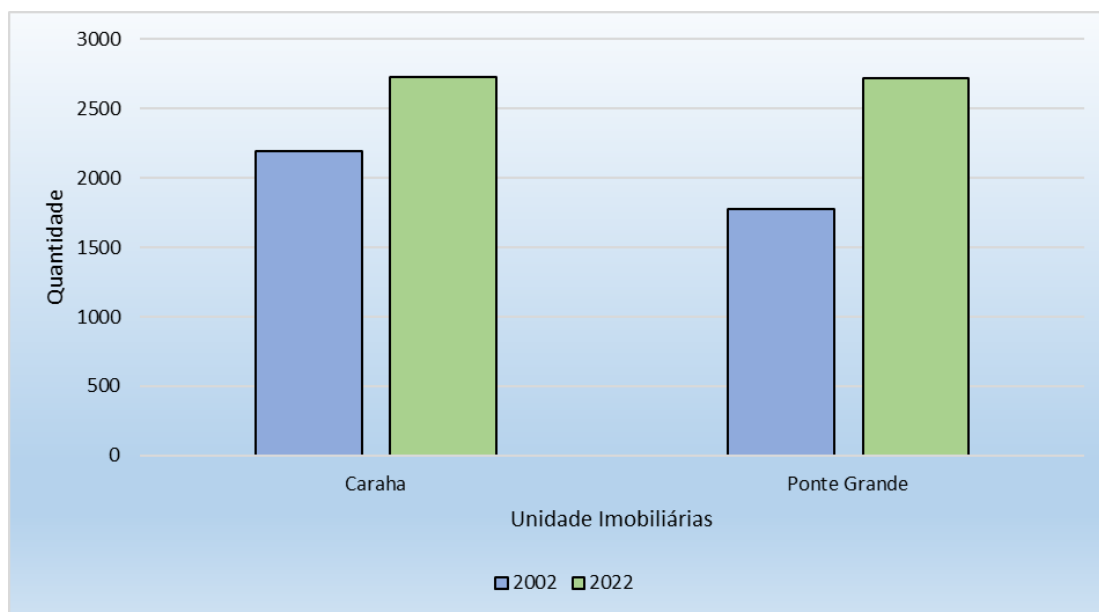
4.3.1 CENÁRIO DE CRESCIMENTO DA OCUPAÇÃO URBANA

Considerando a evolução da ocupação urbana, observou-se uma maior alteração de ocupação na bacia do Rio Ponte Grande, com acréscimo considerável de construções, assim como, tem-se um maior número de lotes cadastrados na base de dados municipal. Já para bacia do Rio Carahá, nota-se um menor acréscimo de construções, sendo perceptível uma maior consolidação de ocupação das áreas no ano de 2002 em relação ao cenário atual.

Neste sentido, o Apêndice E apresenta mapas comparativos na evolução do crescimento urbano, por meio das ortofotos da região de interesse, referente a 2002 e 2012, que corroboram os fatos descritos.

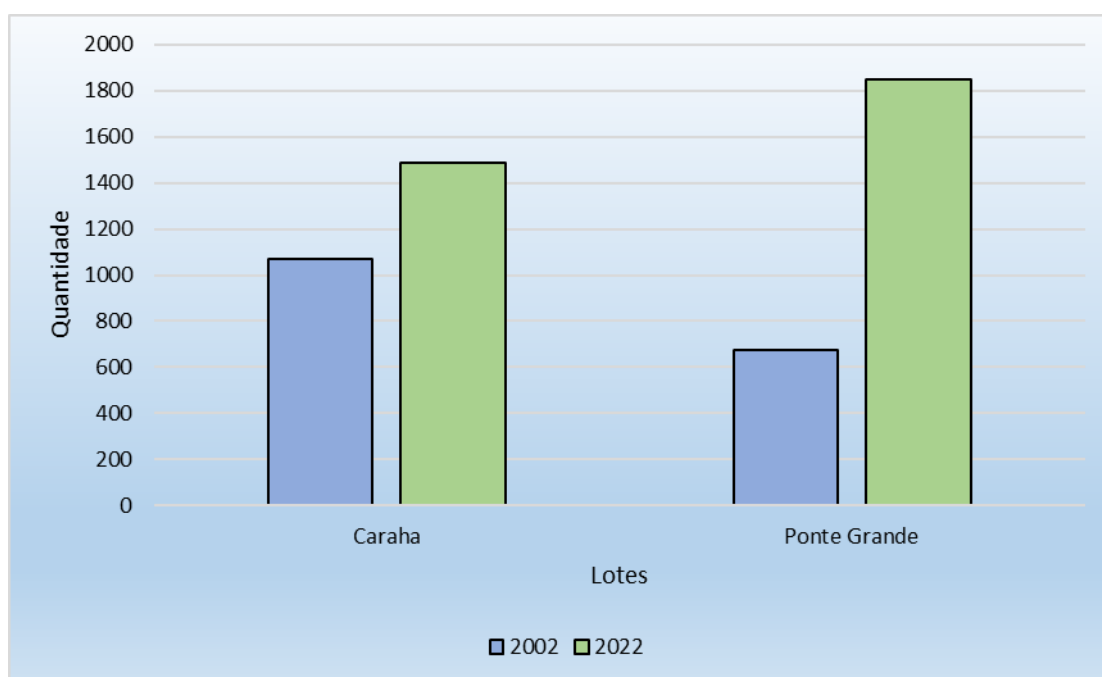
Adiante, considerando o crescimento de ocupação na área de interesse, em especial, aos setores censitários avaliados, as Figuras 26 e 27 mostram a evolução das unidades imobiliárias e lotes cadastrados, no intervalo de 20 anos, nas quais fica perceptível um maior avanço na bacia do rio Ponte Grande.

Figura 26 – Crescimento das Unidades Imobiliárias na área de interesse.



Fonte: Autor (2022).

Figura 27 – Crescimento dos lotes na área de interesse.



Fonte: Autor (2022).

Considerando as edificações amostrais, observa-se que do total de 158 estruturas, 124 já eram ocupadas em 2002, enquanto as novas edificações representam um acréscimo de 27,41 % na amostra. Além disso, dos 34 pontos amostrais, verificou-se maior número de edificações na área do Rio Ponte Grande, com 26 novas estruturas, enquanto, para área do Rio Carahá tem-se 8 estruturas ocupadas após 2002.

Posto isto, a Tabela 11 apresenta o EAD computado através da simulação econômica no HEC-FDA, para as áreas de alcance de danos dos rios Carahá e Ponte Grande, bem como o EAD total, considerando os cenários de crescimento de ocupação urbana.

Tabela 11 – Dano Anual Esperado (EAD), por cenário de evolução urbana, referente aos anos de 2002 e 2022.

Área de Danos	EAD 2002 (R\$)	EAD 2022 (R\$)	Variação do EAD (%)
Rio Carahá	120.869,47	153.091,92	+ 26,66
Rio Ponte Grande	145.221,20	278.216,72	+ 91,58
Total	266.090,67	431.308,64	+ 62,09

Fonte: Autor (2022).

Nota: Valores nominais de abril de 2022.

Portanto, constatou-se um aumento nos danos anuais esperados, entre o cenário de ocupação urbana em 2002 e o cenário atual de ocupação, com incremento de danos em torno de 62,09 % no total. Observou-se um aumento expressivo nos danos anuais esperados para o trecho do Rio Ponte Grande, com aumento em cerca de 91,58%. Enquanto, para o trecho do Rio Carahá, verificou-se um aumento nos danos, contudo, em menor proporção quando comparado com a área do Ponte Grande.

Considerando estudo elaborado por Tiepolo e Galligari (2021), que avaliou a relação da expansão urbana na região de Dosso na Nigéria com os danos de inundações entre o período de 2001 até 2020, observa-se que verificaram a expansão de assentamentos urbanos em zonas propensas a inundações, em virtude de fatores como o crescimento populacional, falta de conscientização e a pobreza.

Já nos resultados obtidos, nota-se que constataram um crescimento com taxa média anual de 3,5% nas cidades, entre os anos de 2004 e 2019, sendo

observado 14% de danos nos assentamentos avaliados situados em áreas urbanas (TIEPOLO e GALLIGARI, 2021).

Considerando os estudos identificados na revisão bibliográfica que utilizaram o FDA em sua metodologia para avaliação dos danos de inundações (QI e ALTINACAR, 2011; CUNHA e TAVARES-PINTO, 2011; MOHAMMADI, NAZARANHA e MEHRDADI, 2014; LEE et al., 2015; MAS, 2015; DIFRANCESCO, GITELMAN e PURKEY, 2020; MOOSAKHAANI, SALIMI e SADATIPOUR, 2020; MOOSAKHAANI et al., 2021), evidencia-se que não foi identificada pesquisa que tenha realizado uma análise de evolução dos danos em uma dada área, que possa ser comparada com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Embora, observa-se que Van Dau, Kuntiyawichai e Plermkamon (2017), estimaram por meio do FDA os danos de inundações considerando potenciais impactos da mudança climática no Vietnã, em cenário atual e futuro. De modo que obtiveram em seus resultados um EAD equivalente a 18,8 milhões de dólares em 2020, e 20,7 milhões de dólares em 2080, resultando em aumento de cerca de 10% nos danos esperados, para o cenário de mudança climática RCP 8,5 (*Representative Concentration Pathways*).

4.3.1.1 Considerações sobre a Hipótese 1

Considerando o cenário de evolução do crescimento da ocupação urbana, observou-se uma maior evolução urbana na bacia do Rio Ponte Grande, sendo que das 34 novas edificações da amostra, 26 estão situadas nesta bacia. Ademais, nota-se que todas as novas edificações se encontravam localizadas em áreas da planície de inundação, de modo que todas agregaram função de nível-dano para a computação do EAD.

Ao final, foi constatado um aumento de 62,09 % dos danos associados aos eventos de inundações, considerando a área de domínio do problema deste estudo, que abrange parte das bacias urbanas dos Rios Ponte Grande e Carahá. Foi verificado um maior incremento de danos na bacia do rio Ponte Grande, cerca de 91 %, a qual demonstrou maior grau de expansão urbana no período dos últimos vinte anos, enquanto, a bacia do Rio Carahá apresentou

menor grau de expansão urbana entre o período de 2002 e 2022, sendo observado na avaliação econômica um acréscimo em torno de 26 % de danos.

Neste sentido, os resultados obtidos no HEC-FDA quantificam que o crescimento urbano em áreas de planície inundáveis aumenta os danos econômicos associados, uma vez que haverá uma maior quantidade de edificações expostas ao risco, e consequentemente, um maior valor de danos esperados associado.

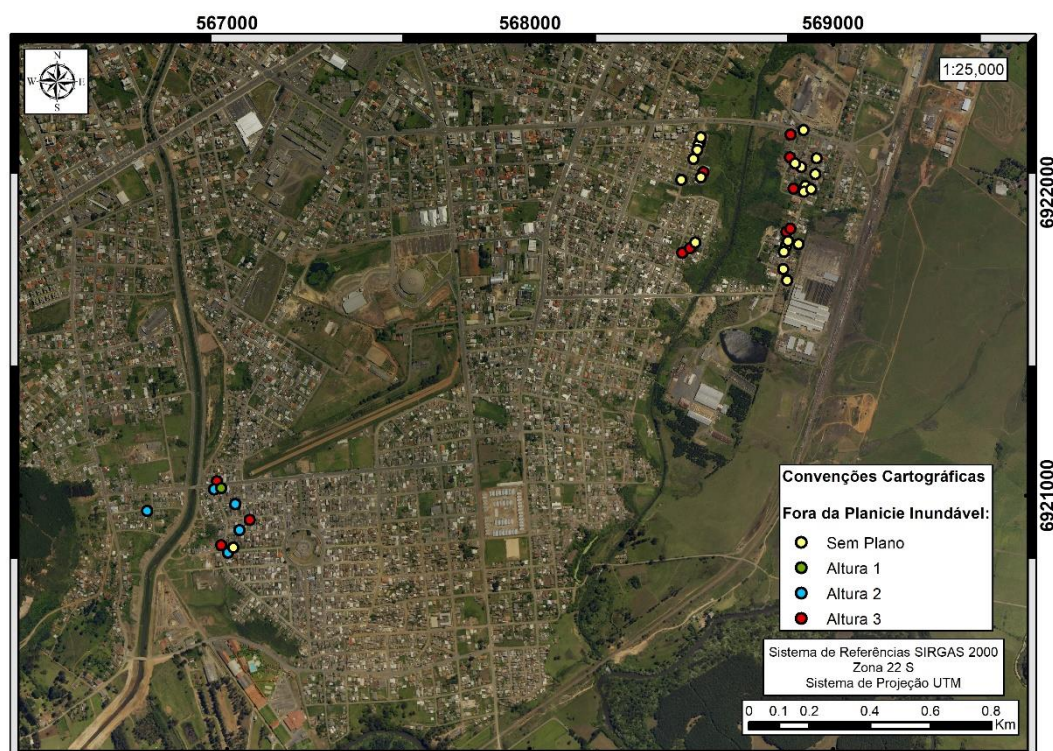
4.3.2 CENÁRIO DE APLICAÇÃO DA MEDIDA MITIGADORA

Considerando os cenários de aplicação de medidas mitigadoras, inicialmente, constatou-se através das observações realizadas para construção do inventário das estruturas, que 46 % das edificações amostrais possuíam algum tipo de elevação pré-existente, seja por meio de degraus, fundação elevada, pilares elevados entre outros.

Neste sentido, a Figura 28 apresenta as edificações consideradas situadas fora da planície inundável pelo FDA, no momento da computação das funções agregadas de nível-danos. Ou seja, representa as estruturas com nível do solo mais altura elevada fora do alcance do WSE, para os diferentes TR's utilizados na análise de risco. Assim sendo, a Figura 28 demonstra a partir de qual cenário uma dada edificação foi considerada fora da planície inundável.

Nesta senda, observa-se que para o cenário sem projeto, 23 edificações foram consideradas fora da planície inundável, enquanto para os planos 1, 2 e 3, foram consideradas fora da planície 17, 24 e 36 estruturas, respectivamente. Ademais, nota-se uma maior quantidade de edificações desconsideradas na computação do EAD, na área do Rio Ponte Grande.

Figura 28 – Edificações fora da planície inundável, a partir de um dado plano.



Fonte: Autor (2022).

Considerando a estimativa de início de danos realizada pelo FDA, constatou-se que para o cenário sem projeto, os danos começavam a surgir a partir do TR de 5 anos, afetando duas edificações, sendo que boa parte das amostras possuía início de danos entre os TR's de 10 a 25 anos, com 31 edificações. Já para os TR's de menor recorrência, entre 50 e 500 anos, nota-se o início de danos para 44 imóveis. No mais, observa-se que para área do rio Carahá uma maior quantidade de edificações foi considerada sem danos, na análise de risco estimada no FDA (Figura 29).

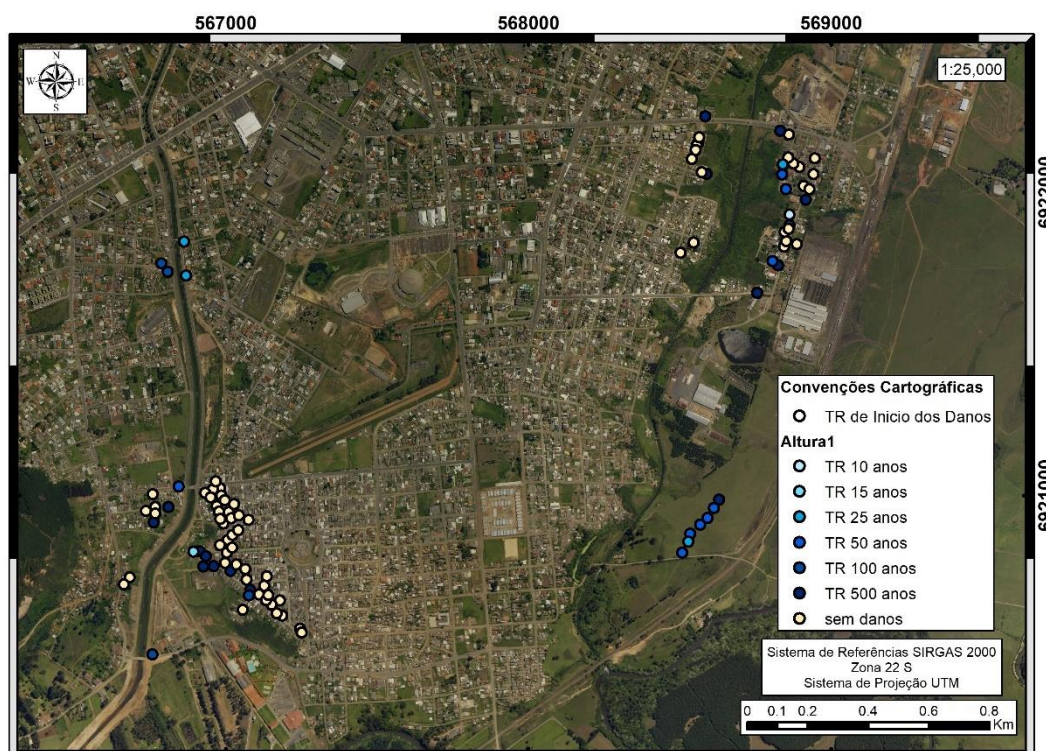
Figura 29 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário sem projeto.



Fonte: Autor (2022).

Considerando o cenário com elevação de estruturas a 0,305 m, observou-se que os danos se iniciavam no TR de 10 anos, afetando uma edificação. Ademais, percebe-se que 29 estruturas possuem início de danos a partir do TR de 50 anos, de mesmo modo, uma maior quantidade de edificações foi considerada sem danos para o trecho do Rio Carahá (Figura 30).

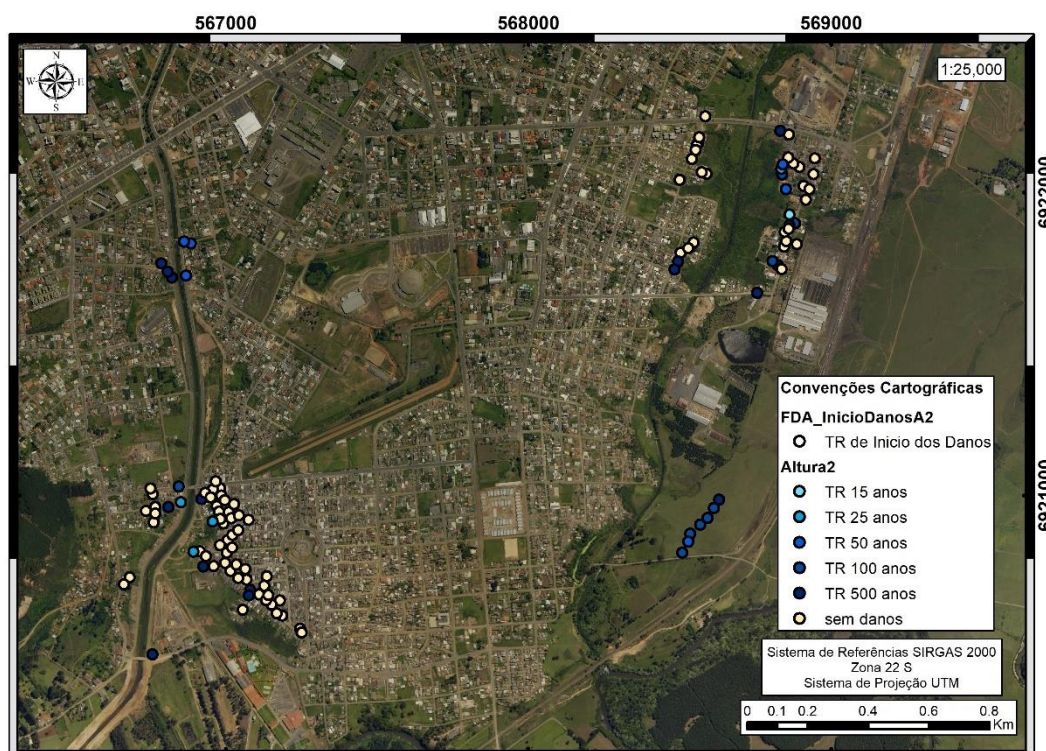
Figura 30 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário com elevação de 0,305 m.



