



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



WILLIAN LEMOS SILVA

**ESTUDO DO ASSOREAMENTO E INFLUÊNCIA DA
POLUIÇÃO DIFUSA EM UM RESERVATÓRIO UTILIZADO
PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO**

Uberlândia, 2025

WILLIAN LEMOS SILVA

Estudo do assoreamento e influência da poluição difusa em um reservatório para abastecimento público

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Ricardo Salla

Uberlândia, 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586e
2025 Silva, Willian Lemos, 1996-
Estudo do assoreamento e influência da poluição difusa em um reservatório utilizado para abastecimento público [recurso eletrônico] / Willian Lemos Silva. - 2025.

Orientador: José Eduardo Alamy Filho.

Coorientador: Márcio Ricardo Salla.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5538>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Recursos hídricos. 3. Saneamento. 4. Água - Qualidade. I. Alamy Filho, José Eduardo (Orient.). II. Salla, Márcio Ricardo (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 319, PPGEC				
Data:	09 de junho de 2025	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	12312ECV021				
Nome do Discente:	Willian Lemos Silva				
Título do Trabalho:	Estudo do assoreamento e influência da poluição difusa em um reservatório para abastecimento público				
Área de concentração:	Análise Espacial, Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização de recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência e na Sala de Projeções da FECIV, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Adelena Goncalves Maia - UFRN, Stênio de Sousa Venâncio - UFTM e José Eduardo Alamy Filho, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, José Eduardo Alamy Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Alamy Filho**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/06/2025, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adelena Gonçalves Maia, Usuário Externo**, em 09/06/2025, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **STÊNIO DE SOUSA VENÂNCIO, Usuário Externo**, em 09/06/2025, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6407658** e o código CRC **3ADACCB6**.

Referência: Processo nº 23117.039077/2025-24

SEI nº 6407658

RESUMO

O assoreamento e a poluição difusa são fatores críticos que afetam a qualidade da água e a vida útil dos reservatórios utilizados para abastecimento público. Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto desses processos no reservatório do Córrego Mumbuca, localizado em Monte Carmelo, Minas Gerais, considerando a mancha urbana e agrícola da bacia de drenagem do manancial. Para isso, foram aplicados modelos computacionais baseados no Modelo de Coeficiente de Exportação (ECM) e no Método Simples de Schueler, que permitiram estimar a carga de poluentes, como chumbo, cobre e zinco, além de nutrientes e sólidos suspensos transportados para o reservatório. Além disso, foram utilizadas diferentes metodologias para análise da eficiência de retenção de sedimentos por meio dos softwares SILTINGZ e HEC-RAS, visando estimar o tempo de vida útil remanescente do reservatório. A partir dos dados gerados, este estudo busca quantificar os impactos dos diferentes usos do solo, como crescimento urbano, industrial e agrícola, na bacia de contribuição a montante do reservatório.

Palavras-chave: Assoreamento - Poluição Difusa - Modelagem Computacional - Retenção de Sedimentos - Qualidade da Água.

ABSTRACT

Sedimentation and diffuse pollution are critical factors affecting water quality and the lifespan of reservoirs used for public water supply. This study aims to evaluate the impact of these processes on the Córrego Mumbuca reservoir, located in Monte Carmelo, Minas Gerais, considering the urban and agricultural areas within the watershed. To this end, computational models based on the Export Coefficient Model (ECM) and the Simple Method by Schueler were applied, allowing the estimation of pollutant loads such as lead, copper, and zinc, as well as nutrients and suspended solids transported to the reservoir. Additionally, different methodologies were used to analyze sediment retention efficiency through the SILTINGZ and HEC-RAS software, to estimate the reservoir's remaining useful life. Based on the data generated, this study seeks to quantify the impacts of different land uses—such as urban, industrial, and agricultural development—in the contributing upstream watershed of the reservoir.

Keywords: Sedimentation - Diffuse Pollution - Computational Modeling - Sediment Retention - Water Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de eficiência de retenção de sedimentos propostas por Brune.	29
Figura 2 - Curvas de eficiência de retenção de sedimentos propostas por Churchill.....	30
Figura 3 - Fluxograma com as etapas do trabalho.....	40
Figura 4 - Mapa de localização do reservatório do estudo.....	41
Figura 5 - Área de contribuição do reservatório do córrego Mumbuca.....	43
Figura 6 - Usos do solo atual na área de contribuição do reservatório.....	44
Figura 7 - Mapa pedológico da área de contribuição do reservatório.....	46
Figura 8 - Usos do solo futuro na área de contribuição do reservatório.....	47
Figura 9 - Estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas para regionalização de vazões médias mensais.....	49
Figura 10 - Janela inicial do programa: Dados pluviométricos.....	50
Figura 11 - Janela para a seleção das estações pluviométricas.....	52
Figura 12 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de Monte Carmelo.....	52
Figura 13 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de todas as estações inseridas no programa.....	53
Figura 14 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de Monte Carmelo com os dados tratados.....	54
Figura 15 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de todas as estações inseridas no programa com os dados tratados.....	54
Figura 16 - Fluxograma do programa: Dados pluviométricos.....	55
Figura 17 - Segunda janela do programa: Dados fluviométricos.....	56
Figura 18 - Janela para a seleção das estações fluviométricas.....	57

Figura 19 - Gráfico de "Vazões médias mensais(mm) x Anos" de Iraí de Minas.....	57
Figura 20 - Gráfico de "Vazões médias mensais(mm) x Anos" de todas as estações inseridas no programa.....	58
Figura 21 - Fluxograma do programa: Dados fluviométricos.	58
Figura 22 - Terceira janela do programa: Coordenadas	59
Figura 23 - Janela para a inserção das coordenadas.	59
Figura 24 - Janela para a inserção das áreas de contribuição das estações fluviométricas.	60
Figura 25 - Fluxograma do programa: Coordenadas.....	61
Figura 26 - Quarta janela do programa: Regionalização	61
Figura 27 - Janela de aviso: Correlação das estações.....	63
Figura 28 - Gráfico de correlação Fazenda Cachoeira: Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica.....	63
Figura 29 - Gráfico de correlação Iraí de Minas: Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica	64
Figura 30 - Gráfico de correlação Estrela do Sul: Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica	64
Figura 31 - Janela para inserção de dados da seção alvo.....	65
Figura 32 - Vazão média mensal regionalizada (para entrada do reservatório do córrego Mumbuca) x Data	66
Figura 33 - Fluxograma do programa: Regionalização.	67
Figura 34 - Janela inicial do programa "Poluição difusa: Método SCS"	70
Figura 35 - Janela de resultado do método SCS. (Direita: Situação atual; Esquerda: Situação futura)	71
Figura 36 - Janela do programa "Poluição difusa: Método de Reckhow".....	71

Figura 37 - Amostra da janela de resultado do método de Reckhow	72
Figura 38 - -- Janela do programa "Poluição difusa: Método Simples de Schueler"	72
Figura 39 – Janela de seleção de estação.....	73
Figura 40 – Janela de aviso de conclusão do cálculo de poluentes ponderados.....	73
Figura 41 – Janela de aviso de conclusão do cálculo da precipitação efetiva	74
Figura 42 – Janela de aviso de conclusão do cálculo de poluentes ponderados.....	74
Figura 43 – Janela de escolha dos poluentes para gerar os gráficos.....	75
Figura 44 - Curva granulométrica do depósito de sedimentos do reservatório do córrego Mumbuca	76
Figura 45 – Pontos de batimetria utilizados	77
Figura 46 – Visualização da batimetria do Modelo Batimétrico Digital (MBD).....	78
Figura 47 -- Localização e estimativa de comprimento do vertedouro por imagem aérea.....	79
Figura 48 - -- Imagem aérea do vertedouro e da barragem do reservatório.....	79
Figura 49 – Curva Cota x Vazão da saída do reservatório	80
Figura 50 - Primeira aba do programa Siltingz	81
Figura 51 - Segunda aba do programa Siltingz	82
Figura 52 – Pontos de contribuição fluviais difusas.....	82
Figura 53 – Visualização Modelo Batimétrico Digital (MBD).....	84
Figura 54 – Visualização da 2D Flow Areas e breaklines no HECRAS.....	85
Figura 55 - Aba Sediment Data -HECRAS	86
Figura 56 - Janela de simulação utilizando sedimentos no HECRAS.....	87

Figura 57 - Bacia do reservatório do córrego Mumbuca: cenários de uso do solo considerados no estudo.....	88
Figura 58 - Média das simulações do volume assoreado na simulação de 10 anos pelo método de Churchill	95
Figura 59 - Porcentagem do volume assoreado do reservatório pelo método de Churchill, considerando intervalo de 10 anos.	96
Figura 60 - Média das simulações do volume assoreado na simulação de 10 anos pelo método de Brune.....	96
Figura 61 - Porcentagem do volume assoreado do reservatório pelo método de Brune, considerando intervalo de 10 anos.	97
Figura 62 - Média das simulações do volume assoreado na simulação de 10 anos pelo método de Heineman.....	97
Figura 63 - Porcentagem do volume assoreado do reservatório pelo método de Heineman, considerando intervalo de 10 anos.	98
Figura 64 - Comparação da porcentagem do volume assoreado do reservatório entre os métodos utilizados, considerando intervalo de 10 anos.	98
Figura 65 - Evolução da mancha de assoreamento estimada para intervalos de 5 e 10 anos, considerando cenário de uso do solo atual	99
Figura 66 - Evolução da mancha de assoreamento estimada para intervalos de 5 e 10 anos. considerando cenário futuro de uso do solo	100
Figura 67 - Ponto de captação de água realizada pelo DMAE.....	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Sólidos Suspensos Totais....	91
Gráfico 2 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal – Chumbo.....	92
Gráfico 3 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal – Cobre.....	92
Gráfico 4 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Zinco.....	92
Gráfico 5 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Fósforos Totais.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites máximos de parâmetros de qualidade para diferentes classes de águas doces conforme a resolução CONAMA n° 357 (2005).	21
Tabela 2 - Valores de CN para tipos de ocupação de solo e de classes de drenagem	34
Tabela 3 - Coeficientes de exportação dos poluentes por usos do solo.....	37
Tabela 4 - Valores típicos de concentração de poluentes em escoamento superficial.	39
Tabela 5 - Distribuição dos usos do solo atual na área de contribuição do reservatório.....	45
Tabela 6 - Distribuição dos tipos do solo na área de contribuição do reservatório.....	45
Tabela 7 - Distribuição dos usos do solo futura na área de contribuição do reservatório	47
Tabela 8 - Áreas das bacias de contribuição das estações fluviométricas.....	49
Tabela 9 - Coordenadas dos centroides das bacias de contribuição	49
Tabela 10 - Coordenadas das estações pluviométricas.....	50
Tabela 11 - Relação entre nome e código das estações	51
Tabela 12 - Classificação hidrológica pelo tipo de solo presente na área estudada	68
Tabela 13 - Grupo hidrológico x Uso do solo – Situação atual.....	69
Tabela 14 - Grupo hidrológico x Uso do solo – Situação futura (cenário hipotético)	69
Tabela 15 - Resultados estimados pelo método ECM: Situação atual x Situação Futura	89
Tabela 16 - Resultados estimados pelo método de Schueler: Situação atual x Situação Futura	91

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i - Área associada ao tipo de uso do solo

C - Concentração de poluente

C_a - Capacidade de afluência

C_s - Coeficiente de escoamento médio

Cu - Cobre

CN - Curve Number

E - Eficiência de retenção

ECM - Coeficiente de exportação

I_a - Abstração inicial

IS - Índice de sedimentação

L - Carga de poluente

L_r - Comprimento do reservatório

L_p - Carga total de nutrientes por ano

N_n - Nitrogênio

P - Fósforo

Pb - Chumbo

P_i - Precipitação no intervalo de tempo considerado

P_j - Fração dos eventos de chuva que geram escoamento

P_n - Carga de nutrientes decorrente da precipitação direta

P_t - Precipitação total

Q – Vazão de entrada média diária

Q_e - Escoamento superficial

S - Potencial máximo de armazenamento do solo

U - Velocidade de fluxo média da seção transversal do reservatório

V_a – Volume afluente

V_e – Volume de escoamento superficial

V_r – Volume do reservatório

Zn - Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>17</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	20
2.1.1	<i>Cobre.....</i>	<i>21</i>
2.1.2	<i>Zinco.....</i>	<i>22</i>
2.1.3	<i>Chumbo</i>	<i>22</i>
2.1.4	<i>Fósforo Total.....</i>	<i>23</i>
2.1.5	<i>Nitrogênio Amoniacal Total.....</i>	<i>24</i>
2.1.6	<i>Sólidos suspensos totais</i>	<i>24</i>
2.2	RESERVATÓRIOS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	24
2.3	ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS.....	25
2.4	EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS	28
2.4.1	<i>Método de Brune</i>	<i>28</i>
2.4.2	<i>Método de Churchill.....</i>	<i>29</i>
2.4.3	<i>Heineman</i>	<i>30</i>
2.4.4	<i>USDA SCS.....</i>	<i>31</i>
2.5	REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES.....	32
2.6	SOIL CONSERVATION SERVICE – SCS	33
2.7	POLUIÇÃO DIFUSA	35
2.7.1	<i>Modelo de coeficiente de exportação.....</i>	<i>36</i>
2.7.2	<i>Método Simples de Schueler</i>	<i>38</i>
3	METODOLOGIA	40
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.1.1	<i>Área de contribuição.....</i>	<i>42</i>
3.1.2	<i>Área de contribuição de uma situação futura.....</i>	<i>46</i>
3.2	REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES PARA O CÓRREGO MUMBUCA.....	48
3.3	MODELAGEM CHUVA-VAZÃO E ESTIMATIVA DAS CARGAS DE POLUENTES	68

3.3.1	<i>Classificação dos grupos hidrológicos das áreas</i>	68
3.3.2	<i>Software para modelagem chuva-vazão e quantificação das cargas poluidoras</i> ..	69
3.4	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	75
3.5	ADAPTAÇÃO DOS DADOS DE BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO	76
3.6	ESTIMATIVA DAS DIMENSÕES DO VERTEDOURO.....	78
3.7	PROGRAMA SILTINGZ	80
3.8	HEC-RAS.....	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	CARGAS POLUENTES	89
4.1.1	<i>Modelo De Coeficiente De Exportação (ECM)</i>	89
4.1.2	<i>Método simples de Schueler</i>	90
4.2	ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO	94
4.2.1	<i>ESTIMATIVAS PELO SILTINGZ</i>	94
4.2.2	<i>ESTIMATIVAS PELO HEC-RAS</i>	99
5	CONCLUSÃO	102

1 INTRODUÇÃO

Entre os principais usos da água no Brasil, a irrigação agrícola destaca-se como o maior consumidor, representando 53,7% da demanda setorial, seguida pelo abastecimento urbano (22,6%), uso industrial (8,8%) e dessedentação animal (7,6%) (ANA, 2022). Todos esses setores dependem da captação de corpos hídricos e captações subterrâneas, sendo que o abastecimento doméstico e industrial, em particular, exige padrões elevados de qualidade, com critérios rigorosos de potabilidade (Von Sperling, 2018).

A qualidade da água é influenciada por processos naturais e antrópicos. O escoamento superficial, a infiltração no solo e as atividades humanas, como o descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos e industriais e a aplicação de defensivos agrícolas, são fatores determinantes para a introdução de sólidos e contaminantes nos corpos hídricos (Von Sperling, 2018). Essas interferências comprometem os padrões de qualidade da água, impactando tanto os ecossistemas aquáticos quanto o abastecimento humano.

A desigualdade no acesso à água potável e as elevadas perdas no sistema de distribuição representam desafios críticos para a gestão dos recursos hídricos no Brasil. A provisão adequada de água potável não apenas previne doenças, mas também reduz impactos ambientais e promove qualidade de vida (Rodrigues et al., 2022). Assim, compreender a disponibilidade hídrica, monitorar sua qualidade e adotar estratégias de gestão sustentável são aspectos fundamentais para garantir um abastecimento seguro e minimizar desperdícios.

Diante da necessidade de garantir vazões superiores àquelas naturalmente oferecidas pelos corpos hídricos, seja em função do crescimento populacional ou da demanda industrial, a construção de barragens torna-se uma alternativa essencial para a regularização da oferta hídrica. A viabilidade dessas infraestruturas é avaliada por meio de estudos hidrológicos, hidráulicos, ambientais e socioeconômicos, os quais subsidiam a tomada de decisão e asseguram a compatibilização entre oferta e demanda hídrica (Righetto, 1998).

Entretanto, reservatórios apresentam baixas velocidades de escoamento, favorecendo a deposição de sedimentos e tornando o assoreamento um processo inerente ao longo dos anos. A intensificação da ação antrópica, especialmente pela remoção da vegetação nativa, tem acelerado esse fenômeno, aumentando a exposição do solo e sua vulnerabilidade à erosão, o que resulta no transporte de partículas pelos escoamentos superficiais e na consequente deposição no fundo dos reservatórios (Silva & Passos, 2022). Palu (2022, apud MAHMOOD,

1987; YOON, 1992) aponta que, anualmente, aproximadamente 1% da capacidade total de armazenamento dessas estruturas é perdida devido à sedimentação, tornando fundamental a adoção de estratégias de mitigação e remediação para prolongar sua vida útil.

O uso do solo é um dos principais fatores responsáveis pela introdução de poluentes nos corpos hídricos. Cornelli et. al (2016) aponta que atividades agrícolas, urbanização e industrialização estão diretamente associadas ao aumento das concentrações de metais pesados, como cobre, zinco e chumbo, além de nutrientes como fósforo total e nitrogênio total, impactando negativamente a qualidade da água. A intensificação agrícola, por exemplo, contribui para a elevação das cargas de nutrientes devido ao uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, resultando na eutrofização dos corpos d'água (Santos et al., 2022). Da mesma forma, a expansão urbana e industrial está relacionada com o lançamento de efluentes sem tratamento adequado, elevando a toxicidade da água e comprometendo sua utilização para o abastecimento público e outros usos essenciais. Dessa forma, a análise desses poluentes é fundamental para compreender a influência antrópica sobre a qualidade da água e subsidiar ações voltadas à preservação dos recursos hídricos.

A previsão do impacto do assoreamento nos reservatórios envolve incertezas relacionadas a variáveis climáticas e antrópicas, incluindo oscilações na precipitação, alterações no uso e ocupação do solo e limitações dos modelos de transformação chuva-vazão e transporte de sedimentos (Silva & Passos, 2022). Assim, a estimativa da progressão do assoreamento requer, inicialmente, a definição de cenários futuros, associando padrões de precipitação à modelagem das cargas sedimentares afluentes ao reservatório. Apenas após essa etapa torna-se viável prever a evolução do processo e seus impactos na capacidade de armazenamento e operação do reservatório. A adoção de estratégias de monitoramento contínuo e de controle de sedimentos mostra-se imprescindível para minimizar os efeitos do assoreamento e garantir a sustentabilidade na gestão dos recursos hídricos (Palu, 2022).

A intensificação do uso e ocupação do solo tem provocado impactos significativos na qualidade da água dos corpos hídricos, sobretudo em áreas de manancial, onde a remoção da vegetação nativa e a conversão para atividades urbanas e agrícolas elevam a produção de sedimentos e o aporte de poluentes nos reservatórios (Jovino et al., 2022). Garcia et. al (2018) indica que a compactação do solo, associada à redução da cobertura vegetal, aumenta o escoamento superficial, promovendo o transporte de partículas sólidas e nutrientes que comprometem a capacidade de armazenamento e a qualidade da água dos reservatórios. O assoreamento

progressivo reduz a vida útil dessas infraestruturas, afetando diretamente a disponibilidade hídrica para abastecimento público e outras finalidades essenciais. Nesse contexto, torna-se fundamental investigar a relação entre os diferentes usos do solo e os poluentes que chegam ao reservatório, permitindo a definição de estratégias de gestão e mitigação que minimizem os impactos ambientais e assegurem a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Diante dessas constatações, reservatórios destinados ao abastecimento público e parcialmente inseridos em setores urbanos são potencialmente mais vulneráveis à recepção de cargas poluidoras crescentes, bem como à redução gradual de volume em função do assoreamento. É nesse contexto que se insere o reservatório do córrego Mumbuca, objeto principal deste estudo.

O reservatório do córrego Mumbuca é utilizado para abastecimento de aproximadamente 38% da cidade de Monte Carmelo - MG (Rodrigues, 2019). Sua bacia de contribuição localiza-se parcialmente dentro do perímetro urbano, apresentando usos do solo modificados por ocupações urbanas, tipicamente residenciais e comerciais, além da implantação de agricultura e pastagens. Como tais usos potencializam a produção de sedimentos na bacia, a hipótese é que as taxas de assoreamento do reservatório tendem a aumentar.

