

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

JOSÉ AUGUSTO MÜLLER NETO

**ESTIMATIVA DE IMPACTO DAS CHEIAS DE 1941, 1967 E 2015 EM PORTO
ALEGRE NA HIPÓTESE DE INEXISTÊNCIA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO
CONTRA CHEIAS DO LAGO GUAÍBA**

Porto Alegre

2018

JOSÉ AUGUSTO MÜLLER NETO

**ESTIMATIVA DE IMPACTO DAS CHEIAS DE 1941, 1967 E 2015 EM PORTO
ALEGRE NA HIPÓTESE DE INEXISTÊNCIA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO
CONTRA CHEIAS DO LAGO GUAÍBA**

*Trabalho de conclusão de curso
submetido ao curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul como
requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Ambiental*

Orientador: Prof. Dr. Fernando Dornelles

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

Diretor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Diretora: Edith Beatriz Camaño Schettini

CIP - Catalogação na Publicação

Müller Neto, José Augusto
ESTIMATIVA DE IMPACTO DAS CHEIAS DE 1941, 1967 E
2015 EM PORTO ALEGRE NA HIPÓTESE DE INEXISTÊNCIA DO
SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA CHEIAS DO LAGO GUAÍBA /
José Augusto Müller Neto. -- 2018.
77 f.
Orientador: Fernando Dornelles.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Inundações urbanas. 2. Cheias do Lago Guaíba. 3.
Porto Alegre. 4. Geoprocessamento. I. Dornelles,
Fernando, orient. II. Título.

JOSÉ AUGUSTO MÜLLER NETO

**ESTIMATIVA DE IMPACTO DAS CHEIAS DE 1941, 1967 E 2015 EM PORTO
ALEGRE NA HIPÓTESE DE INEXISTÊNCIA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO
CONTRA CHEIAS DO LAGO GUAÍBA**

Este trabalho de conclusão de curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada

Fernando Dornelles

Aprovado em: 14/12/2018

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Fernando Dornelles –
Instituto de Pesquisas Hidráulicas –
IPH**

**Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum –
Instituto de Pesquisas Hidráulicas –
IPH**

**Msc. Ayan Santos Fleischmann –
Instituto de Pesquisas Hidráulicas –
IPH**

Dedico este trabalho a todos
aqueles que buscam
esclarecimento através da
ciência.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos integrantes da banca examinadora pelo tempo despendido em avaliar meu trabalho; ao meu orientador, Fernando Dornelles, pela orientação amiga; à minha orientadora durante toda minha graduação, Tatiana Silva da Silva; aos meus colegas de trabalho na empresa Profill Engenharia e Ambiente e no Laboratório de Modelagem de Bacias Ricardo Ayup-Zouain pelas colaborações; à minha família, em especial meus pais, Thaís Elizabeth Peters e Guilherme Augusto Müller, por possibilitarem meus estudos; à minha namorada Camila Horst Toigo, por absolutamente tudo; aos meus fieis amigos e colegas, e, por fim, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pelo ambiente de diversidade, intelectualidade e imenso aprendizado o qual tenho imenso carinho.

Be like water, my friend

Lee Jun-Fan

RESUMO

O trabalho versa sobre as inundações urbanas ocorridas em Porto Alegre/RS em 1941, 1967 e 2015 e configura-se como uma análise espaço-temporal dos impactos sobre as edificações atuais que seriam atingidas na hipótese de inexistência, de remoção ou de falha, do sistema de proteção contra inundações do Lago Guaíba. Dessa forma, o objetivo principal do trabalho é quantificar as edificações potencialmente atingidas diariamente na área protegida durante importantes cheias registradas no Lago Guaíba. A metodologia fundamenta-se em uso de ferramentas de geoprocessamento para cruzar dados da altimetria da cidade e edificações com os níveis d'água do Lago Guaíba simulado matematicamente pelo modelo MGB-IPH para 1941 e registrado diariamente para 1967 e 2015 com régua limnimétrica. Os resultados incluem o número máximo de edificações afetadas em 1941, 1967 e 2015, equivalentes a 43.553, 16.749 e 12.815 unidades no pico dos eventos e o tempo total de 139, 65 e 160 dias, respectivamente. Entretanto, além do número de edificações atingidas e tempo máximo de inundação, o resultado mais notável do trabalho consiste, justamente, na constatação da evolução do cenário de impactos que ocorreriam na hipótese de não existência do sistema de proteção. A conclusão alcançada é de que o sistema de proteção a inundações consiste-se como indispensável mecanismo na segurança da sociedade civil residente na área inundável.

Palavras-chave: Inundações urbanas, Cheias do Lago Guaíba, Porto Alegre, Geoprocessamento

ABSTRACT

This work studies the urban floods that occurred in Porto Alegre/RS - Brazil in 1941, 1967 and 2015. It is a space-time analysis of the impacts on current buildings that would be affected on the hypothesis of inexistence, removal or failure of the Guaíba Lake flood protection system. Therefore, the main objective of the study is to quantify the buildings that would be hit daily in the protected area during important recorded floods of the Guaíba Lake. The methodology is based on the use of geoprocessing tools to cross-check altimetry data of the city and buildings with water levels of Guaíba Lake simulated mathematically with the MGB-IPH model for 1941 and registered daily with a water level gauge for 1967 and 2005. Results include the maximum number of buildings affected at the peak of the events in 1941, 1967 and 2015, which are respectively equivalent to 43,553, 16,749 and 12,815 units for 139, 65 and 160 days. However, besides the number of hit buildings and the maximum time flood duration, the result that is more outstanding in this study is the finding of the evolution of the scenario of impacts that would occur in the hypothesis of inexistence of the protection system. The conclusion reached is that the flood protection system is an indispensable mechanism for the safety of the civil society living in the floodable area.

Keywords: Urban floods, Guaíba Lake floods, Porto Alegre, Geoprocessing.

LISTA DE TABELAS E APÊNDICES

Tabela 1 – Uso e ocupação do solo da Bacia do Lago Guaíba e suas respectivas áreas.....	16
Tabela 2 – Tempo de Retorno do nível do Lago Guaíba na Estação Fluviométrica Parque Harmonia.....	22
Tabela 3 – Relação de nº de edificações e nº de dias inundados por nível d'água...42	
Tabela 4 – Resumo dos resultados das cheias de 1941, 1967 e 2015.....	44
Tabela 5 – Edificações atingidas por tempo e por altura de submersão.....	60
Apêndice 1 – Tabela de informações das edificações abaixo da cota 1,0 m.....	69
Apêndice 2 – Tabela de número de edificações com informação altimétrica menor ou igual a determinada cota.	70
Apêndice 3 – Tabela de dados diários de edificações impactadas das cheias de 1941, 1967 e 2015.....	71
Apêndice 4 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 1941).....	75
Apêndice 5 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 1967).....	76
Apêndice 6 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 2015).....	77

LISTA DE FIGURAS E MAPAS

Figura 1 – Região Hidrográfica do Guaíba	14
Figura 2 – Área edificada e área protegida	17
Figura 3 – Sistema de proteção a inundações	18
Figura 4 – Precipitação na Região Hidrográfica do Lago Guaíba à época da cheia de 1941.	24
Figura 5 – Articulação do mosaico e MDTs.....	33
Figura 6 – Exemplo de pontos dentro de edificações.....	34
Figura 7 – Gráfico <i>Box Plot</i> de edificações impactadas por dia por cada cheia	39
Figura 8 – Nº de edificações impactadas ao longo das inundações.	41
Figura 9 – Cota de cheia e edificações impactadas (1941).....	45
Figura 10 – Cota de cheia e edificações impactadas (1967).....	45
Figura 11 – Cota de cheia e edificações impactadas (2015).....	46
Figura 12 – Cota máxima da inundação de 1941 (destaque para o bairro central)...	48
Figura 13 – Área atingida na cota máxima da inundação de 1967 (destaque para o bairro Navegantes).....	50
Figura 14 – Área atingida na cota máxima da inundação de 2015 (destaque para o bairro Menino Deus).....	50
Figura 15 – Exemplo de tempo de inundação de edificações	55
Mapa 1 – Área e dias inundados (1941).....	52
Mapa 2 – Área e dias inundados (1967).....	53
Mapa 3 – Área e dias inundados (2015).....	54
Mapa 4 – Edificações e tempo de inundação (1941).....	56
Mapa 5 – Edificações e tempo de inundação (1967).....	57
Mapa 6 – Edificações e tempo de inundação (2015).....	58

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	13
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
3.2.	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	19
3.2.1.	INUNDAÇÕES RIBEIRINHAS.....	19
3.2.2.	MECANISMO DAS INUNDAÇÕES EM PORTO ALEGRE.....	20
3.3.	HISTÓRICO.....	21
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1.	MATERIAIS	27
4.1.1.	MODELO DIGITAL DE TERRENO E EDIFICAÇÕES	27
4.1.2.	DADOS LIMNIMÉTRICOS	29
4.2.	MÉTODO.....	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1.	ANÁLISE DESCRITIVA E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS PARA OS TRÊS EVENTOS DE CHEIA	38
5.2.	ANÁLISE DAS EDIFICAÇÕES ATINGIDAS CONSIDERANDO-SE A ESCALA DIÁRIA E O TEMPO DE OCORRÊNCIA	40
5.3.	ANÁLISE DO NÚMERO DE EDIFICAÇÕES ATINGIDAS ANTE O NÍVEL D'ÁGUA 44	
5.4.	ANÁLISE DA ÁREA E DAS EDIFICAÇÕES ATINGIDAS CONSIDERANDO-SE A COTA MÁXIMA.....	47
5.5.	EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS EVENTOS DE CHEIA E ANÁLISE DAS EDIFICAÇÕES AFETADAS	51
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	APÊNDICES	68

1. INTRODUÇÃO

Inundações ribeirinhas são frequentes na Região do Lago Guaíba, especialmente próximo ao complexo deltaico do rio Jacuí, que situa-se em cotas relativamente baixas. A capital do estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, situada às margens desses corpos hídricos, apresenta histórico de inundações com danos consideráveis aos seus núcleos urbanos.

A ocorrência de eventos de cheia demasiados significativos em 1941 e 1967, levaram o poder público à construção de um sistema de proteção a inundações. Esse sistema é composto principalmente por diques e casas de bombas. Entretanto, uma das peças componentes do sistema é a cortina de concreto (famigerado Muro da Mauá) na região central da cidade, separando a população do convívio com o Lago.

Com frequência e especialmente após períodos sem ocorrência de cheias, a sociedade porto-alegrense reinicia um debate a respeito da necessidade ou não do muro da Avenida Mauá. Em contraponto, o presente trabalho almeja demonstrar o importante papel desempenhado pelo sistema de proteção na segurança das populações residentes em seu interior.

Para tanto, a partir do uso de ferramentas de modelagem hidrológica e de geoprocessamento, a realização do trabalho consiste em cruzar informações de altimetria do município de Porto Alegre com dados de nível d'água, medidos ou estimados computacionalmente, das cheias de 1941, 1967 e 2015 do Lago Guaíba. Complementarmente, uma vez que a análise apenas da mancha máxima de inundação não considera a permanência desta mesma, o produto deste trabalho permite, futuramente, uma estimativa mais realista dos prejuízos das inundações ribeirinhas em Porto Alegre.

2. OBJETIVOS

Tendo em vista os aspectos supracitados, o presente trabalho propõe-se responder os seguintes questionamentos: (1) qual o impacto, em termos de quantidade de edificações atingidas, da evolução diária dos mais importantes eventos de cheia do Lago Guaíba sobre a atual infraestrutura urbana protegida de Porto Alegre se não houvesse o sistema de proteção a inundações? Ainda, dadas essas circunstâncias, (2) qual o comportamento temporal e espacial das inundações sobre a região protegida da cidade?

Visando a responder esses questionamentos o objetivo do trabalho é definir o número de edificações atingidas diariamente na área de estudo durante importantes cheias registradas no Lago Guaíba, em 1941, 1967 e 2015. Para tanto, como objetivo secundário, deve-se definir quais cotas altimétricas da cidade estariam submetidas às inundações.

Como motivação para a execução do trabalho salienta-se a importância do papel das medidas estruturais de contenção de cheias já implementadas, uma vez que a necessidade de tais recursos é recorrentemente questionada. Assim, a principal contribuição desta pesquisa é trazer para o debate a respeito da necessidade de medidas estruturais de proteção a inundações dados sobre o impacto que eventos já ocorridos teriam sobre a cidade de Porto Alegre.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Lei 10.350/94, da Política Estadual de Recursos Hídricos, define a Região Hidrográficas (RH) do Guaíba (Figura 1), composta pelas bacias do Lago Guaíba e dos Rios Gravataí, Sinos, Caí, Taquari-Antas, Alto e Baixo Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim e Pardo. Situada na região nordeste do Rio Grande do Sul - RS, entre os paralelos 28° S e 31° S e os meridianos 50° W e 54° W e abrangendo uma área de aproximadamente 84.763,54 km², a RH do Guaíba corresponde a mais de 30% da área total do estado. Integrada por 251 municípios, inclusive a capital do Estado, a região conta com uma população de quase 6 milhões de habitantes, representando, assim, mais de 60% da população do Estado (FEPAM, 2018).

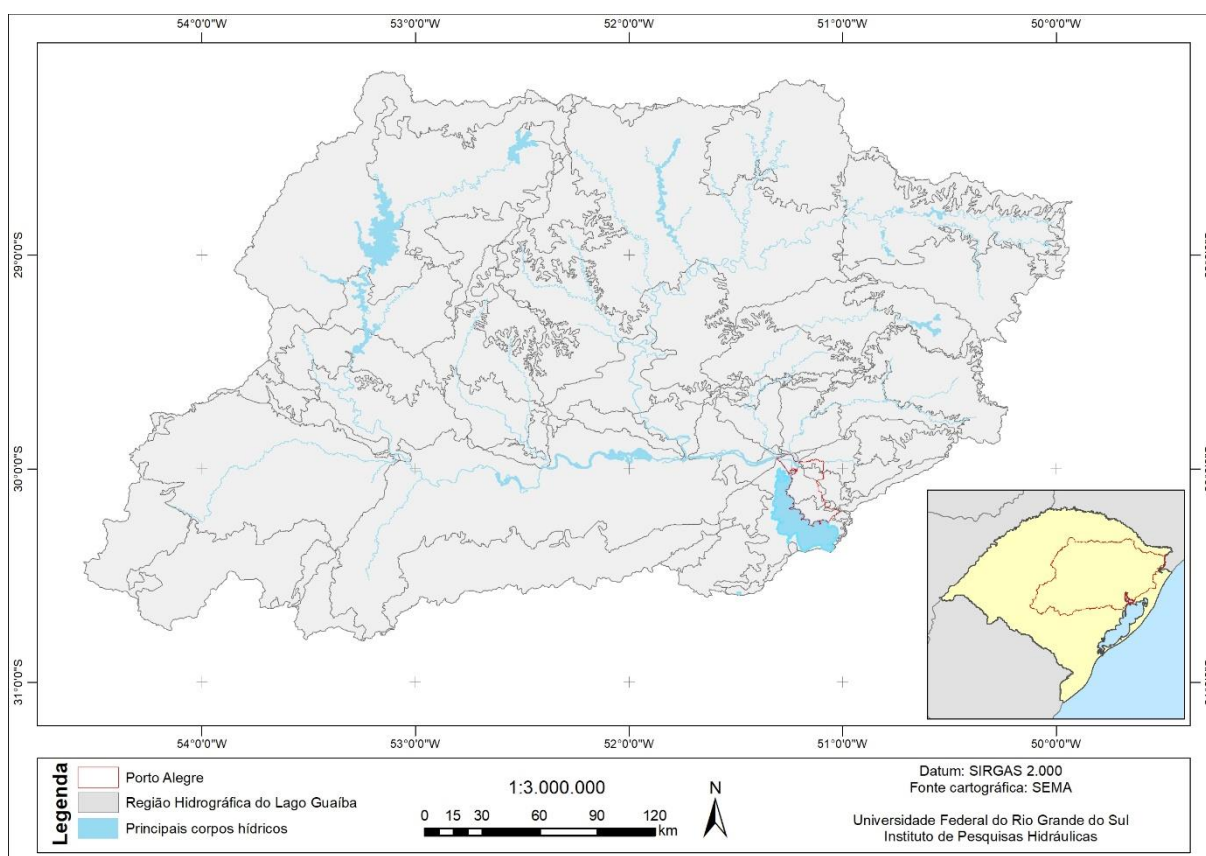


Figura 1 – Região Hidrográfica do Guaíba

Circunscrita pela RH do Guaíba e próxima à sua foz encontra-se parte da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), maior e mais importante centro urbano do RS. De acordo com dados censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, em 2010 a densidade demográfica da RMPA era de 390

hab./km². Porto Alegre, particularmente, é um dos municípios com maior densidade populacional alcançando a taxa de 2.837 hab./km² (MARTINS, 2013).

Em 2010, a RMPA apresentava uma taxa de urbanização (percentual da população urbana sobre a população total) equivalente a 96,9%. No que diz respeito a concentração populacional, a capital (contemplando cerca de 1,409 milhões de habitantes à época), concentrava 34,95% da população metropolitana para o mesmo período (MARTINS, 2013).

De acordo a Fundação de Economia e Estatística – FEE/RS (2013), em 2010 a RMPA representava quase 50% do Produto Interno Bruto a Preços de Mercado (PIB pm) do estado do Rio Grande do Sul. Desse montante, Porto Alegre era a que concentrava a maior participação dos municípios no PIB da região metropolitana, 38,40%.

Com relação a fatores físicos e bióticos da RH do Guaíba, a Geomorfologia abrange o Planalto da Bacia do Paraná, a Depressão Periférica e o Planalto Sul-Rio-Grandense. Dentre as formações vegetais originalmente existentes, predominavam Florestas Ombrófilas Mistas (Mata de Araucárias), Florestas Estacionais e Savanas (Campos). Embora grande parte dessa vegetação tenha sido suprimida, fragmentada ou alterada de forma geral, encontram-se remanescentes florestais em encostas íngremes de vales, especialmente nas cabeceiras dos rios Taquari-Antas e Jacuí (FEPAM, 2018).

Aproximando-se da bacia do Lago Guaíba, a qual é a última e mais direta contribuinte da Região Hidrográfica, fica evidente a situação de vulnerabilidade às inundações. Tal natureza pode ser acentuada pela alteração do uso do solo das ações antrópicas. A partir da classificação do uso e ocupação do solo do Plano de Bacia do Lago, ilustrada a seguir na Tabela 1, é possível constatar que aproximadamente 28% da superfície da bacia é composta por banhados, áreas úmidas ou alagadas sazonalmente, corpos hídricos perenes e área urbana (CONCREMAT, 2005), classes de uso e ocupação do solo que não necessariamente contribuem para atenuação de eventos de inundação. Complementarmente, segundo Tucci e Clarke (1997) o processo de diminuição da cobertura vegetal natural para posterior uso agrícola de cultivos anuais e ocupação urbana tende a incrementar as vazões média e máxima.

Tabela 1 – Uso e ocupação do solo da Bacia do Lago Guaíba e suas respectivas áreas

Classe de uso do solo	Área (km²)
Açude	21,73
Área urbana	151,19
Arroz	175,18
Banhado	61,22
Campo	951,40
Campo úmido	290,88
Lavoura	194,46
Mata	431,94
Parques	23,23
Reflorestamento	149,27

Fonte: Concremat (2005)

Segundo o relatório síntese dos estudos preliminares para subsídios ao Plano de Bacia do Lago Guaíba, o Delta do Jacuí e os municípios ao redor apresentam extensas áreas inundáveis, sejam elas urbanizadas e protegidas ou não. A capital Porto Alegre, especificamente, possui a maior área urbanizada protegida contra cheias dos corpos hídricos circundantes (CONCREMAT, 2005). Na Figura 2 é ilustrada a área urbanizada do município e a área protegida pelo sistema de pôlderes.

A proteção das áreas baixas da cidade é feita por meio de um sistema de diques e casas de bombas que formam pôlderes protegidos. O projeto, à época de responsabilidade do extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento – DNOS, baseou-se nas cotas atingidas pela cheia de 1941 para determinar a cota mínima dos diques de 1,25 m acima do nível alcançado naquele evento de inundação (RAUBER, 1992). Ainda, o Tempo de Retorno ou Tempo de Recorrência (TR) adotado para o dimensionamento das estruturas do projeto é de 370 anos a partir dos dados hidrológicos disponíveis à época (GUIMARAENS, 2009; RAUBER, 1992); atualmente estimam-se TRs muito maiores.

O complexo de barreiras se estende ao longo de 24 km no entorno da cidade e é drenado por 22 casas de bombas e coletores gerais (CONCREMAT, 2005; PMPA, 2018). Além dos diques externos recém mencionados, o sistema contém pelo menos 6 diques internos que, se somados à extensão da borda, fazem com que o conjunto passe a ter 68 km. Destes últimos, o localizado mais ao norte não acompanha a margem de algum arroio, mas, sim o limite da Vila Santo Agostinho. Os demais diques internos estendem-se pelas margens dos principais afluentes,

sendo estes (no sentido norte-sul) os arroios Sarandi, d'Areia, Dilúvio, Sanga da Morte e Cavalhada (CONCREMAT, 2005; GUIMARAENS, 2009; RAUBER, 1992).