Fonte: Autor (2022).

Em seguida, para o cenário com elevação de estruturas a 0,61 m, nota-se que os danos se iniciavam no TR de 15 anos, afetando uma única edificação. Enquanto, uma maior quantidade de edificações os danos se iniciam a partir do TR de 100 anos (Figura 31).

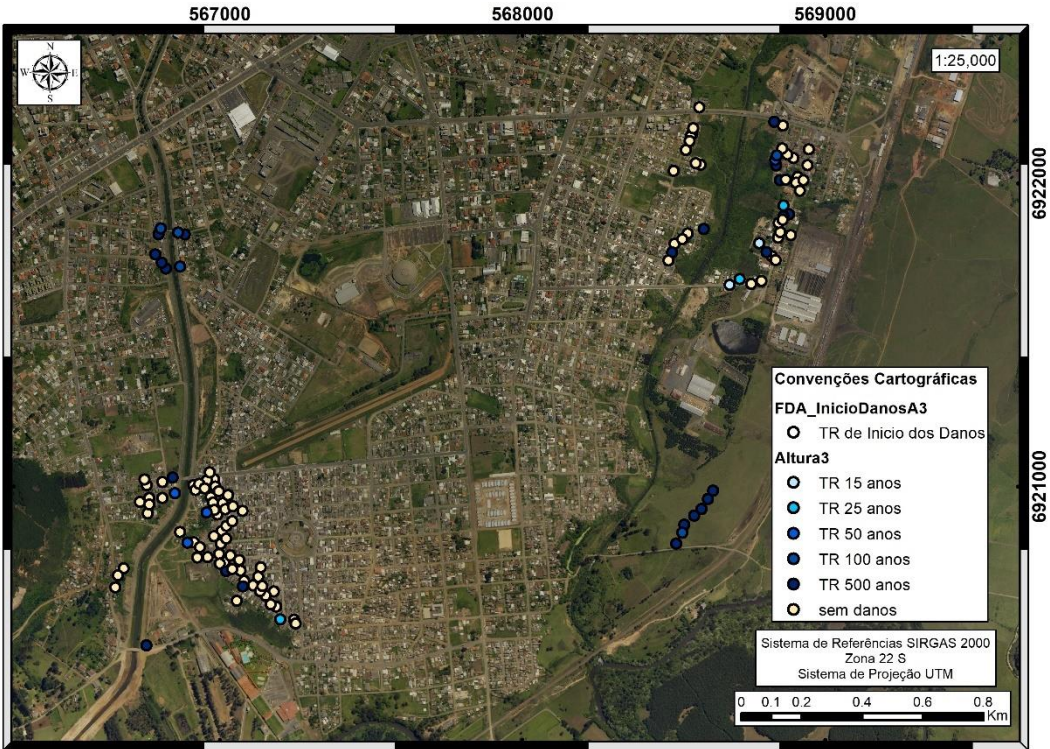
Figura 31 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário com elevação de 0,610 m.



Fonte: Autor (2022).

Já para o cenário com elevação de estruturas a 1,00 m, nota-se que os danos se iniciavam no TR de 15 anos, afetando duas construções, sendo que a maior quantidade de edificações era afetada a partir do TR de 500 anos, com 22 edificações consideradas na análise de risco. De mesmo modo, destaca-se que a maioria das edificações consideradas sem danos, estavam situadas na área do Rio Carahá (Figura 32).

Figura 32 – Tempo de Retorno de Início dos Danos para as edificações, considerando cenário com elevação de 1,000 m.



Fonte: Autor (2022).

Posto isto, a Tabela 12 apresenta o EAD computado através da simulação econômica no HEC-FDA, para os quatro planos estipulados no estudo, considerando o cenário sem projeto e os cenários com aplicação da medida mitigadora de elevação de estruturas.

Tabela 12 – Dano Anual Esperado (EAD), por cenário de medida mitigadora.

Plano	EAD (R\$)	Redução de Danos (R\$)	Redução de Danos (%)
Sem Projeto	431.308,64	0	0
Altura 1	117.599,90	313.708,74	72,73
Altura 2	91.692,29	339.616,36	78,74
Altura 3	72.890,26	358.418,39	83,10

Fonte: Autor (2022).

Nota: Valores nominais de abril de 2022.

Desta maneira, constatou-se uma redução nos danos anuais esperados, quando aplicados os planos de medidas mitigadoras, sendo observada uma redução de danos de aproximadamente 72,73 %, 78,74% e 83,10%, para os

planos 1, 2 e 3, respectivamente, em comparação com o cenário sem aplicação de medidas mitigadoras, na análise de risco efetuada pelo FDA.

A Tabela 13 apresenta o EAD por áreas de danos, considerando a aplicação das medidas mitigadoras. Na qual, percebe-se uma redução de danos para ambas as áreas, sendo observado uma maior estimativa de danos na área do Rio Ponte Grande, para todos os cenários avaliados. No Apêndice F constam as curvas de probabilidade de excedência pela média de redução dos danos, computadas pelo FDA para os cenários de aplicação dos planos propostos.

Tabela 13 – Dano Anual Esperado (EAD), por cenário de medida mitigadora, pelas áreas de danos.

Área de Danos	EAD Sem Projeto (R\$)	EAD Altura 1 (R\$)	EAD Altura 2 (R\$)	EAD Altura 3 (R\$)
Rio Carahá	153.091,92	41.868,85	39.831,58	24.363,51
Rio Ponte Grande	278.216,72	75.731,05	51.860,71	48.526,75
Total	431.308,64	117.599,90	91.692,29	72.890,26

Fonte: Autor (2022).

Nota: Valores nominais de abril de 2022.

Considerando estudo elaborado por Shrestha, Kawasaki e Zin (2021), que avaliou os danos de inundações para diferentes padrões construtivos de edificações, inclusive residências elevadas, por meio do desenvolvimento de curvas de danos de inundação, para região de Bago em Myanmar. Nota-se que verificaram nas casas amostradas do tipo elevada, aplicação de elevações médias entre 1,4 e 1,9 metros, sendo constatado que nas áreas mais propensas as inundações dos municípios de estudo, a maioria das famílias construía casas do tipo elevada com pilares, visando adaptar-se as inundações.

Quanto aos resultados obtidos, observaram valores de danos estimados menores para as edificações do tipo elevada em comparação com as construções do tipo normal (um andar e dois andares, sem estrutura elevada), em dois dos três municípios avaliados. Assim, concluem que as casas sem elevações podem ser mais facilmente danificadas, uma vez que se encontram mais próximas do nível do solo, bem como os danos de inundações nestes

tipos de edificações podem ser reduzidos significativamente com aplicação de elevação de estruturas (SHRESTHA, KAWASAKI e ZIN, 2021).

Nofal e Lindt (2021), avaliaram a aplicação de elevação de estruturas, considerando elevação de 3 metros, em combinação com outras medidas de mitigação, como *buyout*, diques e sistemas de retenção, no total de 28 cenários de mitigação, em comunidades dos Estados Unidos.

Os resultados da pesquisa indicam que os cenários avaliados com aplicação da combinação das medidas mitigadoras de *buyout* e elevação de estruturas, podem reduzir as perdas econômicas ocasionadas por inundações, entre 3,93 até 49,56 milhões de dólares americanos, sendo que está redução de danos aumenta para os cenários que consideram a implantação adicional das medidas de diques e sistemas de retenção, sendo estimadas reduções de até 131,33 milhões de dólares americanos, equivalente a cerca de 98% dos danos em condições sem aplicação de medidas mitigadoras. Os autores pontuam que a aplicação da política de *buyout* em conjunto com a elevação das edificações exige financiamento substancial, contudo, fornece proteção significativa para os imóveis na planície de inundação (NOFAL e LINDT, 2021).

Já De Ruig et. al (2019), consideraram dentro de sua pesquisa, cenários de aplicação de elevação de estruturas para avaliar o custo-benefício da adoção de medidas adaptativas às inundações, no estado da Califórnia, Estados Unidos.

O estudo adotou cenários com elevações de 2, 4, 6 e 8 pés (0,61, 1,22, 1,83 e 2,44 metros, respectivamente), sendo constatado que a medida de elevação das edificações se adaptou melhor em áreas com altas profundidades de inundação, bem como os custos de investimento nas medidas de adaptação às inundações podem ser uma barreira para sua efetiva implementação (DE RUIG et. al, 2019).

Quanto aos estudos identificados na revisão bibliográfica que utilizaram o HEC-FDA para avaliação dos danos (item 2.4), observa-se que nenhum considerou a aplicação da medida de elevação de estruturas dentro de seus escopos. Entretanto, pontua-se que alguns estudos propuseram cenários com aplicações de outras medidas mitigadoras, como barragens, aplicação de seguros contra enchentes e planos com mudanças na conformação do canal,

de maneira que avaliaram a redução dos danos anuais esperados com a adoção das medidas adaptativas consideradas (LEE et al., 2015; MAS, 2015; MOOSAKHAANI et al., 2021).

4.3.2.1 Considerações sobre a Hipótese 2

Considerando o cenário de aplicação de medidas mitigadoras, constatou-se que os danos iniciavam na área a partir do TR de 5 anos, para o cenário sem projeto. Enquanto para os cenários com projetos os danos iniciavam a partir dos TR's de 10 e 15 anos, sendo perceptível a variação do início de danos para uma dada estrutura, conforme a mudança do plano associado.

Por fim, foi constatado reduções de 72,73 %, 78,74 e 83,10 % dos danos associados aos eventos de inundações, considerando a aplicação de medidas mitigadoras de elevação de estruturas de 0,305 m, 0,61 m e 1 m, respectivamente, sendo quantificado a redução dos danos econômicos, conforme o aumento do nível, em relação ao solo, das edificações amostradas. No mais, verificou-se que em ambas as bacias urbanas ocorreram diminuições nos prejuízos decorrentes dos eventos de inundações com a adoção das medidas de controle.

Neste sentido, os resultados obtidos no HEC-FDA mostram que a aplicação de medidas mitigadoras de elevação de estruturas contribui para diminuir os danos econômicos associados aos eventos de inundações nas áreas avaliadas por este estudo.

4.4 AVALIAÇÃO VULNERABILIDADE

Sobre a avaliação de vulnerabilidade, pontua-se que no Apêndice G constam mapas que espacializam as principais variáveis utilizadas na composição do índice de vulnerabilidade aplicado.

Posto isto, após a compilação dos dados das variáveis utilizadas e padronização dos valores, foi aplicado o índice de vulnerabilidade, por meio da Equação 12.

A Tabela 14 apresenta o intervalo de blocos utilizado para classificação do índice, sendo definidas os intervalos das classes de baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade, bem como indicado a quantidade de setores censitários de cada classe. Enquanto, a Tabela 15 mostra o índice de vulnerabilidade calculado para cada setor, bem como a respectiva classificação.

Tabela 14 – Intervalo de blocos para classificação do Índice de Vulnerabilidade.

Classe	Índice de Vulnerabilidade	Quantidade	%	% acumulado
Baixa	1,270 - 2,556	1	10	10
Média	2,557 - 3,842	4	40	50
Alta	3,843 - 5,128	3	30	80
Muito Alta	5,129 - 6,414	2	20	100
Total	-	10	100	100

Fonte: Autor (2022).

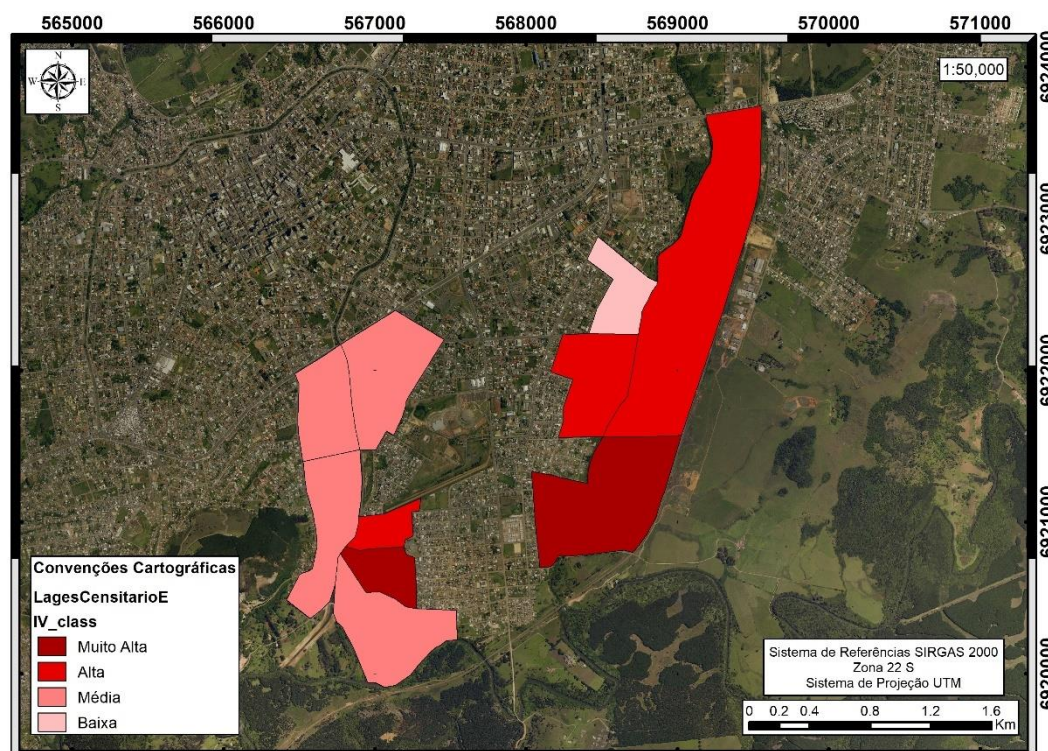
Tabela 15 – Índice de Vulnerabilidade para os setores censitários da área de estudo.

Código do Setor	Índice de Vulnerabilidade	Classificação do IV
420930005000094	6.413	Muito Alta
420930005000089	5.479	Muito Alta
420930005000095	5.030	Alta
420930005000086	4.011	Alta
420930005000085	3.890	Alta
420930005000173	3.639	Média
420930005000096	3.330	Média
420930005000055	3.274	Média
420930005000053	3.164	Média
420930005000163	1.270	Baixa

Fonte: Autor (2022).

A Figura 33 espacializa o Índice de Vulnerabilidade, sendo perceptível a predominância dos setores classificados com vulnerabilidade muito alta e alta, na área do Rio Ponte Grande, bem como o setor com menor vulnerabilidade. Enquanto, para a área do Rio Carahá, verifica-se a presença de um setor com classificação de vulnerabilidade muito alta, sendo nos demais observado a predominância da classe de vulnerabilidade média.

Figura 33 – Índice de Vulnerabilidade para os setores censitários da área de estudo.



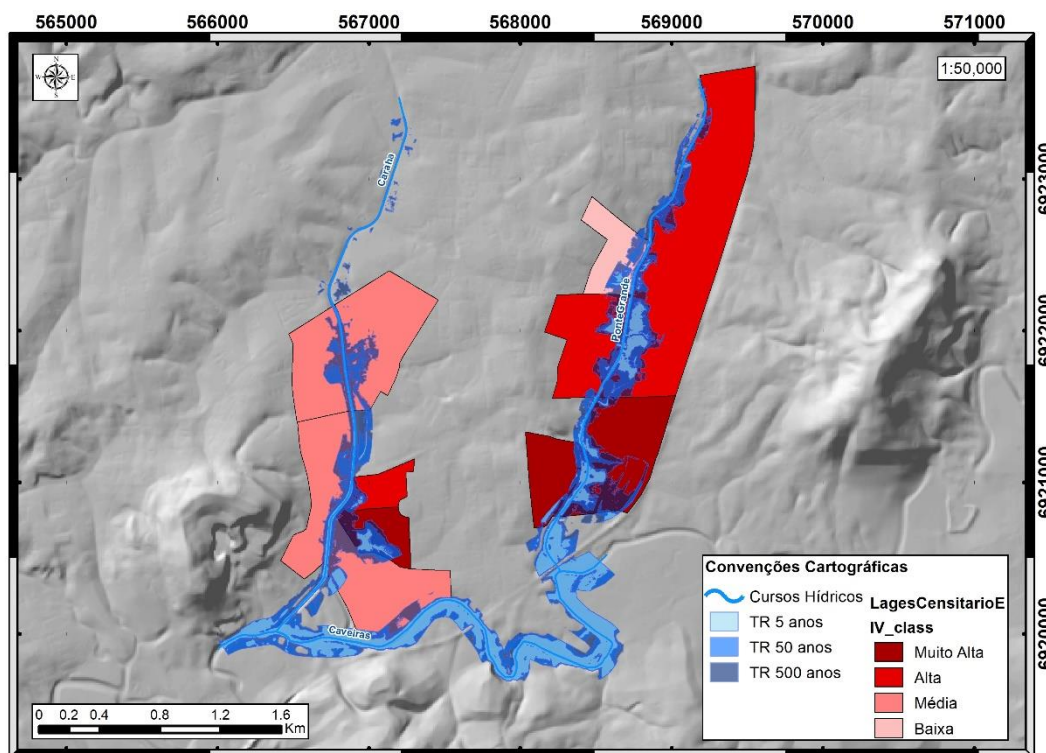
Fonte: Autor (2022).

Assim sendo, os estudos identificados que aplicaram metodologia semelhante para classificação do índice de vulnerabilidade, nota-se que a pesquisa realizada por Goerl, Kobiyama e Pellerin (2011), no município de Rio Negrinho/SC, utilizou oito variáveis para construção do índice, sendo obtido valor mínimo de 1,09 e máximo 7,34. Já Souza et al. (2014), que aplicaram a metodologia em Recife/PE, tem-se que a maioria dos bairros apresentou vulnerabilidade dentro das classes muito alta e alta. Enquanto Malagodi e Peloggia (2015), constataram com a aplicação do método em São Paulo/SP, que os setores classificados como mais vulneráveis eram os situados mais próximos ao leito do rio, uma vez que são áreas mais suscetíveis as inundações.

Por conseguinte, considerando as confrontações realizadas do Índice de Vulnerabilidade com os resultados hidrológicos obtidos, tem-se a Figura 34, que ilustra a abrangência das manchas de inundação nos setores. Consequentemente, observa-se que os setores censitários classificados com

vulnerabilidade muito alta e alta, correspondem as áreas com alta propagação das manchas de cheias, sendo verificado a distribuição média das manchas de inundações modeladas equivalente a cerca de 28%, 35%, 32% e 5% para as classes de vulnerabilidade muito alta, alta, média e baixa, considerando as áreas dos setores, respectivamente.