A deposição excessiva de sedimentos compromete o volume útil do reservatório, reduzindo sua vida útil e impactando diretamente o abastecimento de água da cidade de Monte Carmelo-MG. Nesse contexto, a simulação computacional do assoreamento e da carga poluidora torna-se uma ferramenta essencial para estimar as taxas de sedimentação e poluição, além de servir como um alerta para a população e órgãos responsáveis sobre os impactos ambientais e a necessidade de medidas de mitigação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo principal deste trabalho é simular a carga poluidora e o assoreamento no reservatório do Córrego Mumbuca, utilizado para o abastecimento público da cidade de Monte Carmelo, Minas Gerais. Para isso, são aplicadas simulações computacionais e métodos específicos para estimar a carga de poluentes e a deposição de sedimentos, além de calcular a eficiência de retenção no reservatório. O estudo avalia os impactos do uso do solo, especialmente em função das atividades urbanas e agrícolas, sobre a qualidade da água e a disponibilidade hídrica, afetada pela redução do volume útil do reservatório decorrente da deposição de sedimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

A modelagem computacional da qualidade da água é realizada por meio do desenvolvimento de dois modelos computacionais, aplicando os métodos de Reckhow e Schueler para simular a carga poluidora no Córrego Mumbuca. Esses modelos consideram variáveis como as concentrações de chumbo, cobre, zinco, fósforo total, nitrogênio total e sólidos suspensos totais para prever o impacto de diferentes cenários de desenvolvimento urbano e agrícola na qualidade da água.

A escolha dessas variáveis se justifica pelo fato de que a bacia de contribuição do córrego está parcialmente inserida no perímetro urbano, apresentando modificações no uso do solo devido a ocupações residenciais, comerciais e industriais. Mesmo na zona rural, a maior parte da bacia também já está afetada por atividades agrícolas e pastoris. Essas atividades são fontes potenciais de poluentes, uma vez que áreas urbanas e industriais contribuem com metais pesados e sólidos suspensos, enquanto atividades agrícolas e pastoris elevam a carga de nutrientes e sedimentos transportados para o reservatório.

A simulação do processo de assoreamento do reservatório é conduzida por meio da aplicação de modelos sedimentológicos e hidrodinâmicos, visando estimar a deposição de sedimentos e avaliar os impactos das atividades antrópicas na bacia hidrográfica. Para tal, são empregados os softwares SILTINGZ e HEC-RAS, que possibilitam a modelagem do transporte e deposição de sedimentos a partir de diferentes abordagens metodológicas. No SILTINGZ, são considerados os métodos de Brune, de Churchill e de Heineman, permitindo a estimativa da eficiência de retenção de sedimentos no reservatório. Já na versão bidimensional do HEC-RAS, é utilizada sua funcionalidade específica para análise de assoreamento, que possibilita a modelagem integrada dos processos hidráulicos e sedimentológicos, fornecendo subsídios para a compreensão da evolução temporal do fenômeno, permitindo localizar zonas mais favoráveis à formação de depósitos.

Para complementar a modelagem, foi desenvolvido um programa em linguagem Python para realizar a regionalização das vazões médias mensais de entrada no reservatório, considerando a ausência de estação fluviométrica no córrego Mumbuca. Essa etapa baseou-se na correlação entre séries históricas de precipitação mensal, obtidas em estações pluviométricas da região, e as vazões específicas de estações fluviométricas com bacias de contribuição previamente delimitadas. A partir da ponderação das chuvas incidentes nos centroides dessas bacias e da

aplicação de regressões lineares, foi possível estimar a relação entre precipitação e vazão, permitindo a obtenção das vazões médias mensais na seção de entrada do reservatório. Esses dados serviram como base para as simulações hidrossedimentológicas conduzidas nos softwares SILTINGZ e HEC-RAS.

Dessa forma, são objetivos específicos deste trabalho: a modelagem que acopla os métodos de Reckhow e Schueler para estimativa das cargas difusas de poluentes, além das comparações dos resultados obtidos pelos modelos computacionais SILTINGZ e HEC-RAS na estimativa do assoreamento do reservatório do córrego Mumbuca.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Segundo Fortes et al. (2019), a qualidade da água destinada ao consumo humano é um fator essencial para a promoção da saúde e a garantia do acesso à água potável. No Brasil, a vigilância da qualidade da água tem sido estruturada desde a década de 1980, com normativas e ações que visam assegurar a conformidade com os padrões estabelecidos. No entanto, apesar dos avanços regulatórios, desafios ainda persistem na produção e comunicação das informações sobre a qualidade da água, o que compromete o acesso pleno a esse recurso fundamental. A efetividade das políticas públicas nesse contexto depende não apenas da implementação de normas técnicas, mas também da transparência e acessibilidade das informações para a sociedade, permitindo o empoderamento dos usuários e a participação ativa na gestão dos recursos hídricos.

Os cursos de água doce no Brasil são classificados em cinco classes de qualidade, conforme a Resolução CONAMA nº 357 (2005), considerando, entre outros fatores, o uso das águas para abastecimento humano. As classes diferenciam-se principalmente pelo nível de tratamento necessário para tornar a água adequada ao consumo. A Classe Especial é destinada ao abastecimento humano após apenas desinfecção; a Classe 1, após tratamento simplificado; a Classe 2, após tratamento convencional; e a Classe 3, após tratamento convencional ou avançado. Já a Classe 4 não é adequada para abastecimento humano.

Para cada classe de qualidade, são estabelecidos limites de concentração para determinados parâmetros de qualidade da água, os quais indicam a classificação do corpo hídrico. Esses limites estão apresentados na Tabela 1. É importante destacar que os valores para fósforo total variam conforme a classe e o tipo de corpo de água. Em águas lênticas, o limite para fósforo é de 0,010 mg/L na Classe Especial, 0,030 mg/L na Classe 1 e 0,050 mg/L na Classe 2. Já em águas lóxicas, o limite é de 0,050 mg/L para a Classe 1 e de 0,1 mg/L para a Classe 2. Esses limites são essenciais para controlar a eutrofização e garantir a qualidade da água, conforme os usos previstos para cada classe.

Tabela 1 – Limites máximos de parâmetros de qualidade para diferentes classes de águas doces conforme a resolução CONAMA nº 357 (2005).

Parâmetro	Classe Especial	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Cobre (Cu)	0,009 mg/L	0,009 mg/L	0,020 mg/L	0,030 mg/L	-
Zinco (Zn)	0,18 mg/L	0,18 mg/L	0,36 mg/L	0,5 mg/L	-
Chumbo (Pb)	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L	-
Fósforo Total (P)	0,010 mg/L	0,030 mg/L	0,050 mg/L	0,1 mg/L	-
Nitrogênio Total (N)	-	1,270 mg/L	1,270 mg/L	0,1 mg/L	-

Fonte: CONAMA (2005)

A Classe 4 de qualidade das águas, segundo a Resolução CONAMA nº 357 (2005), não possui limites estabelecidos para parâmetros como cobre, zinco, chumbo e fósforo total porque essa classe é destinada a usos menos restritivos, que não envolvem o consumo humano nem atividades que exijam alta qualidade da água, como a recreação de contato primário ou a preservação de ecossistemas aquáticos sensíveis. A água classificada como Classe 4 é adequada apenas para navegação, harmonia paisagística ou outros usos que não requerem controle rigoroso de contaminantes. Portanto, a ausência de limites reflete a menor exigência de controle sobre a qualidade da água para essas finalidades, uma vez que o risco à saúde humana e ao meio ambiente é considerado baixo nesses contextos.

2.1.1 Cobre

O cobre é um parâmetro relevante na qualidade da água, exigindo atenção devido ao seu impacto potencial tanto na saúde humana quanto no meio ambiente. Em concentrações elevadas, pode causar a coloração indesejada de roupas e utensílios sanitários, além de alterar o sabor da água, tornando-a amarga e desagradável para o consumo (OMS, 2011).

Embora essencial para diversas funções fisiológicas, o cobre pode ser prejudicial quando presente em níveis alterados. Segundo Baieler et al. (2010), mesmo dentro dos valores de referência, sua concentração elevada no sangue pode inibir a atividade da enzima δ -aminolevulinato desidratase (ALA-D), comprometendo a síntese de hemoglobina e afetando parâmetros hematológicos, como hemoglobina e hematócrito. Além disso, o excesso de cobre pode estar associado ao aumento na geração de espécies reativas de oxigênio (EROS), intensificando o estresse oxidativo, fator que pode contribuir para o desenvolvimento de doenças crônico-degenerativas, como Alzheimer e Parkinson. Dessa forma, a homeostase do cobre no organismo, especialmente em idosos, deve ser cuidadosamente avaliada, considerando seus potenciais efeitos deletérios à saúde.

2.1.2 *Zinco*

O zinco é um elemento essencial para o organismo humano, desempenhando papel fundamental em diversas funções biológicas, como a imunidade, cicatrização de feridas e desenvolvimento adequado em crianças (CETESB, 2017). A deficiência em zinco pode causar uma série de problemas de saúde, incluindo falta de apetite, diminuição do paladar e olfato, além de retardo no crescimento e dermatite. Esses efeitos geralmente são reversíveis com a correção da deficiência de zinco (CETESB, 2017).

No entanto, embora o zinco seja necessário em pequenas quantidades, o seu excesso pode ter efeitos adversos graves. O consumo de grandes quantidades de zinco, seja por meio de água, alimentos ou suplementos, pode causar uma variedade de problemas de saúde. A ingestão aguda de altas doses pode resultar em cólicas estomacais, náuseas e vômitos, enquanto a exposição prolongada a altas doses pode levar à anemia, danos ao pâncreas e diminuição do colesterol HDL (CETESB, 2017).

Além dos efeitos mencionados, o excesso de zinco está associado a neurotoxicidade e pode contribuir para o desenvolvimento de doenças neurológicas, como a doença de Alzheimer. Mecanismos envolvidos incluem excitotoxicidade, estresse oxidativo e prejuízo na geração de energia celular. Esses processos podem levar a danos e morte de neurônios, contribuindo para o envelhecimento e neurodegeneração (Zendron, 2015).

Em relação à qualidade da água, concentrações elevadas de zinco podem conferir à água um sabor adstringente, alterar sua cor e até mesmo produzir uma película oleosa quando a água é fervida, o que pode ser indesejável para o consumo (OMS, 2011). Assim, é crucial monitorar as concentrações de zinco na água para evitar esses efeitos indesejados e garantir a segurança do abastecimento.

2.1.3 *Chumbo*

O chumbo é um contaminante altamente tóxico, cuja exposição está associada a uma ampla gama de efeitos adversos à saúde, tanto em crianças quanto em adultos. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2011), a exposição ao chumbo pode causar impactos significativos no neurodesenvolvimento, especialmente em crianças, onde mesmo em baixas concentrações, o chumbo no sangue já estão associadas a comprometimentos neurológicos. Este

efeito é considerado um dos mais críticos, sendo amplamente documentado e consistente nos estudos.

Segundo Souza (2017), o chumbo não desempenha função biológica essencial no organismo, mas pode ser absorvido pelas vias aérea, cutânea e gastrointestinal, dependendo do tamanho da partícula e da forma química do composto. Uma vez no organismo, seus íons ligam-se a proteínas plasmáticas e às membranas dos eritrócitos, circulando no sangue por cerca de 40 dias antes de se distribuir para órgãos como cérebro, fígado, rins e músculos, além de se depositar em tecidos mineralizados, como ossos e dentes. Sua toxicidade é elevada, afetando diversos sistemas fisiológicos e inibindo a biossíntese da hemoglobina por meio da inibição da enzima ácido aminolevulínico desidratase (ALAD), essencial para a produção do grupo heme. Além disso, pode causar danos neurológicos, cardiovasculares e renais, interferindo em processos celulares fundamentais e contribuindo para o desenvolvimento de diversas disfunções no organismo.

2.1.4 Fósforo Total

O fósforo é um elemento essencial para o crescimento dos micro-organismos que desempenham um papel fundamental na estabilização da matéria orgânica, sendo, portanto, um nutriente indispensável em diversos processos biológicos (FUNASA, 2019). Ele pode ser encontrado na água principalmente nas formas de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico (Von Sperling, 2005).

Apesar de não representar problemas diretos de ordem sanitária para a saúde humana, o fósforo é um fator crítico no desenvolvimento de processos de eutrofização em corpos de água. A eutrofização ocorre quando há um excesso de nutrientes, como o fósforo, levando a um crescimento exagerado de algas. Esse fenômeno pode resultar em consequências ambientais graves, como a diminuição da qualidade da água, morte de peixes e outros organismos aquáticos, além de problemas relacionados ao odor e ao gosto da água, afetando seu padrão organoléptico e, portanto, sua aceitação para consumo humano (FUNASA, 2019; Von Sperling, 2005).

A presença de fósforo em concentrações elevadas, portanto, é uma preocupação ambiental significativa, principalmente em lagos e represas, onde o fenômeno da eutrofização pode comprometer tanto a vida aquática quanto o uso desses corpos de água para atividades humanas.

2.1.5 Nitrogênio Amoniacal Total

De acordo com Haluch *et. al* (2025), o nitrogênio amoniacal total (NAT) refere-se à soma das formas iônica (NH_4^+) e não iônica (NH_3) da amônia presentes em soluções aquosas. A presença excessiva de NAT em corpos hídricos pode resultar em sérios impactos ambientais e riscos à saúde humana.

O íon amônio (NH_4^+) desempenha um papel essencial para organismos produtores, sendo energeticamente mais viável para absorção. No entanto, quando presente em altas concentrações, pode gerar impactos ecológicos significativos, principalmente ao afetar a disponibilidade de oxigênio dissolvido na água. (Ribeiro, 2019)

A amônia na forma não iônica (NH_3) é altamente tóxica para organismos aquáticos e pode causar efeitos adversos à saúde humana, incluindo irritação das mucosas, danos ao sistema respiratório e disfunções metabólicas. A presença de NAT em águas pode ser decorrente de atividades antropogênicas, como a liberação de efluentes industriais e domésticos (Haluch *et. al*, 2025).

2.1.6 Sólidos suspensos totais

Os sólidos suspensos totais (SST) são uma das variáveis fundamentais para a avaliação da qualidade da água em diferentes ambientes aquáticos, incluindo sistemas estuarinos, lagos, rios e reservatórios urbanos. A presença desses sólidos pode ter diversas origens, incluindo processos naturais, como erosão e ressuspensão de sedimentos, e atividades antrópicas, como dragagem, descarte de efluentes e uso inadequado do solo (Costa, 2016). A presença de sólidos suspensos interfere diretamente na transparência da água, influenciando a penetração da luz solar e, conseqüentemente, a taxa de fotossíntese dos organismos aquáticos (Simões *et al.*, 2021).

2.2 RESERVATÓRIOS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os reservatórios são estruturas fundamentais no gerenciamento dos recursos hídricos, especialmente em áreas urbanas onde a demanda por água potável é constante e elevada. Esses reservatórios desempenham um papel crucial na captação, armazenamento e distribuição de água, garantindo que as necessidades das populações urbanas sejam atendidas mesmo em períodos de baixa precipitação ou de alta demanda.

As barragens de terra são um tipo específico de estrutura amplamente utilizado devido à disponibilidade local de materiais e ao custo relativamente baixo de construção. Essas barragens são construídas principalmente com materiais naturais, como terra, argila e cascalho, e envolvem a compactação de camadas de solo para formar uma estrutura estável e impermeável (ANA, 2022).

Essas barragens são frequentemente utilizadas em áreas rurais para fins de irrigação ou em regiões onde a construção de barragens de concreto seria economicamente inviável. No entanto, as barragens de terra requerem manutenção contínua para prevenir erosão e infiltrações que possam comprometer sua estrutura. Inspeções regulares e reparos são essenciais para garantir a segurança e a durabilidade dessas barragens (FUNASA, 2015).

2.3 ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

O assoreamento de reservatórios de abastecimento de água é um processo complexo e preocupante, que resulta na deposição de sedimentos no fundo dos reservatórios, reduzindo gradualmente sua capacidade de armazenamento e comprometendo sua eficácia ao longo do tempo. De acordo com Cabral (2004), o estudo do assoreamento ganhou destaque a partir da década de 1930, com trabalhos pioneiros como os de Fiock (1934), Grover & Howards (1938) e Eakin (1939), que abordaram o problema do assoreamento em reservatórios. No Brasil, foi somente a partir de 1981 que o tema recebeu maior atenção, especialmente com os estudos desenvolvidos por Ponçano et al. (1981) em colaboração com a Eletrobrás, que analisaram o assoreamento em reservatórios como os de Capivari-PR, Passo Real-RS e Ernestina-RS (Cabral, 2004).

O assoreamento ocorre devido à alteração do equilíbrio natural do transporte de sedimentos quando uma barragem é construída. Normalmente, cursos de água possuem um equilíbrio dinâmico no transporte de sedimentos, que pode ser por arrasto, saltitação junto ao leito ou em suspensão na corrente. A construção de um reservatório altera drasticamente essa dinâmica, pois a redução da velocidade do fluxo de água no reservatório favorece a deposição de sedimentos. Partículas maiores, como pedregulhos e areias grossas, tendem a se depositar próximo à entrada do reservatório, enquanto partículas mais finas, como silte e argila, podem se mover para as áreas mais profundas ou permanecer em suspensão por mais tempo (Carvalho, 1994 apud Cabral, 2004; Carvalho, 2000).

As causas do assoreamento são múltiplas e complexas. Elas incluem a erosão nas bacias hidrográficas, o transporte dos sedimentos pelos rios e a subsequente deposição no reservatório. A erosão é intensificada por fatores como uso inadequado do solo, desmatamento, práticas agrícolas inadequadas e ocupação desordenada do solo. Esses fatores aumentam a quantidade de sedimentos que são transportados pelos rios até os reservatórios. A deposição dos sedimentos é influenciada por características como a declividade do escoamento, a geometria do reservatório, o modo de operação e as características químicas e físicas dos sedimentos e da água (Carvalho, 1994 apud Cabral, 2004; Lopes, 1993 apud Cabral, 2004; Vanoni, 1977 apud Cabral, 2004).

O cálculo e a estimativa do assoreamento em reservatórios envolvem a avaliação de vários parâmetros. Entre eles estão a quantidade de sedimentos que adentra o reservatório, a eficiência de retenção dos sedimentos, o peso específico dos depósitos e a distribuição dos depósitos de sedimentos ao longo do reservatório (Brune & Allen, 1941 apud Cabral, 2004; Carvalho, 2000). A eficiência de retenção de sedimentos, por exemplo, é a razão entre a carga sólida que se deposita no reservatório e a carga sólida total afluyente. Para calcular o volume de sedimentos acumulados, utiliza-se o peso específico dos depósitos, que é a relação entre o peso seco do material e o volume ocupado pelo depósito (Lopes, 1993 apud Cabral, 2004; Koelzer & Lara, 1958 apud Maia, 2006). Essas estimativas são essenciais para prever a vida útil do reservatório e planejar intervenções corretivas (Carvalho, 2000).

A sedimentação, ou assoreamento, forma diferentes tipos de depósitos dentro do reservatório, classificados conforme sua localização e características. Os depósitos de remanso são formados por materiais de maior granulometria, como seixos, que se depositam na entrada do reservatório. Deltas são formados por partículas de tamanho médio, como areia, que se depositam logo após a entrada do fluxo no reservatório, reduzindo gradualmente sua capacidade útil. Depósitos de fundo, compostos por partículas mais finas como silte e argila, se acumulam nas áreas mais profundas do reservatório, enquanto os depósitos de margem são causados pela deposição de sedimentos trazidos pelas ondas da água e pelo vento (Carvalho, 2000; Vanoni, 1977 apud Cabral, 2004).

As consequências do assoreamento são graves e podem comprometer a operação e a segurança do reservatório. À medida que os sedimentos se acumulam, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui, o que pode levar à necessidade de racionamento de água durante períodos de seca (Rauen, 2018; Schleiss et al., 2016). Além disso, o acúmulo de sedimentos pode obstruir

estruturas de captação e descarga de água, dificultando a operação do reservatório e aumentando os custos de manutenção. O assoreamento também pode aumentar o risco de enchentes a montante, pois a redução da capacidade de armazenamento pode levar ao transbordamento durante eventos de chuvas intensas (Maia, 2006). A erosão do sedimento a jusante do reservatório também é uma preocupação, pois a água limpa liberada pelo reservatório tem maior capacidade erosiva, o que pode levar ao desgaste das margens e leitos dos rios (Carvalho, 1994 apud Cabral, 2004; Coiado, 2001 apud Maia, 2006).