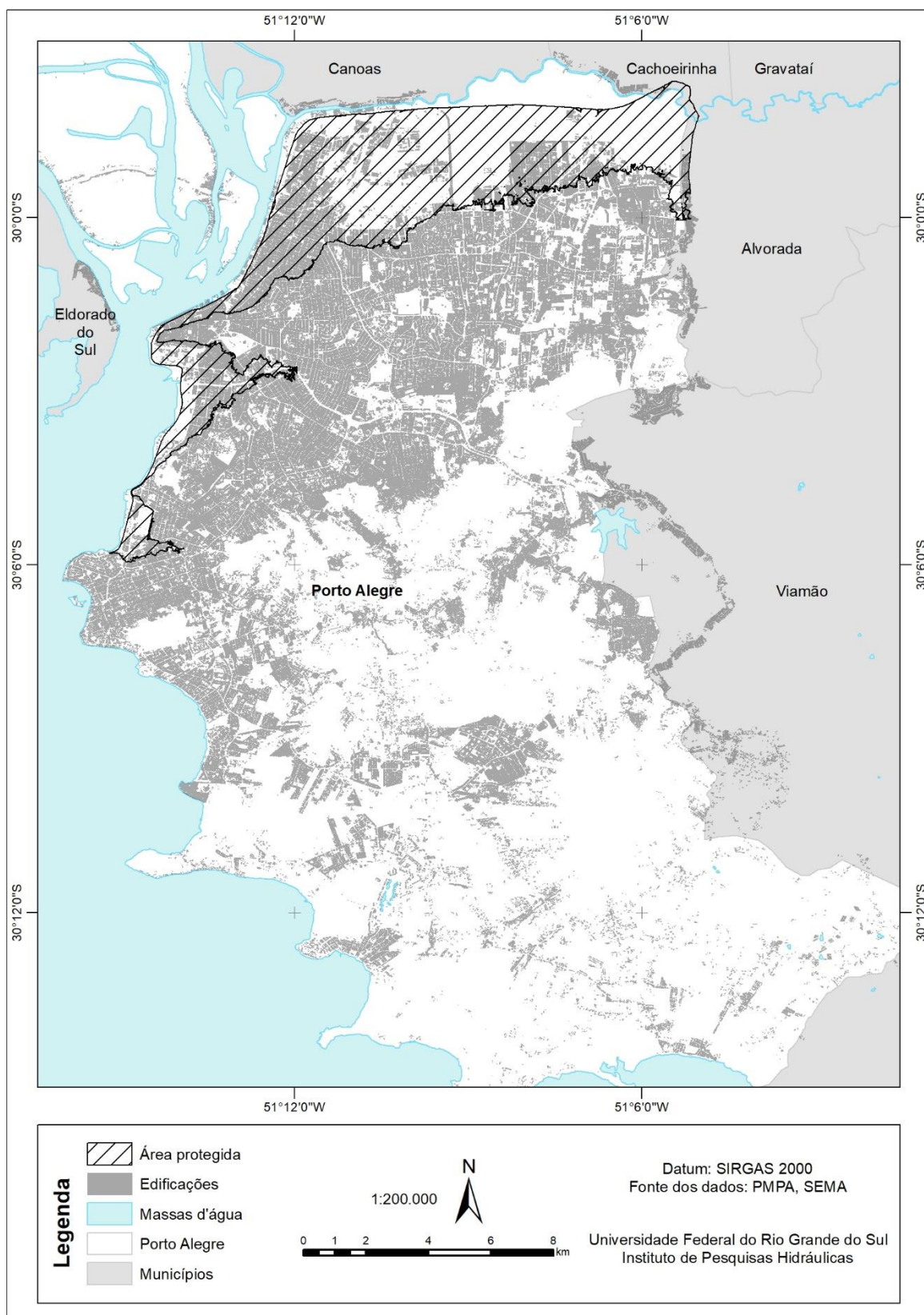


Figura 2 – Área edificada e área protegida

Já discretizando-se o sistema de proteção que circunda a cidade, no sentido norte sul, apresentam-se os seguintes diques externos:

- Dique Autoestrada - desde o entroncamento da Avenida Assis com a Autoestrada *Free-way* até a Ponte do Guaíba;
- Dique Navegantes – constituído pela Avenida Castelo Branco entre a Ponte do Guaíba e a Rodoviária;
- Muro da Mauá – Cortina de proteção de concreto de 3,0 m acima do solo e profundidade variável até atingir rocha ou solo impermeável, com extensão de 2.647 m.
- Dique Praia de Belas – constituído pela Avenida Eduardo Pereira Paiva entre a Usina do Gasômetro e a Ponta do Melo;
- Dique Cristal – constituído pela Avenida Diário de Notícias entre a Ponta do Melo e o Morro da Assunção.

Nesse sentido, a área de interesse utilizada como recorte espacial para o presente estudo é justamente aquela mantida segura pelo sistema de proteção contra inundações em Porto Alegre, ilustrada pela Figura 3.

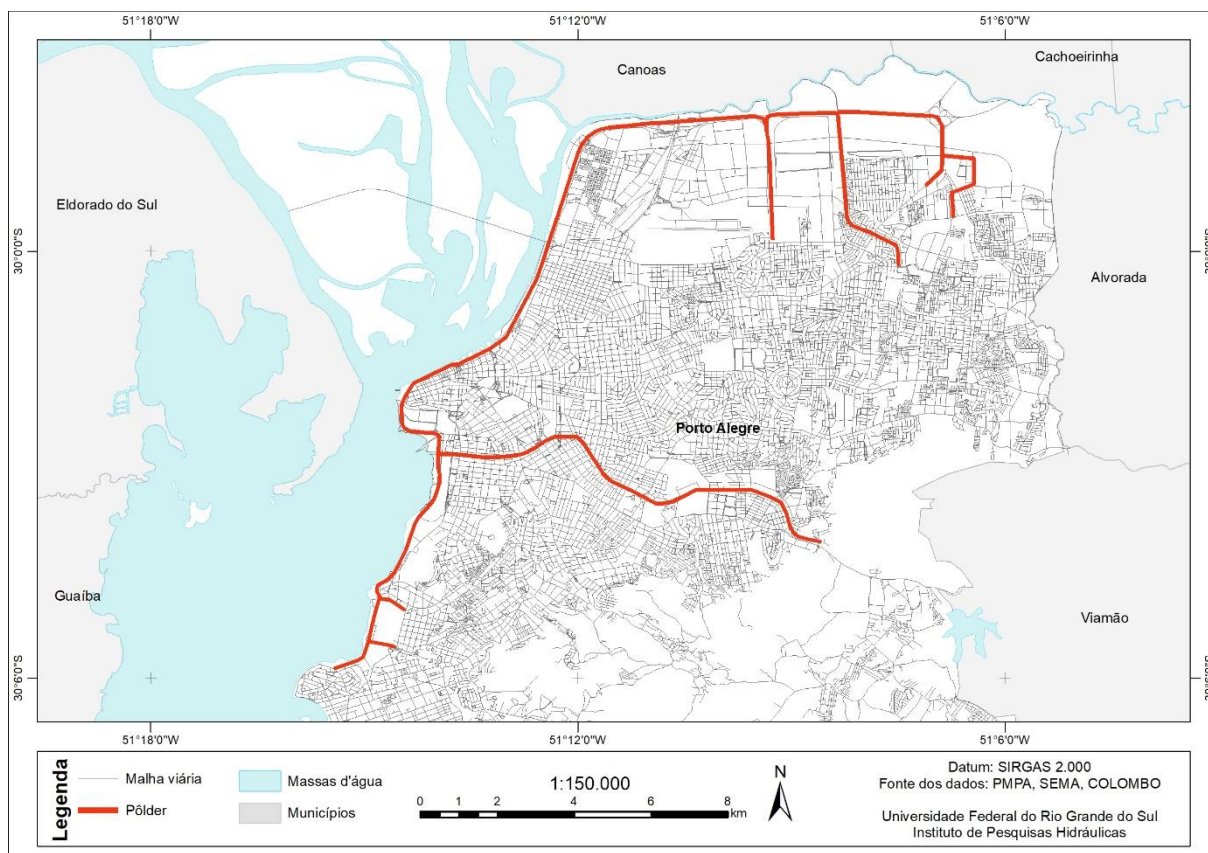


Figura 3 – Sistema de proteção a inundações

3.2. ASPECTOS HIDROLÓGICOS

3.2.1. INUNDAÇÕES RIBEIRINHAS

A partir de dois processos – os quais ocorrem associados ou de forma isolada – o escoamento pluvial pode produzir inundações em áreas urbanas: (i) em forma de extravasamento dos leitos regulares de corpos hídricos, ou (ii) a partir de concentração da precipitação que não é capaz de ser absorvida pelo solo (FEMA, 1992; TUCCI e BERTONI, 2003). De maneira natural, massas d'água eventualmente ocupam duas calhas: a menor, onde o fluxo se concentra grande parte do tempo, e a maior, onde os rios ou lagos, por exemplo, se expandem geralmente a cada 1,5 ou 2 anos.

Próximos às cabeceiras dos rios os fluxos tendem a ser acentuados devido às grandes declividades das encostas e a variação de nível d'água no passar da onda de cheia pode ser de vários metros em um curto período de tempo. A várzea de inundação de um rio cresce significativamente ao passo em que a declividade diminui e as áreas ao redor tornam-se planas. As inundações ribeirinhas como as abordadas no presente trabalho, ocorrem em trechos de baixa declividade onde a seção de escoamento por algum motivo topográfico restringe-se (TUCCI e BERTONI, 2003).

Inundações como as registradas nas margens Lago Guaíba costumam ocorrer em bacias de médio a grande porte, geralmente maiores que 500 ou 1.000 km² (TUCCI, 1993). Uma vez que os fenômenos abordados ocorrem em bacias de médias a grandes dimensões, para a análise dos eventos de cheia deste trabalho interessam mais as precipitações do tipo frontais, pois atuam sobre grandes áreas provocando inundações mais significativas em área e duração (TUCCI e BERTONI, 2003).

O processo de urbanização muitas vezes ocupa o leito maior do corpo hídrico, sujeitando-se a inundações. Estes eventos podem ocorrer devido ao comportamento natural dos rios/lagos ou ampliados pela urbanização, impermeabilização do solo e a canalização de córregos, este último no caso de bacias significativamente urbanizadas e geralmente pequenas (<100 km²). Por outro lado, a cobertura vegetal tem como efeito o desaceleramento de ondas de cheia. Bacias rurais possuem maiores áreas vegetadas e, portanto, tornam o solo mais permeável, facilitando a infiltração, o que por sua vez gera um menor escoamento superficial (TUCCI e BERTONI, 2003).

3.2.2. MECANISMO DAS INUNDAÇÕES EM PORTO ALEGRE

Segundo Tucci (1999), durante o processo de enchimento da bacia, as ondas de cheia dos rios Jacuí e Taquari-Antas têm um tempo de deslocamento de 3 a 5 e de 1 a 2 dias, respectivamente. Em bacias destas dimensões, as inundações podem ser ocasionadas pela contribuição isolada de apenas um desses afluentes, embora o cenário de maior desfavorabilidade envolva a contribuição concomitante dos dois rios. Para ocorrência deste quadro é necessário um período chuvoso prolongado de pelo menos 5 dias com precipitações altas, as quais são mais comuns no inverno da região.

Este processo é acentuado se o deslocamento destas precipitações ocorre no sentido de Oeste para Leste, ou seja, quando o rio Jacuí alcançar a confluência com o rio Taquari a aproximadamente 50 quilômetros do centro de Porto Alegre, pois, nesse momento, este último também estará contribuindo. Cria-se a partir dessa sincronia dos fluxos dos dois rios um aumento da onda de cheia que naturalmente seria mais amena e dispersa no tempo se houvessem outras circunstâncias envolvendo a precipitação (TUCCI, 1999).

A formação de um delta extenso por si só já evidencia a característica de baixa declividade da planície de inundação do rio Jacuí. Nesse sentido, o fluxo durante as inundações se desloca de forma lenta e pode encontrar-se em sua confluência com os demais rios que compõe o delta as ondas de cheia de eventos chuvosos ocorridos aleatoriamente nas respectivas cabeceiras desses tributários. Precipitações ocorridas nas serras onde originam-se os rios Taquari, Caí e Sinos atingirão o delta mais rapidamente uma vez que, se comparados ao rio Jacuí, têm declividade mais acentuada e estão em bacias mais radiais. Configuram-se, assim, os eventos chuvosos de oeste para leste os mais desfavoráveis para as enchentes na RMPA (TUCCI, 1999).

Segundo Tucci (1999), estas condições são características de bacias deste porte. Por outro lado, especula-se que os reservatórios das hidrelétricas existentes poderiam retardar o avanço de ondas de cheia. Entretanto, o volume do hidrograma em um evento significativo é muito grande se comparado com a capacidade dos reservatórios de montante, uma vez que idealmente funcionam cheios para geração de energia. Sendo assim, os reservatórios existentes devem influenciar pouco nos níveis de inundação de cheias com risco superior a 5 anos de tempo de retorno (TUCCI, 1999).

Ainda, a influência do vento em grandes corpos d'água inseridos em locais planos, a exemplo do Lago Guaíba, não pode ser desprezada (LOPES et al, 2017, 2018). Ventos Sul ou Sudeste podem criar condições de elevação dos níveis d'água na Lagoa dos Patos e no Lago Guaíba. Segundo o Comitê de Bacia do Lago Guaíba, em 1941 as cotas extraordinárias registradas no lago ocorreram, além da combinação de cheias dos rios que confluem para a formação do Delta do Jacuí, da ação dos ventos que comprometeram severamente o sistema de drenagem (CONCREMAT, 2005).

3.3. HISTÓRICO

Ao longo da década de 1770 houveram vários processos institucionais com o intuito de fortalecer o povoamento onde atualmente localiza-se Porto Alegre devido à localização estratégica do porto de Viamão entre Rio Pardo e Rio Grande (RAUBER, 1992). O aceleração do crescimento urbano da região como um todo ocorreu a partir de um contexto histórico de intensificação de fluxo populacional após o término de um conflito bélico (Guerra do Paraguai, 1864-1870), da chegada de imigrantes e do desenvolvimento de manufaturas e pequenas indústrias ao longo do século XIX (CABETTE e STROHAECKER, 2015).

Ainda segundo Cabette e Strohaecker (2015), à época da inundação de 1941, sem dúvida a mais notável cheia já registrada, Porto Alegre possuía pouco mais de 275.600 habitantes. Essa estimativa fora levantada pelo Censo de 1940, realizado pelo órgão recém-criado Instituto Nacional de Estatísticas, o qual posteriormente tornar-se-ia o IBGE. Estima-se também que haviam apenas 50.000 residências, das quais quase 60% eram construídas de forma precárias (GUIMARAENS, 2009).

Segundo Wollmann (2014), a RH Guaíba registrou 55 eventos de inundações somente entre os anos de 2000 e 2011, indicando uma alta frequência de eventos. Mais especificamente, a região de Porto Alegre acumulou diversos registros de alagamentos e inundações. Repetidamente ocorreram fenômenos suficientemente impactantes a ponto de merecerem destaque. Algumas das mais significativas cheias ocorreram nos anos de 1850, 1873, 1905, 1912, 1914, 1924, 1926, 1928, 1936, 1941, 1967, 1973, 1983, 2001 e 2015 (GUIMARAENS, 2009; MACHADO, 1950; RAUBER, 1992; RECKZIEGEL, 2018; RECKZIEGEL et al, 2018; WOLLMANN, 2014; TUCCI, 2003).

Segundo Reckziegel, *et al.* (2018), a distribuição temporal das inundações com registro no RS apresenta variações na frequência anual do número de ocorrências. Por exemplo, entre 1940 e 1982 há um pouco mais de 1/3 das ocorrências que houveram entre 1983 e 2015, havendo, inclusive, 10 anos consecutivos sem inundações para o primeiro período. Por outro lado, são registrados no máximo 2 anos consecutivos sem eventos para o segundo período. Este comportamento está em concordância com Naghettini e Pinto (2007), os quais afirmam que os processos hidrológicos são, em geral, uma combinação de eventos determinísticos e estocásticos.

Para os dados disponíveis à época da elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre, produto de um convênio entre o extinto Departamento de Esgotamento Pluvial – DEP e o IPH da UFRGS, em 2005, foram calculados os TRs para o alcance de determinadas cotas da linha d'água do Lago Guaíba. A estação fluviométrica originária dos dados é a nº 87450003 – Praça da Harmonia.

Abaixo, na Tabela 2, estão enumerados os níveis esperados para vários TRs entre 2 e 1.000 anos e sua oscilação ao redor da estimativa para um intervalo de confiança de 95%, segundo o Plano Diretor de Drenagem Urbana – PDDrU. Tal informação explica a frequência com que esses eventos atingem Porto Alegre, uma vez que, para TRs um pouco menores que 25 anos já há extravasamento do Lago por cima da borda do Cais do Porto, cotado um pouco acima de 3,0 m nesse sistema de referência.

Tabela 2 – Tempo de Retorno do nível do Lago Guaíba na Estação Fluviométrica Parque Harmonia.

TR (anos)	Nível esperado (m)	Limite superior (m)	Limite inferior (m)
2	1,95	2,04	1,85
5	2,44	2,58	2,31
10	2,76	2,94	2,58
25	3,15	3,4	2,92
50	3,43	3,74	3,16
100	3,72	4,08	3,39
200	4,01	4,43	3,62
500	4,39	4,9	3,93
1000	4,68	5,26	4,16

Fonte: PDDrU/IPH

A ação simultânea de alguns fenômenos pode ter levado à circunstância excepcional de 1941. De maneira sinérgica, um conjunto de fatores pode explicar a

maior cheia registrada de todos os tempos, tais como: a distribuição temporal e espacial da precipitação incidente na bacia, ventos de Sul/Sudeste agindo sobre o exutório do Lago Guaíba e até mesmo a ocorrência de fenômenos de grande escala influenciadores do clima como o El Niño (TUCCI, 1999; VALENTE, 2018).

Durante o outono e inverno sistemas frontais de chuva predominam no Estado do Rio Grande do Sul. Aliado a isso, o Sul do Brasil apresenta os maiores impactos observados em anos de El Niño. Particularmente, nos anos de 1939 e 1941 o fenômeno teve intensidade considerada como forte e contribuiu de forma significativa para a piora do cenário de chuvas no RS (VALENTE, 2018).

Segundo Machado (1950), o outono de 1941 foi extraordinariamente chuvoso no RS. Entre os meses de março e maio o volume total precipitado foi 165% superior aos valores normais e ultrapassou até mesmo médias anuais de anos secos. Especificamente em relação aos eventos chuvosos que geraram a cheia histórica, consta na bibliografia da época que o período de chuvas iniciou às 09:00 horas do dia 13 de abril, finalizando às 18:00 horas de 14 de maio. Desses 32 dias observou-se precipitação em 25, deixando aproximadamente 70.000 pessoas atingidas na Região Hidrográfica do Guaíba (RECKZIEGEL, 2018).

A Figura 4 ilustra a precipitação acumulada e o número de dias chuvosos de abril e maio de 1941 na RH do Guaíba segundo Valente (2018) e dados do INMET adquiridos via plataforma HidroWeb (www.snirh.gov.br/hidroweb).

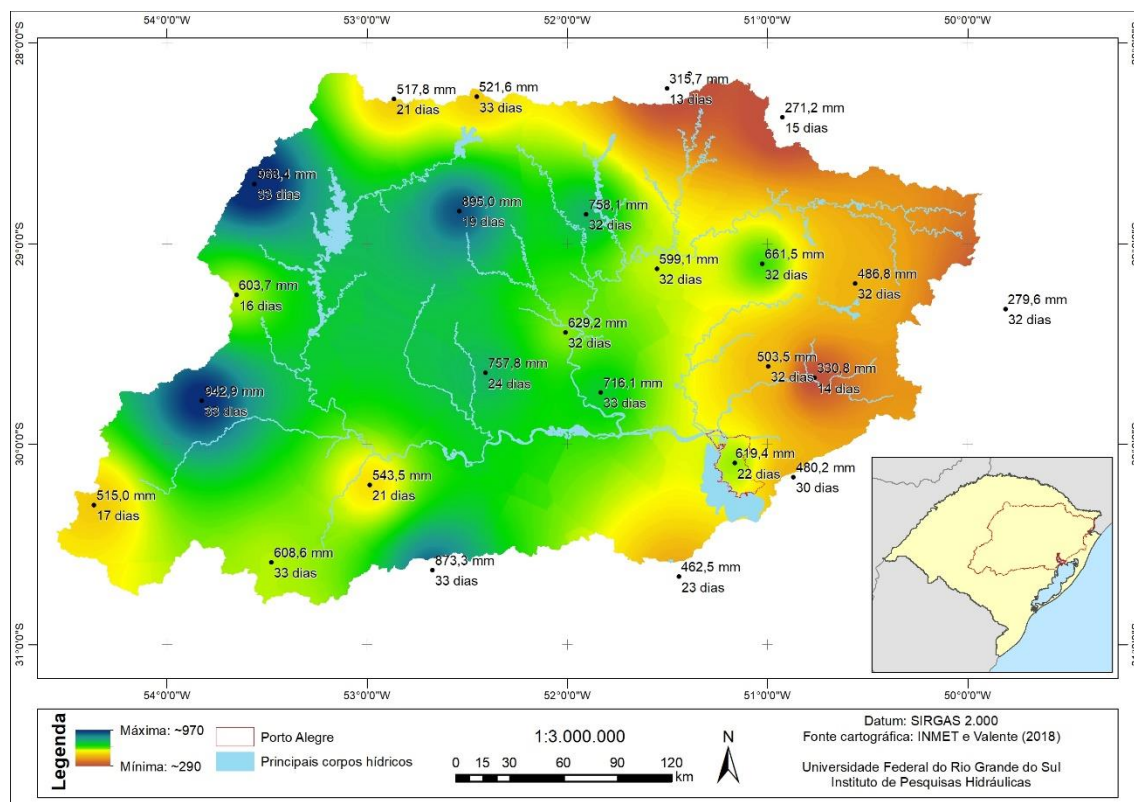


Figura 4 – Precipitação na Região Hidrográfica do Lago Guaíba à época da cheia de 1941.

A precipitação incidente durante a cheia de 1941 possivelmente não detém isoladamente a responsabilidade pelo evento. Entre novembro de 1939 e agosto de 1941, exceto fevereiro e setembro de 1940, os quais foram secos, a precipitação total nesses 22 meses atingiu a ordem de 3.867 milímetros no RS. Configura-se, portanto, que o solo, além de talvez não ter contribuído para o armazenamento do volume incidente durante o evento principal de precipitação, devido às baixas velocidades de trânsito dos fluidos em subsuperfície, ainda poderia estar contribuindo lentamente para o aumento dos níveis do Lago Guaíba. Assim, o solo previamente saturado devido às chuvas abundantes pode ter exercido uma pequena contribuição para a inundação de 1941 ocorrida em Porto Alegre (MACHADO, 1950).

