

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Juliana Maia Duarte

**USO DE TÉCNICAS DE METAMODELAGEM PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E
QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE PERDAS
DE VIDAS ASSOCIADAS A INUNDAÇÕES TECNOLÓGICAS**

Belo Horizonte
2023

Juliana Maia Duarte

**USO DE TÉCNICAS DE METAMODELAGEM PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E
QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE PERDAS
DE VIDAS ASSOCIADAS A INUNDAÇÕES TECNOLÓGICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem física e matemática em hidráulica.

Orientador: Prof. Dr. Veber Afonso Figueiredo Costa

Belo Horizonte
2023

D812u

Duarte, Juliana Maia.

Uso de técnicas de metamodelagem para análise de sensibilidade e quantificação de incertezas na modelagem hidrodinâmica de perdas de vidas associadas a inundações tecnológicas / Juliana Maia Duarte . - 2023.

1 recurso online (133 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Veber Afonso Figueiredo Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 132-133.

Bibliografia: f. 121-131.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Modelos computacionais - Teses. 4. Inundações - Teses. 5. Catástrofes naturais - Teses. 6. Hidrodinâmica - Teses. 7. Incerteza - Teses. 8. Incerteza - Modelos matemáticos - Teses. 9. Modelagem - Teses. 10. Evacuação de civis - Teses. 11. Perda (Psicologia) - Teses. 12. Barragens de rejeitos - Teses. 13. Calamidades públicas - Socorro - Teses. 14. Ruptura - Teses. 15. Probabilidades - Teses. I. Costa, Veber Afonso Figueiredo. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ângela Cristina Silva CRB/6 2361
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Uso de Técnicas de Metamodelagem Para Análise de Sensibilidade e Quantificação de Incertezas Na Modelagem Hidrodinâmica de Perdas de Vidas Associadas A Inundações Tecnológicas"

JULIANA MAIA DUARTE

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Veber Afonso Figueiredo Costa

Prof. Luiz Rafael Palmier

Prof. Francisco Eustáquio Oliveira e Silva

Prof. Ludmilson Abritta Mendes

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Veber Afonso Figueiredo Costa

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Veber Afonso Figueiredo Costa, Professor do Magistério Superior**, em 01/09/2023, às 07:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Eustaquio Oliveira e Silva, Professor do Magistério Superior**, em 15/09/2023, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ludmilson Abritta Mendes, Usuário Externo**, em 04/10/2023, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Rafael Palmier, Membro**, em 15/02/2024, às 19:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 05/03/2024, às 07:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2563731** e o código CRC **C3B8057E**.

*À minha família e especialmente aos
meus avós maternos e avós paternos:*

*Virgília Oliveira Maia e José Ribeiro Maia
(in memoriam)*

*Raimunda de Jesus e Rufino Duarte
(in memoriam)*

Sem vocês, eu não seria.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por seu infinito amor, por sempre me dar sustento e por sua infinita graça em me concender tanto. A minha mãe, Maria Inez, e irmãos João Vitor e Emanuelle, que sempre estiveram do meu lado. Amo vocês infinitamente, vocês são minha base. A toda minha família que sempre me deu suporte e amor.

Agradeço ao Professor Veber Costa, pelo qual tenho grande admiração, pela orientação deste trabalho, sendo fundamental para a conclusão desta pesquisa. Agradeço ao Professor Américo Cunha, da UERJ, por todo apoio durante o desenvolvimento do algoritmo e contribuição na pesquisa.

Agradecimentos a UFMG, CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo amparo concedido para o desenvolvimento da pesquisa. À coordenação, Prof^a Priscila Moura sempre solícita, e à secretaria do PPG-SMARH, aos professores e todos que contribuíram para meu crescimento como pesquisadora.

Aos meus amigos, sejam do ensino médio, da igreja, da faculdade, bem como, da pós-graduação. Tive muita sorte de tê-los em todos os momentos especiais da minha vida. Vocês fazem muita diferença na minha vida, amo vocês!

Aos meus amigos que fiz em Belo Horizonte - a incrível salinha da Diretoria 4504: Alan, Alexandre, André, Daniel, Débora, Fábio, Igor, Luana, Luíza, Vitória, Jáder, Thomaz e Vinícius. Gostaria de agradecer especialmente ao André Filipe, meu amigo que sempre me apoiou e ajudou nas minhas dúvidas durante a pesquisa. Agradecer ao Cadu, por trazer leveza durante os períodos tensos no desenvolvimento deste trabalho. Por fim, agradecer as minhas grandes amigas Luíza e Luana, tendo tido a oportunidade de morar e nos aventurar nesta jornada, dividindo nossas alegrias, tristezas e sonhos. Obrigada por tanto!

Agradeço aos meus amigos que tornam meus dias mais felizes no meu trabalho: Gabriela Jabbur, Walfrido Júnior, Mariana, Thaís, Luís, Luíza, Matheus, Lucas, Elias e Filipinho. Sou feliz e grata a todos que de alguma forma contribuíram na minha trajetória. No meu coração, cada gesto é válido e importante. Gratidão!

“Amo-Te Belém! Como te quero bem.

*Cidade das mangueiras,
Metrópole da Amazônia,
Capital do meu Pará,
E quem te visita sempre deseja voltar.”*

Débora Henrique

“Só, e no mais: sem ti, jamais nunca — Minas, Minas Gerais...”

Guimarães Rosa

RESUMO

A metamodelagem é frequentemente utilizada para propagar incertezas, ou seja, determinar estatísticas de saída de um modelo matemático ou computacional considerando as distribuições de probabilidades nas variáveis de entrada, além de realizar a análise de sensibilidade dessas variáveis. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi de realizar uma análise de sensibilidade e incertezas das variáveis de entrada do modelo computacional LifeSim, utilizado para modelagem de perdas de vidas em caso de inundações naturais e tecnológicas. Para tal, foram construídos o modelo hidrodinâmico e de perdas de vidas para a ruptura hipotética da Barragem da Pampulha, Belo Horizonte - MG. A metodologia do trabalho é estabelecida em 3 etapas. Na primeira etapa foi realizada a atualização do modelo hidrodinâmico bidimensional no software HEC-RAS v. 6.3. Na segunda etapa foram utilizados cenários determinísticos considerando sistemas de alerta e evacuação eficientes e ineficientes para o período diurno e noturno do dia. Na terceira etapa, foi realizada a construção de um modelo substituto (metamodelo), baseado na Expansão de Caos Polinomial, no software MatLab. Os resultados do modelo substituto foram, de forma geral, adequados. O erro da ECP esteve entre 10^{-3} e 10^{-2} para os cenários simulados, e o erro quadrático médio gerado entre a saída do modelo substituto e o modelo computacional (LifeSim) estiveram entre 1 e 2 fatalidades. A análise de sensibilidade global, calculada pelo Índice de Sobol até a terceira ordem, foi realizada para os parâmetros “População Alertada”, “População Mobilizada”, “Emissão do Alerta” e “Identificação do Perigo”. Para todos os cenários, as variáveis “Emissão do Alerta” e “Identificação do Perigo” foram as que geraram maiores valores de contribuição para a saída do modelo, ou seja, para o número de fatalidades. Porém, para os cenários otimistas, que consideram que a população esteja preparada para a mobilização e evacuação e que o sistema de alerta e evacuação sejam eficientes, a variável “População Mobilizada” apresentou índices mais significativos. Por fim, com base nos resultados, a utilização do modelo substituto baseado na Expansão de Caos Polinomiais para análise de incertezas e sensibilidade das variáveis de entrada se apresentou de forma satisfatória.

Palavras-chave: análise de sensibilidade global; quantificação de incertezas; modelagem hidrodinâmica; sistemas de alerta e evacuação; metamodelagem.

ABSTRACT

Metamodeling is frequently used to propagate uncertainties, i.e., to determine output statistics of a mathematical or computational model considering the probability distributions of the input variables, and to perform sensitivity analysis of these variables. In this context, the objective of this study was to conduct a sensitivity and uncertainty analysis of the input variables in the computational model Lifesim, used for modeling loss of life stemming from natural and technological flood events. To achieve this, the hydrodynamic and loss of life modeling for the hypothetical rupture of the Pampulha Dam in Belo Horizonte - MG was performed. The methodology of the study is divided into three stages. In the first stage, a two-dimensional hydrodynamic model was updated using HEC-RAS v. 6.3 software. The second stage involved deterministic scenarios considering efficient and inefficient alert and evacuation systems for both daytime and nighttime. In the third stage, a substitute model (metamodel), based on Polynomial Chaos Expansion, was constructed using MatLab software. Overall, the results of the substitute model were appropriate. The error of the Polynomial Chaos Expansion ranged from 10^{-3} to 10^{-2} for the simulated scenarios, and the mean squared error between the substitute model output and the computational model (LifeSim) resulted in differences of 1 to 2 fatalities. The global sensitivity analysis, calculated using the Sobol Index up to the third order, was conducted for the parameters "Alerted Population," "Mobilized Population," "Alert Emission," and "Hazard Identification." For all scenarios, the variables "Alert Emission" and "Hazard Identification" had the greatest contribution to the model output, i.e., to the number of fatalities. However, in the optimistic scenarios, which assume that the population is prepared for mobilization and evacuation and that the alert and evacuation system are efficient, the variable "Mobilized Population" presented more significant indices. In conclusion, the use of the substitute model based on Polynomial Chaos Expansion for uncertainty and sensitivity analysis of the input variables proved to be useful.

Keywords: global sensitivity analysis; uncertainty quantification; hydrodynamic modeling; alert and evacuation systems; metamodeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de informações do LifeSim	29
Figura 2 – Módulos de informações do LifeSim	31
Figura 3 – Alturas da estrutura - LifeSim.....	33
Figura 4 – Linha do tempo dos componentes do LifeSim – Módulo Alerta e Evacuação	34
Figura 5 – Distribuições de Probabilidades para curvas de planejamento no atraso do primeiro alerta	36
Figura 6 – Curvas empíricas simuladas para Difusão do Alerta.....	38
Figura 7 – Curvas empíricas simuladas para mobilização da população	40
Figura 8 – Curva de mobilização da população a pé ou vertical	41
Figura 9 – Etapas para análise de incertezas	49
Figura 10 – Editor de Passo de Tempo Variável dentro das Opções e Tolerâncias Computacionais.....	58
Figura 11 – Etapas para Construção do Metamodelo	59
Figura 12 – <i>Inputs</i> – LifeSim.....	60
Figura 13 – <i>Outputs</i> – LifeSim.....	61
Figura 14 – Arquivo em formato de texto - <i>Outputs</i> – LifeSim.....	62
Figura 15 – Localização da Área de Estudo – Lagoa da Pampulha.....	67
Figura 16 – Vertedouros da Lagoa da Pampulha.....	68
Figura 17 – Curva de Descarga do Vertedouro Tulipa - da Lagoa da Pampulha	68
Figura 18 – Curva de Descarga do Vertedouro <i>Side Channel</i> - da Lagoa da Pampulha	69
Figura 19 – Detalhe da Malha Computacional e Modelo Digital do Terreno – Modelo Hidrodinâmico Barragem da Pampulha.....	70
Figura 20 – Detalhe da Malha Computacional e Modelo Digital do Terreno – Modelo Hidrodinâmico Barragem da Pampulha.....	71
Figura 21 – Detalhe do Modelo Digital do Terreno com imagem do Google Earth ...	71
Figura 22 - Seção típica de abertura de brecha no maciço da barragem.....	74
Figura 23 – Hidrograma de Ruptura – Barragem da Pampulha	75
Figura 24 – Grades Estatísticas IBGE – caracterização da população	79
Figura 25 – Grades Estatísticas IBGE – Número de Habitantes na Área de Estudo	80
Figura 26 – Grades Estatísticas IBGE – Número de Domicílios na Área de Estudo	80

Figura 27 – Áreas de Ponderação – Censo Demográfico 2010 do IBGE.....	81
Figura 28 – Tipologia de Uso e Ocupação do vale a jusante	82
Figura 29 - Mapeamento da população total na área de interesse durante horário comercial (14:00).....	89
Figura 30 - Mapeamento da população total na área de interesse durante horário não-comercial (02:00).....	89
Figura 31 – Malha Viária utilizada na simulação do LifeSim	90
Figura 32 – Destinos Seguros para evacuação – PAE Barragem da Pampulha.....	91
Figura 33 – Destinos Seguros para evacuação – PAE Barragem da Pampulha.....	91
Figura 34 – Profundidades Máximas (1/2) – Mancha de Inundação	92
Figura 35 – Profundidades Máximas (2/2) – Mancha de Inundação	93
Figura 36 – Envoltória Máxima de inundação – Barragem da Pampulha.....	93
Figura 37 - Linha de metrô sobre a Avenida Cristiano Machado (São Bernardo/Minaslândia)	94
Figura 38 - Viaduto Aníbal Machado sobre a Avenida Cristiano Machado (Ipiranga/União).....	94
Figura 39 - Linha de Metrô sobre a Rua Sônia (Primeiro de Maio)	94
Figura 40 - Viaduto Paulo Mendes Campos sobre a Avenida Cristiano Machado (Suzana/Vila Primeiro de Maio).....	94
Figura 41 - Viadutos Fernando Sabino e Otto Lara Resende sobre a Avenida Cristiano Machado (Suzana/Maria Virgínia)	94
Figura 42 - Viaduto Carlos Drummond de Andrade sobre a Avenida Cristiano Machado (Palmares/São Paulo)	94
Figura 43 – Cenário Ineficiente – noturno	96
Figura 44 – Cenário Ineficiente – diurno	96
Figura 45 – Cenário Eficiente – noturno.....	96
Figura 46 – Cenário Eficiente – diurno	97
Figura 47 – Distribuição da variável <i>População Alertada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme – cenário pessimista diurno	99
Figura 48 – Distribuição da variável <i>População Mobilizada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista diurno	99
Figura 49 – Distribuição da variável <i>Emissão do Alerta</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista diurno	99

Figura 50 – Distribuição da variável <i>Identificação do Perigo</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista diurno	99
Figura 51 – Distribuição da variável <i>População Alertada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme – cenário pessimista noturno	99
Figura 52 – Distribuição da variável <i>População Mobilizada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista noturno	99
Figura 53 – Distribuição da variável <i>Emissão do Alerta</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista noturno	100
Figura 54 – Distribuição da variável <i>Identificação do Perigo</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista noturno	100
Figura 55 – Distribuição da variável <i>População Alertada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme – cenário otimista diurno	100
Figura 56 – Distribuição da variável <i>População Mobilizada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno	100
Figura 57 – Distribuição da variável <i>Emissão do Alerta</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno	100
Figura 58 – Distribuição da variável <i>Identificação do Perigo</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno	100
Figura 59 – Distribuição da variável <i>População Alertada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme – cenário otimista noturno	100
Figura 60 – Distribuição da variável <i>População Mobilizada</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno	100
Figura 61 – Distribuição da variável <i>Emissão do Alerta</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno	101
Figura 62 – Distribuição da variável <i>Identificação do Perigo</i> ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno	101
Figura 63 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário pessimista diurno	101
Figura 64 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário pessimista noturno	101
Figura 65 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário otimista diurno	101
Figura 66 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário otimista noturno	101
Figura 67 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário pessimista diurno	102
Figura 68 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário pessimista noturno	102
Figura 69 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário otimista diurno	103

Figura 70 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário otimista noturno.....	103
Figura 71 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Otimista Noturno	104
Figura 72 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Pessimista Diurno	104
Figura 73 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Otimista Diurno	105
Figura 74 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Pessimista Noturno.....	105
Figura 75 – Índice Total de Sobol – Cenário Pessimista Noturno	108
Figura 76 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Noturno	109
Figura 77 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Noturno	109
Figura 78 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Noturno	110
Figura 79 – Índice Total de Sobol – Cenário Pessimista Diurno	110
Figura 80 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Diurno.....	111
Figura 81 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Diurno	111
Figura 82 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Diurno.....	112
Figura 83 – Índice Total de Sobol – Cenário Otimista Diurno	113
Figura 84 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Diurno.....	113
Figura 85 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Diurno.....	114
Figura 86 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Diurno.....	115
Figura 87 – Índice Total de Sobol – Cenário Otimista Noturno	115
Figura 88 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Noturno.....	116
Figura 89 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Noturno.....	117
Figura 90 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Noturno.....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definição dos parâmetros de entrada requeridos no inventário estrutural	32
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de estimativa de perdas de vida empíricos e dinâmicos	25
Tabela 2 – Coeficientes das Curvas Empíricas de Atraso na Emissão do Alerta	35
Tabela 3 – Coeficientes das Curvas Empíricas de Difusão do Alerta	38
Tabela 4 – Modelos Substitutos	50
Tabela 5 – Métodos de Aprendizagem dos Modelos Substitutos.....	51
Tabela 6 – Famílias polinomiais utilizadas na ECP.....	53
Tabela 7 – Dados da barragem da Pampulha.....	67
Tabela 8 – Bases de dados utilizadas para construção do modelo hidrodinâmico de propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética da barragem da Pampulha	69
Tabela 9 – Coeficientes de Manning para as classes de uso e ocupação do solo adotadas	77
Tabela 10 - Número total absoluto de domicílios nas áreas de ponderação por tipo de ocupação e tipo de material de construção.....	83
Tabela 11 - Número total relativo de domicílios nas áreas de ponderação por tipo de ocupação e tipo de material de construção.....	83
Tabela 12 - Número de domicílios na área de interesse por tipo de ocupação e tipo de material de construção.	84
Tabela 13 - População total em números absolutos nas áreas de ponderação em função da faixa etária e horário do dia (número de pessoas)	85
Tabela 14 - População total em números absolutos nas áreas de ponderação em função da faixa etária e horário do dia (porcentagem).....	86
Tabela 15 - População na área de interesse em números absolutos em função da faixa etária e horário do dia (número de pessoas).....	86
Tabela 16 - Número de equipamentos nas regionais e na área de interesse do estudo	87
Tabela 17 – Variáveis utilizadas para análise de incertezas e sensibilidade do modelo LifeSim	98
Tabela 18 – Resultados de Truncamento e Grau polinomial para cada Cenário na construção no modelo substituto.....	102
Tabela 19 – Erro Quadrático Médio entre os dados do modelo computacional e o modelo substituto	106

Tabela 21 – Variáveis utilizadas para análise de sensibilidade – Índice de Sobol ..107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEPED - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil

ECP – Expansão de Caos Polinomial

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

HEC - Hydrologic Engineering Center

PAE – Plano de Ação Emergencial

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PSB – Plano de Segurança da Barragem

PRODABEL - a Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura da Prefeitura de Belo Horizonte

SAE – Sistema de Alerta e Evacuação

USACE - U.S. Army Corps of Engineers

h - Profundidade do escoamento

u - Velocidade do escoamento

w - Taxa de subida do nível de água

t - Tempo de evacuação disponível

B - Danos em construções

p - Probabilidade de atraso na decisão

t - Tempo

W - População alertada

$\frac{\Delta W}{\Delta t}$ - Taxa de população alertada

PU_t - População que não foi alertada

B_t - Coeficiente relacionado à eficácia do sistema de emissão de alerta direto

C_t - Coeficiente relacionado à eficácia da emissão do alerta indireto

P_t - Probabilidade acumulativa de ser mobilizado

a_m - Coeficiente relacionado à velocidade de mobilização da população

b_m - Coeficiente relacionado ao tempo médio para mobilização da população

MSE – Erro Quadrático Médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	24
2.1	Objetivo geral	24
2.2	Objetivos específicos.....	24
3	REVISÃO DA LITERATURA	25
3.1	Modelagem de perdas de vidas.....	25
3.1.1	Modelo Computacional HEC-LIFESIM	26
3.1.2	Sistemas de Alerta e Evacuação (SAE)	42
3.2	Quantificação de Incertezas	48
3.2.1	Metamodelagem.....	49
3.2.2	Análise de Sensibilidade.....	54
3.3	Modelagem Hidrodinâmica	56
3.3.1	Modelo Computacional HEC-RAS	56
4	METODOLOGIA	58
4.1	Construção do Metamodelo.....	58
4.1.1	Identificação dos <i>INPUTS</i>	59
4.1.2	Identificação dos <i>OUTPUTS</i>	61
4.1.3	Variáveis de Entrada	62
4.1.4	Construção do Algoritmo - MatLab	63
4.1.5	Análise de Sensibilidade Global – MatLab.....	65
4.2	Estudo de Caso	66
4.2.1	Área de Estudo.....	66
4.2.2	Modelo Hidrodinâmico.....	69
4.2.3	Modelo de Estimativa de Perdas de Vidas	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
5.1	Atualização do Estudo de Caso.....	92
5.1.1	Propagação da Onda de Ruptura.....	92
5.1.2	Estimativa de Perdas de Vidas.....	94
5.2	Modelo Substituto – Expansão de Caos Polinomial	98
5.2.1	Definição das Variáveis	98
5.2.2	Quantificação das Incertezas nas Variáveis de Entrada.....	99
5.2.3	Expansão dos Coeficientes Polinomiais	101
5.2.4	Validação Cruzada	105
5.2.5	Comparação das Saídas do Modelo Computacional e do Modelo Substituto	107

5.3	Análise de Sensibilidade Global	107
6	CONCLUSÕES	118
7	RECOMENDAÇÕES	120
	REFERÊNCIAS	121
	ANEXO A – Algoritmo MatLab – Modelo Substituto	132

1 INTRODUÇÃO

Segundo o relatório do *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (2019), cerca de 45% do número total de desastres naturais que ocorreram em todo o planeta no período de 2009 a 2018 foram ocasionados por inundações, afetando bilhões de pessoas. Portanto, é importante realizar abordagens que expliquem os processos, exposição, vulnerabilidade e o desenvolvimento complexo e dinâmico dos eventos de inundação (SCHROTER *et al.*, 2021).

O Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil (CEPED, 2020) elaborou um relatório sobre danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil. Para isso, foi realizado um levantamento de 64.429 registros com informações sobre prejuízos públicos e/ou privados em uma escala temporal de 25 anos (1995 a 2019). Os resultados atestaram que os eventos de inundação estão entre os mais recorrentes nos municípios brasileiros, com um prejuízo material de cerca de 32 bilhões de reais.

Grandes consequências no âmbito social, econômico e ambiental foram observadas nos últimos eventos de inundação tecnológicas: barragem de Fundão em Mariana/MG, no ano de 2015 (19 fatalidades), e barragem B1 da mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG, no ano de 2019 (270 fatalidades). Esses acontecimentos estão relacionados à ruptura de barragens de rejeitos de mineração.

No que concernem às inundações provenientes de rompimentos de barragens, foco do presente estudo, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010) e recentemente alterada pela Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020), tem como um dos seus objetivos a regulamentação das ações de segurança em todas as fases do projeto de barragens. O Plano de Segurança da Barragem (PSB) e o Plano de Ação Emergencial (PAE) são instrumentos da PNSB, e para implementação eficiente desses, é fundamental a disponibilidade de informação e estímulo à participação direta ou indireta da população nas ações preventivas e emergenciais.

Dessa forma, os dispositivos relacionados ao planejamento em situações emergenciais se tornaram mais rigorosos. Como exemplo disso, podem ser citadas

as exigências de determinação de vulnerabilidades sociais, de instalação de sistemas de alerta e definição de rotas de fuga, assim como de definição de pontos de encontro para possível evacuação.

A avaliação de risco de inundação, por ser uma abordagem prospectiva, se apresenta como uma ferramenta fundamental para o gerenciamento de emergências. Modelos hidrodinâmicos são amplamente utilizados no mapeamento de risco de inundação e propagação de onda de cheia; alguns exemplos de softwares utilizados são: o HEC-RAS, Flo-2D, RiverFlow-2D e MikeFlood (WU *et al.*, 2013; KIN *et al.*, 2013; TIMBADIYA *et al.*, 2015).

Para tal análise, a estimativa de perda de vida é uma etapa fundamental que permite identificar os potenciais impactos de eventos de inundação (JONKMAN *et al.*, 2003). Os resultados gerados em uma avaliação de risco podem auxiliar na tomada de decisão, avaliar eficiência dos sistemas de alerta e evacuação em termos de redução de perdas de vidas, avaliar diferentes cenários (KALININA; SPADA; BURGHER, 2021).

Lumbroso *et al.* (2021) realizaram um estudo de modelagem de perdas de vidas do rompimento da Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão, que rompeu no ano de 2019. Com isso, a partir dos resultados obtidos, destacaram a importância da implementação eficiente de sistemas de alertas e evacuação e utilização dos modelos numéricos para melhor entendimento desses processos.

A análise de incertezas na modelagem é um problema frequente nas ciências exatas e engenharia, e uma alternativa para avaliar essas incertezas foi proposta por Sudret (2007) por meio de modelos substitutos baseados em Expansão de Caos Polinomial. Além disso, é possível realizar análise de sensibilidade global das variáveis utilizadas nos modelos computacionais. Outra grande vantagem é a redução do tempo computacional, pois os modelos substitutos convergem em um tempo muito menor que os modelos computacionais, devido à técnica utilizada.

Os modelos substitutos são aplicados em diversas áreas do conhecimento, como, por exemplo, investigações nos coletores de energias biestáveis (NORENBERG *et al.* 2022; ALOUI *et al.* 2020), pás de turbinas eólicas (PAVLACK *et al.* 2022), turbinas

marítimas (NISPEL *et al.* 2021), drenagem urbana (NAGEL *et al.* 2020) e para rompimento de barragens (KALININA; SPADA; BURGHER, 2021). Com isso, o estudo das incertezas relacionadas aos modelos de perdas de vidas por meio de modelos substitutos torna-se uma alternativa para um melhor entendimento desses processos e para aprimorar métodos mais eficientes utilizando a ciência de dados.

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O primeiro capítulo é a **INTRODUÇÃO**, que estabelece o contexto e apresenta as razões que justificam a realização desta pesquisa. O segundo capítulo compreende os **OBJETIVOS** gerais e específicos determinados para a presente pesquisa. O terceiro capítulo trata da **REVISÃO DA LITERATURA**, que aborda os conceitos e estado da arte da modelagem de perdas de vidas, sistemas de alertas e evacuação e análise de incertezas. O quarto capítulo é sobre a **METODOLOGIA** aplicada para a realização do presente trabalho. No quinto capítulo são apresentados os **RESULTADOS E DISCUSSÃO** obtidos a partir da metodologia discutida e aplicada neste trabalho. No capítulo seis são abordadas as **CONCLUSÕES** geradas, considerando os métodos aplicados e os resultados, avaliando cada objetivo desta pesquisa. Por fim, no capítulo sete, são redigidas as **RECOMENDAÇÕES** para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é aplicar técnicas de metamodelagem para realizar a análise de sensibilidade global e quantificar as incertezas na modelagem de perdas de vida, relacionando os sistemas de alerta e evacuação associados a inundações decorrentes de potenciais rompimentos de barragens.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Atualizar a mancha de inundação decorrente da ruptura hipotética da Barragem da Pampulha-MG;
- Atualizar as análises de exposição e vulnerabilidade da população em risco e o modelo de perdas de vida associado à Barragem da Pampulha; e
- Construir um modelo substituto com base na Expansão de Caos Polinomial (ECP) para quantificação de incertezas e análise de sensibilidade global das variáveis de entrada.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Modelagem de perdas de vidas

Na avaliação de consequências ocasionadas por inundações tecnológicas, uma variável fundamental é o número de fatalidades (LUMBROSO *et al.* 2021). Os métodos para a estimativa de perdas de vida diferem em complexidade e princípios de modelagem, sendo classificados como empíricos e dinâmicos – a maior parte de estudos da literatura apresenta abordagens empíricas (SILVA & ELEUTÉRIO, 2019).

Os modelos empíricos são baseados em casos históricos, considerando a taxa de mortalidade da população em risco e as características do evento (SILVA, 2020). Os modelos dinâmicos baseados em agentes possuem um banco de dados com informações espaciais do evento de inundação, das construções expostas e das vulnerabilidades da população, no qual interagem na tomada de decisão do indivíduo e a causa da fatalidade (SILVA, 2020).

Silva & Eleutério (2019) realizaram um levantamento dos métodos de perdas de vidas, nos âmbitos de inundações ribeirinhas e costeiras, e de rupturas de barragens, apresentando as variáveis utilizadas nessas estimativas. Na Tabela 1 é apresentado um compilado do estudo citado, no qual as variáveis de profundidade do escoamento (h), velocidade do escoamento (u), taxa de subida do nível de água (w), tempo de evacuação disponível (t) e o danos em construções (B) são analisados para cada modelo apresentado.

Tabela 1 – Modelos de estimativa de perdas de vida empíricos e dinâmicos

Modelo	Variáveis					Princípio
	h	U	w	t	B	
Inundações ribeirinhas e costeiras						
Friedman (1975)					X	Empírico
Waarts (1992)	X					Empírico
Vrouwenvelder e Steenhuis (1997)	X		X		X	Empírico
HKV (2000)	X		X			Empírico
Jonkman (2001)	X	X	X	X		Empírico
Penning-Rowse <i>et al.</i> (2005)	X	X	X	X		Empírico
Zhai <i>et al.</i> (2006)					X	Empírico
Jonkman <i>et al.</i> (2008)	X	X	X			Empírico
Ruptura de barragens						
Brown e Graham (1988)				X		Empírico
DeKay e McClelland (1993)				X		Empírico
Graham (1999)	X	X		X		Empírico
Reiter (2001)	X	X		X		Empírico

Johnstone <i>et al.</i> (2005)	X	X	X	X	X	Dinâmico
Aboelata e Bowles (2005)	X	X	X	X	X	Dinâmico
Peng e Zhang (2012)	X	X		X	X	Empírico
USBR (2015)	X	X				Empírico

Fonte: Silva & Eleutério (2019).

Segundo Dawson *et al.* (2011), a modelagem baseada em agente é a mais adequada para enfrentar os desafios de simular processos e consequências de eventos de inundação, devido à capacidade de capturar interações e respostas dinâmicas em um ambiente espacial.

Com isso, destacam-se os métodos dinâmicos *Life Safety Model* (JOHNSTONE *et al.*, 2005) e *LifeSim* (ABOELATA & BOWLES, 2005). O modelo *LifeSim* foi inicialmente incorporado pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) em uma versão simplificada no programa HEC-FIA (USACE, 2015), depois integralmente no HEC-LifeSim (USACE, 2018), e, recentemente, atualizado para o LifeSim 2.0 (USACE, 2021). O modelo em questão possibilita a incorporação de cenários relacionados a sistemas de alerta e evacuação da população exposta (USACE, 2021).

3.1.1 Modelo Computacional HEC-LIFESIM

A modelagem dinâmica do HEC-LifeSim é espacialmente distribuída em um sistema para estimar potenciais fatalidades e danos econômicos diretos decorrentes de eventos de inundação (USACE, 2021). O modelo realiza simulações explícitas relacionando o alerta do perigo decorrente do evento de inundação e a mobilização da população potencialmente exposta, dentro de edifícios e em redes rodoviárias (USACE, 2021).

USACE (2021) define os objetivos do LifeSim como: i) apoiar efetivamente a redução do número de fatalidades associados a inundações; ii) avaliar os riscos existentes versus os riscos toleráveis; iii) calcular danos econômicos; iv) compreender a dinâmica de fatalidades associados a eventos de inundações; e v) auxiliar na criação/melhora de planos de ações emergenciais.

As iterações do modelo são realizadas por meio do método estatístico de Monte Carlo. Para isso, cada simulação inicia com o primeiro aviso de evacuação ou considerando o primeiro tempo de chegada de onda de inundação, e finda quando os dados da série

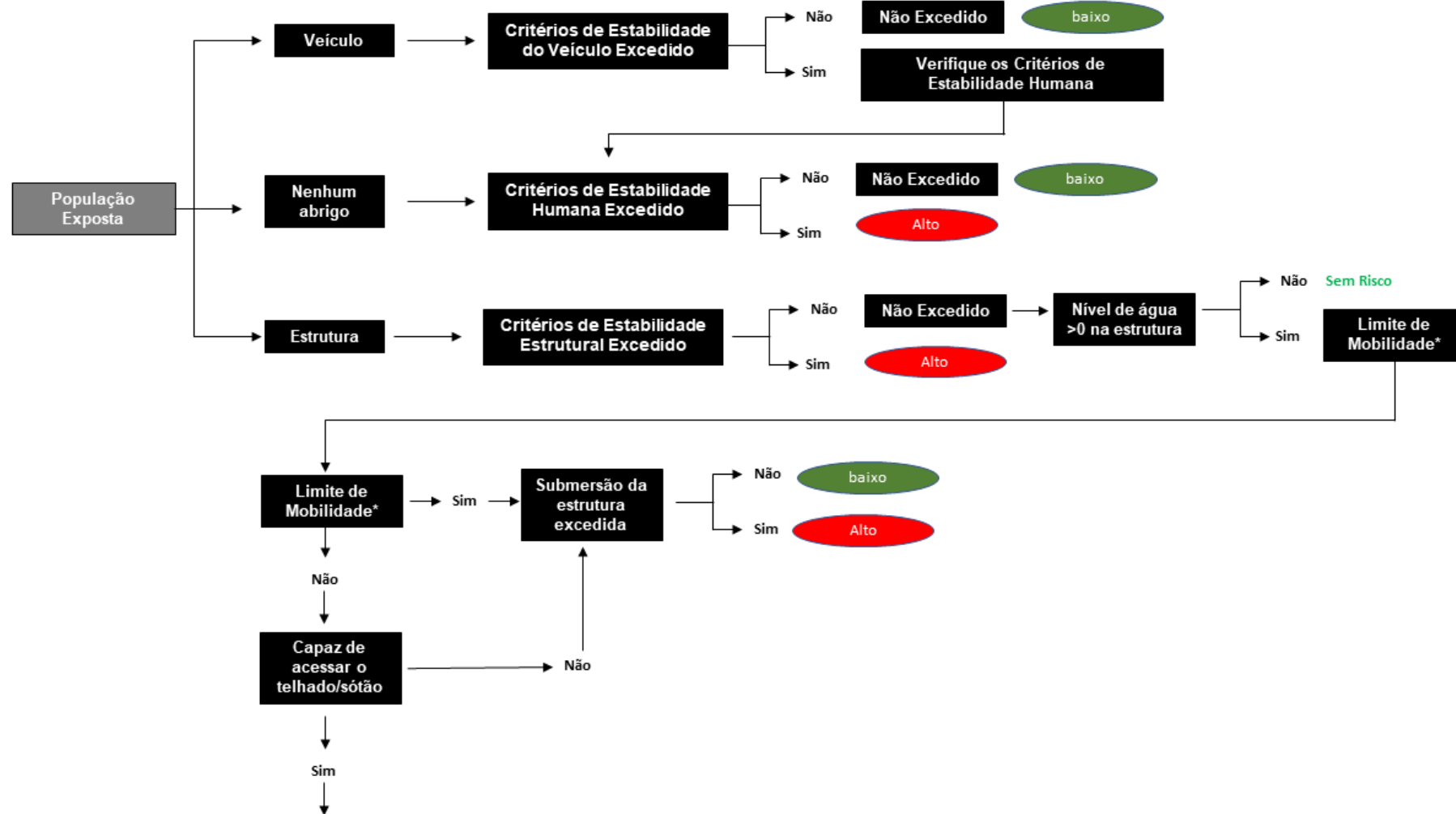
temporal do modelo hidrodinâmico tenham finalizado e propagado o hidrograma de ruptura ou cada grupo mobilizado tenha concluído as ações de evacuação (USACE, 2021). A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário, o modelo analisa o banco de dados fornecidos e segue as seguintes etapas:

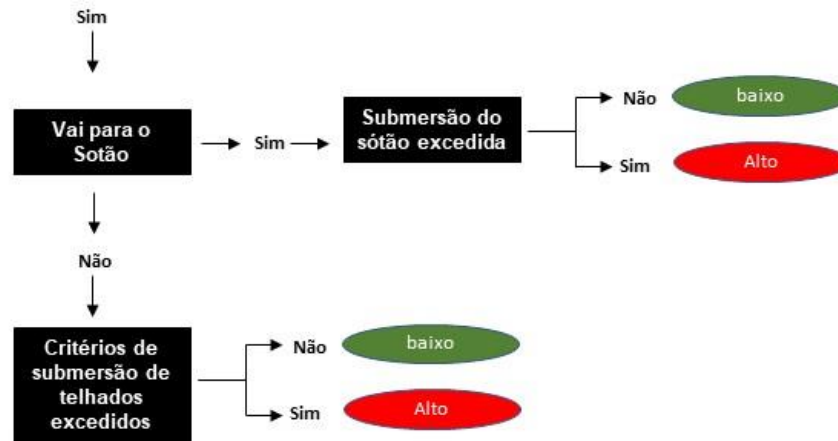
- analisa as características hidráulicas (profundidade, velocidade e risco hidrodinâmico) em cada estrutura e rede rodoviária, a partir das estimativas do modelo hidrodinâmico;
- amostra o tempo de emissão do alerta para a população em cada Zona de Planejamento de Emergência;
- agrupa a população em grupos de evacuação, determinados pelo tipo de ocupação;
- propaga o primeiro alerta para a população exposta e, a partir disso, estima o tempo que a população em cada estrutura recebe o alerta;
- os evacuados ficam imobilizados quando a profundidade de sobrevivência é excedida ou um destino seguro não pode ser encontrado ao tentar reencontrar;
- para os grupos, são atribuídas zonas de risco (nenhum, baixo risco e alto risco). As pessoas que evacuaram e chegaram ao seu destino em segurança, são classificadas na zona em que não há risco. As pessoas que mobilizaram, porém foram apanhadas, são classificadas a uma zona de perigo alta ou baixa. Essa última classificação é dada com base nas condições hidráulicas máximas do local que essas pessoas se encontram ou na estabilidade que se encontram os veículos utilizados na mobilização;
- a análise de estabilidade de veículos no LifeSim é baseada em eventos históricos, nos quais se entende que os veículos são deslocados para águas mais profundas ou com maior velocidade após perderem a estabilidade. A estabilidade do veículo é comprometida quando a força de atrito se iguala à força hidrodinâmica exercida pela água em movimento. Para essa avaliação, o modelo utiliza curvas de vulnerabilidade de risco de inundação, frequentemente aplicadas em projetos de rodovias. Essas curvas estabelecem limites inferiores e superiores utilizados na análise dos veículos;

- as pessoas que não mobilizaram, com base em informações de estabilidade estrutural do abrigo disponível e submersão humana em profundidades máximas de inundação (nível de água em uma estrutura que pode afetar a probabilidade de sobrevivência), também são classificadas em uma zona de perigo alto ou baixo;
- grupos de evacuação ficam imobilizados quando a profundidade máxima de sobrevivência é excedida ou um destino seguro não pode ser encontrado; e
- estima o número de fatalidades com base na taxa de fatalidade amostrada da zona de risco.


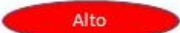
Na Figura 1 é apresentado o fluxo de informações para a classificação de pessoas nas zonas de perigo (alto e baixo) no modelo LifeSim.

Figura 1 – Fluxo de informações do LifeSim





Legenda

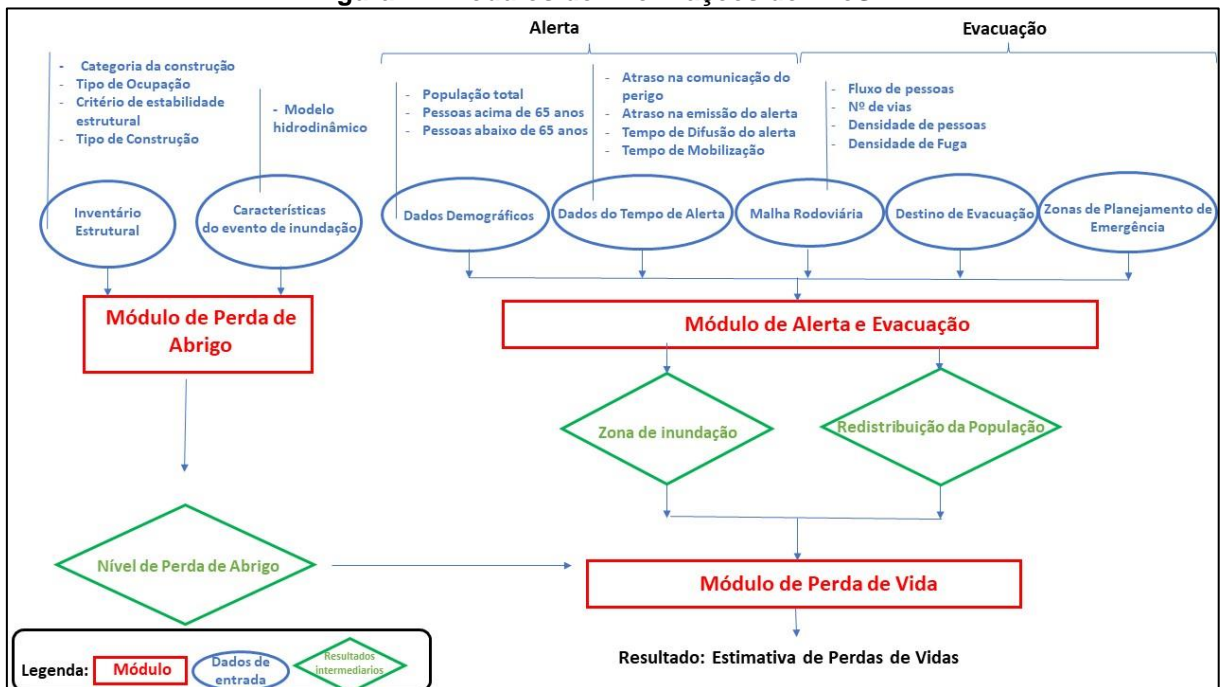
-  baixo Curva de taxa de fatalidade de baixo risco amostra de
-  Alto Curva de taxa de fatalidade de alto risco

*a idade é o principal fator na determinação da mobilidade limitada

Fonte: Adaptado USACE (2021).