Para mitigar os impactos do assoreamento, são necessárias ações preventivas e corretivas. O controle da erosão na bacia hidrográfica é uma das principais medidas preventivas, envolvendo práticas como reflorestamento, construção de terraços e manejo sustentável do solo (ICOLD, 1989 apud Cabral, 2004; Shen & Lai, 1996 apud Cabral, 2004). A remoção de sedimentos por dragagem é uma medida corretiva comum, embora seja cara e exija intervenções regulares para manter a capacidade do reservatório (Shen & Lai, 1996 apud Cabral, 2004). Além disso, o planejamento e a operação do reservatório devem ser ajustados para minimizar a deposição de sedimentos, como o manejo adequado das vazões de entrada e saída (Rauen, 2018).

A erosão do sedimento é o ponto de partida para o processo de assoreamento. A erosão natural ocorre sob condições normais e é responsável pela modelação das paisagens ao longo do tempo. No entanto, a erosão acelerada, causada por atividades humanas como desmatamento e agricultura inadequada, pode aumentar significativamente a quantidade de sedimentos transportados para os cursos de água e, eventualmente, para os reservatórios (Simões & Coiado, 2001 apud Maia, 2006). A sedimentação ocorre quando as partículas transportadas pelo rio não conseguem mais ser sustentadas pelo fluxo de água e se depositam no leito do reservatório. Esse processo depende de fatores como o tamanho, a forma e o peso das partículas, além das forças exercidas pelo escoamento da água (Carvalho, 1994 apud Cabral, 2004).

O assoreamento dos reservatórios é um processo inevitável, mas que pode ser gerenciado e mitigado através de práticas de manejo adequado do solo, intervenções regulares de manutenção e planejamento cuidadoso da operação dos reservatórios. A compreensão detalhada dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos é essencial para prolongar a vida útil dos reservatórios e garantir sua eficácia na gestão dos recursos hídricos (Cabral, 2004; Maia, 2006).

2.4 EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS

A eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios é um parâmetro crucial para a gestão e operação dessas estruturas, pois determina a quantidade de sedimentos que um reservatório é capaz de aprisionar ao longo do tempo. Essa eficiência é calculada por meio de medições sistemáticas das descargas sólidas que entram e saem do reservatório, o que permite quantificar o grau de assoreamento suportado (Amaral, 2018).

Em estudos prévios à construção de barragens, essas medições podem ser complementadas pelo uso de curvas empíricas, como as de Brune para grandes reservatórios e de Churchill para os menores (Carvalho, 2000). Essas variações na eficiência têm implicações diretas na distribuição dos sedimentos ao longo do reservatório, afetando tanto a operação quanto a vida útil da infraestrutura. Além disso, van Rijin (2013) aponta que a sedimentação em reservatórios é influenciada por fatores como o tipo de sedimento, o formato do reservatório, o tempo de retenção e os procedimentos operacionais, com diferentes tipos de deposição ocorrendo ao longo do perfil do reservatório.

O software SILTINGZ é um programa computacional desenvolvido para prever o assoreamento de reservatórios, baseado na eficiência de retenção de sedimentos. O software foi implementado em linguagem VBA e opera por meio de planilhas (Alamy Filho, 2021).

O método emprega técnicas de regionalização de vazões e curvas-chave de sedimentos, além de permitir a utilização de diferentes métodos empíricos para calcular a eficiência de retenção de sedimentos, como os métodos de Churchill, Brune e USDA-SCS (Alamy Filho, 2021).

2.4.1 *Método de Brune*

O método de Brune, desenvolvido na década de 1953, é uma abordagem empírica amplamente utilizada para estimar o assoreamento em médios e grandes reservatórios (Carvalho, 2000). A eficiência de retenção (E) é calculada com base no volume do reservatório (V_r) e volume afluente do reservatório (V_a), o qual a razão é denominada capacidade de afluência (C_a). A fórmula utilizada no cálculo é:

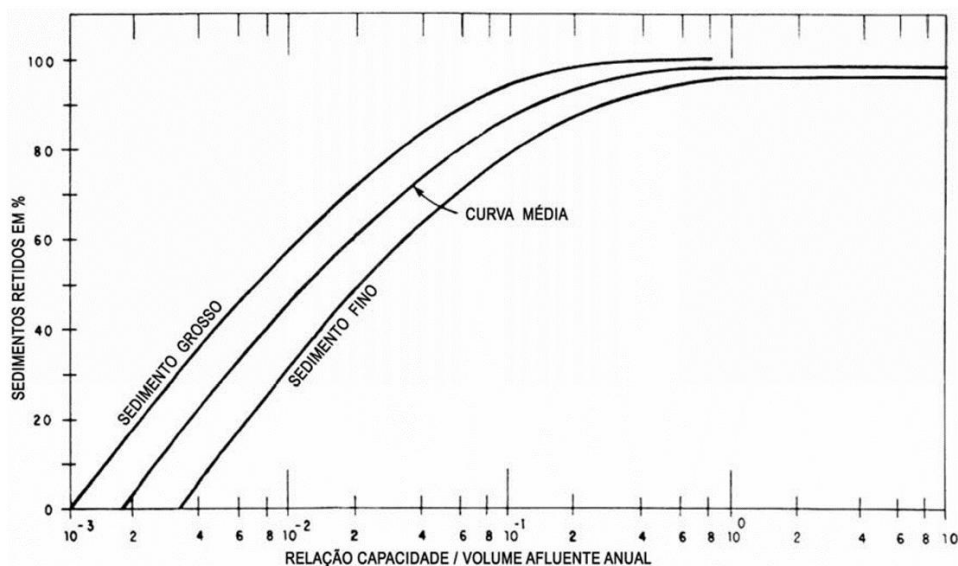
$$Ca = \frac{V_r}{V_a} \quad (1)$$

A Figura 1 apresenta as curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, conforme propostas por Brune. As Equações 2 e 3 representam a curva média dessa retenção, em função da razão capacidade/afluência anual (Ca).

$$E = \frac{0.000085 + Ca^{1,1}}{0.0085 + Ca^{1,1}}, \text{ se } Ca \geq 0.007 \quad (2)$$

$$E = \frac{23.5750907 * \ln(Ca) + 151.179568}{100}, \text{ se } 0 \leq Ca \leq 0.007 \quad (3)$$

Figura 1 - Curvas de eficiência de retenção de sedimentos propostas por Brune.



Fonte: Vanoni, 1977 apud Cabral, 2004.

2.4.2 Método de Churchill

Churchill desenvolveu uma curva de eficiência de retenção com base em dados de reservatório nos EUA, a qual se aplica para pequenos reservatórios (van Rijin, 2013). A curva de Churchill relaciona a porcentagem de sedimentos recebidos e o índice de sedimentação (IS) do reservatório, sendo que este parâmetro é a razão entre o volume do reservatório (V_r) e a vazão de entrada média diária (Q) e velocidade de fluxo média da seção transversal do reservatório (U). A velocidade é calculada como a razão entre o produto da vazão de entrada média diária (Q) e o comprimento do reservatório (L_r) pelo volume do reservatório (van Rijin, 2013). O cálculo do índice de sedimentação é apresentado na equação (4):

$$IS = \frac{V_r}{Q * U} = \frac{V_r}{Q * \frac{QL_r}{V_r}} = \frac{V_r^2}{Q^2 * L_r} \quad (4)$$

A equação (5) apresenta a curva de Churchill com imprecisão de 5% e IS em s²/ft:

$$E = \frac{-20 + 0.95 * IS^{0.63}}{7.500 + IS^{0.63}}, \text{ se } IS > 6.10^4 \quad (5)$$

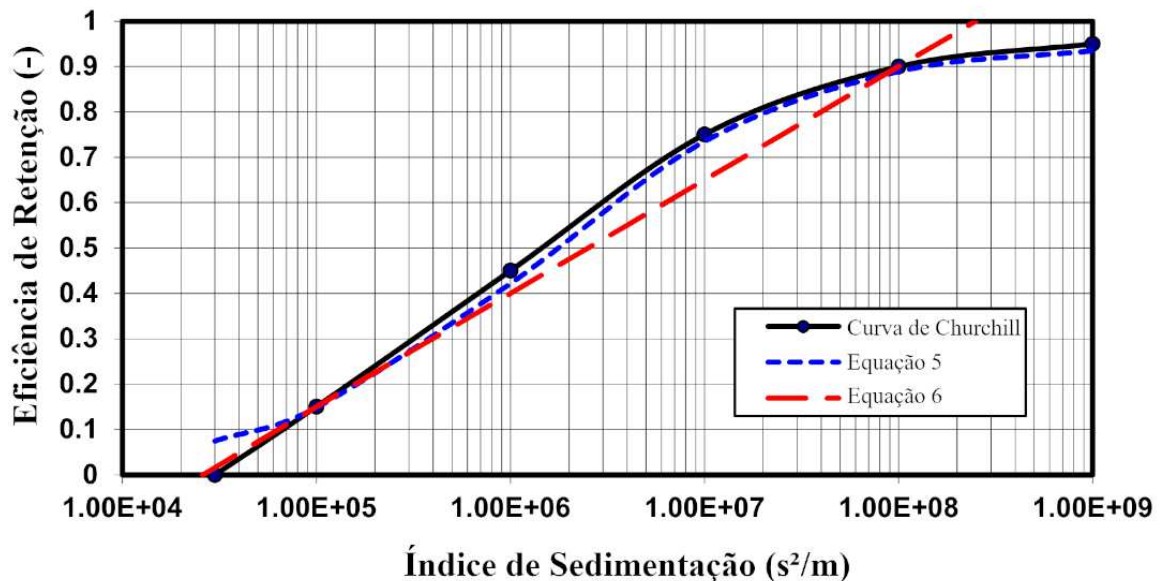
A equação (6) apresenta a curva de Churchill com imprecisão de 10% e IS em s²/m:

$$E = -1.1 + 0.25 * \log(IS) \quad (6)$$

sendo $E = 0$ para $IS \leq 6.10^4$ e $E = 1$ para $IS \geq 2.5 * 10^8$

A Figura 2 ilustra as curvas de Churchill:

Figura 2 - Curvas de eficiência de retenção de sedimentos propostas por Churchill



Fonte: Adaptado de Van Rijn, 2013.

2.4.3 Heineman

O método de Heineman, desenvolvido em 1981, surge como uma continuidade e aprimoramento dos estudos realizados por Brune em 1953 sobre a eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios. Heineman utilizou dados de 20 reservatórios nos Estados Unidos para desenvolver uma nova curva de eficiência, levando em consideração as limitações dos dados disponíveis na época de Brune e as inovações tecnológicas subsequentes (Amaral, 2018).

Essa nova abordagem proporcionou uma visão mais precisa sobre o acúmulo de sedimentos, revelando que, entre 1953 e 1981, houve uma redução de 4 a 10% no volume útil de alguns reservatórios devido ao armazenamento de sedimentos. Essa evolução metodológica demonstra a importância de atualizar modelos preexistentes à luz de novos dados e tecnologias, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

Por ser uma continuidade dos estudos de Brune, a eficiência é calculada com base na capacidade de afluência (Ca), sendo que as equações (7), (8), (9) e (10) apresentam o cálculo da eficiência de retenção de acordo com os valores de capacidade de afluência obtidos por meio da equação (1):

$$E = 0 \quad (7)$$

se $Ca < 0.03$

$$E = \frac{-22 + \frac{119.6 * Ca}{0.012 + 1.02 * Ca}}{100} \quad (8)$$

se $0.03 \leq Ca \leq 0.07$

$$E = \frac{-0.0165889465 * Ca^4 + 0.274317797 * Ca^3 - 1.83260819 * Ca^2 + 6.32355378 * Ca + 90.2793866}{100} \quad (9)$$

se $0.07 \leq Ca \leq 5$

$$E = 1, \text{ se } Ca \geq 5 \quad (10)$$

2.4.4 USDA SCS

O método USDA-SCS (1983) é utilizado para calcular eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, com base principalmente na capacidade de afluência (Ca), a qual é, conforme ilustrado anteriormente calculada com base no volume do reservatório e volume afluente do reservatório (Alamy Filho, 2021).

De acordo com Alamy Filho (2021), os padrões de retenção obtidos pelo método USDA-SCS, Brune e Churchill são semelhantes em longos períodos de simulação. Já o método de Heineman, desenvolvido para reservatórios menores, tende a apresentar menores taxas de assoreamento, devido à sua adaptação para corpos de água com áreas inundadas e volumes mais reduzidos.

As equações (11), (12) e (13) apresentam os cálculos de eficiência de retenção do método:

$$E = 0,97, se Ca \geq 1 \quad (11)$$

$$E = \frac{97 - 1.275 * (\ln Ca)^{2.47}}{100}, se \leq 0.02Ca < 1 \quad (12)$$

$$E = \frac{128 - 11.51 * (\ln Ca)^{1.304}}{100}, se Ca < 0.02 \quad (13)$$

2.5 REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES

A regionalização de vazões é um método utilizado para estimar a vazão em rios e córregos onde não há medições diretas, baseando-se em dados de estações fluviométricas e pluviométricas próximas. Utilizando o método descrito por Amaral (2018) e Costa (2015) o processo visa a determinação de uma série sintética de vazões (Q^*) que representa a vazão desejada para uma determinada área a partir da correlação entre estações pluviométricas e fluviométricas próximas.

Esse método consiste na identificação das bacias hidrográficas associadas às estações fluviométricas disponíveis próximas ao ponto de estudo desejado, seguida pela determinação do centro geométrico de cada bacia de contribuição. A partir desses centros geométricos, calcula-se a distância até as estações pluviométricas selecionadas, permitindo o ajuste dos dados de precipitação por meio da ponderação entre as medições fornecidas e a distância ao centroide. Na equação (14), P_c representa a precipitação mensal interpolada no centro geométrico da bacia. O termo corresponde à precipitação registrada na estação já indica a distância entre a estação e o centro geométrico da bacia.

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (14)$$

Na equação (15), a vazão específica (q^*) é uma medida padronizada utilizada para comparar vazões de diferentes bacias (q) pela sua área (A_b), independentemente de seu tamanho.

$$q^* = q/A_b \quad (15)$$

A correlação entre a precipitação P_c e a vazão específica q^* é avaliada pelo coeficiente de correlação de Linear (r). Na equação (16), são as médias das séries de precipitação e vazão

específica, respectivamente. Estações com coeficientes acima de 0,5 são selecionadas para compor a série sintética regionalizada.

$$r = \frac{\sum(P_c - \bar{P}_c)(q^* - \bar{q}^*)}{\sqrt{\sum(P_c - \bar{P}_c)^2} \cdot \sqrt{\sum(q^* - \bar{q}^*)^2}} \quad (16)$$

A geração da série sintética, conforme descrito na equação (17), envolve a aplicação da regressão linear que relaciona a precipitação registrada na estação pluviométrica mais próxima ao ponto analisado (P) com a média aritmética das vazões específicas das estações cujo coeficiente de correlação linear foi superior a 0,5. a e b são coeficientes ajustados por regressão linear a partir dos dados históricos das estações selecionadas.

$$Q^* = aP + b \quad (17)$$

A equação (18) demonstra que a vazão específica no ponto de interesse ($Q_{estimado}$) é obtida aplicando a equação de regressão (Q^*) à precipitação registrada na estação pluviométrica mais próxima, multiplicando o resultado pela área da bacia de contribuição do ponto (A).

$$Q_{estimado} = Q^* \cdot A \quad (18)$$

2.6 SOIL CONSERVATION SERVICE – SCS

O método do Soil Conservation Service (SCS), é amplamente utilizado no Brasil, especialmente em projetos de drenagem urbana e industrial, como os da indústria de mineração. A popularidade deste método no Brasil deve-se à sua simplicidade e eficiência na transformação de chuva em vazão, mesmo em bacias hidrográficas não monitoradas, típicas de áreas rurais.

O método SCS baseia-se na relação entre a chuva total (P_t) e a chuva efetiva (Q_e), considerando as perdas iniciais por interceptação, armazenamento e infiltração, conhecidas como abstração inicial (I_a). A equação básica que relaciona esses parâmetros é expressa pela Equação (19).

$$Q_e = \frac{(P_t - I_a)}{(P_t - I_a + S)} \quad (19)$$

Em que, Q_e representa o escoamento superficial em milímetros (mm), ou seja, a precipitação efetiva, enquanto P_t refere-se à precipitação total, também medida em milímetros (mm). I_a corresponde às perdas iniciais de água devido à interceptação, armazenamento e infiltração,

sendo frequentemente considerada como $I_a = 0,2 S$. O parâmetro S é o potencial máximo de armazenamento do solo, expresso em milímetros (mm), que pode ser calculado a partir do Curve Number (CN) utilizando a Equação (20).

$$S = \frac{254 \cdot (100 - CN)}{CN} \quad (20)$$

O valor CN é um valor adimensional que varia conforme o tipo de solo, uso do solo e condições de umidade antecedente. A Tabela 2 mostra os valores de CN em função do tipo, vegetação e ocupação do solo.

Tabela 2 - Valores de CN para tipos de ocupação de solo e de classes de drenagem

Ocupação do Solo	Tipo de Solo da Bacia			
	A	B	C	D
Solo cultivado:				
- Sem técnicas de conservação	72	81	88	91
- Com técnicas de conservação	62	71	78	81
Pastagem:				
- Condição precária	68	79	86	89
- Condição adequada	39	61	74	80
Área florestada:				
- Pouca cobertura	45	66	77	83
- Grande cobertura	25	55	70	77
Parques e jardins:				
- 75% de área gramada	39	61	74	80
- 50 a 75% de área gramada	49	69	79	84
Áreas comerciais (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Áreas industriais (72% de área impermeável)	81	88	91	93
Áreas residenciais:				
- 65% de área impermeável	77	85	90	92
- 38% de área impermeável	61	75	83	87
- 25% de área impermeável	54	70	80	85
- Áreas impermeáveis	98	98	98	98
Pavimento com pedrisco	76	85	89	91
Pavimento com drenagem	98	98	98	98

Fonte: Righetto, 1998.

A precipitação efetiva é a parte da chuva que contribui diretamente para o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica. Diferente da precipitação total, a precipitação efetiva exclui as perdas iniciais, como a interceptação pela vegetação, a infiltração no solo e o armazenamento temporário em depressões do terreno. Essas perdas, conhecidas como abstrações iniciais, são fundamentais para determinar o volume de água que efetivamente esco

sobre a superfície do solo, sendo um parâmetro crucial na modelagem hidrológica e no dimensionamento de estruturas de drenagem.

A determinação da precipitação efetiva é essencial para avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia, especialmente em estudos de controle de enchentes e no planejamento de sistemas de drenagem. Métodos como o Soil Conservation Service (SCS) utilizam a precipitação efetiva como um dos principais componentes para calcular o escoamento superficial, integrando-a com outros fatores como a capacidade de armazenamento do solo e as condições de umidade antecedente. Dessa forma, a precipitação efetiva fornece uma medida mais realista do potencial de geração de escoamento em resposta a eventos de chuva, possibilitando previsões mais acuradas e um planejamento mais eficaz das infraestruturas hídricas.

2.7 POLUIÇÃO DIFUSA

A poluição difusa é caracterizada pela dispersão de poluentes ao longo de extensas áreas, sem uma fonte pontual claramente identificável, sendo transportada para os corpos de água principalmente por meio do escoamento superficial, frequentemente associado a eventos de precipitação. Diferentemente da poluição pontual, que pode ser rastreada até uma única origem, a poluição difusa resulta de diversas atividades humanas, como o uso agrícola e urbano do solo, o que dificulta a identificação e quantificação de suas fontes específicas. Essa complexidade torna indispensável o uso de modelos hidrológicos e ferramentas de sensoriamento remoto para sua análise e controle (APRÍGIO, 2012; NOGUEIRA, 2020).

Em regiões urbanas, esse tipo de poluição é um desafio crescente, especialmente devido à impermeabilização do solo e à expansão desordenada, que intensificam o escoamento superficial e, conseqüentemente, o transporte de poluentes para os corpos de água. Nesse contexto, a dinâmica da poluição difusa ressalta a importância dos modelos de simulação para prever a geração de cargas poluentes e auxiliar na gestão ambiental urbana (APRÍGIO, 2012). Além disso, a avaliação dos impactos ambientais da poluição difusa exige a integração de diferentes fontes de dados e metodologias.