Além da excepcionalidade do volume de chuvas, o sentido de deslocamento da frente fria foi de Oeste para Leste, o qual configura o pior cenário para a ocorrência de cheias no Lago Guaíba, como dito anteriormente. Adicionalmente, durante o desenvolvimento da inundação de 1941, ventos Sul/Sudeste incidentes sobre a bacia elevavam o nível d'água no sistema de drenagem durante o enchimento do Lago Guaíba, impactando as cidades ali situadas (TUCCI, 1999; MACHADO, 1950). Como resultado desse conjunto de fatores, por exemplo, a cota

fluviométrica do Lago Guaíba se manteve superior a 2,10 metros (cota considerada de alerta para o Centro Integrado de Comando (CEIC) da Prefeitura Municipal de Porto Alegre – PMPA) na estação Praça da Harmonia durante 37 dias (RECKZIEGEL, 2018).

Ainda em 1941, agentes tomadores de decisão de importantes instituições reuniam-se para discutir medidas a serem tomadas em relação à exposição de Porto Alegre a eventos de cheia. As soluções propostas foram desde o aumento da seção de vazão do Lago Guaíba na ligação com a Lagoa dos Patos, uma série de diques e barreiras isolando o perímetro central de Porto Alegre e de algumas ilhas do Delta do Jacuí, a construção de reservatórios a montante para dispersar as ondas de cheias, até a alteração do sentido de fluxo natural do rio Gravataí com construção de um canal de 80 km conectando Porto Alegre ao Oceano Atlântico (GUIMARAENS, 2009; RAUBER, 1992).

Posteriormente, em 1943, o DNOS sugere o sistema de proteção que de fato viria a concretizar-se: um complexo de diques de terra com vias de tráfego de veículos e o “Muro da Mauá”. Em 1950, o dique composto pela autoestrada *Free-way* e pela Av. Castelo Branco, atual Av. da Legalidade e da Democracia, é construído, dando início ao que seria o sistema de proteção atualmente implantado. Na sequência das intervenções vieram os aterros na orla do Lago Guaíba próximos ao atual Centro Administrativo e bairro Menino Deus, a construção dos outros diques e avenidas da orla (GUIMARAENS, 2009; RAUBER, 1992).

Outro evento de cheia bastante significativo ocorreu em setembro de 1967. Curiosamente, no ano de 1967 não houve ocorrência de El Niño, porém, os anos imediatamente anteriores e posteriores apresentaram esse fenômeno com intensidade moderada e forte, respectivamente (VALENTE, 2018). Esse fator influenciou na ocorrência de 9 a 10 dias de intensa pluviosidade. Segundo Reckziegel, et al. (2018a) e Reckziegel (2018b), os quais efetuaram pesquisa diária em periódicos para o período entre 1940 e 2015, nessa inundação de alta intensidade o número de atingidos foi de quase 5.000 habitantes, conforme informação veiculada no jornal *Correio do Povo* em 21/09/1967.

Somente com a ocorrência da cheia de 1967 o poder público municipal e o DNOS deram início à conclusão do sistema de proteção a inundações. Finalmente, é construído o muro na avenida Mauá entre os anos de 1971 e 1974, protegendo a

área central de Porto Alegre das inundações do Lago Guaíba (GUIMARAENS, 2009; RAUBER, 1992).

Desde a conclusão da instalação do sistema de proteção contra inundações a cheia de 2015 foi a mais significativa. Em 17 de outubro de 2015 a cota fluviométrica atingiu a marca de aproximadamente 2,94 m. Apesar desse nível não ser o suficiente para que haja o extravasamento por sobre a margem do Cais do Porto, a ação dos ventos e as eventuais ondulações provocadas pelo mesmo preocuparam a administração municipal e a população, culminando no fechamento das comportas que permitem o acesso à área portuária (RECKZIEGEL et al, 2018 e RECKZIEGEL, 2018).

Como exposto anteriormente, a baixa frequência dos eventos de cheia nas últimas décadas possibilitou o questionamento do sistema de proteção (TUCCI, 1999; TUCCI e BERTONNI, 2003). Entretanto, segundo Guimaraens (2009), em função da construção do muro ter se dado em momento de repressão política, não houve mobilização civil contrária ao projeto na época. Somente anos depois, com o surgimento de movimentos ambientalistas e urbanistas o debate sobre a necessidade do sistema de proteção foi iniciado.

Porém, apesar da pressão popular e da vontade de alguns gestores públicos de integrar a região portuária ao convívio diário da cidade, diversas iniciativas para modificar o trecho do muro da Av. Mauá não foram levadas adiante. Após a cheia de 2015 e suas consequências, a discussão do tema foi amenizada. Segundo Tucci e Berttonni (2003), quando a frequência das inundações é baixa, as populações ocupantes das várzeas de inundação tendem a desprezar o risco, o que acaba por aumentar a densificação nas áreas inundáveis.

Desta forma, as cheias a serem estudadas no presente trabalho foram selecionadas a partir de características que as destacam das demais. A ocorrida em 1941 é a maior e mais impactante cheia já registrada; a em 1967 influenciou diretamente na conclusão do sistema de proteção contra inundações por ter atingido o centro da cidade de fato, e não somente os bairros da zona norte e; finalmente, a em 2015 é a mais recente e a única ocorrência significativa após o sistema ter sido totalmente instalado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são elencados e descritos as bases de dados e os procedimentos metodológicos utilizados na execução deste trabalho.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. MODELO DIGITAL DE TERRENO E EDIFICAÇÕES

4.1.1.1. PRODUTOS UTILIZADOS

Os dados utilizados são originários do aerolevante disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Consistem em informações vetorial e matricial georreferenciadas de Edificações e Modelo Digital de Terreno - MDT deste município (CONSÓRCIO GUAÍBA, 2012; ZANARDI et al, 2015).

O MDT empregado foi gerado a partir de mapeamento aerofotogramétrico e do emprego de um sistema de varredura a LASER (do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) conhecido como LiDAR (do inglês *Light Detection and Ranging*) por parte de um consórcio de empresas contratadas em convênio com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS com início em 2010. Como resultado final dos voos e dos processamentos dos arquivos advindos do perfilamento LiDAR, o consórcio obteve um Modelo Digital de Superfície - MDS, o qual foi submetido a filtros para remoção dos pontos referentes a edificações, vegetação, culminando na geração do MDT empregado aqui (CONSÓRCIO GUAÍBA, 2012; ZANARDI et al, 2015).

O MDT representa o conjunto de pontos que caracterizam o solo, sem as estruturas acima da superfície. A remoção desses pontos não pertencentes ao terreno baliza-se na declividade da região, na distribuição geométrica dos pontos, na altitude e na intensidade do retorno do pulso LASER, até que nenhuma informação que não faça parte do terreno estivesse presente no modelo. O MDT foi disponibilizado em formato *geotiff* com pixel de resolução espacial de 1 metro e resolução altimétrica no nível de milímetros (CONSÓRCIO GUAÍBA, 2012; ZANARDI et al, 2015).

Ainda, foi cedido pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre uma camada vetorial contendo polígonos de todas edificações identificadas de Porto Alegre. As edificações foram representadas pelo seu contorno mais externo, ou seja, pela área mais abrangente considerando a projeção dos beirais (CONSÓRCIO GUAÍBA,

2011). Os atributos vinculados à camada vetorial eram poucos e incompletos, de forma que somente edificações de interesse especial como igrejas, delegacias, sindicatos e etc. eram nomeados e, dessa forma, tais atributos foram desconsiderados no restante da análise.

4.1.1.2. POSSÍVEIS ERROS ASSOCIADOS

Para o controle da qualidade altimétrica do MDT gerado, o consórcio verificou que 96,9% dos pontos apresentaram valores dentro do pretendido, com somente 78 pontos amostrados com erro superior aos 61 cm definidos como limite de tolerância. Ainda segundo Zanardi et al (2015), a diferença média entre a altitude medida em estações fotogramétrica e a altitude inferida nos MDT é de 2,6 cm e tem desvio padrão de 1,6 cm. Todos pontos de campo verificados com GPS apresentaram valores dentro do especificado e a média das diferenças entre a altitude medida via GPS e a altitude dos modelos ficou em 3,7 cm, com desvio padrão de 4,3 cm (ZANARDI et al, 2015).

O produto obteve, finalmente, enquadramento como *Classe A* a partir do Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, instaurado pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. A exatidão planimétrica e o erro padrão correspondente são, respectivamente, na escala da carta, 0,5 mm e 0,3 mm. Já o padrão altimétrico equivale a pelo menos “metade da equidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o erro-padrão correspondente”. Uma vez que a escala máxima de trabalho para os dados no projeto foi de 1:1000, o limite máximo de erro para que o padrão de exatidão cartográfico seja considerado *Classe A* é de 0,5 metros e o erro-padrão de 0,33 metros (ZANARDI et al, 2015).

Apesar dos valores de pixel do MDT apresentarem-se com resolução de quatro dígitos significativos, na ordem de milímetros, considerou-se nas análises apenas os três primeiros algarismos, correspondendo ao nível de detalhamento na ordem de centímetros. Assumiu-se como suficiente o nível de detalhamento em centímetros uma vez que as variáveis hidrológicas também assim eram discretizadas e não se dispunha desse grau de exatidão em nenhum dos demais dados de entrada.

Mesmo mapas que façam uso das melhores técnicas disponíveis apresentarão incertezas. Elas podem variar de origem, desde a aquisição de dados topográficos até premissas e parâmetros dos modelos. Dentre as várias fontes de

erro, a topografia tem se destacado como o fator majoritário na definição da exatidão de mapas de inundação (SAKSENA e MERWADE, 2015).

O aumento do emprego de tecnologia conhecida como LiDAR tem melhorado a delimitação de áreas de inundação uma vez que sua resolução espacial e altimétrica é consideravelmente melhor que de MDEs convencionais. Sendo assim, manchas de inundação derivadas do emprego de LiDAR podem ser mais exatas do que de qualquer outra fonte topográfica atualmente (SAKSENA e MERWADE, 2015).

Ainda segundo Saksena e Merwade (2015), nesse sentido, MDEs de baixas resoluções como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) resultarão em extensões superestimadas de inundações uma vez que quanto mais grosseira for a resolução de um MDE mais suavizada serão as superfícies representadas e, assim, maiores serão as áreas inundadas. Ainda, a elevação média da linha d'água (WSE, do inglês *Water Surface Elevation*) e a área inundada têm relação inversamente linear com a resolução dos MDEs (SAKSENA e MERWADE, 2015).

4.1.2. DADOS LIMNIMÉTRICOS

4.1.2.1. O EVENTO DE 1941

Para aproximar a análise do evento de cheia do Lago Guaíba de 1941, o maior que se tem registro, do formato das demais análises efetuadas nesse trabalho, foi necessário o uso de dados estimados pelo grupo de estudos em Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da UFRGS. A reconstituição do evento a partir de ferramentas de modelagem hidrológica foi protagonista especialmente na análise da inundação recorde de 1941 uma vez que faltam dados apropriadamente discretizados para caracterização desse período pretérito. O referenciamento vertical dos dados segue a mesma lógica descrita a seguir no item 4.1.2.2

4.1.2.1.1. SIMULAÇÃO DO MODELO DE GRANDES BACIAS - MGB

O MGB-IPH, desenvolvido inicialmente por Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007) para simulações hidrológicas e representação da transformação da chuva-vazão em bacias de grande escala, é integrado a plataformas de Sistema de Informação Geográfica (FAN e COLLISCHONN, 2014 e MARTINBIANCHO et al, 2018). Diferentemente das primeiras aplicações do modelo, as quais utilizavam-se exclusivamente do método simplificado de Muskingum-Cunge linear, o MGB-IPH

2017 permite também o uso de propagação inercial de vazões proposto por e descrito por. Fan et al. (2014) e Pontes et al. (2015) (JARDIM et al, 2017).

Segundo Bates et al. (2010), a adoção desse tipo propagação de vazões é mais apropriada para simulações em áreas com baixa declividade (como é o caso da área de estudo) além de representar melhor a física de ondas de cheia. Já a análise de sensibilidade de parâmetros de modelo hidrodinâmico de grande escala (como largura, profundidade e coeficiente de Manning) está disponível em Paiva et al. (2013) (JARDIM et al, 2017).

Os dados de entrada do modelo constituíram-se pelos (1) Modelos Digitais de Elevação - MDE advindos da missão de mapeamento conhecida como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*); (2) batimetria da Laguna dos Patos a partir de cartas de hidrografia e navegação da Marinha do Brasil; (3) vegetação e uso e tipo de solo da região, extraída das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) desenvolvidas por Fan et al. (2015); (4) clima, derivado de normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia; e, finalmente, a partir do banco de dados da Agência Nacional de Águas a (5) precipitação (MARTINBIANCHO et al, 2018).

4.1.2.1.2. POSSÍVEIS ERROS ASSOCIADOS AO MODELO

Devido aos lapsos originalmente contidos na base de dados de precipitação para o período de tempo analisado, os autores dos dados cedidos para a execução desse trabalho utilizaram-se de interpolação para especializar os dados de precipitação observados.

Outro pressuposto importante de ser ressaltado é de que o modelo, apesar de simular acontecimentos focados no evento de cheia de 1941, foi calibrado com base em vazões observadas entre os anos de 1990 e 2010. Entretanto, Lopes et al. (2017) validaram a relação usada na calibração e, assim, indica-se a possibilidade do emprego do modelo para o intervalo de tempo proposto.

Vale ressaltar que o modelo talvez devesse ainda ser validado para eventos extremos, comparando-se a mancha de inundação resultante da modelagem com a observada para cheias das quais dispõem-se de dados, como 2015. Para adequado aquecimento (período para se ter insignificância das condições iniciais) do modelo estendeu-se a janela de simulação para compreender um período anterior à cheia em questão. O período analisado vai de 01 de janeiro de 1937 até 31 de dezembro de 1943.

Quanto ao dado de entrada de URHs, os autores adotaram um mapa reespecializado para resolução de 400 metros originalmente gerado a partir de diferentes bases de dados para toda a América do Sul. A resolução, aparentemente grosseira, foi considerada satisfatória para a aplicação dentro do modelo por Fan et al. (2015). Desta forma, apesar da baixa resolução de alguns dados de entrada do MGB, o resultado final do modelo, o qual é usado como dado de entrada neste presente trabalho, é capaz de descrever o evento ímpar de cheia registrado na cidade de Porto Alegre em 1941 com as características necessárias para a comparação com as outras cheias analisadas.

4.1.2.2. OS EVENTOS DE 1967 E 2015

Diferentemente do evento de cheia de 1941, para as ocorrências de 1967 e 2015 existem dados registrados e amplamente disponíveis através do Portal HidroWeb, o qual é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas – ANA e do site do Porto de Rio Grande. Os registros hidrológicos podem ser acessados através do endereço eletrônico <http://www.snirh.gov.br/hidroweb> na aba séries históricas e http://www.portoriogrande.com.br/site/hidroviarias_medidas_rios.php.

O código da estação fluviométrica consultada é 87450003, nomeada como Praça da Harmonia. As coordenadas geográficas do local da estação são Latitude S 30° 2' 04,92" e Longitude W 51° 14' 29,04", na região central de Porto Alegre. Segundo a página na *web* do SNIRH, a estação é atualmente operada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Vale ressaltar que a série oficial de monitoramento de níveis no Guaíba na estação Praça da Harmonia se iniciou em junho de 1941, não tendo, portanto, o registro do evento de cheia ocorrido em maio de 1941. Porém, para o período desde então, dentre os dados há registros diários de nível com poucas lacunas faltantes e, particularmente no período de análise deste trabalho, não existem falhas.

Finalmente, o atual Datum Altimétrico do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), denominado comumente Datum de Imbituba/SC, o qual foi definido em 1959 (LUZ, FREITAS e DALAZOANA, 2012), deve ser usado para adequação dos dados da estação Praça de Harmonia. Segundo a Secretaria de Obras Públicas, Irrigação e Desenvolvimento Urbano – SOP do RS, o nível 3,0 m da régua, corresponde à cota verdadeira 2,693 m. Desta forma, todos dados registrados de níveis estão acrescidos da diferença entre essas duas cotas, devendo assim ser subtraídos 30,7

cm para ter-se a altimetria correta em relação ao nível do mar, o qual é a referência para os outros produtos utilizados neste trabalho (CONSÓRCIO ENGEPLUS AEROGEO, 2014)

Porém, segundo a Superintendência de Portos e Hidrovias – SPH, O zero da régua da Harmonia está localizado 23,72 cm abaixo do nível médio do mar medido no marégrafo de Torres. A relação entre os marégrafos brasileiros e o de Imbituba é explicada por Alencar (1990), no qual fica clara a divergência de + 0,0584 m entre o marégrafo de Torres e Imbituba. Sendo assim, somando-se 23,72 cm com 5,84 cm se tem como resultado 29,56 cm.

A diferença entre as duas referências é de apenas 1,14 cm ($30,7 - 29,56$) e para as pretensões desse presente trabalho é um nível de incerteza associada aceitável, tendo em vista as notáveis indefinições que envolvem o tema. Adotou-se o cálculo sugerido pela SOP/RS por coincidir com a diferença de nível entre os dados obtidos do SNIRH e da maioria das fontes históricas consultadas.

4.2. MÉTODO

Inicialmente, o processamento dos dados ocorreu em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Posteriormente, para que pudessem ser feitas análises de forma mais concisa buscou-se transformar as informações espaciais dos dados geométricos em dados tabulares de forma que possibilitassem uma melhor análise. A área de interesse delimitante do conjunto de dados processados é exibida na Figura 5.

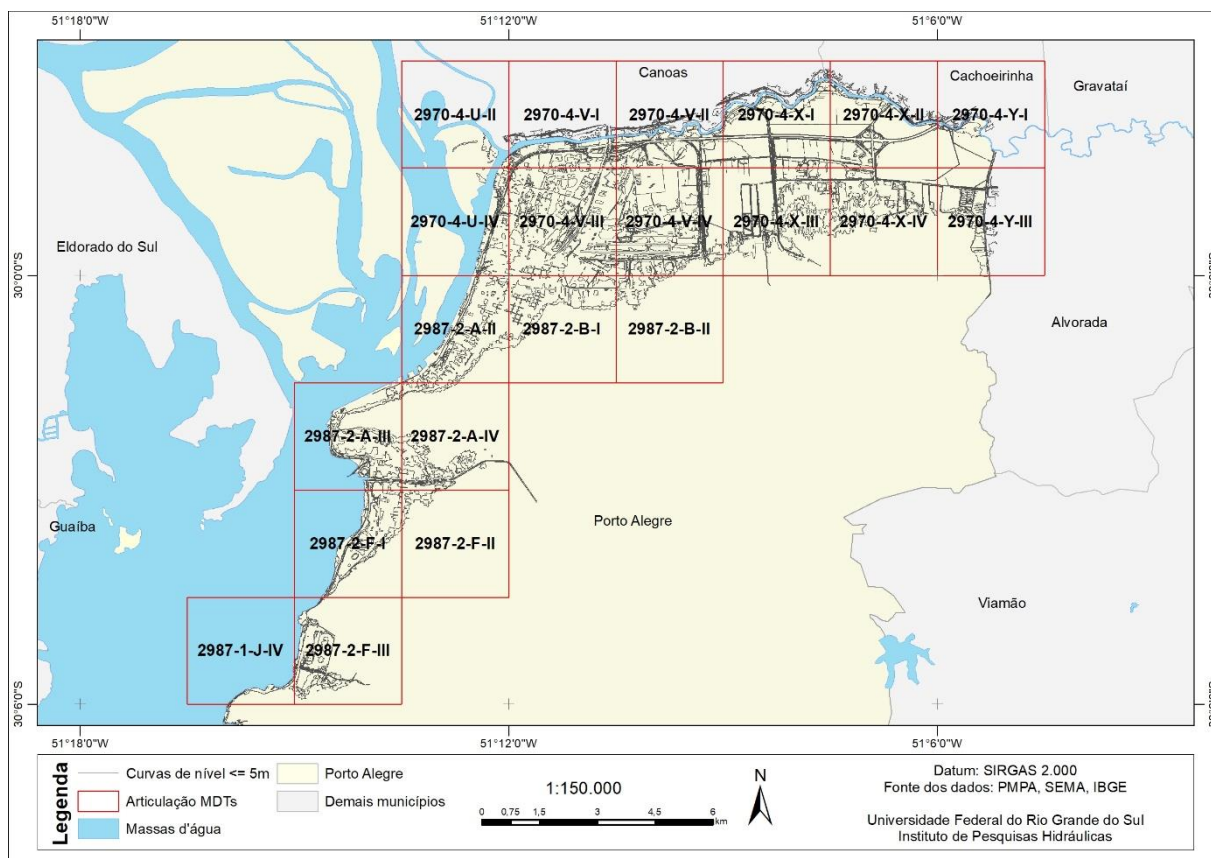


Figura 5 – Articulação do mosaico e MDTs.

Com o cruzamento das informações de altimetria dos MDTs e da informação de localização das edificações obteve-se o valor mínimo, máximo, médio, o desvio padrão, a variância e a diferença entre os valores mínimos e máximos de altura dos pixels contidos pelos polígonos de edificações. Nessa etapa, foram computados 163.173 polígonos de edificações e 101.665.705 pontos com informação de altura gerados a partir dos MDTs do mosaico (Figura 6). A partir dessa intersecção obtiveram-se informações de altura do terreno local e a identidade das edificações assentadas. Eram essas informações a cota mínima, máxima e média, o desvio padrão e a variância para o grupo de pontos de cota do MDT (pixel) contidos por cada edificação.



Figura 6 – Exemplo de pontos dentro de edificações.

Considerando a hipótese de inexistência do sistema de proteção contra inundações, foram computados apenas dados de nível d'água a partir da cota 1,00 m. A delimitação dessa altura para a aquisição dos dados hidrológicos ocorreu em função da ínfima quantidade de edificações (72) abaixo de 1 m na área de estudo. Ainda, tal medida foi tomada uma vez que seria inviável a aquisição de dados de nível do Lago Guaíba que permitissem a análise de 100% das edificações atingidas devido às cotas muito baixas de algumas dessas mesmas.