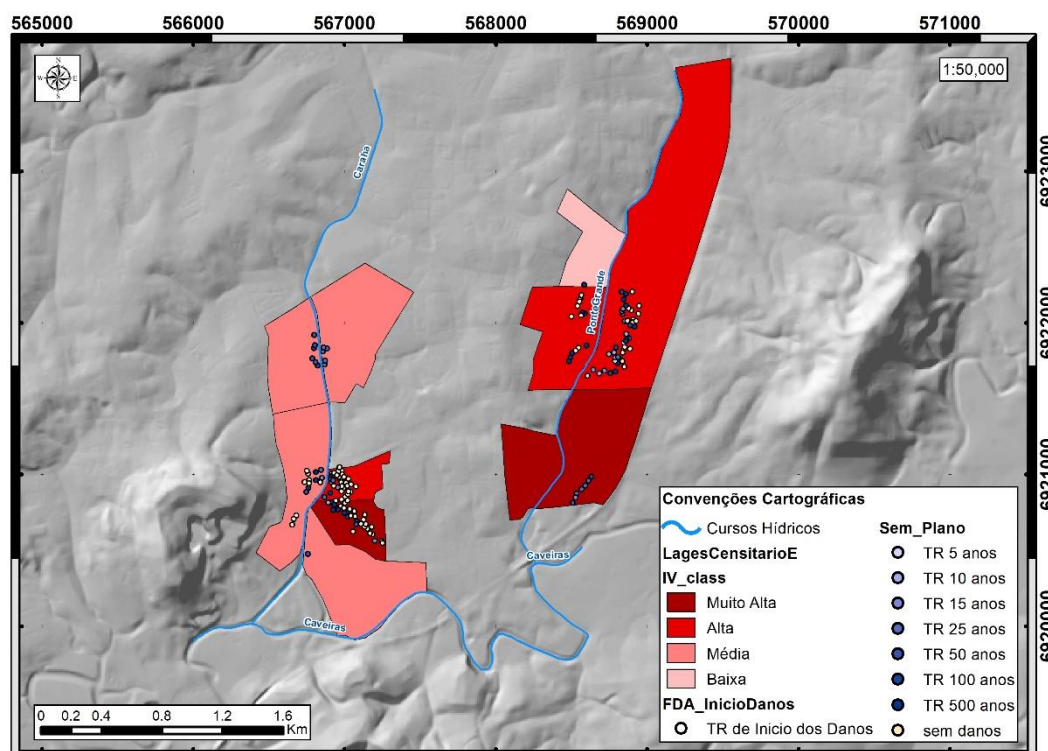
Figura 34 – Índice de Vulnerabilidade *versus* manchas de inundações modeladas.



Fonte: Autor (2022).

Posteriormente, foi considerada as confrontações realizadas do Índice de Vulnerabilidade com os resultados econômicos obtidos. Neste sentido, a Figura 35, apresenta o tempo de retorno de início de danos nos setores censitários, considerando o cenário sem projeto. Desta maneira, observa-se que na área do Rio Ponte Grande, há uma grande quantidade de edificações com danos computados na análise de risco, sendo estas inseridas em setores com classificação muito alta e alta. Enquanto, para área do Rio Carahá tem-se um comportamento semelhante, contudo, com uma maior quantidade de edificações consideradas sem danos, nos setores censitários de grau muito alto e alto de vulnerabilidade.

Figura 35 – Índice de Vulnerabilidade *versus* tempo de retorno de início de danos nas edificações.

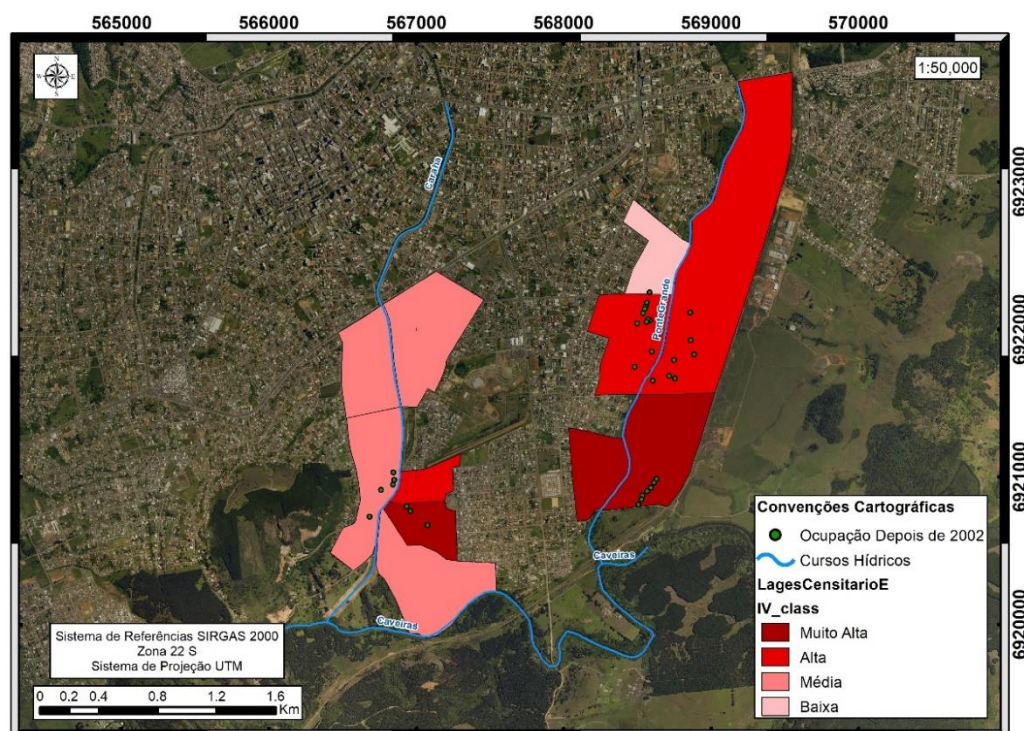


Fonte: Autor (2022).

No geral, verificou-se um total de 80 edificações sem danos, sendo a maioria situada na bacia do rio Carahá. Enquanto, 78 edificações foram consideradas com danos na modelagem econômica para o cenário sem aplicação de medidas mitigadoras, sendo distribuídas com 2, 6, 9, 16, 10, 9 e 26 residências, com os danos iniciais a partir dos TR's de 5, 10, 15, 25, 50, 100 e 500 anos, respectivamente. Constatou-se que destas 78 edificações com danos, 59 encontram-se situadas nos setores classificados com vulnerabilidade muito alta e alta.

Considerando a evolução do crescimento urbano, a Figura 36 mostra a localização das edificações amostrais ocupadas após o ano de 2002. De modo que se evidencia a predominância destas ocupações nas áreas de vulnerabilidade muito alta e alta, nas áreas de estudo. Assim, tem-se cerca de 82% das novas ocupações, situadas nos setores classificados como de vulnerabilidade muito alto e alta.

Figura 36 – Índice de Vulnerabilidade *versus* localização das edificações amostrais ocupadas após 2002.

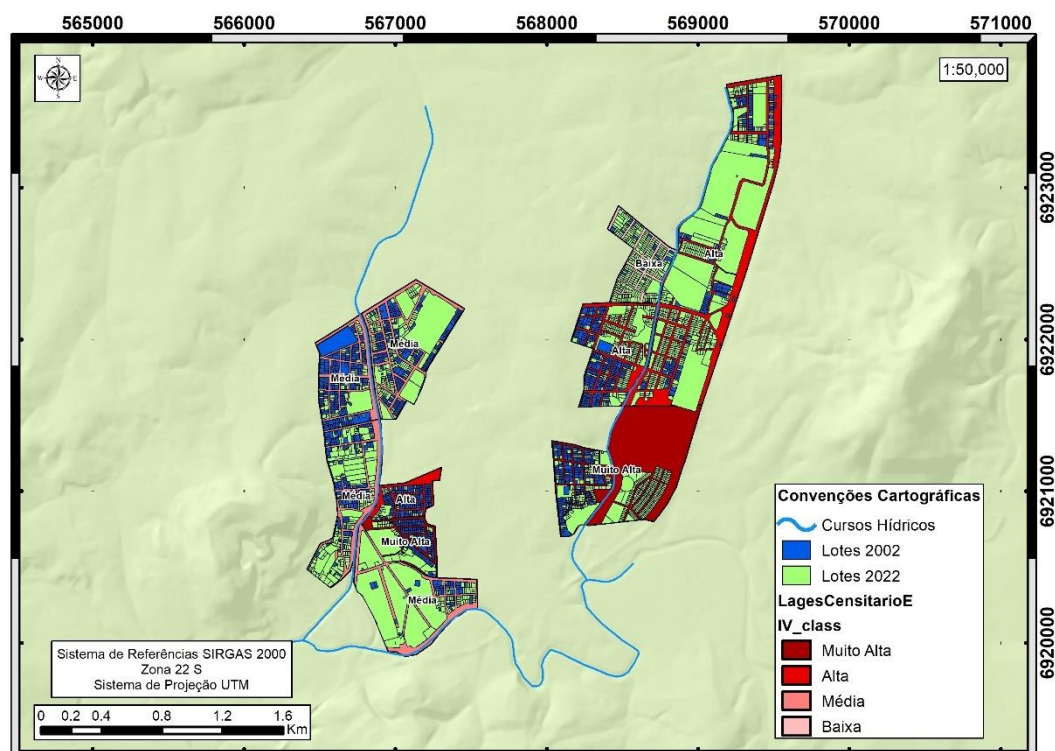


Fonte: Autor (2022).

De modo similar, a Figura 37, apresenta a evolução do crescimento urbano nos setores censitários avaliados. Na qual, observa-se um crescimento acentuado de lotes em todos os setores do Rio Ponte Grande, bem como um aumento considerável de lotes nos setores com vulnerabilidade muito alta e média na área do Rio Carahá. Deste jeito, constatou-se o surgimento de 339, 654, 343 e 263 novos lotes, no período de 20 anos, para os setores classificados como de vulnerabilidade, muito alta, alta, média e baixa, respectivamente.

Posto isto, considerando as confrontações realizadas, observa-se que os setores com vulnerabilidade muito alta e alta dentro da área de estudo, correspondem as zonas com alta propagação das manchas de inundação, bem como abrangem a maioria das edificações com danos estimados nas simulações realizadas no FDA.

Figura 37 – Índice de Vulnerabilidade *versus* evolução de crescimento urbano.



Fonte: Autor (2022).

Por fim, evidencia-se que os setores classificados com vulnerabilidade muito alta e alta demandam auxílio prioritário na ocorrência de eventos de inundações significativos nas bacias urbanas dos rios Carahá e Ponte Grande, por demonstrarem-se mais suscetíveis a este tipo de evento. Cabe pontuar que o setor identificado com maior grau de vulnerabilidade está localizado na bacia do rio Carahá.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A análise de redução de riscos de inundações, por meio do HEC-FDA, demonstrou-se uma ferramenta interessante para avaliação de cenários de danos econômicos provenientes de eventos de inundação, que considerem a influência de fatores como a urbanização e a aplicação de medidas mitigadoras na composição dos danos associados aos eventos de inundações de chuvas máximas acumuladas de 5 dias.

Deste modo, foi constatado e quantificado que o crescimento da ocupação urbana em áreas da planície inundável, potencializa os danos anuais esperados em eventos de inundações, uma vez que se tem uma maior quantidade de construções em zona de risco, considerando o perigo associado as vazões para os diferentes tempos de retorno, a exposição ao nível de água e a vulnerabilidade aos danos.

Considerando os cenários de aplicação de medidas mitigadoras de elevação de estruturas, evidenciou-se a redução dos danos anuais esperados, conforme aumento da elevação da estrutura, sendo que para estes cenários as edificações permanecem em área de perigo, contudo, com menor exposição aos danos associados as inundações, tornando-se menos vulneráveis aos eventos.

Outrossim, observou-se que os setores censitários com índice de vulnerabilidade muito alta e alta, correspondem as áreas de maior propagação das manchas inundáveis dos TR's analisados. Assim como, tem-se uma predominância das edificações impactadas por danos econômicos nesses setores, de modo que estas unidades espaciais se demostram relevantes para gestão dos riscos.

Neste sentido, pode-se discorrer a importância dos resultados obtidos no estudo para fomentação de políticas públicas que visem melhorar questões de saúde, econômicas e da qualidade de vida. Posto isto, sugere-se a promoção de ações para evitar a continuidade do avanço da ocupação urbana em áreas com alta suscetibilidade às inundações, em especial, na bacia do Rio Ponte Grande, a qual demonstrou maior percentual de avanço nos últimos vinte anos, por meio de fiscalizações, orientações e outras medidas que considerarem

pertinentes, de modo a manter o solo mais permeável na planície inundável e precaver potenciais danos econômicos a comunidade.

Além disso, aconselha-se que a Defesa Civil em conjunto com os demais órgãos municipais forneça orientação técnica para determinar uma cota de elevação da estrutura mínima, na construção de edificações localizadas em áreas inundáveis, que considere mapas de profundidades de inundação. De modo que incentive a população a adotar esta medida de adaptação, visando reduzir e otimizar os recursos gastos, bem como diminuir a vulnerabilidade do imóvel às inundações.

Por fim, como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de diferentes cenários de medidas mitigadoras, como a aplicação de seguros contra enchentes, captação de água da chuva, entre outros. No mais, propõe-se a avaliação do custo-benefício da aplicação das medidas mitigadoras consideradas. Assim como, a execução de análise de vulnerabilidade mais aprofundada, que considere um maior número de variáveis para composição do índice.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-1: Avaliação de bens Parte 1: Procedimentos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 11 p.

ADNAN, Mohammed Sarfaraz Gani; ABDULLAH, Abu Yousuf Md; DEWAN, Ashraf; HALL, Jim W. The effects of changing land use and flood hazard on poverty in coastal Bangladesh. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 99, p. 104868, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104868.

ALMEIDA, Lincoln Vieira Queiroz de. **Construção e avaliação a priori de curvas de danos residenciais diretos tangíveis relacionados a inundações para Minas Gerais**. 2020. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

ALVES, Augusto; BIANCHINI, Cleberton Diego; MALHEIROS, Marcelo; QUARTIERI, Marli Teresinha; SALVADOR, Paulo Fernando; ECKHARDT, Rafael Rodrigo. Correlação Entre O Nível Atingido E Os Prejuízos Causados Pelas Inundações Do Rio Taquari No Município De Cruzeiro Do Sul-Rs. [S. l.], p. 217–229, 2013.

ARRIGHI, Chiara; ROSSI, Lauro; TRASFORINI, Eva; RUDARI, Roberto; FERRARIS, Luca; BRUGIONI, Marcello; FRANCESCHINI, Serena; CASTELLI, Fabio. Quantification of flood risk mitigation benefits: A building-scale damage assessment through the RASOR platform. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 207, p. 92–104, 2018. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.017.

AVASHIA, Vidhee; GARG, Amit. Implications of land use transitions and climate change on local flooding in urban areas: An assessment of 42 Indian cities. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 95, p. 104571, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104571.

BALDASSARRE, Giuliano di et al. Sociohydrology: scientific challenges in addressing the sustainable development goals. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 55, n. 8, p. 6327-6355, ago. 2019. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2018wr023901>.

BATISTA, Larissa; RIBEIRO NETO, Alfredo; COUTINHO, Roberto. FLOOD DAMAGE ANALYSIS: A BRAZILIAN CASE STUDY. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, [S. l.], p. 150–160, 2020. DOI: 10.4090/juee.2020.v14n1.150160. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/juee/article/view/51034>.

BATISTA, Larissa Ferreira David Romão. **Quadro conceitual e analítico como subsídio ao mapeamento de risco decorrente de inundação**. 2021.

129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

BERGSTRAND, Kelly; MAYER, Brian; BRUMBACK, Babette; ZHANG, Yi. Assessing the Relationship Between Social Vulnerability and Community Resilience to Hazards. **Social Indicators Research**, [S. l.], v. 122, n. 2, p. 391–409, 2015. DOI: 10.1007/s11205-014-0698-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-014-0698-3>. Acesso em: 28 nov. 2020.

CARTER, W. N. **Disaster Management A Disaster Manager's Handbook**. [S. l.: s. n.], 2008. ISSN 978-971-561-006-3. E-book.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana - Manual de projeto**. 3.ed. São Paulo: CETESB, 1986. 464p. (CETESB, 1986)

CHAVES, Sammya Chaves Vanessa Vieira; TAVARES, Antônio Carlos; ANDRADE, Carlos Sait Pereira De. VULNERABILIDADE ÀS INUNDAÇÕES EM TERESINA, PIAUÍ E AÇÕES MITIGADORAS DO PODER PÚBLICO. **Sociedade e Território**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 175, 2018. DOI: 10.21680/2177-8396.2017v29n2id12533. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/12533>. Acesso em: 28 nov. 2020.

CHEN, Xiaoli; ZHANG, Han; CHEN, Wenjie; HUANG, Guoru. Urbanization and climate change impacts on future flood risk in the Pearl River Delta under Shared Socioeconomic Pathways. **Science of The Total Environment**, [S. l.], p. 143144, 2020. a. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143144.

CHEN, Yu; WANG, Ying; ZHANG, Yue; LUAN, Qingzu; CHEN, Xiaojuan. Flash floods, land-use change, and risk dynamics in mountainous tourist areas: A case study of the Yesanpo Scenic Area, Beijing, China. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. l.], v. 50, p. 101873, 2020. b. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101873.

CORSI, Alessandra Cristina; AZEVEDO, Paulo Brito Moreira De; GRAMANI, Marcelo Fischer. DAMAGE VALUATION ARISING FROM FLOOD IN SÃO LUIZ DO PARAITINGA (SP). **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 124–142, 2012. DOI: 10.5585/geas.v1i2.26. Disponível em: <http://www.revistageas.org.br/ojs/index.php/geas/article/view/26>.

CUNHA, Sandra; TAVEIRA-PINTO, Francisco. Application of a Flood Risk Analysis Methodology to the River Banks of Peso da Régua. [S. l.], n. February, p. 103–112, 2011.

CUTTER, Susan L.; FINCH, Christina. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 105, n. 7, p. 2301–2306,

2008. DOI: 10.1073/pnas.0710375105. Disponível em: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0710375105. Acesso em: 28 nov. 2020.

DE LOYOLA HUMMELL, Beatriz Maria; CUTTER, Susan L.; EMRICH, Christopher T. Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Science**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 111–122, 2016. DOI: 10.1007/s13753-016-0090-9. Disponível em: www.springer.com/13753. Acesso em: 28 nov. 2020.

DE RUIG, Lars T.; HAER, Toon; DE MOEL, Hans; BOTZEN, W. J. Woute.; AERTS, Jeroen C. J. H. A micro-scale cost-benefit analysis of building-level flood risk adaptation measures in Los Angeles. **Water Resources and Economics**, [S. l.], p. 100147, 2019. DOI: 10.1016/j.wre.2019.100147.

DIFRANCESCO, Kara; GITELMAN, Alix; PURKEY, David. Bottom-Up Assessment of Climate Risk and the Robustness of Proposed Flood Management Strategies in the American River, CA. **Water**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 907, 2020. DOI: 10.3390/w12030907. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/907>. Acesso em: 8 dez. 2020.

DISSE, M.; JOHNSON, T. G.; LEANDRO, J.; HARTMANN, T. Exploring the relation between flood risk management and flood resilience. **Water Security**, [S. l.], v. 9, p. 100059, 2020. DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100059. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468312418300440>.

DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Rio de Janeiro: IPR, 2005. 137 p.

FADEL, Amanda Wajnberg. **Incorporação Do Risco De Prejuízo No Gerenciamento De Medidas De Controle De Inundação**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FARIAS ASMUS, Gabriela; YIDE MELLO, Allan; REGINA DA CAL SEIXAS, Sônia; MATEUS BATISTELLA, Unicampbr. **Análise sociodemográfica da distribuição espacial de ocorrências de diarreias agudas em áreas de risco de inundação, Caraguatatuba-SP**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: www.uff.br/revistavitas. Acesso em: 3 nov. 2020.