A progressão do evento de inundação e as ações da população exposta ao perigo são processos dinâmicos. Logo, o LifeSim simula as interações entre os processos considerando três principais módulos: Módulo de Perda de Abrigo, Módulo de Alerta e Evacuação e Módulo de Perda de Vida (Figura 2) (USACE, 2021).

Figura 2 – Módulos de informações do LifeSim



Fonte: Adaptado de Kalinina *et al.* (2021).

3.1.1.1 Módulo de Perda de Abrigo

Neste módulo são inseridos os dados de entrada do evento de inundação e inventário estrutural dos edifícios existentes na área exposta ao perigo. O modelo hidrodinâmico pode ser importado de softwares como HEC-RAS e FLO-2D, a partir dos quais as informações de tempo de chegada de onda, profundidades e velocidades são avaliadas.

Com relação ao inventário estrutural, os dados de entrada necessários são apresentados no Quadro 1. Para cada estrutura existente, é necessário relacionar um tipo de ocupação (residencial, comercial, industrial e público).

Quadro 1 – Definição dos parâmetros de entrada requeridos no inventário estrutural

Parâmetro de Entrada	Definição
Tipo de Ocupação	Define a classificação da estrutura.
Número de andares	Número de andares da estrutura.
Tipo de Construção	Material de construção predominante da estrutura.
Altura da Fundação	Diferença entre a elevação do terreno e elevação do térreo.
Altura do Piso Térreo	Diferença entre a elevação do piso e o teto.
População com menos de 65 anos (período noturno)	Estimativa de pessoas dentro de uma estrutura com menos de 65 anos durante a noite.
População acima de 65 anos (período noturno)	Estimativa de pessoas dentro de uma estrutura com idade acima de 65 anos durante a noite.
População com menos de 65 anos (período diurno)	Estimativa de pessoas dentro de uma estrutura com menos de 65 anos durante o dia.
População acima de 65 anos (período diurno)	Estimativa de pessoas dentro de uma estrutura com idade acima de 65 anos durante o dia.

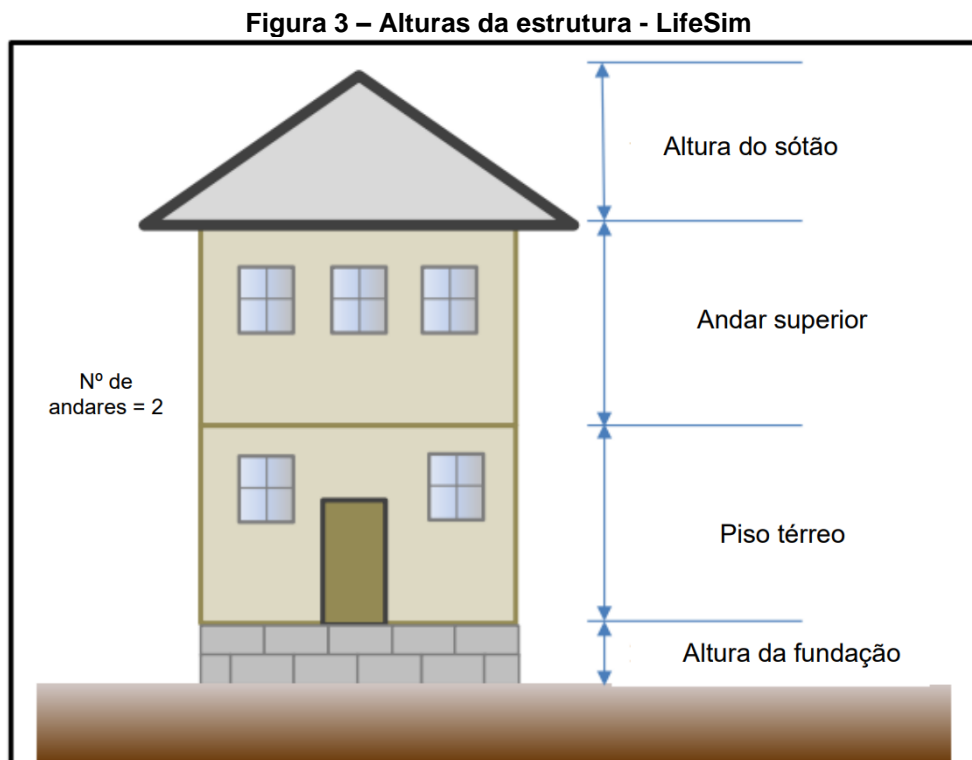
Fonte: Adaptado de USACE (2021).

Considerando o inventário estrutural, os dados de tipo de ocupação podem ter influência no resultado do número de fatalidades. A seguir serão apresentados alguns aspectos importantes do modelo computacional LifeSim:

- todos os ocupantes de uma única estrutura de qualquer tipo de ocupação (exceto apartamentos/residência multifamiliar) recebem o aviso de alerta ao mesmo tempo;
- o modelo determina que os tipos de ocupação agrícola, residencial unifamiliar e dormitórios institucionais recebem o aviso de alerta simultaneamente, e por isso, as linhas do tempo de alerta e evacuação serão as mesmas para esses grupos;
- o modelo adota uma chance de 95% do ocupante alcançar o telhado ou sótão ao evacuar verticalmente, ou seja, com altura do solo maior que o nível de água do local. Apenas 5% de ocupantes com mobilidade total estarão em um edifício sem acesso para o telhado ou sótão ou optará em não realizar essa tentativa. Além disso, os ocupantes com mobilidade limitada não estão inclusos nessa possibilidade;
- o modelo adota a probabilidade de que 90% dos ocupantes que irão evacuar verticalmente e que podem se locomover para o telhado irão tomar essa decisão. Os outros 10% não teriam conhecimento, vontade ou habilidade para chegar no telhado;

- o modelo considera que as pessoas que irão evacuar a pé utilizariam estradas regulamentadas, como ruas, avenidas, rodovias etc. que são monitoradas como vias de passagem de veículos, ou seja, não são considerados caminhos alternativos e outras infraestruturas, como, por exemplo, pessoas atravessando praças públicas para acessar o destino seguro mais rápido. Isso pode ser uma limitação do modelo e até mesmo imprecisão, pois as pessoas podem evacuar cortando caminhos ou outras áreas não acessíveis para veículos; e
- é necessário que seja definida a quantidade de pessoas que evacuarão por unidade de veículo. O padrão do modelo é de três pessoas, exceto para dormitórios institucionais. O encadeamento de viagem, ou seja, possíveis caronas ou paradas feitas durante a viagem para adicionar mais pessoas ao veículo não está incluída na simulação do LifeSim.

As alturas consideradas para fundação, térreo, andares superiores e sótão são utilizadas para definir como ocorrerá a evacuação vertical pelas pessoas (Figura 3) sendo consideradas, aproximadamente, as alturas de 3 metros para cada andar e térreo e 2 metros para sótão.

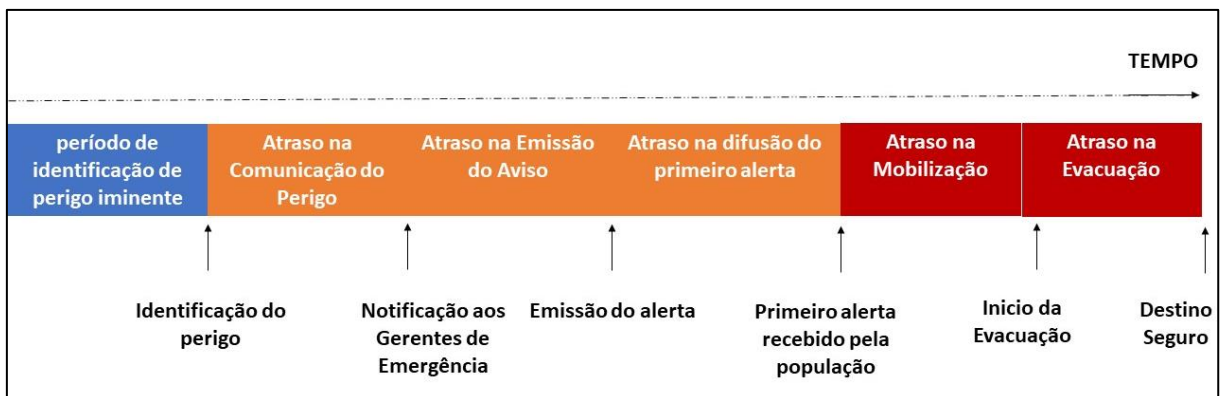


Fonte: Adaptado de USACE (2021).

3.1.1.2 Módulo de Alerta e Evacuação

Neste módulo são considerados parâmetros de alerta e evacuação que, em conjunto, descrevem uma linha de tempo desde a identificação do perigo até a evacuação da população exposta (Figura 4). Além disso, a linha do tempo inclui atrasos que podem ocorrer no processo de alerta e evacuação das pessoas, o que pode influenciar no número de fatalidades estimada no modelo.

Figura 4 – Linha do tempo dos componentes do LifeSim – Módulo Alerta e Evacuação



Fonte: Adaptado de USACE (2021).

O perigo iminente é definido quando ocorre o rompimento da barragem e pode ser determinado considerando simulações no período diurno e noturno. No entanto, a identificação desse perigo é dada pelo monitoramento da barragem e, com isso, pode haver o atraso na comunicação do perigo pelo identificador responsável para a equipe de Gerenciamento de Emergências. Esse atraso pode estar relacionado a diversos eventos, como, por exemplo, o não atendimento telefônico dos responsáveis técnicos pelo Plano de Ação Emergencial da Barragem (falha na comunicação), não seguir o protocolo de emergência, não obtenção de possíveis aprovações internas etc. Porém, destaca-se que há muita incerteza nesse âmbito, devido ao tempo de rompimento da barragem ser dependente do modo de falha do evento de ruptura.

Após isso, é necessário emitir o alerta à população exposta ao perigo. O tempo de emissão do alerta é dado após notificar os gerenciadores de emergência até a tomada de decisão de emissão de alerta à população exposta. Os atrasos na emissão do alerta estão relacionados principalmente na compreensão, confirmação e descrição do perigo pelos Gerenciadores de Emergência.

Para isso, o LifeSim utiliza a metodologia de Sorenson & Mileti (2015), que realizaram um extenso levantamento, com base em eventos históricos, a fim de coletar informações sobre emissão, difusão e conteúdo de alertas públicos, em casos de emergências. Com base nesse levantamento, especificamente de 70 casos de acidentes e liberações químicas, os autores identificaram os principais impactos relacionados ao tempo de emissão do primeiro alerta às comunidades, sendo destacados quatro importantes fatores: i) formalização dos procedimentos de planejamento e implementação; ii) relações interpessoais e desempenho individual (treinamentos regulares); iii) desempenho do sistema de monitoramento da barragem; e iv) fatores situacionais, como, por exemplo, falta de energia elétrica e infraestrutura física afetada.

Discorrendo sobre a pesquisa supracitada, os autores elaboraram curvas empíricas de planejamento de atraso na emissão do alerta, com base em eventos históricos, utilizando a formulação matemática de Lindell *et al.* (2002), que propõem um modelo empírico baseado na estimativa de tempo de evacuação em larga escala. No modelo proposto por Sorenson & Mileti (2015), as curvas empíricas de atraso na emissão do alerta são dadas pela Equação 7.

$$p = 1 - e^{(-at^b)} \quad (7)$$

na qual p é a probabilidade de atraso na decisão; t é o tempo ([t]); e a e b são coeficientes específicos para o ajuste dos dados empíricos. Tais coeficientes estão listados na Tabela 2.

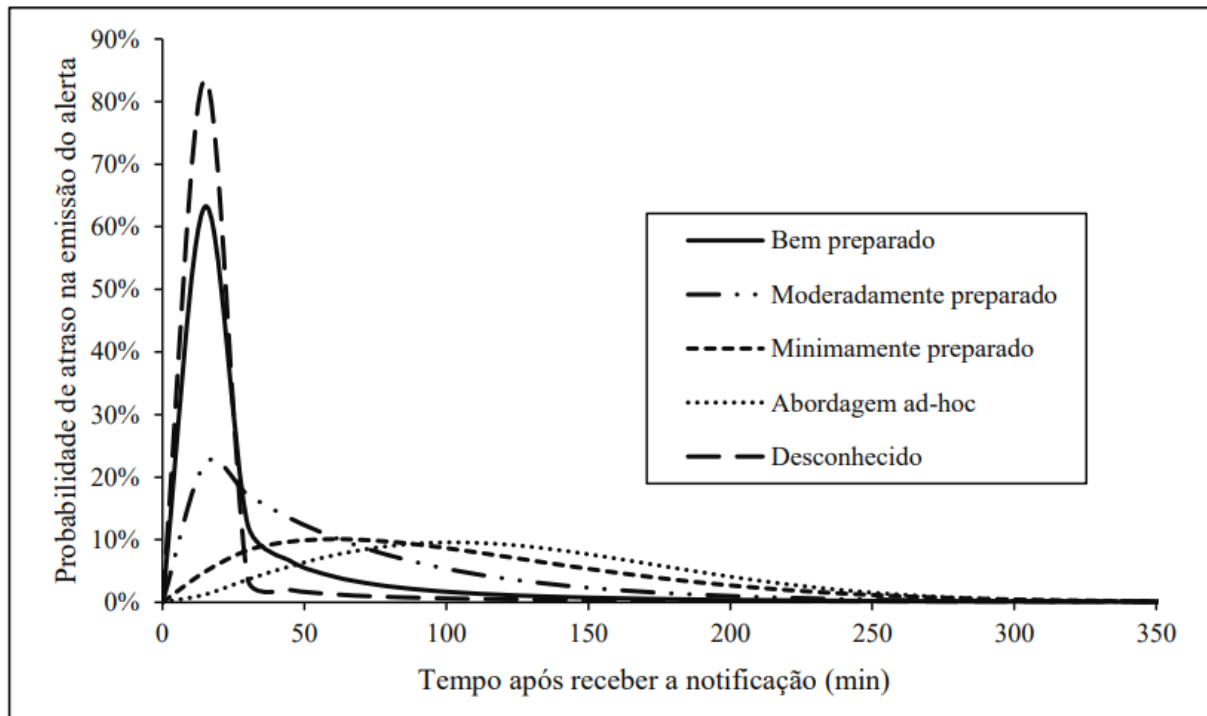
Tabela 2 – Coeficientes das Curvas Empíricas de Atraso na Emissão do Alerta

Curva	Coeficiente	
	a	b
A (bem preparado)	1,7	0,6
B (moderadamente preparado)	1,0	1,0
C (minimamente preparado)	0,4	1,5
D (Abordagem <i>ad-hoc</i>)	0,2	2,0
Desconhecido	0,83	1,28

Fonte: adaptado de Sorenson & Mileti (2015) e USACE (2021).

Diante do exposto, as curvas probabilísticas de atraso na emissão do alerta em relação ao tempo, em minutos, estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Distribuições de Probabilidades para curvas de planejamento no atraso do primeiro alerta



Fonte: Adaptado de Sorenson & Mileti (2015).

Após a emissão do alerta para a população, o LifeSim estima o atraso na difusão do primeiro alerta, ou seja, a velocidade do alerta emitido está chegando à população exposta ao perigo, com base na metodologia de Sorenson & Mileti (2015). O meio de comunicação do primeiro alerta considera os meios oficiais destinados ao Plano de Ação Emergencial, como, por exemplo, sirenes e alto falantes, e os meios secundários, como redes sociais, televisão, vizinhos, familiares etc.

Sorenson & Mileti (2015) afirmam que o recebimento do alerta não implica necessariamente a consciência do perigo pela pessoa exposta ao evento de inundação. No entanto, o LifeSim não engloba essa abordagem, apenas implica a propagação da informação. Os autores ainda destacam o baixo número de publicações científicas sobre o tema com levantamento de dados e equações ou curvas empíricas.

O LifeSim considera nas simulações apenas as pessoas em risco localizadas na mancha de inundação. As pessoas fora da área de risco, que podem, por exemplo, entrar na área de risco sem conhecimento prévio do evento, não são incluídas na modelagem de perdas de vidas. Sorenson & Mileti (2015) destacam quatro

importantes fatores que influenciam a difusão do alerta, quais sejam: i) tecnologias e abordagens para a implantação de sistemas de alerta eficazes e atuais; ii) maior variedade de canais para fornecer informações à população exposta (sirenes, telefones, redes sociais etc.); iii) infraestrutura obstruída, como, por exemplo, sistemas de alerta baseados em energia elétrica; e iv) repetição contínua do primeiro alerta.

Sorenson & Mileti (2015) apresentam um levantamento, com base em eventos históricos, da eficiência de cada meio de comunicação e como isso repercute na difusão do alerta. Com base nisso, os autores apresentam a equação que avalia a taxa de variação do recebimento do primeiro alerta de uma população ao longo do tempo (Equação 8).

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = PU_t * (B_t + C_t - B_t * C_t) \quad (8)$$

na qual W é a população alertada; $\frac{\Delta W}{\Delta t}$ é a taxa de população alertada no tempo t ; PU_t é a população que não foi alertada no tempo t ; B_t é o coeficiente relacionado à eficácia do sistema de emissão de alerta direto; e C_t é o coeficiente relacionado à eficácia da emissão do alerta indireto.

A partir dessa equação, os autores apresentam quatro curvas modelo de difusão de alerta, geradas para a ocorrência de eventos no período diurno e noturno.

- Tipo A – Curva de Difusão Rápida: utiliza múltiplos canais de alerta tecnológicos, com velocidades muito rápidas e ampla frequência na disseminação da informação;
- Tipo B – Curva de Difusão Moderadamente Rápida: utiliza vários canais de alerta; no entanto, nem todas são tecnologias recentes e com rápida velocidade de disseminação da informação;
- Tipo C – Curva de Difusão Moderada: utiliza tecnologias tradicionais para canais de alerta, excluindo tecnologias avançadas; e
- Tipo D – Curva de Difusão Lenta: utiliza canais de alerta com tecnologia limitada com disseminação única.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes relacionados às curvas empíricas de difusão de alerta proposto pelos autores. Destaca-se que tais informações foram geradas a partir do levantamento realizado com base em séries históricas. Além disso, os autores sugerem intervalos de valores considerando a tecnologia de emissão de alerta adotada. Ressalta-se ainda que tais coeficientes não estão atualizados para o cenário brasileiro e que não consideram as mudanças relativas à percepção e reposta da população a atualização dos novos sistemas de alerta, sendo necessária a atualização de tais coeficientes.

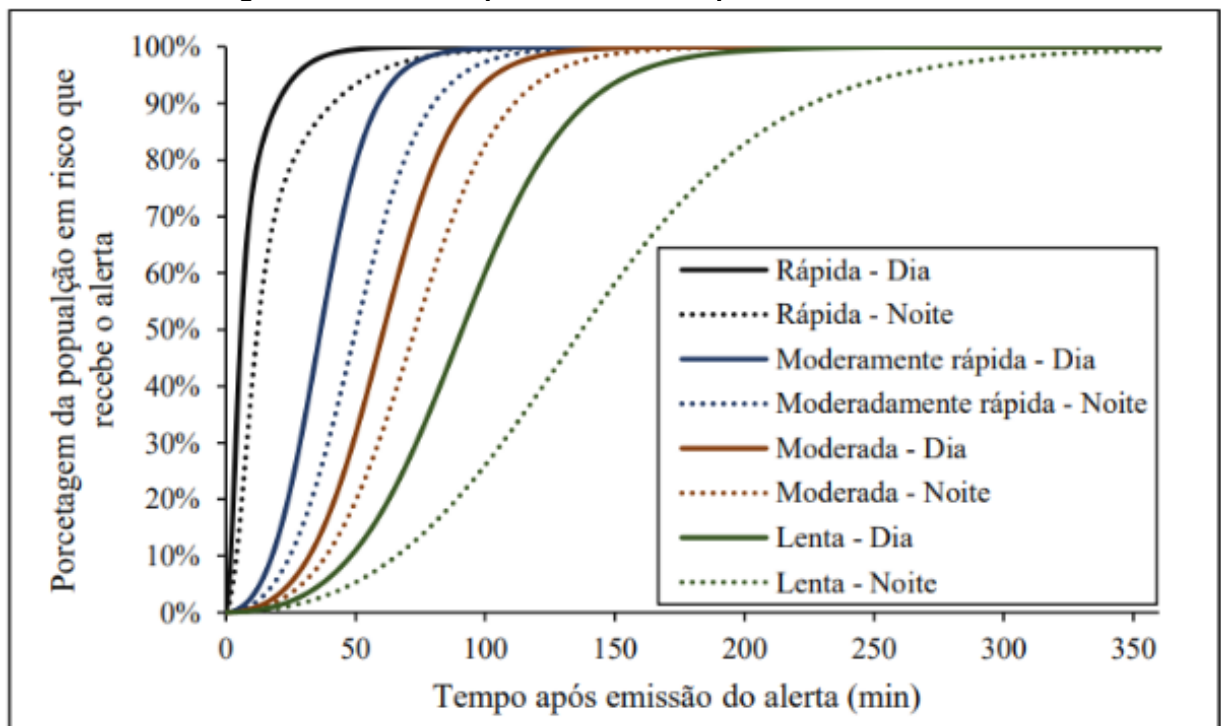
Tabela 3 – Coeficientes das Curvas Empíricas de Difusão do Alerta

Curva Período	A		B		C		D	
	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite
B_t	5	10	50	70	100	120	150	180
C_t	0,10	0,05	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04	0,02

Fonte: adaptado de Sorenson & Mileti (2015).

As curvas simuladas para representação da difusão do alerta, considerando a equação e coeficientes supracitados, são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Curvas empíricas simuladas para Difusão do Alerta



Fonte: Adaptado de Sorenson & Mileti (2015).

No LifeSim é possível determinar um método de avaliação de incertezas, no qual o modelo apresenta valores máximos e mínimos da curva escolhida pelo usuário.

Após o recebimento do aviso de alerta, a população exposta ao perigo inicia a mobilização e evacuação para alcançar pontos seguros. O LifeSim, segundo a metodologia de Sorenson & Mileti (2015), determina uma taxa máxima de mobilização com base nas ações de proteção, ou seja, no preparo da população e percepção do risco para mobilização.

O LifeSim determina o início de ação protetora (mobilização) a partir do afastamento da pessoa da área potencial de inundação em direção a abrigos de emergência e pontos de segurança. Sorenson & Mileti (2015) afirmam que a orientação correta na emissão do alerta discorre em uma melhor mobilização da população. Além disso, clareza e precisão na informação transmitida são fundamentais para melhor percepção do risco.

Sorenson & Mileti (2015) apresentam, com base em um extenso levantamento de casos históricos, uma abordagem para avaliar a probabilidade de mobilização da população exposta ao perigo (Equação 9).

$$P_t = 1 - e^{\left(-\frac{t^2}{a_m * b_m^2}\right)} \quad (9)$$

na qual P_t é a probabilidade acumulada de ser mobilizado no tempo t ; a_m é o coeficiente relacionado à velocidade de mobilização da população; e b_m é o coeficiente relacionado ao tempo médio para mobilização da população.

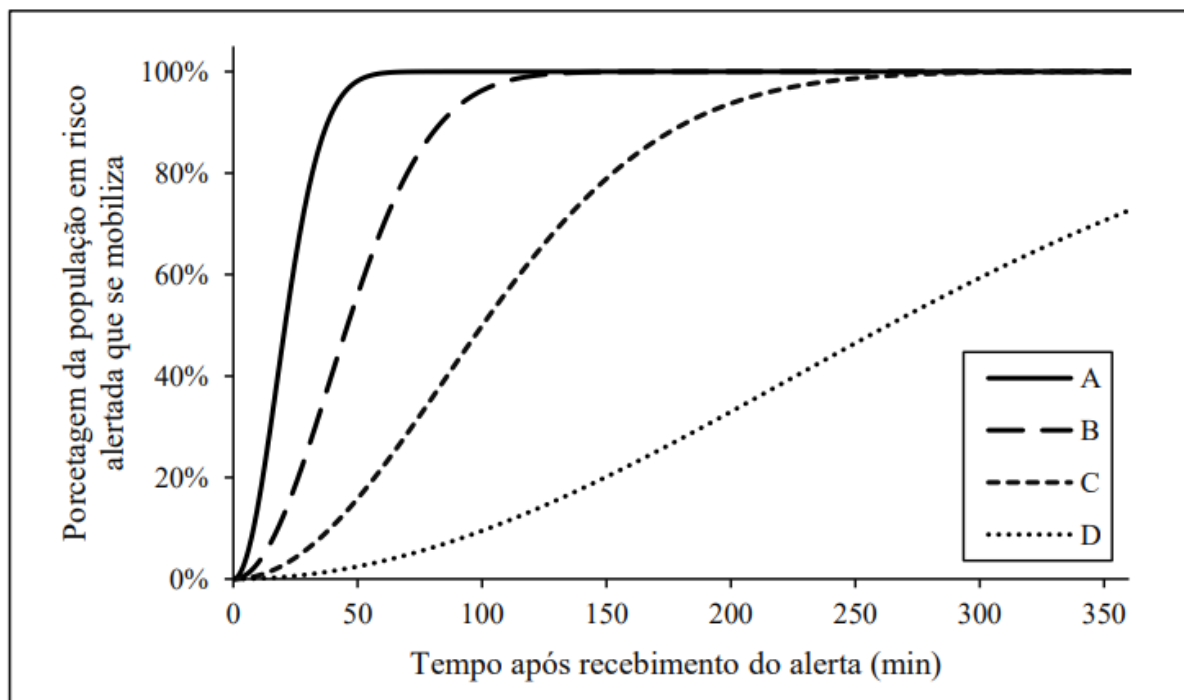
Diante do exposto, os autores também apresentam quatro curvas que representam cenários alternativos relacionados à mobilização da população, assim como os coeficientes estimados para cada cenário:

- Curva A ($a_m = 1$ e $b_m = 25$): para ações de mobilização em casos de riscos iminentes e que possuam sistema de planejamento de emergência tecnológico e eficaz;
- Curva B ($a_m = 1,5$ e $b_m = 45$): considerando um sistema de planejamento de emergência incerto, alguns avanços no sistema de alerta e preparação da população;

- Curva C ($a_m = 2$ e $b_m = 85$): ações de mobilização com planejamento de emergência incerto; não há sistema de alerta;
- Curva D ($a_m = 2,5$ e $b_m = 200$): não há planejamento nem investimento em ações de emergência.

Considerando os coeficientes apresentados, na Figura 7 ilustra as curvas empíricas para mobilização.

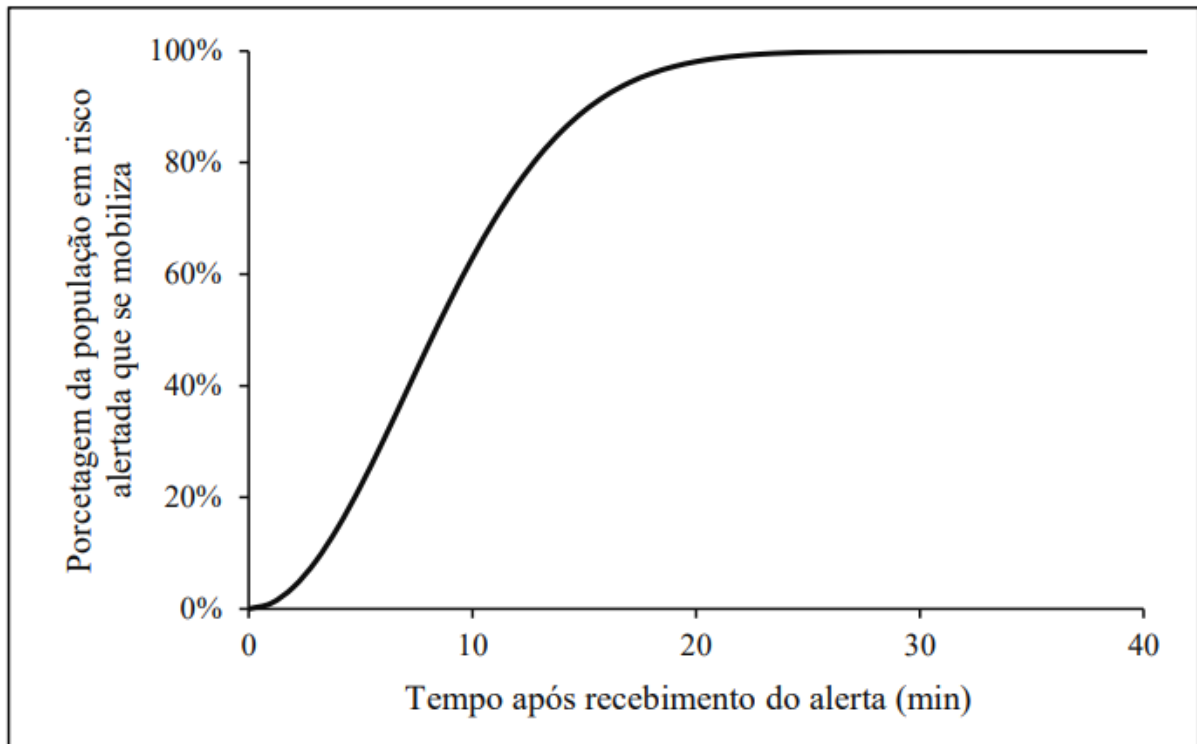
Figura 7 – Curvas empíricas simuladas para mobilização da população



Fonte: Adaptado de Sorenson & Mileti (2015).

Sorenson & Mileti (2015) ainda apresentam a curva adicional para mobilização vertical ou a pé. Nesse caso, a curva de mobilização adota os coeficientes $a_m = 0,7$ e $b_m = 12$ para mobilização, considerando a ruptura da barragem em pequeno intervalo de tempo (Figura 8).

Figura 8 – Curva de mobilização da população a pé ou vertical



Fonte: Adaptado de Sorenson & Mileti (2015).

No Lifesim, o atraso na mobilização da população é avaliado com base em uma função empírica, sendo disponibilizadas as seguintes classificações:

- Boa: os Gerenciadores de Emergência estão preparados para emitir uma mensagem convincente e bem elaborada que motive a população que a recebe na tomada de decisão;
- Ruim: os Gerenciadores de Emergência não estão preparados para emitir uma mensagem; e
- Desconhecida: há pouca ou nenhuma informação sobre a preparação dos Gerenciadores de Emergência.

Com isso, as curvas propostas por Sorenson & Mileti (2015) são discretizadas para escolha do usuário, conforme a área a ser estudada.

3.1.1.3 Módulo de Perda de Vida

O LifeSim é um modelo que aborda a estimativa da perda de vida do indivíduo ou de um grupo pequeno de agentes, determinando a localização de todos os agentes expostos que não alcançaram os pontos de segurança. Isso é dado pela estimativa de localização, abrigo e condições hidráulicas de cada agente exposto. Além disso, é realizada a classificação da zona de risco de cada agente exposto, sendo essas:

- Alto Risco: condição em que os critérios de estabilidade ou submersão do indivíduo, veículo ou estrutura são excedidos;
- Baixo Risco: condição em que os critérios de estabilidade ou submersão do indivíduo, veículo ou estrutura não são excedidos.

Após a avaliação da zona de risco, o LifeSim realiza uma análise de taxa de fatalidade a fim de considerar a sobrevivência ou não do indivíduo exposto. Essa avaliação é feita a partir de um banco de dados históricos de fatalidades dos eventos de inundação.

3.1.2 Sistemas de Alerta e Evacuação (SAE)

Na literatura recente, há um destaque para pesquisas sobre os Sistemas de Alerta e Evacuação (SAE), com ênfase no comportamento dos evacuados levando em consideração fatores humanos, bem como na modelagem numérica computacional desses sistemas. A maioria dos trabalhos na literatura foca no teor comportamental. Wang *et al.* (2021) trazem uma revisão de literatura recente sobre o aspecto comportamental, com um estudo visando identificar os principais aspectos do comportamento humano no processo de evacuação, a partir de um extenso levantamento de base sobre o tema. Os autores apresentam dois principais âmbitos durante a evacuação: a pré-evacuação e a evacuação.

A etapa de pré-evacuação se relaciona com estudos de decisão, treinamentos sobre as rotas de fugas e monitoramento pelos gerenciadores do risco. Para o caso de eventos de inundação, os autores ressaltam que existe a possibilidade de identificação do perigo, por meio de monitoramentos técnicos, em tempo hábil para emissão do alerta.

Na etapa de evacuação, os autores analisam estudos sobre a decisão dos ocupantes da área exposta ao evento, na qual os evacuados reconhecem e validam o alerta, avaliam e se preparam para evacuar e, por fim, ocorre a evacuação. No reconhecimento e validação, a população afetada recebe informações por meio de sinais físicos (fumaça, chamas, aumento de nível d'água, etc.) e/ou canais de informações (mídias, vizinhos, sistema de alerta). Além disso, a população pode perceber condições e estados que estão fora de sua experiência habitual, como incertezas sobre o evento, sobrecarga de informações, estresse relacionado à urgência do evento e a lembranças de eventos passados.

Na etapa de avaliação e preparação, a população afetada avalia as informações recebidas e define a gravidade da situação e o risco associado. A partir disso, é dada a resposta da população diante do evento, gerando a decisão de onde evacuar, como evacuar e quando evacuar (incluindo a opção de abrigo no local). Uma vez que a decisão de evacuar é tomada, a evacuação física real acontece.

Ademais, Wang *et al.* (2021) afirmam que a evacuação está significativamente relacionada a fatores sociodemográficos, como idade e raça ou gênero, e fatores socioeconômicos, como, por exemplo, escolaridade ou características domésticas. Além disso, três características pessoais são destacadas: experiência de risco, conhecimento do local e habilidades/dificuldades. Por exemplo, quando enfrentam diferentes ambientes (edifícios, rede de tráfego), os evacuados tendem a fazer uso de sua familiaridade com a área afetada. Essas discussões promovem a melhoria contínua dos modelos de evacuação existentes, propondo sugestões de maior clareza do comportamento humano frente a emergências. Porém, como estudos recentes foram aplicados principalmente em países que possuem maior incidência de desastres naturais (Thakur *et al.*, 2022; Verma *et al.*, 2022) e com sistemas de alerta e evacuação altamente desenvolvidos (Chen *et al.*, 2022; Huo *et al.*, 2022), eles focam principalmente na avaliação do comportamento humano para a melhoria contínua dos sistemas existentes.

No entanto, esses questionamentos são associados a fatores sociais e comportamentais que geram muitas incertezas difíceis de se quantificar. Sorensen (2000) apresenta dois objetivos principais relacionados a sistemas de alerta: i)

detectar desastres iminentes; e ii) fornecer informações para a população em risco, permitindo que aqueles em perigo tomem decisão de evacuar. Mileti & Sorensen (1990) destacam que cada SAE possui particularidades e requisitos inerentes ao evento analisado. Com isso, diversos estudos e modelos foram desenvolvidos e testados para diferentes tipos de catástrofes: terremotos, tsunamis, inundações, vapores tóxicos, incêndios e furações/tornados.

No âmbito de SAE relacionado à ocorrência de tsunamis, Arai (2013) elaborou um estudo com foco nos alertas de tsunami emitidos pela Agência Meteorológica. Os resultados apontaram a importância do uso da linguagem como comunicação efetiva de prevenção de desastres, assim como elaborar diretrizes para procedimentos de evacuação sob a perspectiva da mensagem mais apropriada a ser utilizada para motivar as pessoas a agir rapidamente e reduzir a exposição ao risco.

No âmbito de SAE em acidentes que envolvem vapores tóxicos e químicos, Gai & Deng (2019) realizaram um estudo para analisar a difusão dos avisos de evacuação com base em estudos de caso na China. Para isso, foram realizados 401 questionários com pessoas que deveriam ter evacuado durante o acidente e foram analisados os métodos e canais da notificação de evacuação. Com base nos resultados, observou-se que, ao emitir alertas de evacuação, a polícia/corpo de bombeiros e o rádio/televisão foram os principais canais utilizados para informar a população local durante a evacuação. Porém, esses métodos não são padronizados e os autores sugerem a importância de determinar comunicadores com métodos comprovadamente eficientes de notificação e alto grau de aceitação pública.

Ainda nesse contexto, Hosseinnia *et al.* (2018) elaboraram um trabalho em uma área com a presença várias usinas, a fim de fornecer um quadro de informações que minimizassem os conflitos na comunicação em casos de emergência. Para isso, os autores consideraram diferentes níveis de emergências, e, para cada nível, uma resposta diferente. Como resultado, foi proposta uma ferramenta de gestão para tomada de decisão na área de estudo.

Chen *et al.* (2022) elaboraram um estudo no âmbito de melhoria de SAE com foco em eventos de incêndios em longos túneis de metrô. A estratégia abordada e proposta foi avaliar as rotas de fugas e o modo de ventilação de um metrô em Pequim, na China,

a partir de uma análise quantitativa de três estratégias de evacuação e uma análise de sensibilidade. Os principais resultados apontaram que as escadas são gargalos na evacuação do túnel. Os autores também avaliaram a importância da direção do vento nesses eventos, pois a fumaça difunde no veículo e força os passageiros a evacuarem para trás do metrô, sendo necessária a abertura das portas traseiras do metrô para que o sistema de ventilação consiga controlar o alcance de difusão da fumaça e garantir a segurança da área de passagem de evacuação.

Grajdera *et al.* (2021) concluíram, a partir de estudos com evacuados em um caso real, que, para eventos de incêndios florestais, a resposta comportamental da população é relacionada diretamente à idade, raça e renda, e que celulares são usados de forma positiva na evacuação dos habitantes da área de risco. Além disso, os autores concluíram que, sem o aviso prévio, a evacuação da população exposta é mais lenta, e ressaltam a dificuldade de identificação do início dos eventos de incêndios.

Hostetter & Naser (2022) elaboraram um estudo sobre a inclusão, nos modelos de alerta e evacuação, de pessoas com deficiências, com transtornos de saúde mental e condições crônicas de saúde. Porém, a discussão se manteve no âmbito de eventos de incêndios. Os autores enfatizaram que o tema engloba todos os tipos de eventos e precisa ser discutido. Além disso, discutem sobre o uso de ferramentas computacionais para a melhor eficiência dos SAE e quais incertezas estariam relacionadas na inclusão de pessoas com necessidades especiais nos modelos numéricos.

Goodie *et al.* (2019) estudaram o comportamento dos evacuados dos furacões Harvey e Irma nos Estados Unidos. Foram formuladas hipóteses com base em eventos anteriores ao ocorrido e, após isso, foram realizadas entrevistas com a população evacuada durante a ocorrência dos furacões com o objetivo de validar as hipóteses formuladas. As hipóteses iniciais foram as seguintes: i) a experiência prévia com eventos anteriores relacionados a furacões e trauma em geral estaria positivamente associada ao comportamento durante a evacuação; ii) o tempo de percepção do risco estaria associado à evacuação mais rápida; e iii) receber mensagens mais claras para evacuar seria mais significativo para a mobilização da população que o local de

moradia (Flórida e Geórgia versus Texas). Com base nas entrevistas e formulários, observou-se que adultos mais jovens e aqueles que viviam com crianças eram mais propensos a evacuar. Por outro lado, os idosos relataram receber menos ordens de evacuação e evacuaram menos. Além disso, a experiência dos evacuados foi relacionada a impactos emocionais de eventos anteriores.

Para eventos de inundação, Bilali *et al.* (2021) avaliaram o risco de inundação para uma barragem localizada no Marrocos. Os autores utilizaram os modelos HEC-RAS e HEC-LIFESIM a partir de duas estratégias de evacuação na malha viária: uma eficiente (com rotas de fugas, fechamento de estradas etc.) e outra ineficiente. Os resultados mostraram que a inclusão de medidas de gestão na malha viária durante a evacuação diminuiu significativamente o número de fatalidades.

Kalinina *et al.* (2021) avaliaram as incertezas relacionadas às variáveis de entrada do LifeSim considerando a ruptura hipotética de barragens na Suíça. Para isso, os autores apresentaram uma metodologia utilizando um ajuste ao modelo original, denominado de metamodelo, baseado na ECP para a realização de um maior número de simulações com menor tempo computacional. Os resultados desse estudo mostraram que as seguintes variáveis de entrada, no contexto suíço, possuem maior impacto para variabilidade na estimativa de perdas de vidas: população residente, taxa de fatalidade (considerando a curva empírica do LifeSim) e atraso na emissão do alerta. A partir desse estudo, foi possível realizar uma análise de sensibilidade inerente aos dados de entrada e com isso obter maior confiabilidade nos resultados gerados pelo modelo numérico computacional. Esses resultados auxiliam na elaboração de planos de ações emergenciais mais eficientes, considerando a avaliação na efetividade de notificação, mobilização e rastreamento de incertezas de cada variável.