O nível de 1 m corresponde a um TR de menos de 2 anos para o Lago Guaíba, o qual é evidentemente suficiente para isolar o início e o final de eventos com TR bem maior. Sendo assim, decidiu-se por delimitar o início e o fim dos eventos de cheia a partir do momento em que o nível do Lago Guaíba se

regularizasse ao redor de 1 m ou menos, como referido acima. Para tanto, uma vez atingidas cotas menores que 1 m a aquisição dos dados seguia um intervalo semanal, ao invés de diário como durante a cheia, afim de conferir-se se os níveis não voltavam a ultrapassar a marca de 1 m.

Dentre os dados cedidos pelo grupo de estudos em Hidrologia de Grande Escala estavam as simulações para 3 pontos do Lago Guaíba. Dentre as opções de locais simulados com base em dados de medições observadas estavam a orla na praia de Ipanema, no Bairro Cristal e na Ilha da Pintada. Optou-se pelos níveis desta última, uma vez que, segundo Reckziegel et al (2018), os valores de medições na Ilha da Pintada são levemente inferiores aos da Praça da Harmonia, estando, assim, dentro de uma faixa aceitável de diferença tendo em vista a resolução de outros dados do presente estudo e à proximidade com a área de estudo.

Considerou-se como edificações impactadas aquelas que apresentaram o valor mínimo dos pontos de cota do terreno em seu interior igual ou menor ao nível diário de elevação da linha d'água do Lago Guaíba para a Ilha da Pintada (evento de 1941) e Praça da Harmonia (eventos de 1967 e 2015). É importante ressaltar que, mesmo após reamostragem dos MDTs de 1 m para 25 cm alguns polígonos da camada vetorial de edificações não adquiriram informação altimétrica por não coincidirem com o centroide de nenhum pixel. Foram estes 540 polígonos excluídos por não terem como integrarem a análise. Somando-se às 72 edificações excluídas pela cota muito baixa, as edificações desconsideradas da área de estudo totalizam 612 unidades.

Os níveis d'água foram corrigidos para fazerem referência ao nível do mar, assim como o MDT. Dessa forma, para o nível d'água dos eventos de cheia de 1941, e 2015, foram subtraídos 30,7 cm da cota dos dados gerado pelo MGB e dos dados originais obtidos no endereço eletrônico do SNIRH e da SPH. É importante ressaltar que os dados resultantes do MGB fazem referência ao Datum EGM96 e não foram observadas possíveis diferenças em relação ao Datum SIRGAS 2000 utilizado pelo marégrafo de Imbituba. Entretanto, os resultados do modelo são condizentes com o valor histórico de aproximadamente 4,75 m de altura do nível d'água no dia mais crítico da cheia de 1941 e, sendo assim, assumiu-se que os dados estão coerentes. Para os dados de 1967 não foram necessárias correções pois já foram adquiridos com as altimetrias corretas. Adicionalmente, para a

contagem das edificações atingidas, considerou-se um intervalo crescente de 0,1 m no nível d'água.

Dada a generalização que ocorre ao aplicar-se um intervalo crescente de 10 em 10 cm de nível d'água para a contagem das edificações afetadas, o número máximo aferido destas acaba por ser inferior ao que poderia vir a ser contado se fosse usada a resolução original de 1 em 1 cm. Ainda, embora se tenha usado para os arredondamentos necessários os padrões notoriamente recomendados, gerou-se, nesse processo, um erro médio de 1,47% por dado de entrada. Ou seja, se tivesse sido utilizada a resolução original do dado, a cada dia de inundação ter-se-ia, em média, 1,47% a mais de edificações impactadas.

Como dito anteriormente, vale a pena ressaltar aqui que se assumiu o nível diário de todas cheias em uma única cota constante, sem se levar em conta a declividade da linha d'água. Tal decisão advém do fato que outras incertezas do método têm ordem de grandeza superiores às possíveis diferenças de cota da linha d'água em função de sua declividade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do uso de ferramentas de modelagem hidrológica e de geoprocessamento, este trabalho visa a definir o número de edificações atingidas diariamente na área de estudo durante as três mais significativas cheias registradas no Lago Guaíba, em 1941, 1967 e 2015, além de definir quais cotas altimétricas da cidade estariam submetidas às inundações caso o sistema de proteção não existisse ou falhasse.

Para tal, o subcapítulo 5.1 apresentará, primeiramente, uma análise estatística comparativa e descritiva do número de edificações atingidas nas três cheias, sob a hipótese de não existência do sistema de proteção. O subcapítulo seguinte exhibe a análise e a discussão referente à magnitude que os impactos dos eventos de cheia teriam na infraestrutura urbana atual da região que atualmente está protegida, considerando a escala diária. Já o subcapítulo 5.3 apresenta a avaliação do número de edificações afetadas frente ao nível d'água alcançado durante a onda de cheia, considerando uma análise separada para cada evento. O subcapítulo 5.4, por sua vez, expõe a análise da área que seria atingida quando o nível d'água das cheias estivessem em sua maior elevação (cota máxima).

Ressalta-se, pois, que esses quatro primeiros subcapítulos respondem ao primeiro questionamento de pesquisa proposto: (1) qual o impacto, em termos de quantidade de edificações atingidas, da evolução diária dos mais importantes eventos de cheia do Lago Guaíba sobre a atual infraestrutura urbana protegida de Porto Alegre se não houvesse o sistema de proteção a inundações?

A fim de trazer resposta sobre o comportamento temporal e espacial das inundações sobre a região protegida da cidade (segundo questionamento proposto), o subcapítulo 5.5 apresenta a evolução cronológica (crescimento e decréscimo) da passagem de eventos de cheia e as estruturas construídas afetadas pela mesma. Com os resultados deste último subcapítulo é possível compreender a dimensão temporal das inundações em Porto Alegre caso não houvesse o sistema de proteção a inundações e considerando a ocorrência das três cheias referenciadas.

5.1. ANÁLISE DESCRITIVA E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS PARA OS TRÊS EVENTOS DE CHEIA

Ressalta-se, primeiramente, que constataram-se restrições ao método uma vez que não foi atribuída informação altimétrica a 540 edificações na etapa de geoprocessamento. Isto ocorreu por não haver nenhuma intersecção entre a área de alguns polígonos relativamente pequenos e os centroides dos pixels do MDT. De qualquer forma, o número de edificações não contempladas é ínfimo se comparado ao conjunto de dados como um todo e, desta forma, considerou-se bastante satisfatória a conexão das informações.

Dentre as restantes 44.151 da área de estudo, 99,84% delas foram contempladas pela linha de corte traçada em 1 m para a aquisição de dados hidrológicos e, conseqüentemente, cruzadas com informações de altura das cheias históricas escolhidas. A partir disso, foram submetidas à análise 44.079 edificações enquadradas nos requisitos supracitados e apenas 72 não entraram em discretizações por estarem abaixo da cota 1 m. Entretanto, essas 72 edificações estiveram presentes em todos resultados uma vez que apresentavam cota mínima inferior ao limite superior diário de todo o período das três inundações, e por isso foram contabilizadas como atingidas em todos dias de cheia.

É interessante salientar que a média de submersão dessas edificações foi, na verdade, 1,58 m. Todavia, o critério adotado para o início da contagem das edificações impactadas foi a cota mais baixa do MDT dentro de cada edificação a partir de 1 m. Sendo assim, não se enquadraram no critério pois tinham cota mínima menor. Informações de área, cotas mínima, média e máxima, diferença e somatório de cotas e desvio padrão das edificações abaixo de 1 m de altura estão disponíveis no Apêndice 1.

Na Figura 7 são evidenciadas algumas medidas de posição e variação relativa para as três inundações em um gráfico do tipo *Box Plot*. Devido à grande variabilidade do número de edificações impactadas optou-se por exibir o eixo vertical em escala logarítmica.

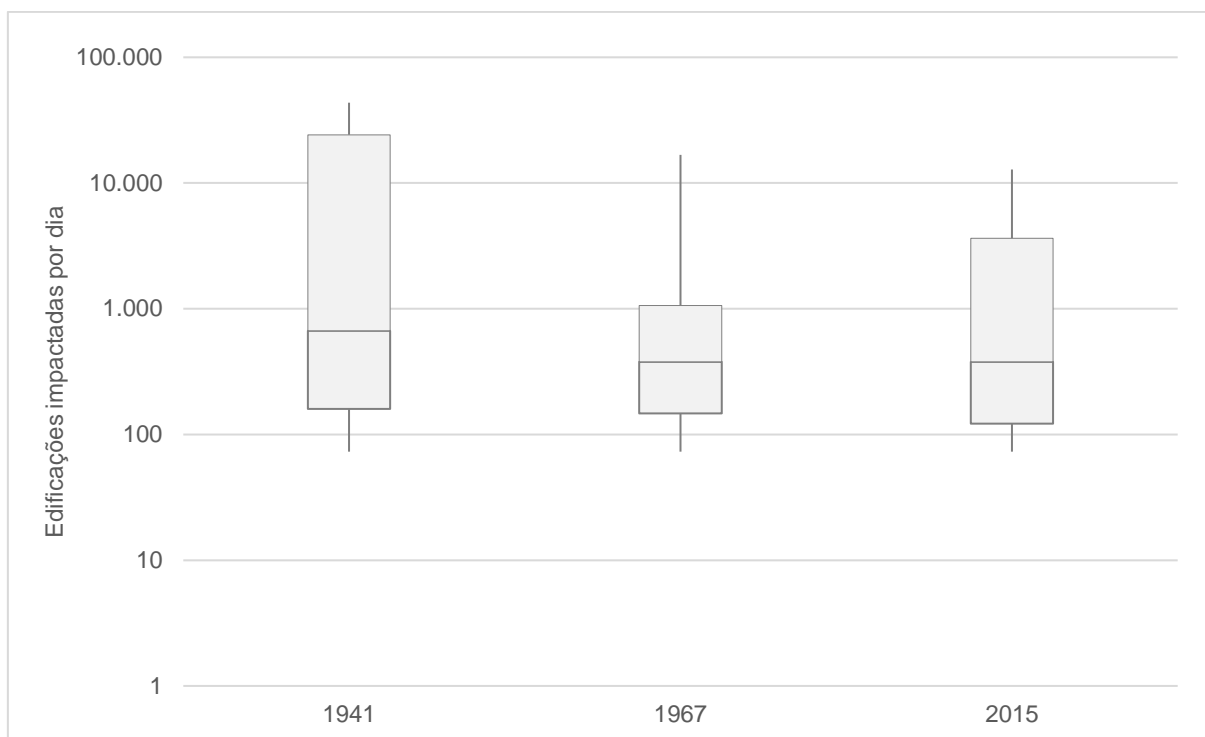


Figura 7 – Gráfico *Box Plot* de edificações impactadas por dia por cada cheia

Constata-se, a partir do gráfico, que os dados de edificações impactadas de todas as três inundações apresentam assimetria positiva. Isso é comprovado visto que a linha representativa da mediana, a linha central do retângulo, encontra-se mais próxima ao limite inferior nos três casos de cheia. Evidencia-se, assim, que o número de edificações atingidas em momentos iniciais dos eventos de cheia varia menos e esses valores estão mais próximos entre si do que os de momentos agudos da inundação.

A partir disso é possível depreender que a urbanização afetada pelas inundações na área de estudo densifica-se a partir de uma certa altura. Isso pode ser indicativo de que as cotas mais baixas da cidade têm urbanização mais rarefeita ou são compostas por edificações de maior dimensão, pois ocupam o espaço de tal maneira que o número de edificações por área inundada é menor.

Ainda a respeito da Figura 7, a característica de maior dimensão do terceiro quartil (retângulo maior de cada período de cheia) não infere que o mesmo contenha mais entradas de dados. Ressalta-se que cada seção do *Box Plot* mostra os mesmos 25% de “amostras”. O que fica evidente na análise é que existe nesse percentual de dados um intervalo maior entre os valores, ou seja, a variação do número de edificações é mais acentuada e/ou pulverizada.

Analisando-se especificamente a plotagem dos resultados da cheia de 1941, depreende-se que esse evento de inundação é absolutamente o mais significativo dentre os estudados. Comparativamente, é possível afirmar que o número de edificações afetadas até o 3º quartil (referente à 75% da amostra) é superior até mesmo aos limites máximos das demais inundações. Essa inundação também se diferencia pela sua grande diferença interquartilica, a distância que cobre os 50% do meio dos dados entre os 25 e 75%, por demonstrar a excepcional variação do conjunto.

Já quanto à cheia de 1967, a reflexão anterior sobre a localização da mediana vale, igualmente, tanto para a presente cheia quanto para a de 1941. Entretanto, salienta-se para a grande diferença entre o valor máximo de edificações alcançado e o limite do terceiro quartil. Isso demonstra a intensidade do evento frente à sua curta duração. Ainda, a distância acentuada entre essas duas variáveis estatísticas demonstra que um grande número de edificações foi impactado durante um período curto de dias, enquanto um número menor de edificações fora impactado por mais tempo.

Por fim, para a cheia de 2015, observa-se que embora esse evento assemelhe-se ao de 1967 no que diz respeito aos valores máximos de edificações atingidas, corresponde ao intermédio entre os dois eventos nos demais parâmetros. Assim, não há destaques interpretativos que possam ser feitos para essa cheia que já não tenham sido descritos anteriormente.

Destaca-se que o gráfico do tipo *Box Plot* consegue reproduzir de maneira evidente as principais características dos eventos de cheia de 1941 e 1967: a grande quantidade de edificações impactadas por um longo período de tempo e a média quantidade de edificações impactadas em um curto período de tempo, respectivamente. Porém, o mesmo não acontece para a inundação de 2015, pois sua principal característica não reside na quantidade de edificações impactadas ou na repentina subida d'água, mas, sim, nos dois picos de cheia que ocorrem após um certo período de cotas relativamente baixas.

5.2. ANÁLISE DAS EDIFICAÇÕES ATINGIDAS CONSIDERANDO-SE A ESCALA DIÁRIA E O TEMPO DE OCORRÊNCIA

A Figura 8 ilustra o número de edificações que seriam atingidas diariamente em caso de não existência do sistema de proteção. Com o propósito de melhor

expor visualmente os resultados obtidos, limitou-se a série temporal graficada mais próxima aos picos das cheias. Em realidade, o evento de inundação completo considerado continua alguns dias após o final do exposto no eixo das abscissas na figura.

Apesar disso, a Figura 8, adicionalmente à Figura 7, ilustra, propriamente, o número de edificações afetadas com a subida do nível d'água por outra perspectiva. Embora componham os principais resultados do trabalho, devido à sua dimensão os dados de entrada da Figura 8 encontram-se em forma tabular na seção de apêndice (Apêndice 3).

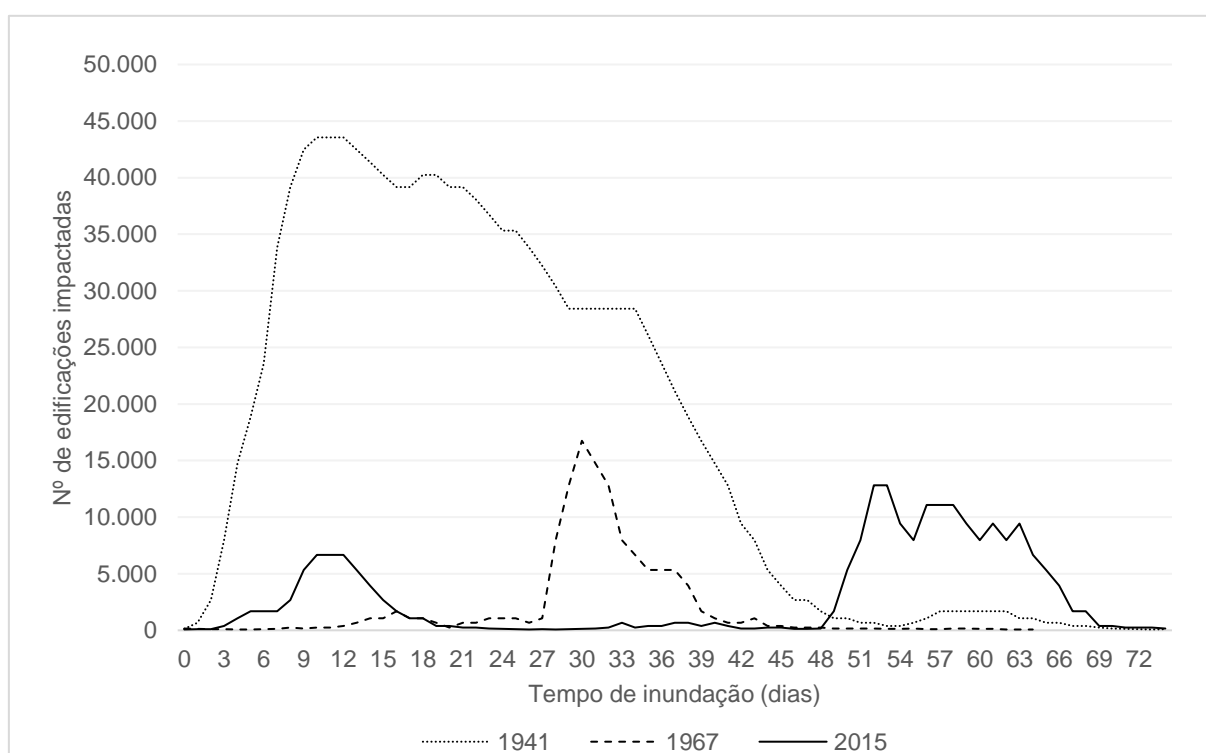


Figura 8 – Nº de edificações impactadas ao longo das inundações.

Enquanto o gráfico *Box Plot* ajuda a identificar a frequência e a variância dos dados, através do gráfico de Nº de edificações impactadas v.s. Tempo de inundação é possível perceber de maneira mais cognoscível a magnitude que os impactos dos eventos de cheia analisados pelo presente estudo teriam na infraestrutura urbana atual da região que atualmente está protegida.

Dessa forma, complementarmente à Figura 8, a seguir são enumerados na Tabela 3 a quantidade de dias que cada nível d'água permaneceu e a quantidade de edificações que seriam inundadas para cada um dos períodos estudados.

Tabela 3 – Relação de nº de edificações e nº de dias inundados por nível d'água.

Nível d'água	Nº de edificações atingidas	Nº de dias de inundação		
		1941	1967	2015
1,00	73	3	5	4
1,10	97	6	5	13
1,20	122	20	7	7
1,30	172	15	7	8
1,40	240	6	7	11
1,50	379	4	3	8
1,60	667	6	7	5
1,70	1.058	5	10	3
1,80	1.678	7	2	7
1,90	2.678	3	0	2
2,00	3.959	1	1	2
2,10	5.342	1	3	4
2,20	6.654	0	1	4
2,30	7.958	2	2	4
2,40	9.431	1	0	4
2,50	11.081	2	0	3
2,60	12.815	1	2	2
2,70	14.753	1	1	
2,80	16.749	1	1	
2,90	18.869	2		
3,00	21.161	1		
3,10	23.583	2		
3,20	26.081	1		
3,30	28.415	6		
3,40	30.395	1		
3,50	32.216	1		
3,60	33.832	2		
3,70	35.325	2		
3,80	36.722	1		
3,90	38.051	1		
4,00	39.163	5		
4,10	40.234	3		
4,20	41.370	1		
4,30	42.463	2		
4,40	43.553	3		

Nota-se que, tratando-se apenas do número máximo de construções afetadas, a cheia de 1941 causaria mais de 3 vezes o impacto da cheia de 2015 e aproximadamente 2,5 vezes o da cheia de 1967. No que concerne ao tempo de duração do evento, mesmo com aproximadamente 30 dias de relativa baixa entre os picos da cheia mais recente e, até mesmo, considerando-se somente o evento principal, as cheias de 2015 e 1941 são consideravelmente mais duradouras do que a de 1967.

Tratando-se de mais de 1.000 unidades de edificações afetadas, as cheias de 1967, 2015 e 1941 apresentam um crescimento quase linear com 23, 35 e 58 dias de efeito, respectivamente. Ao restringir-se a análise para mais de 10.000

construções afetadas, os eventos de 1967 e 2015 apresentariam, nessa ordem, apenas 4 e 5 dias sob essas circunstâncias, enquanto o evento de 1941 apresentaria 38 dias.

Apesar disso, os resultados são bastante expressivos. Para as condições simuladas nesse trabalho, a contagem máxima de edificações atingidas e o tempo de duração desse impacto máximo para cada cheia foi de 43.553 edificações, durante 3 dias, para a cheia de 1941, 16,749 edificações, por 1 dia, para o evento de 1967 e, por fim, 6.654 edificações, por 3 dias e 12.815 por 2 dias, para o evento de 2015, devido ao comportamento oscilatório deste.

É importante salientar a inexistência ou pouca certeza nas estimativas de prejuízos das inundações passadas. Para além do total de edificações atingidas, o tempo e a profundidade de submersão à qual as edificações ficaram expostas compõe fator muito relevante na análise do impacto de uma inundação

Outra informação interessante para o dimensionamento das cheias é resultante da soma das edificações impactadas durante todo o período de inundação. A área do gráfico da Figura 8 é um indicativo da magnitude de cada evento e corrobora os resultados já citados anteriormente no que diz respeito à proporção da cheia de 1941 em relação às demais. A área sob a curva de construções afetadas no tempo é 1.283.373, 124.239 e 217.776 unidades de área, para 1941, 1967 e 2015, respectivamente.

O tempo máximo de cada ocorrência, considerando os parâmetros adotados, como dias com mais de 1,0 m de nível d'água, foi 139 dias, entre 28/04/1941 e 13/09/1941; 65 dias entre 23/08/1967 e 26/10/1967; 160 dias entre 15/06/2015 e 30/12/2015 (entretanto, é importante ressaltar que, se considerado somente o evento principal da inundação de 2015, o tempo de máximo é, na verdade, 61 dias). Complementarmente, embora tenha se omitido essa informação do gráfico da Figura 8 com a intenção de melhorar o aspecto do mesmo, no decorrer das inundações houveram dias sem edificações afetadas, conforme os critérios estabelecidos.

Nesse sentido, para a cheia de 1941, houveram 21 dias sem inundação, os quais ficaram distribuídos em 2 intervalos de 18 e 3 dias, totalizando 118 dias de inundação efetiva dentre os 139 totais entre o início e fim do evento. Para 1967, houveram apenas 2 intervalos de 1 dia cada sem inundação nos 65 dias de cheia. E, finalmente, para o evento de 2015 percebe-se uma oscilação sempre próxima ao nível mínimo de 1 m por um longo período, mas que, mesmo assim, acaba por

ocasionar 68 dias sem inundação distribuídos em 7 intervalos (13, 24, 16, 3, 3, 7 e 2 dias, em ordem cronológica) nos 160 dias de evento (considerando-se os dois picos de cheia como um evento único).