FOX-ROGERS, Linda; DEVITT, Catherine; O'NEILL, Eoin; BRERETON, Finbarr; CLINCH, J. Peter. Is there really “nothing you can do”? Pathways to enhanced flood-risk preparedness. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 543, p. 330–343, 2016. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.009.

FREIRE, Neison Cabral Ferreira; BONFIM, Cristine Vieira Do; NATENZON, Claudia Eleonor. Vulnerabilidade socioambiental, inundações e repercussões na Saúde em regiões periféricas: o caso de Alagoas, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S. l.], v. 19, n. 9, p. 3755–3762, 2014. DOI: 10.1590/1413-81232014199.07572014. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232014000903755&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 28 nov. 2020.

FURTADO, Janaína; OLIVEIRA, Marcos De; DANTAS, Maria Cristina; SOUZA, Pedro Paulo; PANCERI, Regina. **Capacitação Básica em DEFESA CIVIL**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2012.

GHARARI, S.; HRACHOWITZ, M.; FENICIA, F.; SAVENIJE, H. H. G. Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 11, p. 3275–3291, 2011. DOI: 10.5194/hess-15-3275-2011.

GOERL, Roberto Fabris; KOBIYAMA, Masato. Considerações sobre as inundações no Brasil. **Anais**, [S. l.], p. 14, 2005. Disponível em: http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf.

GOERL, Roberto Fabris; KOBIYAMA, Masato; PELLERIN, Joel Robert Georges Marcel. Mapeamento De Vulnerabilidade No Município De Rio Negrinho – SC: Uma Proposta Metodológica. **Revista Caminhos da Geografia**, [S. l.], v. 12, n. 40, p. 205–221, 2011.

GUIMARÃES, Raphael Mendonça; CRUZ, Oswaldo Gonçalves; PARREIRA, Viviane Gomes; MAZOTO, Maíra Lopes; VIEIRA, Juliana Dias; ASMUS, Carmen Ildes Rodrigues Fróes. Análise temporal da relação entre leptospirose e ocorrência de inundações por chuvas no município do Rio de Janeiro, Brasil, 2007-2012. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S. l.], v. 19, n. 9, p. 3683–3692, 2014. DOI: 10.1590/1413-81232014199.06432014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232014000903683&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 3 nov. 2020.

HEIDENREICH, Anna; MASSON, Torsten; BAMBERG, Sebastian. Let's talk about flood risk – Evaluating a series of workshops on private flood protection. *In*: INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION 2020, **Anais [...]**. : Elsevier Ltd, 2020. p. 101880. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101880.

HERRMANN, Maria Lucia de Paula. **Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010 [Atlas of natural disasters in the state of Santa Catarina, period from 1980 to 2010]**. [s.l: s.n.].

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IBGE. **Cidades e Estados: Lages (SC)**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/lages.html>. Acesso em: 25 fev. 2022.

IPCC, 2022: **Alterações Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade - Resumo para Decisores**. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental

sobre Alterações Climáticas [Hans-O. Pörtner (Germany), et al.]. Organização Meteorológica Mundial (WMO), Genebra, Suíça, 3676 págs. (em Árabe, Chinês, Inglês, Francês, Russo e Espanhol).

JONOV, Cristiane Machado Parisi; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira; SILVA, Adriano de Paula e. Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 75–94, 2013. DOI: 10.1590/s1678-86212013000100006.

KABLAN, Malan Ketcha Armand; DONGO, Kouassi; COULIBALY, Mamadou. Assessment of Social Vulnerability to Flood in Urban Côte d'Ivoire Using the MOVE Framework. **Water**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 292, 2017. DOI: 10.3390/w9040292. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/9/4/292>. Acesso em: 28 nov. 2020.

KARUNARATHNE, Ananda Y.; LEE, Gunhak. Developing a multi-facet social vulnerability measure for flood disasters at the micro-level assessment. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. l.], v. 49, p. 101679, 2020. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101679.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais, conceitos básicos**. Curitiba – PR 1ª Edição. 2006 124 p.

LA LOGGIA, Goffredo; PULEO, Valeria; FRENI, Gabriele. Floodability: A New Paradigm for Designing Urban Drainage and Achieving Sustainable Urban Growth. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 34, n. 10, p. 3411–3424, 2020. DOI: 10.1007/s11269-020-02620-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02620-6>. Acesso em: 27 nov. 2020.

LAGES. Lei nº 4473, de 2020. Dispõe sobre o Plano Municipal de Saneamento Básico e Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município de Lages, aprova a sua revisão, aperfeiçoamento e dá outras providências. **Lei 4473**. LAGES, SC, 21 dez. 2020.

LAMBERTY, Débora; MENDONÇA, Renato Ribeiro. **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações**. Lages: CPRM, 2018.

LEE, Jongso; KIM, Duckhwan; KIM, Jungwook; HAN, Daegun; KIM, Hung Soo. Flood Damage Reduction Plan Using HEC-FDA Model. **Journal of Wetlands Research**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 237–244, 2015. DOI: 10.17663/jwr.2015.17.3.237.

LIU, Jie; WANG, Shao yu; LI, Dong mei. The Analysis of the Impact of Land-Use Changes on Flood Exposure of Wuhan in Yangtze River Basin, China. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 28, n. 9, p. 2507–2522, 2014. DOI: 10.1007/s11269-014-0623-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0623-1>. Acesso em: 25 out. 2020.

LIZ, Mariane Souza Melo de. **Influência do Rio Caveiras nas Inundações dos Rios Carahá e Ponte Grande**. 2018. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

LONDE, Luciana de Resende; MARCHEZINI, Victor; CONCEIÇÃO, Rodrigo Silva Da; BORTOLETTO, Katia Cristina; SILVA, Ana Elisa Pereira; SANTOS, Elisa Volker Dos; REANI, Regina Tortorella. Impactos de desastres socioambientais em saúde pública: estudos dos casos dos Estados de Santa Catarina em 2008 e Pernambuco em 2010. **Revista Brasileira de Estudos de População**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 537–562, 2015. DOI: 10.1590/S0102-3098201500000031. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-30982015000300537&lng=pt&nrm=iso&tlng=en.

MACHADO, Maria Léa; NASCIMENTO, Nilo; BAPTISTA, Márcio; GONÇALVES, Március; SILVA, Adriano; LIMA, Joelma Costa; DIAS, Rodrigo;; SILVA, Anderson. Versus Profundidade De Submersão : Desenvolvimento De Metodologia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S. l.], v. 2, p. 35–52, 2005.

MAGRO, Renata Bulling. **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Previsão de Inundação em uma Área Urbana**. 2021. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2021.

MALAGODI, Camila Capassi; PELOGGIA, Alex Ubiratan Goossens. VULNERABILIDADE E RISCO EM UM ASSENTAMENTO URBANO NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO RIO TIETÊ NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (SP). **Revista do Instituto Geológico**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 47-60, 2015. Instituto Geologico. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929x.20150007>.

MARCELINO, Emerson Vieira; NUNES, Luci Hidalgo; KOBIYAMA, Masato. Mapeamento De Risco De Desastres Naturais Do Estado De Santa Catarina. **Caminhos de Geografia**, [S. l.], v. 7, n. 17, p. 72–84, 2006. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15273/8574>.

MAS, Anton Dharma Pusaka. Study on Flood Management Plan in Surabaya City. **Journal of the Civil Engineering Forum**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 51, 2015. DOI: 10.22146/jcef.23891.

MENNE, Bettina; MURRAY, Virginia. **Floods in the WHO European Region: health effects and their prevention**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.euro.who.int/pubrequest>. Acesso em: 3 nov. 2020.

MIANABADI, Ameneh; DERAKHSHAN, Hashem; DAVARY, Kamran; HASHEMINIA, Seyed Majid; HRACHOWITZ, Markus. A Novel Idea for Groundwater Resource Management during Megadrought Events. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 1743–1755, 2020. DOI: 10.1007/s11269-020-02525-4.

MINERVINO, Aline Costa; DUARTE, Elisabeth Carmen. Loss and damage affecting the public health sector and society resulting from flooding and flash floods in Brazil between 2010 and 2014 – Based on data from national and global information systems. **Ciencia e Saude Coletiva**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 685–694, 2016. DOI: 10.1590/1413-81232015213.19922015.

MINISTERIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

MOHAMMADI, S. A.; NAZARIHA, M.; MEHRDADI, N. Flood damage estimate (quantity), using HEC-FDA model. Case study: The Neka river. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 70, p. 1173–1182, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.130. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.130>.

MOOSAKHAANI, Mahsa *et al.* Game theoretic approach for flood risk management considering a financial model. **Environmental Engineering Research**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 210368, 27 dez. 2021. Korean Society of Environmental Engineering. <http://dx.doi.org/10.4491/eer.2021.368>.

MOOSAKHAANI, Mahsa; SALIMI, Lida; SADATIPOUR, Mohammad Taghi; RABBANI, Mohammad. Developing Flood Economic Loss Evaluation Model in Residential and Commercial Sectors Case Study: darband and golab darreh rivers. **Environmental Energy And Economic Research**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 215-229, ago. 2020. Iranian Association for Energy Economics. <http://dx.doi.org/10.22097/eeer.2020.212510.1127>.

MOREIRA, Luana Lavagnoli; BRITO, Mariana Madruga de; KOBİYAMA, Masato. Effects of Different Normalization, Aggregation, and Classification Methods on the Construction of Flood Vulnerability Indexes. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 98, 4 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13010098>.

MOREIRA, Luana Lavagnoli; KOBİYAMA, Masato. PANORAMA DE ESTUDOS SOBRE ÍNDICE DE VULNERABILIDADE ÀS INUNDAÇÕES NO BRASIL ATRAVÉS DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Caminhos de Geografia**, [S.L.], v. 22, n. 79, p. 309-320, 1 fev. 2021. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rcg227952240>.

NAGEM, Fernanda Raquel Maximiano. **Avaliação Econômica Dos Prejuízos Causados Pelas Cheias Urbanas**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NOFAL, Omar M.; LINDT, John W. van de. High-resolution flood risk approach to quantify the impact of policy change on flood losses at community-level. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 62, p. 1-18, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102429>.

NOTARO, V.; FONTANAZZA, C. M.; FRENI, G.; LA LOGGIA, G. Assessment of modelling structure and data availability influence on urban flood damage modelling uncertainty. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 89, p. 788–795, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.508.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia De; QUEVEDO, Renata Pacheco; GUASSELLI, Laurindo Antonio; MENEZES, Pablo Hebert Nörnberg. Expansão urbana nas áreas inundáveis do rio Paranhana no município de Igrejinha/RS. [S. l.], n. April, 2013.

PADILHA, Víctor Luís. **Modelagem Hidrológica Orientada por Eventos de Inundação em Lages/SC**. 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PATERSON, David L.; WRIGHT, Hugh; HARRIS, Patrick N. A. **Health risks of flood disasters***Clinical Infectious Diseases*Oxford University Press, , 2018. DOI: 10.1093/cid/ciy227. Disponível em: <https://academic.oup.com/cid/article/67/9/1450/4945455>. Acesso em: 3 nov. 2020.

PORTELA, Francisco Carlos; KOBIYAMA, Masato; GOERL, Roberto Fabris. Panorama brasileiro da relação entre leptospirose e inundações. **Geosul**, [S.L.], v. 35, n. 75, p. 711-734, 9 jun. 2020. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). <http://dx.doi.org/10.5007/1982-5153.2020v35n75p711>.

POUR, Sahar Hadi; WAHAB, Ahmad Khairi Abd; SHAHID, Shamsuddin; ASADUZZAMAN, Md; DEWAN, Ashraf. **Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges***Sustainable Cities and Society*Elsevier Ltd, , 2020. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102373.

QI, Honghai; ALTINAKAR, M.s.. A GIS-based decision support system for integrated flood management under uncertainty with two dimensional numerical simulations. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 26, n. 6, p. 817-821, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.11.006>.

RAFAELI NETO, Sílvio Luís. **Relatório Técnico - Parte 2: Volumes e Tempos de Recorrência**. Lages: Udesc/Cav, 2019a.

RAFAELI NETO, Sílvio Luís. **Precipitação: Aplicações**. Lages: Udesc/Cav, 2021. 39 p.

RAFAELI NETO, Sílvio Luís. **Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações**. 2000. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

RAFAELI NETO, Sílvio Luís. **Relatório Técnico - Parte 1: Modelagem Hidrológica**. Lages: Udesc/Cav, 2019b.

RAFAELI NETO, Sílvio Luís. **Aerolevantamento da Planície Topográfica de Inundações**. Lages: Udesc/Cav, 2019c.

REIS, Janete Teresinha; KOBIYAMA, Masato; ZAMBRANO, Fernando Campo; MICHEL, Gean Paulo. CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA MAPEAMENTO DE VULNERABILIDADE AOS DESASTRES HIDROLÓGICOS NO ARROIO FORROMECO-RS. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 1361, 2016. DOI: 10.5902/2179460X19989. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/19989>.

REZENDE, Osvaldo Moura; RIBEIRO DA CRUZ DE FRANCO, Anna Beatriz; BELEÑO DE OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti; MIRANDA, Francis Martins; PITZER JACOB, Ana Caroline; MARTINS DE SOUSA, Matheus; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Mapping the flood risk to Socioeconomic Recovery Capacity through a multicriteria index. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 255, p. 120251, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120251.

ROBINSON, Peter John; BOTZEN, W. J. Woute. Flood insurance demand and probability weighting: The influences of regret, worry, locus of control and the threshold of concern heuristic. **Water Resources and Economics**, [S. l.], v. 30, n. October 2018, p. 100144, 2020. DOI: 10.1016/j.wre.2019.100144. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212428418301166>.

SAYERS, Paul; PENNING-ROWSELL, Edmund C.; HORRITT, Matt. Flood vulnerability, risk, and social disadvantage: current and future patterns in the UK. **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 339–352, 2018. DOI: 10.1007/s10113-017-1252-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1252-z>. Acesso em: 28 nov. 2020.

SCHIER, Daiane Teixeira. **Avaliação do Índice Topográfico de Umidade para Detecção de Zonas Urbanas Inundáveis**. 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

SHOKRI, Azar; SABZEVARI, Sadaf; HASHEMI, Seyed Ahmad. **Impacts of flood on health of Iranian population: Infectious diseases with an emphasis on parasitic infections** *Parasite Epidemiology and Control* Elsevier Ltd, , 2020. DOI: 10.1016/j.parepi.2020.e00144.

SHRESTHA, Badri Bhakta; KAWASAKI, Akiyuki; ZIN, Win Win. Development of flood damage assessment method for residential areas considering various house types for Bago Region of Myanmar. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 66, p. 102602, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102602>.

SILVA, Emanuel Duarte. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE DANOS CAUSADOS POR INUNDAÇÕES : APLICAÇÃO AO MUNICÍPIO DE MONTENEGRO -RS. **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, [S. l.], p. 1–10, 2015.

SILVA, Emanuel Duarte. **Previsão Hidroeconômica De Curto Prazo Com Modelo De Redes Neurais Artificiais: Aplicação À Bacia Do Rio Caí**. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Regulação e Gestão de Recursos Hídricos, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SINGH, Vijay P.. Hydrologic modeling: progress and future directions. **Geoscience Letters**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 1-18, 28 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>.

SIVAPALAN, Murugesu; SAVENIJE, Hubert H. G.; BLÖSCHL, Günter. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 26, n. 8, p. 1270–1276, 2012. DOI: 10.1002/hyp.8426. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.8426>.

SÖRENSEN, Johanna et al. Re-Thinking Urban Flood Management—Time for a Regime Shift. **Water**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 332, 2016. DOI: 10.3390/w8080332. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/8/8/332>. Acesso em: 27 nov. 2020.

SOUZA, W.; AZEVEDO, P.; ASSIS, J.; SOBRAL, M. DO C. ÁREAS DE RISCO MAIS VULNERÁVEIS AOS DESASTRES DECORRENTES DAS CHUVAS EM RECIFE-PE. **Brazilian Journal of Environmental Sciences** (Online), n. 34, p. 79-94, 30 dez. 2014.

SUKHWANI, Vibhas et al. Understanding the Barriers Restraining Effective Operation of Flood Early Warning Systems. **International Journal Of Disaster Risk Management**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 1-17, 2019. Faculty of Philology, University of Belgrade. <http://dx.doi.org/10.18485/ijdrm.2019.1.2.1>.

TACHINI, Mario. **Avaliação De Danos Associados Às Inundações No Município De Blumenau**. 2010. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TELLMAN, Beth; SCHANK, Cody; SCHWARZ, Bessie; HOWE, Peter D.; DE SHERBININ, Alex. Using disaster outcomes to validate components of social vulnerability to floods: Flood deaths and property damage across the USA. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 12, n. 15, p. 6006, 2020. DOI: 10.3390/su12156006. Disponível em: www.mdpi.com/journal/sustainability. Acesso em: 28 nov. 2020.

TIEPOLO, Maurizio; GALLIGARI, Andrea. Urban expansion-flood damage nexus: evidence from the dosso region, niger. **Land Use Policy**, [S.L.], v. 108, p. 105547, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105547>.

TRAMBLAY, Yves et al. Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. **Hydrology And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 23,

n. 11, p. 4419-4431, 30 out. 2019. Copernicus GmbH.
<http://dx.doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019>.

USACE, HEC-FDA. Flood Damage Reduction Analysis. User's Manual, 2016. a. 392 p.

USACE, HEC-RAS. River Analysis System. User's Manual, 2016. b. 960 p.

USACE, HEC-HMS. Hydrologic Modeling System. User's Manual, 2016. c.

USACE. **EGM 04-01: Generic depth-damage relationships for residential structures with basements.** CECW-PG, 2003.

VAN DAU, Quan; KUNTIYAWICHAI, Kittiwet; PLERMKAMON, Vichian. Quantification of Flood Damage under Potential Climate Change Impacts in Central Vietnam. **Irrigation and Drainage**, [S. l.], v. 66, n. 5, p. 842–853, 2017. DOI: 10.1002/ird.2160. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/ird.2160>.

VIGLIONE, Alberto; DI BALDASSARRE, Giuliano; BRANDIMARTE, Luigia; KUIL, Linda; CARR, Gemma; SALINAS, José Luis; SCOLOBIG, Anna; BLÖSCHL, Günter. Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk - Roles of collective memory, risk-taking attitude and trust. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 518, n. PA, p. 71–82, 2014. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.018.

WINTER, Thomas C. THE CONCEPT OF HYDROLOGIC LANDSCAPES. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 335–349, 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x>.

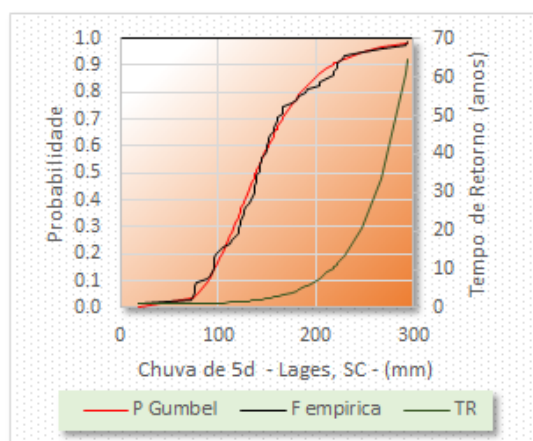
WMO, Meteorological Organization World. **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019**. 1248. ed. [s.l.] : WMO, 2020.