Nogueira (2020) explora a modelagem da poluição em bacias hidrográficas, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos, e destaca a necessidade de identificar as áreas mais vulneráveis e quantificar as cargas poluentes como passos essenciais para desenvolver estratégias de mitigação eficazes. Contudo, mesmo com o uso de ferramentas avançadas, as

incertezas persistem devido à variabilidade espacial e temporal inerente aos processos hidrológicos e às práticas de uso do solo, o que exige cautela na aplicação dos modelos e na interpretação de seus resultados.

2.7.1 Modelo de coeficiente de exportação

Reckhow et. al (1980) desenvolveu o modelo de coeficiente de exportação (ECM) inicialmente como uma forma de estimar a carga anual de nutrientes, como o fósforo e o nitrogênio, a partir de diferentes tipos de uso da terra em uma bacia hidrográfica. A simplicidade do ECM está em sua premissa básica de que cada tipo de uso do solo exporta uma quantidade média específica de nutrientes por unidade de área. Esse valor é chamado de coeficiente de exportação, expresso em termos de massa de poluente por hectare por ano (kg/km²/ano). A Equação (21) apresenta o cálculo do coeficiente de exportação.

$$L_p = \sum (E_i \cdot A_i) + P_n \quad (21)$$

Em que L_p representa a carga total de nutrientes (kg/ano), enquanto E_i corresponde ao coeficiente de exportação para o tipo de uso do solo i (kg/km²/ano), e A_i é a área associada ao tipo de uso do solo i (km²). Além disso, P_n é a carga de nutrientes decorrente da precipitação direta (kg/ano).

Ding et al (2010) esclarece que o método apresenta algumas limitações importantes que precisam ser consideradas. Entre os principais fatores que afetam a poluição de fontes difusas não pontuais (NPS), destacam-se a precipitação e o relevo. No entanto, o ECM não leva em consideração a distribuição temporal e espacial irregular da precipitação, utilizando o mesmo coeficiente de exportação para o mesmo nutriente em diferentes anos e regiões hidrológicas. Além disso, a poluição NPS depende significativamente do terreno e das condições do solo em uma bacia hidrográfica, especialmente em áreas com grande variação de relevo e tipos de solo. O ECM, contudo, não considera a heterogeneidade do solo subjacente, o que limita sua aplicabilidade em regiões com terrenos variados e complexos ou em estudos de larga escala. Essas limitações indicam que o modelo pode não ser adequado para aplicações em áreas extensas e com elevada diversidade de usos do solo e presença de ocupações específicas ou contrastantes.

O ECM baseia-se na associação entre os coeficientes médios de exportação de poluentes e as classes de uso e cobertura do solo, permitindo estimar a carga total de contaminantes

transportados para o corpo hídrico receptor (Ding et al., 2010). Esse modelo tem sido empregado em diferentes contextos hidrológicos, com ajustes específicos para representar as características locais de precipitação, infiltração e escoamento (Johnes, 1996)

Os coeficientes de exportação foram selecionados e ajustados com base nas tabelas de EC (Export Coeficiente) extraídas da literatura, conforme apresentado por Ding et al. (2010), Johnes (1996), Angello et al. (2020) e com base no manual da CH2M HILL (2001). Os valores foram adaptados considerando as características hidrológicas da bacia e as tipologias de uso do solo predominantes, garantindo maior representatividade na modelagem dos processos de transporte de poluentes. A implementação do ECM no programa foi realizada de forma a possibilitar a importação automática dos dados de área e cobertura do solo a partir de planilhas em formato .csv, otimizando a inserção das informações pelo usuário e reduzindo erros operacionais.

A metodologia adotada permite a avaliação do impacto das diferentes classes de uso do solo na exportação de poluentes, auxiliando na identificação das áreas mais susceptíveis à contribuição de cargas contaminantes para o reservatório. Além disso, a adaptação do ECM às condições locais, utilizando bases de dados previamente validadas, assegura a confiabilidade dos resultados obtidos e possibilita sua aplicação em estudos voltados à gestão da qualidade da água e mitigação da poluição hídrica em bacias hidrográficas (Hillsborough County, 2007).

A Tabela 3 apresenta esses valores já adaptados.

Tabela 3 - Coeficientes de exportação dos poluentes por usos do solo

Uso do Solo	Coeficientes de Exportação dos Poluentes (kg/km ² . ano)					
	Sólidos Suspensos Totais (TSS)	Nitrogênio Total (TN)	Fósforo Total (TP)	Cobre (Cu)	Chumbo (Pb)	Zinco (Zn)
Residencial Baixa/Média Densidade	3138.38	496.54	48.20	4.48	15.69	57.16
Residencial Alta Densidade	38568.42	792.44	220.81	6.73	17.93	62.77
Industrial Leve	78011.11	1113.00	534.65	4.48	26.90	97.51
Agrícola	223836.96	1754.13	105.36	4.48	15.69	62.77
Comercial	65737.81	1062.57	229.77	6.73	17.93	62.77
Rodovias/Infraestrutura	109944.10	700.53	280.21	6.73	17.93	62.77
Solo exposto/Vegetação rasteira	66259.00	627.68	56.04	1.12	2.24	7.85
Florestas	6433.67	311.60	14.57	1.12	2.24	7.85
Praças	2174.45	260.04	17.93	1.12	2.24	7.85

Fonte: Do autor, 2025. (Adaptado de CH2M HILL 2001)

2.7.2 Método Simples de Schueler

O método simples de estimativa de cargas de poluentes, desenvolvido por Schueler (1987), é uma abordagem prática utilizada para quantificar a poluição difusa em áreas urbanas. Esse método é útil em contextos em que os dados disponíveis são limitados, permitindo realizar avaliações preliminares do impacto da urbanização na qualidade da água. A simplicidade do método está no uso de variáveis facilmente acessíveis, como a área impermeável da bacia e a precipitação anual, para calcular a carga de poluentes. Dessa forma, ele fornece uma estimativa inicial que pode ser usada no planejamento e gestão de recursos hídricos, auxiliando na identificação de áreas críticas e na formulação de estratégias de mitigação.

O método simples de Schueler (1987) para estimativa de cargas de poluentes em áreas urbanas segue uma abordagem dividida em duas etapas. Na primeira, é calculado o volume de escoamento superficial ocorrido em um período específico, como o anual, utilizando a Equação (22).

$$V_e = (P_i \cdot P_j \cdot C_s) \cdot A \quad (22)$$

Em que, V_e representa o volume de escoamento superficial, P_i é a precipitação no intervalo de tempo considerado, P_j é a fração dos eventos de chuva que geram escoamento, C_s é o coeficiente de escoamento médio, e A é a área da bacia. Essa fórmula permite que se estime o volume de água que escorre sobre a superfície da bacia, levando em conta fatores como a precipitação e a impermeabilização do solo.

Na segunda etapa, utiliza-se o volume de escoamento superficial calculado para determinar a carga de poluentes. A carga de poluentes (L) é obtida multiplicando-se o volume de escoamento V_e pela concentração média do poluente de interesse C , conforme a Equação (23).

$$L = V_e \cdot C \quad (23)$$

Essa abordagem simplificada, oferece uma estimativa prática da quantidade de poluentes que são transportados pelas águas pluviais em áreas urbanas. A aplicação dessas fórmulas permite uma rápida avaliação dos impactos da urbanização sobre a qualidade da água, sendo útil para gestores na tomada de decisões relacionadas à gestão de águas pluviais.

Esse procedimento tem sido utilizado e testado em diferentes cenários de urbanização, como mostrado por Meneses Filho e Tucci (2003), que aplicaram essa metodologia para avaliar a

produção de cargas poluentes em áreas urbanas. A Tabela 4 mostra os valores típicos de concentração de poluentes que ocorrem em escoamento superficial.

Tabela 4 - Valores típicos de concentração de poluentes em escoamento superficial.

Uso do Solo	Média de Concentração dos Poluentes					
	Sólidos Suspensos (mg/L)	Chumbo Total (µg/L)	Cobre Total (µg/L)	Zinco Total (µg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)
Comercial	56,3	14,5	14,5	180,0	0,3	1,4
Agrícola	75,0	0,9	1,5	16,0	1,3	4,1
Residencial AD	52,0	9,0	15,0	80,0	0,8	2,0
Residencial BD	52,0	9,0	15,0	80,0	0,8	2,0
Pastagem/grama	1,4	5,0	10,0	6,0	0,1	0,9
Floresta	0,8	2,2	10,0	6,0	0,0	0,5
Industrial	60,5	15,0	15,0	245,0	0,3	1,3
Coef. de Variação	1,0 - 2,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0

Fonte: Do autor, 2025 (Adaptado de Liu et al, 2014; Urbonas e Stahre, 1993)

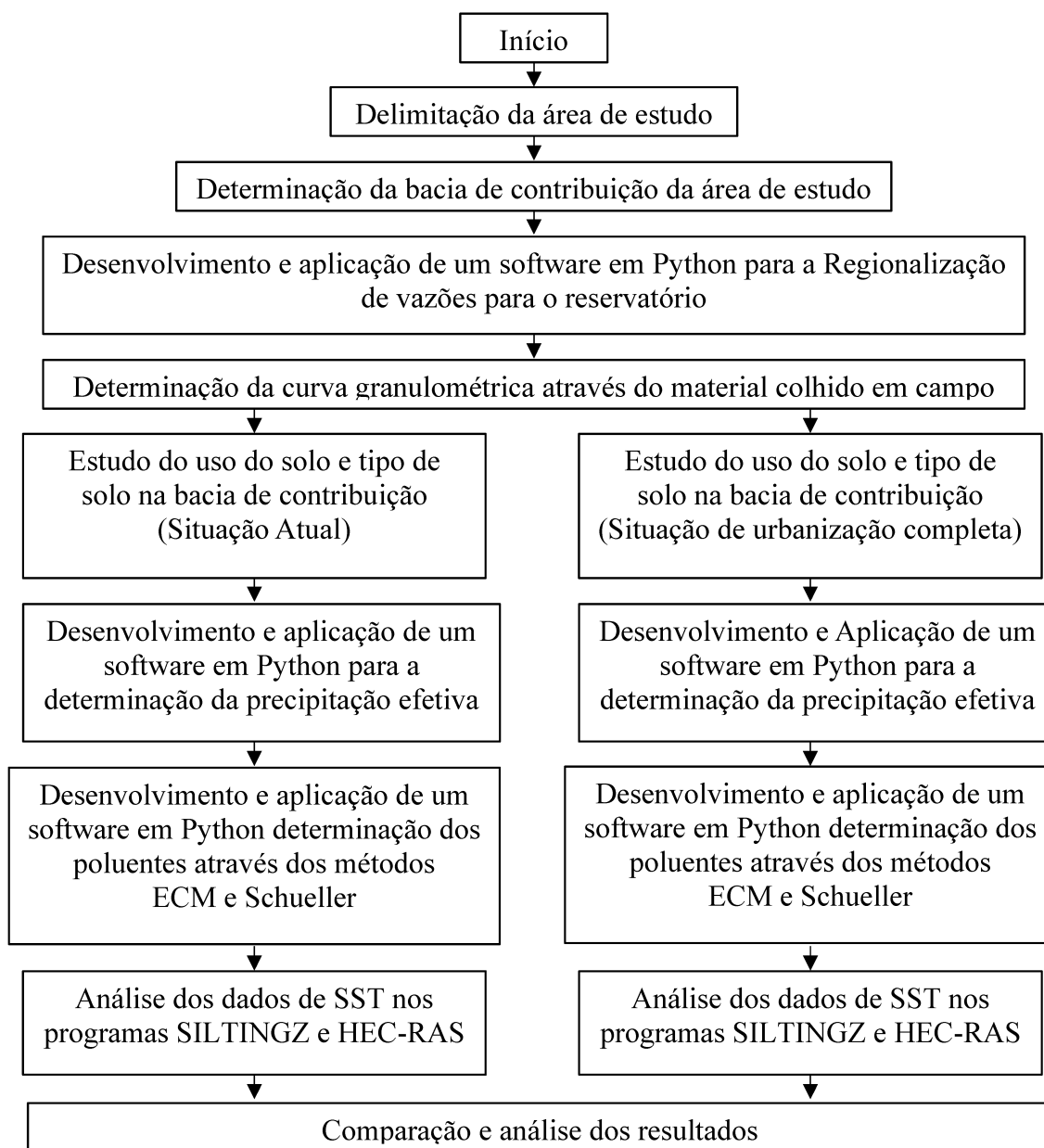
Os coeficientes de concentração de poluição apresentados no trabalho de Liu et al. (2014) fornecem maior especificidade na classificação das áreas consideradas, em comparação com os coeficientes tradicionalmente adotados. A abordagem utilizada por Liu et al. (2014) permite uma representação detalhada dos impactos hidrológicos e da qualidade da água em diferentes tipos de uso e ocupação do solo, fornecendo subsídios técnicos adequados para a modelagem dos efeitos das práticas de manejo de águas pluviais.

Já os valores do coeficiente de variação foram extraídos da obra de Urbonas e Stahre (1993), que variam de acordo com o poluente considerado. Esses coeficientes representam a variabilidade dos eventos de escoamento urbano e são utilizados para descrever a flutuação das concentrações de poluentes em diferentes condições hidrológicas.

3 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho aborda procedimentos como a delimitação de bacias hidrográficas, técnicas de regionalização de vazões, transformação chuva-vazão, estimativa de descargas de massa de poluentes e de sedimentos, análise granulométrica. Vale ressaltar que o trabalho tem uma grande parcela de programação, que reúne as etapas de cálculo em algoritmos específicos. Assim, para se ter uma noção geral da pesquisa, o fluxograma ilustrado pela Figura 3 apresenta as etapas do trabalho.

Figura 3 - Fluxograma com as etapas do trabalho

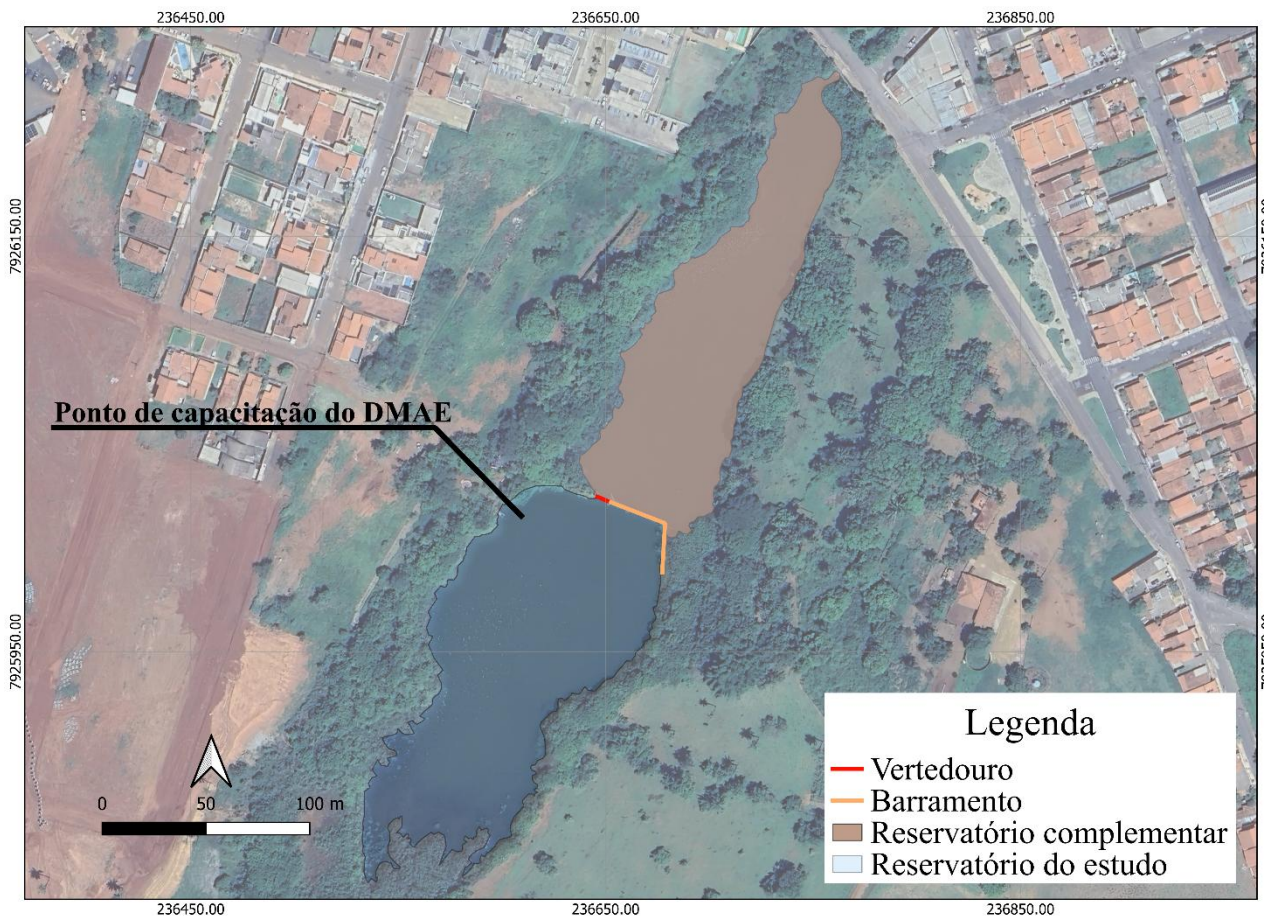


Fonte: Do autor, 2025

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho, como mostra a Figura 4, é o reservatório localizado na cidade de Monte Carmelo no estado de Minas Gerais nas imediações do limite entre os bairros Montreal e Batuque Novo. Conforme levantado por Cunha (2019), a represa está situada próxima às coordenadas geográficas $-18^{\circ}44'31,6''$ de latitude sul e $-47^{\circ}29'55,4''$ de longitude oeste, e é gerenciada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) e abrange uma área de aproximadamente $23.025,9 \text{ m}^2$. A represa é utilizada para abastecimento público, suprindo aproximadamente 38% da demanda urbana.

Figura 4 - Mapa de localização do reservatório do estudo.



Fonte: Do autor, 2025.

De acordo com Plano Municipal de Saneamento Básico - Monte Carmelo (DMAE, 2013), a represa encontra-se assoreada e desempenha uma função dupla: além de ser utilizada para a captação de água, atua também como reservatório para contenção de cheias. Conforme ilustrado na Figura 4, o reservatório está dividido em duas zonas distintas, separadas pela barragem e pelo vertedouro. A montante da barragem, como mostra a Figura 4, localiza-se a represa

destinada ao abastecimento público. A jusante, há uma área represada, controlada por dois bueiros de 1,5 metros de diâmetro, situados na Rua Matusalém Freitas Cardoso, que contribuem para a regulação do fluxo hídrico, funcionando como uma bacia de amortecimento de cheias.

Ainda de acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico - Monte Carmelo (DMAE, 2013), a captação Mumbuca é responsável por 38% da vazão total de água destinada ao abastecimento de Monte Carmelo. Essa porcentagem representa uma vazão média de 60 L/s, posicionando o Mumbuca como a segunda maior fonte de abastecimento da cidade, logo após os 26 poços profundos, que contribuem com 45% da vazão total, ou 72 L/s. Em conjunto, essas duas fontes respondem por 83% da água fornecida à população, evidenciando a importância crítica do Mumbuca no sistema de abastecimento municipal. As outras duas fontes são a captação Santa Barbara e captação Lambari, que correspondem a 14% e 3% da vazão total, respectivamente, complementando o fornecimento de água para atender a demanda da cidade.