A seguir, na Tabela 4, são mostradas de forma resumida as informações já referidas:

Tabela 4 – Resumo dos resultados das cheias de 1941, 1967 e 2015.

Ano	Dias com >1.000 edificações afetadas	Dias com >10.000 edificações afetadas	Máximo de edificações afetadas e tempo	Data de início e fim e duração	Tempo sem inundação	Razão de dias inundados sob duração do evento
1941	58	38	43.553 (3 dias)	28/04/1941 - 13/09/1941 (139 dias)	21 dias (2 intervalos)	118/139
1967	23	4	16.749 (1 dia)	23/08/1967 - 26/10/1967 (65 dias)	2 dias (2 intervalos)	63/65
2015	35	5	6.654 (3 dias) e 12.815 (2 dias)	15/06/2015 - 30/12/2015 (160 dias) *	60 dias (7 intervalos)	92/160

* 61 dias do evento maior

5.3. ANÁLISE DO NÚMERO DE EDIFICAÇÕES ATINGIDAS ANTE O NÍVEL D'ÁGUA

Dando continuidade à análise dos resultados, a seguir são apresentadas a Figura 9, Figura 10 e Figura 11, as quais detalham para cada cheia o número de edificações afetadas frente o nível d'água alcançado durante a onda de cheia. Tendo em vista as diferentes proporções dos eventos de cheia analisados, é importante ressaltar que cada gráfico está em uma escala diferente.

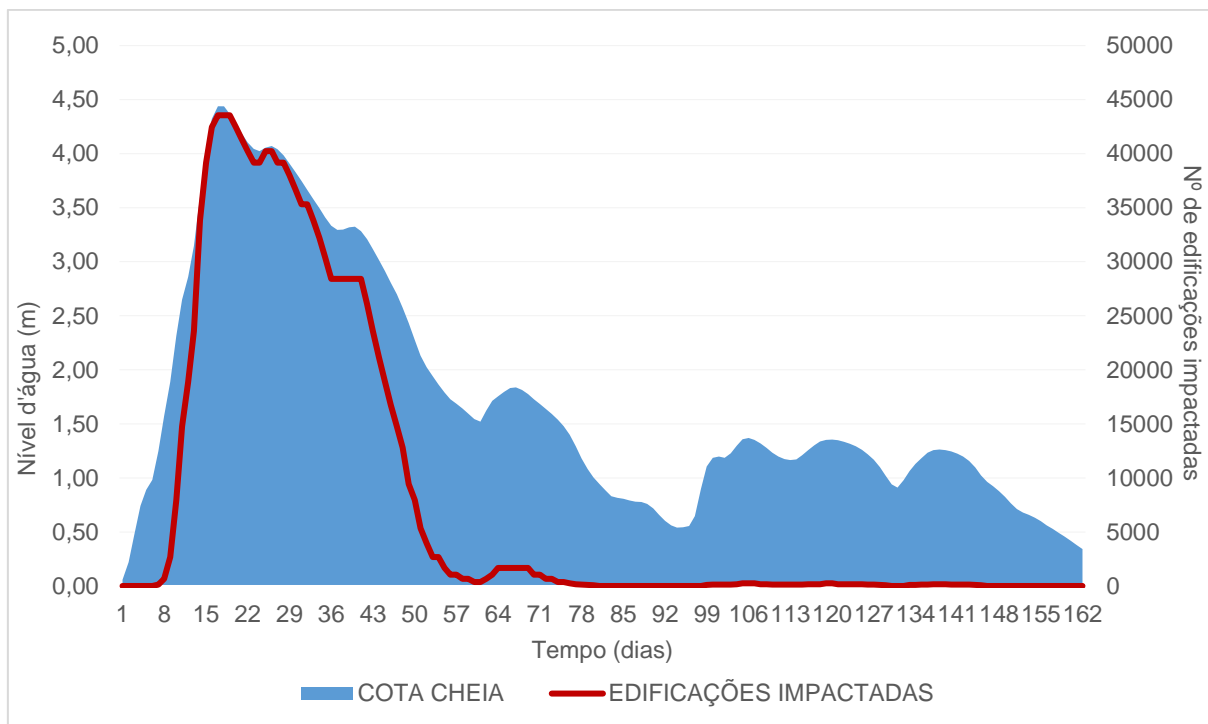


Figura 9 – Cota de cheia e edificações impactadas (1941)

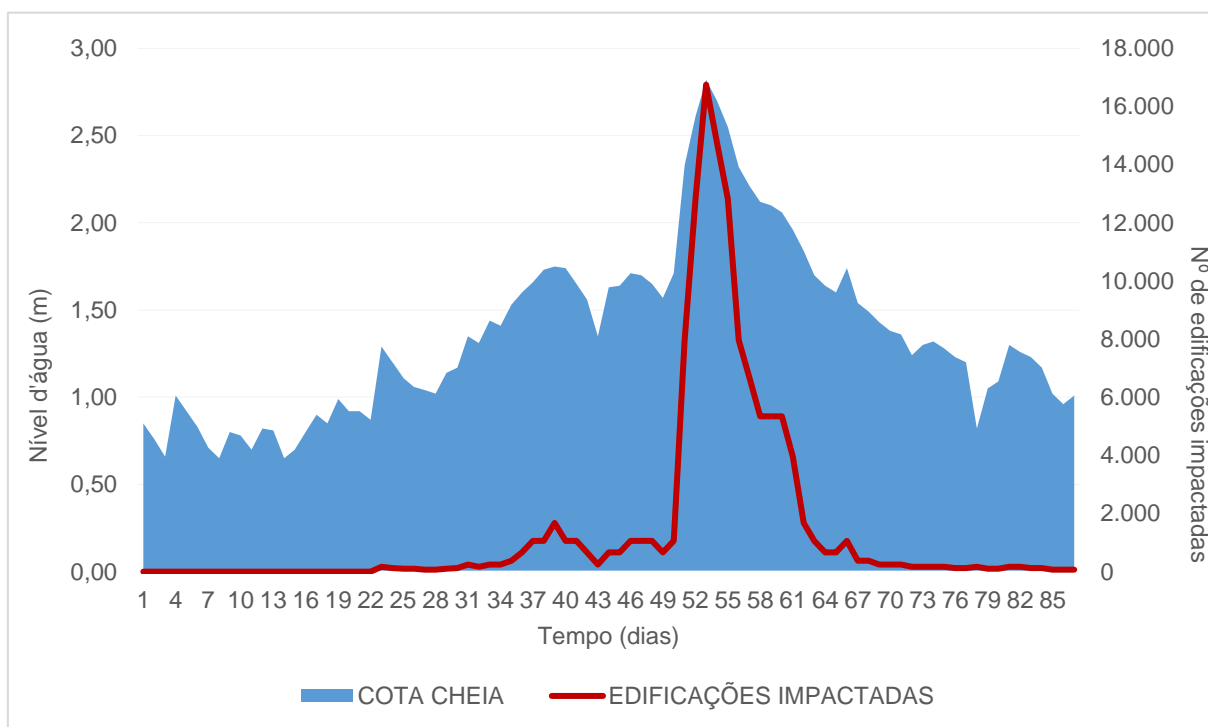


Figura 10 – Cota de cheia e edificações impactadas (1967)

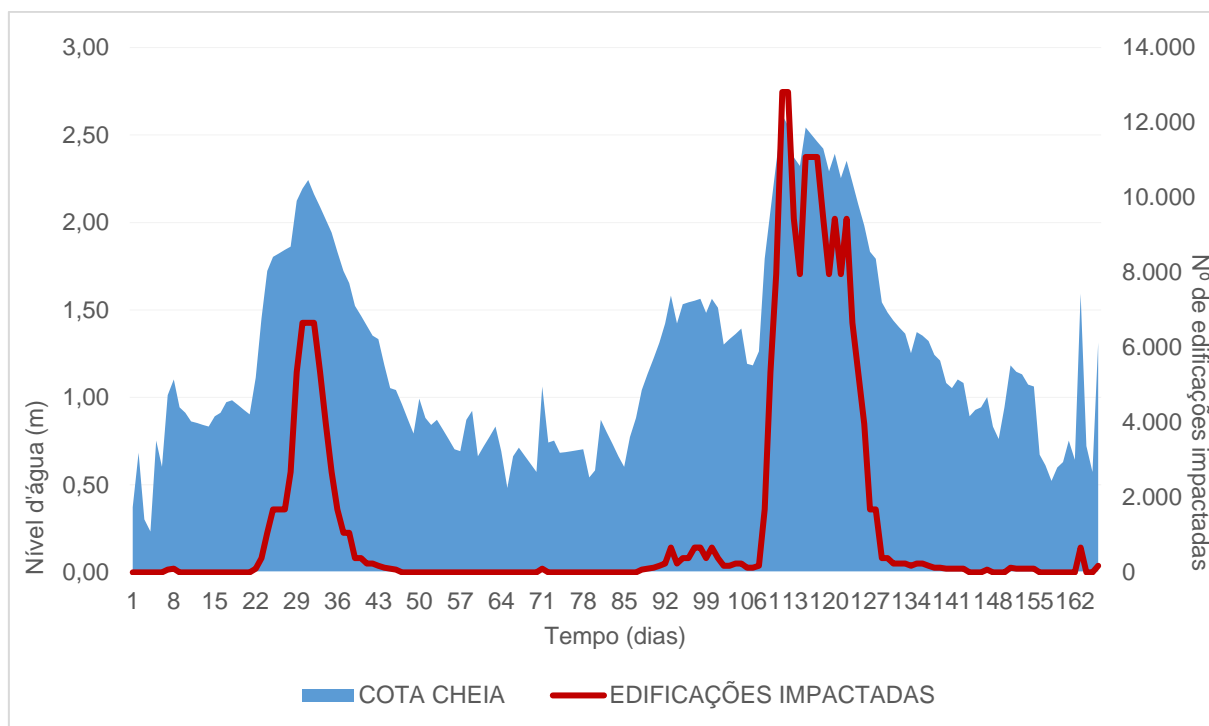


Figura 11 – Cota de cheia e edificações impactadas (2015)

Assim como resultante do gráfico *Box Plot*, a partir das três figuras acima é possível constatar que quando o nível d'água atinge aproximadamente 1,50 m, a quantidade de edificações impactadas cresce demasiadamente. É justamente a contar desse valor que cada incremento de altura no nível d'água retorna, proporcionalmente, um igual incremento de infraestrutura atingida.

Observando-se a variação de nível d'água e a variação no número de edificações atingidas percebe-se como em cotas mais altas atingidas o comportamento dos dois conjuntos de dados é mais semelhante do que para as cotas mais baixas. Como exemplo dessa constatação podem ser citadas as oscilações do final da cheia de 1941, as quais surtem efeito praticamente nulo na quantidade de edificações impactadas.

Chama atenção, também, a suavidade com que o nível d'água de 1941 varia em relação às demais cheias. Talvez possa se tribuir esse comportamento ao efeito exagerado de planícies de inundação a montante e a ausência de consideração do vento à modelagem matemática empregada para o evento dada a escassez de dados diários disponíveis. Para os demais anos foram adquiridos dados de medições e calculadas as médias diárias, motivo pelo qual as oscilações são mais abruptas.

Nesse sentido, destaca-se que os picos das três cheias apresentaram uma elevação da linha d'água excepcional. A cheia de 1941 atingiu a área de estudo e, rapidamente, em 11 dias havia subido quase 3,20 m, aumentando o número de edificações atingidas em mais de 35.000%. Já a o crescimento da cheia de 1967 destaca-se por apresentar a maior variação diária dentre todos eventos: 62 cm no dia 20/09/1967 contra 53 cm no dia 09/10/2015 e 46 cm no dia 05/05/1941.

Merece destaque também o crescimento da cheia de 2015, que em uma semana aumentou em mais de 100 vezes o número de edificações afetadas de, aproximadamente, 122 para 12.815 com a subida de 1,43 m do nível d'água (1,18 para 2,61 m). Ao final do documento, na seção de apêndices estão disponíveis os dados diários de nível e edificações impactadas para as três inundações analisadas.

5.4. ANÁLISE DA ÁREA E DAS EDIFICAÇÕES ATINGIDAS CONSIDERANDO-SE A COTA MÁXIMA

Dadas as condições metodológicas estabelecidas nesse trabalho, para além dos aspectos analisados de forma tabular, obtiveram-se, por fim, informações espacializadas dos referidos eventos. Entre a Figura 12 e a Figura 14 e o Mapa 1 e o Mapa 6, a seguir, são demonstrados os resultados alcançados no levantamento das áreas e edificações que seriam atingidas pelas cheias de 1941, 1967 e 2015.

A Figura 12, especificamente, ilustra a área que seria atingida quando o nível d'água da cheia de 1941 estivesse em sua maior elevação, 4,44 m, no dia 08/05/1941. Adicionalmente, é dado destaque para a região central da cidade, próxima ao Cais do Porto, onde encontra-se um dos componentes do sistema de proteção a inundações, o Muro da Mauá.

É relevante mencionar que o MDT cedido pela PMPA, utilizado para determinação das áreas afetadas é o melhor dado altimétrico disponível para a presente finalidade, como já dito anteriormente, é um dado relativamente atual. Isto implica na falha metodológica de que a superfície sobre a qual são avaliadas as extensões das inundações será influenciada pelo sistema de proteção, mesmo quando a análise diz respeito a eventos anteriores à construção do mesmo, como é o caso da cheia de 1941 e 1967.

Contata-se, também, que a extensão dos diques que compõem o sistema de proteção não aparece como área que seria afetada pela cota máxima da cheia de 1941, o que, a princípio, comprova a sua efetividade na contenção de eventuais

cheias com esse TR. A única parte do sistema que não pode ser evidenciada na Figura 12 é o muro da Av. Mauá devido à resolução dos pixels de 1 m não permitir a identificação de objetos com a espessura da barreira de contenção mencionada.

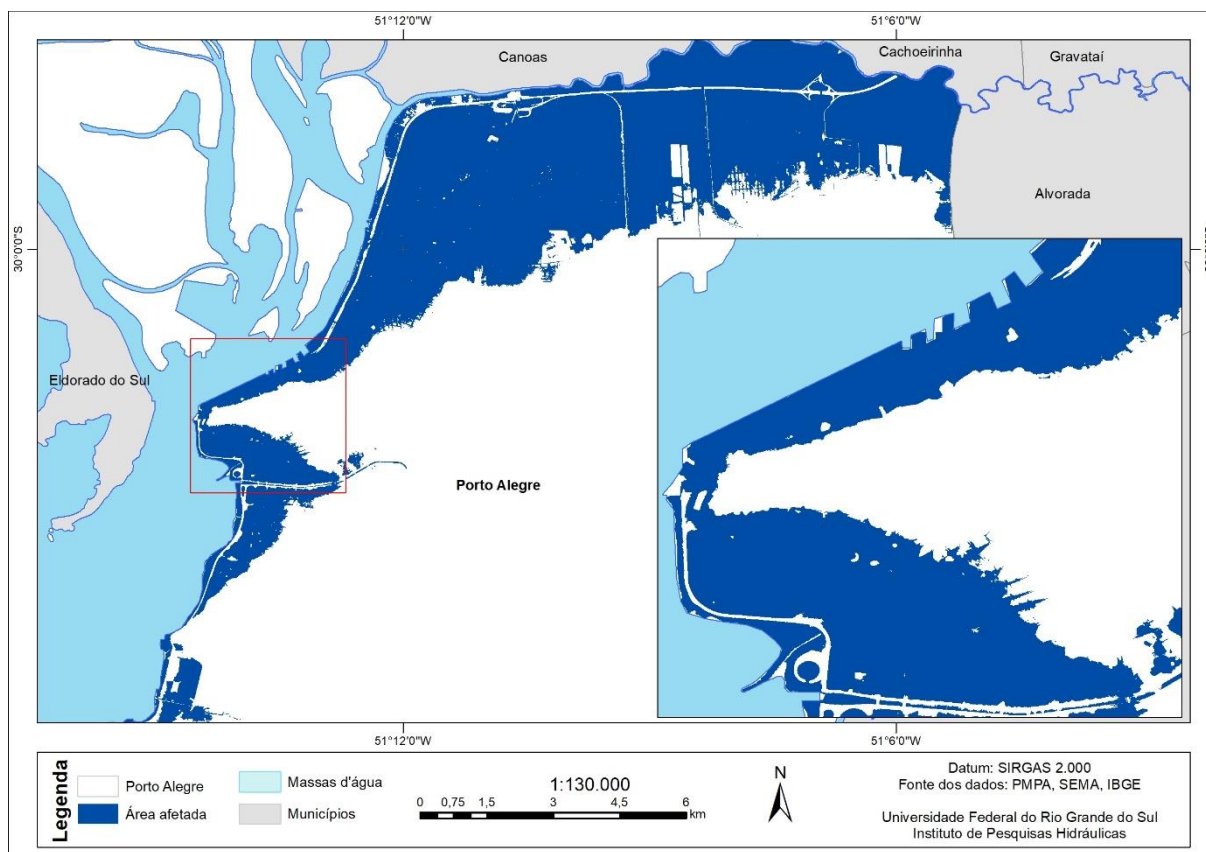


Figura 12 – Cota máxima da inundação de 1941 (destaque para o bairro central)

A seguir são apresentadas as Figura 13 e Figura 14, as quais retratam os eventos de 1967 e 2015, respectivamente. Distintamente da Figura 12, os destaques dados nos cantos inferiores direito das imagens contemplam outras áreas da região afetada que não o centro histórico a título de ilustração. Na Figura 13 é exibida a área que contempla os arredores dos bairros São Geraldo, Farrapos, Navegantes, Humaitá e uma porção do Aeroporto Internacional Salgado Filho. Já na Figura 14 o destaque contempla o bairro Menino Deus.

As Figura 12, Figura 13 e Figura 14 evidenciam a excepcionalidade do evento de cheia de 1941. Ordenada como a maior cheia do Lago Guaíba já registrada, a extensão da mancha de inundação resultante sobre o MDT com valores de pixel menores que 4,44 m é muito superior aos outros dois eventos seguintes na classificação de maiores níveis d'água já registrados. Ainda, os eventos de 1967 e 2015, mesmo apresentando distribuição temporal completamente diferentes,

atingiram cotas aproximadas, e, portanto, geraram manchas de inundação semelhantes, como é possível constatar a seguir.

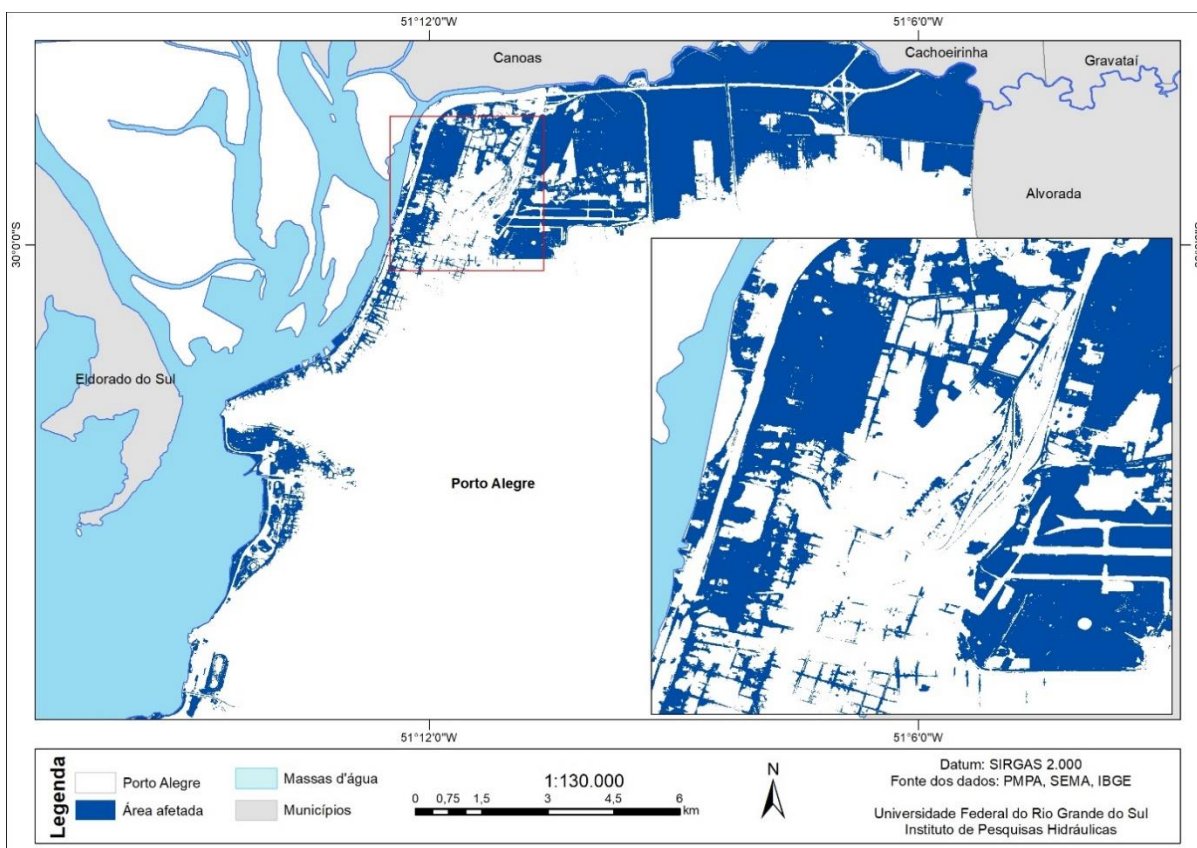


Figura 13 – Área atingida na cota máxima da inundação de 1967 (destaque para o bairro Navegantes)