Lumbroso *et al.* (2021) elaboraram um estudo sobre o potencial de redução de perdas de vida no rompimento da barragem de rejeitos B1 da Mina Córrego do Feijão. Os resultados mostraram que, se um aviso de alerta tivesse sido emitido 15 minutos antes da falha, e assumindo que as pessoas demorariam 1 min para reagir e saberiam para onde evacuar, o número de mortes (270 no acidente real) poderia ter sido reduzido a zero. No entanto, os autores afirmam que o estudo visou apresentar a importância dos

sistemas de alerta e evacuação em situações de emergência e recomendam que, em estudos futuros, sejam analisadas as incertezas associadas a esses sistemas a às simulações. Ainda segundo os autores, para que os planos de ação emergencial de barragens de rejeitos sejam eficazes, eles precisam ser realistas para os agentes reguladores e partes interessadas. Destaca-se também que vários trabalhos foram realizados no contexto específico brasileiro, objetivando-se o avanço da utilização dessa ferramenta para subsídio no gerenciamento de riscos de inundação e o atendimento aos requisitos legais de segurança de barragens.

Lara & Lohn (2019) exploraram a interface do software HEC-LifeSim como ferramenta para fins de planejamento e estruturação eficiente de PAE. Os resultados indicaram que o LifeSim consegue simular diferentes cenários de SAE para diferentes cenários sociodemográficos, sendo possível analisar qual cenário é mais eficiente considerando-se as características físicas do local exposto ao evento de inundação.

Concomitantemente ao estudo anterior, Matos & Eleutério (2019) analisaram um SAE por meio de uma análise prospectiva da ruptura hipotética da barragem de Fundão, avaliando diferentes cenários que consideram a existência e inexistência de sistemas de alerta. O trabalho demonstrou, por meio das simulações realizadas, os benefícios potenciais associados à implementação de SAE e destacou a importância de estudos do software HEC-LifeSim na estimativa de perdas de vidas, SAE e perdas materiais e econômicas.

Silva (2020) avaliou a aplicabilidade de dois modelos de estimativa de perdas de vidas com princípios diferentes, RCEM e HEC-LifeSim, em inundações causadas por rompimento de barragens de rejeitos. Como estudo de caso, foram avaliados, nas mesmas condições observadas durante os eventos, os acidentes em barragens de rejeitos ocorridos em São Francisco (Miraí/MG), em 2007, e em Fundão (Mariana/MG), em 2015. Para isso, o autor caracterizou a população vulnerável ao risco utilizando a grade estatística (IBGE, 2016) e microdados (IBGE, 2010) do censo demográfico de 2010, a partir dos fatores sociodemográficos, socioeconômicos e de uso e ocupação do solo. Relatórios e reportagens foram as fontes para caracterização do processo de alerta e evacuação reais. Para o caso de Miraí, um evento mais lento, as simulações foram condizentes com a realidade observada. Já para Mariana, um

evento com tempo de chegada curto, houve uma superestimativa das fatalidades simuladas face ao ocorrido, indicando a limitação do modelo em representar a evacuação em situações de inundações rápidas e com alta taxa de mobilização da população. Ademais, os resultados apontaram para a maior eficiência do modelo LifeSim na estimativa de perdas de vidas, comparado ao modelo empírico utilizado.

Silva *et al.* (2021) analisaram o impacto da ação dos agentes envolvidos em emergências e das características do sistema de alerta, considerando a ruptura hipotética da barragem da Lagoa da Pampulha, localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais. Para cada cenário de sistema de alerta, foram observados tempos ideais mínimos de ação dos agentes para redução das fatalidades. Para situações com tempos similares de antecipação de alerta, foram identificadas variações que indicam ineficiência ou eficiência da evacuação (difusão e mobilização da população), o que remete à relevância da informação e do treinamento das pessoas na área de risco. Os autores ainda destacam a necessidade de mais esforços em relação à base empírica para caracterização e compreensão desse processo, que atualmente tem como fonte estudos e regiões diferentes do contexto brasileiro.

3.2 Quantificação de Incertezas

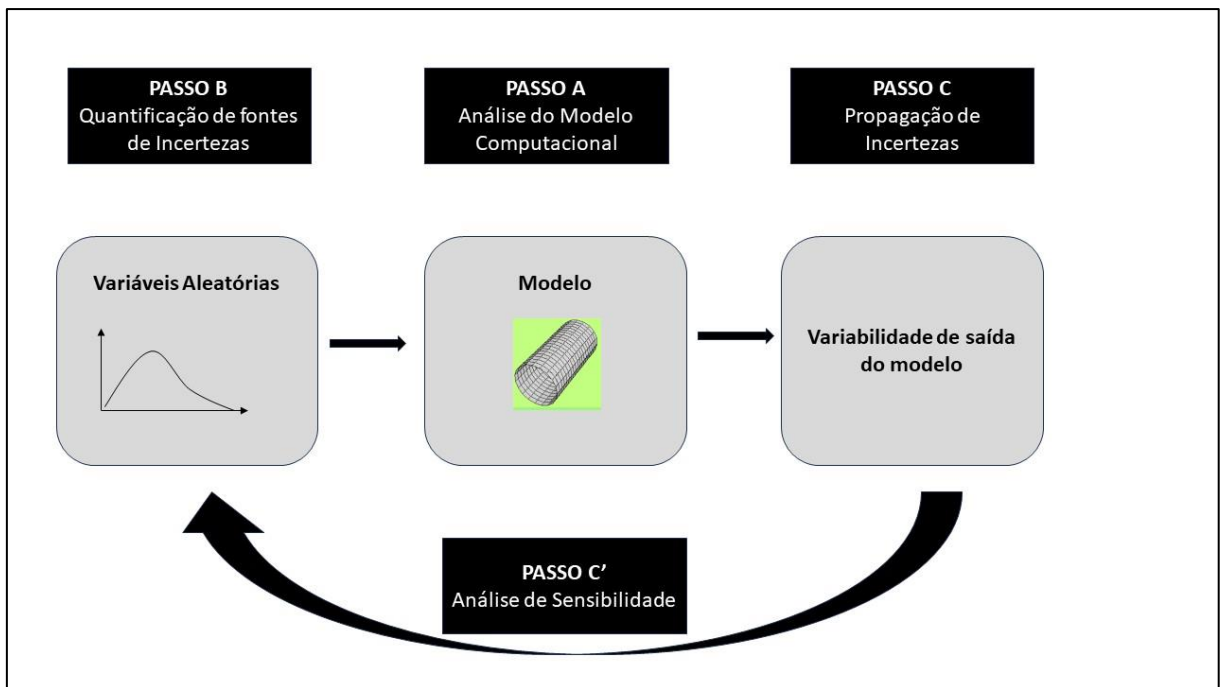
Os modelos existentes para representação de eventos que utilizam grandezas físicas estão sujeitos a incertezas, seja nas variáveis de entrada ou nas condições de contorno. Assim, para um modelo ser uma boa representação do fenômeno que ele deseja caracterizar, se torna essencial o tratamento das incertezas que afetam a resposta final do modelo (SUDRET, 2007). A análise de incertezas é imprescindível para os tomadores de decisão, uma vez que o objetivo é avaliar com melhor clareza os riscos envolvidos.

Como as variáveis de entrada desses modelos são considerados aleatórias, então os métodos estocásticos são os mais utilizados para a análise de incertezas. Nesse universo, os métodos mais eficientes serão aqueles que requerem um número menor de iterações para convergir, isso é, métodos cujo resultado reduza o tempo computacional (SHIELDS & SUDRET, 2019).

A análise de sensibilidade permite que se avalie quais variáveis de entrada determinam maior variabilidade na saída do modelo. A análise pode ser local e global. A análise de sensibilidade local verifica a variabilidade dentro de apenas um parâmetro sem considerar a interação com os outros, enquanto a análise de sensibilidade global avalia a variabilidade de saída do modelo a partir do conjunto de variáveis de entrada (SUDRET, 2007).

Na Figura 9 é apresentada uma simplificação esquemática das etapas de análise de incertezas, proposto inicialmente por Sudret (2007). Na etapa inicial, passo A, é realizada a caracterização e identificação clara de entradas e saídas do modelo. Na etapa seguinte, passo B, são avaliadas as variáveis de entrada do modelo que caracterizam o espaço físico e que podem conter incertezas devido à variabilidade e até mesmo desconhecimento. A partir disso, essas variáveis são modeladas por distribuições teóricas de probabilidades. No passo C, as incertezas das variáveis de entrada pré-definidas são propagadas na saída do modelo. No passo C' é possível identificar quais variáveis possuem maior impacto na variabilidade de resposta do modelo.

Figura 9 – Etapas para análise de incertezas



Fonte: Adaptado de Sudret (2007).

3.2.1 Metamodelagem

A metamodelagem pode ser utilizada para propagar incertezas, além de reduzir o tempo computacional. Para isso, determina estatísticas de saída de um modelo matemático ou computacional considerando distribuições de probabilidades nas variáveis de entrada (SUDRET, 2007). Alguns métodos tradicionais são amplamente utilizados para a propagação de incertezas, como exemplo, o Método de Monte Carlo (MMC).

Contextualizando brevemente, o método de Monte Carlo consiste em extrair um conjunto de amostras independentes e identicamente distribuídas de uma população e simulá-las. No entanto, o número de simulações do modelo numérico de interesse exige grande despesa computacional para convergir os dados de saída, sendo necessárias outras técnicas que se mostrem mais favoráveis nesse quesito (LE GRATIET *et al.*, 2017).

Com isso, a metamodelagem oferece uma solução para essa limitação, substituindo um modelo complexo por um estatisticamente equivalente e de baixo custo de simulação (LE GRATIET *et al.*, 2017; SUDRET *et al.*, 2019), o qual é construído com base em um número limitado de execuções do modelo verdadeiro.

Logo, a metamodelagem vem se tornando uma ferramenta com aplicações importantes no campo da engenharia e matemática aplicada. Porém, devido à complexidade subjacente de sua formulação, essa técnica tem visto relativamente pouco uso fora desses campos (MARELLI; LUTHEN; SUDRET, 2022).

Sudret *et al.* (2017) apresentaram alguns exemplos de métodos utilizados para se aproximarem de um modelo computacional a partir dos dados de saída por meio de um algoritmo de aprendizado (Tabela 4).

Tabela 4 – Modelos Substitutos

Método	Equação	Parâmetros
Expansão de Caos Polinomial	$\mathcal{M}(x) = \sum_{\alpha \in \mathbb{N}^M} y_{\alpha} \Psi_{\alpha}(x)$	y_{α}
Aproximadores de Tensor de Baixa Ordem	$\mathcal{M}(x) = \sum_{l=1}^R b_l \left(\prod_{i=1}^M v_l^{(i)}(x_i) \right)$	$b_l, z_{k,l}^{(i)}$
Processos Gaussianos	$\mathcal{M}(x) = \beta^T f(x) + Z(x, w)$	$\beta, \sigma_z^2, \theta$

Máquinas de Vetores de Suporte	$\mathcal{M}(x) = \sum_{i=1}^m a_i K(x_i, x) + b$	c, b
Redes Neurais	$\mathcal{M}(x) = f_n(\dots f_2(b_2 + f_1(b_1 + w_1 x)w_2))$	w, b

Fonte: Adaptado de Sudret *et al.* (2017) e Sudret (2021)

A metodologia de aprendizagem de cada modelo substituto é apresentada, de forma resumida, na Tabela 5.

Tabela 5 – Métodos de Aprendizagem dos Modelos Substitutos

Método	Método de Aprendizagem
Expansão de Caos Polinomial	Integração em Grades Esparsas, Mínimos Quadrados e Amostragem Compressiva
Aproximadores de Tensor de Baixa Ordem	Mínimos Quadrados Alternativos
Processos Gaussianos	Máxima Verossimilhança, Inferência Bayesiana
Máquinas de Vetores de Suporte	Programação Quadrática

Fonte: Adaptado de Sudret (2021)

A Expansão de Caos Polinomial (ECP) é uma técnica utilizada para modelar e propagar incertezas em simulações computacionais estocásticas por aproximação em termos de base de polinômios ortonormais (SUDRET, 2007). Esse conceito foi originalmente introduzido por Wiener (1938). No entanto, sua aplicação veio somente no final do século XX, com o trabalho pioneiro de Ghanem & Spanos (1991). A principal vantagem do método ECP é que o número de pontos necessários para uma boa estimativa das estatísticas da saída de um simulador, comparado com o método de Monte Carlo, é menor (LUTHEN *et al.* 2022). Os métodos ECP apresentam taxas de convergência rápidas com ordem de expansão crescente (SUN *et al.* 2021).

O método de Expansão de Caos Polinomial (ECP) foi proposto inicialmente para resolver equações diferenciais estocásticas. A ECP permite criar uma relação robusta entre a resposta do sistema e as variáveis aleatórias, uma vez que pode determinar a média e o desvio padrão da resposta (SUDRET, 2007).

Xiu & Karniadakis (2002) generalizaram o polinômio de Caos para a família de polinômios ortogonais, aplicando a resolução de equações diferenciais parciais elípticas com incertezas. Sudret (2006) e Sudret (2007) apresentaram a utilização da ECP no contexto de análise de sensibilidade. A ECP tem o benefício adicional de pertencer à classe de expansões espectrais, uma característica que lhe permite

fornecer diretamente índices de sensibilidade baseados em variância (para os índices de Sobol), sendo essa a principal motivação para a escolha da EPC como modelo probabilístico neste trabalho. Diante disso, torna-se possível realizar a análise de sensibilidade do modelo, considerando a análise estatística das estimativas de saída do modelo computacional probabilístico e do modelo computacional complexo.

A Expansão do Caos Polinomial (ECP) é dada pela aproximação de uma função quadraticamente integrável (que representa a saída de um modelo físico), por meio de uma soma finita de funcionais ortogonais. Em outras palavras, uma função $\mathcal{M}(x)$ pode ser representada como uma soma de um conjunto único de coeficientes relacionados a uma base de polinômios ortogonais multidimensionais (RAMOS, 2014; MARELLI; LUTHEN; SUDRET, 2022).

$$Y = \mathcal{M}(x) = \sum_{\alpha \in \mathbb{N}^M} y_{\alpha} \Psi_{\alpha}(x)$$

na qual Y é o modelo computacional de variância finita; $\mathcal{M}(x)$ é o modelo substituto; $\Psi_{\alpha}(x)$ é a família de polinômios ortogonais em relação a (x) ; $\alpha \in \mathbb{N}^M$ são multi-índices que identificam os componentes dos polinômios; e y_{α} são os coeficientes determinísticos de valor real.

A soma da Equação 10 precisa ser truncada para uma soma de valores finitos; para isso é selecionado um conjunto de multi-índices de polinômios multivariados $\mathcal{A} \subset \mathbb{N}^M$, conforme apresentado na Equação 11.

$$\mathcal{M}(x) \approx \mathcal{M}^{PC}(x) = \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} y_{\alpha} \Psi_{\alpha}(x) \quad (11)$$

Logo, a base polinomial $\Psi_{\alpha}(x)$ é comumente construída a partir de um conjunto de polinômios univariados ortogonais $(\phi_k^{(i)}(x_i))$, que satisfazem a relação apresentada na Equação 12 (MARELLI; LUTHEN; SUDRET, 2022).

$$\left(\phi_j^{(i)}(x_i), \phi_k^{(i)}(x_i) \right) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{\mathcal{D}_{x_i}} \phi_j^{(i)}(x_i) \phi_k^{(i)}(x_i) f_{x_i}(x_i) dx_i = \delta_{jk} \quad (12)$$

na qual i é a variável de entrada, em relação à qual eles são ortogonais, relacionada à família de polinômios correspondente; j e k são os graus polinomiais

correspondentes; $f_{x_i}(x_i)$ a é distribuição marginal da i -ésima variável de entrada; e δ_{jk} é o símbolo de Kronecker, para, em determinada condição, atender aos valores 0 e 1.

A partir disso, os polinômios multivariados $\Psi_\alpha(\mathbf{x})$ são construídos como o produto tensorial de seus equivalentes univariados (Equação 13). O produto tensorial é uma operação que combina os polinômios univariados em todas as combinações possíveis, formando assim os polinômios multivariados.

$$\Psi_\alpha(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \prod_{i=1}^M \phi_{\alpha_i}^{(i)}(x_i) \quad (13)$$

Essa construção do produto tensorial é fundamental para criar uma base completa e adequada de polinômios multivariados que permitem representar adequadamente funções complexas e fenômenos de múltiplas variáveis. Devido às relações de ortogonalidade na Equação 12, os polinômios multivariados também são ortogonais (Equação 14).

$$\Psi_\alpha(\mathbf{x}), \Psi_\beta(\mathbf{x}) = \delta_{\alpha\beta} \quad (14)$$

na qual $\delta_{\alpha\beta}$ é um símbolo de Kronecker estendido para o caso multidimensional.

Marelli *et al.* (2022) apresentam as famílias clássicas de polinômios utilizadas como base para expandir as variáveis aleatórias (Tabela 6). Essas famílias clássicas fornecem uma base para a construção das funções utilizadas na Expansão do Caos Polinomial. Ao combinar esses polinômios univariados por meio de produtos tensoriais ou outras técnicas, é possível representar de forma eficiente a incerteza e a variabilidade em sistemas complexos, permitindo a propagação de incertezas e análise de sensibilidade mais precisa e eficiente.

Tabela 6 – Famílias polinomiais utilizadas na ECP

Distribuição	Família de Polinômios Univariados	Base Hilbertiana
Uniforme	Legendre	$P_k(x) / \sqrt{\frac{1}{2k+1}}$
Gaussiano	Hermite	$H_{ek}(x) / \sqrt{k!}$
Gama	Laguerre	$L_k^a(x) / \sqrt{\frac{\Gamma(k+a+1)}{k!}}$
Beta	Jacobi	$j_k^{a,b}(x) / \mathfrak{S}_{a,b,k}$

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}_{a,b,k}^2 &= \frac{2^{a+b+1}}{2k+a+b+1} \frac{\Gamma(k+a+1)\Gamma(k+b+1)}{\Gamma(k+a+1)\Gamma(k+1)} \end{aligned}$$

Fonte: Adaptado de Marelli *et al.* (2022)

Com base nas famílias polinomiais, é utilizado o esquema de truncamento por grau total, que corresponde a todos os polinômios utilizados nas variáveis de entrada do modelo \mathcal{M} com grau menor ou igual a p . Logo, a base de grau total cresce exponencialmente com o grau p (Equação 15) (MARELLI; LUTHEN; SUDRET, 2022).

$$\mathcal{A}^{M,p} = \{\alpha \in \mathbb{N}^M : |\alpha| \leq p\} \quad \text{para} \quad \mathcal{A}^{M,p} = P = \left(\frac{M+p}{p}\right) \quad (15)$$

A relevância dos termos na base não é uniforme. Muitas vezes, os termos mais importantes na expansão são aqueles em que apenas algumas variáveis têm influência significativa. Esse fenômeno é conhecido como o princípio da esparsidade de efeitos. Esses esquemas são projetados para melhorar a eficiência computacional e a interpretação dos resultados, permitindo uma representação mais simplificada e significativa dos fenômenos em estudo (MARELLI; LUTHEN; SUDRET, 2022).

O esquema de truncamento hiperbólico (q -norm) é definido em uma escala de 0 a 1, é dado pelas Equações 16 e 17 (BLATMAN, 2009).

$$\mathcal{A}^{M,p} = \{\alpha \in \mathcal{A}^{M,p} : \|\alpha\| \leq p\} \quad (16)$$

em que:

$$\|\alpha\|_q = \left(\sum_{i=1}^M \alpha_i^q\right)^{\frac{1}{q}} \quad (17)$$

na qual, para $q = 1$, o truncamento hiperbólico corresponde exatamente ao esquema padrão de truncamento por grau total (Equação 15), porém, para valores de q menores que 1 o truncamento hiperbólico inclui todos os termos univariados de alto grau, mas exclui os termos de alto grau com muitas variáveis interagindo.

3.2.2 Análise de Sensibilidade

Segundo Sudret (2007), os métodos de propagação de incerteza fornecem informações sobre o impacto das variáveis de entrada na variabilidade da resposta do

modelo. Essa hierarquização das variáveis de entrada é conhecida como análise de sensibilidade, que pode ser classificada como local ou global. A análise local é dada pela alteração em um determinado intervalo de valores de um parâmetro e pela fixação dos demais utilizados no modelo. Oposto a isso, a análise global é dada pela alteração de todos os parâmetros que estão sendo analisados de forma mútua. Apesar da maior complexidade, essa última opção traz melhor representação na análise de sensibilidade dos resultados de saída, visto que na iteração numérica os parâmetros são simulados em conjunto.

Neste trabalho foi utilizado o método de Índice de Sobol para análise global de sensibilidade, devido à possibilidade de inseri-lo no modelo substituto baseado na ECP. Os índices de Sobol (SOBOL, 1993) são baseados na definição de expansão do modelo computacional em termos de parcelas de dimensão crescente. Analogamente, o método é uma análise de sensibilidade baseada em variância, no qual a variância total do modelo é descrita como a soma das variâncias das parcelas (MARELLI *et al.* 2022).

Esse método visa entender como a variação dos valores de saída pode ser atribuída a entradas individuais do modelo e à interação conjunta entre as variáveis de entrada (BREVAULT *et al.* 2013; ZHANG *et al.* 2015). Assim, ele decompõe a variância total da resposta do modelo em contribuições de cada variável de entrada e das interações entre as variáveis.

$$f(x_1, \dots, x_M) = f_0 + \sum_{i=1}^M f_i(X_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq M} f_{ij}(X_i, X_j) + \dots + f_{1,2,\dots,M}(x_1, \dots, x_M) \quad (18)$$

na qual f_0 e D são, respectivamente, a média e a variância de uma variável aleatória. Essa última pode ser decomposta ainda mais para a definição da variância total de $f(X)$, conforme apresentado na Equação 19.

$$D = \int_{D_X} f^2(x) dx - f_0^2 \quad (19)$$

As variâncias parciais são calculadas a partir da Equação 20.

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad 1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq M; s = 1, \dots, M \quad (20)$$

Logo, os índices de sensibilidade de Sobol, para a primeira ordem e ordens superiores, são então definidos como a razão da variância parcial e variância total (Equação 21). O índice total de Sobol representa a soma de todos os índices referentes à variável em questão.

$$S_{i_1 \dots i_s} = \frac{D_{i_1 \dots i_s}}{D} \quad (21)$$

3.3 Modelagem Hidrodinâmica

Por fim, nesta revisão, cabe ressaltar que a avaliação de risco das áreas propensas à inundação, por ser uma abordagem prospectiva, se apresenta como uma ferramenta fundamental para o gerenciamento de estratégias que mitiguem os impactos ambientais, de perdas humanas e danos econômicos. Portanto, as saídas do modelo hidrodinâmico são um dado de entrada da modelagem de perdas de vidas e tal modelo será brevemente apresentado no tópico a seguir.

3.3.1 Modelo Computacional HEC-RAS

O software HEC-RAS, modelo hidráulico desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), é um dos mais populares em aplicações práticas, podendo fornecer dados em grade como velocidade, profundidade, elevação da superfície da água e risco hidráulico, além de ser gratuito.

Na modelagem de escoamento, são aplicadas as equações de continuidade e conservação de momento (BRUNETTI, 2008). Assumindo o escoamento incompressível, essas equações diferenciais são apresentadas nas equações a seguir:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} + q = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(u)}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - C_t u + f v \quad (23)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - C_t v + f u \quad (24)$$

em que H é o nível do fluxo; t é o tempo; h é a profundidade; u e v são as componentes da velocidade na direção x e y , respectivamente; q é o termo de fluxo; g é a aceleração gravitacional; ν_t é o coeficiente de viscosidade turbulento; c_t é o coeficiente de atrito de fundo; e f o parâmetro de Coriolis.

A propagação de onda pode ocorrer nos âmbitos unidimensional, bidimensional e conjunto. Para isso, a maioria dos modelos computacionais utiliza as equações de Navier-Stokes (ZHANG *et al.* 2016), que descrevem o movimento dos fluidos em três dimensões (BRUNETTI, 2008). A equação geral de Navier-Stokes é dada pela Equação 25.

$$-\nabla P + \mu \nabla^2 V + pg = \rho \frac{DV}{Dt} \quad (25)$$

na qual ∇P é o gradiente da pressão; μ a viscosidade do fluido; ∇^2 o operador laplaciano; V o vetor de velocidade; e pg é a força gravitacional.

Na modelagem hidráulica, simplificações são impostas para possibilitar a propagação do fluido no âmbito unidimensional e bidimensional. Além disso, considera-se a aplicação para fluidos incompressíveis (BRUNETTI, 2008). O HEC-RAS oferece três conjuntos de equações simplificadas, que podem ser usadas para analisar o fluxo na malha computacional, sendo elas: equações de Águas Rasas, método Euleriano-Lagrangiano e equações de Onda de Difusão. Dentre essas, a equação de Onda de Difusão (Equação 26) pode apresentar maior estabilidade no modelo (USACE, 2022).

$$V = \frac{-(RH)^{\frac{2}{3}}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

em que V é a velocidade vetorial; RH é o raio hidráulico; e ∇H é o gradiente de elevação.

O recurso de passo de tempo variável é utilizado no mecanismo de fluxo do HEC-RAS. Na última versão (v. 6.3.1), é possível determinar a etapa de tempo variável com base no número de Courant (Equação 27), ou seja, o tempo de residência em cada célula. Alternativamente, a etapa de tempo variável pode ser determinada com base em divisores de data e hora (Figura 10) (USACE, 2022).

$$C = \frac{V_0 \Delta T}{\Delta X} \text{ ou } \Delta T \leq \frac{\Delta X}{V_0} \quad (27)$$

em que C é o número de Courant; V_0 é a velocidade da onda de inundação (m/s); ΔT é o intervalo computacional (s); e ΔX é o tamanho médio da célula (m).

Essas etapas de tempo são utilizadas para melhor estabilidade do modelo, bem como para reduzir o tempo computacional.

Figura 10 – Editor de Passo de Tempo Variável dentro das Opções e Tolerâncias Computacionais

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General | 2D Flow Options | 1D/2D Options | **Advanced Time Step Control** | 1D Mixed Flow Options

Fixed Time Step (Basic method) 10 Second

Adjust Time Step Based on Courant

Maximum Courant: 1

Minimum Courant: 0.45

Number of steps below Minimum before doubling: 4

Maximum number of doubling base time step: 2 40.00 sec

Maximum number of halving base time step: 0 10.00 sec

Courant Methodology

Courant (Velocity * dt / Length)

Residence Time (flow out * dt / Volume)

Adjust Time Step Based on Time Series of Divisors Verify Dates ...

	Time Step	Date(ddMMMyyyy hhmm)	Divisor
1	1.25 sec	01OCT2013 0000	8
2	2.00 sec	01OCT2013 0130	5
3	2.50 sec	01OCT2013 0200	4
4	5.00 sec	01OCT2013 0600	2
5	10.00 sec	01OCT2013 0800	1
6	5.00 sec	02OCT2013 0200	2
7			
8			

OK Cancel Defaults ...

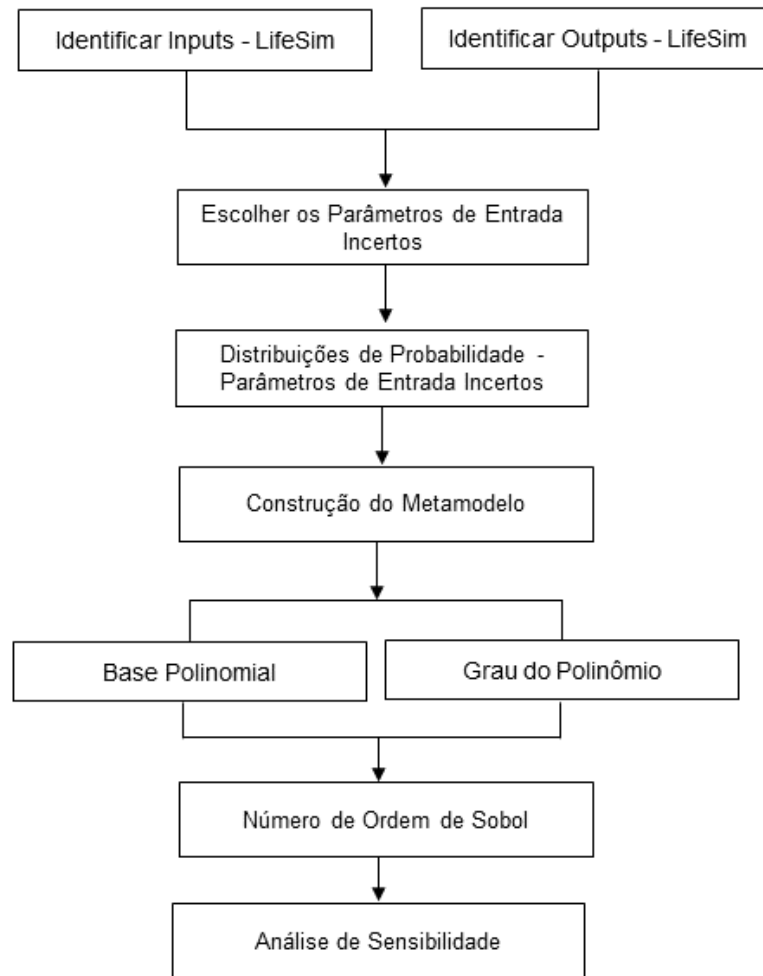
Fonte: USACE (2022).

4 METODOLOGIA

4.1 Construção do Metamodelo

A análise de quantificação de incertezas foi realizada utilizando a ferramenta UQLab (Figura 11), desenvolvida por Stefano Marelli e Bruno Sudret, do Grupo de Pesquisa em Quantificação de Incertezas, Segurança e Riscos (MARELLI *et al.* 2022), do Instituto de Tecnologia de Zurique na Suíça. Essa ferramenta possui código aberto desde 2022, com acesso pela plataforma de programação do MatLab.

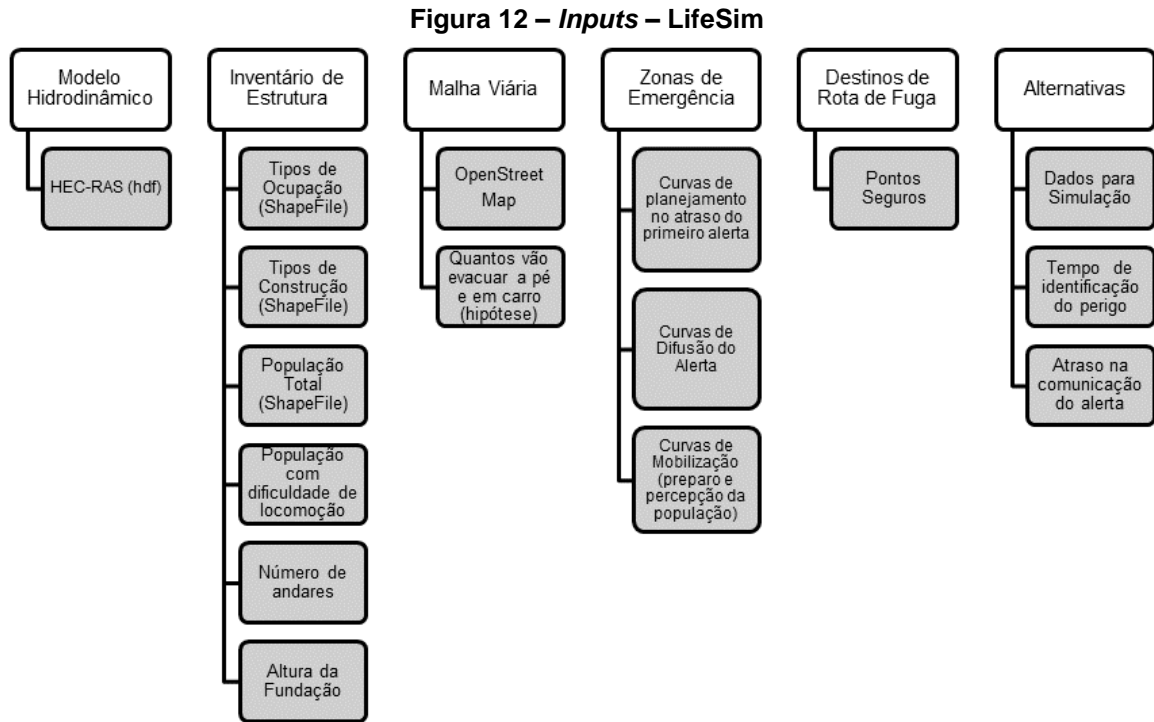
Figura 11 – Etapas para Construção do Metamodelo



Fonte: Autora (2023).

4.1.1 Identificação dos *INPUTS*

A etapa de identificação dos *inputs* do LifeSim foi realizada investigando o funcionamento do modelo. O Software tem uma interface que permite analisar os dados de entrada por módulos, facilitando a visualização pelo usuário. Com isso, foram identificados os dados de entrada necessários para a simulação de estimativa de perdas de vidas no LifeSim (Figura 12).



Fonte: Autora (2023).

Os dados de entrada possuem formatos diferentes para inserção no LifeSim, sendo a maior parte das informações inseridas por meio de *shapefiles*. O Modelo hidrodinâmico, o qual possui as informações hidráulicas necessárias para a realização das simulações, pode ser exportado no formato *.HDF* para o LifeSim.

O inventário de estruturas é inserido no formato *shapefile* com as informações referentes aos tipos de ocupação, tipos de construção, população total, população com dificuldades de locomoção, número de andares e altura da fundação. Destaca-se que a maioria dessas informações é fornecida pelo censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) por meio de levantamentos oficiais. No entanto, pode ser realizado um levantamento cadastral referente à área de estudo para melhorar a representatividade dos dados. A malha viária é exportada do *OpenStreetMap*, que é uma ferramenta gratuita e de mapeamento colaborativo. Com isso, é possível identificar a área de estudo na plataforma são gerados os dados de direcionamento das estradas e vias oficiais de passagem de veículos.

As zonas de emergência são avaliadas pelo usuário para associação das curvas de alerta e mobilização, nas quais a população é caracterizada e agrupada com base na emissão e difusão do alerta, e preparo e percepção do perigo.

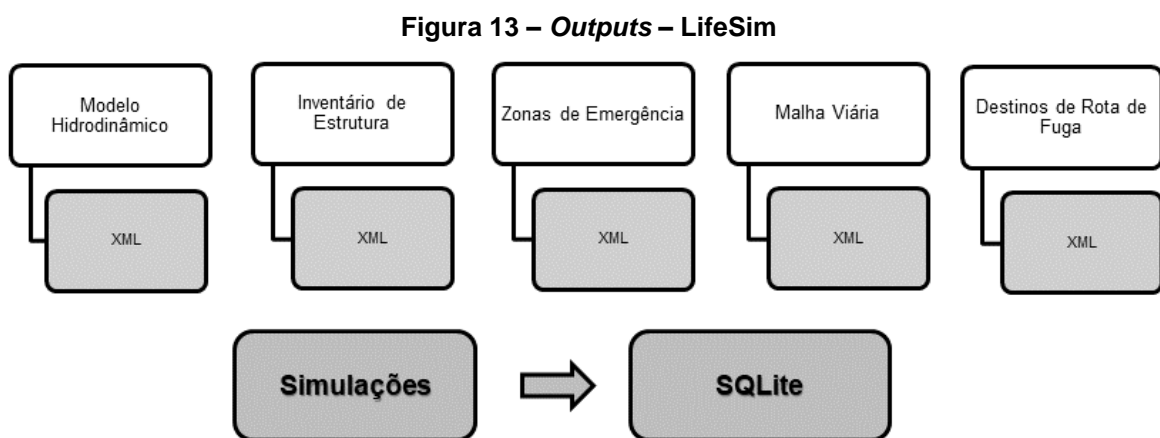
Os destinos de rotas de fugas são inseridos pelo usuário como pontos seguros, para os quais a população pode se locomover e estar em segurança do perigo de inundação. Geralmente, são pontos mais elevados e fora da mancha de inundação.

As alternativas de simulação são abordagens para identificar cenários e dados que serão utilizados. Duas variáveis importantes são: o tempo de identificação do perigo e o atraso na comunicação do alerta, pois irão influenciar nas curvas de alerta e mobilização e, conseqüentemente, no número de estimativa de fatalidades.

4.1.2 Identificação dos *OUTPUTS*

A etapa de identificação de *outputs* do LifeSim foi realizada avaliando todos os dados no fim de cada simulação. Destaca-se que o LifeSim, atualmente, não é um *software* com código disponível para os usuários, ou seja, a abordagem numérica utilizada pelo modelo substituto é um método não intrusivo, que não altera o código fonte original do modelo computacional estudado nesta pesquisa. Logo, a análise dos dados de saída é fundamental para o presente estudo.

A partir das análises realizadas, foi identificado que a simulação de cada “módulo” apresentado no tópico anterior (Identificação dos *INPUTS*) gera um arquivo de texto com a descrição das escolhas do usuário (XML). Além disso, é gerado um arquivo final no formato SQL que apresenta todas as etapas de simulação do modelo e a tabela de dados finais de estimativa de perdas de vidas do LifeSim (Figura 13).



Fonte: Autora (2023).

Na Figura 14 é apresentado um exemplo de imagem, no formato de texto, no qual são apresentadas as alternativas utilizadas na simulação. Ademais, também são apontados os parâmetros das curvas de alerta e mobilização que foram sorteados pelo método de Monte Carlo para cada interação.

Figura 14 – Arquivo em formato de texto - *Outputs – LifeSim*

```
<LifeSim Alternative Name="Alternative_01" Simulate_Evacuation="True" Hydraulic_Data="Pampulha_01" Structure_Inventory="Contrucoes_01" Emergency_Planning_Zones="Emergencia_01"
Road_Networks="BH_02" Destination_Set="Destinos_01">
  <Warning_To_EMAs_By_EP2 Destination_Field_Name="FID">
    <Emergency_Planning_Zone Name="0">
      <IDProblemRelativeToImminentHazard>
        <Uniform_sampleSize="0" median="-5" _min="-10" _max="0"/>
      </IDProblemRelativeToImminentHazard>
      <NotifyEMAOffset>
        <None_value="0"/>
      </NotifyEMAOffset>
      <Destination_Indices>0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27</Destination_Indices>
    </Emergency_Planning_Zone>
    <Warning_To_EMAs_By_EP2>
      <Evacuation_Parameters Evacuation_TimeStep="10" Fraction_In_Vehicles="5" Fraction_In_Cars="1" Vehicle_Occupancy_Rate="3" Greenshield_Alpha="15" Pedestrian_Speed="4"
Stop_And_Go_Speed="3" Fraction_Width_GPS="8" Look_Ahead_Distance="1320" Road_Assessment_Interval="4" Impassable_Road_Depth="2" Live_Update_Interval="1"/>
    </Life_Loss_Parameters>
  </Warning_To_EMAs_By_EP2>
  <Chance_Zone>
    <Point X="0" Y="1"/>
    <Point X="4923077" Y="1"/>
    <Point X="5076923" Y="9914063"/>
    <Point X="523077" Y="9878049"/>
    <Point X="5384616" Y="9811321"/>
    <Point X="5538462" Y="9810345"/>
    <Point X="5692308" Y="9777778"/>
    <Point X="5846154" Y="9714286"/>
    <Point X="6" Y="9375"/>
    <Point X="6153846" Y="9333333"/>
    <Point X="6307693" Y="9333333"/>
    <Point X="6461539" Y="9285714"/>
    <Point X="6615385" Y="925"/>
    <Point X="6769231" Y="9152542"/>
    <Point X="6923077" Y="9"/>
    <Point X="7076923" Y="9"/>
    <Point X="7230769" Y="8888889"/>
    <Point X="7384616" Y="8666667"/>
    <Point X="7538462" Y="8571429"/>
    <Point X="7692308" Y="8571429"/>
    <Point X="7846154" Y="8461539"/>
    <Point X="8" Y="8421053"/>
    <Point X="8153846" Y="8333333"/>
    <Point X="8307692" Y="8235294"/>
    <Point X="8461539" Y="8064516"/>
    <Point X="8615385" Y="8"/>
    <Point X="8769231" Y="8"/>
    <Point X="8923077" Y="8"/>
    <Point X="9076923" Y="7857143"/>
    <Point X="9230769" Y="7058824"/>
    <Point X="9384615" Y="6551724"/>
    <Point X="9538462" Y="6428571"/>
    <Point X="9692308" Y="6"/>
    <Point X="9846154" Y="5"/>
    <Point X="1" Y="3825"/>
  </Chance_Zone>
  <Compromized_Zone>
    <Point X="0" Y="5"/>
    <Point X="5555556" Y="5"/>
    <Point X="1111111" Y="5"/>
    <Point X="1666667" Y="2413793"/>
    <Point X="2222222" Y="2222222"/>
    <Point X="2777778" Y="2"/>
    <Point X="3333333" Y="8333334"/>
    <Point X="3888889" Y="3571429"/>
    <Point X="4444444" Y="0"/>
    <Point X="1" Y="0"/>
  </Compromized_Zone>
  <Safe_Zone>
    <Point X="0" Y="1333333"/>
    <Point X="1538462" Y="1567398"/>
    <Point X="3076923" Y="0"/>
    <Point X="1" Y="0"/>
  </Safe_Zone>
</Life_Loss_Parameters>
<Stability_Criteria>
  <Car_Stability Depth_Threshold="6" Velocity_Threshold="6562" Depth_Times_Velocity_Threshold="9688"/>
  <SUV_Truck_Stability Depth_Threshold="6" Velocity_Threshold="6562" Depth_Times_Velocity_Threshold="1453"/>
  <Pedestrian_Stability Depth_Threshold="5" Velocity_Threshold="6562" Depth_Times_Velocity_Threshold="1184"/>
</Stability_Criteria>
</LifeSim Alternative>
```

4.1.3 Variáveis de Entrada

As variáveis de entrada do modelo computacional foram analisadas a fim de determinar quais seriam as mais significativas na análise de incertezas na saída do modelo. Ademais, foram consideradas as variáveis de entrada utilizadas no estudo de Kalinina *et al.* (2021), que quantificaram as incertezas do LifeSim considerando uma barragem localizada na Suíça, e da pesquisa desenvolvida por Lumbroso *et al.* (2021), que discorreram sobre a importância da análise de incertezas dos modelos e

estimativas de perdas de vidas, a fim de gerar o desenvolvimento de planos de ações emergenciais mais eficazes de barragens. As variáveis a serem escolhidas precisam ser aleatórias, e funcionam como vetores de entrada no modelo substituto.