3.1.1 Área de contribuição

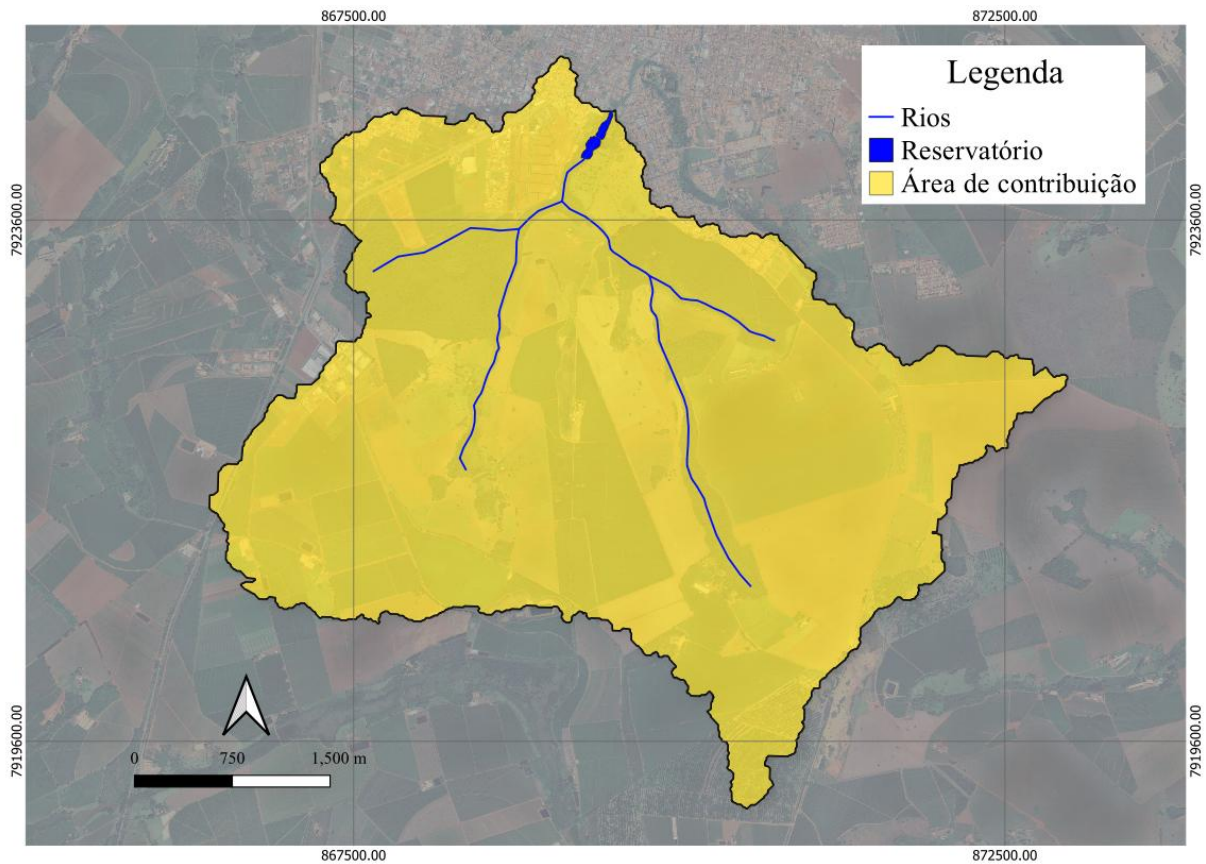
Para a delimitação das áreas contribuintes para o reservatório, foi realizada uma análise da topografia local com base em dados de elevação provenientes do modelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibilizado pelo USGS (United States Geological Survey). Esse modelo digital de terreno (MDT) foi complementado por imagens de satélite obtidas através do Bing Maps via Web Map Service (WMS).

O processamento dos dados foi realizado no software InfraWorks da Autodesk, que permitiu a delimitação da bacia hidrográfica a partir da definição de um ponto de saída. Esse ponto foi selecionado com base na localização do exutório do reservatório, garantindo que a área de drenagem fosse coerente com as características hidrológicas da região. O software aplica um modelo computacional que segmenta a superfície em uma malha ajustável, permitindo configurar a resolução da análise e definir um limite de fluxo mínimo para a consideração de cursos de água.

Com os parâmetros estabelecidos, o InfraWorks processou os dados altimétricos e delimitou os contornos da bacia hidrográfica, definindo a área de contribuição e sua integração com a rede de drenagem natural. A precisão está associada à definição do ponto de saída e à configuração dos parâmetros de análise, como o espaçamento da malha computacional e o limite do fluxo, que influenciam a representação da bacia em conformidade com as condições reais do terreno.

O software permitiu analisar o relevo e delimitar as bacias de contribuição, conforme mostrado na Figura 5, que ilustra a área total de contribuição de 18,2 km².

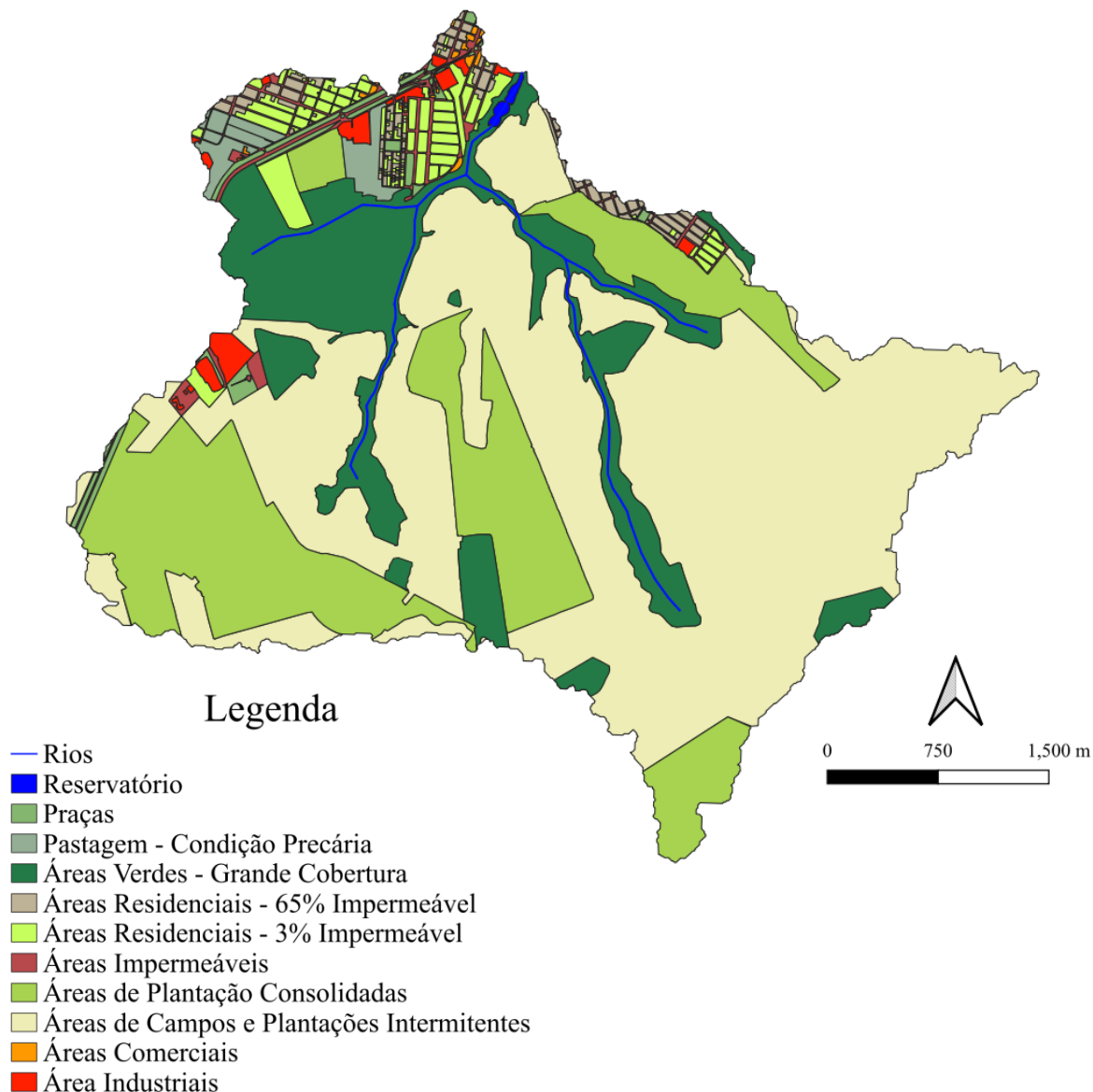
Figura 5 - Área de contribuição do reservatório do córrego Mumbuca.



Fonte: Do autor, 2025

O mapa na Figura 6 detalha a divisão da área de contribuição do reservatório em categorias de uso do solo, seguindo as classificações utilizadas para o cálculo dos valores de Curve Number (CN) no método SCS. Essas categorias incluem áreas residenciais com 3% e 65% de impermeabilização, áreas industriais, comerciais, impermeáveis, além de áreas verdes, pastagens, praças e áreas de plantação. Essa divisão é necessária para a aplicação do método SCS na estimativa de escoamento superficial e na avaliação do impacto dos diferentes usos do solo na bacia, viabilizando o processo de transformação chuva-vazão e a estimativa de cargas poluidoras de origem difusa.

Figura 6 - Usos do solo atual na área de contribuição do reservatório.



Fonte: Do autor, 2025.

Para a construção do mapa apresentado na Figura 6, foi utilizado o programa de georreferenciamento QGIS, para a delimitação do uso do solo, com base em imagens de satélite de alta resolução obtidas através do Bing Maps via Web Map Service (WMS). Esse processo permitiu uma representação detalhada das diferentes classes de ocupação na área de estudo, assim como da distribuição dos usos do solo. A Tabela 5 resume as áreas e porcentagens correspondentes a cada tipo de uso, sendo essa informação essencial para a aplicação dos métodos de cálculo de escoamento principalmente no que se refere à transformação chuva-vazão e à estimativa de cargas poluidoras de origem difusa.

Além da análise do uso do solo, os tipos de solo presentes na bacia de contribuição também devem ser considerados, pois influenciam diretamente na infiltração e na geração de escoamento superficial. A classificação do SCS foi realizada com base nesses tipos de solo, conforme pode ser observado na Figura 7, garantindo maior precisão na caracterização das condições hidrológicas da região. Para essa classificação, foi utilizado o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, produzido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 2018. O mapeamento apresentado na Figura 7 identifica a presença de quartzito, filito, argilito arenoso e cascalho, destacando a diversidade de formações na área de estudo. A Tabela 6 apresenta a distribuição dos tipos de solo na área de contribuição do reservatório.

Tabela 5 - Distribuição dos usos do solo atual na área de contribuição do reservatório.

Usos do Solo	Área	Porcentagem
Reservatório	0.02 km ²	0.1%
Pastagem - Condição Precária	1.24 km ²	6.8%
Praças	0.20 km ²	1.1%
Áreas Residenciais - 3% Impermeável	0.54 km ²	3.0%
Áreas Residenciais - 65% Impermeável	0.24 km ²	1.3%
Área Industriais	0.18 km ²	1.0%
Áreas Verdes - Grande Cobertura	2.87 km ²	15.8%
Áreas de Campos e Plantações Intermitentes	9.53 km ²	52.4%
Áreas de Plantação Consolidadas	2.96 km ²	16.3%
Áreas Comerciais	0.03 km ²	0.2%
Áreas Impermeáveis	0.38 km ²	2.1%
Total	18.2 km ²	100.0%

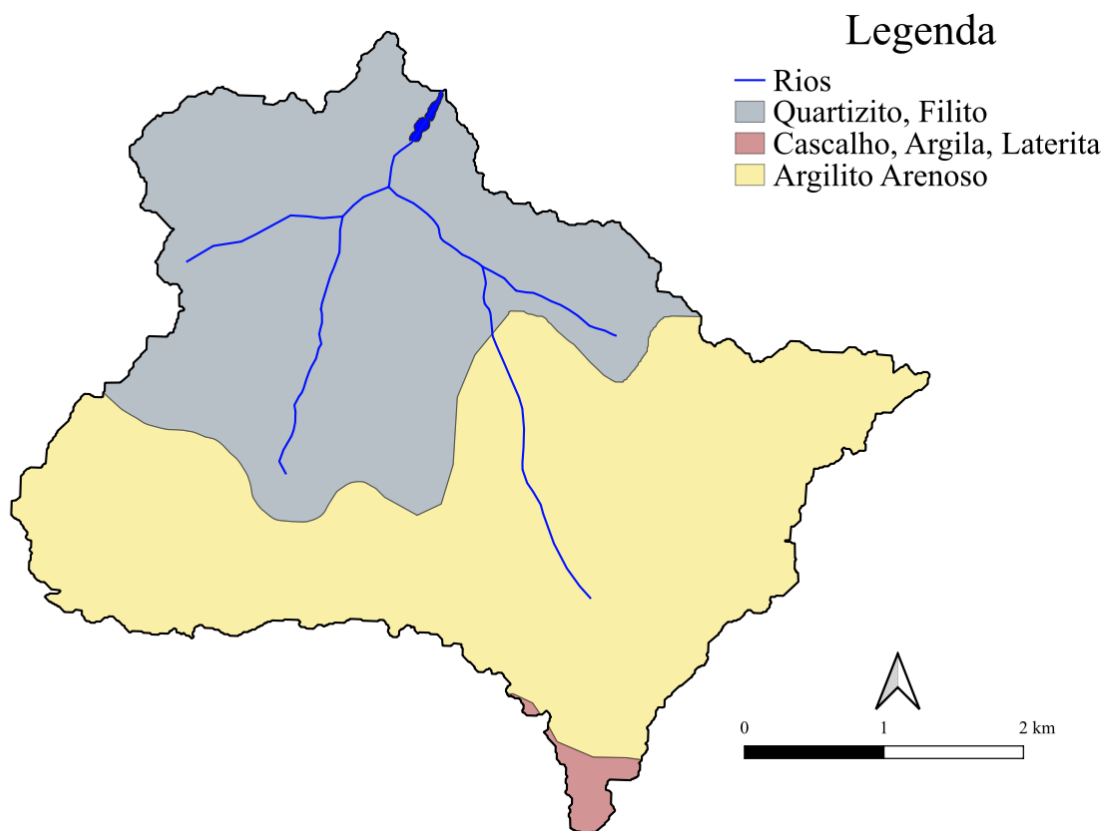
Fonte: Do Autor, 2025.

Tabela 6 - Distribuição dos tipos do solo na área de contribuição do reservatório.

Tipos de Solo	Área	Porcentagem
Cascalho, Argila, Laterita	0,42 Km ²	2,3%
Quartzito, Filito	7,69 Km ²	42,3%
Argilito arenoso	10,09 Km ²	55,4%
Total	18,20 Km ²	100,0%

Fonte: Do autor, 2025.

Figura 7 - Mapa pedológico da área de contribuição do reservatório.



Fonte: Adaptado de CPMR (2018), pelo autor (2025).

3.1.2 *Área de contribuição de uma situação futura*

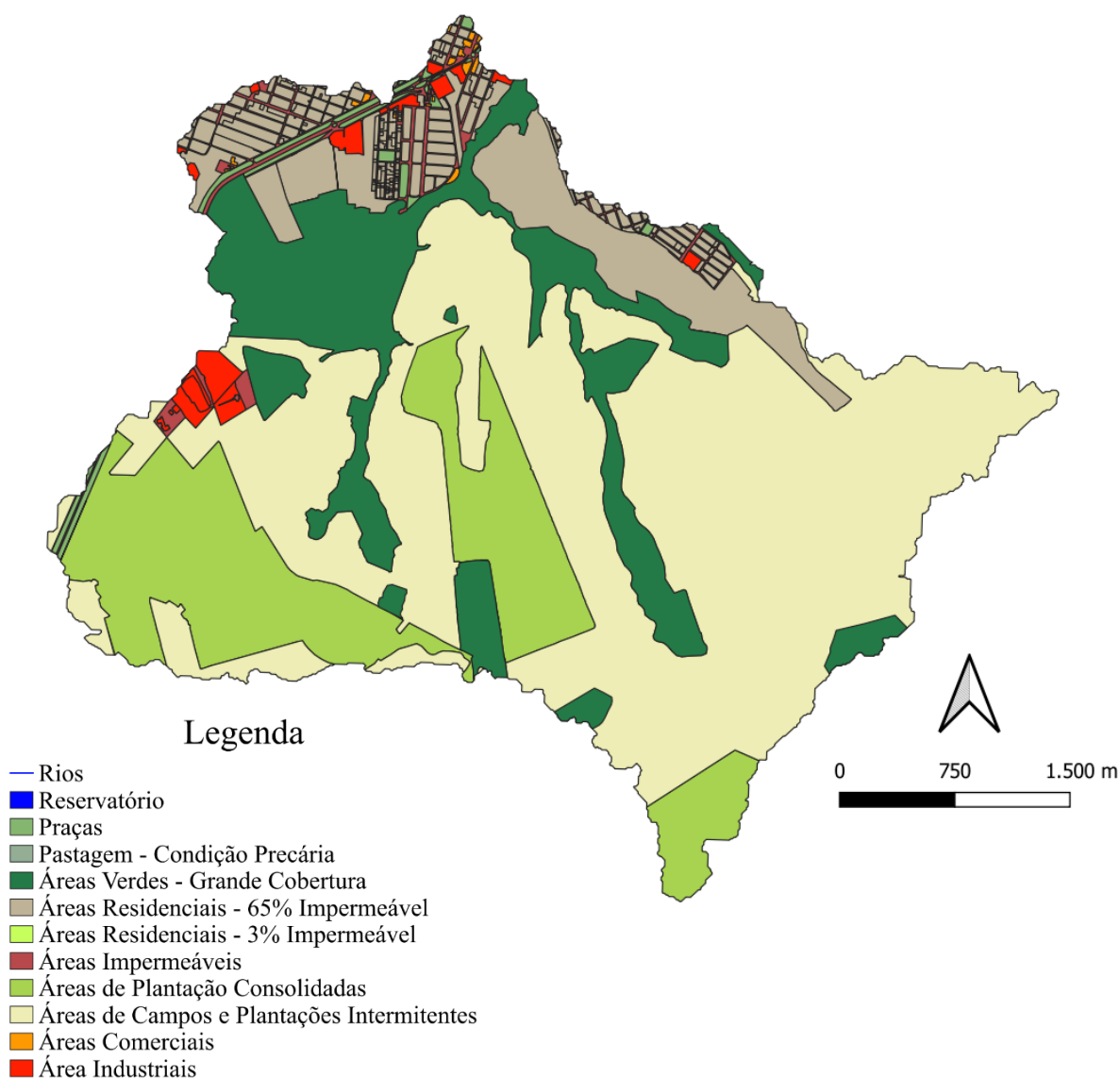
Além da análise do cenário atual, também será considerada uma situação futura crítica, concebida com o objetivo de avaliar potenciais impactos decorrentes da intensificação do uso e ocupação do solo. Nesse cenário prospectivo, todas as áreas classificadas como residenciais de baixa densidade, bem como as pastagens em condição precária localizadas nas adjacências da mancha urbana, foram reclassificadas como zonas residenciais de alta densidade como mostra a Figura 8. Tal abordagem visa representar uma configuração de máxima urbanização, permitindo estimar as implicações dessa transformação sobre a geração de escoamento superficial, a carga poluidora difusa e, conseqüentemente, sobre a qualidade da água e a dinâmica de assoreamento no reservatório em estudo. A Tabela 7 apresenta a distribuição dos tipos de solo na área de contribuição do reservatório.

Tabela 7 - Distribuição dos usos do solo futura na área de contribuição do reservatório

Uso do Solo	Área	Porcentagem
Praças	0.16 km ²	0.9%
Área Industriais	0.24 km ²	1.3%
Áreas Comerciais	0.03 km ²	0.2%
Áreas Impermeáveis	0.38 km ²	2.1%
Áreas Residenciais - 65% Impermeável	2.01 km ²	11.1%
Áreas Verdes - Grande Cobertura	2.88 km ²	15.8%
Áreas de Campos e Plantações Intermitentes	9.23 km ²	50.8%
Áreas de Plantação Consolidadas	3.25 km ²	17.9%
Total	18.2 km ²	100.0%

Fonte: Do autor, 2025.

Figura 8 - Usos do solo futuro na área de contribuição do reservatório



Fonte: Do autor, 2025.