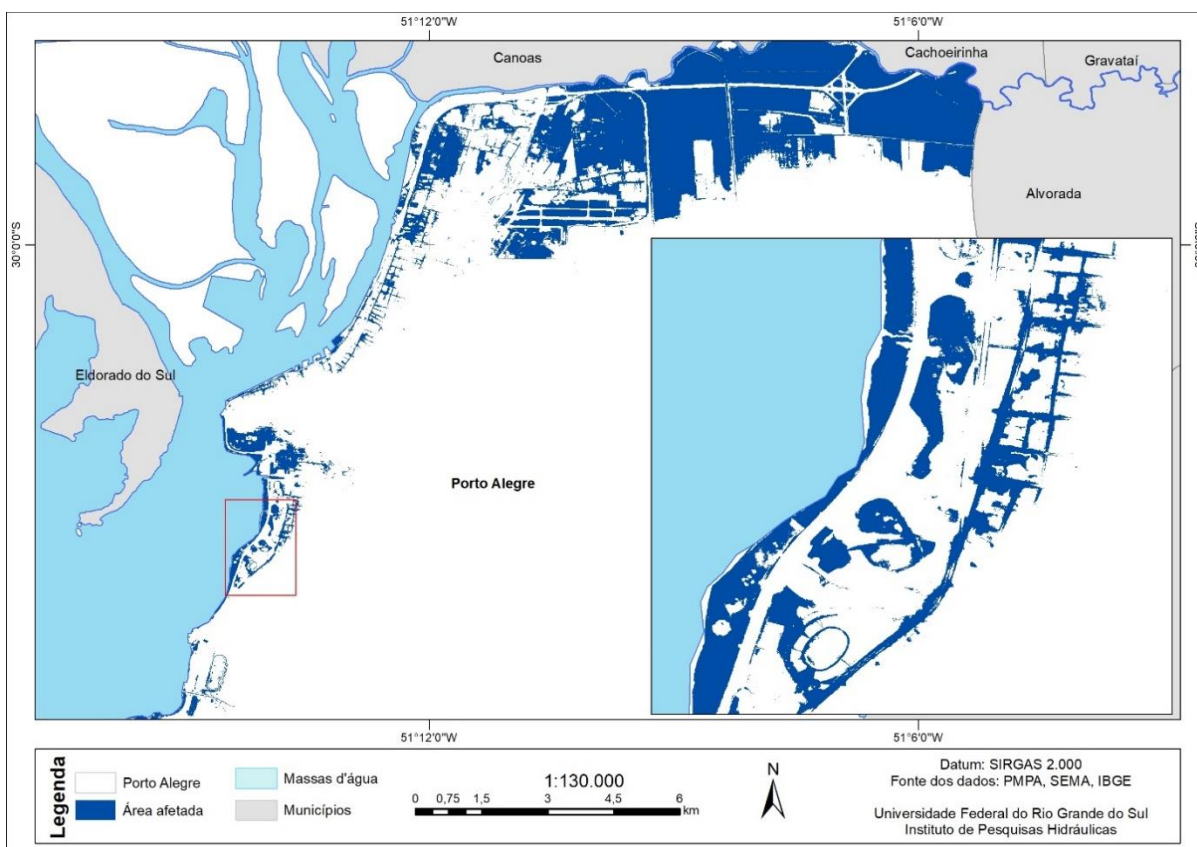


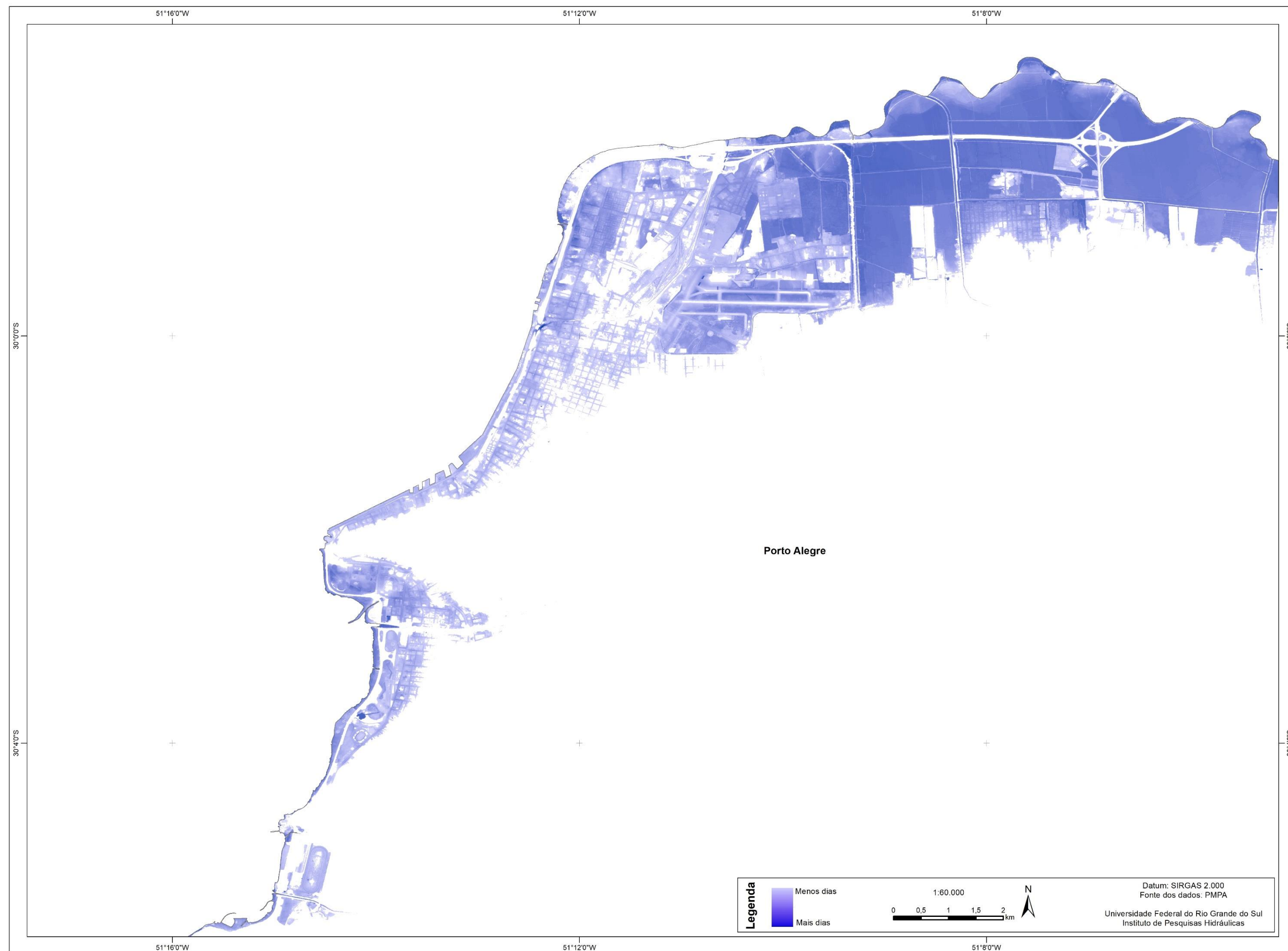
Figura 14 – Área atingida na cota máxima da inundação de 2015 (destaque para o bairro Menino Deus)

5.5. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS EVENTOS DE CHEIA E ANÁLISE DAS EDIFICAÇÕES AFETADAS

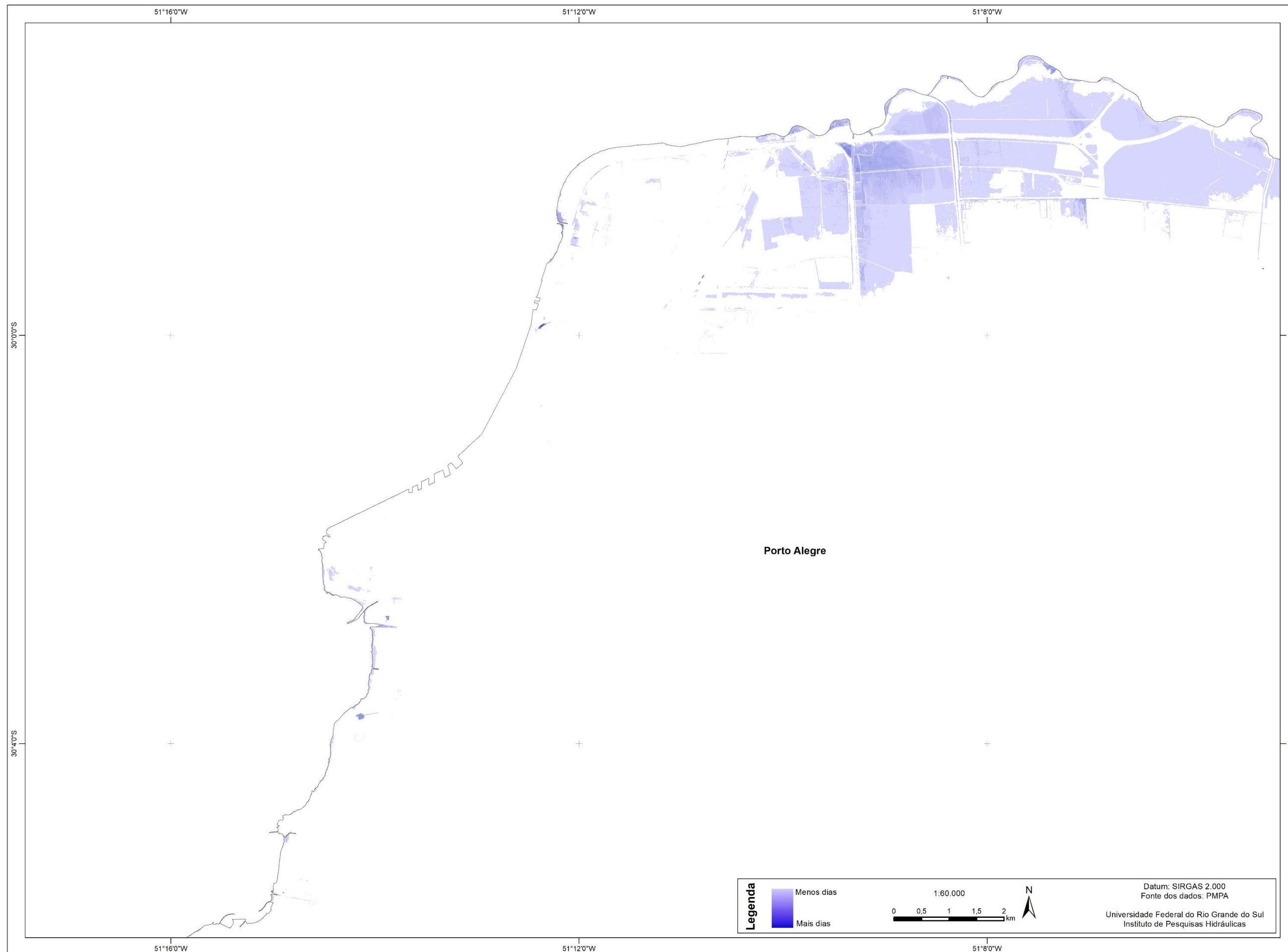
Entretanto, para além de somente graficar as cotas máximas atingidas pelas cheias analisadas, o presente trabalho se propõe a avaliar a evolução cronológica (crescimento e decrescimento) da passagem de eventos de cheia e as estruturas construídas afetadas pela mesma. Desta forma, os Mapas 1, 2 e 3 – área e dias inundados das cheias de 1941, 1967 e 2015 – abaixo auxiliam na compreensão da dimensão temporal das inundações na área de estudo atualmente caso não houvesse o sistema de proteção a inundações e ocorressem as três cheias referenciadas.

Os mapas foram elaborados de modo que todas os três seguem a mesma simbologia, em que quanto mais escura a célula, mais tempo ela ficou inundada. Para melhor compreensão da dimensão dos resultados, foi empregada a mesma escala na paleta de cores dos três mapas, onde a cheia de 1941 foi usada como referência. Desta forma, as inundações de 1967 e 2015 aparentam terem sido menos significativas do que de fato o foram.

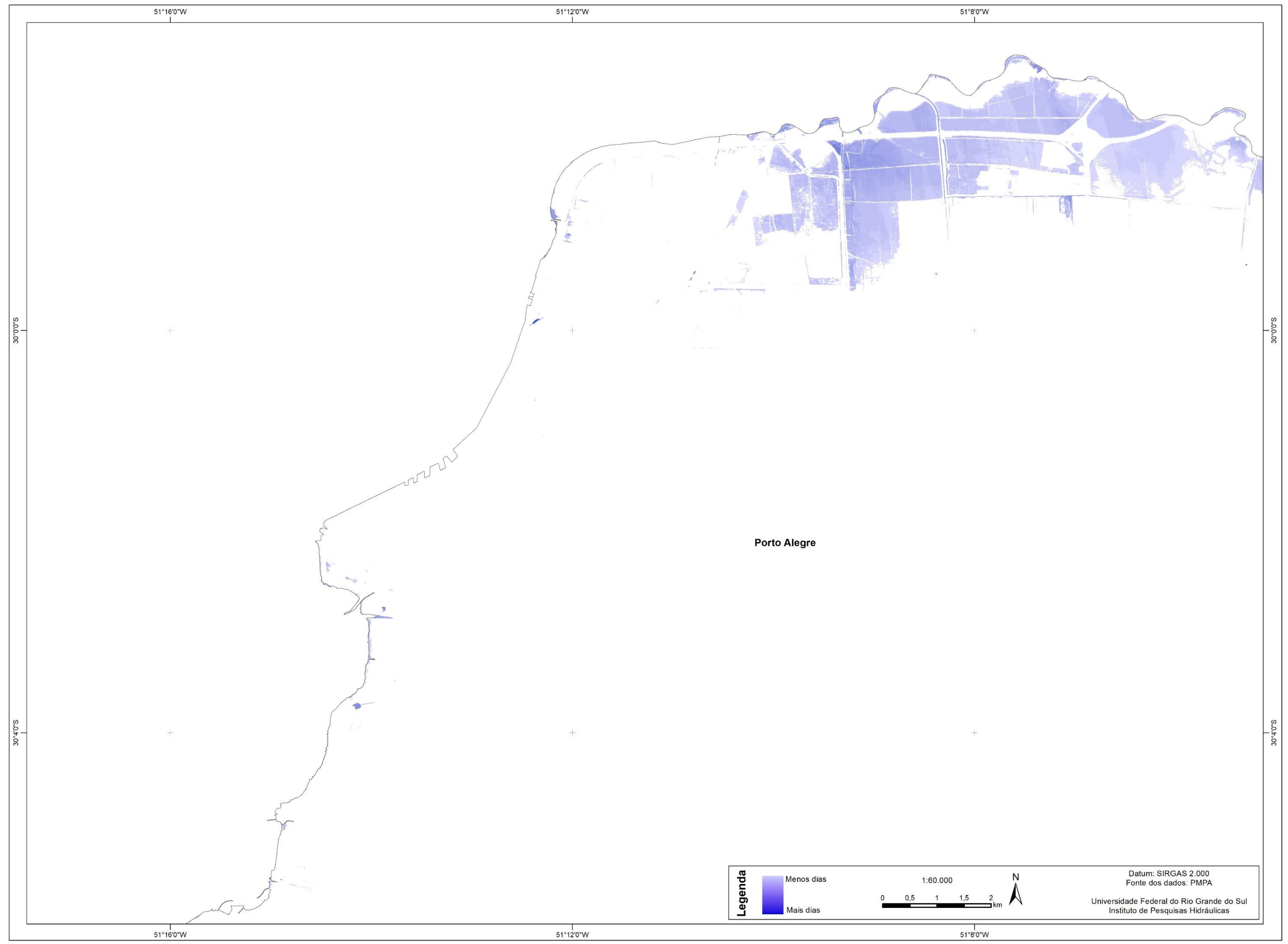
Mapa 1 – Área e dias inundados (1941).



Mapa 2 – Área e dias inundados (1967).



Mapa 3 – Área e dias inundados (2015).



Percebe-se, assim, a extensão do impacto das cheias, bem como sua duração. Salienta-se que, como dito anteriormente, as áreas de menor cota, e com conseqüente mais tempo de inundação, são as representadas pela coloração mais escura. Virtualmente, com os mapas expostos acima é possível obter-se a informação de quantos dias cada célula ficou inundada com resolução planimétrica de 1 m.

Conclusivamente, com a informação de cota do terreno de cada edificação da área de estudo foi possível determinar, também, o tempo de inundação dessas mesmas. A Figura 15 é um recorte detalhado de uma pequena região bastante afetada em 1941, como forma de exemplo das informações que compõem os Mapas 4, 5 e 6 – edificações e tempo de inundação das cheias de 1941, 1967 e 2015 – a seguir. Seguindo o mesmo critério de apresentação dos mapas anteriores, quanto mais escura a edificação estiver preenchida, menor a sua cota mínima e, conseqüentemente, maior o seu tempo sujeito à inundação. Em todos mapas foi dado destaque para a região central devido à densidade de edificações atingidas.

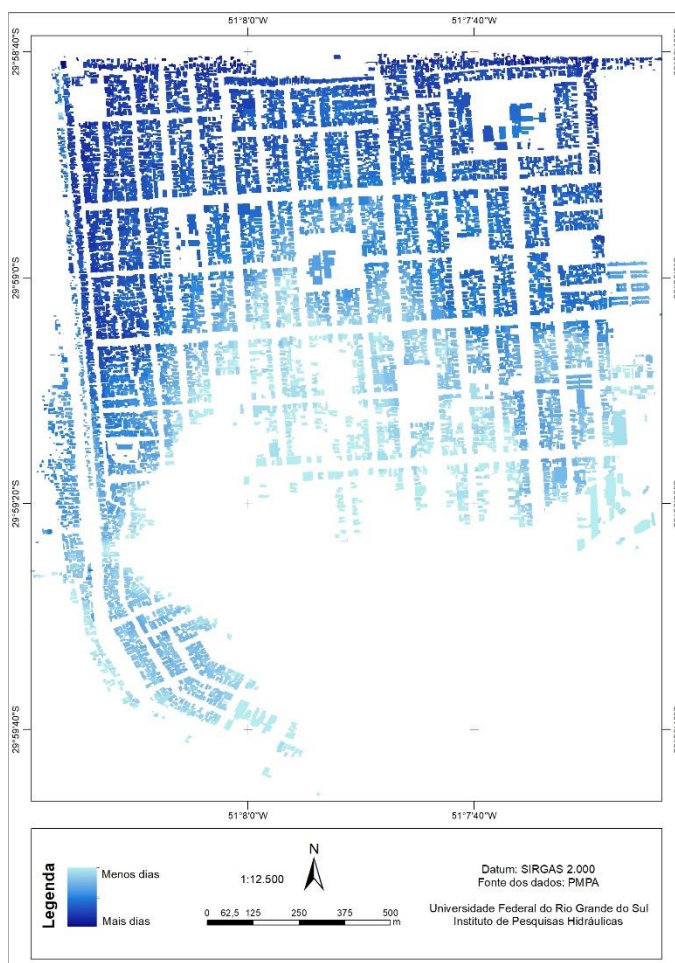
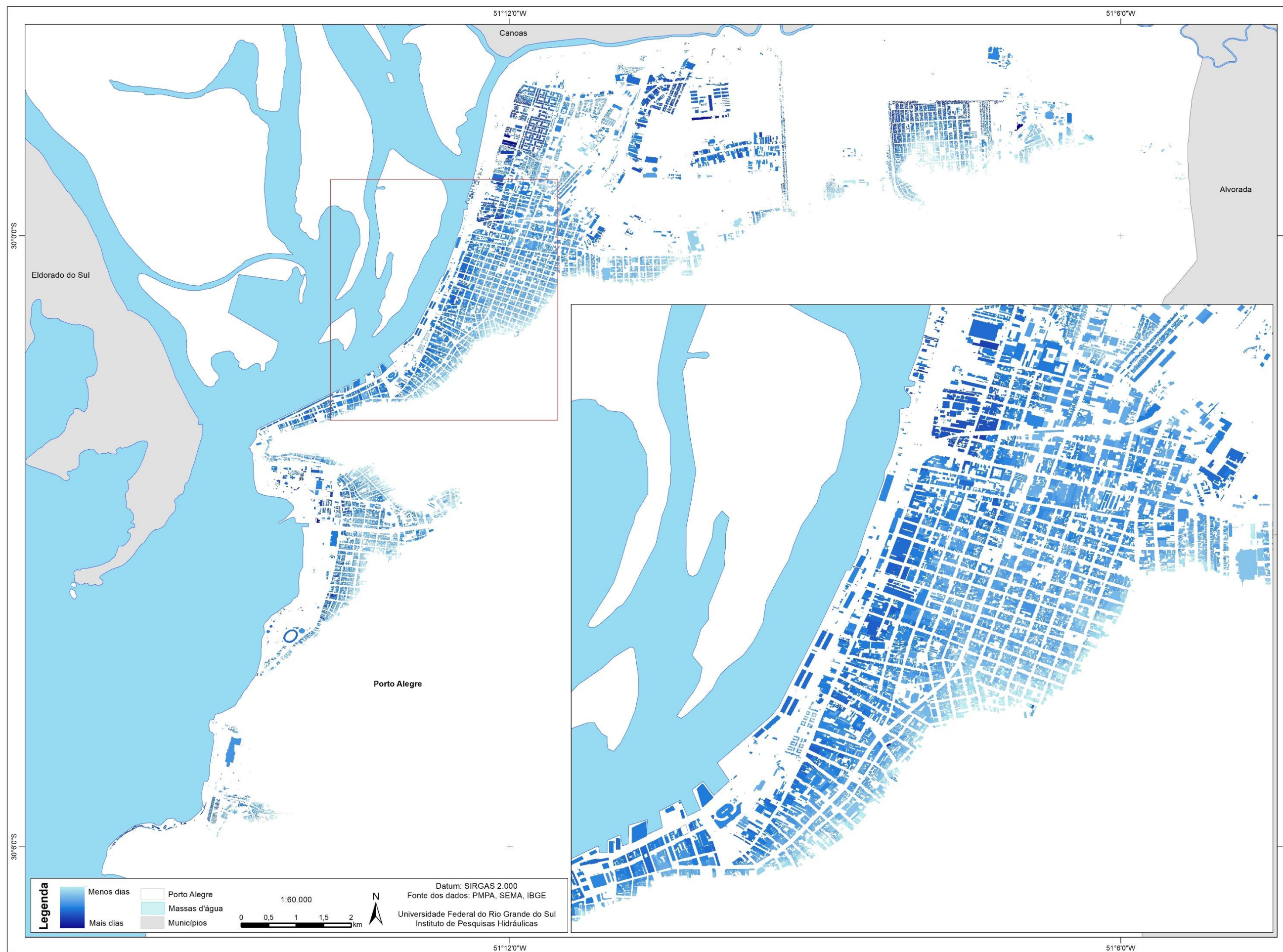
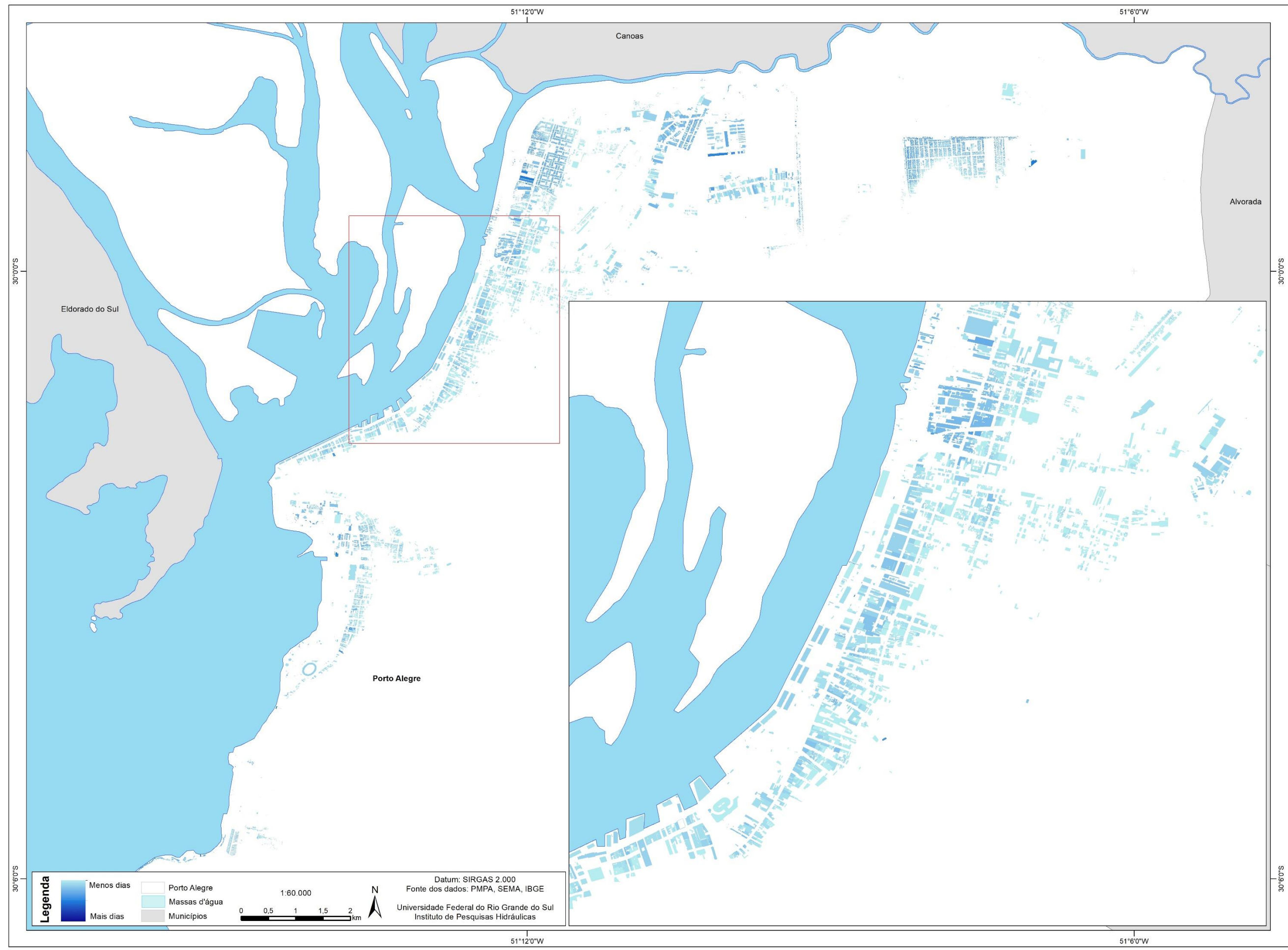