WREGE, Marcos Silveira et al. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil. Estado de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

APÊNDICE A – ANÁLISE DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE CHUVA

Figura 38 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 5 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.

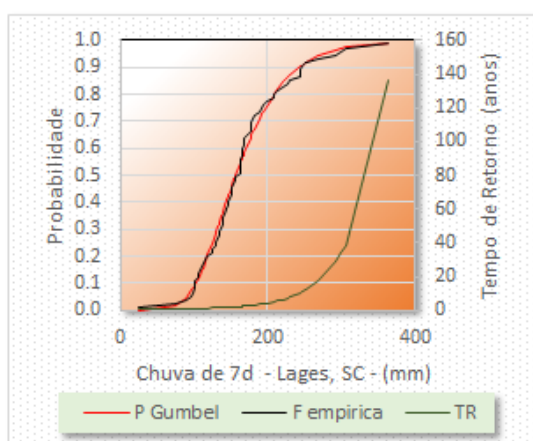
Chuva de 5d (mm)	
N(amostra)	74
Média	147.4
Desvio Padrão	52.7
Beta	41.1
Alfa	123.7
Dmáximo	0.06
Dcrítico 1%	0.19



Fonte: Autor (2022).

Figura 39 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 7 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.

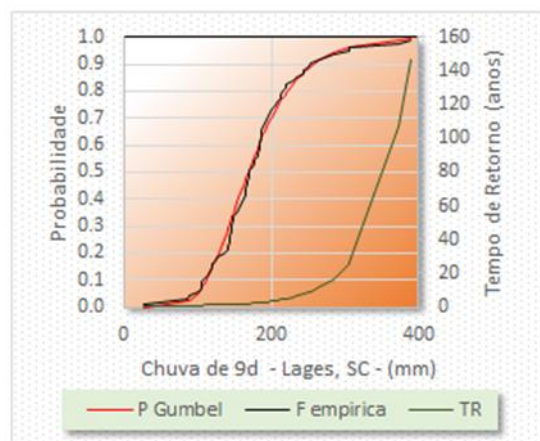
Chuva de 7d (mm)	
N(amostra)	74
Média	166.2
Desvio Padrão	58.4
Beta	45.5
Alfa	140.0
Dmáximo	0.05
Dcrítico 1%	0.19



Fonte: Autor (2022).

Figura 40 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 9 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.

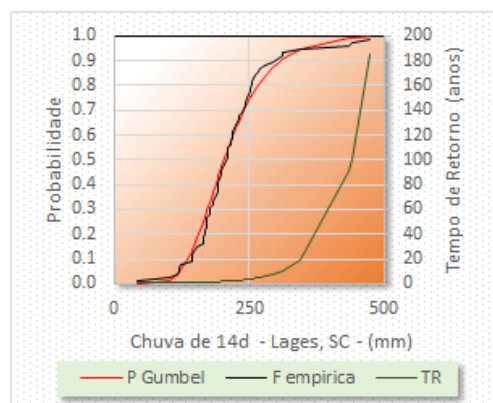
Chuva de 9d (mm)	
N(amostra)	74
Média	178.7
Desvio Padrão	61.1
Beta	47.6
Alfa	151.3
Dmáximo	0.07
Dcrítico 1%	0.19



Fonte: Autor (2022).

Figura 41 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 14 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.

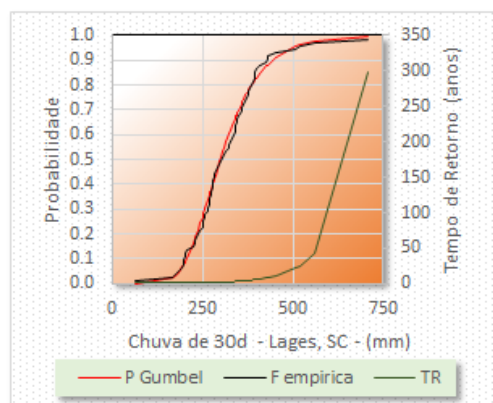
Chuva de 14d (mm)	
N(amostra)	74
Média	214.9
Desvio Padrão	71.4
Beta	55.6
Alfa	182.8
Dmáximo	0.09
Dcrítico 1%	0.19



Fonte: Autor (2022).

Figura 42 – Parâmetros do modelo probabilístico de Gumbel para chuvas diárias máximas de 30 dias e gráficos de probabilidades e Tempos de Retornos.

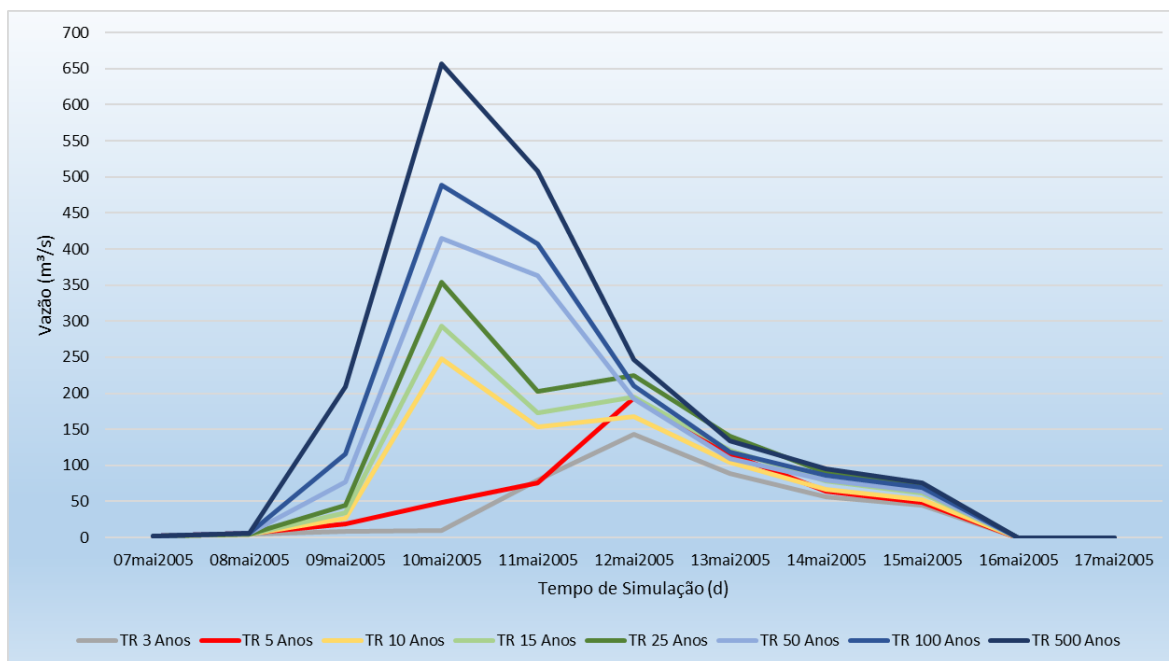
Chuva de 30d (mm)	
N(amostra)	74
Média	314.6
Desvio Padrão	98.9
Beta	77.0
Alfa	270.2
Dmáximo	0.06
Dcrítico 1%	0.19



Fonte: Autor (2022).

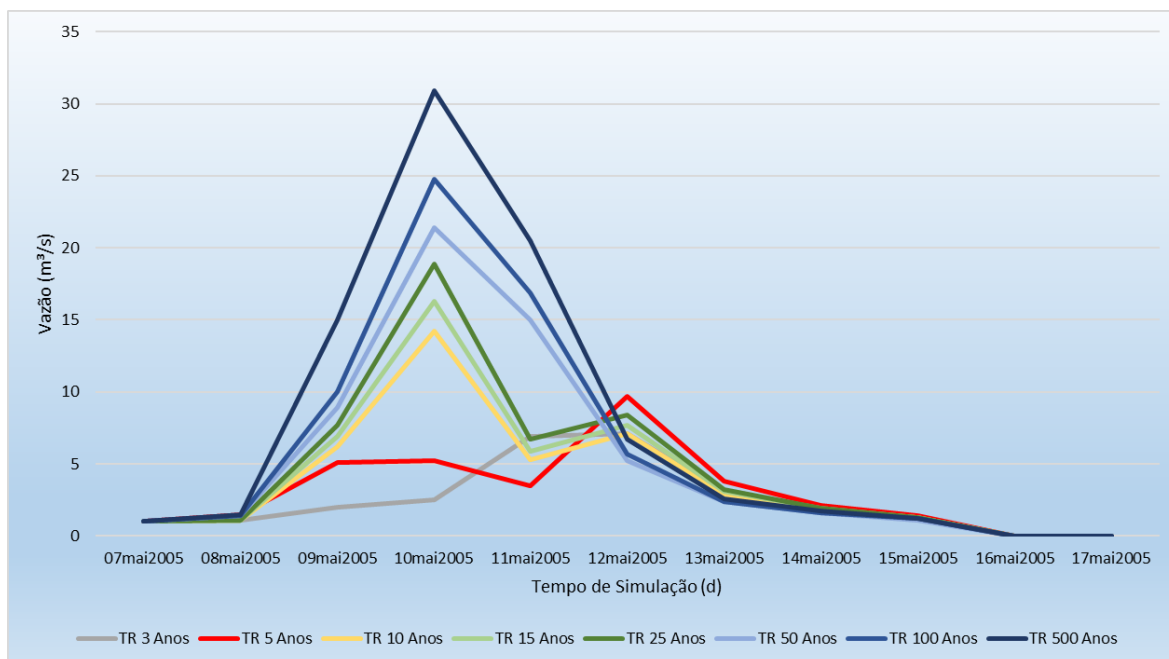
APÊNDICE B – HIDROGRAMAS DE PROJETO PARA AS JUNÇÕES DE INTERESSE

Figura 43 – Hidrograma de Projeto para os tempos de retornos, referente a junção 4, situada no rio Caveiras.



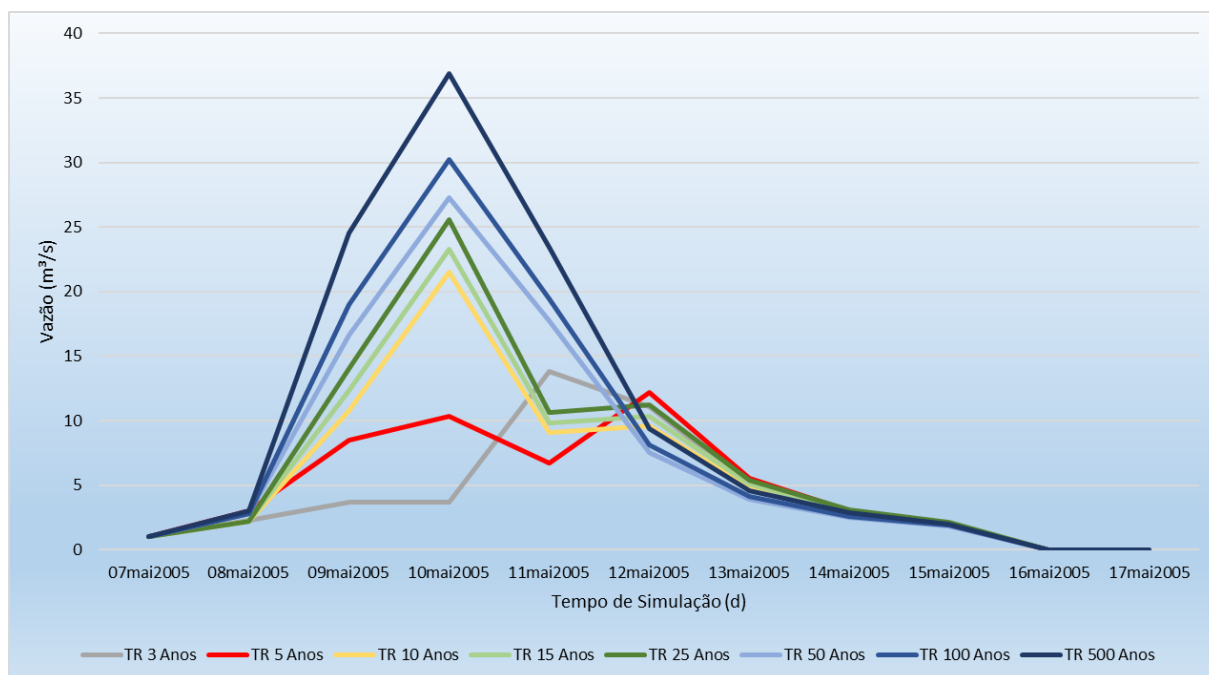
Fonte: Autor (2022).

Figura 44 – Hidrograma de Projeto para os tempos de retornos, referente a junção 8, situada no rio Ponte Grande.



Fonte: Autor (2022).

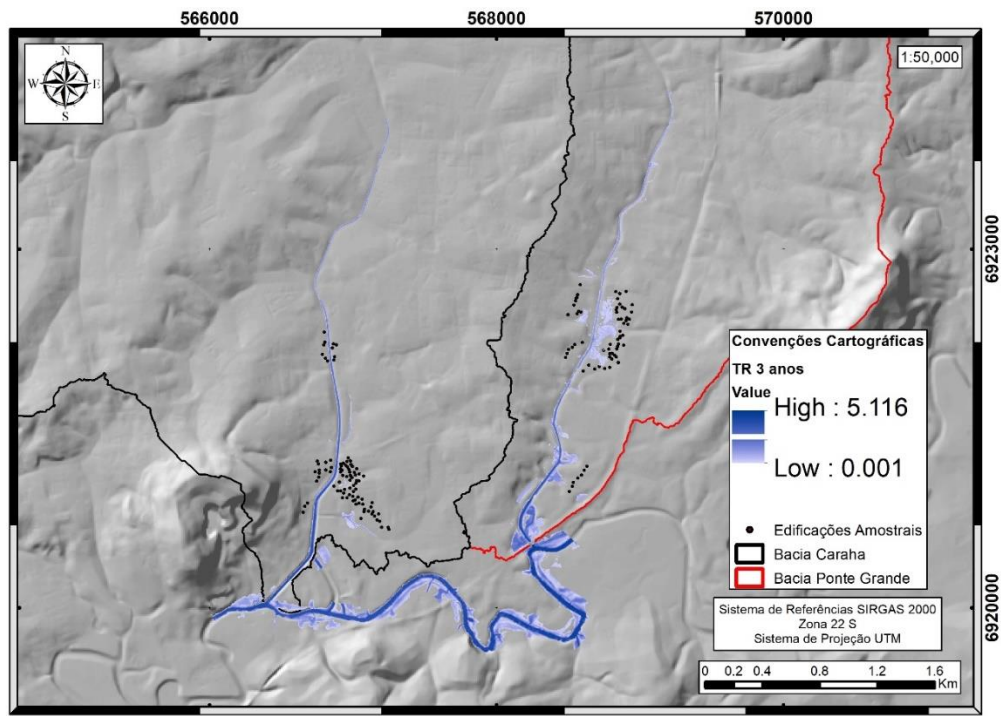
Figura 45 – Hidrograma de Projeto para os tempos de retornos, referente a junção 13, situada no rio Carahá.



Fonte: Autor (2022).

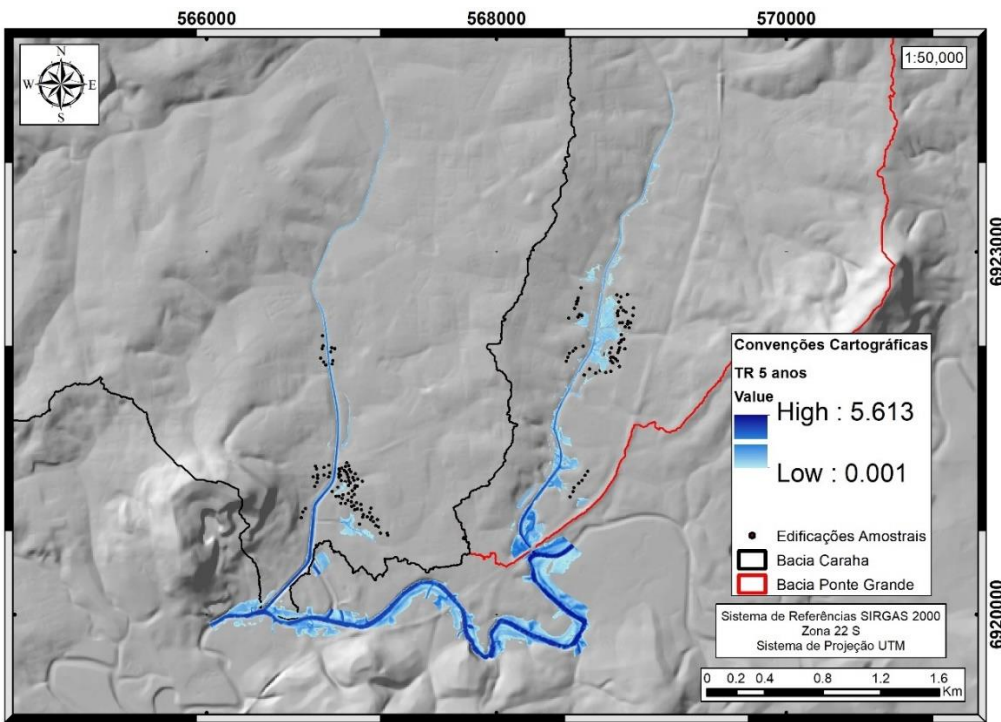
APÊNDICE C – MANCHAS DE INUNDAÇÕES PARA OS TEMPOS DE RETORNO

Figura 46 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 3 anos.



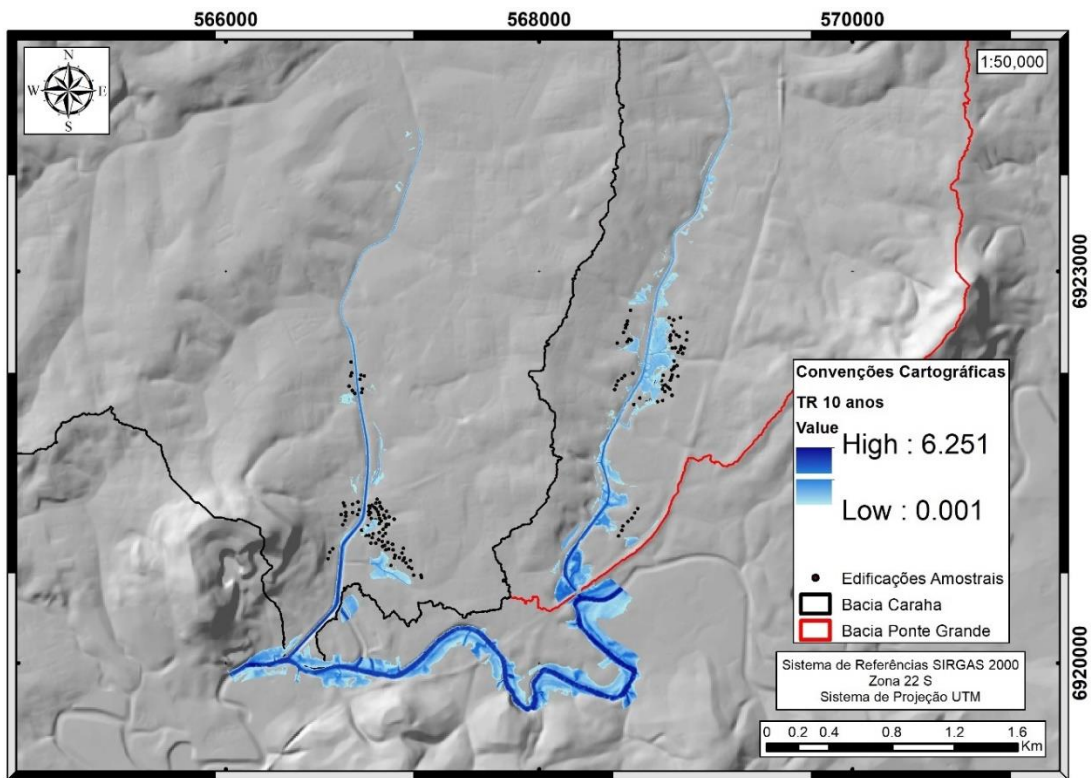
Fonte: Autor (2022).