No entanto, o cenário brasileiro apresenta poucos dados primários sobre alerta e mobilização em casos de ruptura de barragens, sendo a principal base de dados sobre a população exposta obtida pelo Censo Demográfico do IBGE, que, neste último ciclo (2010-2020), sofreu atrasos e, até o momento, no ano de 2023, não teve os dados divulgados.

4.1.4 Construção do Algoritmo - MatLab

A Expansão de Caos Polinomial visa aproximar um modelo computacional complexo por um substituto polinomial. Para isso, existe a ferramenta UQLab, que foi desenvolvida no ano de 2017 como uma estrutura de quantificação de incerteza para ser utilizada na interface do MatLab (MARELLI *et al.* 2019).

Marelli *et al.* (2019) destacam que os avanços nas modelagens numéricas e computacionais vêm crescendo nos últimos anos, assim como a análise de incertezas dos processos na ciência da computação. No entanto, os autores ressaltam a falta de integração desses avanços com outras áreas do conhecimento como, por exemplo, a engenharia. Nesse sentido, apresentam o UQLab como uma ferramenta funcional para implementação de estudos e avanços de análise de incertezas de simuladores.

Segundo Marelli & Sudret (2015), os principais pontos a serem definidos no metamodelo baseado no polinômio de expansão de caos são:

- Um modelo a ser substituído: $Y = M(X)$;
- Distribuições de probabilidade de entrada definidos;
- Uma base polinomial; e
- Os coeficientes polinomiais.

A construção do metamodelo é dada inicialmente pela inserção do modelo a ser substituído, no qual deve ser implementado como um arquivo *.m* no MatLab. Após isso, é necessário chamar o arquivo criado dentro do algoritmo no MatLab.

O modelo a ser substituído deve ser inserido com os dados de entrada e saída resultante das simulações. A dimensão de entrada do modelo $M(X)$ é dada pelo número de variáveis de entrada das quais serão avaliadas as incertezas. Portanto, o modelo a ser substituído funciona como uma função de “caixa preta”, que mapeia os parâmetros de entrada em vetores e calcula os coeficientes polinomiais. A dimensão do modelo a ser substituído é configurada a partir do arquivo inserido. Os dados do LifeSim foram inseridos em formato *.m*, considerando os dados de entrada (Y) em função dos dados de saída (X).

A base de polinômios ortogonais é definida considerando polinômios univariados, dependendo da distribuição dos dados de entrada do modelo a ser substituído. Considerando que as variáveis de entrada utilizadas no LifeSim são uniformemente distribuídas, a base polinomial utilizada é a da Legendre, que possui intervalos de limites máximos e mínimos.

Após isso, é estabelecido o grau do polinômio a ser utilizado no esquema de truncamento padrão, ou seja, haverá expansão da função em uma série de polinômios que será truncada até determinado grau N (MARELLI; LUTHEN; SUDRET, 2022).

No UQLab o esquema de truncamento padrão possui grau máximo igual a três. No entanto, é possível realizar essa alteração para melhor refinamento do metamodelo construído. Além disso, é possível configurar as estratégias de truncamento realizadas.

No presente estudo, foram realizados testes com polinômios de diferentes graus, mais especificamente entre 1 e 15, para a construção do metamodelo. Portanto, após essa análise, o grau escolhido para cada metamodelo foi avaliado conforme o menor erro dos resultados durante a validação cruzada.

A próxima etapa é o cálculo dos coeficientes polinomiais. Para isso, é necessário determinar a técnica de projeção a ser utilizada. As técnicas utilizadas no UQLab são: Quadratura Gaussiana, Mínimos Quadrados Ordinários e ECP-Esparso (regressão de ângulo mínimo), que são métodos numéricos utilizados para aproximar o valor de uma integral definida.

A partir do método escolhido, é possível gerar uma representação gráfica do espectro logarítmico dos coeficientes da Expansão de Caos Polinomial (ECP). Além disso, é possível acessar as informações da estrutura de saída do metamodelo e os dados que atendem à execução da Equação 10.

O método de projeção Esparsa baseado na Expansão de Caos Polinomiais foi a técnica utilizada nos modelos substitutos utilizados nesta pesquisa. Esse método apresenta uma estrutura semelhante ao Método dos Mínimos Quadrados Ordinários. Um relatório de informações sobre o modelo criado pode ser fornecido a partir da função `uq_print(myPCE_sparse)`, na qual são apresentados dados utilizados e gerados. Para uma representação gráfica, utiliza-se a função `uq_display(myPCE_sparse)`. Marelli *et al.* (2022) destacam que esse método apresenta números baixos de coeficientes nulos, em comparação aos demais métodos apresentados, sendo uma vantagem para a melhor representação e conversão dos resultados.

4.1.5 Análise de Sensibilidade Global – MatLab

No UQLab é possível realizar análises de sensibilidade baseadas em métodos de amostragem, métodos de linearização e métodos globais (Marelli *et al.* 2022), conforme descrito a seguir:

- Métodos baseados em amostragem: correlação de entrada e saída e Coeficientes de Regressão;
- Métodos de linearização: Métodos de perturbação e método Cotter;
- Métodos Globais: Efeitos elementares de Morris, Índices de Borgonovo, Índices de Sobol, Índices de Covariância e Índice de Kucherenko.

Destaca-se que, para a utilização dos métodos de Coeficientes de Regressão, Método de Perturbação e Índice de Sobol, as variáveis de entrada precisam ser independentes. Considerando as complexidades de cada método, neste tópico são apresentadas somente configurações do Índice de Sobol, uma vez que esse é o método de análise de sensibilidade escolhido para ser utilizado nesta pesquisa.

4.1.5.1 Índice de Sobol - UQLab

Na construção do modelo substituto, com base na Expansão de Caos Polinomial, é possível calcular os índices de Sobol a partir dos coeficientes polinomiais (MARELLI *et al.* 2022). Para isso, é necessária a inclusão de comandos que relacionem a análise de sensibilidade global, baseado no índice de Sobol, no algoritmo do metamodelo.

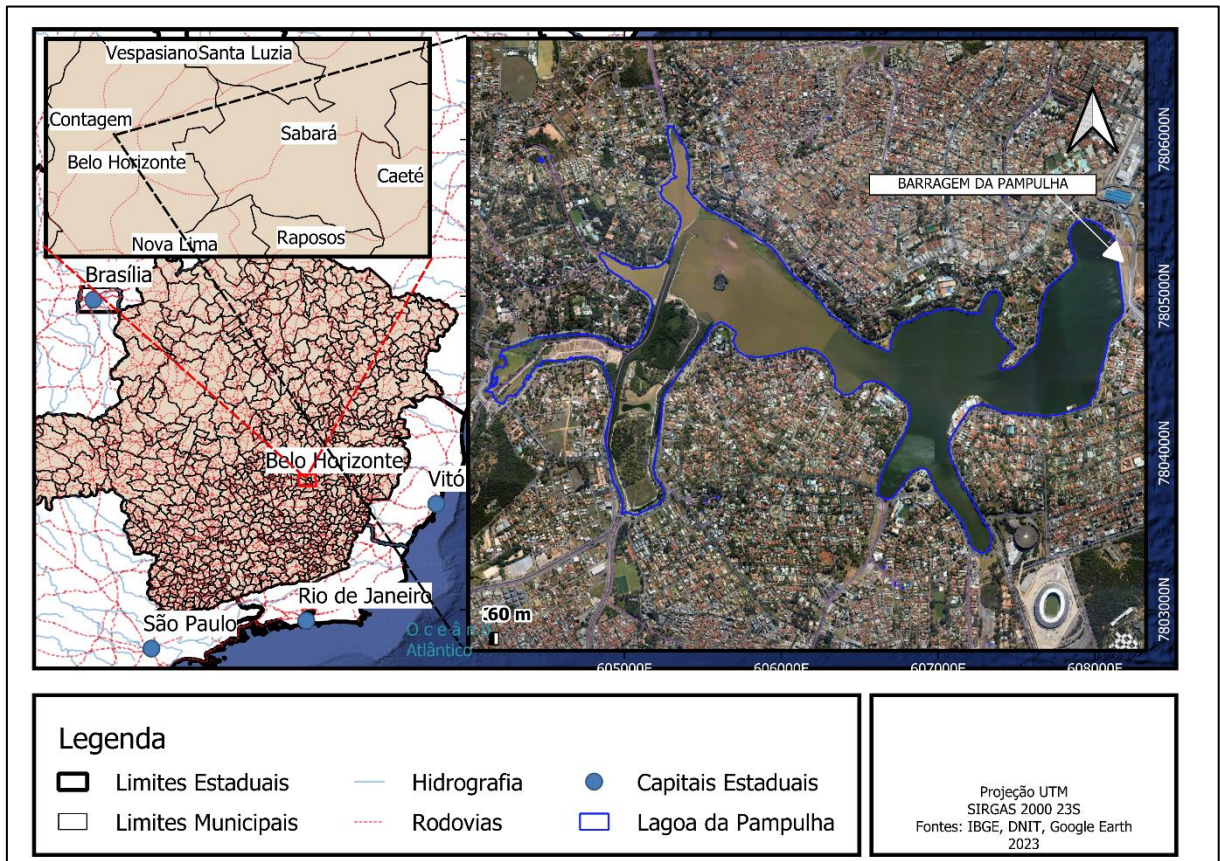
A configuração é dada na aproximação de informações utilizadas na Expansão de Caos polinomial, sendo utilizados comandos do MatLab para a construção da análise de sensibilidade. Para utilização do índice de Sobol em ordens acima de 1, é necessário configurar o algoritmo para diferentes ordens de Sobol.

4.2 Estudo de Caso

4.2.1 Área de Estudo

A área de estudo utilizada foi a Barragem da Lagoa da Pampulha, localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais. A principal justificativa é a maior disponibilidade de dados para o desenvolvimento do estudo. Além disso, por ser um reservatório urbano, existe uma quantidade significativa de pessoas exposta ao perigo iminente em caso de ruptura dessa barragem (Figura 15), fato importante na modelagem de perdas de vidas e análise do alerta e evacuação da população.

Figura 15 – Localização da Área de Estudo – Lagoa da Pampulha



A Barragem da Pampulha foi inaugurada no ano de 1938, como reservatório de água para o município de Belo Horizonte. No ano de 1954 houve o rompimento dessa barragem, com volume propagado de cerca de 12,6 milhões de m³. A ruptura da barragem ocorreu por erosão interna (*piping*) - a passagem de água se iniciou no dia 16 de abril de 1954 e o rompimento de fato ocorreu no dia 20 de abril de 1954, tendo como consequências apenas danos materiais (VIANINI, 2016). Um resumo das características da barragem é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados da barragem da Pampulha

Descrição/Características	Finalidade
Coordenada Geográfica	Latitude 19°50'44.69"S e Longitude 43°58'1.43"O
Finalidade	Amortecimento de cheias / Paisagística
Ano construção / inauguração	1936 / 1938
Elevação crista do maciço	El. 805,00 m
Elevação da fundação da barragem (m)	785,00
Elevação NA Máximo Normal	El. 801,00 m
Altura total	20,0 m
Comprimento da crista	450 m
Volume total do reservatório (até a crista)	30.084.312 m ³ (El. 805,00 m)
Volume útil até a soleira	10.009.628 m ³ (El. 801,00 m)
Maciço	Aterro compactado

Extravasor de emergência	Side Channel com largura de 32,00 m (El. 801,00 m)
Extravasor auxiliar	Tulipa com diâmetro de 12,54 m (El. 801,50 m)

Fonte: Vianini (2016)

Conforme informações disponibilizadas na Tabela 7, o reservatório possui dois vertedouros, um do tipo tulipa e outro na ombreira direita do tipo *side channel* (Figura 16).

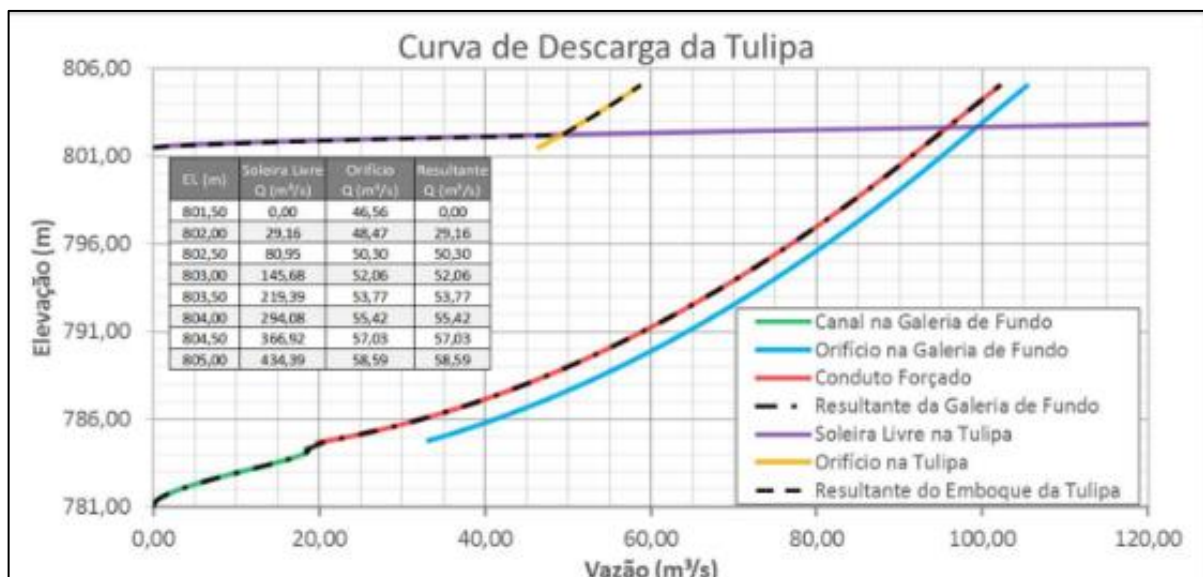
Figura 16 – Vertedouros da barragem da Lagoa da Pampulha



Fonte: Vianini (2016).

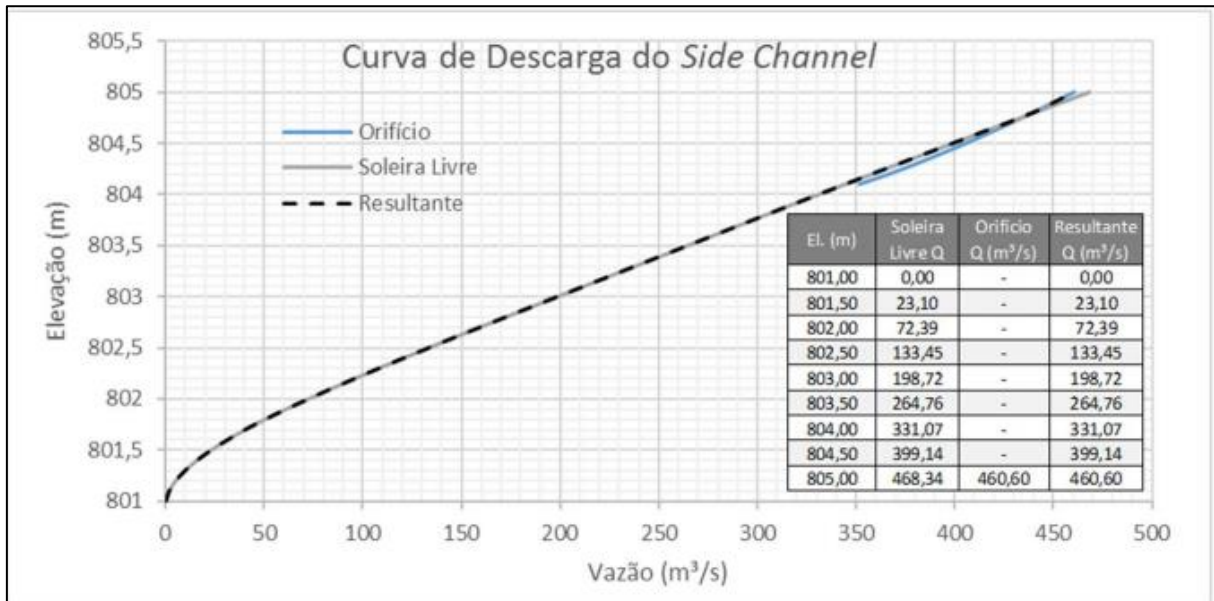
As curvas de descarga (C_d) dos vertedouros em questão são apresentadas na Figura 17 e Figura 18. A maior vazão efluente do vertedouro tulipa é de $58,59 \text{ m}^3/\text{s}$ e a maior vazão efluente do vertedouro *side channel* é de $452,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (VIANINI, 2016).

Figura 17 – Curva de Descarga do Vertedouro Tulipa da barragem da Lagoa da Pampulha



Fonte: Vianini (2016).

Figura 18 – Curva de Descarga do Vertedouro *Side Channel* da barragem da Lagoa da Pampulha



Fonte: Vianini (2016).

4.2.2 Modelo Hidrodinâmico

Nascimento *et al.* (2020) realizaram um estudo de modelagem hidrodinâmica para a ruptura hipotética da barragem da Pampulha gerando uma mancha de inundação. Os resultados subsidiaram a elaboração do Plano de Ação Emergencial da Barragem.

Para isso, o estudo foi realizado considerando o contrato firmado entre a Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura da Prefeitura de Belo Horizonte (Prodabel) e a Universidade Federal de Minas Gerais. Portanto, os dados básicos disponibilizados pela Prodabel serão utilizados neste trabalho, sendo a disponibilidade de dados para elaboração do modelo uma das justificativas da escolha da área de estudo (Tabela 8).

Tabela 8 – Bases de dados utilizadas para construção do modelo hidrodinâmico de propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética da barragem da Pampulha

Base de dados	Descrição/Características	Finalidade
Modelo Digital de Terreno da Prodabel	Dados altimétricos levantados por tecnologia LIDAR.	Constituição de base topográfica para construção do modelo hidrodinâmico de propagação de onda de ruptura.
Base de fotografias aéreas da Prodabel	Fotografias aéreas levantadas por tecnologia LIDAR.	Análise de uso e ocupação do solo e produção de mapas.
Base de dados gratuita da Google® (cartografia e	Fotografias aéreas obtidas via satélite e fotografias panorâmicas terrestres obtidas via translado terrestre. Datas e resoluções diversas não identificadas.	Análise de uso e ocupação do solo, avaliação de infraestrutura e produção de mapas.

Destaca-se que a modelagem hidrodinâmica do evento de inundação decorrente da ruptura hipotética da barragem da Pampulha foi atualizada para a versão mais recente do software HEC-RAS v. 6.3.

4.2.2.1 Malha Computacional

A partir dos fundamentos do software HEC-RAS, apresentado no Item 3.3, o modelo utiliza uma malha computacional para representar as elevações do terreno e aplicar os recursos matemáticos de volumes finitos. Para o estudo em questão, a malha computacional determinada foi para tamanhos de 5m x 5m, buscando evidenciar maior detalhamento e refinamento nos resultados, apesar de aumentar o tempo computacional das simulações (Figura 19,

Figura 20 e Figura 21).

Figura 19 – Detalhe da Malha Computacional e Modelo Digital do Terreno – Modelo Hidrodinâmico Barragem da Pampulha

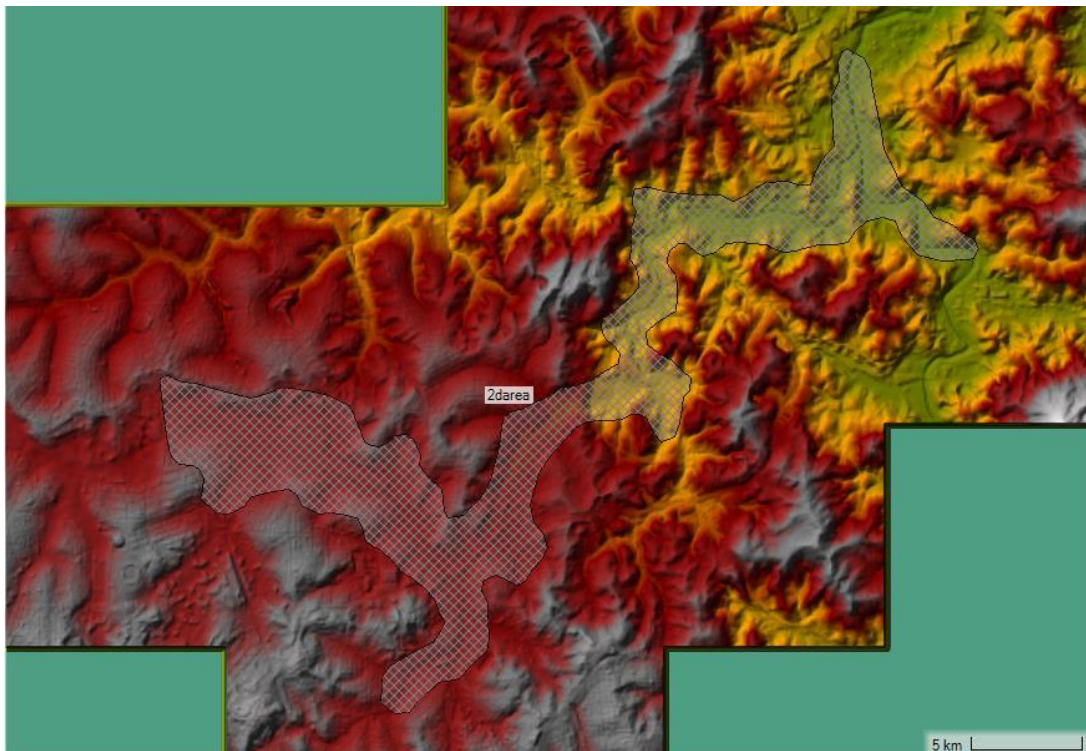


Figura 20 – Detalhe da Malha Computacional e Modelo Digital do Terreno – Modelo Hidrodinâmico da barragem da Pampulha

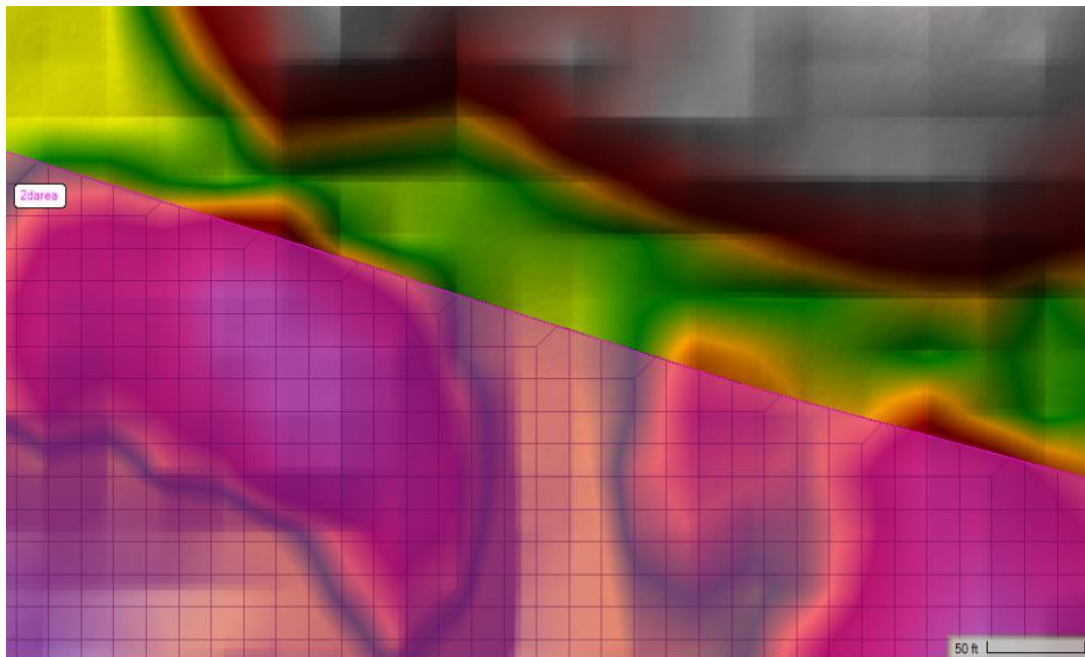
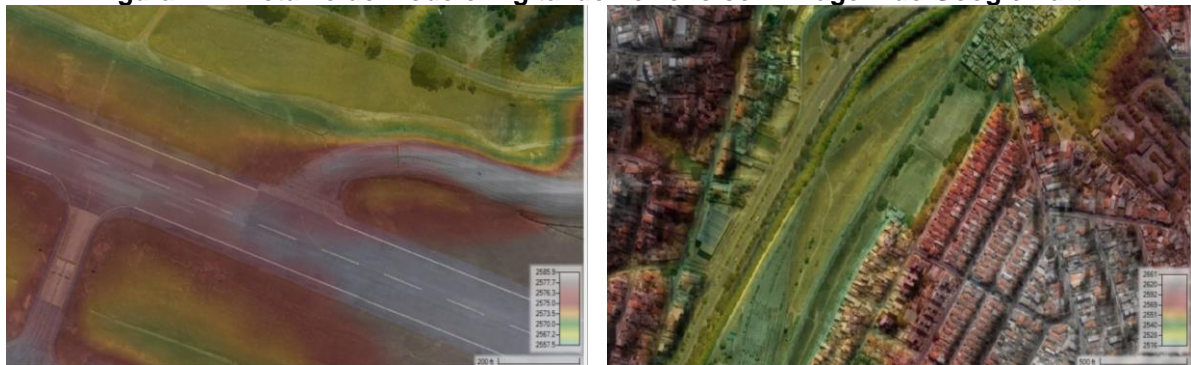


Figura 21 – Detalhe do Modelo Digital do Terreno com imagem do Google Earth



Destaca-se que o estudo de ruptura hipotética da barragem da Pampulha realizado por Vianini (2016) utilizou um Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução de pixel igual a 3 metros, sendo a informação levantada por tecnologia LIDAR no ano de 2008 e disponibilizada pela Prefeitura de Belo Horizonte. Logo, a qualidade da informação é superior, sendo justificada pelo desenvolvimento de novas tecnologias, novo levantamento altimétrico e atualização do software HEC-RAS, utilizado em ambas as modelagens hidrodinâmicas.

Além disso, houve uma atualização da legislação vigente, que atualmente é redigida pela Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022), alterada pela Resolução ANM nº

130/2023 (BRASIL, 2023), e determina que os mapas de inundação sejam executados com base topográfica atualizada e em escala apropriada para representação da tipologia do vale a jusante.

4.2.2.2 Modo de Falha

Os modos de falha foram discutidos por Vianini (2016), que realizou o estudo de trânsito de cheias do reservatório da Lagoa da Pampulha, para avaliação de possibilidade de galgamento, e analisou os estudos geotécnicos disponibilizados por Dinésio Franco Engenharia e Geotecnia (2015), para avaliação de possibilidade de erosão interna (*piping*).

Destaca-se que, considerando a legislação vigente, redigida pela Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022) e alterada pela Resolução ANM nº 130/2023 (BRASIL, 2023), os estudos de ruptura hipotética e mapas de inundação devem considerar o modo de falha que ocasione o cenário de maior dano, independente da probabilidade de ocorrência, sendo que para o caso de modo de falha por liquefação, quando aplicável, devem ser consideradas as mobilizações máximas fisicamente possíveis.

Porém, como o objetivo do trabalho é avaliar as consequências do evento de ruptura da barragem da Pampulha, será considerado o estudo mais recente elaborado para o Plano de Ação Emergencial, sendo o documento com informações oficialmente válidas para os órgãos competentes.

Logo, o PAE da Barragem da Pampulha utilizou o modo de falha *piping* no modelo hidrodinâmico, por ser o modo mais provável de ocorrer. No entanto, para atendimento da legislação atual, o cenário de maior dano seria por galgamento, com maior volume propagado, pois a legislação atual determina a realização do estudo de maior dano, independente da probabilidade de ocorrência.

Apesar dos estudos de trânsito de cheias apresentados por Vianini (2016) identificarem a não possibilidade de galgamento, algumas hipóteses poderiam ter sido adotadas para a realização do estudo, como, por exemplo, a ausência de manutenção dos vertedouros e, conseqüentemente, a redução no coeficiente de descarga.

4.2.2.3 Parâmetros de Brecha

Vianini (2016) realizou um estudo utilizando diferentes equações empíricas para estimar os parâmetros de brecha da Barragem da Pampulha. As equações aplicadas foram propostas por três autores: Xu & Zhang (2009), Froehlich (2008) e Von Thun & Gillette (1990). A partir dessa análise, o autor constatou que a equação proposta por Froehlich (2008) proporcionou resultados mais próximos da geometria da brecha que levou à ruptura da Barragem de Pampulha em 1954.

No entanto, Froehlich (2016) realizou uma atualização na base histórica de informações sobre casos de ruptura de barragens utilizados no desenvolvimento do modelo empírico para previsão de brecha. A equação mais recente proposta por ele foi utilizada para estimar os parâmetros de brecha da Barragem da Pampulha, considerando uma ruptura hipotética por *piping*.

Logo, utilizando a metodologia de Froehlich (2016), a largura média da brecha é dada utilizando a Equação 29, e o tempo de formação da brecha dada utilizando a equação 30.

$$\bar{B} = 0,23 \times K_0 V_w^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

na qual \bar{B} é a largura média da brecha (m); V_w é o volume do reservatório no momento da ruptura (m³); e K_0 é a constante equivalente a 1,0 para rupturas por erosão interna e 1,3 para ruptura por galgamento.

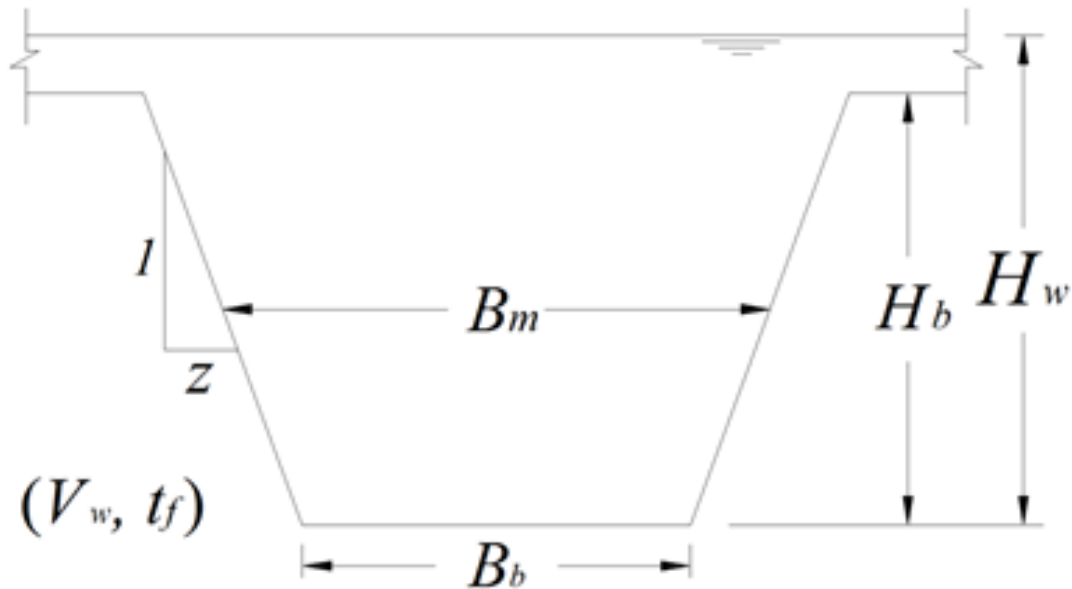
$$T_f = 60 \sqrt{\frac{V_w}{gH_B^2}} \quad (30)$$

na qual T_f é o tempo de formação da brecha (h); V_w é o volume do reservatório no momento da ruptura (m³); g é a aceleração da gravidade (m/s²); e H_B é a carga hidráulica acima do fundo da brecha (m).

Na Figura 22 é disposta a representação das condições geométricas de uma brecha trapezoidal com os parâmetros apresentados. Destaca-se que o valor da inclinação

do talude lateral (Z H: 1,00V) é definido em função do tipo de ruptura que se encontra em análise.

Figura 22 - Seção típica de abertura de brecha no maciço da barragem



Fonte: Adaptado de Froehlich (2016)

4.2.2.4 Hidrograma de Ruptura

Considerando as informações apresentadas no subitem 4.2.2.2, o Plano de Ação Emergencial da Barragem da Pampulha determinou o cenário mais provável como modo de falha. Com isso, o hidrograma de ruptura representa apenas o volume previsto atualmente na lagoa.

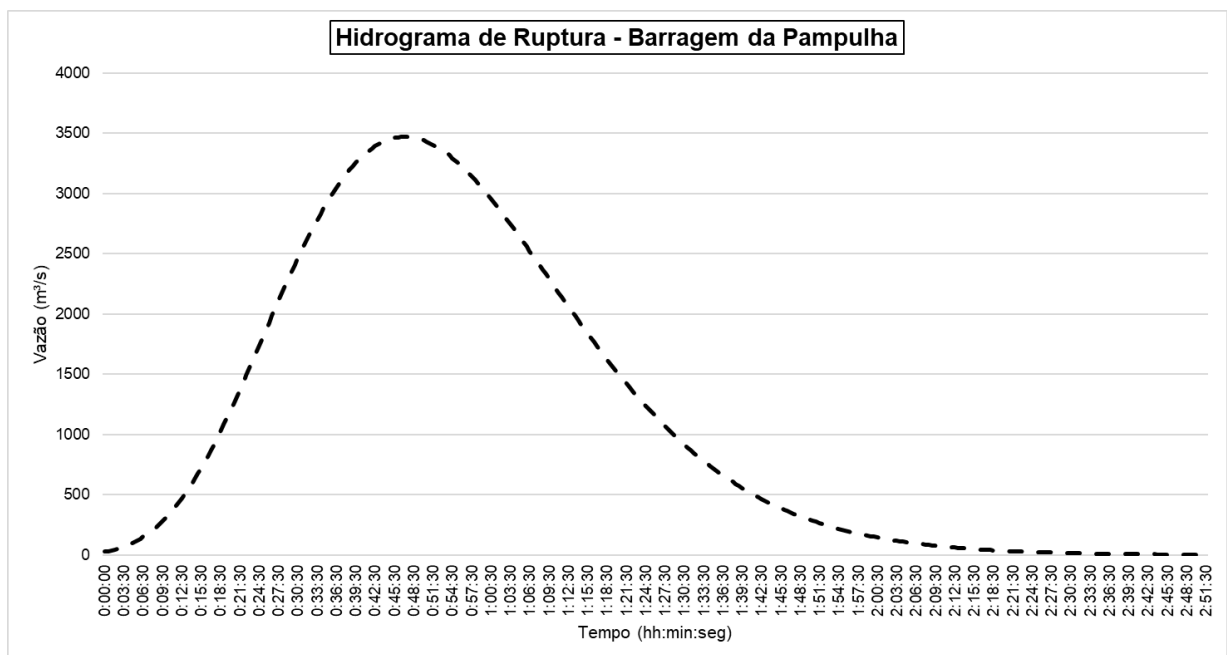
O volume propagado na ruptura é essencial, pois influencia o alcance da mancha de inundação no vale a jusante e, conseqüentemente, na área de planejamento de emergência em caso de uma ruptura da barragem. No presente estudo, conforme supracitado, foram utilizadas as principais informações do PAE da Barragem da Pampulha, uma vez que essas geram uma representação mais próxima do gerenciamento de emergência atual da área de estudo e ser possível avaliar tais incertezas.

A atualização do Plano de Ação Emergencial (PAE) da Barragem da Pampulha, realizada em 2020, utilizou o mesmo hidrograma de ruptura elaborado por Dinésio

(2015), o qual também foi utilizado neste estudo por ser mais próximo ao volume atual do reservatório. Destaca-se que Vianini (2016) utilizou um hidrograma de ruptura que considera o volume do reservatório até a crista da barragem e incluiu uma estimativa do volume de sedimentos no reservatório. No entanto, o volume mobilizado resultante do estudo de Vianini (2016) foi duas vezes maior que o volume atual do reservatório da Lagoa da Pampulha.

Dinésio Franco Engenharia/Geotecnia (2015) considerou um modelo newtoniano, com lâmina máxima de água de aproximadamente 17 metros e o volume atual do reservatório. Na Figura 23 é apresentado o hidrograma de ruptura utilizado, no qual a vazão máxima foi de 3.470 m³/s.

Figura 23 – Hidrograma de Ruptura – Barragem da Pampulha



Fonte: Adaptado de Dinésio Franco Engenharia/Geotecnia (2015)

4.2.2.5 Condições de Contorno

Para o funcionamento do modelo, implementado no software HEC-RAS 6.3.1, é necessário fornecer alguns dados básicos, incluindo as condições de contorno. Para a condição de contorno de montante, foi considerado o hidrograma de ruptura da estrutura avaliada, elaborado por Dinésio Franco Engenharia/Geotecnia (2015). Esse

hidrograma apresenta uma vazão de pico de 3.470 m³/s, que ocorre 47 minutos após o início do rompimento.

Já para a condição de contorno de jusante, foi utilizado um valor de profundidade normal referente à declividade do trecho final, que é de 0,02m/m. Essa condição representa a profundidade normal do escoamento na seção final do rio após o término do escoamento de pico proveniente do rompimento da estrutura.

4.2.2.6 Parâmetros de Resistência – Coeficientes de Manning

Para estimar os valores dos coeficientes de rugosidade de *Manning*, foi realizada a avaliação do uso e ocupação do solo do vale a jusante da Barragem da Pampulha. Essa avaliação foi efetuada considerando dados públicos municipais, disponibilizados no site da Prefeitura de Belo Horizonte do levantamento realizado no ano de 2022, e de imagens do satélite CBERS 04A do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023).

O satélite CBERS 04A foi lançado no ano de 2019, em parceria entre Brasil e China. A imagem utilizada foi registrada no dia 03 de maio de 2023 e possui resolução espacial de 2 metros na banda pancromática e 8 metros na banda multiespectral.

A partir desses dados, foi possível realizar a classificação do uso do solo com ferramentas de sensoriamento remoto no *software* QGIS v. 3.22.10. Após isso, foram geradas as informações de uso e ocupação do solo do vale a jusante. A técnica utilizada foi a classificação supervisionada.

A classificação supervisionada de solos no QGIS é um método que permite identificar e categorizar os diferentes tipos de solos em uma determinada área com base em dados de sensoriamento remoto, como imagens de satélite. Nesse método, a palavra "supervisionada" indica que o operador fornece amostras de treinamento ao *software*, ou seja, áreas onde os tipos de solo são conhecidos, para que o QGIS possa aprender a classificar outras áreas na imagem (ILACQUA, 2017).

Logo, foram estimados os valores dos coeficientes de *Manning* para cada tipo de uso do solo. O manual do usuário do *software* HEC-RAS 6.3.1 disponibiliza um compilado

de referências para valores de *Manning* para cada tipo de superfície; com base nisso, foram selecionados os valores dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de rugosidade de Manning para as classes de uso e ocupação do solo adotadas

Uso do solo	Coeficiente de rugosidade de Manning (<i>n</i>)
Vegetação Densa	0,080
Vegetação Rasteira	0,032
Área Urbana	0,100
Água	0,045

4.2.3 Modelo de Estimativa de Perdas de Vidas

A modelagem de perdas de vidas foi realizada no software HEC-LIFESIM 1.0. Os dados foram levantados no estudo de Nascimento *et al.* (2020), no qual o mapeamento da vulnerabilidade e caracterização da população e infraestrutura no vale de jusante foram realizados exclusivamente com base em dados secundários.

Os cenários de exposição e vulnerabilidade foram construídos com base nos dados do último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, no ano de 2010, e nas bases de dados disponibilizadas pela empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL), conforme metodologia utilizada por Silva (2020).

As simulações no HEC-LIFESIM foram realizadas considerando o período diurno (2pm) e noturno (2am) para dois cenários: um eficiente na identificação do perigo, que representa eficiência no alerta e mobilização da população; e outro ineficiente, que reproduz uma região pouco preparada para reagir à emergência de ruptura da barragem, com relação às reponsabilidades do empreendedor, sistema de alerta e mobilização da população. As faixas de coeficientes das equações do atraso na difusão do alerta e do atraso para início da mobilização foram determinadas para representar essas situações. O modelo hidrodinâmico utilizado para gerar o perigo iminente foi descrito no item 4.2.2.