Figura 15 – Exemplo de tempo de inundação de edificações

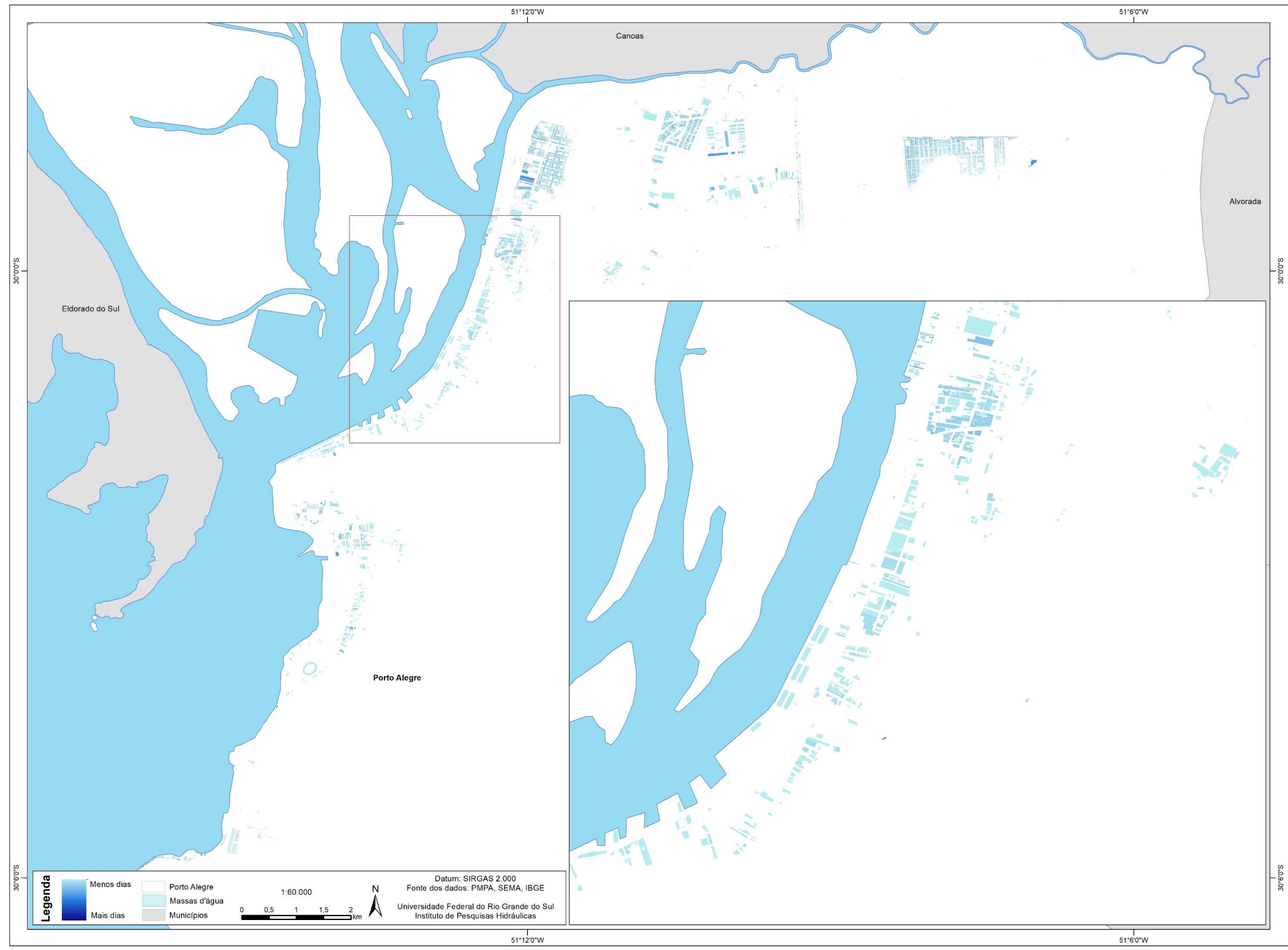
Mapa 4 – Edificações e tempo de inundação (1941).



Mapa 5 – Edificações e tempo de inundação (1967).



Mapa 6 – Edificações e tempo de inundação (2015).



Percebe-se, assim, uma aparente inconformidade entre os mapas de área e tempo inundados e os mapas de edificações e tempo de inundação. Entretanto, esse resultado é somente de caráter gráfico uma vez que a cheia de 1941 foi usada como referência para a intensidade das cores. Desta forma, fica ainda mais explícita a característica de grande impacto desta cheia excepcional. Embora o uso da cheia de 1941 como referência da escala de cores faça com que a área afetada nas cheias de 1967 e 2015 não fiquem tão evidenciadas, nos Mapas 1, 2 e 3, tem-se uma melhor apresentação com os mapas de edificações atingidas (Mapas 4, 5 e 6).

Os mapas acima fundamentam-se, originalmente, em resultados organizados de forma tabular, os quais, por sua vez, são resultado da comparação entre três informações primordiais, como dito anteriormente: nível d'água ao longo do tempo, cota altimétrica do terreno e geometria das edificações da cidade de Porto Alegre.

A Tabela 5 abaixo evidencia a quantidade de edificações atingidas ante a subida de nível d'água considerando o respectivo nº de dias de submersão por altura de submersão. Para tanto adotou-se um intervalo de 0,5 em 0,5 m até o nível d'água máximo de cada cheia. A partir dela é possível constatar-se, por exemplo, quantos dias e quantas edificações ficaram submersas em cada faixa de profundidade submersão. Para uma melhor exibição da dimensão dos impactos multiplicou-se o número de edificações atingidas pelo número de dias que elas estiveram submersas até as cotas determinadas, tendo-se, assim, o resultado na unidade *edificações·dia*. Tal resultado pode ser significativo para pesquisas futuras que venham a estimar o prejuízo potencial em termos monetários destas inundações.

Isto posto, é importante tornarem-se públicas as informações levantadas e organizadas que tornaram esse trabalho possível. Para isto, estão expostas em sua íntegra, nos apêndices, as tabelas resultantes das manipulações das bases de dados adquiridas das fontes referenciadas:

- Apêndice 1 – Tabela de informações das edificações abaixo da cota 1,0 m.
- Apêndice 2 – Tabela de número de edificações com informação altimétrica menor ou igual a determinada cota.
- Apêndice 3 – Tabela de dados diários de edificações impactadas das cheias de 1941, 1967 e 2015.
- Apêndice 4 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 1941).
- Apêndice 5 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 1967).
- Apêndice 6 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 2015).

Tabela 5 – Edificações atingidas por tempo e por altura de submersão

Cheia de	Altura submersa (m)	De 0,10 a	De 0,60 a	De 1,10 a	De 1,60 a	De 2,10 a	De 2,60 a	De 3,10 a
		0,50 m	1,00 m	1,50 m	2,00 m	2,50 m	3,00 m	3,30 m
1941	Nº de edificações	43.553	40.234	33.832	23.583	12.815	5.342	667
	Tempo submerso (dias)	116	59	42	36	29	18	6
	Edificações x dias	5.052.148	2.373.806	1.420.944	848.988	371.635	96.156	4.002
Cheia de 1967	Altura submersa (m)	De 0,10 a 0,50 m	De 0,60 a 1,00 m	De 1,10 a 1,50 m	De 1,60 a 1,80 m	-	-	-
	Nº de edificações	16.749	11.091	3.959	379	-	-	-
	Tempo submerso (dias)	64	30	10	4	-	-	-
	Edificações x dias	1.071.936	332.430	39.590	1.516	-	-	-
Cheia de 2015	Altura submersa (m)	De 0,10 a 0,50 m	De 0,60 a 1,00 m	De 1,10 a 1,60 m	-	-	-	-
	Nº de edificações	12.815	3.959	379	-	-	-	-
	Tempo submerso (dias)	91	40	21	-	-	-	-
	Edificações x dias	1.166.195	158.360	7.959	-	-	-	-

Foram somadas ao total 72 edificações as quais inicialmente são impactadas com 1,0 m de nível d'água

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da metodologia empregada, tem-se como principal resultado deste trabalho o número de edificações potencialmente impactadas em escala diária por três importantes eventos de inundação em Porto Alegre, caso não existisse o sistema de proteção. Inicialmente, constata-se que todos eventos de cheia analisados resultariam em inundações de maior prejuízo.

A principal hipótese decorre da urbanização que se expandiu e ocupou, inclusive, as regiões de várzea. Esse fato é especialmente pertinente para os eventos de 1941 e 1967 uma vez que existem atualmente edificações em áreas que antes ainda não haviam sido alcançadas pela urbanização e que podem não ter sido atingidas à época, mas que hoje seriam caso houvesse uma repetição desses eventos e não se contasse com o sistema de proteção contra cheias.

A partir dos resultados foi possível obter-se uma visão geral do impacto que três importantes cheias em Porto Alegre teriam sobre a infraestrutura urbana que atualmente é mantida segura por um sistema de proteção a inundações. Desta forma, os objetivos propostos inicialmente foram alcançados satisfatoriamente uma vez que foram quantificadas as edificações atingidas diariamente a partir da cota de 1 m considerada como início e fim das cheias.

O número máximo de edificações afetadas em 1941, 1967 e 2015 foi 43.553, 16.749 e 12.815 unidades nessa ordem, com duração total das inundações de 139, 65 e 160 dias, respectivamente. Entretanto, o diferencial do trabalho consistiu no cálculo e exibição de quanto tempo as habitações ficaram atingidas pelo aumento e diminuição do nível d'água diário. Conclui-se, portanto, que os cenários simulados evidenciam a importância do sistema de proteção uma vez que seria capaz de atenuar os efeitos constatados por este trabalho.

Dentre as principais limitações encontradas pelo trabalho está a escassez de dados de registros limnimétricos para o evento de cheia de 1941, o mais significativo já registrado. Todavia, os dados usados originários da modelagem hidrológica do grupo de Hidrologia de Grande Escala utilizando-se do MGB – IPH foram válidos. Outra dificuldade percebida na pesquisa foi a correspondência entre os dados altimétricos do MDT e os polígonos de edificações. Perderam-se alguns dados pela não intersecção de centroides de pixels do dado matricial com o dado vetorial.

Para futuras pesquisas sugere-se a divisão da área de estudo em pequenas bacias hidrográficas, possibilitando o uso de dados mais discretizados do MGB. Complementarmente, o uso de ferramentas de modelagem hidrológica como o software HEC-RAS, ao invés do emprego de um MDT simplesmente, poderia reproduzir mais fidedignamente às áreas impactadas pela subida do nível do Lago Guaíba. Ainda, sobre o aspecto dos níveis d'água e réguas limnimétricas – o qual é especialmente problemático –, recomenda-se maior aprofundamento na pesquisa bibliográfica de forma a consolidar as cotas utilizadas e conferir mais confiabilidade ao estudo. E, por fim, sugere-se também a estimativa de custos que os impactos aferidos no presente trabalho teriam do ponto de vista econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, JCM de. **Datum altimétrico brasileiro**. Cadernos de Geociências, v. 5, p. 69-73, 1990. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/artigos/1990-datum%20altimetrico%20brasileiro.pdf>. Acesso em: 16 outubro 2018.

BATES, Paul D.; HORRITT, Matthew S.; FEWTRELL, Timothy J. **A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling**. Journal of Hydrology, v. 387, n. 1-2, p. 33-45, 2010. Disponível em: <http://catalytics.asia/wp-content/themes/catalytics/flood/Bates%20et%20al%202010%20new%20lisflood.pdf>. Acesso em: 17 outubro 2018.

CABETTE, Amanda; STROHAECKER, Tânia Marques. **A dinâmica demográfica e a produção do espaço urbano em Porto Alegre, Brasil**. Cadernos Metrópole., v. 17, n. 34, p. 481-501, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cm/v17n34/2236-9996-cm-17-34-0481.pdf>. Acesso em: 08 outubro 2018.

COLLISCHONN, Walter et al. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling**. Hydrological Sciences Journal, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/04/mgb07.pdf>. Acesso em: 16 outubro 2018.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2500>. Acesso em: 04 dezembro 2018.

CONCREMAT ENGENHARIA. **Estudos preliminares para subsídios ao plano de bacia do Lago Guaíba**: Relatório de Fase A, Fase B e Síntese. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <http://comitedolagoguaiba.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Relat%C3%B3rios-Fase-A-Fase-B-e-S%C3%ADntese-comp.pdf>. Acesso em: 29 novembro 2018.

Consórcio Engeplus Aerogeo. **Estudos de alternativas para minimização do efeito das cheias do trecho baixo do Rio Caí/RS**: Estudos hidrológicos básicos. Porto Alegre: Consórcio Engeplus Aerogeo, 2014. Disponível em: http://www.metroplan.rs.gov.br/ajax/download.php?qArquivo=20140702170756eg0182_r_erh_r5_01_02__relatorio_final_.pdf. Acesso em: 08 outubro 2018.

Consórcio Guaíba. **Relatório de planejamento da elaboração da base cartográfica**. Curitiba: Consórcio Guaíba, 2011.

Consórcio Guaíba. **Relatório final da execução da cobertura laser**. Curitiba: Consórcio Guaíba, 2012.

DE PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias et al. **Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin**. Water Resources Research,

v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wrcr.20067>. Acesso em: 04 dezembro 2018.

DO SUL, RIO GRANDE. **Lei Estadual n. 10.350, de 30 de dezembro de 1994. Política estadual de Recursos Hídricos. Assembléia Legislativa**, 1994. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/filerepository/replegis/arquivos/10.350.pdf>. Acesso em: 15 outubro 2018.

FAN, Fernando Mainardi et al. **Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, novembro de, 2015. Disponível em: www.researchgate.net/publication/304991815. Acesso em: 04 dezembro 2018.

FAN, Fernando Mainardi; COLLISCHONN, Walter. **Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014. Disponível em: www.researchgate.net/publication/272524013. Acesso em: 16 outubro 2018.

FEDERAL INTERAGENCY FLOODPLAIN MANAGEMENT TASK FORCE. **Floodplain management in the United States: An assessment report**. 1992. Disponível em: <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1504-20490-0436/fema18.pdf>. Acesso em: 14 novembro 2018.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental – Henrique Luis Roessler. **Região Hidrográfica do Guaíba**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp>. Acesso em: 26 setembro 2018.

FLORENZANO, Tereza Gallotti. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. Acesso em: 16 outubro 2018.

GUIMARAENS, Rafael. **A enchente de 41**. Porto Alegre: Libretos, 2009.

JARDIM, Pedro Frediani et al. **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB-IPH 2017 utilizando o IPH-Hydro Tools**. 2017. Disponível em: https://www.ufrgs.br/hge/wp-content/uploads/2017/01/manual_MGB.20.02.pdf. Acesso em: 02 outubro 2018.

LOPES, Vitória Ache Rocha et al. **A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes**. Journal of hydrology, v. 565, p. 177-196, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169418306073>. Acesso em: 09 outubro 2018.

LOPES, Vitória Ache Rocha et al. **É possível incluir o efeito do vento em um modelo hidrológico para melhorar a representação de ambientes lagunares?**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRH, 2017], 2017.

LOPES, Vitória Ache Rocha. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/172898>. Acesso em: 08 outubro 2018.

LUZ, Roberto Teixeira; FREITAS, SRC de; DALAZOANA, Regiane. **Acompanhamento do datum altimétrico IMBITUBA através das redes altimétrica e maregráfica do sistema geodésico brasileiro**. In: VII Congresso Internacional de Ciências da Terra, Santiago, Chile. 2002. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/artigos/2002-Acompanhamento_Imbituba_atraves_Redes_SGB.pdf. Acesso em: 06 outubro 2018.

MACHADO, Floriano Peixoto. **Contribuição ao estudo do clima do Rio Grande do Sul**. Serviço gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1950. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv14127.pdf>. Acesso em: 26 outubro 2018.

MARTINBIANCHO, Guilherme Kohut et al. **Aplicação preliminar do modelo hidrológico MGB-IPH para análise do evento extremo de cheia em 1941 no estado do Rio Grande do Sul**. I Encontro Nacional de Desastres, julho de 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/326693541>. Acesso em: 16 outubro 2018.

MARTINS, Cristina Maria dos Reis. **Caracterização da região metropolitana de Porto Alegre: Textos para Discussão FEE**, Porto Alegre: FEE, n. 112, 2013. Disponível em: <http://cdn.fee.tche.br/tds/112.pdf>. Acesso em: 26 setembro 2018.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística**. CPRM, 2007. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/454?show=full>. Acesso em: 26 novembro 2018.

PONTES, Paulo RM et al. **Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Fan/publication/292967552_Modelagem_hidrolologica_e_hidraulica_de_grande_escala_com_propagacao_inercial_de_vazoes/links/578c397008ae254b1de369e8/Modelagem-hidrolologica-e-hidraulica-de-grande-escala-com-propagacao-inercial-de-vazoes.pdf. Acesso em: 16 outubro 2018.

RAUBER, Vicente. **Prevenir é o melhor remédio: sistemas de proteção contra inundações e alagamentos de Porto Alegre**. Porto Alegre: Prefeitura Municipal, 1992.

RECKZIEGEL, Elisabete Weber. **Áreas com risco de inundação do Lago Guaíba e Delta Do Jacuí**. 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/174530>. Acesso em: 03 novembro 2018

RECKZIEGEL, Elisabete Weber; WESCHENFELDER, Jair; BAZZAN, Thiago. **Dinâmica Temporal e Espacial das Inundações no Lago Guaíba e Delta do**

Jacuí (RS) entre 1940 e 2015. Disponível em: www.researchgate.net/profile/Jair_Weschenfelder/publication/327850216. Acesso em: 08 outubro 2018.

SAKSENA, Siddharth; MERWADE, Venkatesh. **Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping.** Journal of Hydrology, v. 530, p. 180-194, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415007520>. Acesso em: 28 setembro 2018

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS. **Acervo de dados hidrológicos.** Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 8 outubro 2018.

TUCCI, Carlos EM et al. **Inundações urbanas na América do Sul.** Ed. dos Autores, 2003. Disponível em: <https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/inbr02803.pdf>. Acesso em: 26 outubro 2018.