Figura 47 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 5 anos.



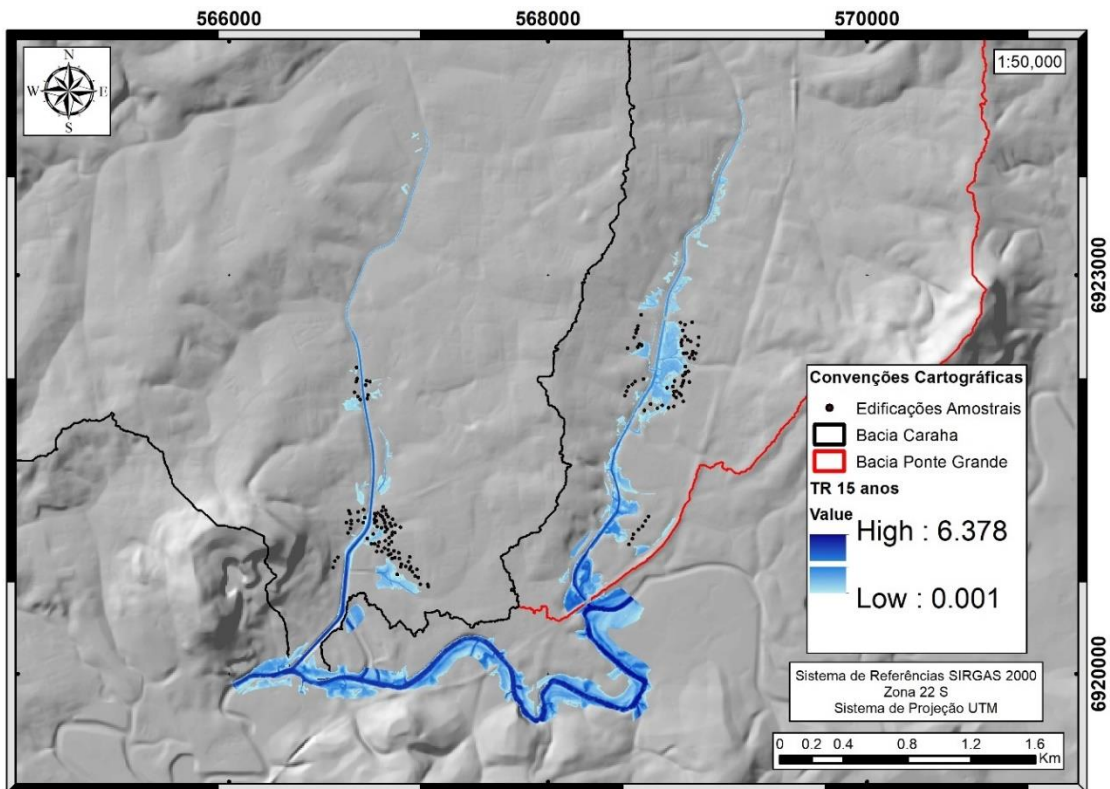
Fonte: Autor (2022).

Figura 48 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 10 anos.



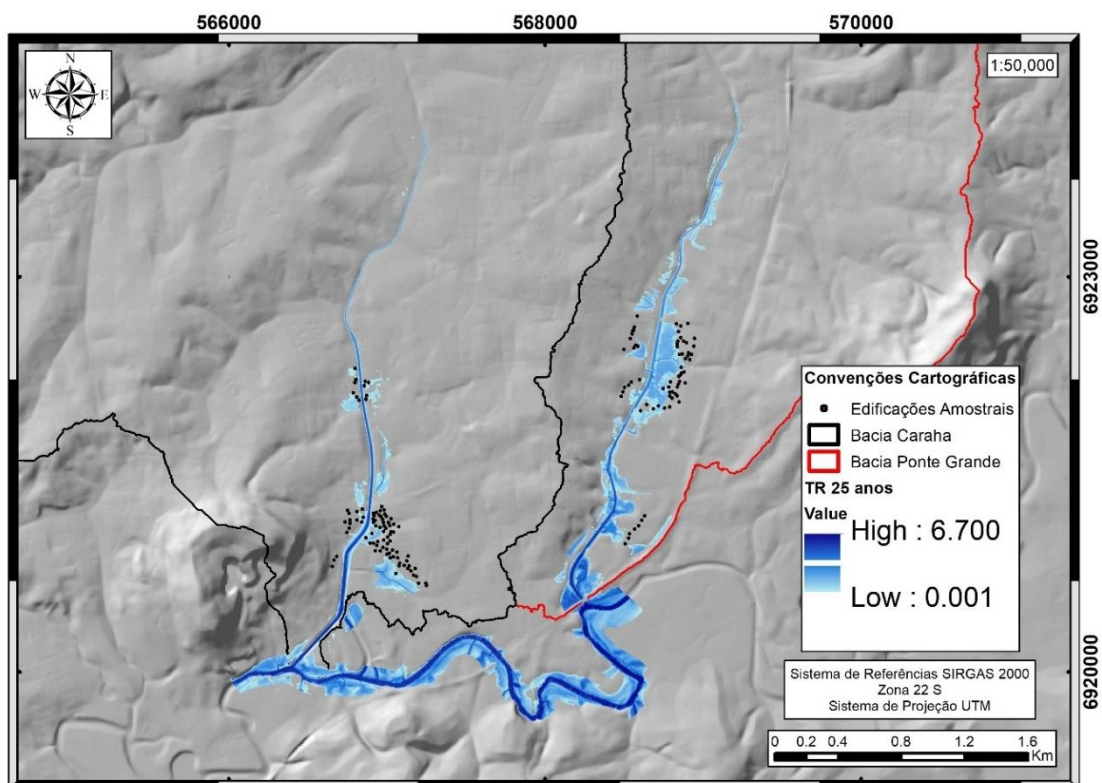
Fonte: Autor (2022).

Figura 49 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 15 anos.



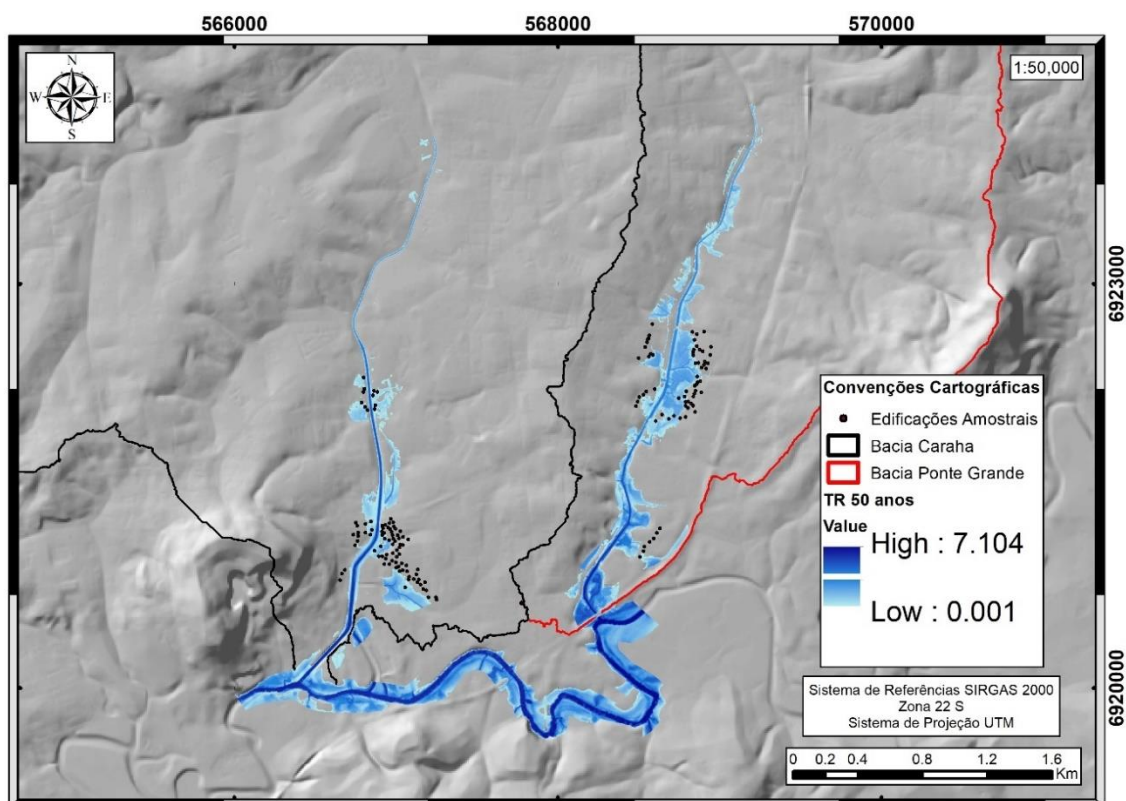
Fonte: Autor (2022).

Figura 50 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 25 anos.



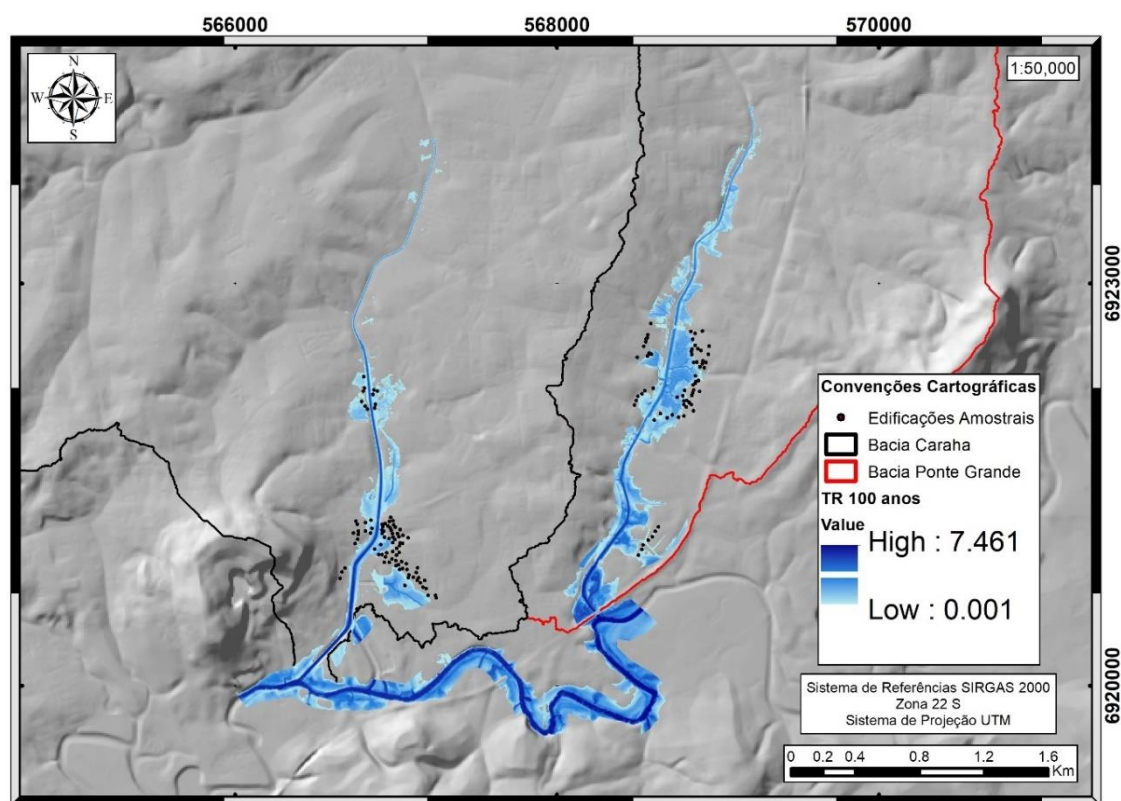
Fonte: Autor (2022).

Figura 51 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 50 anos.



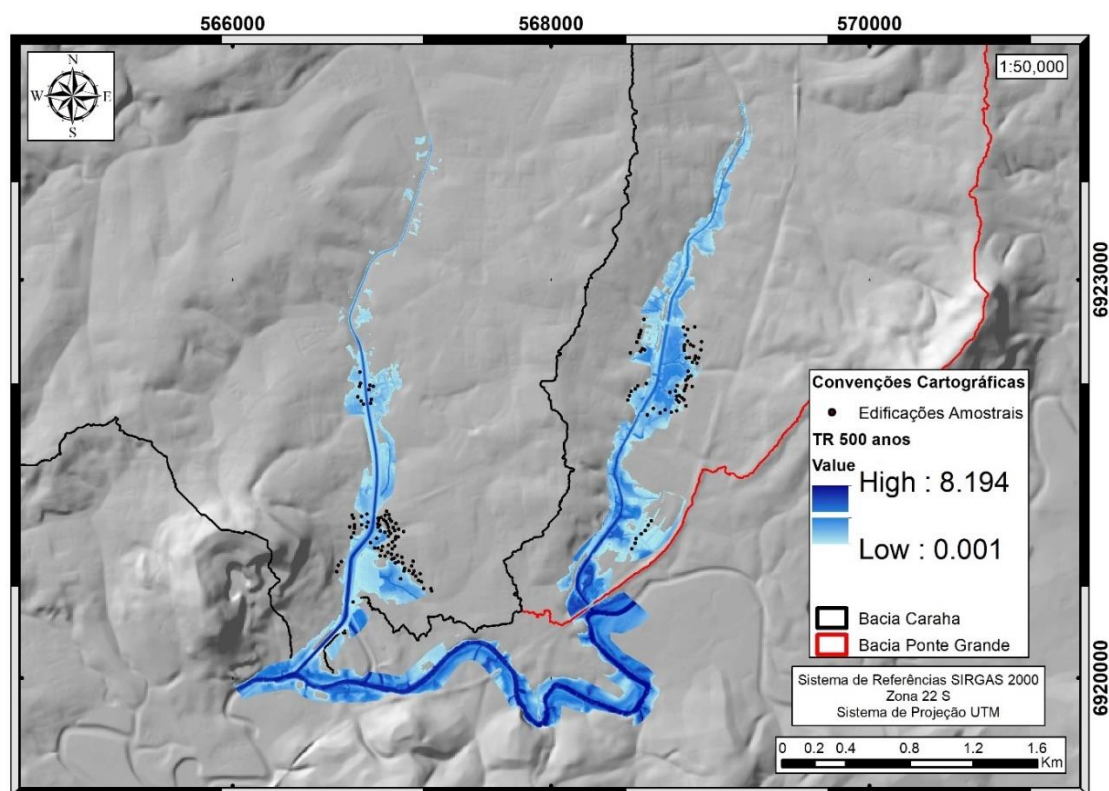
Fonte: Autor (2022).

Figura 52 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 100 anos.



Fonte: Autor (2022).

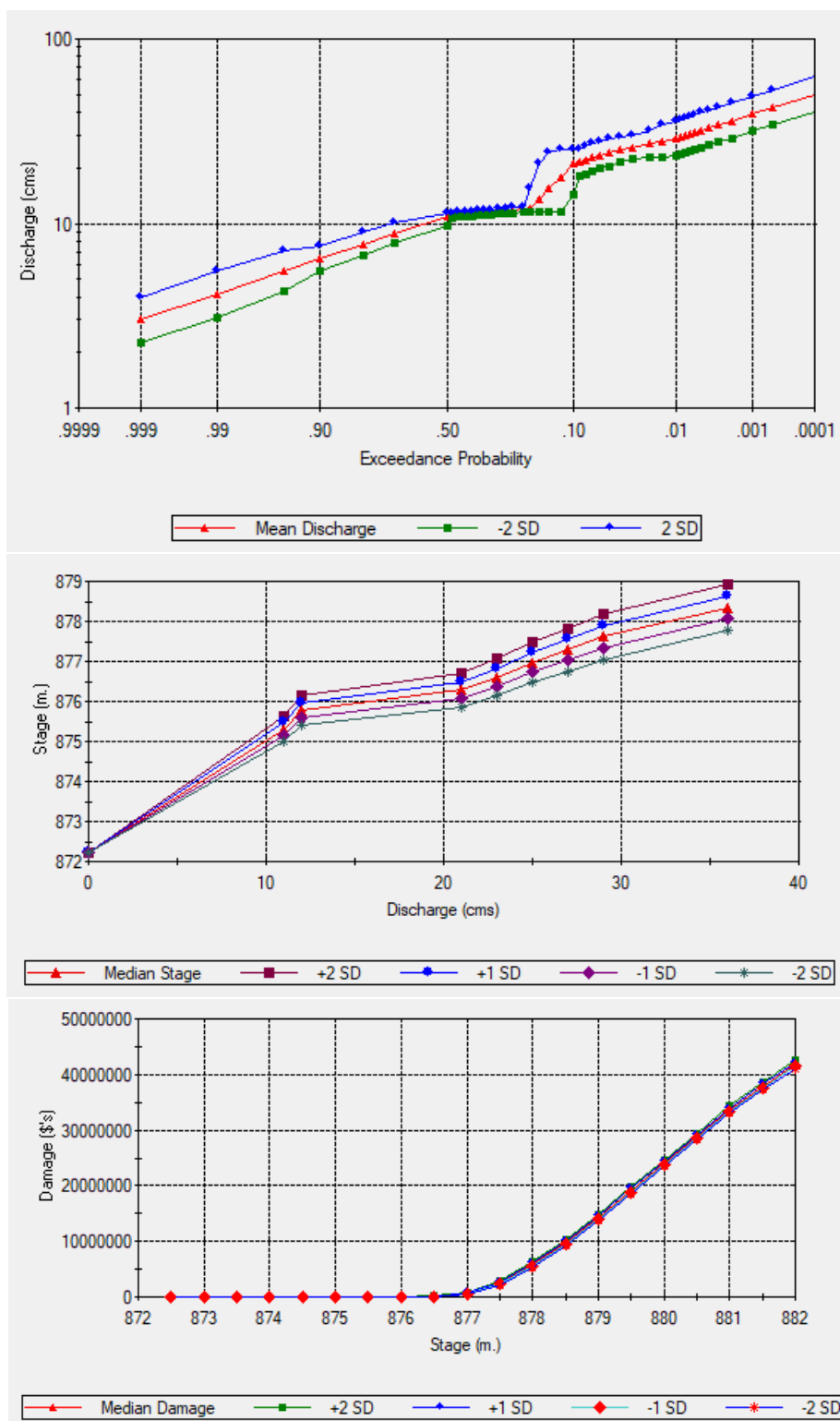
Figura 53 – Mancha de inundação para o Tempo de Retorno de 500 anos.



Fonte: Autor (2022).