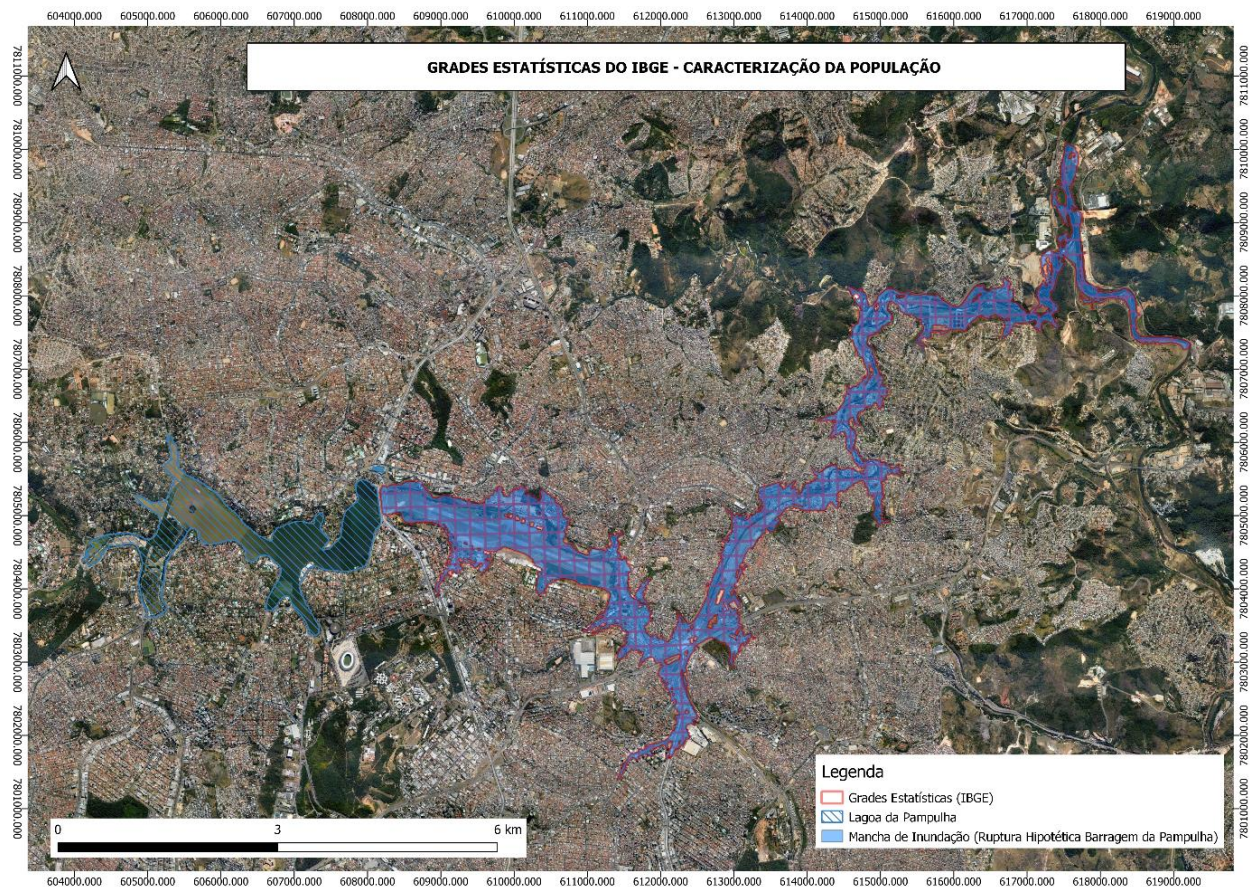
4.2.3.1 Caracterização do Vale a Jusante

Para determinação das variáveis que caracterizam a população e estruturas atingidas, foram utilizados dados secundários, conforme supracitado. Para a delimitação da área de interesse e o levantamento das populações em domicílios, ou seja, definição da população que seria atingida pela onda de inundação devido ao rompimento da barragem da Pampulha, foi utilizada a grade estatística do IBGE (IBGE, 2016).

A grade estatística permite uma análise mais detalhada das divisões territoriais, visando fornecer dados em unidades geográficas menores, as quais são compostas por um conjunto de áreas regulares que dividem os territórios geopolíticos, com intuito de integrar dados de origens diversas agregados em unidades geográficas incompatíveis. A menor unidade geográfica de resultados do censo demográfico é o setor censitário, que não possui uma forma homogênea. Assim, por meio de processos estatísticos de agregação e desagregação, informações contidas (população e domicílios) nesses setores censitários são transferidas para áreas de 1 km x 1 km, em zonas rurais, e 200 m x 200 m, em zonas urbanas, homogêneas e sem variação ao longo do tempo (IBGE, 2016).

Foram considerados os limites dos cenários simulados acrescidos de um *buffer* de 100 metros para seleção das grades estatísticas a serem analisadas. Portanto, foram analisadas 428 grades estatísticas que estavam delimitadas na área de interesse (Figura 24).

Figura 24 – Grades Estatísticas IBGE – caracterização da população



Com base nessas informações, foram extraídos os dados por meio da ferramenta de geoprocessamento QGIS, a partir da qual foram identificados 107.029 habitantes (Figura 25) e 32.868 domicílios inseridos na mancha de inundação (Figura 26). Destaca-se que no ano de 2022 foi realizado o levantamento de informações para atualização do censo demográfico do Brasil, porém, não houve, até o momento, divulgação de todos os resultados; houve apenas liberação parcial de alguns resultados, dentre os quais o quantitativo de população das capitais dos estados brasileiros. Foi observado que a população estimada no censo de 2022 para o município de Belo Horizonte, onde está inserida a área e estudo, foi de 2.392.678 habitantes (IBGE, 2023), ou seja, um aumento de menos de 18.000 habitantes (cerca de 0,8% a mais) em cerca de 12 anos, o que sugere uma representatividade adequada dos dados utilizados nesta pesquisa.

Figura 25 – Grades Estatísticas IBGE – Número de Habitantes na Área de Estudo

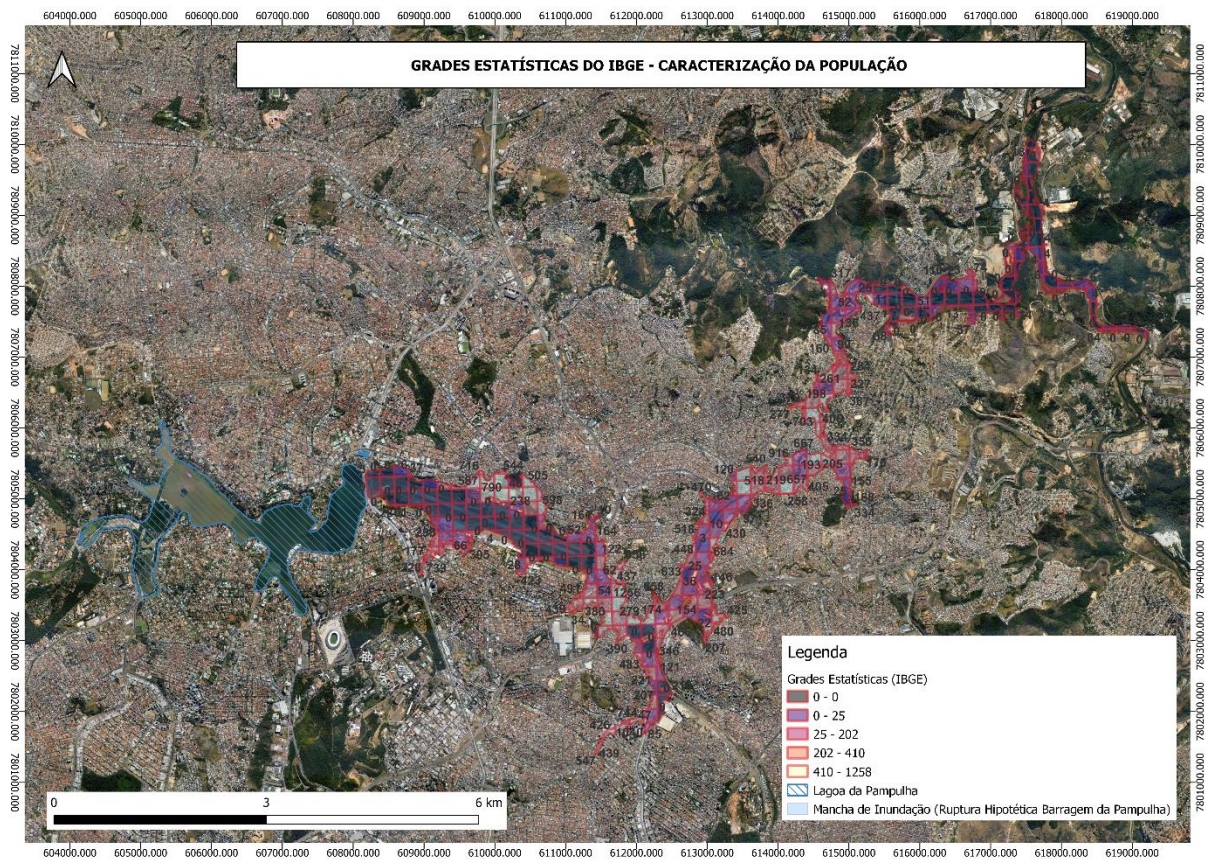
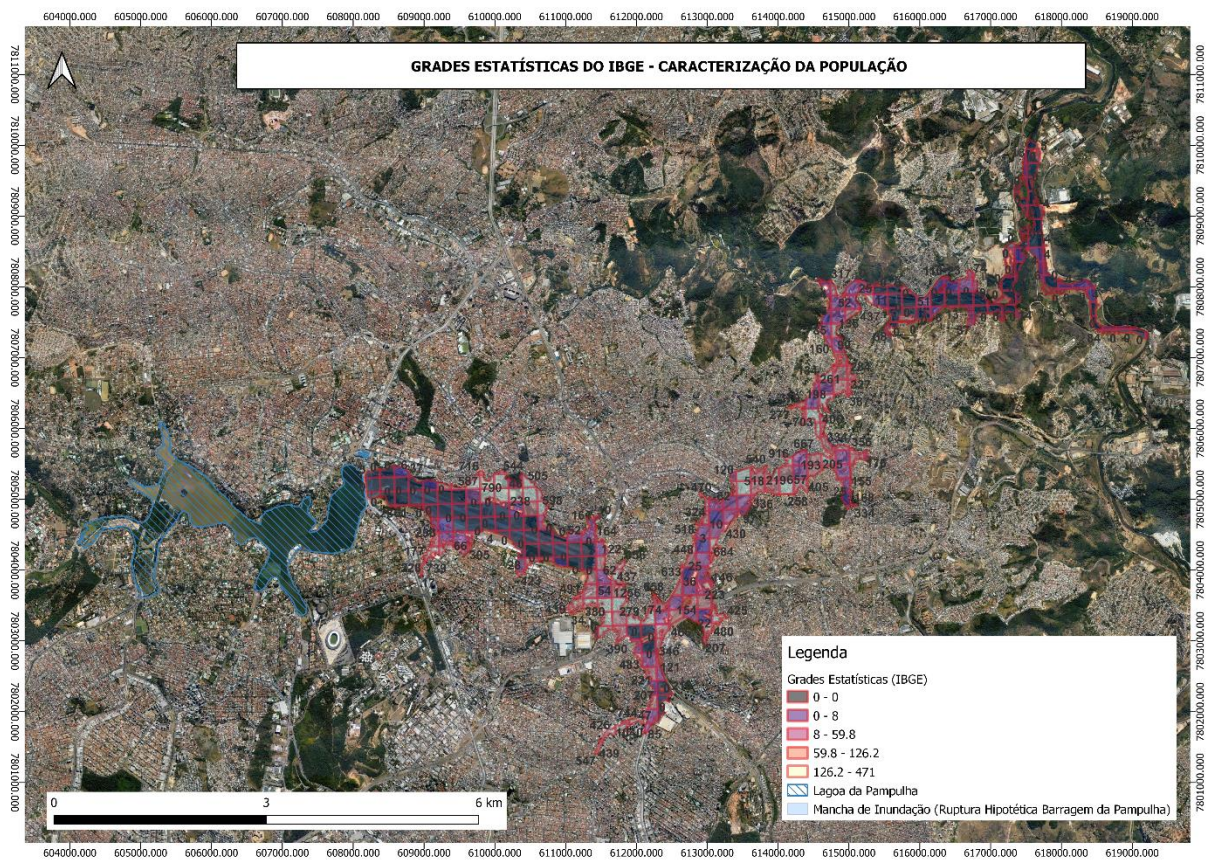


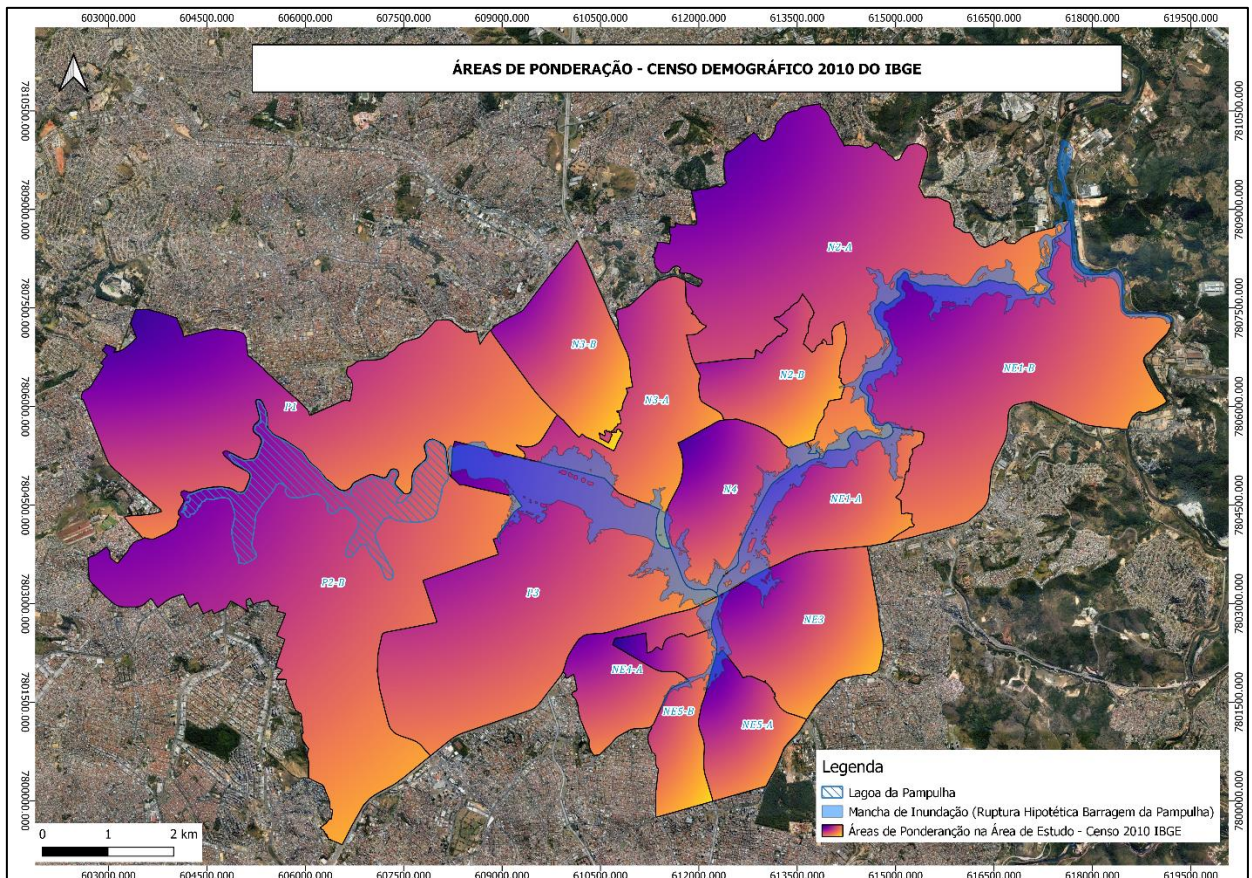
Figura 26 – Grades Estatísticas IBGE – Número de Domicílios na Área de Estudo



Os microdados são dados que representam o levantamento do censo demográfico realizado pelo IBGE nos domicílios visitados. Com isso, esses dados consistem no menor nível de desagregação do censo demográfico, retratando os resultados em forma de números e não individualização das informações para manutenção do sigilo dos entrevistados (IBGE, 2010).

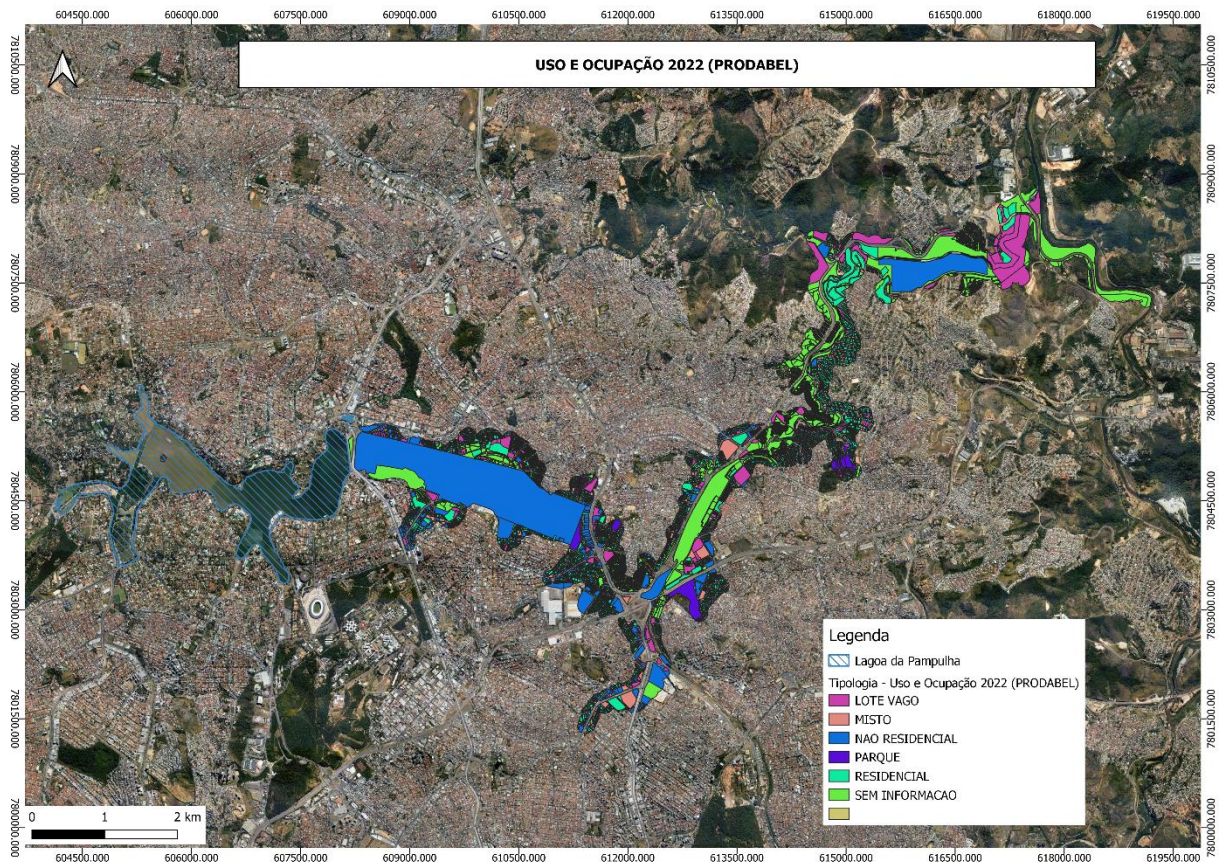
Logo, a partir dessas informações, foi realizado o levantamento de dados de tipologia de ocupação e material de construção das estruturas para o inventário estrutural dos edifícios localizados na mancha de inundação. Além disso, foram levantados dados referentes à idade, número de deficientes físicos e presença das pessoas em diferentes horários do dia, para definição de vulnerabilidades da população dentro da mancha de inundação. Os microdados são agrupados em áreas de ponderação, que são unidades geográficas formadas por agrupamento de setores censitários nos quais são aplicados calibradores para gerar as estimativas de informação da população em cada localidade. Na área de estudo, estão inseridas 14 áreas de ponderação (Figura 27).

Figura 27 – Áreas de Ponderação – Censo Demográfico 2010 do IBGE



Além das informações do censo demográfico do IBGE, foram utilizadas as informações levantadas pela PRODABEL, dados públicos disponibilizados no Portal de Geoprocessamento de informações da Prefeitura de Belo Horizonte. Os dados disponibilizados são geoespacializados. As informações utilizadas da PRODABEL foram de uso e ocupação territorial do município no ano de 2022. Na Figura 28 são apresentadas as informações delimitadas na área de interesse.

Figura 28 – Tipologia de Uso e Ocupação do vale a jusante



Fonte: Adaptado de PRODABEL (2022).

Logo, considerando as 14 áreas de ponderação e as edificações localizadas na área de interesse, foi possível alocar as informações extraídas dos microdados do censo demográfico do IBGE. Essa alocação compreendeu duas principais etapas. A primeira foi a utilização do algoritmo construído por Silva (2020) para a leitura dos dados em formato de números associados a cada informação. Ademais, o algoritmo foi atualizado para a inserção de pessoas com deficiências físicas (cegos, surdos, dificuldade de locomoção e deficientes mentais) serem incluídas na variável “pessoas com dificuldade de locomoção” no *software* LifeSim.

Após a leitura desses dados, foi realizada a caracterização das estruturas identificadas na área de interesse. Essa associação foi realizada por meio da ferramenta de geoprocessamento QGIS, que permite arranjar de maneira proporcional e distribuir de forma homogênea as informações nos domicílios alocados na região de estudo.

Com base na amostra de domicílios dos microdados, as residências foram classificadas em relação à tipologia de ocupação como: residencial unifamiliar (RES1); apartamentos (RES3); dormitório institucional (RES4); penitenciária/casa de recuperação (RES5); e asilo ou orfanato (RES6). Para o material de construção, foram considerados os materiais alvenaria e madeira. Foi percebido um predomínio da tipologia residencial unifamiliar (25.656 domicílios) e do material de construção alvenaria (32.532 domicílios) como mostrado nos resultados da análise nas Tabelas Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 10 - Número total absoluto de domicílios nas áreas de ponderação por tipo de ocupação e tipo de material de construção

Área de ponderação	Total de domicílios	Número absoluto de domicílios						
		Tipo de ocupação					Material	
		RES1	RES3	RES4	RES5	RES6	Madeira	Alvenaria
1	10.317	10.040	199	0	0	80	103	10.214
2	8.958	8.856	92	0	0	10	10	8.948
3	15.200	12.056	2.953	0	16	175	278	14.922
4	8.707	6.041	2.416	23	0	227	266	8.441
5	11.102	9.880	1.127	29	0	66	120	10.981
6	8.723	7.802	921	0	0	0	0	8.723
7	14.820	14.179	568	0	73	0	113	14.707
8	13.417	11.805	1.596	0	0	16	16	13.401
9	8.987	7.235	1.735	0	0	17	35	8.952
10	10.230	3.779	6.420	0	0	31	31	10.199
11	11.548	3.534	7.907	1	0	106	129	11.419
12	15.353	10.128	5.004	0	0	221	390	14.963
13	10.495	5.804	3.904	627	0	160	884	9.611
14	13.496	7.153	6.240	27	0	76	117	13.379

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Tabela 11 - Número total relativo de domicílios nas áreas de ponderação por tipo de ocupação e tipo de material de construção

Área de ponderação	Total de domicílios	Número relativo de domicílios (%)						
		Tipo de ocupação					Material	

		RES1	RES3	RES4	RES5	RES6	Madeira	Alvenaria
1	10.317	97,3	1,9	0,0	0,0	0,8	1,0	99,0
2	8.958	98,9	1,0	0,0	0,0	0,1	0,1	99,9
3	15.200	79,3	19,4	0,0	0,1	1,2	1,8	98,2
4	8.707	69,4	27,7	0,3	0,0	2,6	3,1	96,9
5	11.102	89,0	10,2	0,3	0,0	0,6	1,1	98,9
6	8.723	89,4	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
7	14.820	95,7	3,8	0,0	0,5	0,0	0,8	99,2
8	13.417	88,0	11,9	0,0	0,0	0,1	0,1	99,9
9	8.987	80,5	19,3	0,0	0,0	0,2	0,4	99,6
10	10.230	36,9	62,8	0,0	0,0	0,3	0,3	99,7
11	11.548	30,6	68,5	0,0	0,0	0,9	1,1	98,9
12	15.353	66,0	32,6	0,0	0,0	1,4	2,5	97,5
13	10.495	55,3	37,2	6,0	0,0	1,5	8,4	91,6
14	13.496	53,0	46,2	0,2	0,0	0,6	0,9	99,1

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Tabela 12 - Número de domicílios na área de interesse por tipo de ocupação e tipo de material de construção

Área de ponderação	Domicílios na região de interesse	Número absoluto de domicílios						
		Tipo de ocupação					Material	
		RES1	RES3	RES4	RES5	RES6	Madeira	Alvenaria
1	3.857	3.753	74	0	0	30	39	3.818
2	589	582	6	0	0	1	1	588
3	4.433	3.516	861	0	5	51	81	4.352
4	86	60	24	0	0	2	3	83
5	5.638	5.017	572	15	0	34	61	5.577
6	3.733	3.339	394	0	0	0	0	3.733
7	2.724	2.607	104	0	13	0	21	2.703
8	2.190	1.926	261	0	0	3	3	2.187
9	1.404	1.130	271	0	0	3	5	1.399
10	215	79	135	0	0	1	1	214
11	2.943	901	2.015	0	0	27	33	2.910
12	419	276	137	0	0	6	11	408
13	492	272	183	29	0	8	41	451
14	4.145	2.198	1.916	8	0	23	36	4.109
TOTAL	32.868	25.656	6.953	52	18	189	336	32.532

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Para definição do número de andares dos edifícios, foi adotada a hipótese de distribuição vertical homogênea dos domicílios entre os andares das edificações, ou seja, o mesmo número de apartamentos por andar. Além disso, foi adotada a hipótese de número de andares igual a 04 para os domicílios na tipologia “apartamento”.

Com relação às variáveis relacionadas a ensino e trabalho para estimativa da presença de pessoas em casa no período da tarde e noite, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Para o período noturno, foram consideradas as pessoas que retornam para casa diariamente;
- Para o período diurno, foram consideradas as pessoas que não trabalham, as que realizam trabalho doméstico no domicílio, as que trabalham no domicílio, as que estudam de manhã e que não trabalham (do sexto ano do ensino fundamental até o terceiro ano do ensino médio) e 50% das pessoas que cursam ensino superior e que não trabalham; e
- A distribuição de pessoas com idade superior e inferior a 65 anos foi realizada respeitando-se a população total de cada domicílio.

Com isso, foram estimadas as populações nos domicílios em horário não-comercial (02:00) – 105.577 pessoas, e em horário comercial (14:00) – 55.317 pessoas. Os dados detalhados estão dispostos na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 13 - População total em números absolutos nas áreas de ponderação em função da faixa etária e horário do dia (número de pessoas)

Área de ponderação	População total	Número absoluto de pessoas					
		Em casa à noite			Em casa à tarde		
		Geral	<65 anos	>65 anos	Geral	<65 anos	>65anos
1	36.709	36.153	34.411	1.742	20.255	18.599	1.656
2	29.622	29.264	27.414	1.850	15.393	13.652	1.741
3	48.355	47.895	44.477	3.418	26.047	22.824	3.223
4	26.668	26.263	23.586	2.677	13.454	11.073	2.381
5	35.809	35.285	32.368	2.917	18.500	15.769	2.731
6	28.324	28.089	26.303	1.786	14.036	12.370	1.666
7	50.161	49.545	47.128	2.417	24.636	22.540	2.096
8	43.425	42.723	39.051	3.672	22.996	19.626	3.370
9	27.734	27.499	24.920	2.579	15.427	13.107	2.320
10	31.708	30.749	27.487	3.262	14.660	11.955	2.705
11	32.990	32.472	29.330	3.142	16.125	13.234	2.891
12	48.050	47.424	43.901	3.523	23.217	20.169	3.048
13	31.107	30.589	27.753	2.836	15.662	13.241	2.419
14	41.226	40.441	37.142	3.299	20.604	17.673	2.931

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Tabela 14 - População total em números absolutos nas áreas de ponderação em função da faixa etária e horário do dia (porcentagem).

Área de ponderação	População total	Número relativo de pessoas					
		Em casa à noite			Em casa à tarde		
		Geral	<65anos	>65anos	Geral	<65 anos	>65anos
1	36.709	98,5	93,7	4,7	55,2	50,7	4,5
2	29.622	98,8	92,5	6,2	52,0	46,1	5,9
3	48.355	99,0	92,0	7,1	53,9	47,2	6,7
4	26.668	98,5	88,4	10,0	50,4	41,5	8,9
5	35.809	98,5	90,4	8,1	51,7	44,0	7,6
6	28.324	99,2	92,9	6,3	49,6	43,7	5,9
7	50.161	98,8	94,0	4,8	49,1	44,9	4,2
8	43.425	98,4	89,9	8,5	53,0	45,2	7,8
9	27.734	99,2	89,9	9,3	55,6	47,3	8,4
10	31.708	97,0	86,7	10,3	46,2	37,7	8,5
11	32.990	98,4	88,9	9,5	48,9	40,1	8,8
12	48.050	98,7	91,4	7,3	48,3	42,0	6,3
13	31.107	98,3	89,2	9,1	50,3	42,6	7,8
14	41.226	98,1	90,1	8,0	50,0	42,9	7,1

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Tabela 15 - População na área de interesse em números absolutos em função da faixa etária e horário do dia (número de pessoas).

Área de ponderação	População na região de interesse	Número absoluto de pessoas					
		Em casa à noite			Em casa à tarde		
		Geral	<65anos	>65anos	Geral	<65anos	>65anos
1	13.557	13.352	12.709	643	7.480	6.869	611
2	1.982	1958	1.834	124	1.030	914	116
3	14.802	14.661	13.615	1.046	7.973	6.987	986
4	284	280	251	29	143	118	25
5	18.683	18.410	16.888	1.522	9.652	8.227	1.425
6	12.572	12.468	11.675	793	6.230	5.491	739
7	8.943	8.833	8.402	431	4.392	4.018	374
8	7.339	7.220	6.600	620	3.886	3.316	570
9	4.191	4.155	3.765	390	2.331	1.981	350
10	643	624	558	66	297	242	55
11	8.359	8.228	7.432	796	4.086	3.353	733
12	1.319	1.302	1.205	97	637	553	84
13	1.519	1.494	1.356	138	765	647	118
14	12.836	12.592	11.565	1.027	6.415	5.502	913
TOTAL	107.029	105.577	97.855	7.722	55.317	48.218	7.099

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

A estimativa da população em instituições de ensino (fundamental, superior, estadual, federal e particular), saúde (Unidades de Pronto Atendimento e centros de saúde), e

assistência social (Centros de Referência de Assistência Social (CRAS) e Centros de Referência de Assistência Social (CREAS)) foi realizada a partir dos dados da PRODABEL. Logo, foram identificadas 583 unidades localizadas nas regionais Pampulha, Norte e Nordeste de Belo Horizonte. Porém, apenas 84 unidades se encontram no interior da área de interesse. Na Tabela 15 indica-se o quantitativo de cada tipologia de equipamento por regional, de maneira geral e na região de interesse. Assumiu-se que 50% dos empregados das unidades de saúde e assistência social trabalham de dia e 50% durante a noite, devido ao funcionamento 24h dessas unidades.

Tabela 16 - Número de equipamentos nas regionais e na área de interesse do estudo

Categoria	Equipamento	Regional					
		Nordeste		Norte		Pampulha	
		Total	Região de interesse	Total	Região de interesse	Total	Região de interesse
Ensino	Creche	19	1	19	8	21	2
	Infantil	24	3	20	4	16	0
	Fundamental	27	2	20	4	14	0
	Estadual	29	5	17	6	19	3
	Particular	54	12	43	4	112	7
	Superior	12	9	3	0	40	1
Saúde	Centro de saúde	21	1	20	5	15	2
	UPA	1	1	1	1	1	0
Assistência social	CRAS	3	0	5	1	4	0
	CREAS	1	0	1	1	1	1
TOTAL		191	34	149	34	243	16

Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Com base nos dados da PRODABEL, também foi possível identificar o quantitativo de pessoas relacionadas a atividades econômicas. Os dados vetoriais disponibilizados apresentam a localização e tipo de atividade, a área utilizada para o desenvolvimento da atividade, o porte da empresa, a data de início, a natureza jurídica, a razão social e o CNPJ. Nessa base de dados, constam 379.402 atividades no município de Belo Horizonte e 12.324 atividades dentro da área de interesse.

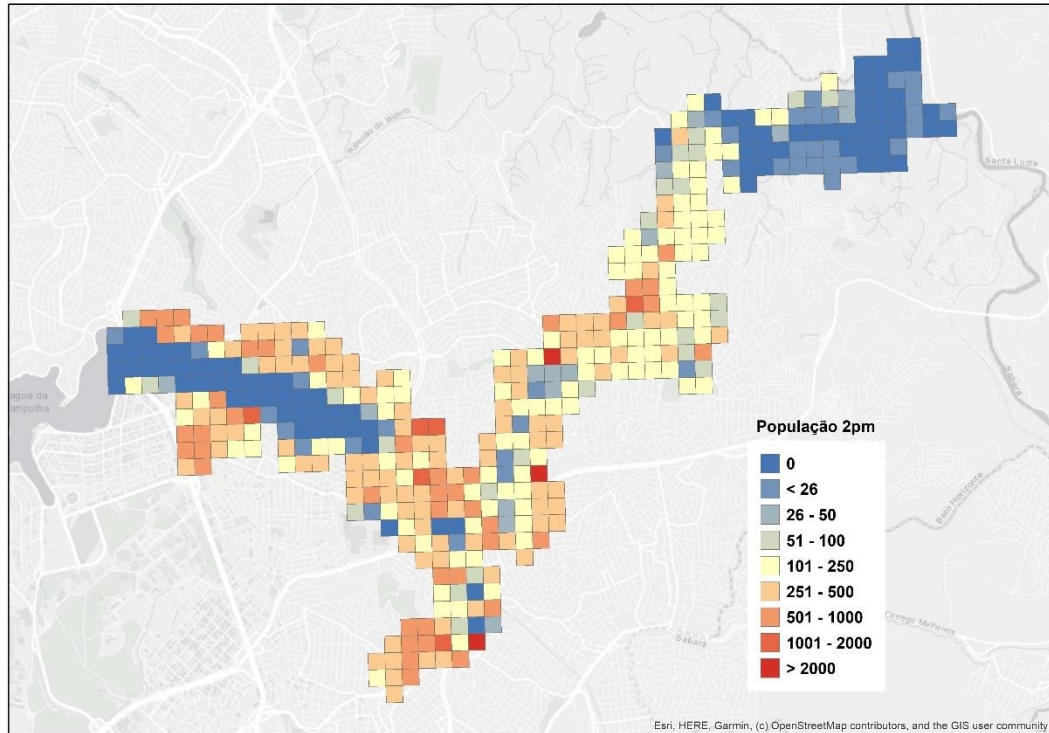
A *priori*, foram selecionados os tipos de atividades a serem consideradas nesta análise, na qual foram adotadas as seguintes hipóteses com intuito de se evitar redundâncias e dupla-contagem às análises já realizadas:

- Foram consideradas apenas as atividades que estavam localizadas fora de áreas exclusivamente residenciais – essa consideração permite que não seja feita dupla-contagem de população exposta, visto que, na análise de domicílios, já foram consideradas pessoas que trabalham em residências nessas áreas; e
- Não foram consideradas as atividades relacionadas a ensino, saúde e assistência social, conforme já realizado.

Com base nessa análise, foram identificadas 156.241 atividades econômicas em Belo Horizonte e 5.070 na área de interesse. Foi realizado um reagrupamento das atividades, no qual foram introduzidas duas categorias: atividades noturnas e diurnas. Como atividades noturnas (02:00), foram considerados os bares e estabelecimentos especializados em serviços de bebidas, como entretenimento, casas de festas e eventos e discotecas e danceterias. Como atividades diurnas, foram consideradas todas as demais. Com isso, as 5.070 atividades econômicas foram divididas em 5.038 diurnas e 32 noturnas.

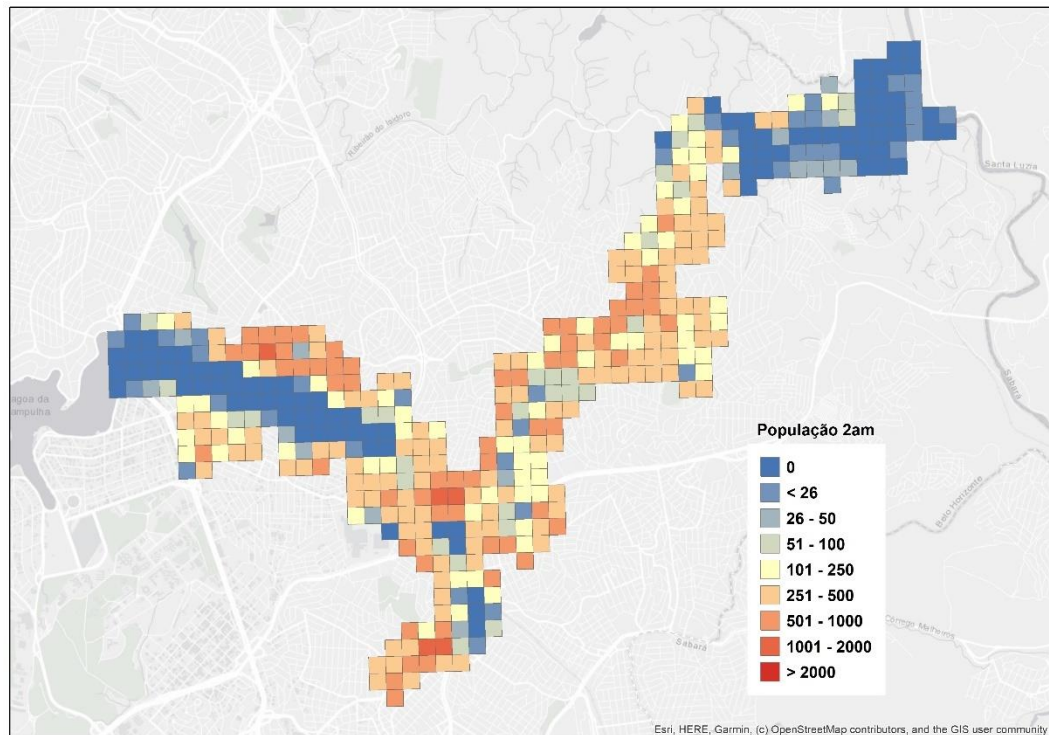
A população total estimada para o horário comercial (14:00) foi de 101.865 pessoas e para o horário não-comercial (02:00) foi de 106.520 pessoas. Em relação ao material de construção, todas foram consideradas de concreto que, segundo o critério de estabilidade de USACE (2015), possui comportamento semelhante à alvenaria. Destaca-se que não foi considerada a população flutuante dentro da área de estudo.