3.2 REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES PARA O CÓRREGO MUMBUCA

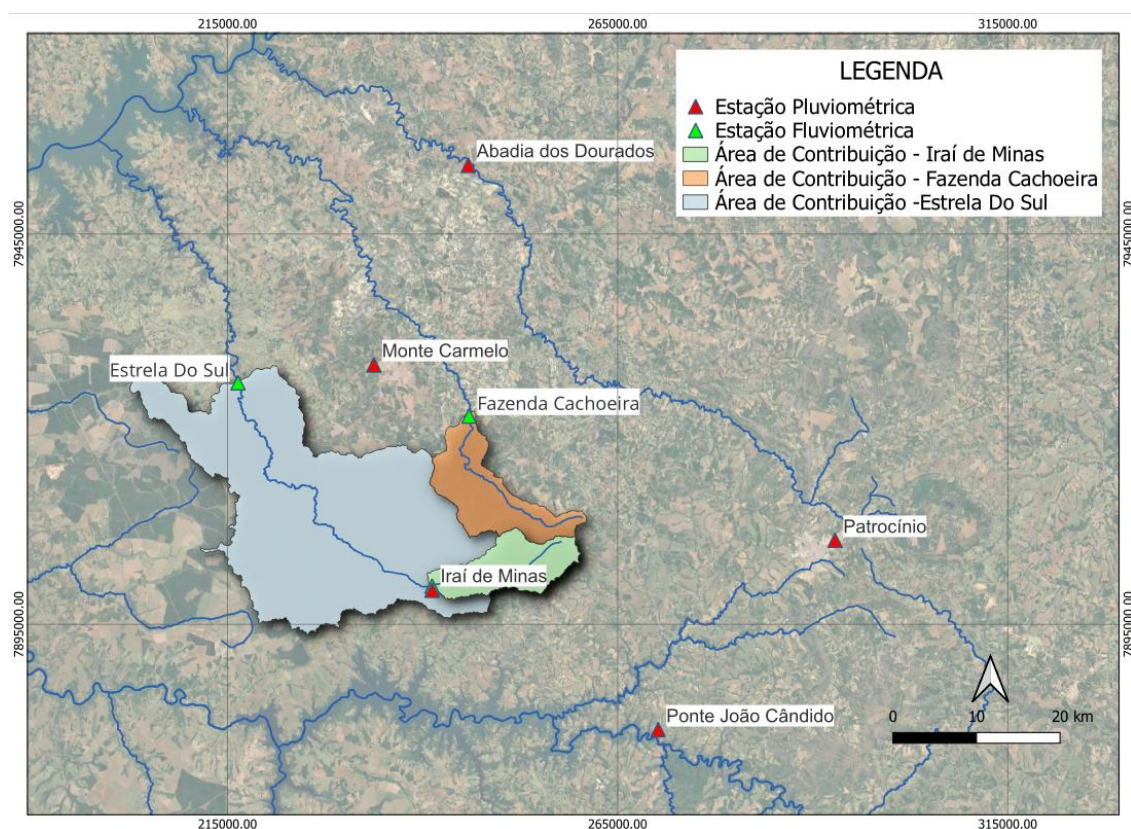
Para o cálculo da vazão média de entrada no reservatório do córrego Mumbuca, foi realizada uma regionalização da vazão com base em três estações fluviométricas próximas à cidade de Monte Carmelo e cinco estações pluviométricas nas suas imediações. Isso foi necessário porque o córrego Mumbuca não dispõe de estação fluviométrica, assim não há registros sistemáticos de vazões para esse corpo de água.

Nesse estudo de regionalização, pressupõe-se que a área da bacia contribuinte e a precipitação mensal incidente são os principais determinantes para os valores de vazão média mensal. Por isso essas variáveis foram escolhidas como base para construção de uma equação que permitisse estimar as vazões médias mensais que alimentam o reservatório do córrego Mumbuca.

Os dados pluviométricos foram obtidos das estações de Iraí de Minas, Ponte João Cândido, Patrocínio, Abadia dos Dourados e Monte Carmelo, sendo esta última a mais próxima da área de estudo, conforme ilustrado na Figura 9. Já os dados fluviométricos foram extraídos das estações Estrela do Sul, Fazenda Cachoeira e Iraí de Minas, também representadas na Figura 9. As séries históricas de precipitação e vazão foram coletadas no portal HidroWeb, vinculado ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), no formato .CSV.

A delimitação das bacias de contribuição de cada estação fluviométrica foi realizada com base na análise da topografia local, utilizando microbacias e curvas de nível com resolução de 30 m, obtidas no banco de dados do Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais (IDE Sisema). O processo contou com o apoio do software QGIS, que viabilizou, além da inserção dos dados geoespaciais, a utilização de imagens de satélite do Google Maps para aprimorar a identificação dos divisores de drenagem. As áreas de contribuição delimitadas estão representadas na Figura 9. Essas áreas foram organizadas em camadas de polígonos, possibilitando inserir um atributo de área, o qual permitiu a quantificação da extensão de cada bacia. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Figura 9 - Estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas para regionalização de vazões médias mensais.



Fonte: Do Autor, 2025.

Tabela 8 - Áreas das bacias de contribuição das estações fluviométricas

Nome das Estações Fluviométricas	Área da Bacia de Contribuição
Iraí De Minas (rio Bagagem)	98,17 km ²
Estrela Do Sul (rio Bagagem)	864,60 km ²
Fazenda Cachoeira (rio Perdizes)	130,26 km ²

Fonte: Do autor, 2025.

Com as bacias de contribuição delimitadas, utilizou-se a ferramenta de vetor de geometria “centroide” para a determinação do centroide de cada bacia. Esses pontos de referência serão empregados no processo de regionalização, por permitirem a ponderação dos dados pluviométricos. As coordenadas dos centroides estão apresentadas na Tabela 9, expressas no sistema de projeção UTM, fuso 23 Sul, com datum SIRGAS 2000.

Tabela 9 - Coordenadas dos centroides das bacias de contribuição

Coordenadas	Centroides das bacias de contribuição		
	Fazenda Cachoeira	Iraí de Minas	Estrela do Sul
x	248735,37	250989,84	229415,17
y	7911968,69	7902317,88	7909028,17

Fonte: Do autor, 2025.

A localização das estações pluviométricas e fluviométricas também foi obtida junto ao banco de dados do IDE Sisema. Após a inserção desses dados no QGIS, foi possível extrair as coordenadas geográficas tanto das estações quanto dos centroides das bacias de contribuição. Os valores dessas coordenadas encontram-se apresentados nas Tabela 10, expressas no sistema de projeção UTM, fuso 23 sul, com datum SIRGAS 2000.

Tabela 10 - Coordenadas das estações pluviométricas

Estações pluviométricas					
Coordenadas	Patrocínio	Monte Carmelo	Abadia dos Dourados	Iraí de Minas	Ponte João Cândido
x	270216,43	233793,26	245907,78	241257,53	270216,43
y	7881506,71	7928208,90	7953785,43	7899364,67	7881506,71

Fonte: Do autor, 2025.

Para a estimativa da vazão média mensal regionalizada, foi desenvolvido um software em Python, estruturado para processar dados pluviométricos e fluviométricos e aplicar os métodos de regionalização. Para facilitar a interação com o usuário, foi criada uma interface gráfica utilizando a biblioteca Tkinter, ferramenta nativa do Python destinada ao desenvolvimento de interfaces gráficas (GUIs), permitindo a inserção e o tratamento dos dados de forma mais intuitiva. O programa foi organizado em quatro abas principais, cada uma responsável por uma etapa do processo de regionalização.

A primeira aba do programa, conforme ilustrado na Figura 10, é destinada à seleção dos dados pluviométricos pelo usuário.

Figura 10 - Janela inicial do programa: Dados pluviométricos



Fonte: Do autor, 2025.

Inicialmente, o usuário realiza a inserção dos dados por meio da opção “Importar dados CSV”, que permite o carregamento de arquivos no formato .CSV contendo os registros das estações

pluviométricas. É possível selecionar, de forma interativa, múltiplos arquivos diretamente do diretório local, sendo exibida uma janela de aviso informando a quantidade de arquivos importados com sucesso. Durante esse processo, utilizando a biblioteca Pandas do Python para manipulação e organização das informações, o programa também executa um pré-tratamento dos dados. Os arquivos provenientes do banco de dados contêm diversas informações que não são necessárias para a análise, como cabeçalhos, legendas e outros dados. Além disso, a coluna “Total mensal”, presente nos arquivos, pode apresentar inconsistências ou não apresentar a totalidade dos dados. Diante disso, o programa realiza a soma dos valores diários de precipitação e gera uma nova coluna intitulada “Total mensal”, associada à respectiva data. Os dados resultantes desse pré-tratamento são disponibilizados ao usuário por meio da criação do arquivo “Dados_Pluviométricos.csv”.

O programa adota o número da estação, em vez do nome, para identificar tanto as estações pluviométricas quanto as fluviométricas, tanto nas janelas do sistema quanto nos dados exportados. Essas informações estão contidas nos arquivos .CSV importados do portal. A Tabela 11 apresenta os nomes das estações correspondentes aos identificadores numéricos utilizados neste trabalho.

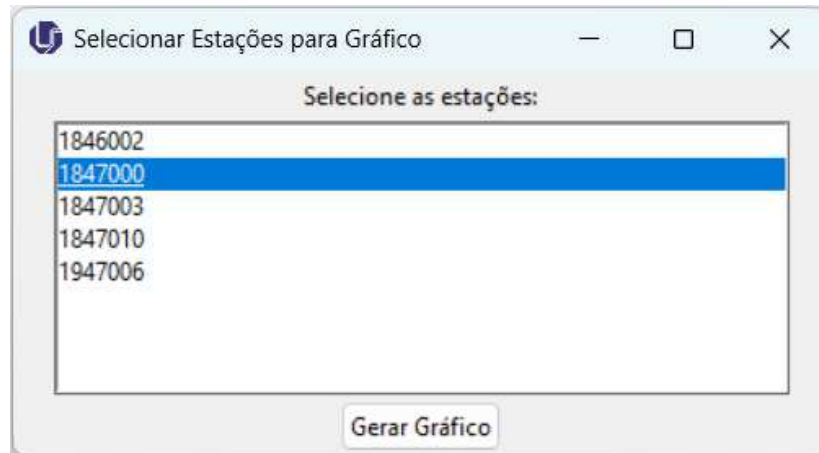
Tabela 11 - Relação entre nome e código das estações

Tipo	Pluviométricas					Fluviométricas		
Estação	Patrocínio	Monte Carmelo	Abadia dos Dourados	Iraí de Minas	Ponte João Cândido	Fazenda Cachoeira	Iraí de Minas	Estrela do Sul
Código	1846002	1847000	1847003	1847010	1947006	60130000	60145000	60150000

Fonte: Do autor, 2025.

Após essa etapa, o usuário pode acionar a função “Gerar Gráfico”, que abrirá uma nova janela contendo a lista das estações importadas, identificadas pelos respectivos códigos, como mostra a Figura 11. A partir dessa interface, o usuário pode selecionar uma ou mais estações para visualizar os dados graficamente, no formato “Data x Chuvas mensais”, permitindo uma análise visual preliminar dos dados não tratados.

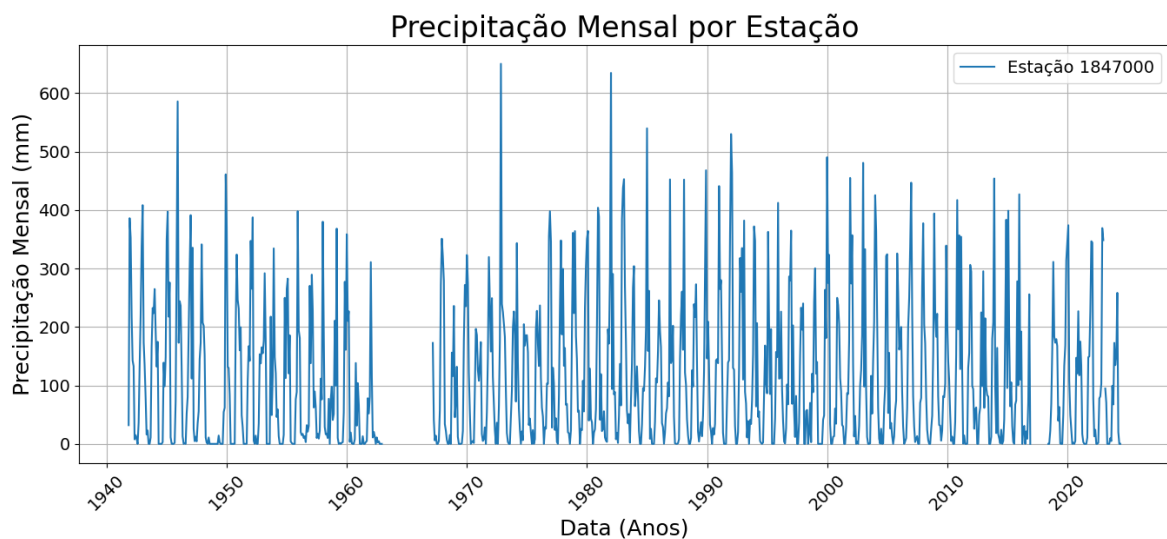
Figura 11 - Janela para a seleção das estações pluviométricas



Fonte: Do autor, 2025.

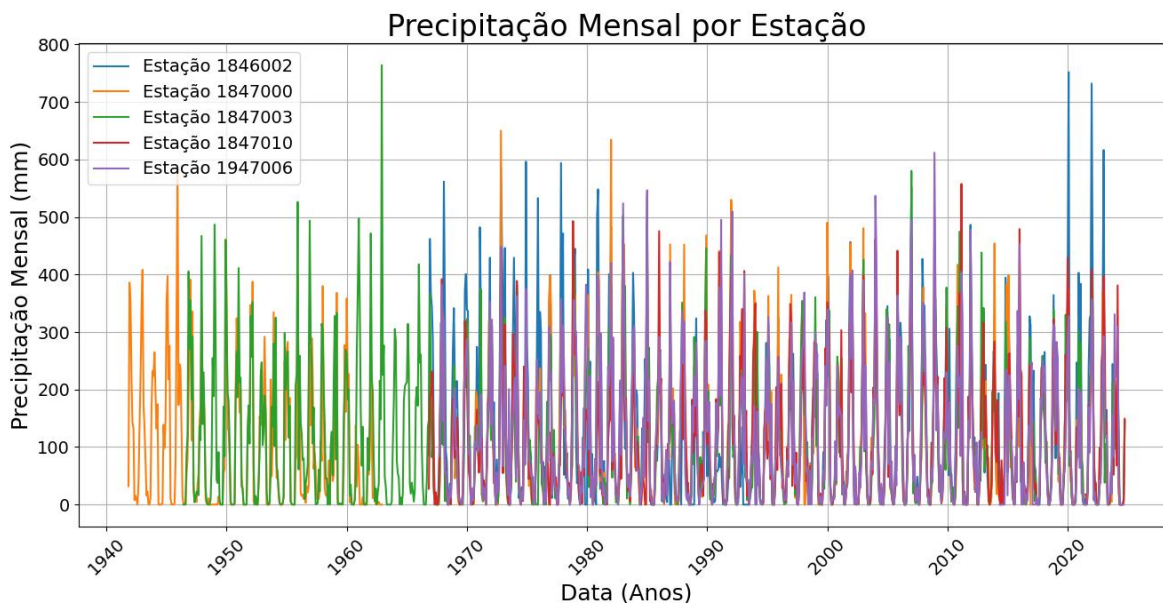
Os gráficos podem ser visualizados de forma individual, como exemplificado na Figura 12, que apresenta os dados da estação de Monte Carmelo, ou com múltiplas estações sobrepostas em um mesmo gráfico, conforme ilustrado na Figura 13 com todas as estações inseridas no programa. No caso estudado, a análise dos gráficos gerados evidenciou a presença de diversos dados ausentes anteriores à data de 01/01/1970 em várias estações. Essa análise preliminar é fundamental para a etapa de filtragem, permitindo ao usuário informar ao programa a data de início mais adequada para a aplicação do tratamento refinado dos dados.

Figura 12 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de Monte Carmelo



Fonte: Do autor, 2025.

Figura 13 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de todas as estações inseridas no programa.



Fonte: Do autor, 2025.

Em seguida, o usuário pode acionar a função “Filtrar dados”, a qual abre uma janela para inserção da data de início desejada para a análise. A partir dessa definição, os dados anteriores à data informada são descartados, e os dados remanescentes são submetidos a um tratamento por meio do método de ponderação regional. Esse método constitui uma abordagem simplificada voltada à homogeneização do período de informações e à viabilização da análise estatística das precipitações. Para as estações que apresentarem falhas nos registros, os valores ausentes podem ser estimados com base na Equação (14).

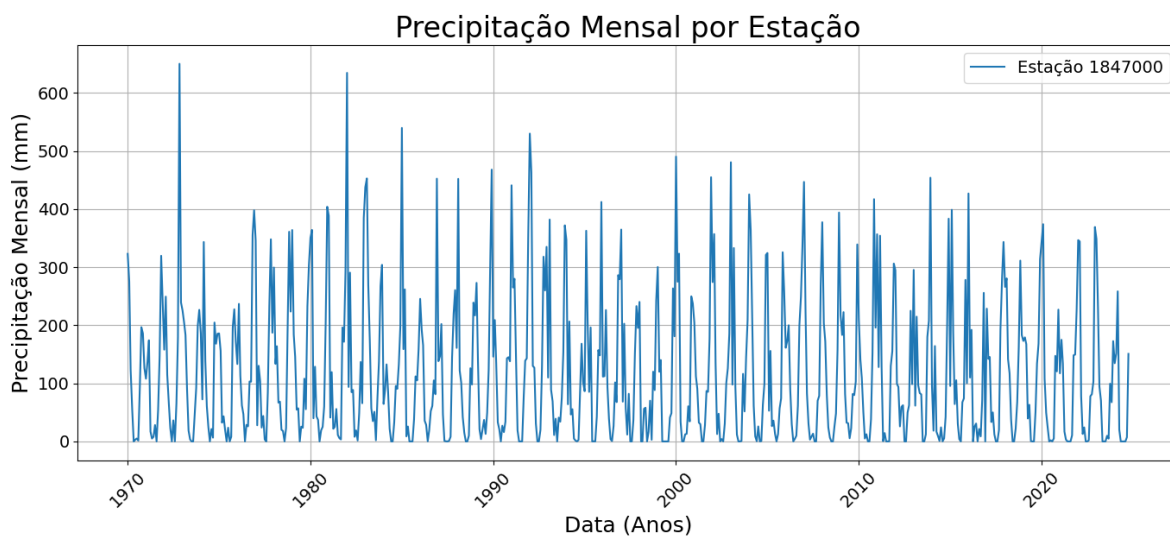
$$y = \frac{1}{3} \left(\frac{x_1}{xm_1} + \frac{x_2}{xm_2} + \frac{x_3}{xm_3} + \frac{x_n}{xm_n} \right) . ym \quad (14)$$

Em que y é a precipitação estimada para a estação com dados faltantes, x_n representa as precipitações registradas nas demais estações na mesma data, xmn é a média das precipitações nas estações vizinhas e ym corresponde à média de precipitação da estação em análise. No presente estudo, foi adotada a data de 01/01/1970 como ponto de partida, permitindo a aplicação do método para o preenchimento dos dados ausentes a partir desse momento.

O usuário pode, então, acionar a função “Gerar Gráfico Tratados”, a qual abre uma janela contendo a lista das estações importadas, identificadas por seus respectivos códigos. Essa funcionalidade é semelhante à da opção “Gerar Gráfico”, porém utiliza os dados já submetidos

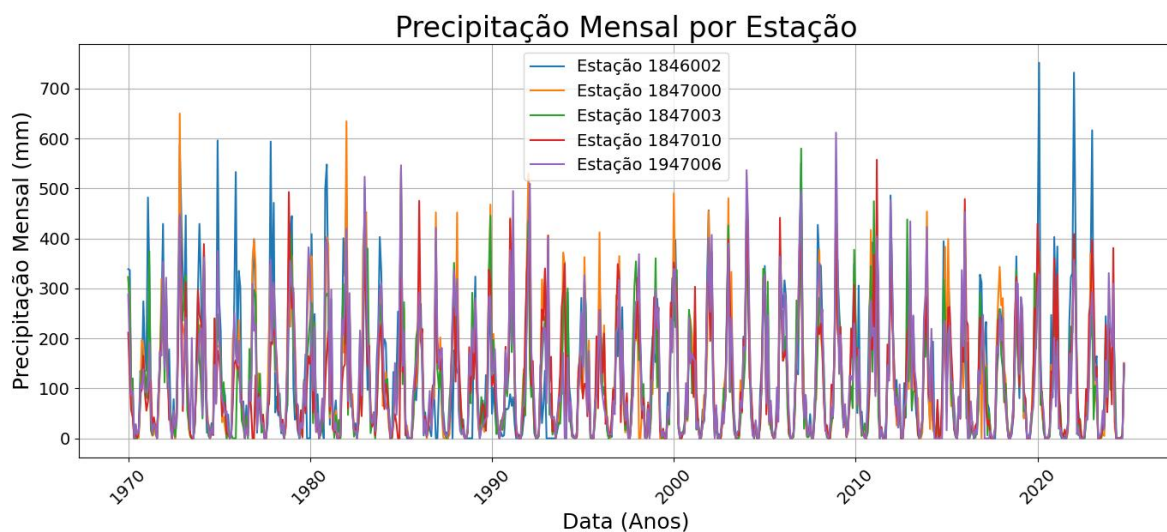
ao processo de filtragem. A Figura 14 apresenta o gráfico com os dados filtrados da estação de Monte Carmelo, enquanto a Figura 15 ilustra os dados filtrados de todas as estações inseridas no programa. Os dados resultantes desse tratamento são disponibilizados ao usuário por meio da criação do arquivo “Dados_Pluviométricos_Tratados.csv”.