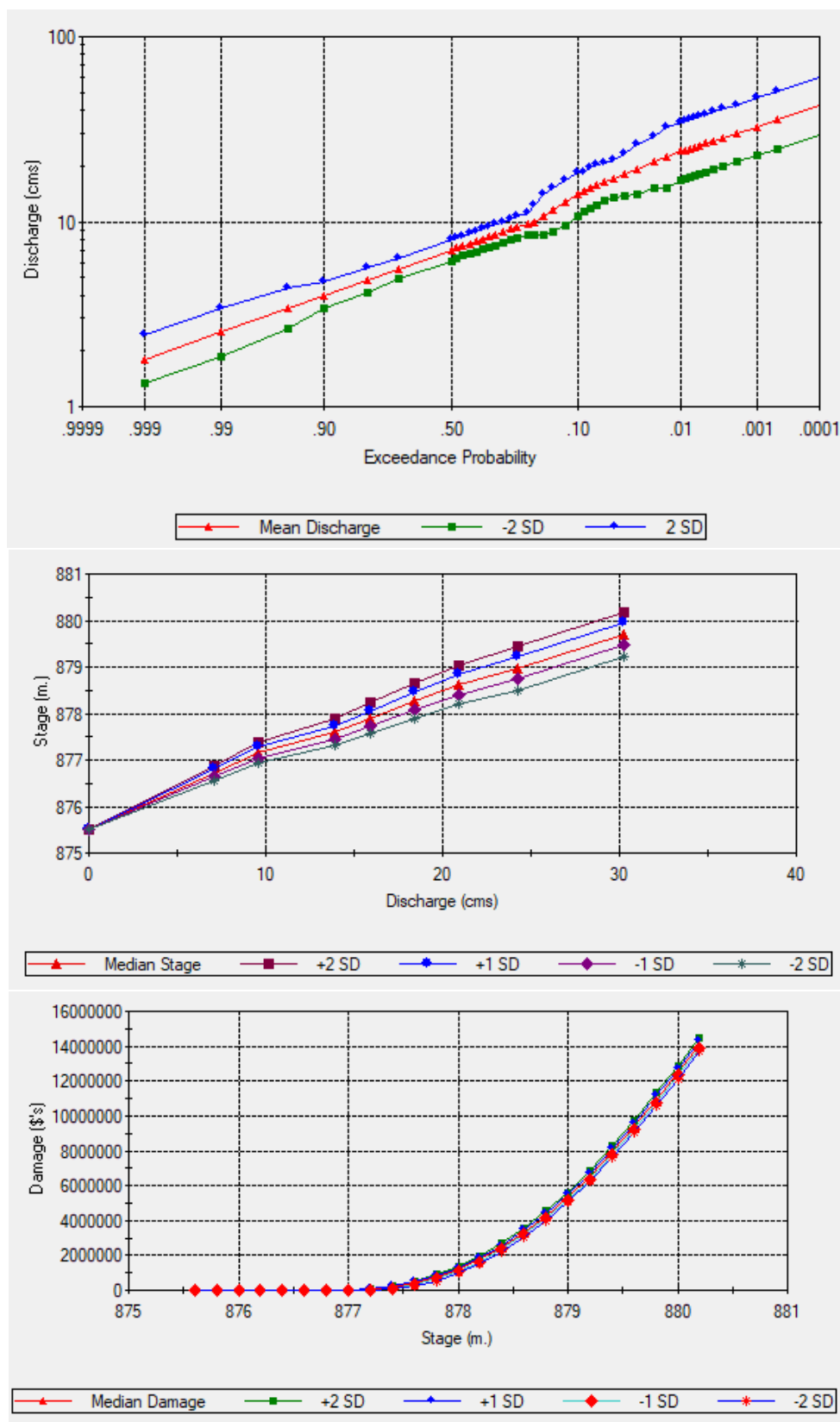
APÊNDICE D – FUNÇÕES OBTIDAS NO HEC-FDA

Figura 54 – Funções de probabilidade de excedência, nível-vazão e nível-danos, referentes ao Rio Carahá, modeladas no FDA.



Fonte: Autor (2022).

Figura 55 – Funções de probabilidade de excedência, de nível-vazão e de nível-danos, referentes ao Rio Ponte Grande, modeladas no FDA.



Fonte: Autor (2022).

APÊNDICE E – COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO URBANO NA ÁREA DE ESTUDO

Figura 56 – Evolução da Ocupação Urbana, em intervalo de 20 anos, na área de domínio do problema, no município de Lages/SC.



Fonte: Autor (2022).

Figura 57 – Evolução da Ocupação Urbana, em intervalo de 20 anos, na área de domínio do problema, com destaque para bacia do rio Carahá.



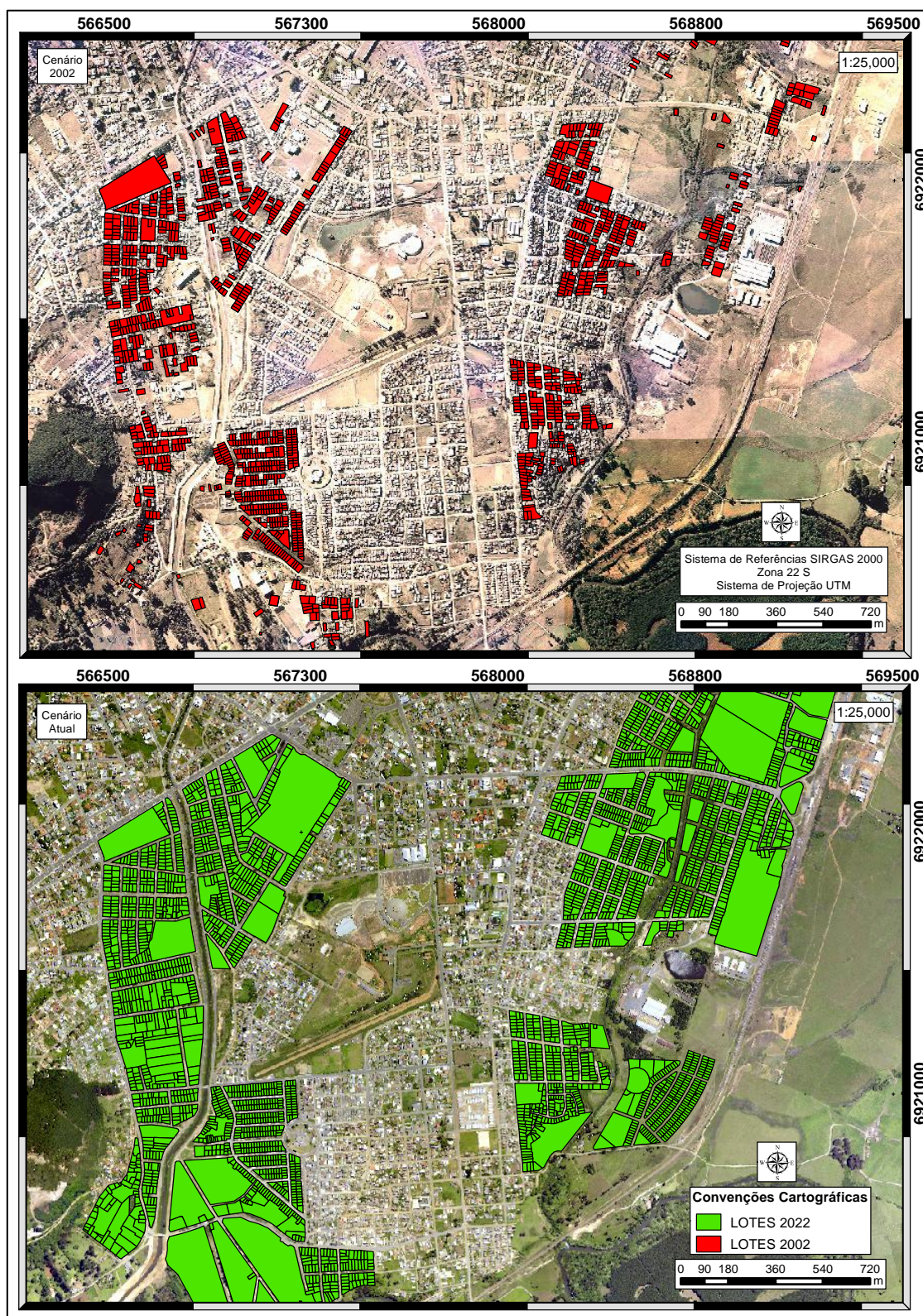
Fonte: Autor (2022).

Figura 58 – Evolução da Ocupação Urbana, em intervalo de 20 anos, na área de domínio do problema, com destaque para bacia do rio Ponte grande.



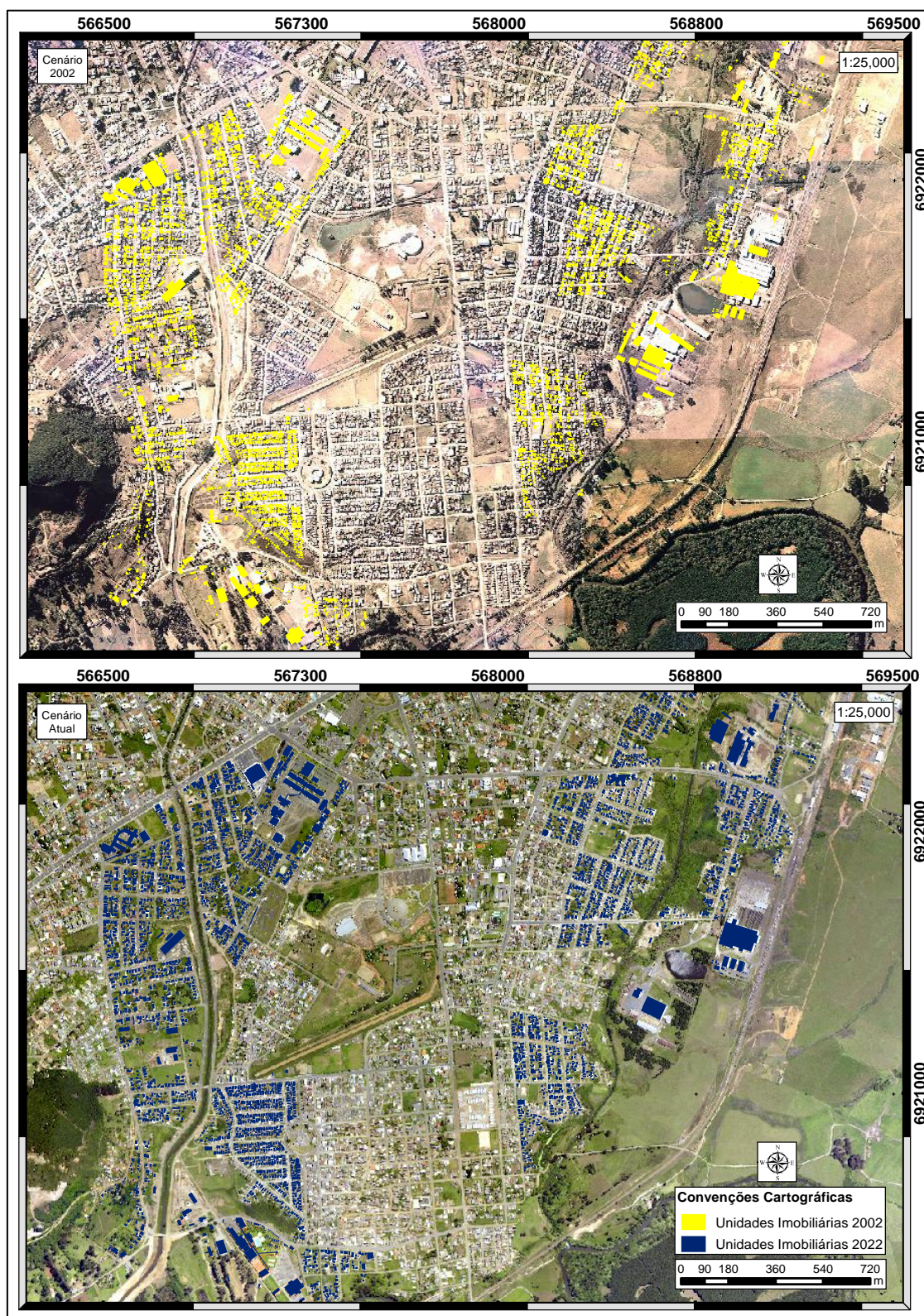
Fonte: Autor (2022).

Figura 59 – Evolução da Ocupação Urbana na área de domínio do problema, com destaque para os lotes cadastrados no município.



Fonte: Autor (2022).

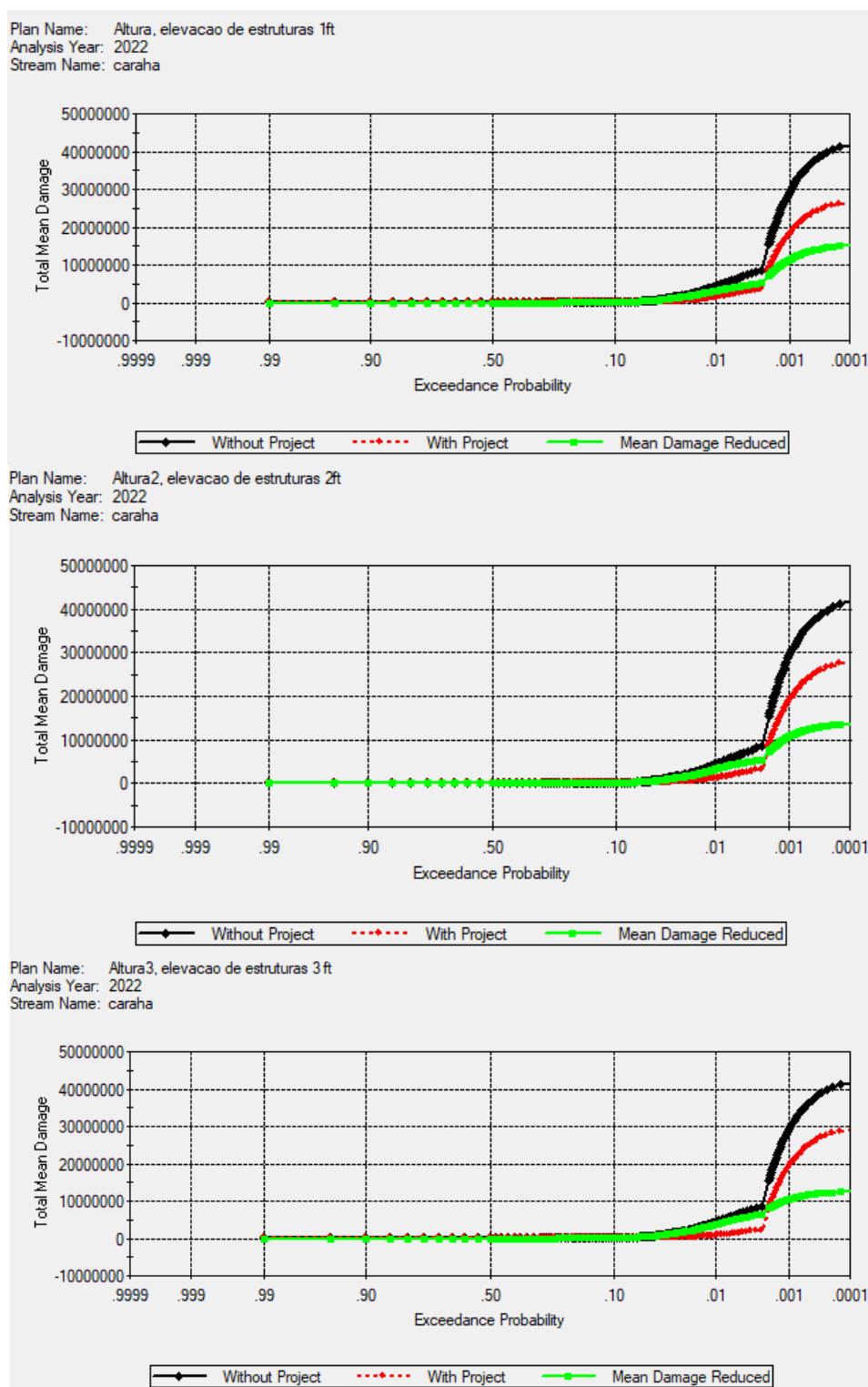
Figura 60 – Evolução da Ocupação Urbana na área de domínio do problema, com destaque para as unidades imobiliárias cadastradas no município.



Fonte: Autor (2022).

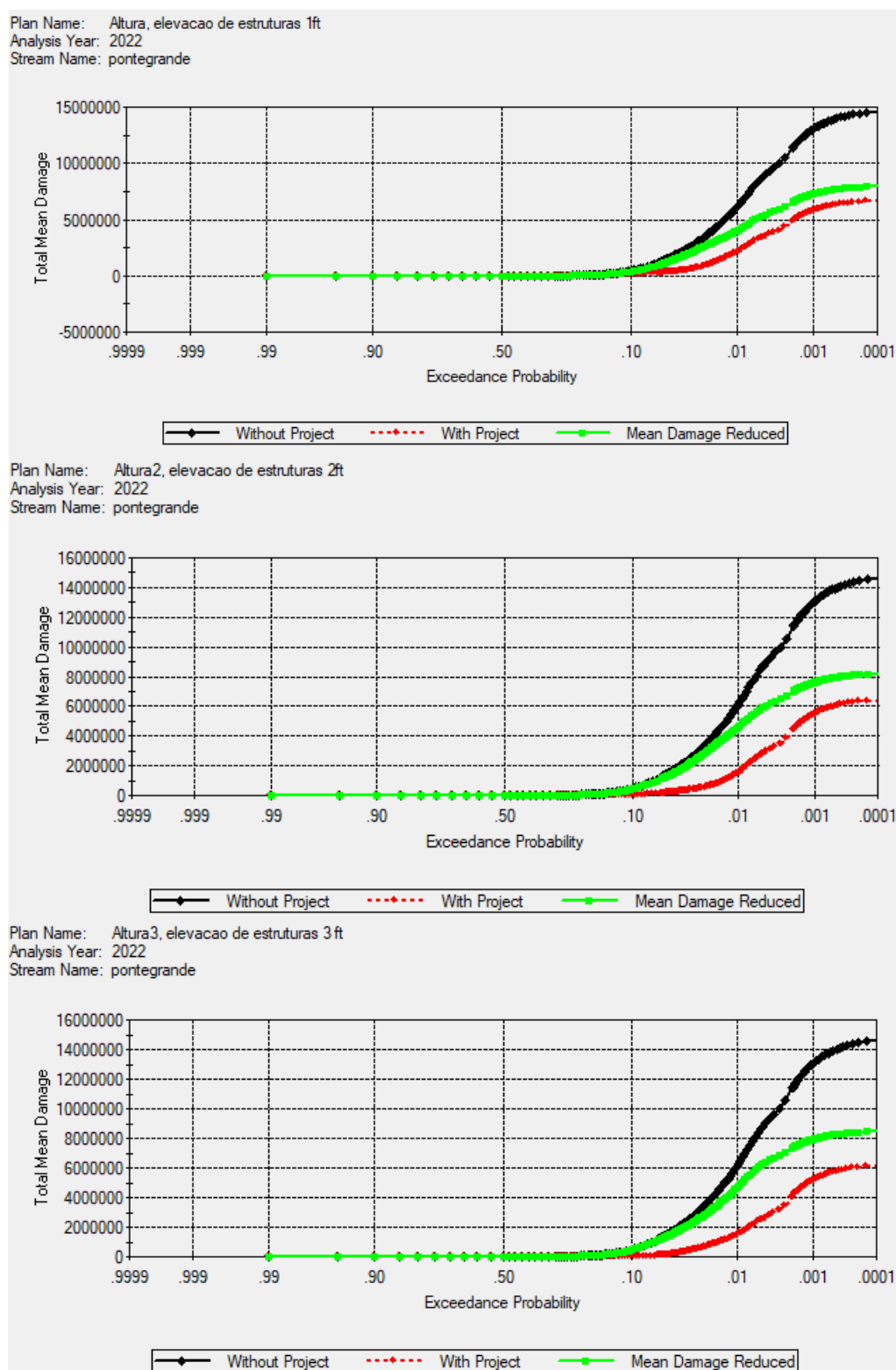
APÊNDICE F – CURVAS DE PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA - MÉDIA DE REDUÇÃO DOS DANOS

Figura 61 – Funções de probabilidade de excedência por média total de danos para os planos de mitigação, referentes ao Rio Carahá, modeladas no FDA.