Figura 29 - Mapeamento da população total na área de interesse durante horário comercial (14:00)



Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

Figura 30 - Mapeamento da população total na área de interesse durante horário não-comercial (02:00)

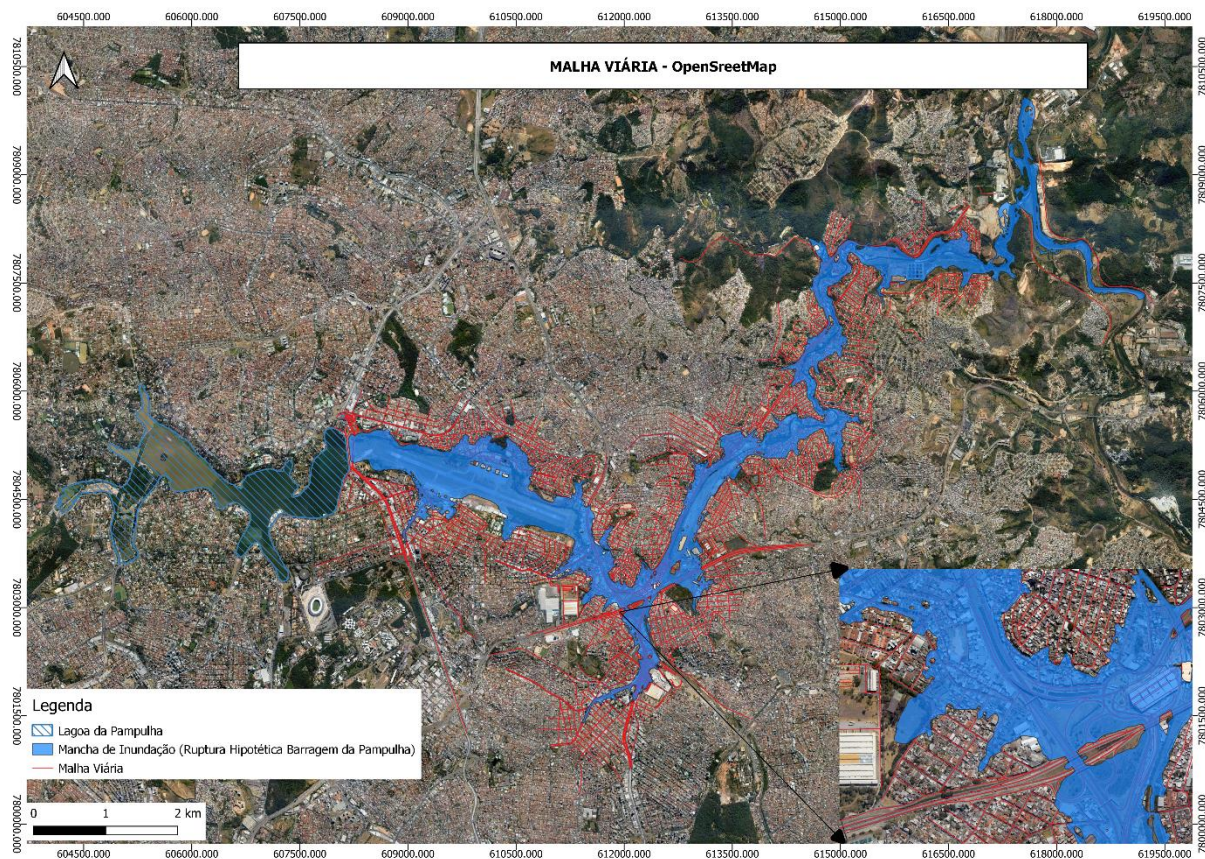


Fonte: PAE da Barragem da Pampulha (Nascimento *et al.*, 2020)

4.2.3.2 Malha Viária

A malha viária representa os caminhos que poderão ser percorridos pelos evacuados a pé ou em veículos. Os dados foram obtidos na plataforma do *OpenStreetMap*, que é inclusa na interface do LifeSim e permite identificar os sentidos das vias. Na Figura 31 é apresentada a malha viária utilizada. No entanto, conforme discutido no item 3.1.1.1, são utilizados somente os acessos formais, ou seja, possíveis estradas informais, como vielas, passagens por praças etc. ainda não conseguem ser computadas no LifeSim.

Figura 31 – Malha Viária utilizada na simulação do LifeSim



4.2.3.3 Destinos Seguros

No PAE da Barragem da Pampulha foram identificados destinos seguros para que a população evacuasse em caso de rompimento da barragem. Os pontos foram fornecidos pela Defesa Civil via SUDECAP, que orientam o processo de evacuação. Esses destinos foram planejados a fim de otimizar os deslocamentos e evitar deslocamentos da população para dentro da área de risco (Figura 32).

Figura 32 – Destinos Seguros para evacuação – PAE Barragem da Pampulha

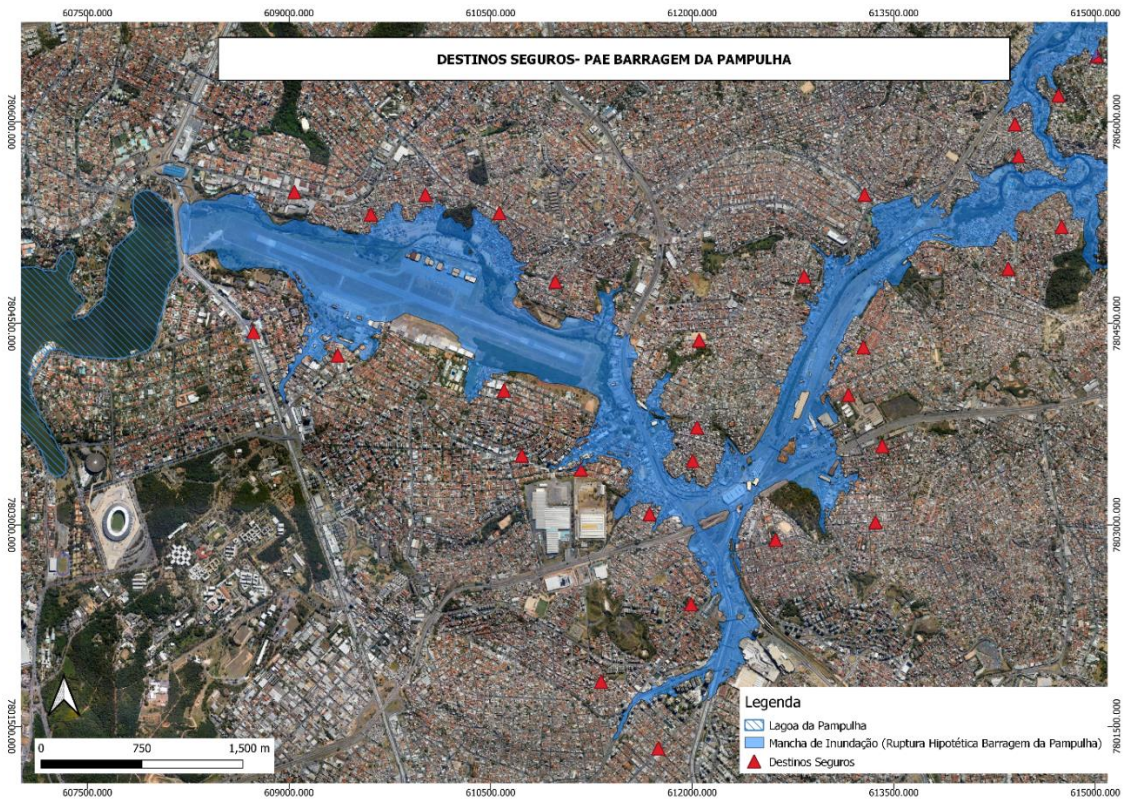
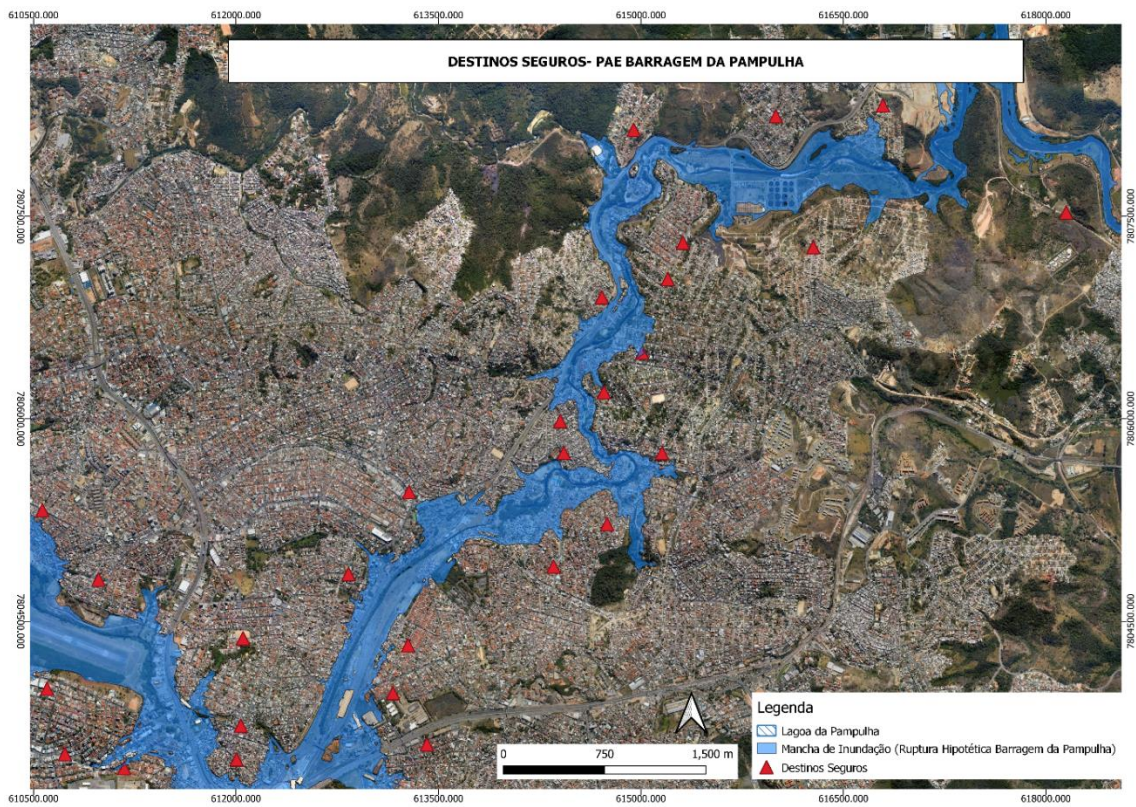


Figura 33 – Destinos Seguros para evacuação – PAE Barragem da Pampulha



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Atualização do Estudo de Caso

5.1.1 Propagação da Onda de Ruptura

A propagação de onda de ruptura decorrente da ruptura hipotética da Barragem da Pampulha foi gerada utilizando o *software* HEC-RAS versão 6.3.1. Os resultados foram próximos aos encontrados por Nascimento *et al.* (2020), considerando principalmente a utilização do hidrograma de ruptura de Dinésio Franco Engenharia/Geotecnia (2015) em ambos os modelos. As profundidades encontradas na mancha de inundação variaram entre 0,0097m e 14,5 m, sendo as maiores profundidades associadas ao rio Ribeirão das Onças (Figura 34 e Figura 35).

Na Figura 36 é apresentada a envoltória máxima de inundação. A maioria das estruturas atingidas é de edifícios comerciais e residenciais e viadutos; além disso, o Aeroporto da Pampulha está bem próximo da barragem.

Figura 34 – Profundidades máximas (1/2) – Mancha de Inundação

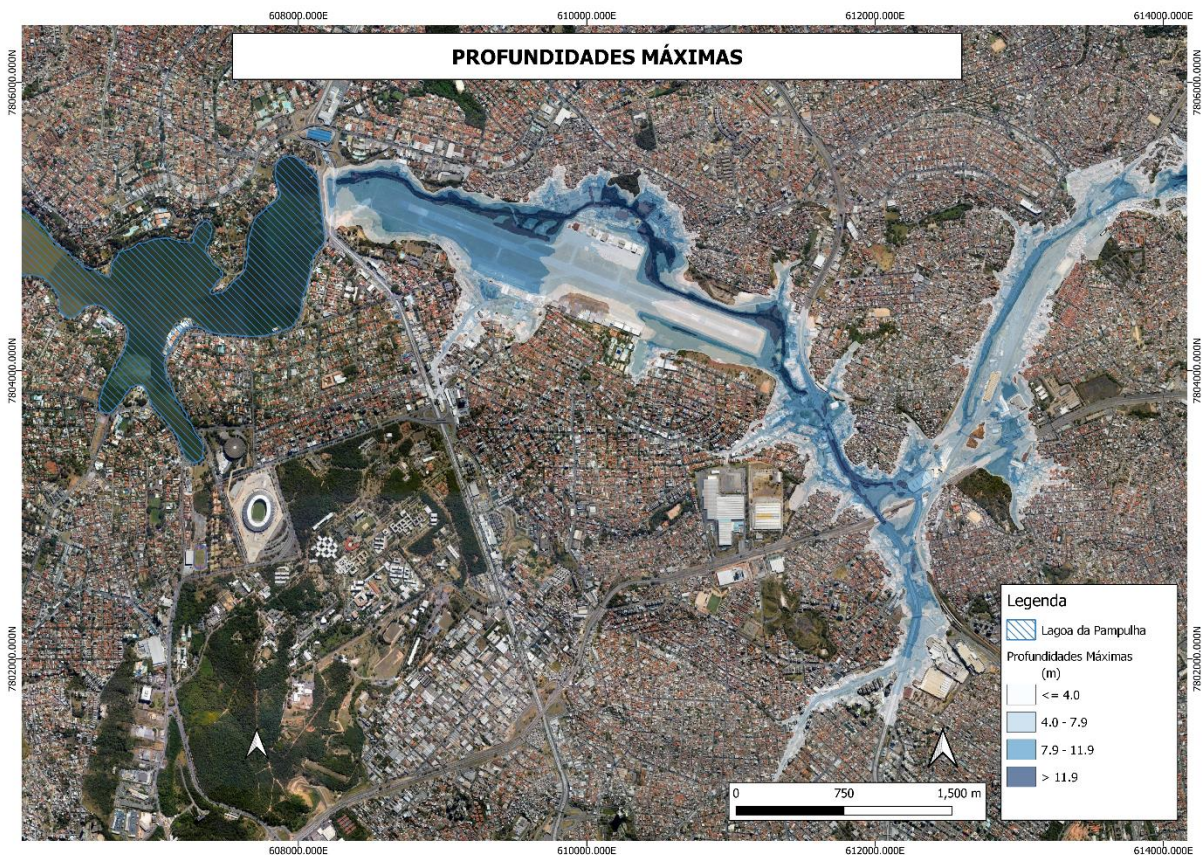


Figura 35 – Profundidades Máximas (2/2) – Mancha de Inundação

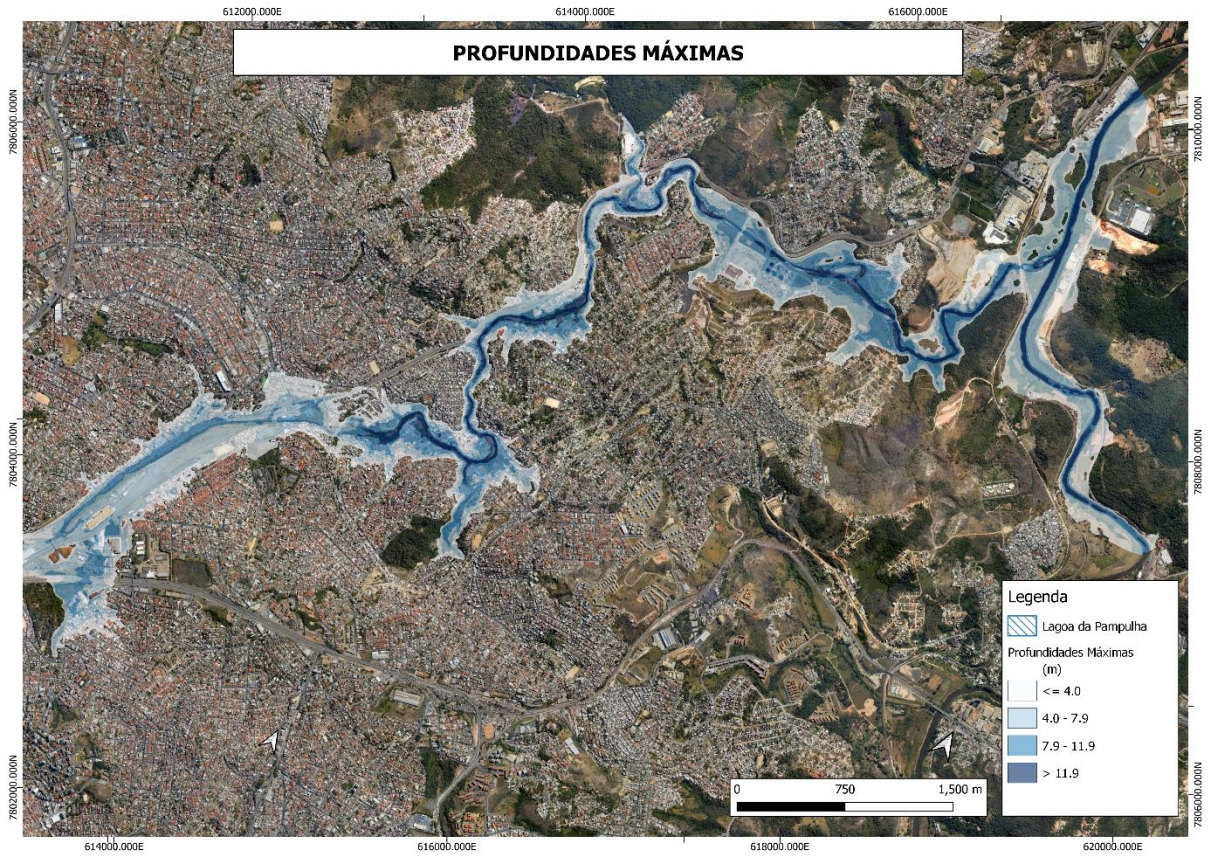
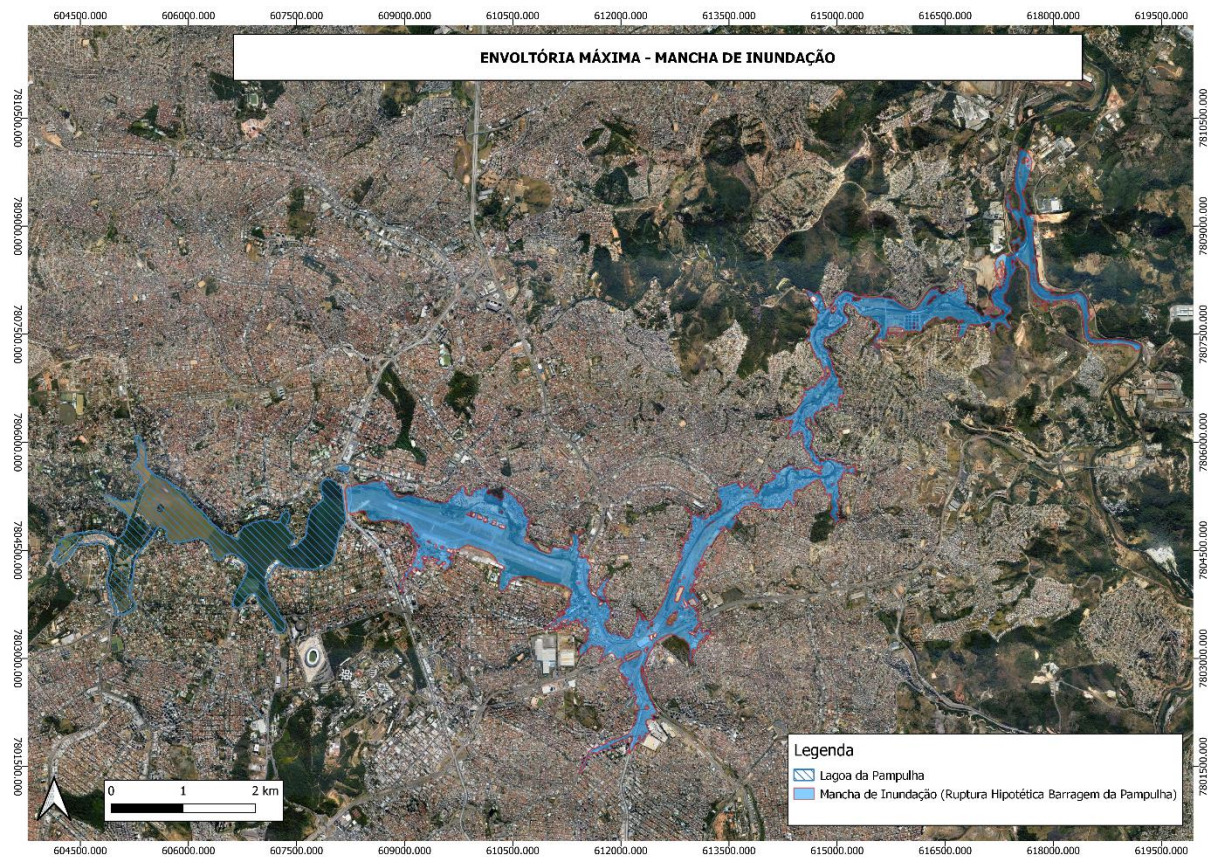


Figura 36 – Envoltória Máxima de inundação – Barragem da Pampulha



Alguns exemplos de viadutos atingidos são apresentados por Nascimento *et al.* (2020) no PAE da Barragem da Pampulha (Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42).

Figura 37 - Linha de metrô sobre a Avenida Cristiano Machado (São Bernardo/Minaslândia)



Figura 38 - Viaduto Aníbal Machado sobre a Avenida Cristiano Machado (Ipiranga/União)



Figura 39 - Linha de Metrô sobre a Rua Sônia (Primeiro de Maio)



Figura 40 - Viaduto Paulo Mendes Campos sobre a Avenida Cristiano Machado (Suzana/Vila Primeiro de Maio)



Figura 41 - Viadutos Fernando Sabino e Otto Lara Resende sobre a Avenida Cristiano Machado (Suzana/Maria Virgínia)



Figura 42 - Viaduto Carlos Drummond de Andrade sobre a Avenida Cristiano Machado (Palmares/São Paulo)



5.1.2 Estimativa de Perdas de Vidas

A partir do modelo hidrodinâmico bidimensional (Item 4.2.2) e do levantamento dos dados de entrada para o modelo de perdas de vidas (Item 4.2.3), é possível realizar as simulações no *software* LifeSim a fim de iniciar as análises propostas. As

simulações foram realizadas considerando cenários eficientes e ineficientes, no período diurno e noturno.

Os cenários desenvolvidos e propostos estão descritos a seguir:

- **Cenário Ineficiente:** a modelagem resultou em uma representação de uma região pouco preparada para uma situação de alerta e evacuação. As faixas de coeficientes das equações de atraso na disseminação do alerta e do atraso para o início da mobilização foram determinadas para refletir essa situação. No intervalo entre a identificação da ameaça e a emissão do alerta, foi adotado um período suficientemente longo, variando de 0 a 24 horas (ou seja, de 0 a 1440 minutos). Em relação aos modos de evacuação, foram consideradas duas hipóteses: 50% dos evacuados realizariam a evacuação a pé e os outros 50% utilizariam veículos. Essa abordagem foi adotada para abranger diferentes cenários e comportamentos da população durante uma situação de emergência, permitindo uma análise abrangente da dinâmica de evacuação; e
- **Cenário Eficiente:** a escolha de faixas de coeficientes mais eficientes, no que concerne à difusão do alerta e início da mobilização, representa um planejamento de emergência eficiente em todas as etapas. Em relação aos modos de evacuação, foram consideradas duas hipóteses: 50% dos evacuados realizariam a evacuação a pé e os outros 50% utilizariam veículos.

Para cada cenário foram realizadas 1.000 simulações, baseando-se no método Monte Carlo, para sorteio das variáveis aleatórias entre os valores mínimos e máximos das faixas definidas para antecedência do alerta, curvas de alerta e mobilização. Os resultados para todos os cenários levando-se em consideração os diferentes níveis de eficiência são apresentados na Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Figura 46, as quais apresentam o número de fatalidades em função da antecipação do alerta do perigo para a população.

Figura 43 – Cenário Ineficiente – noturno

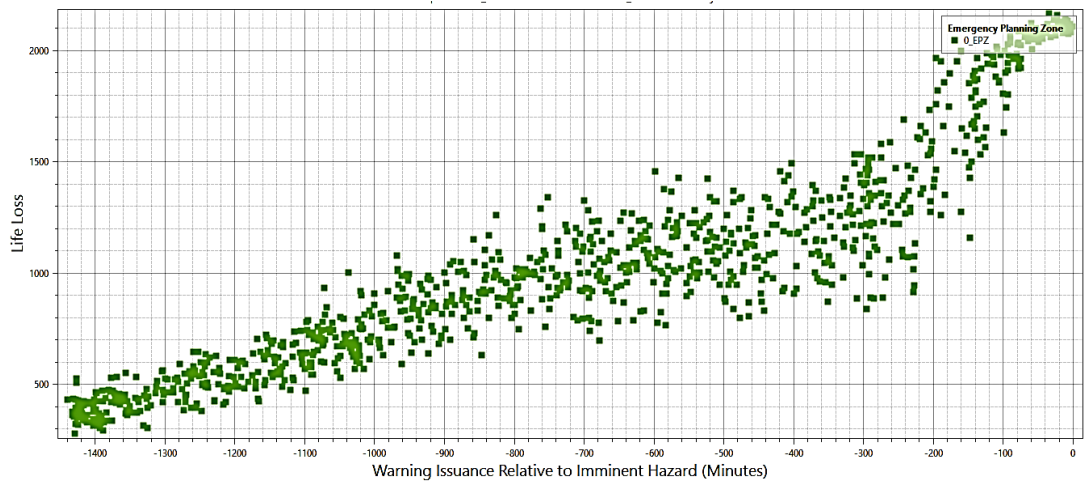


Figura 44 – Cenário Ineficiente – diurno

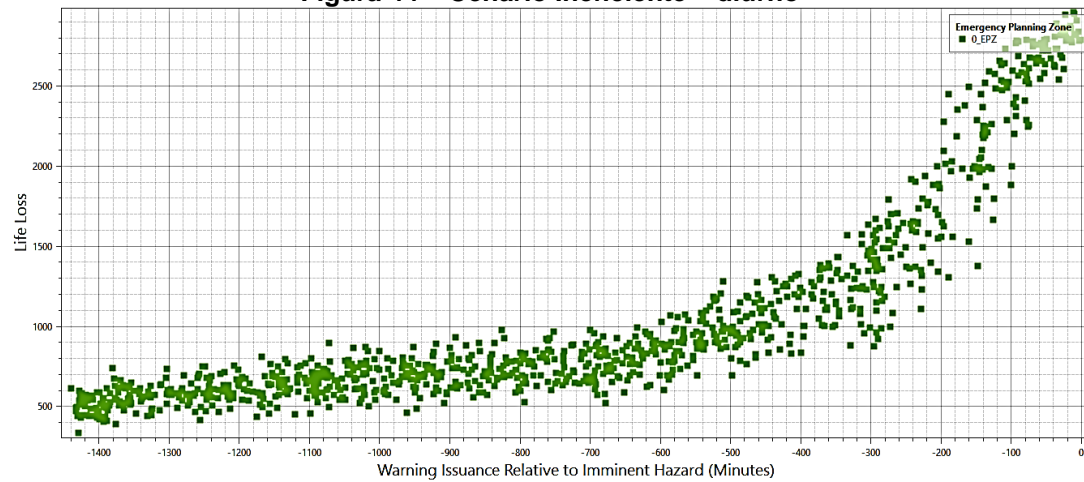


Figura 45 – Cenário Eficiente – noturno

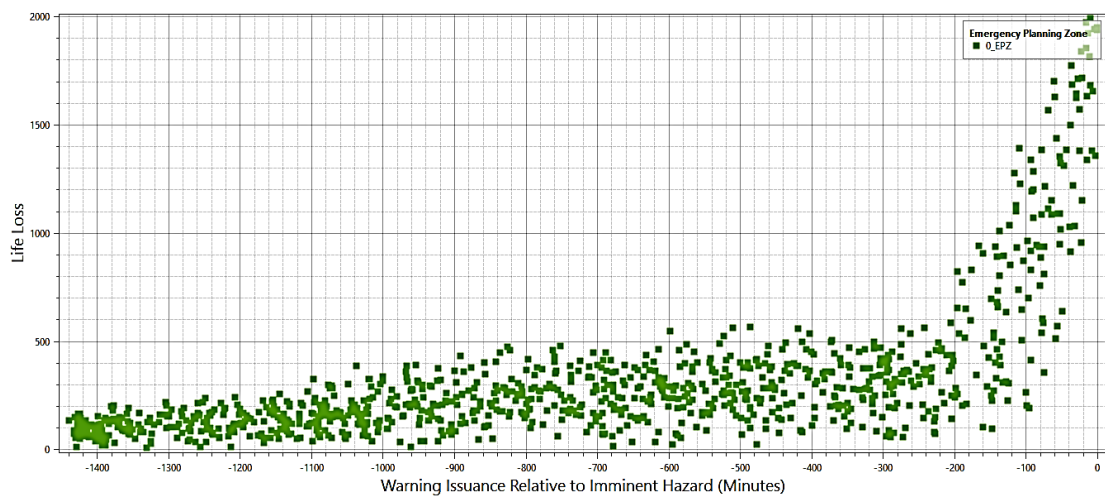
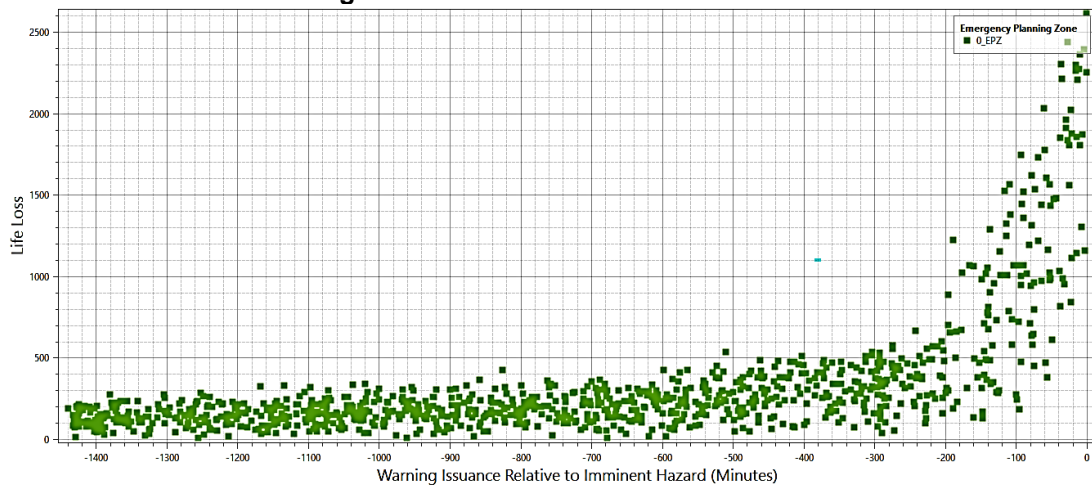


Figura 46 – Cenário Eficiente – diurno



Com base nas simulações realizadas, foi possível constatar uma redução significativa no número de fatalidades a partir da implementação de sistemas de alerta e evacuação eficientes, bem como da preparação adequada da população para a evacuação. Os resultados dos cenários no período noturno, tanto no caso eficiente quanto no ineficiente (Figura 43 e Figura 45), revelaram que, quando o alerta é emitido sem antecedência em relação ao início do evento de ruptura, ocorreriam em média 976 fatalidades no cenário ineficiente, enquanto no cenário eficiente esse número seria reduzido para uma média de 319. Para o período diurno, no cenário ineficiente, ocorreriam, em média, 1.047 fatalidades e para o cenário eficiente, em média, 325 fatalidades.

Com isso, haveria uma redução na ordem de 69% do número de fatalidades para o período diurno e de 67% para o cenário noturno, com a implementação e operacionalização de sistemas de alerta e evacuação eficientes na área atingida pela onda de inundação considerando o rompimento da Barragem da Pampulha.

Nos cenários eficientes, as consequências mínimas foram de 8 fatalidades para o período noturno e 9 fatalidades para o período diurno. Em contraste, nos cenários ineficientes, as consequências mínimas foram muito mais graves, com 279 fatalidades para o período noturno e 334 para o período diurno. Esses resultados ressaltam a importância de medidas eficientes de alerta para redução do número de fatalidades.

Os resultados destacam que o cenário de rompimento diurno (14:00) é mais crítico em relação ao cenário noturno (02:00). Essa diferença pode ser explicada pela

presença de atividades comerciais na região durante o horário diurno, o que implica em uma maior concentração de população exposta ao risco nesse período. Embora não tenha sido considerado diretamente nas simulações, é esperado que durante o horário comercial haja um maior fluxo de pessoas transitando pela área de risco, que podem ter efeitos bem negativos na evacuação.

Os resultados obtidos evidenciam um potencial significativo na redução de danos humanos (fatalidades) por meio da otimização dos sistemas de identificação de possíveis falhas, difusão de alertas e organização das ações de evacuação. Isso inclui treinamentos eficazes da população exposta ao perigo e da capacitação da equipe gerenciadora de emergências da barragem. Nesse sentido, investir em tecnologias e estratégias que aprimorem a capacidade de identificação de riscos e a eficiência dos sistemas de alerta e evacuação é fundamental para garantir uma resposta adequada.

5.2 Modelo Substituto – Expansão de Caos Polinomial

5.2.1 Definição das Variáveis

As variáveis de entrada foram definidas com base na relevância para elaboração dos Planos de Ações Emergenciais (PAE), conforme indicado no estudo de Lumbroso *et al.* (2021), que avaliou o potencial de redução do número de fatalidades no rompimento da Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais. No entanto, destaca-se a ausência de históricos de dados primários recentes, e, por isso, foram adotadas as hipóteses do modelo LifeSim referentes aos valores das curvas empíricas de população alertada, população mobilizada, emissão do alerta e identificação do perigo (Tabela 17).

Tabela 17 – Variáveis utilizadas para análise de incertezas e sensibilidade do modelo LifeSim

Variável	Unidade	Valores
População Alertada	Fração	0-1
População Mobilizada	Fração	0-1
Emissão do Alerta	Minutos	0-1.440
Identificação do Perigo	Minutos	0-1.440

5.2.2 Quantificação das Incertezas nas Variáveis de Entrada

Após a determinação das variáveis de entrada, torna-se necessária a escolha da distribuição de probabilidade que melhor representa os dados. Para esse propósito, foram analisadas as distribuições marginais das variáveis de entrada, a fim de construir o modelo substituto baseado na Expansão de Caos Polinomial e realizar a análise de sensibilidade dessas variáveis. Na Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50 são apresentados os ajustes das distribuições teóricas aos dados empíricos para o cenário pessimista diurno, sendo o melhor ajuste para a distribuição uniforme para todas as variáveis desse cenário. Esse resultado foi gerado para todas as variáveis de todos os cenários (Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62).

Figura 47 – Distribuição da variável *População Alertada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme – cenário pessimista diurno

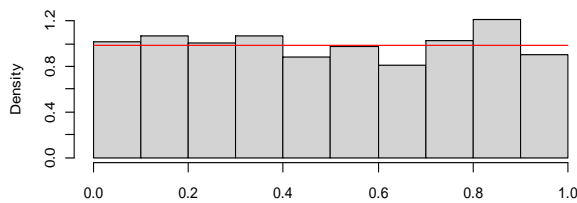


Figura 48 – Distribuição da variável *População Mobilizada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista diurno

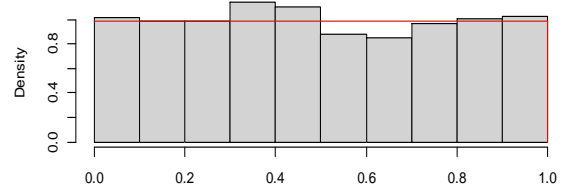


Figura 49 – Distribuição da variável *Emissão do Alerta* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista diurno

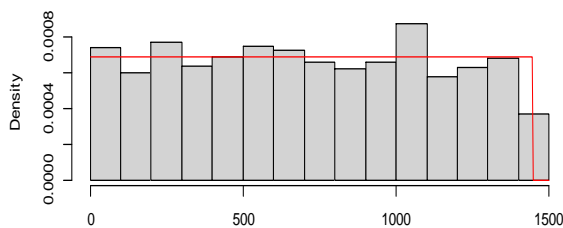


Figura 50 – Distribuição da variável *Identificação do Perigo* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista diurno

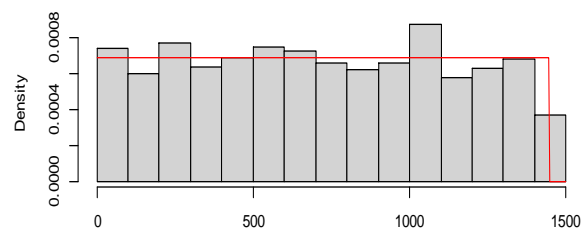


Figura 51 – Distribuição da variável *População Alertada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme – cenário pessimista noturno

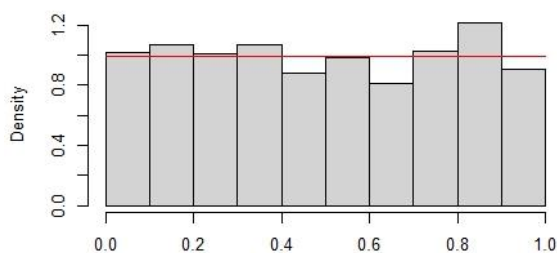


Figura 52 – Distribuição da variável *População Mobilizada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista noturno

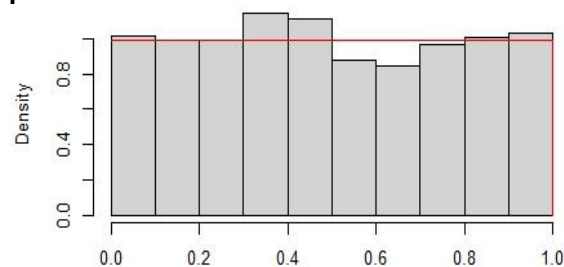


Figura 53 – Distribuição da variável *Emissão do Alerta* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista noturno

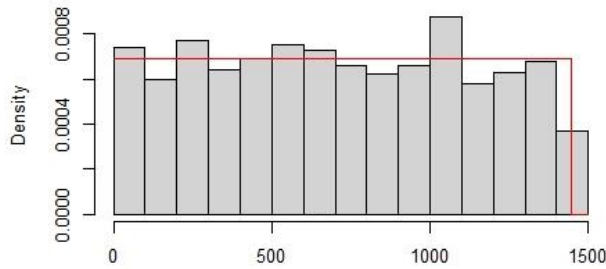


Figura 54 – Distribuição da variável *Identificação do Perigo* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário pessimista noturno

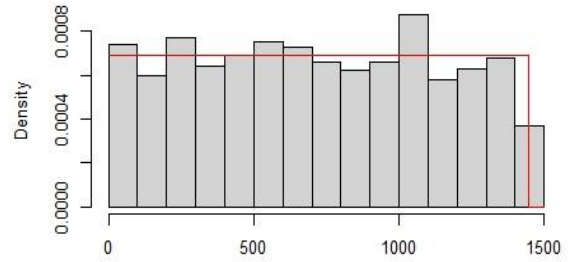


Figura 55 – Distribuição da variável *População Alertada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno

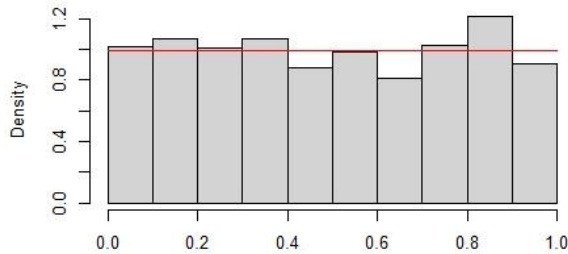


Figura 56 – Distribuição da variável *População Mobilizada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno

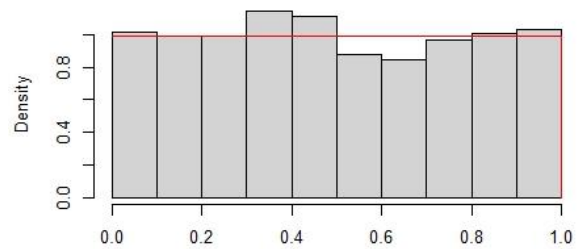


Figura 57 – Distribuição da variável *Emissão do Alerta* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno

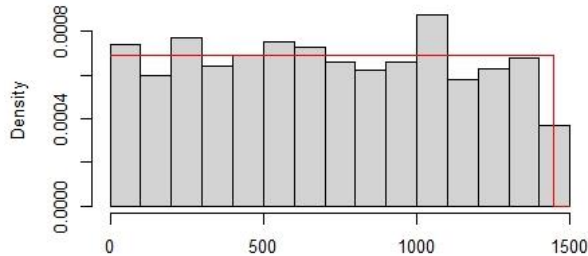


Figura 58 – Distribuição da variável *Identificação do Perigo* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista diurno

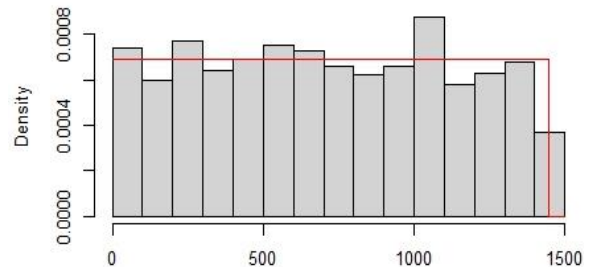


Figura 59 – Distribuição da variável *População Alertada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno

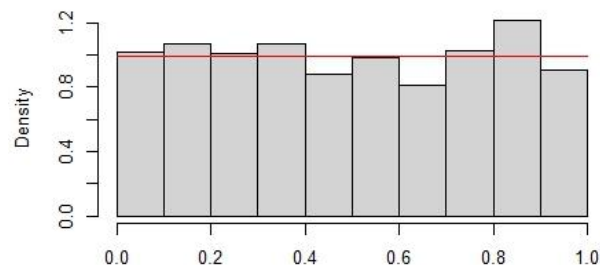


Figura 60 – Distribuição da variável *População Mobilizada* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno

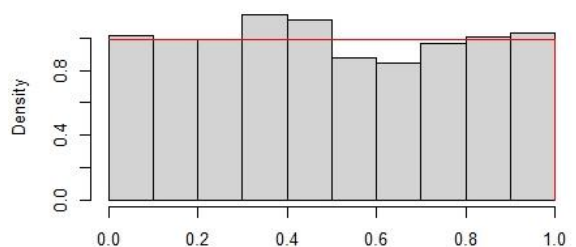


Figura 61 – Distribuição da variável *Emissão do Alerta* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno

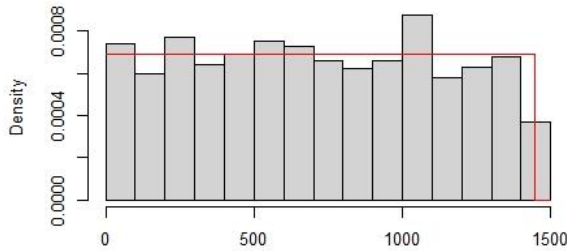
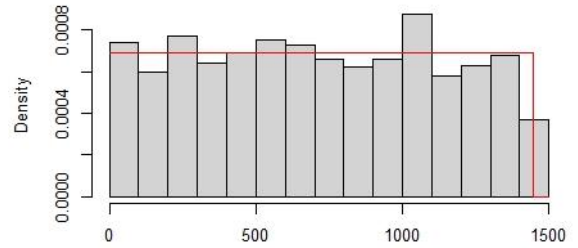


Figura 62 – Distribuição da variável *Identificação do Perigo* ajustada a uma distribuição teórica uniforme - cenário otimista noturno



Nas Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66 são apresentadas as variáveis de entrada inseridas na ECP, no MatLab.