Figura 14 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de Monte Carmelo com os dados tratados.



Fonte: Do autor, 2025.

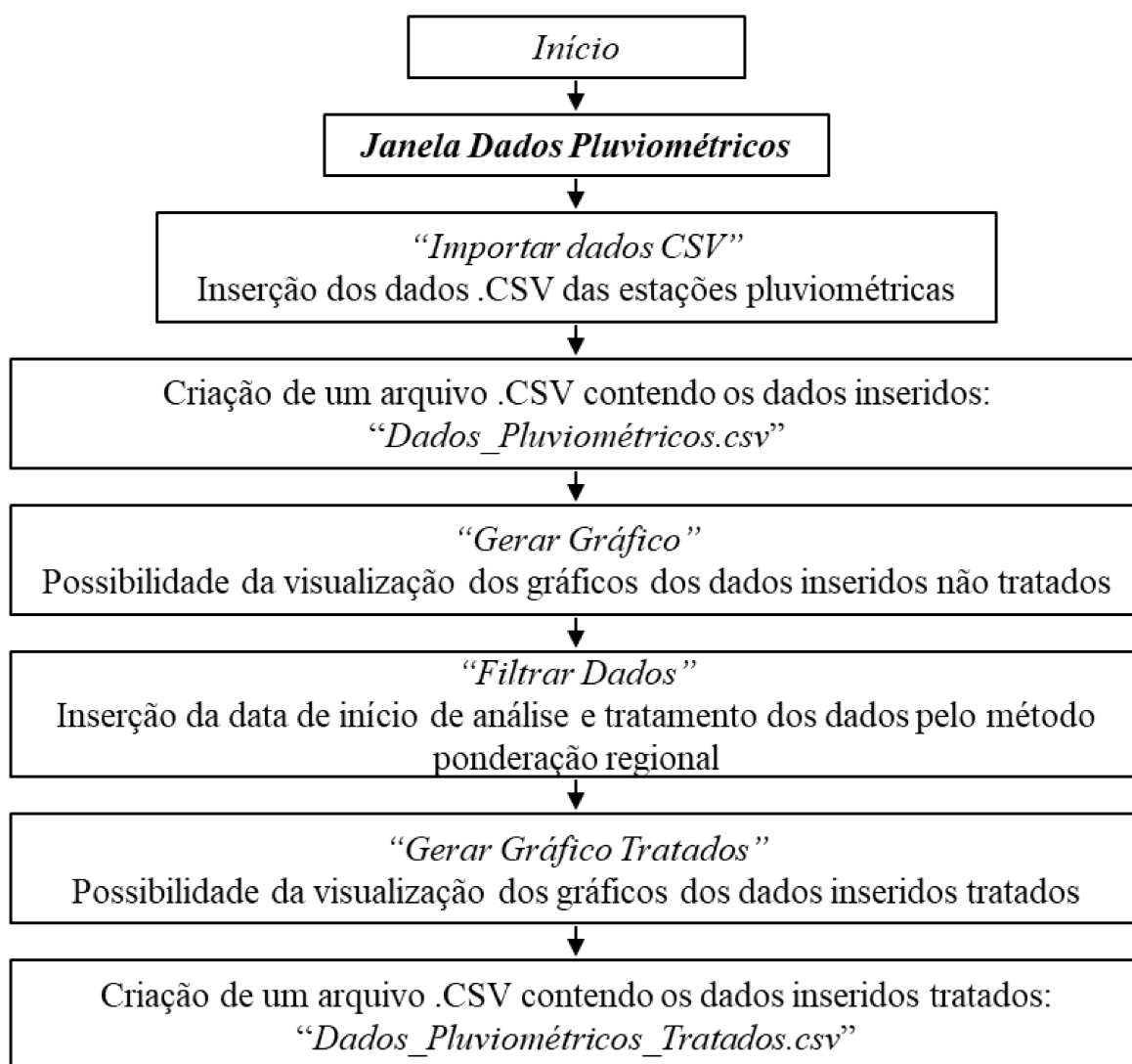
Figura 15 - Gráfico de "Precipitação mensal(mm) x Anos" de todas as estações inseridas no programa com os dados tratados.



Fonte: Do autor, 2025.

A Figura 16 apresenta um fluxograma representativo do processo desenvolvido na primeira janela, ilustrando de forma sequencial as etapas a serem seguidas pelo usuário dentro da interface do programa. Esse diagrama permite uma visualização do fluxo de operações, auxiliando na compreensão do funcionamento do software e na correta execução de cada funcionalidade implementada.

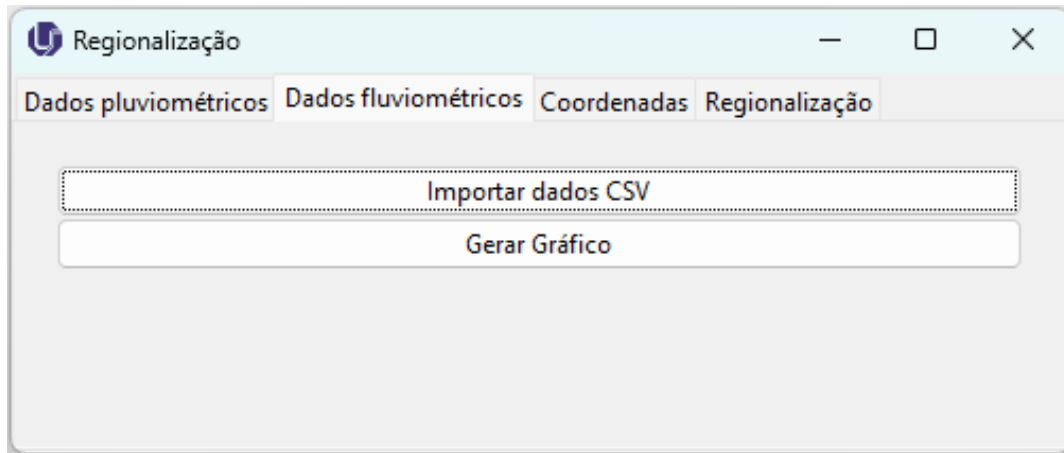
Figura 16 - Fluxograma do programa: Dados pluviométricos.



Fonte: Do autor, 2025.

A segunda aba do programa, conforme ilustrado na Figura 17, é destinada à seleção dos dados pluviométricos pelo usuário.

Figura 17 - Segunda janela do programa: Dados fluviométricos

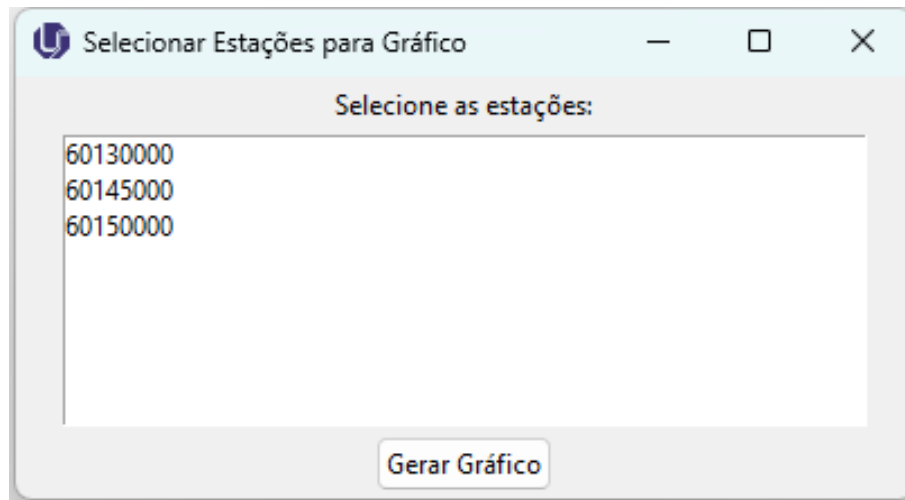


Fonte: Do autor, 2025.

De forma similar à primeira aba, o usuário realiza a inserção dos dados por meio da opção “Importar dados CSV”, que permite o carregamento de arquivos no formato .CSV contendo os registros das estações fluviométricas. É possível selecionar múltiplos arquivos diretamente do diretório local, sendo exibida uma janela informando a quantidade de arquivos importados com sucesso. Durante esse processo, é aplicado o mesmo procedimento de pré-tratamento descrito anteriormente, utilizando a biblioteca Pandas do Python para a manipulação e organização das informações. No entanto, além da soma dos dados diários, o programa calcula a média dos valores registrados, a fim de obter a vazão média mensal dos corpos hídricos. Esses valores são então organizados em uma nova coluna denominada “Vazões Mensais”, associada às respectivas datas. Os dados resultantes desse pré-tratamento são disponibilizados ao usuário por meio da criação do arquivo “Dados_Fluviométricos.csv”.

Após essa etapa, o usuário pode acionar a função “Gerar Gráfico”, a qual abre uma nova janela contendo a lista das estações fluviométricas importadas, identificadas por seus respectivos códigos, conforme ilustrado na Figura 18. A partir dessa interface, é possível selecionar uma ou mais estações para a visualização gráfica dos dados, no formato “Data x Vazões mensais”.

Figura 18 - Janela para a seleção das estações fluviométricas

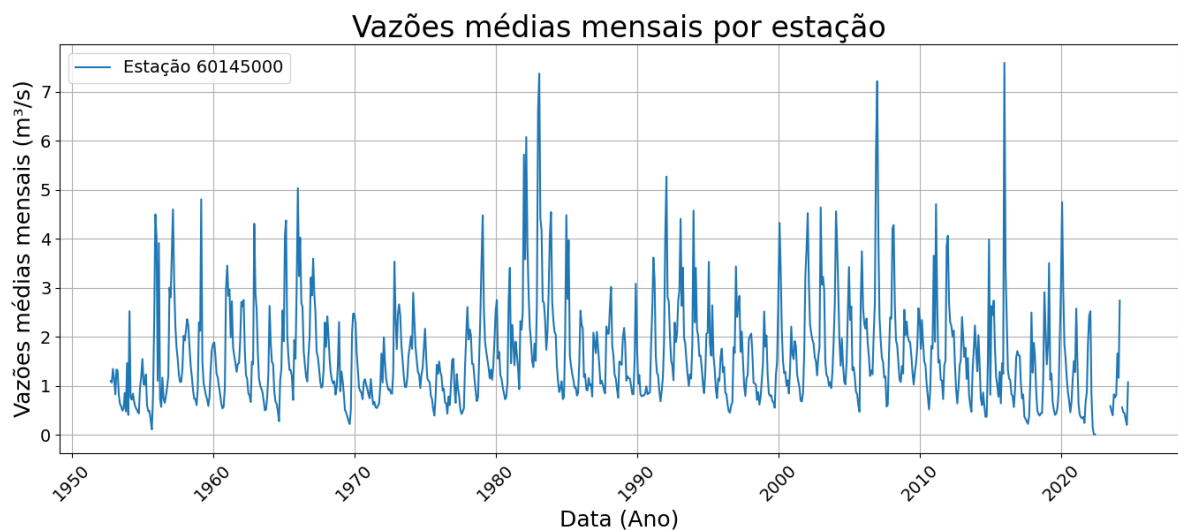


Fonte: Do autor, 2025.

Os gráficos podem ser visualizados de forma individual, como exemplificado na Figura 19, que apresenta os dados da estação de Iraí de Minas, ou com múltiplas estações sobrepostas em um mesmo gráfico, conforme ilustrado na Figura 20 com todas as estações inseridas no programa.

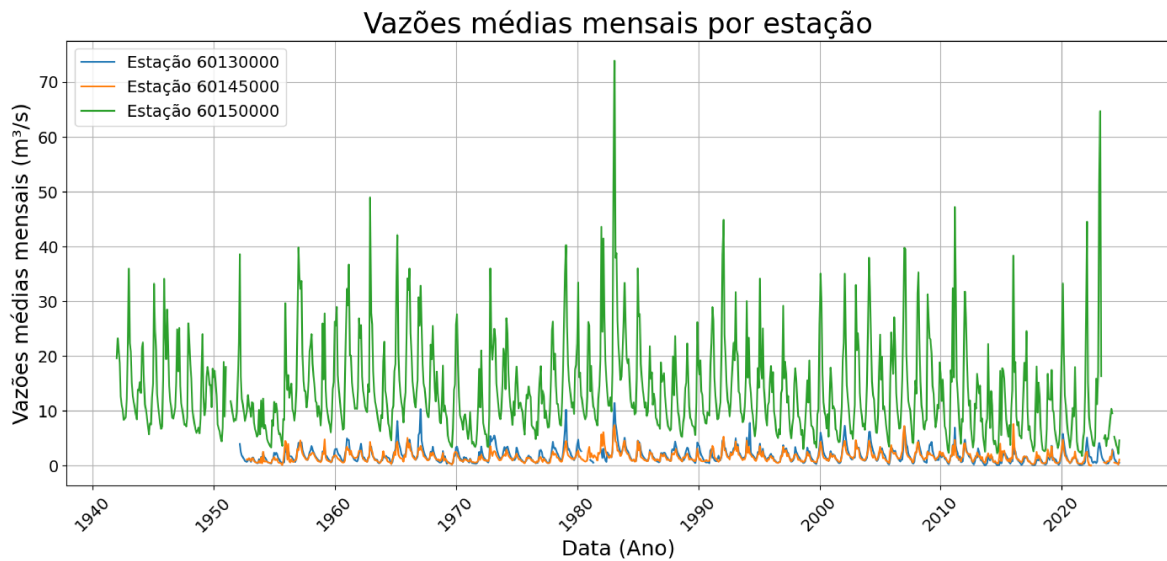
0

Figura 19 - Gráfico de "Vazões médias mensais(mm) x Anos" de Iraí de Minas



Fonte: Do autor, 2025.

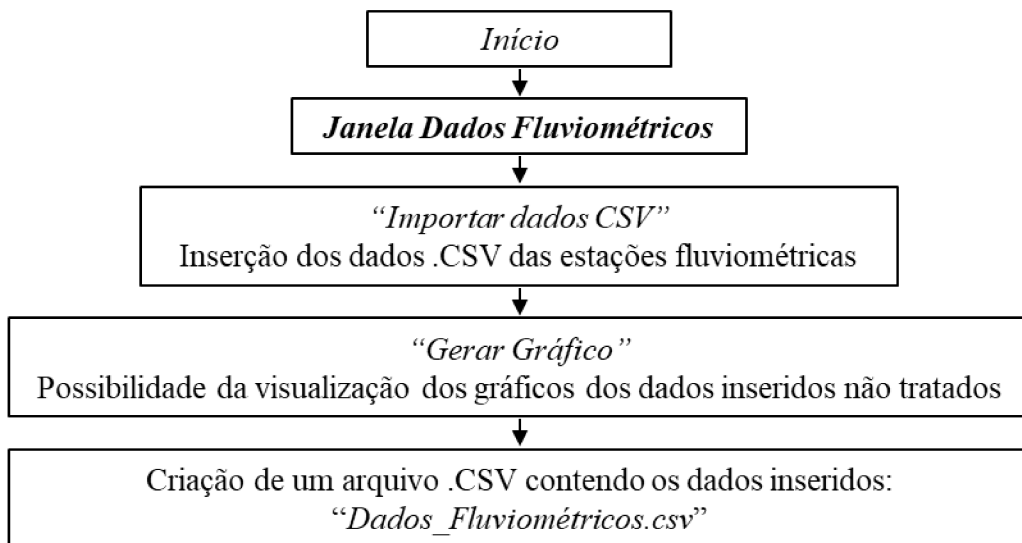
Figura 20 - Gráfico de "Vazões médias mensais(mm) x Anos" de todas as estações inseridas no programa



Fonte: Do autor, 2025.

Observa-se que as médias mensais da estação de Estrela do Sul são significativamente superiores às das demais estações, o que já era esperado, uma vez que essa estação possui uma bacia de contribuição maior em comparação às outras. A Figura 21 apresenta o fluxograma correspondente à segunda aba do programa, representando de forma sequencial as etapas relacionadas ao tratamento dos dados fluviométricos. Assim como no primeiro diagrama, este fluxograma tem como objetivo facilitar a compreensão do fluxo de trabalho específico dessa etapa.

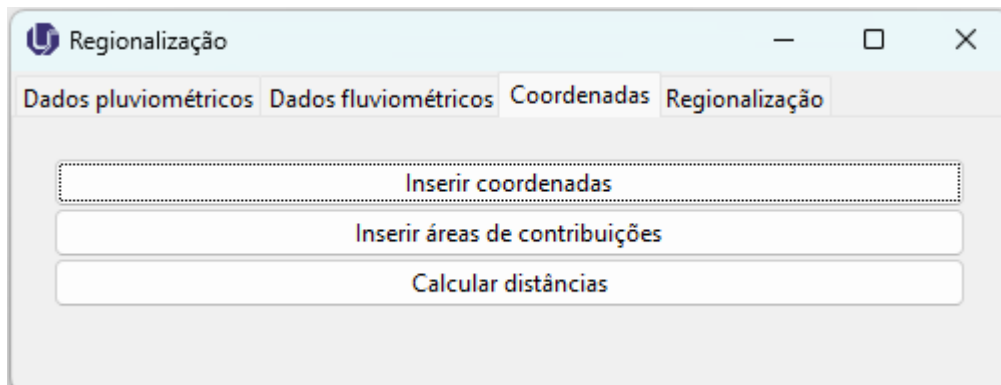
Figura 21 - Fluxograma do programa: Dados fluviométricos.



Fonte: Do autor, 2025.

A terceira aba do programa, conforme ilustrado na Figura 22, é destinada à inserção dos dados de coordenadas das estações e áreas levantadas pelo usuário.

Figura 22 - Terceira janela do programa: Coordenadas



Fonte: Do autor, 2025.

Ao acionar a função “Inserir coordenadas”, o usuário abrirá uma nova janela com o mesmo nome, na qual é exibida uma tabela contendo, nas colunas, a lista das estações pluviométricas previamente inseridas no programa. Essa tabela também inclui as estações fluviométricas, porém, nesse caso, o programa solicita a inserção das coordenadas do centroide da bacia de contribuição de cada estação, em vez do ponto de localização da estação propriamente dita. A Figura 23 apresenta essa janela, com os dados utilizados neste trabalho, previamente demonstrados na Tabela 9 e Tabela 10.

Figura 23 - Janela para a inserção das coordenadas.

Tipo	1846002	1847000	1847003	1847010	1947006	Centróide 60130000	Centróide 60145000	Centróide 60150000
X	270216,430	233793,259	245907,778	241257,529	270216,430	248735,3748	250989,8425	229415,1738
Y	7881506,70	7928208,89	7953785,43	7899364,67	7881506,70	7911968,691	7902317,879	7909028,17

Fonte: Do autor, 2025.

Ao acionar a função “Inserir áreas de contribuição”, o usuário abrirá uma nova janela com o mesmo nome, na qual é exibida uma tabela contendo, nas colunas, a lista das estações fluviométricas. Nessa interface, o usuário deve preencher os campos correspondentes com as respectivas áreas das bacias de contribuição de cada estação. A Figura 24 apresenta essa janela com os dados utilizados neste trabalho, previamente demonstrados na Tabela 8.

Figura 24 - Janela para a inserção das áreas de contribuição das estações pluviométricas.