Fonte: Autor (2022).

Figura 62 – Funções de probabilidade de excedência por média total de danos para os planos de mitigação, referentes ao Rio Ponte Grande, modeladas no FDA.



Fonte: Autor (2022).

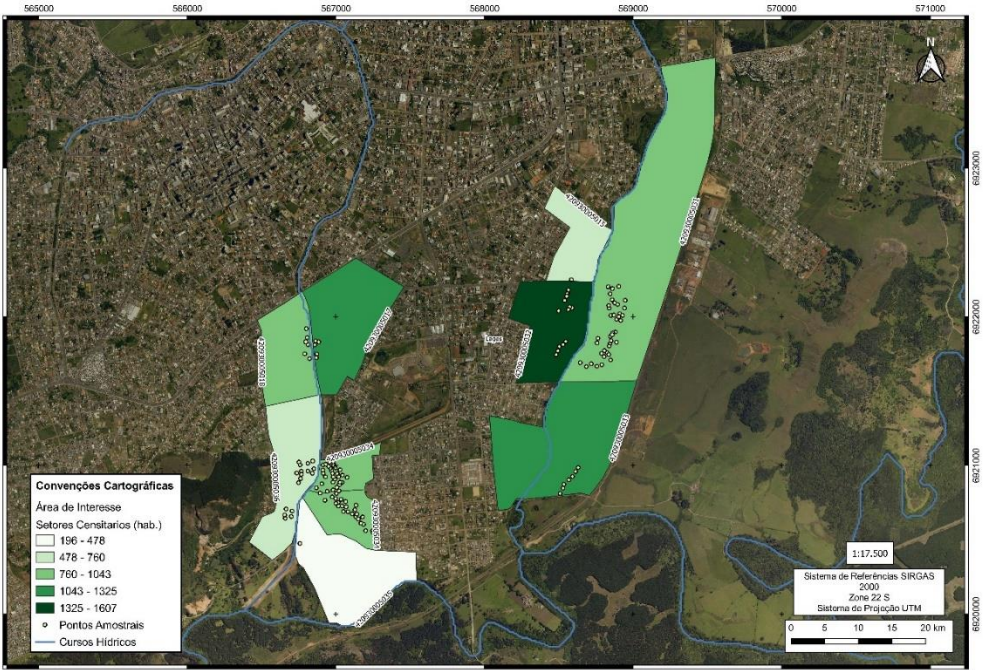
**APÊNDICE G – ESPACIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO
ÍNDICE DE VULNERABILIDADE**

Figura 63 – Espacialização da Variável referente ao número de domicílios por
setor censitário.



Fonte: Autor (2022).

Figura 64 – Espacialização da Variável referente ao número de habitantes por
setor censitário.



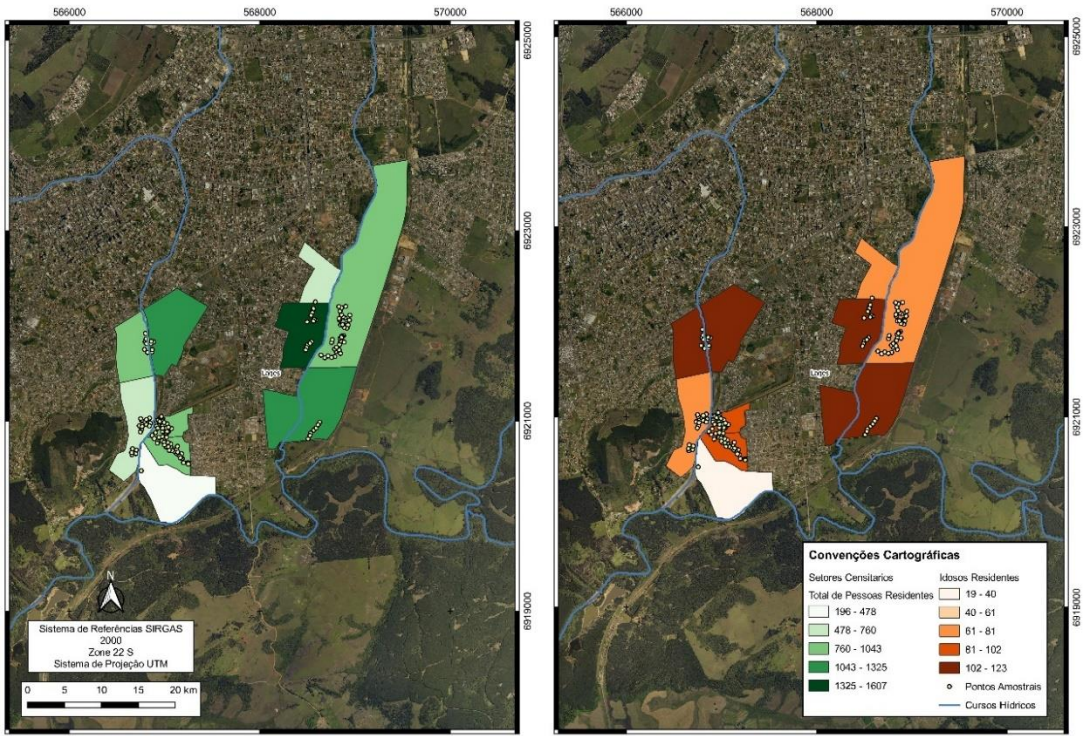
Fonte: Autor (2022).

Figura 65 – Espacialização da Variável referente ao número de pessoas responsáveis alfabetizadas por setor censitário.



Fonte: Autor (2022).

Figura 66 – Espacialização da Variável referente ao número de idosos residentes por setor censitário.



Fonte: Autor (2022).

Figura 67 – Espacialização da Variável referente ao número de crianças residentes por setor censitário.



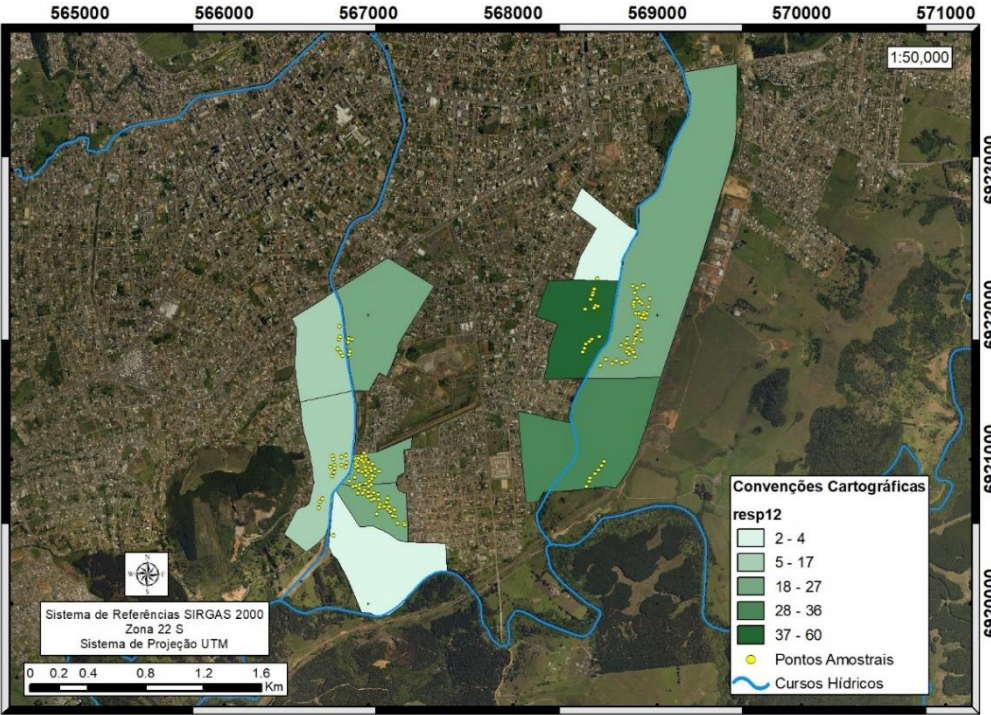
Fonte: Autor (2022).

Figura 68 – Espacialização da Variável referente ao número de pessoa responsável do sexo feminino por setor censitário.



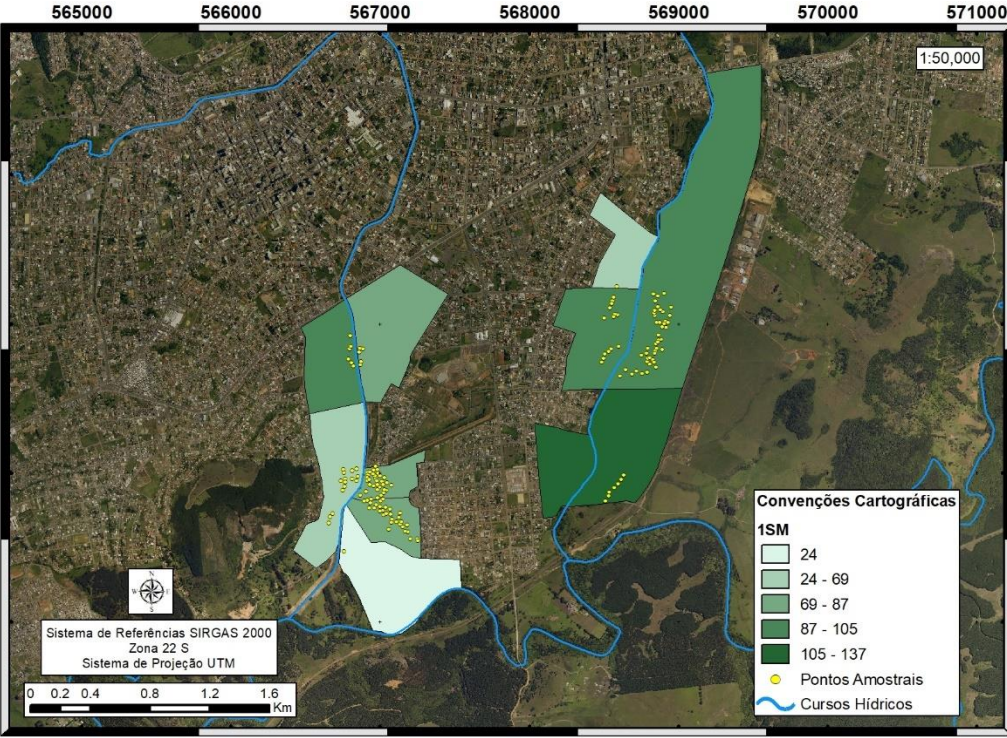
Fonte: Autor (2022).

Figura 69 – Espacialização da Variável referente ao número de responsáveis sem rendimento por setor censitário.



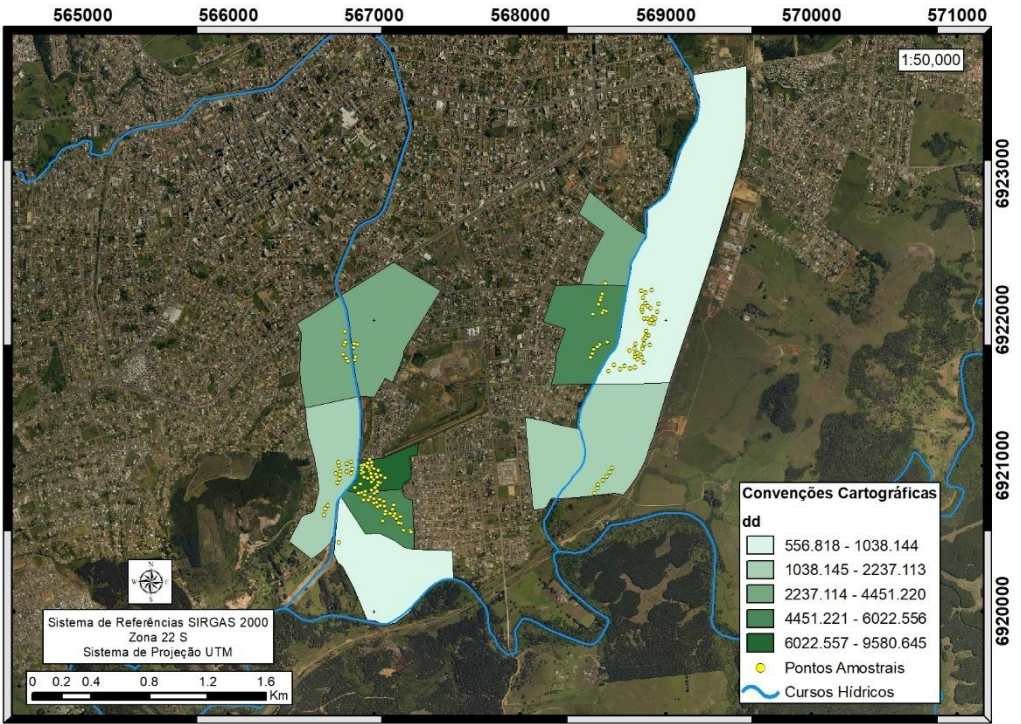
Fonte: Autor (2022).

Figura 70 – Espacialização da Variável referente ao número de responsáveis com até 1 salário mínimo de rendimento por setor censitário.



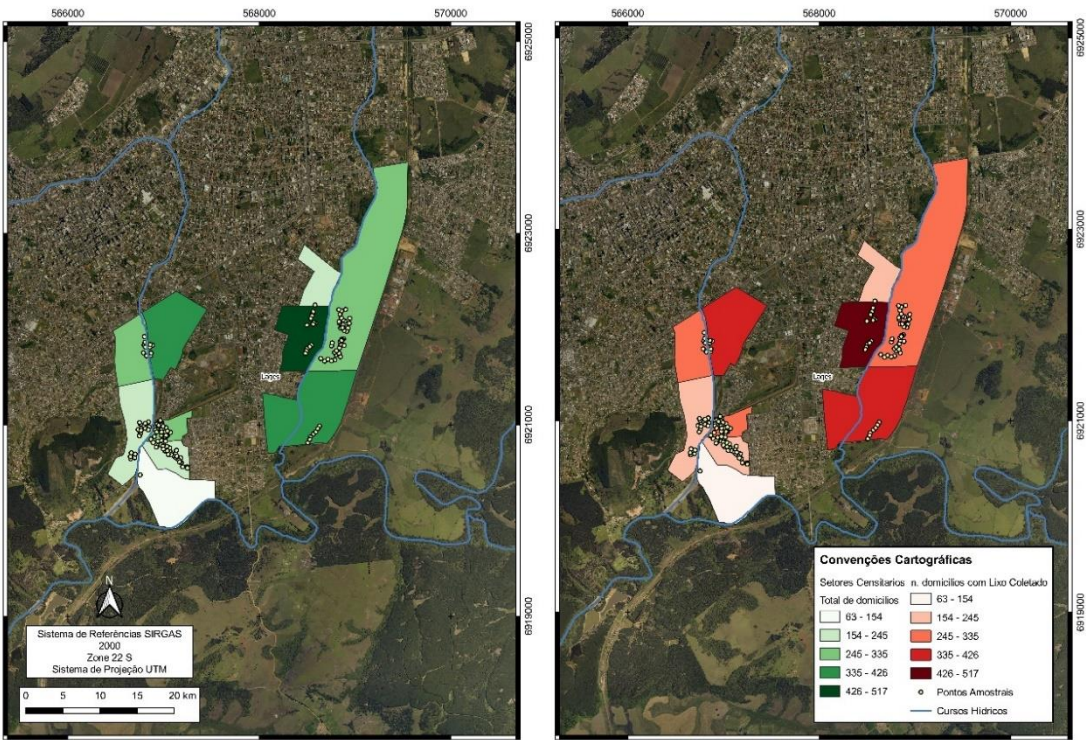
Fonte: Autor (2022).

Figura 71 – Espacialização da Variável referente à densidade demográfica por setor censitário.



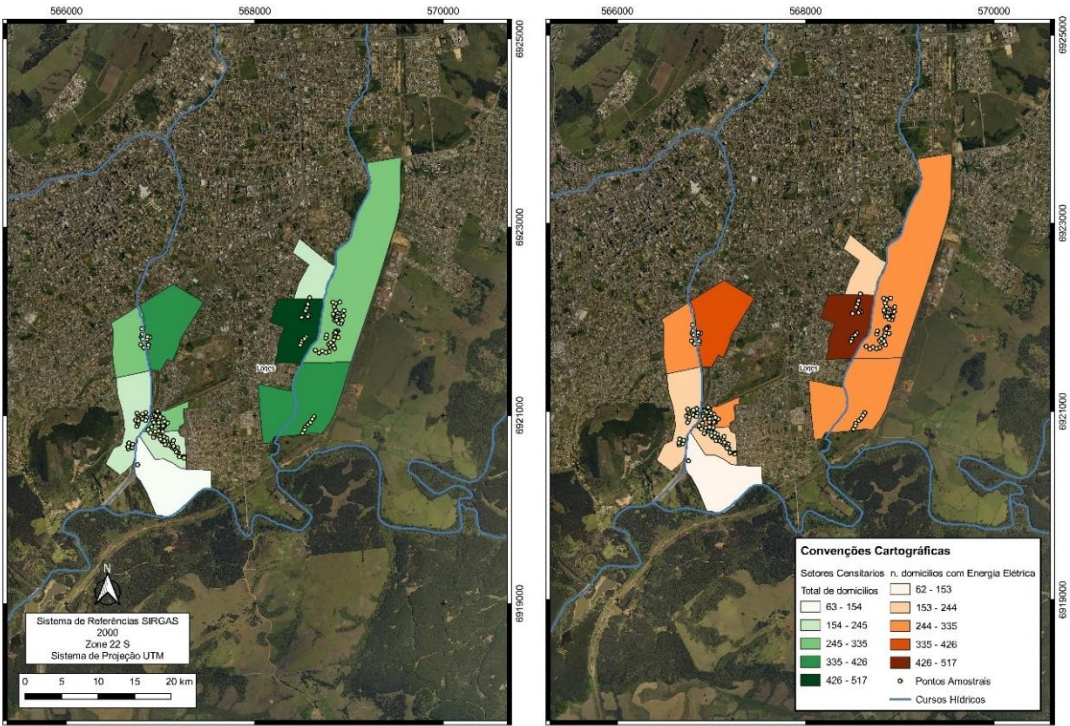
Fonte: Autor (2022).

Figura 72 – Espacialização dos domicílios com coleta de lixo por setor censitário.



Fonte: Autor (2022).

Figura 73 – Espacialização dos domicílios com energia elétrica por setor censitário.



Fonte: Autor (2022).



Assinaturas do documento



Código para verificação: **1AZ1D75B**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



SILVIO LUIS RAFAELI NETO (CPF: 493.XXX.709-XX) em 05/10/2022 às 11:20:15

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:45:58 e válido até 30/03/2118 - 12:45:58.

(Assinatura do sistema)



FLAVIO JOSE SIMIONI (CPF: 746.XXX.859-XX) em 05/10/2022 às 11:35:02

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:40:08 e válido até 30/03/2118 - 12:40:08.

(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTlwMjJfMDAwMzgyNDlfMzgZMDZfMjAyMl8xQVoxRDc1Qg==> ou o site

<https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00038249/2022** e o código **1AZ1D75B** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.