Figura 63 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário pessimista diurno

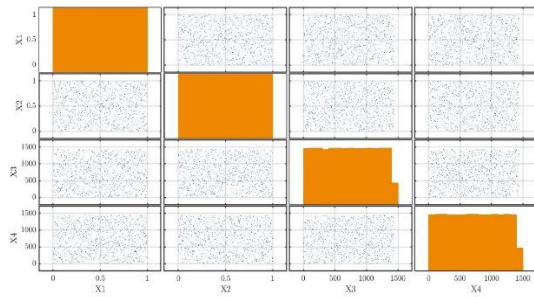


Figura 64 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário pessimista noturno

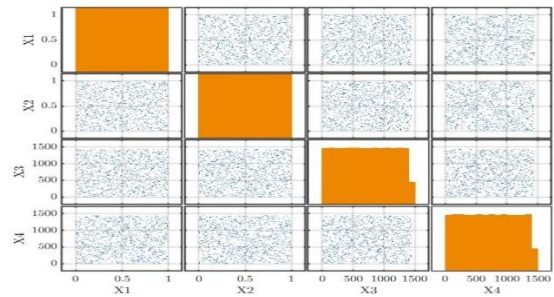


Figura 65 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário otimista diurno

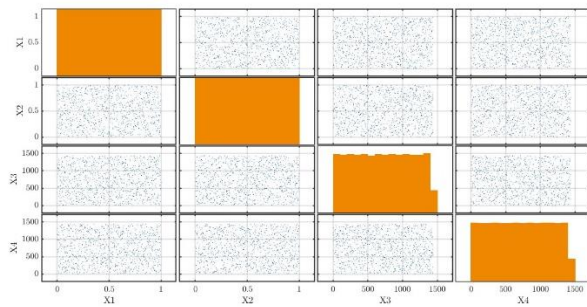
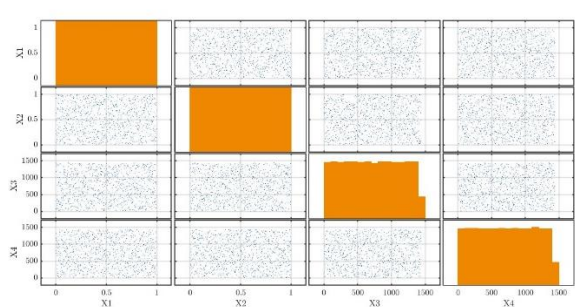


Figura 66 – Variáveis inseridas na ECP (MatLab) - cenário otimista noturno



5.2.3 Expansão dos Coeficientes Polinomiais

Na construção do modelo substituto, é necessário realizar o ajuste do algoritmo para determinar a base de representação e seu grau máximo, e calcular os coeficientes da expansão polinomial. Para isso, foi realizada uma variação entre os graus 1 e 15 e foram considerados coeficientes de truncamento entre 0,1 e 1,0, a fim de identificar

qual o melhor ajuste. O grau polinomial foi validado com base no menor erro estimado sob validação cruzada e na qualidade de extrapolação do modelo.

Para a calibração do modelo substituto, foi utilizada uma amostra de 1.000 simulações de saída do LifeSim, conforme apresentado no item 4.2.3. Foram criados quatro metamodelos de Expansão de Caos Polinomial: dois para o cenário pessimista de alerta e mobilização (um para o período diurno e outro para o período noturno) e dois para o cenário otimista de alerta e mobilização (um para o período diurno e outro para o período noturno).

A Tabela 18 apresenta um resumo dos resultados gerados na construção da ECP. Os erros apresentados são considerados aceitáveis e próximos dos encontrados por Kalinina *et al.* (2021), demonstrando uma boa capacidade de ajuste do modelo baseado na ECP. O grau polinomial determinado para cada cenário reflete a melhor combinação entre a precisão do modelo e a eficiência na representação dos dados.

Tabela 18 – Resultados de Truncamento e Grau polinomial para cada Cenário na construção no modelo substituto

Cenário	Período	Erro	Grau Polinomial	q-normalizado
Pessimista	Diurno	0,0074	8	0,9
Pessimista	Noturno	0,0124	15	0,5
Otimista	Diurno	0,0082	11	0,8
Otimista	Noturno	0,0066	14	0,8

Na Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70 são apresentadas as saídas das simulações da ECP para cada cenário e período determinado, nas quais é possível identificar o grau polinomial e coeficiente de truncamento que melhor se ajustou para cada modelo substituto.

Figura 67 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário pessimista diurno

```

%----- Polynomial chaos output -----%
Number of input variables: 4
Maximal degree: 8
q-norm: 0.90
Size of full basis: 318
Size of sparse basis: 51
Full model evaluations: 1000

Leave-one-out error: 7.3629222e-03
Modified leave-one-out error: 7.9117293e-03
Mean value: 559.5398
Standard deviation: 596.8122
Coef. of variation: 106.661%
%-----%

```

Figura 68 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário pessimista noturno

```

%----- Polynomial chaos output -----%
Number of input variables: 4
Maximal degree: 15
q-norm: 0.50
Size of full basis: 263
Size of sparse basis: 40
Full model evaluations: 1000
Leave-one-out error: 1.2350300e-02
Modified leave-one-out error: 1.3121519e-02
Mean value: 592.1670
Standard deviation: 563.4357
Coef. of variation: 95.148%
%-----%

```

Figura 69 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário otimista diurno

```

%----- Polynomial chaos output -----%
Number of input variables:      4
Maximal degree:                 11
q-norm:                         0.80
Size of full basis:             560
Size of sparse basis:          61
Full model evaluations:         1000
Leave-one-out error:            8.2478768e-03
Modified leave-one-out error:  9.0217055e-03
Mean value:                    112.9557
Standard deviation:             207.7090
Coef. of variation:            183.885%
  
```

Figura 70 – Saída do ajuste realizado pela ECP – cenário otimista noturno

```

%----- Polynomial chaos output -----%
Number of input variables:      4
Maximal degree:                 14
q-norm:                         0.80
Size of full basis:            1215
Size of sparse basis:          142
Full model evaluations:         1000
Leave-one-out error:            6.5955213e-03
Modified leave-one-out error:  8.2561356e-03
Mean value:                    112.6668
Standard deviation:             199.4633
Coef. of variation:            177.038%
  
```

A Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74 apresentam os coeficientes polinomiais estimados em cada simulação para ajuste do modelo substituto (metamodelo). Observa-se que muitos coeficientes tendem a ser próximos de zero, pois determinados termos polinomiais têm pouco impacto na descrição do sistema e podem ser ignorados para simplificar a análise ou otimizar os cálculos computacionais. Esse comportamento está alinhado com o princípio de esparsidade de efeitos, que indica que apenas um subconjunto das variáveis tem um efeito significativo na resposta do modelo.

Diante do exposto, é possível relacionar diretamente o número de coeficientes polinomiais utilizados para o ajuste e construção de cada modelo substituto com o coeficiente de truncamento (q-norm). O esquema de truncamento tem o efeito de excluir termos de alta ordem de interação, o que contribui para simplificar o modelo sem comprometer sua precisão.

O cenário pessimista – noturno apresentou o maior coeficiente de truncamento entre todos os cenários (q-norm = 0,9), o que resultou no uso de um maior número de coeficientes polinomiais para ajustar o modelo substituto – total de 142 coeficientes, conforme apresentado na Figura 71. Em contrapartida, o cenário pessimista – diurno apresentou o menor coeficiente de truncamento entre todos os cenários (q-norm = 0,5), e, apesar de convergir com grau polinomial igual a 15, foram necessários 40 coeficientes polinomiais para a estabilização do modelo substituto (Figura 72).

Em contrapartida, no cenário otimista, para ambos os períodos (noturno e diurno), foi obtido o mesmo coeficiente de truncamento (q-norm = 0,8). No entanto, ao se comparar os graus polinomiais, o período diurno convergiu em um grau polinomial menor (grau 11) que o período noturno (grau 15). Portanto, foram gerados 61

coeficientes polinomiais para o período diurno (Figura 73) e 40 coeficientes polinomiais para o período noturno (Figura 74).

Figura 71 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Otimista Noturno

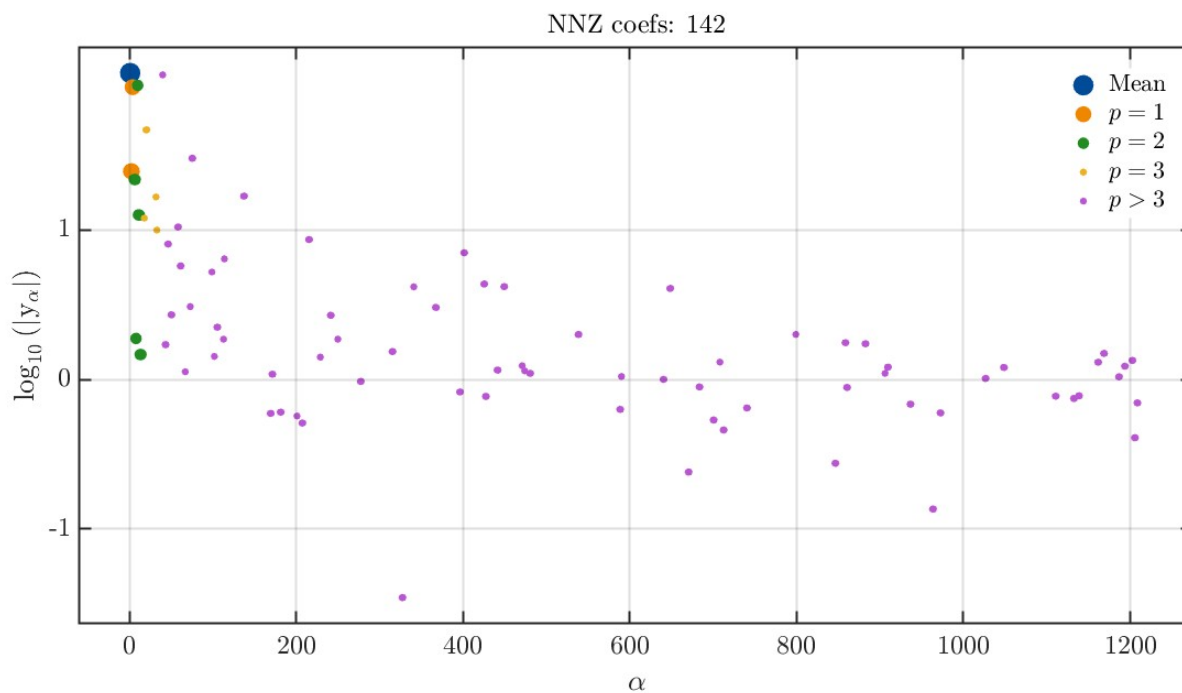


Figura 72 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Pessimista Diurno

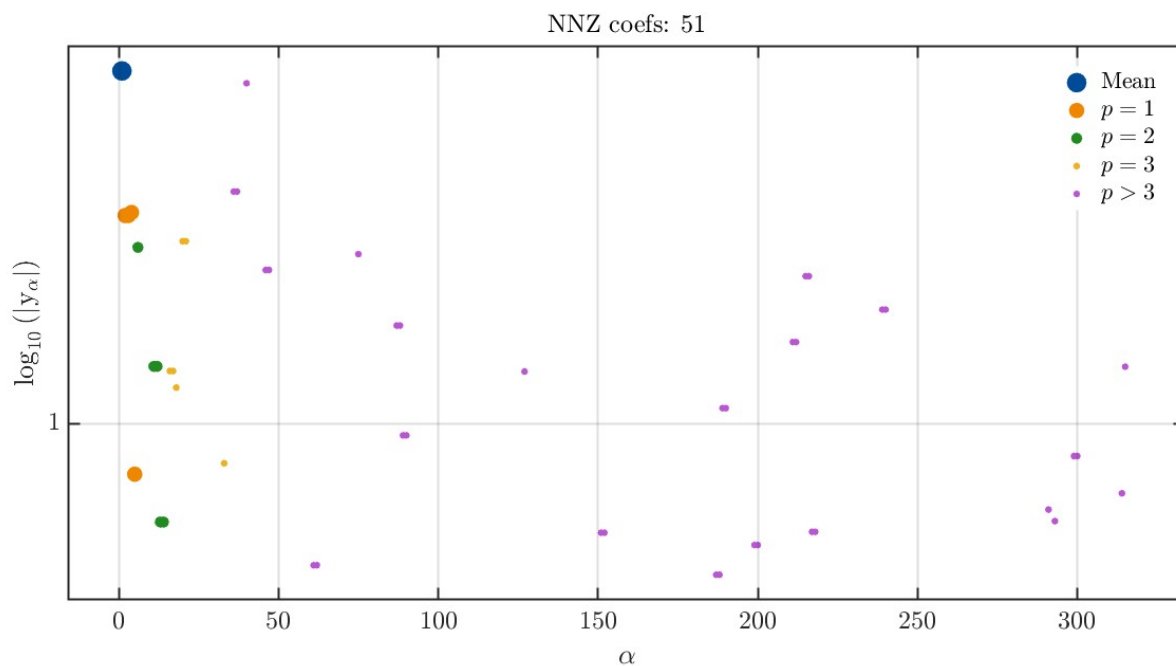


Figura 73 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Otimista Diurno

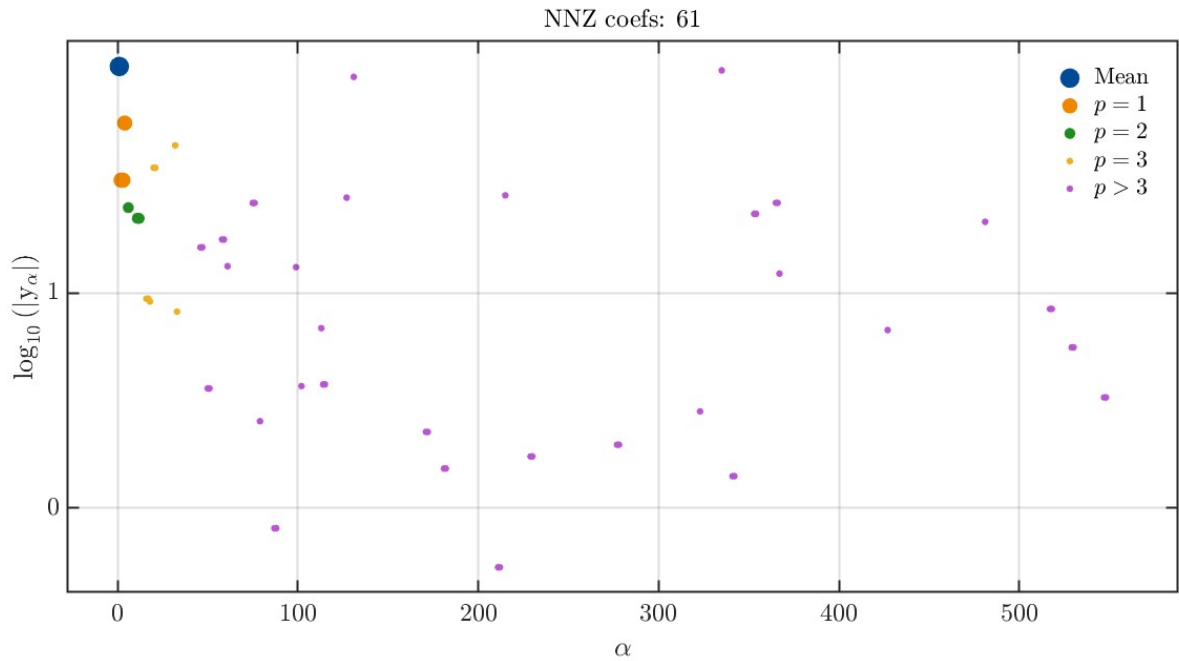
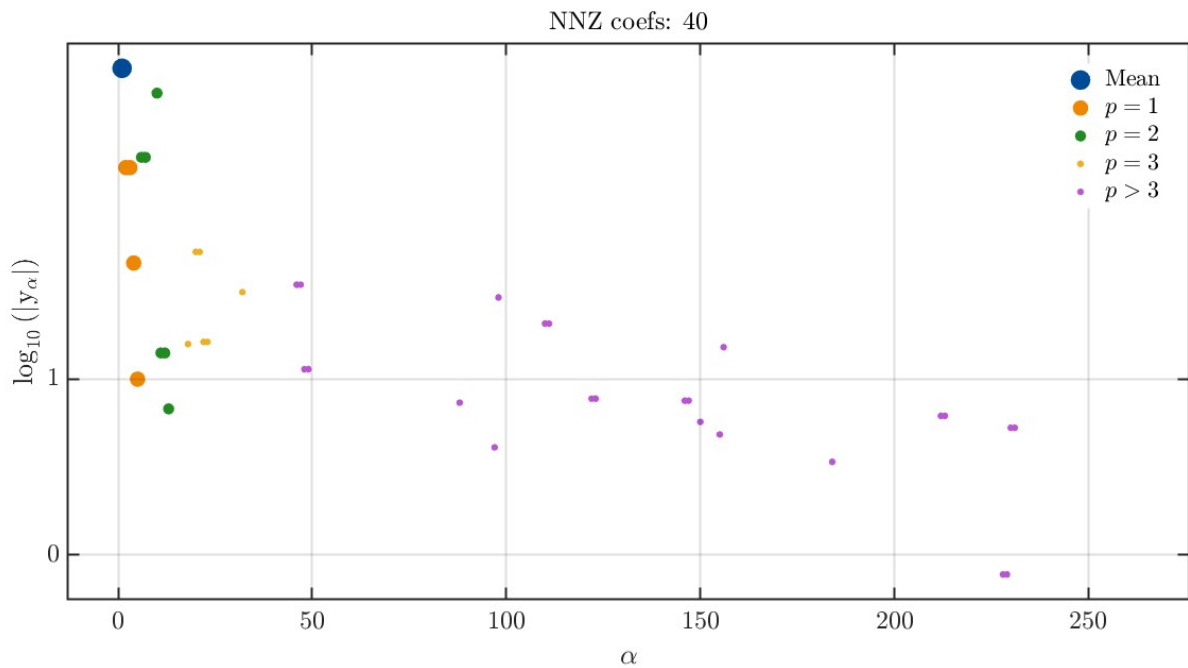


Figura 74 – Representação dos espectros logarítmicos dos coeficientes do PCE – Cenário Pessimista Noturno



5.2.4 Validação Cruzada

A validação dos modelos foi realizada utilizando como métrica o Erro Quadrático Médio (MSE), considerando as respostas relacionadas a cada cenário proposto. O valor do erro quadrático médio indica o quanto as estimativas simuladas pelo modelo

substituto estão distantes dos valores simulados pelo modelo computacional LifeSim – quanto mais próximo de zero o erro quadrático médio, melhor o desempenho do modelo. A formulação é apresentada na Equação 31.

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_i^{MS} - Y_i^{MC})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_i^{MC} - \bar{Y}_i^{MC})^2} \quad (31)$$

na qual Y_i^{MS} é a saída do modelo substituto (fatalidades); e Y_i^{MC} a saída do modelo computacional LifeSim (fatalidades).

Na Tabela 19 são apresentados os resultados da validação realizada para cada cenário proposto. É possível observar que as simulações para os cenários otimistas apresentam resultados muito próximos, com erros menores em relação às simulações geradas pelos cenários pessimistas.

Tabela 19 – Erro Quadrático Médio entre os dados do modelo computacional e o modelo substituto

Cenário	Período	MSE
Pessimista	Diurno	1.89
Pessimista	Noturno	2.10
Otimista	Diurno	1.41
Otimista	Noturno	1.43

No entanto, é importante enfatizar que, de forma geral, o desempenho dos modelos é adequado. O maior erro encontrado representa uma diferença de apenas duas fatalidades, a mais ou a menos, em relação às estimativas reais. Além disso, no contexto do estudo de caso utilizado nesta pesquisa, o número de fatalidades pode variar consideravelmente, abrangendo valores entre 300 e 2.000 nas simulações. Nesse contexto, o erro identificado foi considerado aceitável.

Em comparação ao estudo de Kalinina *et al.* (2021), os valores de MSE encontrados nesta pesquisa foram maiores. No entanto, esse fato pode ser explicado pela melhor base de dados primários existentes no estudo de caso dos referidos autores, disponibilizado pelo governo da Suíça, possibilitando uma melhor análise dessas variáveis. Apesar das incertezas inerentes, considerando as hipóteses adotadas pelo LifeSim, como as curvas de alerta e mobilidade que são baseadas em dados

empíricos, as estimativas se mostraram consistentes e próximas do modelo computacional avaliado (LifeSim). Tal fato indica que o modelo estimado possui um grau de erro aceitável para a estimativa do número de fatalidades em diferentes cenários.

5.2.5 Comparação das Saídas do Modelo Computacional e do Modelo Substituto

Após a calibração do modelo substituto, baseado na Expansão de Caos Polinomial, foram realizadas simulações para gerar os resultados do número de fatalidades em cada cenário, nos quais foi avaliada a resposta do LifeSim e do metamodelo construído. Para aprofundar a análise, também foram considerados os tempos necessários para a execução das 100.000 simulações do LifeSim e da ECP. Essa avaliação permitiu verificar o desempenho e a eficiência de ambos os métodos no contexto das simulações realizadas e compreensão da capacidade de estimar o número de fatalidades em diferentes cenários.

Nesse sentido, o LifeSim requereu um tempo de cerca de 20 horas para realizar as 100.000 simulações, enquanto o modelo substituto requereu 20 minutos de simulação. Esses valores de tempo são similares aos encontrados por Kalinina *et al.* (2021) na mesma quantidade de simulações. Destaca-se que para as simulações realizadas com base na ECP, existe uma diferença estimada entre uma e duas fatalidades, para mais ou para menos, considerando os cenários determinados (Tabela 19).

5.3 Análise de Sensibilidade Global

O método de Índice de Sobol foi escolhido para a Análise de Sensibilidade Global das variáveis de entrada devido à possibilidade de inserção da metodologia no modelo substituto da ECP. O Índice de Sobol foi calculado para as variáveis utilizadas em cada cenário proposto, sem necessidade de amostras adicionais de saída do LifeSim, sendo essa uma das vantagens e justificativas da escolha do método. Considerando o modo de inserção das variáveis no MatLab, na Tabela 20 são apresentados os símbolos associados a cada variável.

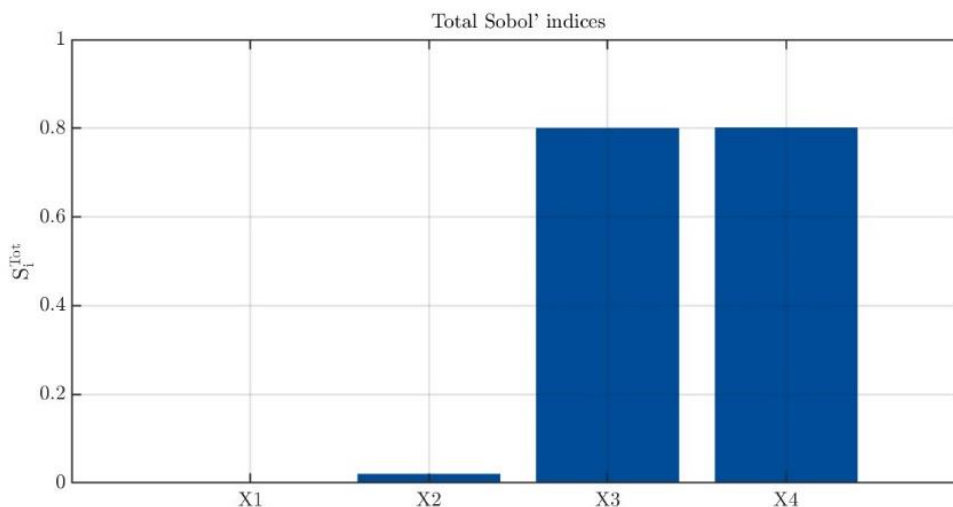
Tabela 20 – Variáveis utilizadas para análise de sensibilidade – Índice de Sobol

Variável	Símbolo
População Alertada	X1
População Mobilizada	X2

Emissão do Alerta	X3
Identificação do Perigo	X4

O índice de Sobol foi calculado até a terceira ordem para investigar a influência de cada variável analisada na saída do modelo, ou seja, o número de fatalidades. Ao avaliar os resultados obtidos para o cenário pessimista noturno (Figura 75), foi possível observar que, no índice Total de Sobol, que representa a influência total de cada variável, tanto individualmente quanto em sua interação com outros *inputs*, as variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" apresentaram a contribuição mais significativa na variabilidade das estimativas de fatalidades, com valores de índice de 0,8005 e 0,8016, respectivamente, em uma escala que varia de 0 a 1, em que valores mais próximos de 1 indicam uma maior contribuição da variável de entrada. Além disso, a variável "População Mobilizada" teve valor de contribuição de 0,0206 e "População Alertada" contribuição de 0,0007.

Figura 75 – Índice Total de Sobol – Cenário Pessimista Noturno



Além disso, foram calculados os índices para a primeira, segunda e terceira ordens, e os resultados reforçaram a importância das variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" (Figura 76 e Figura 77). Para a análise de segunda ordem, o índice de Sobol foi de 0,6015, o que indica a influência significativa da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" nas estimativas de fatalidades. No entanto, essas variáveis possuem valores diferentes para cada ordem de análise. Para a primeira ordem, que avalia a influência individual de cada variável,

foram obtidos valores dos índices de 0,1883 e 0,1891, respectivamente, para essas variáveis.

Figura 76 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Noturno

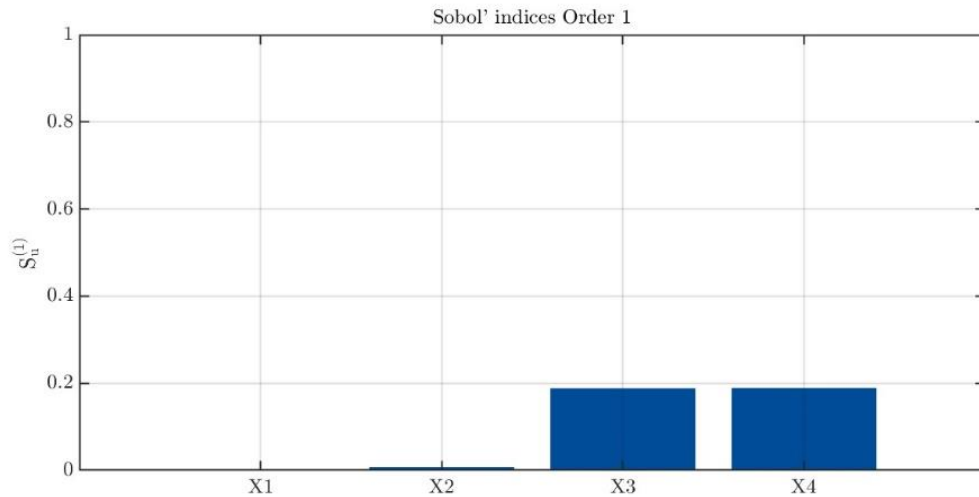
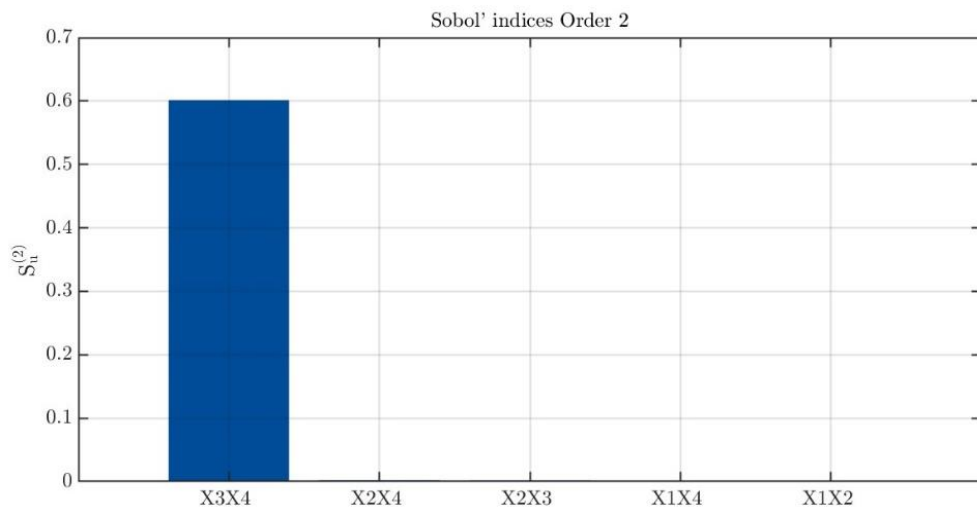
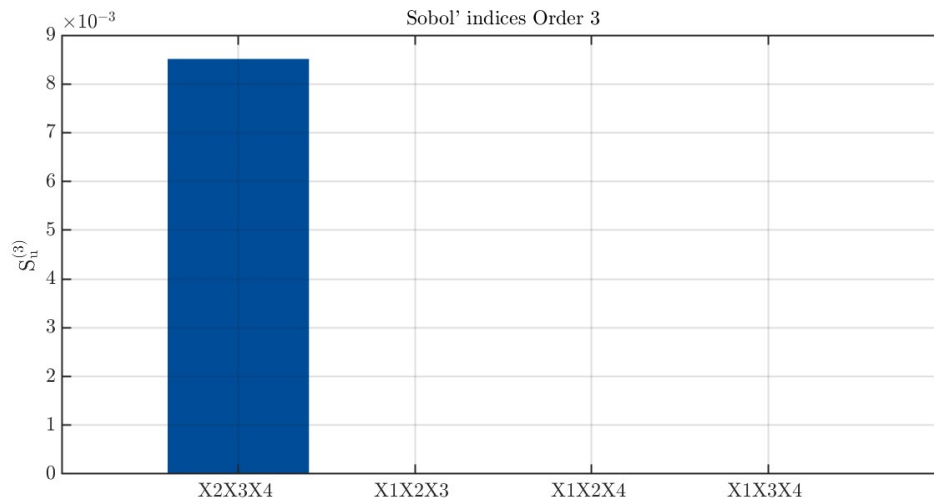


Figura 77 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Noturno



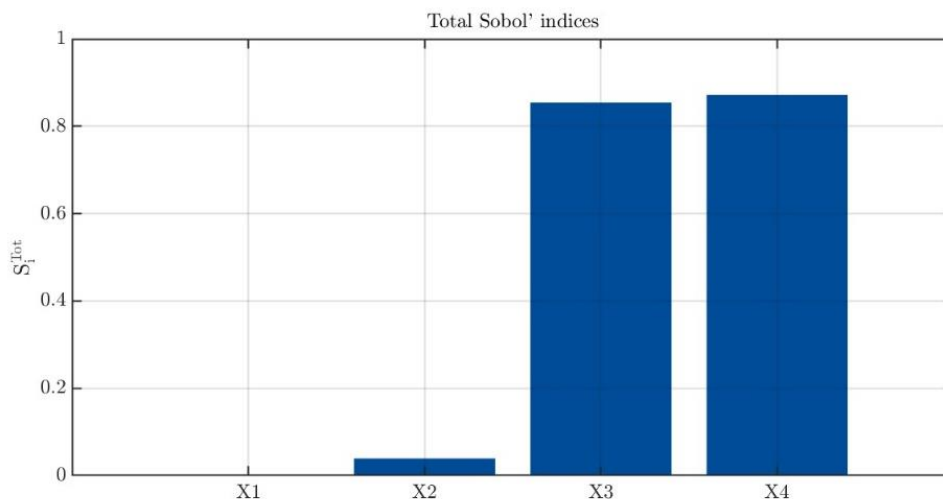
Na análise de terceira ordem, o índice de Sobol foi de 0,0085 para a influência da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta", "Identificação do Perigo" e "População Mobilizada" nas estimativas de fatalidades (Figura 78). Esse valor, por ser muito baixo, pode indicar uma influência mínima na combinação entre as três variáveis.

Figura 78 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Noturno



Ao avaliar os resultados obtidos para o cenário pessimista diurno (Figura 79), foi possível observar que as variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" apresentaram a contribuição mais significativa na variabilidade das estimativas de fatalidades, com valores de índice de 0,8400. Em comparação ao cenário pessimista noturno, essas variáveis de entrada no cenário pessimista diurno tiveram uma contribuição um pouco maior. Além disso, a variável "População Mobilizada" continuou com uma contribuição de apenas 0,0206.

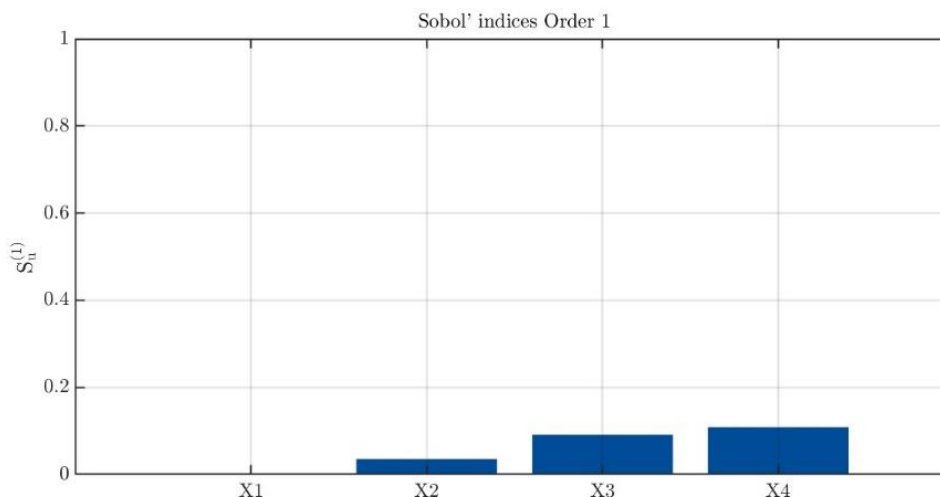
Figura 79 – Índice Total de Sobol – Cenário Pessimista Diurno



No cenário pessimista diurno, o índice de Sobol para a primeira ordem, que avalia a influência individual de cada variável, as variáveis "População Mobilizada", "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" obtiveram índices de 0,0354, 0,0910 e 0,1086,

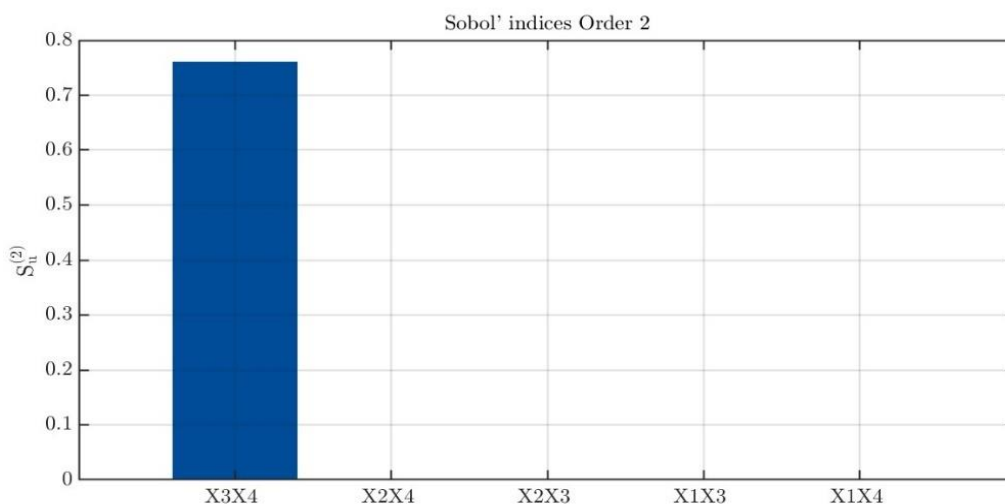
respectivamente (Figura 80). Esses valores são um pouco menores do que encontrados para o cenário pessimista diurno, porém muito próximos.

Figura 80 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Diurno



Para a análise de segunda ordem, o índice de Sobol foi de 0,7609 para a influência da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" nas estimativas de fatalidades (Figura 81). Os valores encontrados são muito próximos ao cenário pessimista noturno.

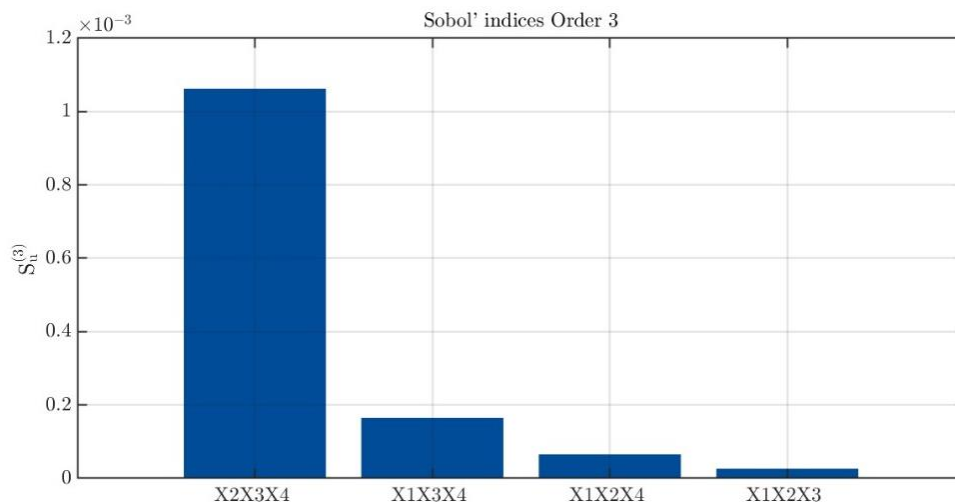
Figura 81 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Diurno



Na análise de terceira ordem, o índice de Sobol foi de 0,0011 para a influência da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta", "Identificação do Perigo" e "População Mobilizada" nas estimativas de fatalidades (Figura 82). Além disso, o

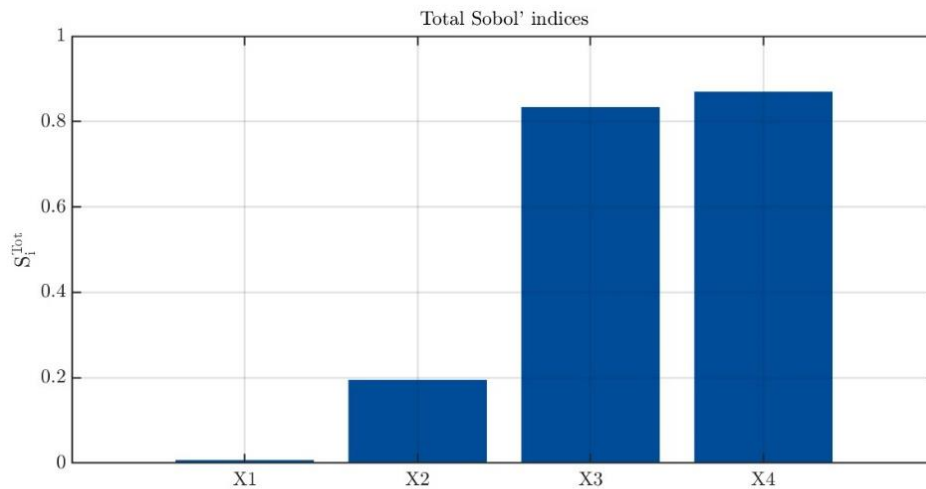
índice de Sobol gerou valores abaixo de 0,0002 para a interação entre as demais variáveis. Esses valores indicam que a combinação entre três variáveis possui contribuição baixa para a variabilidade de saída do modelo.