TUCCI, Carlos EM. **Conflitos do controle de inundação ribeirinha em Porto Alegre.** Avaliação e controle da drenagem urbana. Org. Carlos EM Tucci e David da Motta Marques. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/01/conflitosinudacao.pdf>. Acesso em: 08 outubro 2018

TUCCI, Carlos EM. **Inundações urbanas.** Porto Alegre: ABRH/RHAMA, v. 11, 2007. Disponível em: http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outros_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-terrimorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/drenagem1.PDF. Acesso em: 09 outubro 2018.

TUCCI, C. E. M. **Plano Diretor de Drenagem Urbana:** Manual de Drenagem Urbana. 2005. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf. Acesso em: 08 outubro 2018.

TUCCI, Carlos EM; CLARKE, Robin T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2016/12/impacto-das-mudan%C3%83%C2%A7as-cobertura-vegetal-no-escoamento.pdf>. Acesso em: 08 outubro 2018.

VALENTE, Pedro Teixeira. **Eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul no Século XX a partir de dados de reanálise e registros históricos.** 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/174485>. Acesso em: 28 outubro 2018.

WOLLMANN, Cássio Arthur. **ENCHENTES NO RIO GRANDE DO SUL DO SÉCULO XXI** (the floods in Rio Grande do Sul during 21th century). Mercator, v. 13,

n. 1, p. 79 a 91-79 a 91, 2014. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/951>. Acesso em: 26 outubro 2018.

ZANARDI, Rafael Pereira et al. **Análise da qualidade dos modelos digitais de terreno e de superfície do município de Porto Alegre**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/274001028>. Acesso em: 16 outubro 2018.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Tabela de informações das edificações abaixo da cota 1,0 m.

Área (m ²)	Cota mínima (m)	Cota máxima (m)	Cota média (m)	Diferença de altura (m)	Desvio padrão	Soma das alturas (m)
154,61	-1,09	1,19	-0,16	2,28	0,44	-98,27
1.229,81	-0,25	4,99	2,96	5,24	1,08	14.564,92
496,55	-0,05	0,80	0,45	0,85	0,24	894,26
520,07	0,41	2,38	1,40	1,97	0,41	2.912,11
7.148,03	0,53	2,69	1,77	2,16	0,59	50.613,04
581,58	0,56	3,09	2,40	2,54	0,71	5.577,18
37,26	0,59	2,72	1,55	2,13	0,65	139,08
26,35	0,60	2,38	1,30	1,78	0,53	135,21
25,72	0,60	2,86	1,89	2,26	0,60	194,96
15,74	0,60	2,71	1,58	2,11	0,66	96,63
14,49	0,61	1,83	1,04	1,23	0,39	59,14
14,52	0,61	1,35	0,86	0,74	0,25	25,05
96,48	0,61	4,07	2,38	3,46	0,94	931,13
50,39	0,62	2,54	1,54	1,92	0,51	307,38
14,16	0,62	1,35	0,91	0,72	0,19	50,91
34,65	0,63	1,68	1,12	1,05	0,33	157,04
59,21	0,64	2,22	1,04	1,59	0,44	247,17
153,95	0,65	3,16	1,93	2,52	0,57	1.187,27
83,87	0,65	1,98	0,94	1,33	0,37	313,27
46,37	0,65	1,50	1,07	0,85	0,18	196,20
32,38	0,65	2,27	1,37	1,62	0,44	175,35
361,99	0,66	2,81	2,11	2,15	0,52	3.042,66
43,31	0,67	2,13	1,20	1,46	0,36	209,17
22,89	0,67	2,51	1,88	1,84	0,57	170,66
101,02	0,67	1,84	1,30	1,17	0,29	525,88
5,00	0,67	1,23	0,91	0,56	0,16	19,12
68,20	0,67	2,61	1,57	1,94	0,62	428,14
37,55	0,68	2,30	1,50	1,61	0,43	224,85
43,66	0,69	1,95	1,05	1,27	0,37	185,43
71,54	0,69	1,77	0,92	1,09	0,23	262,26
38,02	0,69	1,39	0,90	0,70	0,21	125,45
50,90	0,70	3,05	2,03	2,35	0,68	412,62
43,36	0,71	3,46	2,11	2,76	0,86	366,84
80,94	0,71	2,37	1,42	1,67	0,39	460,01
49,90	0,72	2,91	2,20	2,18	0,67	439,04
99,64	0,73	2,31	1,63	1,58	0,28	657,14
71,01	0,73	3,52	2,11	2,79	0,80	594,22
33,71	0,74	2,45	1,52	1,71	0,50	203,37
19,23	0,74	1,97	1,26	1,23	0,36	94,59
51,03	0,74	2,59	1,69	1,85	0,56	339,62
129,90	0,75	3,20	2,13	2,45	0,66	1.105,23
36,18	0,76	2,16	1,87	1,40	0,35	276,08
76,77	0,76	4,17	3,00	3,41	0,90	917,75
22,02	0,76	2,77	1,69	2,01	0,57	148,70
54,16	0,77	1,66	1,39	0,89	0,24	299,81
65,00	0,78	0,89	0,81	0,11	0,02	183,26
1.413,37	0,78	2,94	2,54	2,16	0,37	14.358,35
8,80	0,79	1,78	1,28	0,98	0,29	43,57
22,24	0,81	1,85	1,51	1,04	0,31	131,48
100,32	0,81	4,18	2,43	3,37	0,95	964,84
19,60	0,81	1,10	0,96	0,29	0,08	78,73
16,23	0,81	0,84	0,82	0,03	0,01	53,62
16,32	0,84	2,22	1,73	1,38	0,36	112,72

Área (m ²)	Cota mínima (m)	Cota máxima (m)	Cota média (m)	Diferença de altura (m)	Desvio padrão	Soma das alturas (m)
5,64	0,85	0,96	0,92	0,11	0,03	23,01
80,73	0,86	2,05	1,64	1,19	0,30	526,01
40,23	0,87	2,21	1,53	1,34	0,37	248,93
44,64	0,87	2,67	1,74	1,81	0,50	326,73
1.567,30	0,87	3,57	1,82	2,70	0,56	11.426,33
74,42	0,87	2,23	1,90	1,36	0,38	564,69
95,49	0,89	2,97	2,15	2,08	0,62	820,33
182,09	0,89	2,81	2,26	1,92	0,47	1.641,99
119,66	0,90	3,95	2,57	3,05	0,85	1.213,86
200,28	0,92	3,74	2,58	2,82	0,73	2.061,73
40,39	0,92	1,57	1,07	0,65	0,16	172,90
269,20	0,94	2,58	1,99	1,64	0,25	2.145,01
9,50	0,94	1,25	1,09	0,32	0,10	41,57
480,15	0,95	2,50	1,78	1,54	0,35	3.417,57
23,07	0,96	1,52	1,22	0,56	0,16	113,69
1.083,20	0,96	4,13	2,95	3,17	0,75	12.791,00
21,09	0,98	1,06	1,02	0,08	0,02	87,75
33,93	1,00	1,57	1,31	0,57	0,15	177,19
55,12	1,00	1,59	1,31	0,59	0,16	289,64
Área média (m ²)	Cota mínima média (m)	Cota máxima média (m)	Cota média (m)	Diferença de altura média (m)	Desvio padrão médio	Soma das alturas média (m)
257,45	0,70	2,36	1,58	1,66	0,44	2.002,84

Apêndice 2 – Tabela de número de edificações com informação altimétrica menor ou igual a determinada cota.

Cota altimétrica (m)	Edificações	Cota altimétrica (m)	Edificações
1,00	73	2,80	16.749
1,10	97	2,90	18.869
1,20	122	3,00	21.161
1,30	172	3,10	23.583
1,40	240	3,20	26.081
1,50	379	3,30	28.415
1,60	667	3,40	30.395
1,70	1.058	3,50	32.216
1,80	1.678	3,60	33.832
1,90	2.678	3,70	35.325
2,00	3.959	3,80	36.722
2,10	5.342	3,90	38.051
2,20	6.654	4,00	39.163
2,30	7.958	4,10	40.234
2,40	9.431	4,20	41.370
2,50	11.081	4,30	42.463
2,60	12.815	4,40	43.553
2,70	14.753	4,50	44.609

Apêndice 3 – Tabela de dados diários de edificações impactadas das cheias de 1941, 1967 e 2015.

1941				1967				2015			
Data	Dias de inundação	Nível d'água ajustado	Edificações impactadas	Data	Dias de inundação	Nível d'água ajustado	Edificações impactadas	Data	Dias de inundação	Nível d'água ajustado	Edificações impactadas
28/04/1941	1	1,25	122	23/08/1967	1	1,29	172	15/06/2015	1	1,01	73
29/04/1941	2	1,57	667	24/08/1967	2	1,20	122	21/06/2015	2	1,10	97
30/04/1941	3	1,89	2.678	25/08/1967	3	1,11	97	-	-	-	-
01/05/1941	4	2,32	7.958	26/08/1967	4	1,06	97	14/07/2015	3	1,11	97
02/05/1941	5	2,65	14.753	27/08/1967	5	1,04	73	15/07/2015	4	1,45	379
03/05/1941	6	2,86	18.869	28/08/1967	6	1,02	73	16/07/2015	5	1,72	1058
04/05/1941	7	3,15	23.583	29/08/1967	7	1,14	97	17/07/2015	6	1,80	1678
05/05/1941	8	3,60	33.832	30/08/1967	8	1,17	122	18/07/2015*	7	1,82	1678
06/05/1941	9	4,04	39.163	31/08/1967	9	1,35	240	19/07/2015*	8	1,84	1678
07/05/1941	10	4,32	42.463	01/09/1967	10	1,31	172	20/07/2015	9	1,86	2678
08/05/1941	11	4,44	43.553	02/09/1967	11	1,44	240	21/07/2015	10	2,12	5342
09/05/1941	12	4,44	43.553	03/09/1967	12	1,41	240	22/07/2015	11	2,19	6654
10/05/1941	13	4,37	43.553	04/09/1967	13	1,53	379	23/07/2015	12	2,24	6654
11/05/1941	14	4,28	42.463	05/09/1967	14	1,60	667	24/07/2015	13	2,16	6654
12/05/1941	15	4,19	41.370	06/09/1967	15	1,66	1.058	25/07/2015*	14	2,09	5342
13/05/1941	16	4,10	40.234	07/09/1967	16	1,73	1.058	26/07/2015*	15	2,02	3959
14/05/1941	17	4,04	39.163	08/09/1967	17	1,75	1.678	27/07/2015	16	1,94	2678
15/05/1941	18	4,02	39.163	09/09/1967	18	1,74	1.058	28/07/2015	17	1,83	1678
16/05/1941	19	4,06	40.234	10/09/1967	19	1,65	1.058	29/07/2015	18	1,72	1058
17/05/1941	20	4,07	40.234	11/09/1967	20	1,56	667	30/07/2015	19	1,65	1058
18/05/1941	21	4,04	39.163	12/09/1967	21	1,35	240	31/07/2015	20	1,52	379
19/05/1941	22	3,99	39.163	13/09/1967	22	1,63	667	01/08/2015*	21	1,47	379
20/05/1941	23	3,91	38.051	14/09/1967	23	1,64	667	02/08/2015*	22	1,41	240
21/05/1941	24	3,83	36.722	15/09/1967	24	1,71	1.058	03/08/2015	23	1,35	240
22/05/1941	25	3,75	35.325	16/09/1967	25	1,70	1.058	04/08/2015	24	1,33	172
23/05/1941	26	3,66	35.325	17/09/1967	26	1,65	1.058	05/08/2015	25	1,18	122
24/05/1941	27	3,58	33.832	18/09/1967	27	1,57	667	06/08/2015	26	1,05	97
25/05/1941	28	3,50	32.216	19/09/1967	28	1,71	1.058	07/08/2015	27	1,04	73
26/05/1941	29	3,41	30.395	20/09/1967	29	2,33	7.958	-	-	-	-
27/05/1941	30	3,33	28.415	21/09/1967	30	2,61	12.815	01/09/2015	28	1,06	97
28/05/1941	31	3,29	28.415	22/09/1967	31	2,82	16.749	-	-	-	-
29/05/1941	32	3,30	28.415	23/09/1967	32	2,70	14.753	18/09/2015	29	1,04	73

30/05/1941	33	3,32	28.415	24/09/1967	33	2,55	12.815	19/09/2015*	30	1,13	97
31/05/1941	34	3,32	28.415	25/09/1967	34	2,32	7.958	20/09/2015*	31	1,22	122
01/06/1941	35	3,28	28.415	26/09/1967	35	2,21	6.654	21/09/2015	32	1,31	172
02/06/1941	36	3,21	26.081	27/09/1967	36	2,12	5.342	22/09/2015	33	1,42	240
03/06/1941	37	3,12	23.583	28/09/1967	37	2,10	5.342	23/09/2015	34	1,58	667
04/06/1941	38	3,02	21.161	29/09/1967	38	2,06	5.342	24/09/2015	35	1,42	240
05/06/1941	39	2,91	18.869	30/09/1967	39	1,96	3.959	25/09/2015	36	1,53	379
06/06/1941	40	2,81	16.749	01/10/1967	40	1,84	1.678	26/09/2015*	37	1,54	379
07/06/1941	41	2,70	14.753	02/10/1967	41	1,70	1.058	27/09/2015*	38	1,55	667
08/06/1941	42	2,57	12.815	03/10/1967	42	1,64	667	28/09/2015	39	1,56	667
09/06/1941	43	2,43	9.431	04/10/1967	43	1,60	667	29/09/2015	40	1,48	379
10/06/1941	44	2,28	7.958	05/10/1967	44	1,74	1.058	30/09/2015	41	1,56	667
11/06/1941	45	2,13	5.342	06/10/1967	45	1,54	379	01/10/2015	42	1,51	379
12/06/1941	46	2,02	3.959	07/10/1967	46	1,49	379	02/10/2015	43	1,30	172
13/06/1941	47	1,94	2.678	08/10/1967	47	1,43	240	03/10/2015*	44	1,33	172
14/06/1941	48	1,86	2.678	09/10/1967	48	1,38	240	04/10/2015*	45	1,36	240
15/06/1941	49	1,79	1.678	10/10/1967	49	1,36	240	05/10/2015	46	1,39	240
16/06/1941	50	1,73	1.058	11/10/1967	50	1,24	172	06/10/2015	47	1,19	122
17/06/1941	51	1,69	1.058	12/10/1967	51	1,30	172	07/10/2015	48	1,18	122
18/06/1941	52	1,64	667	13/10/1967	52	1,32	172	08/10/2015	49	1,26	172
19/06/1941	53	1,59	667	14/10/1967	53	1,28	172	09/10/2015	50	1,79	1.678
20/06/1941	54	1,54	379	15/10/1967	54	1,23	122	10/10/2015*	51	2,07	5.342
21/06/1941	55	1,52	379	16/10/1967	55	1,20	122	11/10/2015*	52	2,34	7.958
22/06/1941	56	1,62	667	17/10/1967	-	0,82	172	12/10/2015	53	2,61	12.815
23/06/1941	57	1,71	1.058	18/10/1967	56	1,05	97	13/10/2015	54	2,55	12.815
24/06/1941	58	1,75	1.678	19/10/1967	57	1,09	97	14/10/2015	55	2,37	9.431
25/06/1941	59	1,80	1.678	20/10/1967	58	1,30	172	15/10/2015	56	2,32	7.958
26/06/1941	60	1,83	1.678	21/10/1967	59	1,26	172	16/10/2015	57	2,54	11.081
27/06/1941	61	1,84	1.678	22/10/1967	60	1,23	122	17/10/2015*	58	2,50	11.081
28/06/1941	62	1,81	1.678	23/10/1967	61	1,17	122	18/10/2015*	59	2,46	11.081
29/06/1941	63	1,77	1.678	24/10/1967	62	1,02	73	19/10/2015	60	2,42	9.431
30/06/1941	64	1,73	1.058	25/10/1967	-	0,96	73	20/10/2015	61	2,29	7.958
01/07/1941	65	1,68	1.058	26/10/1967	63	1,01	73	21/10/2015	62	2,39	9.431
02/07/1941	66	1,64	667					22/10/2015	63	2,25	7.958
03/07/1941	67	1,59	667					23/10/2015	64	2,35	9.431
04/07/1941	68	1,54	379					24/10/2015*	65	2,23	6654
05/07/1941	69	1,48	379					25/10/2015*	66	2,11	5342

06/07/1941	70	1,40	240
07/07/1941	71	1,29	172
08/07/1941	72	1,18	122
09/07/1941	73	1,08	97
10/07/1941	74	1,01	73
-	-	-	-
29/07/1941	75	1,11	97
30/07/1941	76	1,19	122
31/07/1941	77	1,20	122
01/08/1941	78	1,19	122
02/08/1941	79	1,23	122
03/08/1941	80	1,30	172
04/08/1941	81	1,36	240
05/08/1941	82	1,37	240
06/08/1941	83	1,35	240
07/08/1941	84	1,32	172
08/08/1941	85	1,28	172
09/08/1941	86	1,23	122
10/08/1941	87	1,20	122
11/08/1941	88	1,17	122
12/08/1941	89	1,16	122
13/08/1941	90	1,17	122
14/08/1941	91	1,21	122
15/08/1941	92	1,26	172
16/08/1941	93	1,30	172
17/08/1941	94	1,34	172
18/08/1941	95	1,35	240
19/08/1941	96	1,36	240
20/08/1941	97	1,35	172
21/08/1941	98	1,33	172
22/08/1941	99	1,32	172
23/08/1941	100	1,29	172
24/08/1941	101	1,26	172
25/08/1941	102	1,22	122
26/08/1941	103	1,17	122
27/08/1941	104	1,10	97
28/08/1941	105	1,02	73

26/10/2015	67	1,98	3.959
27/10/2015	68	1,83	1.678
28/10/2015	69	1,79	1.678
29/10/2015	70	1,54	379
30/10/2015*	71	1,49	379
31/10/2015*	72	1,44	240
01/11/2015*	73	1,40	240
02/11/2015*	74	1,36	240
03/11/2015	75	1,25	172
04/11/2015	76	1,37	240
05/11/2015	77	1,35	240
06/11/2015	78	1,32	172
07/11/2015*	79	1,24	122
08/11/2015*	80	1,21	122
09/11/2015	81	1,08	97
10/11/2015	82	1,05	97
11/11/2015	83	1,10	97
12/11/2015	84	1,08	97
-	-	-	-
16/11/2015	85	1,00	73
-	-	-	-
20/11/2015	86	1,18	122
21/11/2015*	87	1,15	97
22/11/2015*	88	1,13	97
23/11/2015	89	1,07	97
24/11/2015	90	1,06	97
-	-	-	-
07/12/2015	91	1,59	667
-	-	-	-
30/12/2015	92	1,31	172

-	-	-	-
01/09/1941	106	1,06	97
02/09/1941	107	1,13	97
03/09/1941	108	1,18	122
04/09/1941	109	1,23	122
05/09/1941	110	1,26	172
06/09/1941	111	1,26	172
07/09/1941	112	1,26	172
08/09/1941	113	1,24	122
09/09/1941	114	1,22	122
10/09/1941	115	1,20	122
11/09/1941	116	1,16	122
12/09/1941	117	1,10	97
13/09/1941	118	1,02	73

Apêndice 4 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 1941)

Altitude	Profundidade de submerção da edificação													
	Entre 0,10 e 0,50 m		Entre 0,60 e 1,00 m		Entre 1,10 e 1,50 m		Entre 1,60 e 2,00 m		Entre 2,10 e 2,50 m		Entre 2,60 e 3,00 m		Entre 3,10 e 3,30 m	
	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias
Entre 1,10 e 1,50 m	667	57	667	17	667	6	667	7	667	11	667	12	667	6
Entre 1,60 e 2,00 m	4.675	17	4.675	6	4.675	7	4.675	11	4.675	12	4.675	6	-	-
Entre 2,10 e 2,50 m	7.473	6	7.473	7	7.473	11	7.473	12	7.473	6	-	-	-	-
Entre 2,60 e 3,00 m	10.768	7	10.768	11	10.768	12	10.768	6	-	-	-	-	-	-
Entre 3,10 e 3,50 m	10.249	11	10.249	12	10.249	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Entre 3,60 e 4,00 m	6.402	12	6.402	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Entre 4,10 e 4,30 m	3.319	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	43.553	116	40.234	59	33.832	42	23.583	36	12.815	29	5.342	18	667	6
Edificações x Dias	5.052.148		2.373.806		1.420.944		848.988		371.635		96.156		4.002	

Foram somadas ao total 72 edificações as quais inicialmente são impactadas com 1,0 m de nível d'água

Apêndice 5 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 1967)

Altitude	Profundidade de submerção da edificação							
	Entre 0,10 e 0,50 m		Entre 0,60 e 1,00 m		Entre 1,10 e 1,50 m		Entre 1,60 e 1,80 m	
	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias
Entre 1,10 e 1,50 m	379	34	379	20	379	6	379	4
Entre 1,60 e 2,00 m	3.580	20	3.580	6	3.580	4	-	-
Entre 2,10 e 2,50 m	7.122	6	7.122	4	-	-	-	-
Entre 2,60 e 2,80 m	5.668	4	-	-	-	-	-	-
TOTAL	16.749	64	11.081	30	3.959	10	379	4
Edificações x Dias	1.071.936		332.430		39.590		1.516	

Foram somadas ao total 72 edificações as quais inicialmente são impactadas com 1,0 m de nível d'água

Apêndice 6 – Número de edificações atingidas e dias de impacto por altura submersa por cota em que está a edificação (Cheia de 2015)

Altitude	Profundidade de submerção da edificação					
	Entre 0,10 e 0,50 m		Entre 0,60 e 1,00 m		Entre 1,10 e 1,60 m	
	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias	Nº Edif.	Dias
Entre 1,10 e 1,50 m	379	51	379	19	379	21
Entre 1,60 e 2,00 m	3.580	19	3.580	21	-	-
Entre 2,10 e 2,60 m	8.856	21	-	-	-	-
TOTAL	12.815	91	3.959	40	379	21
Edificações x Dias	1.166.165		158.360		7.959	

Foram somadas ao total 72 edificações as quais inicialmente são impactadas com 1,0 m de nível d'água