Figura 82 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Pessimista Diurno



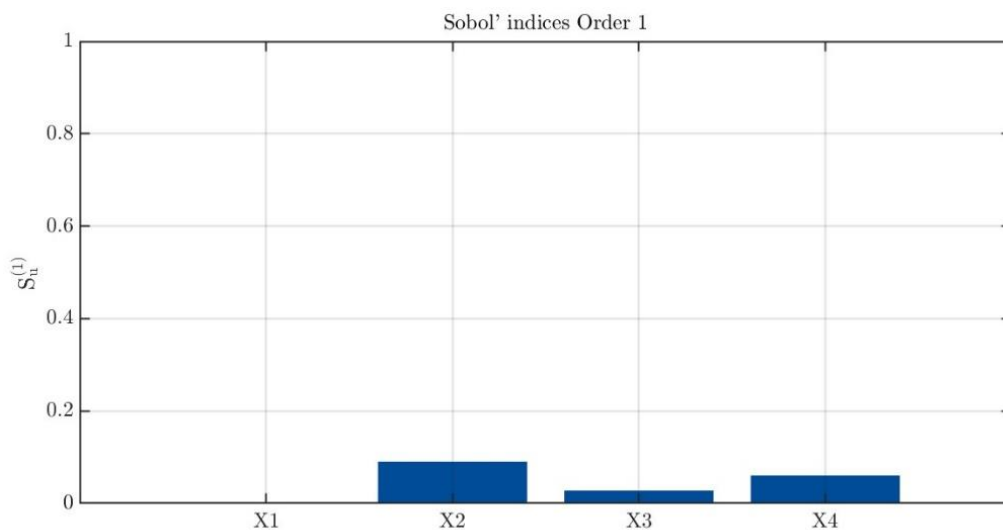
Para o cenário otimista diurno, foi possível observar que, no índice Total de Sobol, as variáveis "População Alertada", "População Mobilizada", "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" obtiveram valores de índice de 0,0071, 0,1951, 0,8339 e 0,8698, respectivamente (Figura 83). Em comparação aos cenários já mencionados, essas variáveis de entrada X1 e X2 tiveram uma contribuição maior neste caso, sendo justificada pela maior importância da eficiência de alerta e mobilização da população, considerando que essas variáveis indicam um cenário otimista de preparação da população e, conseqüentemente, na redução do número de fatalidades.

Figura 83 – Índice Total de Sobol – Cenário Otimista Diurno



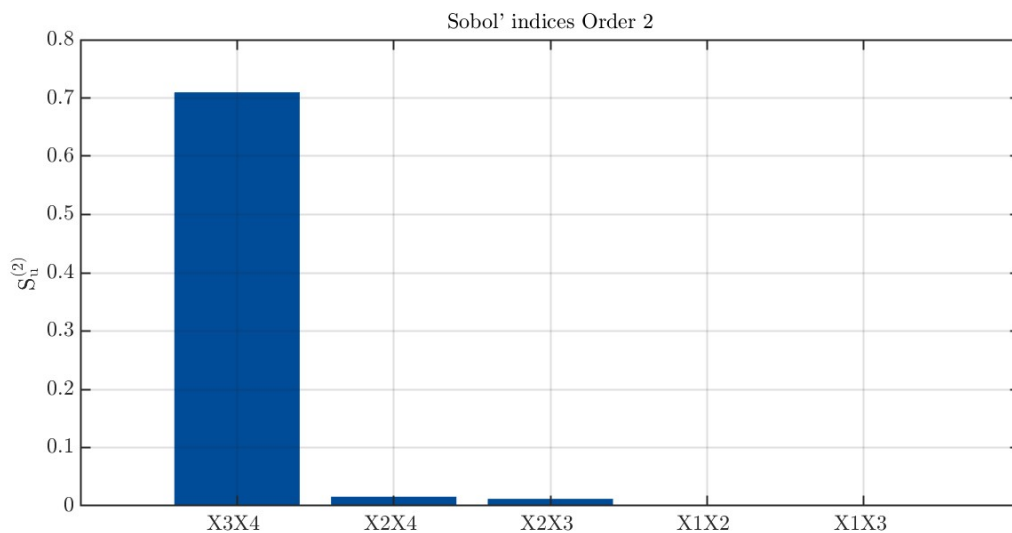
No cenário otimista diurno, para a primeira ordem, o índice de Sobol gerou valores de 0,0900, 0,0280 e 0,0602 para as variáveis "População Mobilizada", "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo", respectivamente (Figura 84). Os valores das variáveis X3 e X4 são próximos aos encontrados nos cenários anteriores. No entanto, a variável X2 teve uma contribuição mais significativa para o cenário otimista diurno, o que é justificável pela importância dessa variável no cenário que considera uma eficiência no alerta e mobilização da população.

Figura 84 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Diurno



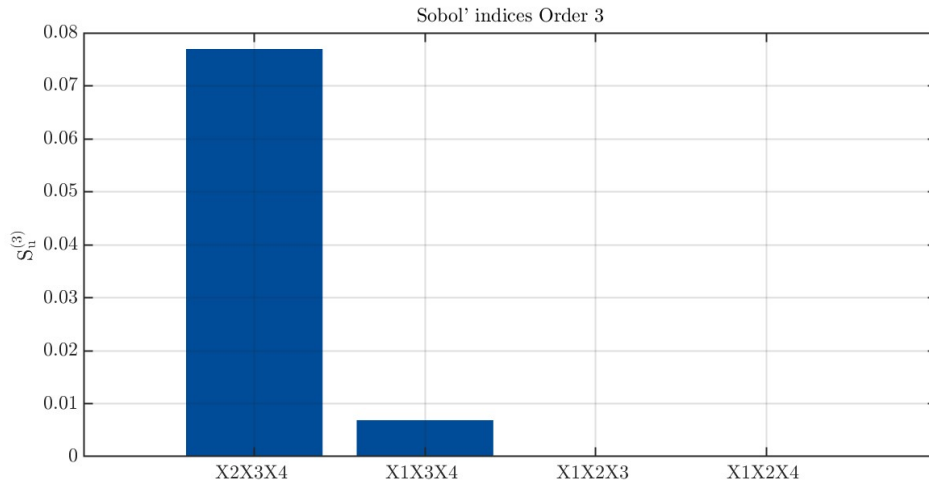
Para a análise de segunda ordem, o índice de Sobol foi de 0,7098 para a influência da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" nas estimativas de fatalidades (Figura 85), 0,0157 entre "População Mobilizada" e "Identificação do Perigo", e 0,0121 para a interação entre as variáveis "População Mobilizada" e "Identificação do Perigo". Os valores de contribuição das variáveis de X2 e X4 são próximos aos encontrados nos cenários anteriores, porém a influência da variável X2 é maior para este cenário e, por isso, a contribuição dessa variável com as demais também é maior neste caso.

Figura 85 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Diurno



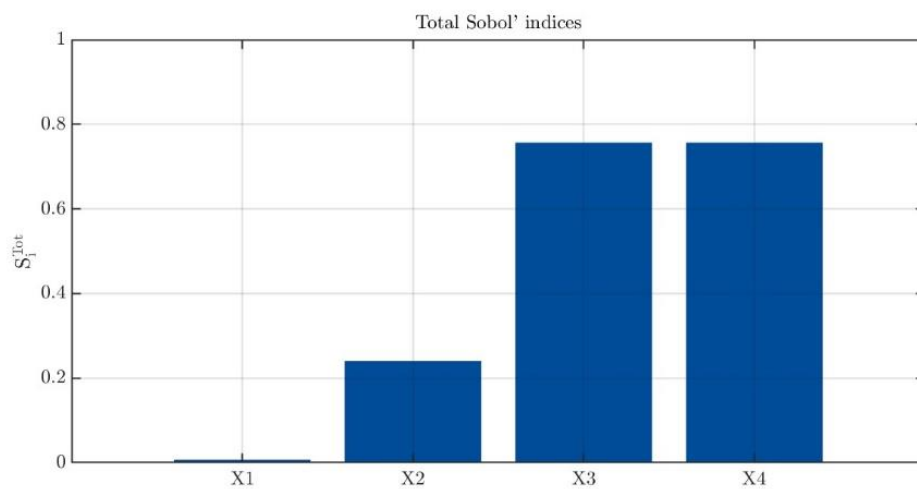
Na análise de terceira ordem, o índice de Sobol foi de 0,0769 para a influência da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta", "Identificação do Perigo" e "População Mobilizada" nas estimativas de fatalidades (Figura 86). Além disso, o índice de Sobol gerou o valor de 0,0069 para a interação entre as variáveis "População Alertada", "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo". Observa-se uma maior contribuição entre a interação dessas variáveis neste cenário, assim como observado uma maior contribuição no âmbito individual.

Figura 86 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Diurno



Para o cenário pessimista noturno, foi possível observar que, no índice Total de Sobol, as variáveis “População Alertada”, “População Mobilizada”, "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" obtiveram valores de índice de 0,0069, 0,2401, 0,7567 e 0,7567, respectivamente (Figura 87). A variável “População Mobilizada” teve maior contribuição dentre todos os cenários, o que pode ser justificado pela importância da mobilização nos cenários otimistas, que considera uma população preparada para evacuar em casos de risco iminente.

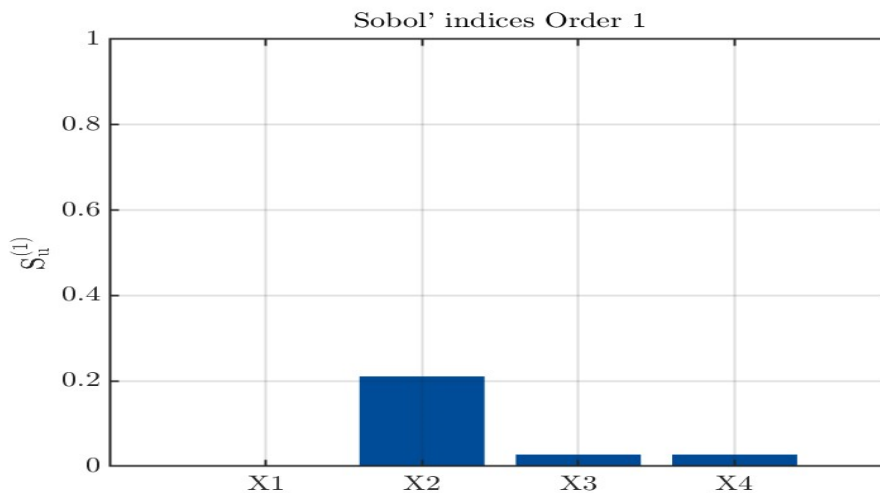
Figura 87 – Índice Total de Sobol – Cenário Otimista Noturno



No cenário otimista noturno, para a primeira ordem, o índice de Sobol gerou valores de 0,2106, 0,0275 e 0,0275 para as variáveis "População Mobilizada", "Emissão do

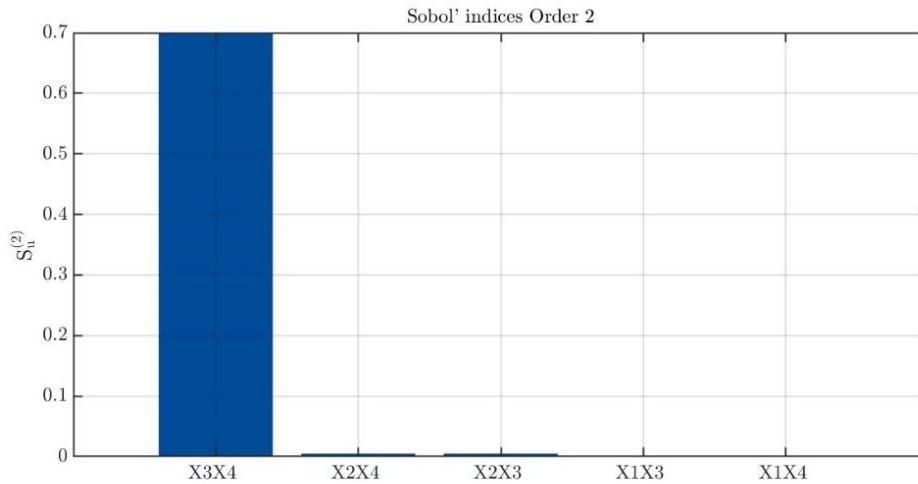
Alerta" e "Identificação do Perigo", respectivamente (Figura 88). Esses resultados estão em consonância com aqueles encontrados no cenário otimista diurno: a variável X2 continua com maiores valores de contribuição devido à importância do alerta e mobilização no cenário otimista, que considera eficiência nesse processo. Oposto a isso, nos cenários pessimistas as variáveis X3 e X4 tiveram maiores contribuições em todas as ordens de Sobol analisadas neste estudo.

Figura 88 – 1ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Noturno



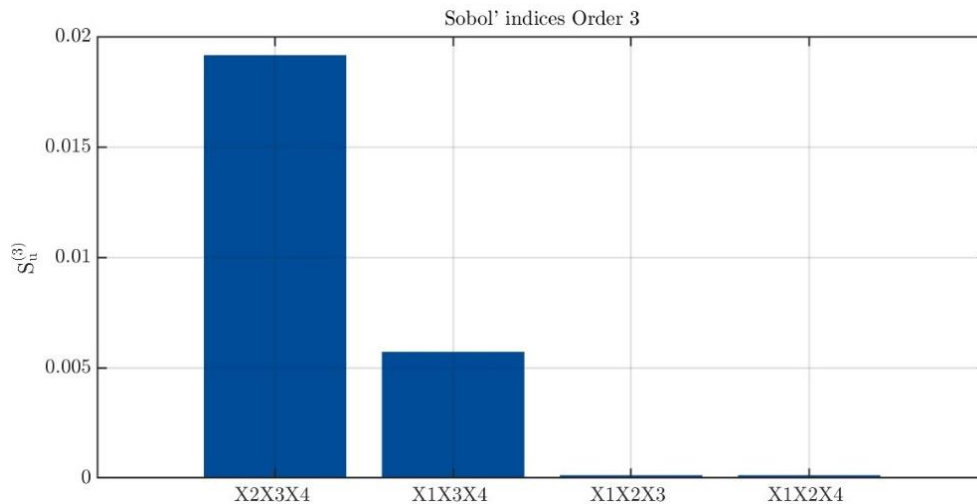
Para a análise de segunda ordem, o índice de Sobol foi de 0,6988 para a influência da interação entre as variáveis "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" nas estimativas de fatalidades (Figura 89), 0,0048 entre "População Mobilizada" e "Identificação do Perigo", e 0,0048 para a interação entre as variáveis "População Mobilizada" e "Identificação do Perigo". Os valores ainda indicam a prevalência das variáveis X3 e X4 para a segunda ordem de Sobol, conforme encontrado em todos os cenários.

Figura 89 – 2ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Noturno



Na análise de terceira ordem, o índice de Sobol foi de 0,0192 para a influência da interação entre as variáveis "População Mobilizada", "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo" nas estimativas de fatalidades (Figura 90). Além disso, o índice de Sobol gerou o valor de 0,0057 para a interação entre as variáveis "População Alertada", "Emissão do Alerta" e "Identificação do Perigo", e um valor abaixo de 0,001 para as demais variáveis. Assim como no cenário otimista diurno, observa-se uma maior contribuição das variáveis na saída do modelo, podendo ser justificado pela importância dessas variáveis na evacuação e mobilização da população em caso de perigo iminente, diferentemente do cenário pessimista, que adota a hipótese de uma população despreparada e um sistema de alerta e mobilização ineficiente.

Figura 90 – 3ª Ordem de Sobol – Cenário Otimista Noturno



6 CONCLUSÕES

A utilização de ferramentas computacionais para análise das consequências decorrentes de eventos de rupturas de barragens é essencial para o melhor entendimento dos processos envolvidos, além de fornecer subsídios no planejamento de ações emergenciais, que se implementados de forma eficiente, podem reduzir o número de fatalidades e danos ambientais e socioeconômicos. Silva (2020) realizou a comparação de dois modelos de perdas de vidas no cenário brasileiro, no qual os resultados para o modelo LifeSim se apresentaram mais aderentes. Lumbroso *et al.* (2021) identificaram a importância de analisar as incertezas nesses modelos e Kalinina *et al.* (2021) apresentaram o uso da ferramenta de modelagem com base na Expansão de Caos Polinomiais na análise dessas incertezas.

Nesse contexto, o presente trabalho utilizou a ferramenta de modelagem de perdas de vidas no cenário brasileiro, para cenários eficientes e ineficientes de sistema de alerta e evacuação. Com isso, buscou-se analisar as incertezas inerentes e realizar uma análise de sensibilidade global do modelo LifeSim. Essa análise foi realizada com o uso de um modelo substituto baseado na ECP, que apresentou resultados importantes na redução do tempo computacional das simulações, na análise de sensibilidade e no bom ajuste às estimativas do modelo LifeSim.

Diante dos resultados obtidos, entende-se que os objetivos deste trabalho foram atingidos. O primeiro e segundo objetivo específico, os quais são relativos à atualização do Modelo Hidrodinâmico e do Modelo de Perdas de Vidas decorrente da Ruptura Hipotética da Barragem da Pampulha, foram atendidos.

De fato, não foi possível realizar um levantamento sobre a eficiência do treinamento e divulgação do PAE da Barragem da Pampulha, assim como verificar de maneira detalhada a qualidade dos dados fornecidos pela Prefeitura de Belo Horizonte (Modelo Digital do Terreno, Inventário Estrutural e Uso e Ocupação do Solo) e das curvas utilizadas de alerta e mobilização da população no modelo de perdas de vidas (LifeSim), sendo essas incertezas dos modelos existentes. Destaca-se que tais ações não eram objeto deste estudo. No entanto, são importantes para análises futuras, ainda que a importância desses dados e da utilização desses modelos, que

representam avanços e precisam ser ainda mais estudados e refinados, deva ser ressaltada.

O terceiro objetivo específico compreendeu a construção do algoritmo baseado na Expansão de Caos Polinomial, capaz de representar o modelo de perdas de vidas LifeSim. Com isso, foi realizada a análise de sensibilidade das variáveis determinadas neste estudo. O algoritmo foi construído na plataforma UQLab no MatLab, conforme metodologia proposta por Sudret (2015).

Os resultados do modelo substituto foram, de forma geral, satisfatórios. O erro da ECP esteve entre 10^{-3} e 10^{-2} para os cenários simulados, e o erro quadrático médio gerado entre a saída do modelo substituto e o modelo computacional (LifeSim) estiveram entre uma e duas fatalidades, sendo considerado um erro aceitável devido à grande variação dos resultados de fatalidades (entre 300 e 2.000) para os cenários simulados.

A análise de sensibilidade global, calculada pelo Índice de Sobol até a terceira ordem, foi realizada para as variáveis “População Alertada”, “População Mobilizada”, “Emissão do Alerta” e “Identificação do Perigo”. Para todos os cenários, as variáveis “Emissão do Alerta” e “Identificação do Perigo” foram as que geraram maiores valores de contribuição para a saída do modelo, ou seja, para o número de fatalidades. Porém, para os cenários otimistas, que considera que a população esteja preparada para a mobilização e evacuação e que o sistema de alerta e evacuação seja eficiente, a variável “População Mobilizada” apresentou índices mais significativos.

De forma geral, o modelo substituto com base na Expansão de Caos Polinomial (ECP) representou bem o modelo de perdas de vidas (Lifesim). Apesar do Lifesim não possuir código aberto e disponível ao público, o método não intrusivo da ECP gerou erros aceitáveis. Além disso, o tempo computacional foi de cerca de 20 horas para o LifeSim e cerca de 20 minutos para o modelo substituto, considerando uma amostra de 100.000 simulações e um computador Dell Inspiron i7 8th. A partir dessa validação, é possível gerar, por exemplo, 1.000.000 de saídas no modelo substituto em apenas poucos minutos.

7 RECOMENDAÇÕES

- Com relação ao modelo hidrodinâmico, recomenda-se a atualização do hidrograma de ruptura no PAE da Barragem da Pampulha, considerando o cenário com maior dano, independente da probabilidade de ocorrência;
- Com relação ao modelo de perdas de vidas, recomenda-se a atualização das curvas de alerta e evacuação para o cenário brasileiro. Entende-se que a utilização da ferramenta Lifesim é recente, e é reconhecido o avanço proporcionado por muitos estudos nas quais foi usada essa ferramenta. Porém, para maior refinamento, é importante reconhecer as limitações e características particulares da população brasileira diante de eventos de rompimento de barragens; e
- Com relação ao modelo substituto, recomenda-se, para trabalhos futuros, realizar uma análise comparativa entre os métodos para cálculo dos coeficientes polinomiais e análise comparativa entre os outros modelos de análise de sensibilidade disponíveis no UQLAb.

REFERÊNCIAS

ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S. (2005). LIFESim: a model for estimating dam failure life loss. United States Army Corps of Engineers. 2005.

ARAI, K. How to transmit disaster information effectively: a linguistic perspective on japan's tsunami warnings and evacuation instructions. **International Journal of Disaster Risk Science**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 150-158, set. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s13753-013-0016-8>>. Acesso em: 08 abr. 2022.

BILALI, Ali El; TALEB, Abdeslam; BOUTAHRI, Imane. Application of HEC-RAS and HEC-LifeSim models for flood risk assessment. **Journal Of Applied Water Engineering and Research**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 336-351, 18 abr. 2021. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1080/23249676.2021.1908183>>. Acesso em: 12 maio. 2022.

BLATMAN, G. (2009). **Adaptive sparse polynomial chaos expansion for uncertainty propagation and sensitivity analysis**. Tese de Doutorado, Universidade Blaise Pascal - Clermont II.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 95, de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 mar. 2022. Seção 1, p. 20. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 25 maio 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 130, de 2023**. Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 fev. 2023. Seção 1. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 25 maio 2023.

BRASIL. **Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010**. Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 10 jan. 2022.

BRASIL. **Lei 14.066 de 30 de setembro de 2020**. Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm>. Acesso em: 10 jan. 2022.

BREVAULT, L.; BALESIDENT, M.; BEREND, N.; LE RICHE, R. Comparison of different global sensitivity analysis methods for aerospace vehicle optimal design. In: 10th

World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Orlando FL, USA, mai 2013. Anais [...]. Orlando: WCSMO, 2013. 19–24 p.

BRUNETTI, F. Mecânica dos Fluidos - 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 431p.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. EM-DAT: The International Disaster Database. Disaster profile (2019). Available at: www.emdat.be/disaster_profiles/index.html. Acesso em: 28 maio 2022.

Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2019- 2. ed. Relatório. Florianópolis: FAPEU, 2020. 156p.

CHEN, J.; LONG, Z.; WANG, L.; XU, B.; BAI, Q.; ZHANG, Y.; LIU, C.; ZHONG, M. Fire evacuation strategy analysis in long metro tunnels. **Safety Science**, [S.L.], v. 147, p. 105603, mar. 2022. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105603>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

DAWSON, R. J.; PEPPE, R.; WANG, M. An agent-based model for risk-based flood incident management. **Natural Hazards**, [S.L.], v. 59, n. 1, p. 167-189, 24 fev. 2011. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9745-4>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

DINÉSIO FRANCO ENGENHARIA/GEOTECNIA. Plano de Segurança, Relatório, Volume IV - Plano de Ação de Emergência - PAE, Belo Horizonte: SUDECAP – Superintendência de Desenvolvimento da Capital - PBH (Prefeitura Municipal de Belo Horizonte). 2015.

DINÉSIO FRANCO ENGENHARIA/GEOTECNIA. Relatório de investigações geológico-geotécnicas de ensaios de campo e de instalações de instrumentos de controle. Belo Horizonte: SUDECAP – Superintendencia de Desenvolvimento da Capital – PBH (Prefeitura Municipal de Belo Horizonte); 2015. P1503-SUDECAP-A-BA-RL-09-GE_r0.

FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 12, p. 1708–1721, 2008a.

FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 12, p. 1708–1721, dez. 2008b.

Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282008%29134%3A12%281708%29>>.

FROEHLICH, D. C. Predicting Peak Discharge from Gradually Breached Embankment Dam. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 11, p. 04016041, nov. 2016. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001424>>.

GAI, W.; DENG, Y. Survey-based analysis on the diffusion of evacuation advisory warnings during regional evacuations for accidents that release toxic vapors: a case study. **Journal Of Loss Prevention in The Process Industries**, [S.L.], v. 57, p. 174-185, jan. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.012>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

GRAJDURA, S.; QIAN, X.; NIEMEIER, D. Awareness, departure, and preparation time in no-notice wildfire evacuations. **Safety Science**, [S.L.], v. 139, p. 105258, jul. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105258>>. Acesso em: 13 set. 2021.

GHANEM, R.; SPANOS, P.D. **Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach**, New York: Springer-Verlag, 1991.

GOODIE, A.; DOSHI, P.; SANKAR, A. Experience-Based and Demographic Predictors of Evacuation Decisions in Hurricanes Harvey and Irma. **Mendeley Data**, V1, doi: 10.17632/2cxnyxc8f8.1. 2019.

HOSTETTER, H.; NASER, M. Characterizing disability in fire evacuation: A progressive review. **Journal of Building Engineering**, Volume 53, 2022, p. 104573. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104573>.

HOSSEINNIA, B.; KHAKZAD, N.; RENIERS, G. Genserik. Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. **Safety Science**, [S.L.], v. 102, p. 275-289, fev. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.003>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

HUO, F.; LI, C.; LI, Y.; LV, W.; MA, Y. An extended model for describing pedestrian evacuation considering the impact of obstacles on the visual view. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [S.L.], v. 604, p. 127932, out. 2022.

Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2022.127932>>. Acesso em: 20 out. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2010). Descrição das variáveis da amostra do Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=microdados>. Acesso em: 10 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2016). Grade Estatística. Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2022). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 17 jun. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Câmeras Imageadoras CBERS 04A. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cameras/cbbers04a.php>. Acesso em: 30 mai. 2023.

JONKMAN, S. N. *Overstromingsrisico's: een onderzoek naar de toepasbaarheid van risicomaten*. Dissertação — Universidade de Tecnologia de Delft., Holanda, 2001.

JOHNSTONE, W. M; SAKAMOTO, D.; ASSAF H.; BOURBAN, S. Architecture, modelling framework and validation of BC Hydro's virtual reality life safety model. In: International Symposium on Stochastic Hydraulics, Nimegue, Holanda. 2005. **Anais** [...]. Holanda: 2005. 23–24 p.

JONKMAN, S. N.; VAN GELDER, P.H.A.J.M.; VRIJLING, J. K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. **Journal of hazardous materials**, v. 99, n. 1, p. 1-30, 2003.

JONKMAN, S. N.; VRIJLING, J. K.; VROUWENVELDER; A. C. W. M. Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method, **Natural Hazards**, v.46, n.3, p. 353-389, 2008.

KALININA, A.; SPADA, M.; BURGHER, P. Quantitative assessment of uncertainties and sensitivities in the estimation of life loss due to the instantaneous break of a hypothetical dam in switzerland. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 23, p. 3414, 2 dez. 2021. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.3390/w13233414>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

KIM, S., PAIK, J. KIM, K. Run-out Modeling of Debris Flows in Mt. Umyeon using FLO-2D. **Journal of Civil and Environmental Engineering Research**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 1015-6348, maio 2013. Disponível em:<<https://doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.965>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

LARA, P. G. D.; LOHN, J. D. L. Em busca de um plano de emergência efetivo. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019. **Anais** [...]. Paraná: 2019. 1-9 p.

LE GRATIET, L. L.; MARELLI, S.; SUDRET, B. Metamodel-Based Sensitivity Analysis: polynomial chaos expansions and gaussian processes. **Handbook Of Uncertainty Quantification**, [S.L.], p. 1289-1325, 2017. Disponível em:<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-12385-1_38>. Acesso em: 15 jul. 2021.

LINDELL, M.K.; PRATER, C.W.; PERRY, R.W.; WU, J.Y. (2002). **EMBLEM: An Empirically Based Large Scale Evacuation Time Estimate Model**. College Station TX: Texas A&M University Hazard Reduction & Recovery Center.

LUMBROSO, D.; DAVISON, M.; BODY, R.; PETKOVSEK, G. Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, n. 1, p. 21-37, 2021. Disponível em:<<https://doi.org/10.5194/nhess-21-21-2021-supplement>>. Acesso em: 18 jul. 2022.

LUTHEN, N.; MARELLI, S.; SUDRET, B. Automatic selection of basis-adaptive sparse polynomial chaos expansions for engineering applications. **International Journal for Uncertainty Quantification**, v. 12, n. 3, 2022. Disponível em:<<https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.04800>>. Acesso em: 18 set. 2022.

LLACQUA, R. C. **Manual do QGIS para Classificação Supervisionada de Áreas**. Faculdade de Medicina do ABC. Santo André, 2017.

MATOS, C. S.; ELEUTÉRIO, J. C. Análise de perdas de vidas associadas à ruptura hipotética da barragem de fundão. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019. **Anais** [...]. Paraná: 2019. 1-9 p.

MARELLI, S.; LUTHEN, N.; SUDRET, B. **UQLab user manual – Polynomial chaos expansions**. Report UQLab-V2.0-104. Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification, ETH Zurich, Switzerland, 2022.

MARELLI, S.; LAMAS, C., KONAKLI, K.; MYLONAS, C.; WIEDERKEHR, P.; SUDRET, B. (2022). **UQLab user manual - Sensitivity analysis, Report UQLab-V2.0-106**. Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification, ETH Zurich, Suíça.

MARELLI, S.; SUDRET, B. UQLab: a framework for uncertainty quantification in MATLAB. **Research Collection**, p. 2554-2563. 2014. Disponível em :<<https://doi.org/10.1061/9780784413609.257>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MARELLI, S.; SUDRET, B. UQLab user manual–Polynomial chaos expansions. **Chair of risk, safety & uncertainty quantification**, Reino Unido, 2015, p. 97-110.

MARELLI, S.; WICAKSONO, D.; SUDRET, B. **UQTEAM. The UQLAB project: steps toward a global uncertainty quantification community**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY IN CIVIL ENGINEERING, 13th, Seoul, South Korea, May 26-30, 2019. Proceedings of ICASP13. Seoul: ICASP13, 2019. p. 1-10.

NAGEL, J.; RIECKERMANN, J.; SUDRER, B. Principal component analysis and sparse polynomial chaos expansions for global sensitivity analysis and model calibration: application to urban drainage simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 195, p. 106737, 2020. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106737.

NAKAMURA, I; MORIOKA, C. Effect of Communication Regarding Dam Operation on the Evacuation of Residents: a case study of the 2018 inundation of the hijikawa river in japan. **Geosciences**, [S.L.], v. 9, n. 10, p. 444, 18 out. 2019. MDPI AG. Disponível em :<<http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9100444>>. Acesso em: 10 abr. 2022.

NASCIMENTO, N; MORIOKA, C. Effect of Communication Regarding Dam Operation on the Evacuation of Residents: a case study of the 2018 inundation of the hijikawa river in japan. **Geosciences**, [S.L.], v. 9, n. 10, p. 444, 18 out. 2019. MDPI AG. Disponível em :<<http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9100444>>. Acesso em: 10 abr. 2022.

NASCIMENTO, N. O.; ELEUTÉRIO, J. C.; PALMIER, L.R.; SILVA, A. F. R.; VIEIRA, L. M. S.; BRASIL, L. **Plano de Ação de Emergência: Barragem da Pampulha, Belo**

Horizonte: SUDECAP – Superintendência de Desenvolvimento da Capital - PBH (Prefeitura Municipal de Belo Horizonte). 2020.

NAYLOR, A.; WALKER, J. F.; SUPPASRI, A. Suitability of the early warning systems and temporary housing for the elderly population in the immediacy and transitional recovery phase of the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 31, p. 302-310, out. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.05.022>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

NISPEL, A.; EKWARIO-OSIRE, S.; DIAS, J. P.; CUNHA, A. Jr. Uncertainty Quantification for Fatigue Life of Offshore Wind Turbine Structure. **ASME Journal of Risk and Uncertainty**. v. 7, n. 4, p. 040901 (2021). DOI: 10.1115/1.4051162.

NORENBERG, J.P.; CUNHA, A.; DA SILVA, S; VAROTO, P. S. Global sensitivity analysis of asymmetric energy harvesters. **Nonlinear Dynamics**. v. 109, n. 2, p. 443–458, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07563-8>.

PAVLACK, B.; PAIXÃO, J.; SILVA, S.; CUNHA, A.; GARCÍA CAVA, D. Polynomial Chaos-Kriging metamodel for quantification of the debonding area in large wind turbine blades. **Structural Health Monitoring**. v. 21, n. 2, p. 666-682, 2022. DOI: 10.1177/14759217211007956.

PENG, M.; ZHANG, L. M. Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: A new model based on Bayesian networks. **Natural Hazards**, v. 64, n. 1, p. 903-933, 2012.

PENNING-ROUSELL, E.; FLOYD, P.; RAMSBOTTOM, D.; SURENDRAN, S. Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework. **Natural Hazards**, v. 36, n. 1-2, p. 43-64, 2005.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PRODABEL. BHMap - Mapa Interativo de Belo Horizonte. Disponível em: <http://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo>. Acesso em: 02 de abril de 2023.

RAMOS, K. P. G. **Propagação de incertezas via expansão por caos polinomial na simulação de reservatórios de petróleo**. 2014. 113 f. Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

SCHROTER, K.; BARENDRECHT, M.; BERTOLA, M.; CIULLO, A.; COSTA, R. T. da; CUMISKEY, L.; CURRAN, A.; DIEDEREN, D.; FARRAG, M.; HOLZ, F. Large-scale flood risk assessment and management: prospects of a systems approach. *Water Security*, [S.L.], v. 14, p. 100109, dez. 2021. Disponível em :<<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100109>>. Acesso em: 20 out. 2022.

SHIELDS, M. D.; AU, S.; SUDRET, B. Advances in Simulation-Based Uncertainty Quantification and Reliability Analysis. **Journal Of Risk and Uncertainty In Engineering Systems**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 02019003, dez. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1061/ajrua6.0001025>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

SILVA, A. F. R. **Análise da aplicabilidade de modelos de estimativa de perdas de vidas para inundações provenientes de rupturas de barragens de rejeito**. 2020. 201 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2020.

SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C. Simulação de perdas de vidas causadas por inundações: modelos disponíveis e aplicações comparativas. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019. **Anais** [...]. Paraná: 2019. 1-9 p.

SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C.; NASCIMENTO, N. O. Alerta e redução de perdas de vidas associadas à ruptura hipotética da barragem da Pampulha –MG. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019. **Anais** [...]. Paraná: 2019.

SLOVIC, Paul. **The perception of risk**. New York: Earthscan Publications, 2000. 102 p.

SMALLEY, V. J. Who Says I Should Leave? Factors Determining the Decision to Leave Home During Disasters. p. 18, 2013.

SOBOL, I. M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. **Mathematical Modelling and Computational Experiment**, v. 1, n. 4, p. 407–414, 1993.

SORENSEN, J.; MILETI, D. First Alert and/or Warning Diffusion Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases and Levee Breaches or Overtopping. Projeto de Documento preparado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados

Unidos. Instituto de Recursos Hídricos, Centro de Gerenciamento de Crise. Davis, Califórnia, 2015.

SUDRET, B. **Recent Developments on Surrogate Models for Stochastic Simulators**. In: 4th International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering (UNCECOMP'2021), Atenas (Grécia) – 30 de junho de 2021.

SUDRET, B.; MARELLI, S.; WIART, JOE. **Surrogate models for uncertainty quantification: An overview**. In: 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). 2017. DOI: 10.23919/EuCAP.2017.7928679.

SUDRET, B. **Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions**. In P. Spanos and G. Deodatis (Eds.), Proc. 5th Int. Conf. on Comp. Stoch. Mech (CSM5), Rhodos, Greece. 2006.

SUDRET, B. **Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models Contributions to structural reliability and stochastic spectral methods**. 2007. 252 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ecole Doctorale Sciences Pour L'ingé Nieur, UniversitÉ Blaise Pascal - Clermont II, Paris, 2007.

SUN, X.; PAN, X.; CHOI, J. Non-intrusive framework of reduced-order modeling based on proper orthogonal decomposition and polynomial chaos expansion. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 390, p. 113372, julho de 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2021.113372>.

THAKUR, S.; RANJITKAR, P.; RASHIDI, S. Modelling evacuation decisions under a threat of volcanic eruption in Auckland. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 109, p. 103374, ago. 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2022.103374>>. Acesso em: 17 set. 2022.

TIMBADIYA P.; PATEL P, POREY P. A 1D–2D coupled hydrodynamic model for river flood prediction in a coastal urban floodplain. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.20, n.2. 2015. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001029](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001029)>. Acesso em: 10 out. 2022.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Flood Impacts Analysis (HEC-FI). Version 3.0. Davis, Califórnia, 2015.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Life Loss Estimation (HEC-LifeSim). Version 1.0.1. Davis, Califórnia, 2018.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Life Loss Estimation (LifeSim). Version 2.0. Davis, Califórnia, 2021.

VERMA, R.; SHEN, J.; BENEDICT, B. C.; MURRAY-TUITE, P.; LEE, S.; GE, Y. G.; UKKUSURI, S. V. Progression of hurricane evacuation-related dynamic decision-making with information processing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 108, p. 103323, jul. 2022. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2022.10332>>. Acesso em: 13 set. 2022.

XIU, D.; KARNIADAKIS, G. The Wiener--Askey Polynomial Chaos for Stochastic Differential Equations. **Siam Journal on Scientific Computing**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 619-644, jan. 2002. Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM). Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1137/s1064827501387826>>. Acesso em: 13 jan. 2022.

XU, Y.; ZHANG, L. M. Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 12, p. 1957–1970, dez. 2009. Disponível em:<<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000162>>.

VIANINI NETO, L. **Estudo de Ruptura da Barragem da Pampulha, Em Belo Horizonte: Retroanálise da Brecha do Acidente de 1954 e Ruptura Hipotética Nas Condições Atuais**. 2016. 304 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

VON THUN, L.; GILLETTE, D. R. *Guidance on breach parameters*. Denver, Colorado: [s.n.], 1990.

VROUWENVELDER, A. C. W. M.; STEENHUIS, C. M. Tweede waterkeringen Hoeksche Waard, berekening van het aantal slachtoffers bij verschillende inundatiescenario's. Report TNO 97-CON-R0332. 1997.

WANG, J. J. *et al.* Survey on evacuation notification process in “3· 29” Liquid chlorine leakage accident. **China Safety Sci. J.**, v. 23, n. 1, p. 136-141, 2013. Disponível em:<http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTTotal-ZAQQ201301023.htm>. Acesso em: 13 jan. 2022.

WAARTS, P. Methode voor de bepaling van het aantal doden als gevolg van inundatie. Report TNO B-91-1099. 1992.

WANG, Y.; KYRIAKIDIS, M.; DANG, V. N. Incorporating human factors in emergency evacuation – An overview of behavioral factors and models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 60, p. 102254, jun. 2021. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102254>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

WIENER, N. The Homogeneous Chaos. **American Journal of Mathematics**, v. 60, n. 4, p. 897-93, 1938.

WU, Y.; LIU, K.; CHEN, Y. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study. *Journal Of Mountain Science*, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 293-304, abr. 2013. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1007/s11629-013-2511-1>>. Acesso em: 18 out. 2022.

ZHAI, G.; FUKUZONO, T.; IKEDA, S. An empirical model of fatalities and injuries due to floods in Japan. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 4, p. 863-875, 2006.

ZHANG, X-Y.; TRAME, M.; LESKO, L.; SCHMIDT, S. Sobol Sensitivity Analysis: a tool to guide the development and evaluation of systems pharmacology models. **Cpt: Pharmacometrics & Systems Pharmacology**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 69-79, fev. 2015. Disponível em:<Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/psp4.6>>. Acesso em: 20 out. 2022.

ZHANG, L. *et al.* Dam failure mechanisms and risk assessment. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2016.

ANEXO A – Algoritmo MatLab – Modelo Substituto

```

clc
clear
close all

% -----
% Importando dados
% -----

data = importdata("Dados_LifeSim");

X = data(1:end,1:4);
Y = data(1:end,5);
% -----
% -----
%Inicializando uqlab
% -----
uqlab
% -----
%Distribuição dos inputs
% -----

% Warning
InputOpts.Marginals(1).Type = 'uniform';
InputOpts.Marginals(1).Parameters = [0 1];

% -----

% Mobilization
InputOpts.Marginals(2).Type = 'uniform';
InputOpts.Marginals(2).Parameters = [0 1];

% -----

% Relative Warning Issuance
InputOpts.Marginals(3).Type = 'uniform';
InputOpts.Marginals(3).Parameters = [0 1440];

% -----

% Relative Hazard Identifeid
InputOpts.Marginals(4).Type = 'uniform';
InputOpts.Marginals(4).Parameters = [0 1440];
% -----
InputOpts.Copula.Type = 'Independent';

% -----
myInput = uq_createInput(InputOpts);
% -----
uq_print(myInput)
uq_display(myInput)
% -----

```

```

% -----
%PCE-índice de Sobol
% -----

PCEOpts.Type          = 'Metamodel';
PCEOpts.MetaType      = 'PCE';
PCEOpts.ExpDesign.X = X;
PCEOpts.ExpDesign.Y = Y;
PCEOpts.Input         = myInput;
PCEOpts.Degree        = 1:15;
PCEOpts.ExpDesign.NSamples = 1000;
MetaOpts.Method = 'LARS';
PCEOpts.TruncOptions.qNorm=0.1:0.1:1.0;

myPCE = uq_createModel(PCEOpts);
uq_print(myPCE)
uq_display(myPCE)

YPCE = uq_evalModel(myPCE,X);
% Y
plot(Y,YPCE,'o',[1 20],[1 20],'-k');

% quantile(YPCE, [0.025 0.975]);
% myPCE.Internal.PCE.LARS

X = uq_getSample(1000);
% Y = uq_myPCE(X);
YPCE = uq_evalModel(X);
% -----
% Sobol analysis
% -----

PCESobol.Type          = 'Sensitivity';
PCESobol.Method        = 'Sobol';
PCESobol.Sobol.Order = 3;
PCESobolAnalysis = uq_createAnalysis(PCESobol);

mySobolAnalysisPCE = uq_createAnalysis(PCESobol);
mySobolResultsPCE = mySobolAnalysisPCE.Results;

uq_print(mySobolAnalysisPCE);
uq_display(mySobolAnalysisPCE);

% -----

```