Estação	60130000	60145000	60150000
Área (km ²)	130,26	98,17	864,60

Salvar Áreas

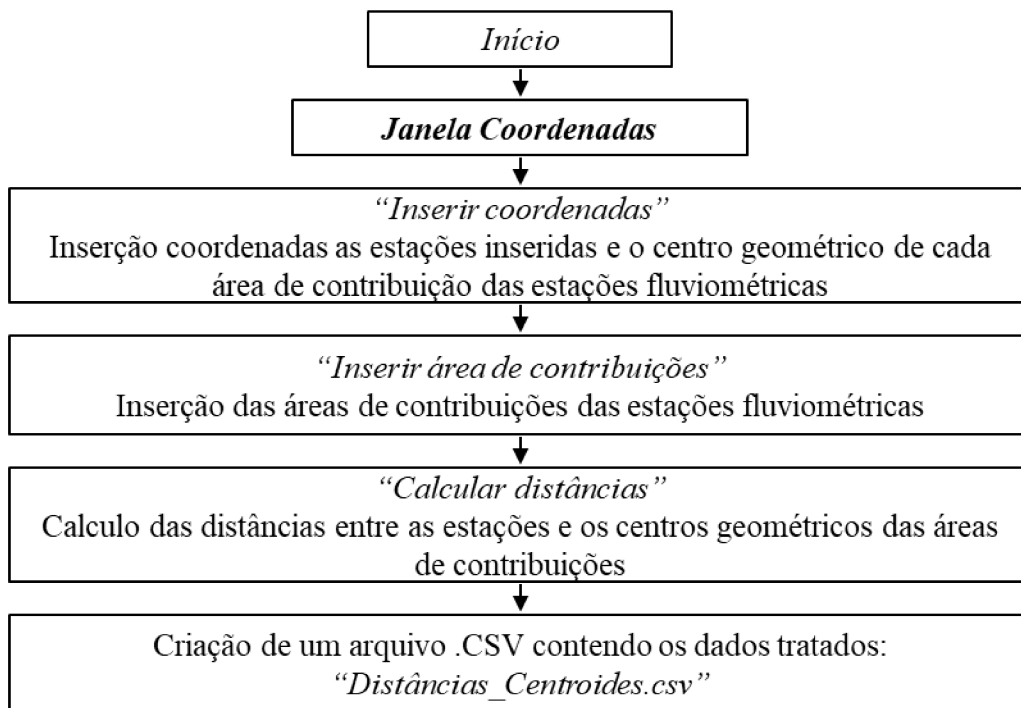
Fonte: Do autor, 2025.

Após a inserção dos dados, o usuário deve acionar a função “Calcular distâncias”, que tem como finalidade determinar a distância entre cada estação pluviométrica e o centroide das respectivas bacias de contribuição previamente inseridas. Esse cálculo é realizado por meio da Equação (15), em que cx e cy correspondem às coordenadas X e Y da estação, ex e ey às coordenadas X e Y do centroide, e $dist$ representa a distância resultante.

$$dist = \sqrt{(cx - ex)^2 + (cy - ey)^2} \quad (15)$$

Os dados obtidos a partir desse cálculo são disponibilizados ao usuário por meio da criação do arquivo “Distâncias_Centroides.csv”. A Figura 25 apresenta o fluxograma correspondente à terceira aba do programa, ilustrando de forma sequencial as etapas envolvidas na inserção dos dados de coordenadas e áreas, bem como no cálculo das distâncias.

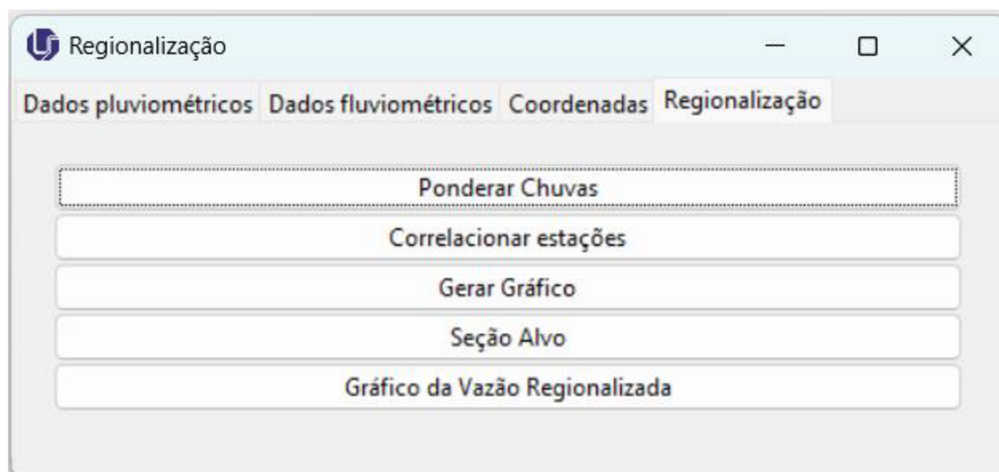
Figura 25 - Fluxograma do programa: Coordenadas.



Fonte: Do autor, 2025.

A quarta e última aba do programa, conforme ilustrado na Figura 26, é destinada à realização dos cálculos de regionalização.

Figura 26 - Quarta janela do programa: Regionalização



Fonte: Do autor, 2025.

Ao acionar a função “Ponderar chuvas”, o usuário faz com que o programa acesse os dados de precipitação previamente inseridos e tratados, bem como os dados de distância entre as estações pluviométricas e os centroides das bacias de contribuição. A partir dessas informações, o

programa realiza a ponderação das chuvas, utilizando como fator de ponderação a distância calculada, conforme representado na Equação (16).

$$CP = \frac{DP \cdot DDist^t}{\sum DDist} \quad (16)$$

Nessa equação, CP representa a matriz de dados contendo os valores de precipitação ponderados para os centroides; DP é a matriz com os dados pluviométricos tratados; $DDist^t$ corresponde à matriz transposta das distâncias entre as estações e os centroides; e $\sum DDist$ representa a matriz das somas dessas distâncias.

Os resultados obtidos por meio desse cálculo são disponibilizados ao usuário por meio da criação do arquivo “Dados_Chuvas_Ponderadas.csv”.

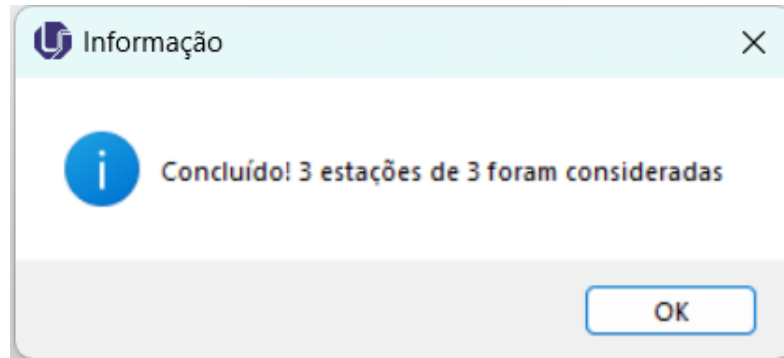
A partir disso, o usuário poderá acionar a função “Correlacionar estações”, a qual faz com que o programa realize a correlação entre os dados de precipitação ponderada no centroide da bacia de contribuição de cada estação fluviométrica e a vazão média mensal específica (Q^*) dessa estação. Essa vazão específica é obtida pela divisão da vazão média mensal (Q) pela área da bacia de contribuição (A), conforme apresentado na Equação (17).

$$Q^* = Q / A \quad (17)$$

A correlação é realizada por meio de uma regressão linear, sendo avaliado o coeficiente de correlação obtido. Caso esse coeficiente seja superior a 0,5, a estação é considerada válida para integração no processo de regionalização de vazão. Por outro lado, se o coeficiente for inferior a esse valor, a estação é descartada da análise por não apresentar correlação satisfatória. A regressão linear é executada com o auxílio das bibliotecas SciPy.stats e NumPy da linguagem Python.

Os resultados dessa regressão linear, incluindo os coeficientes linear e angular da equação da reta, bem como o valor do coeficiente de correlação linear são armazenados internamente no programa. Além disso, o sistema informa ao usuário a quantidade de estações que apresentaram um coeficiente de correlação considerado aceitável. No presente estudo, todas as três estações analisadas apresentaram coeficientes superiores a 0,5, conforme ilustrado na Figura 27.

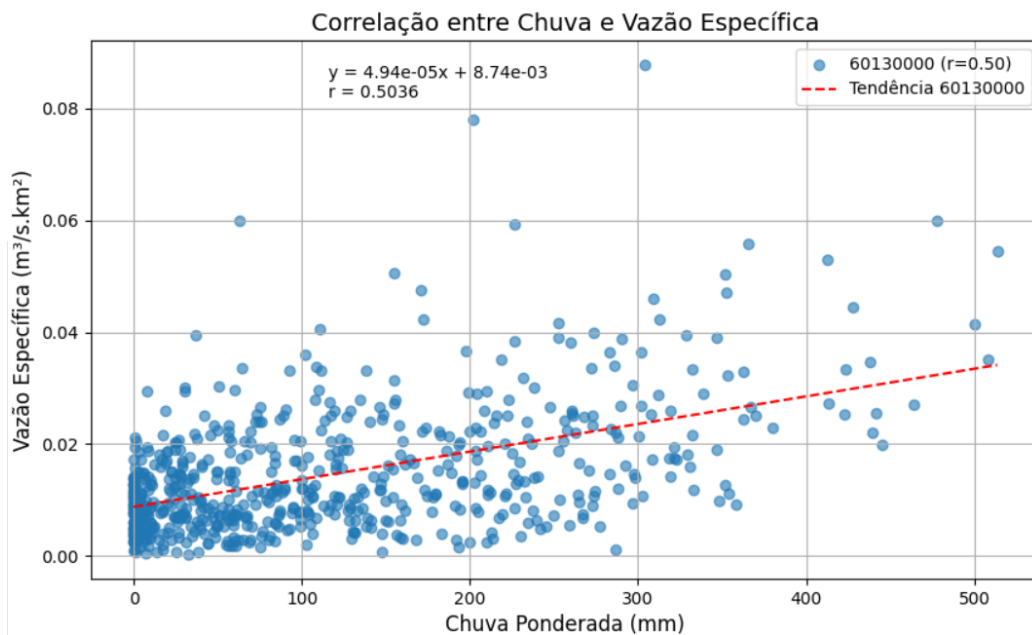
Figura 27 - Janela de aviso: Correlação das estações



Fonte: Do autor, 2025.

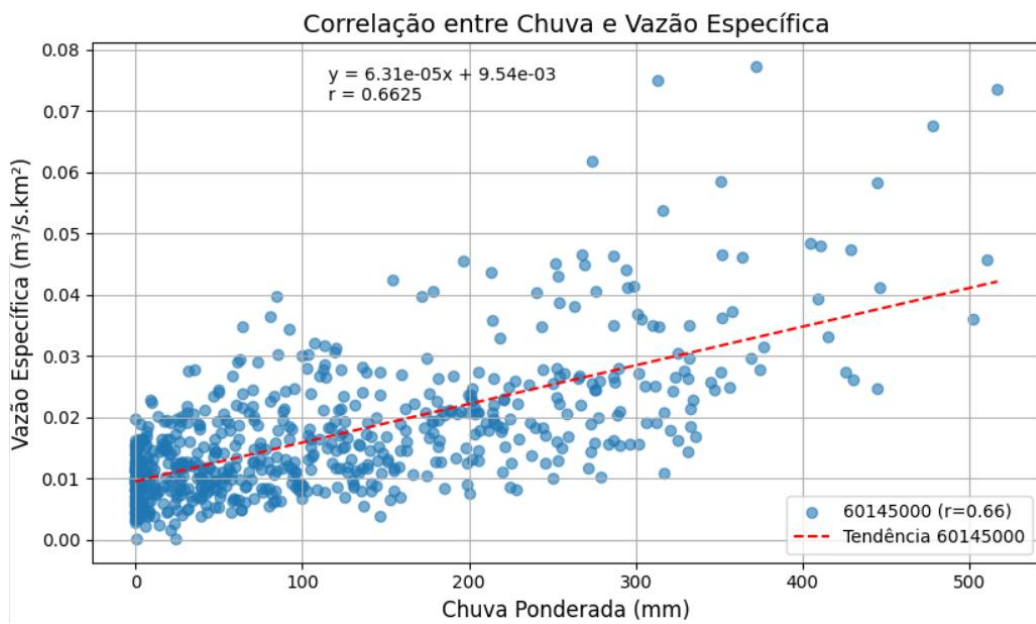
Ao acionar a função “Gerar gráfico”, o usuário pode visualizar os gráficos de dispersão "Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica", os quais exibem, além dos pontos de dados, a reta de regressão linear ajustada, sua equação e o valor do coeficiente de correlação correspondente. A Figura 28, a Figura 29 e a Figura 30 apresentam os gráficos referentes às estações fluviométricas Fazenda Cachoeira, Iraí de Minas e Estrela do Sul, respectivamente.

Figura 28 - Gráfico de correlação Fazenda Cachoeira: Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica



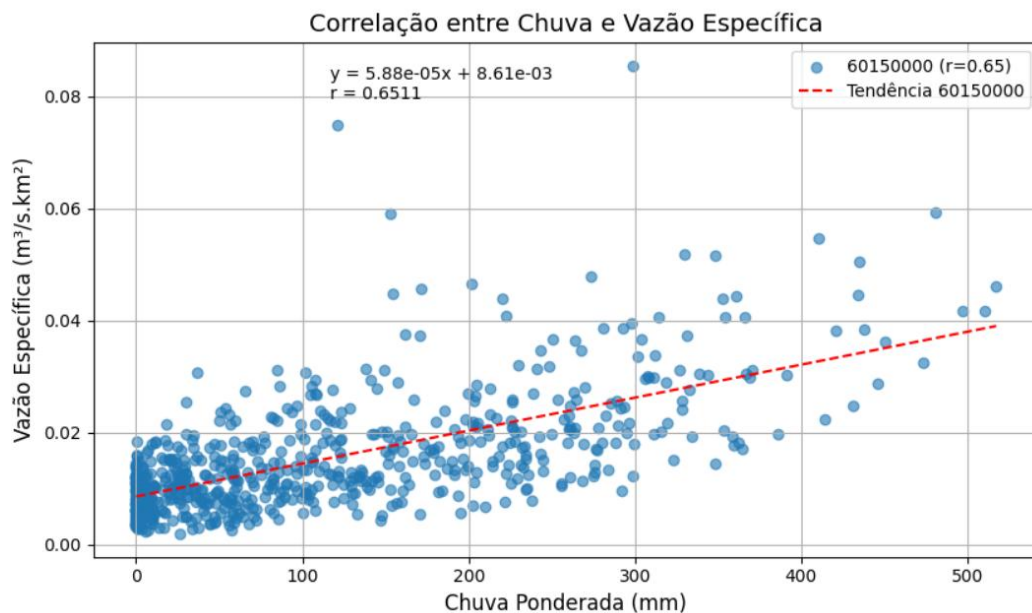
Fonte: Do autor, 2025.

Figura 29 - Gráfico de correlação Iraí de Minas: Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica



Fonte: Do autor, 2025.

Figura 30 - Gráfico de correlação Estrela do Sul: Precipitação ponderada x Vazão média mensal específica



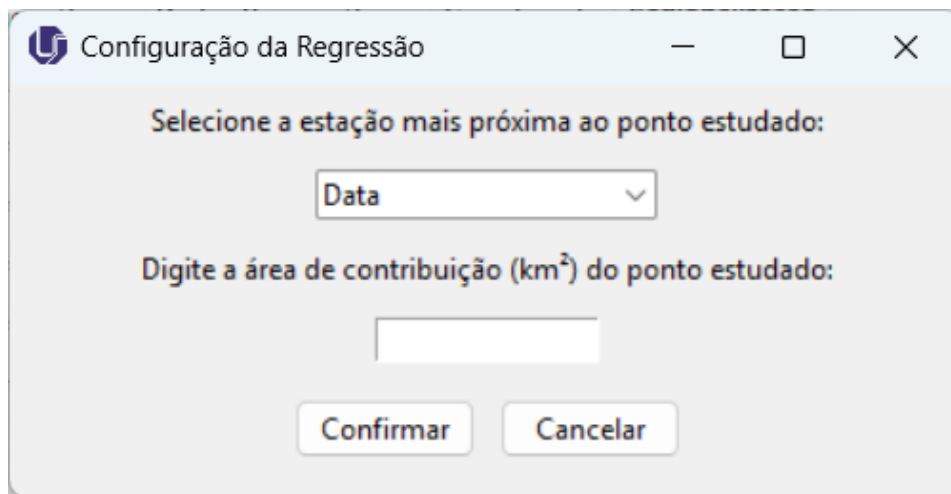
Fonte: Do autor, 2025.

Para dar continuidade ao processo de regionalização, o usuário deve inserir os dados correspondentes à seção-alvo em análise. Esse procedimento é realizado por meio da função “Seção alvo”, a qual abre uma janela denominada “Configuração da regressão”. Nessa

interface, o usuário pode selecionar, dentre as estações pluviométricas previamente inseridas no programa, aquela que se encontra mais próxima ao ponto analisado, além de informar a área da bacia de contribuição correspondente à seção-alvo.

A Figura 31 apresenta essa janela com os dados utilizados no presente estudo. Para este caso, foi selecionada a estação pluviométrica de Monte Carmelo, associada à área de contribuição do reservatório Mumbuca, com 18,20 km², conforme indicado na Figura 5.

Figura 31 - Janela para inserção de dados da seção alvo



The image shows a dialog box titled "Configuração da Regressão". It has a standard Windows-style title bar with a logo on the left and minimize, maximize, and close buttons on the right. The main content area is light gray and contains the following elements:

- A label: "Selecione a estação mais próxima ao ponto estudado:"
- A dropdown menu with the text "Data" and a downward arrow.
- A label: "Digite a área de contribuição (km²) do ponto estudado:"
- An empty text input field.
- Two buttons at the bottom: "Confirmar" and "Cancelar".

Fonte: Do autor, 2025.

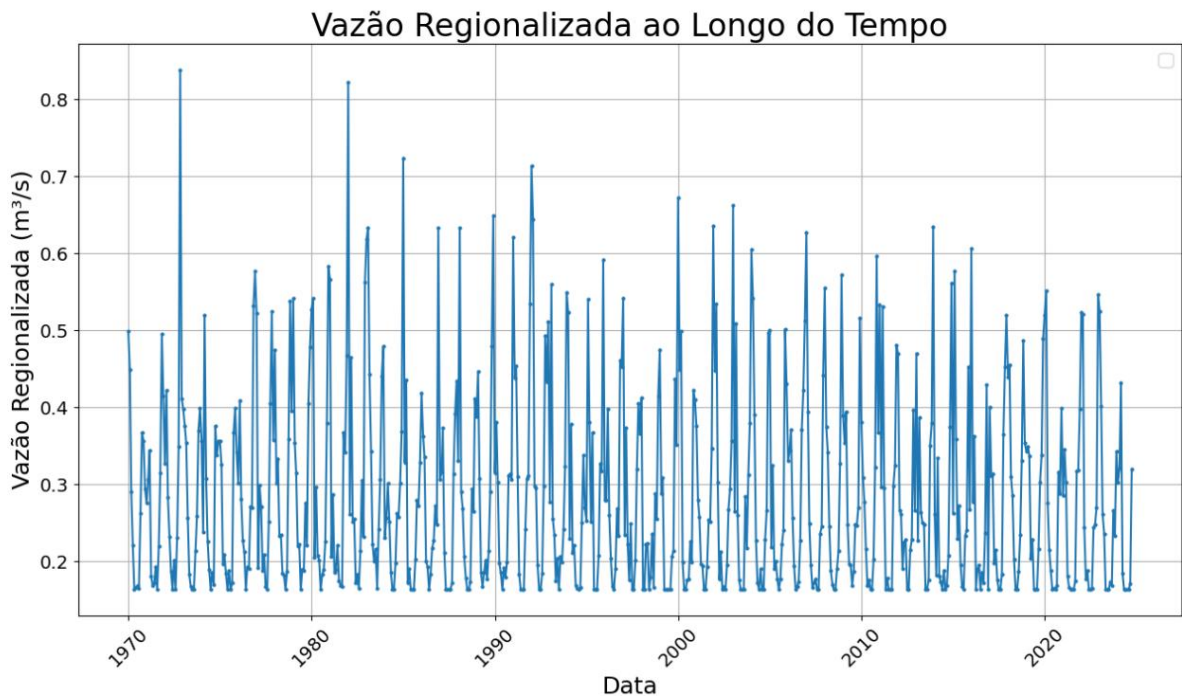
Ao confirmar os dados inseridos na janela, esta é automaticamente fechada. Em seguida, os coeficientes angulares (a_n) e lineares (b_n), previamente armazenados pelo programa na etapa de correlação entre as estações, são utilizados no cálculo da regionalização com base nos dados da estação-alvo, conforme apresentado na Equação (18). Nessa equação, n representa o número de estações com coeficiente de correlação superior a 0,5, e q^* corresponde à vazão média mensal regionalizada específica.

$$q^* = \frac{\sum_{i=1}^n (a_n \cdot Ps + b_n)}{n} \quad (18)$$

Para a obtenção da vazão média mensal regionalizada (q), o programa multiplica os valores específicos gerados pela área da bacia de contribuição da seção-alvo previamente inserida. Os resultados desse cálculo são disponibilizados ao usuário por meio da criação do arquivo "Resultado_Regressão.csv".

Em seguida, o usuário pode acionar a função “Gráfico da vazão regionalizada” para visualizar os resultados da regionalização em um gráfico do tipo “Vazão média mensal regionalizada x Mês”. A Figura 32 apresenta esse gráfico para o caso estudado.

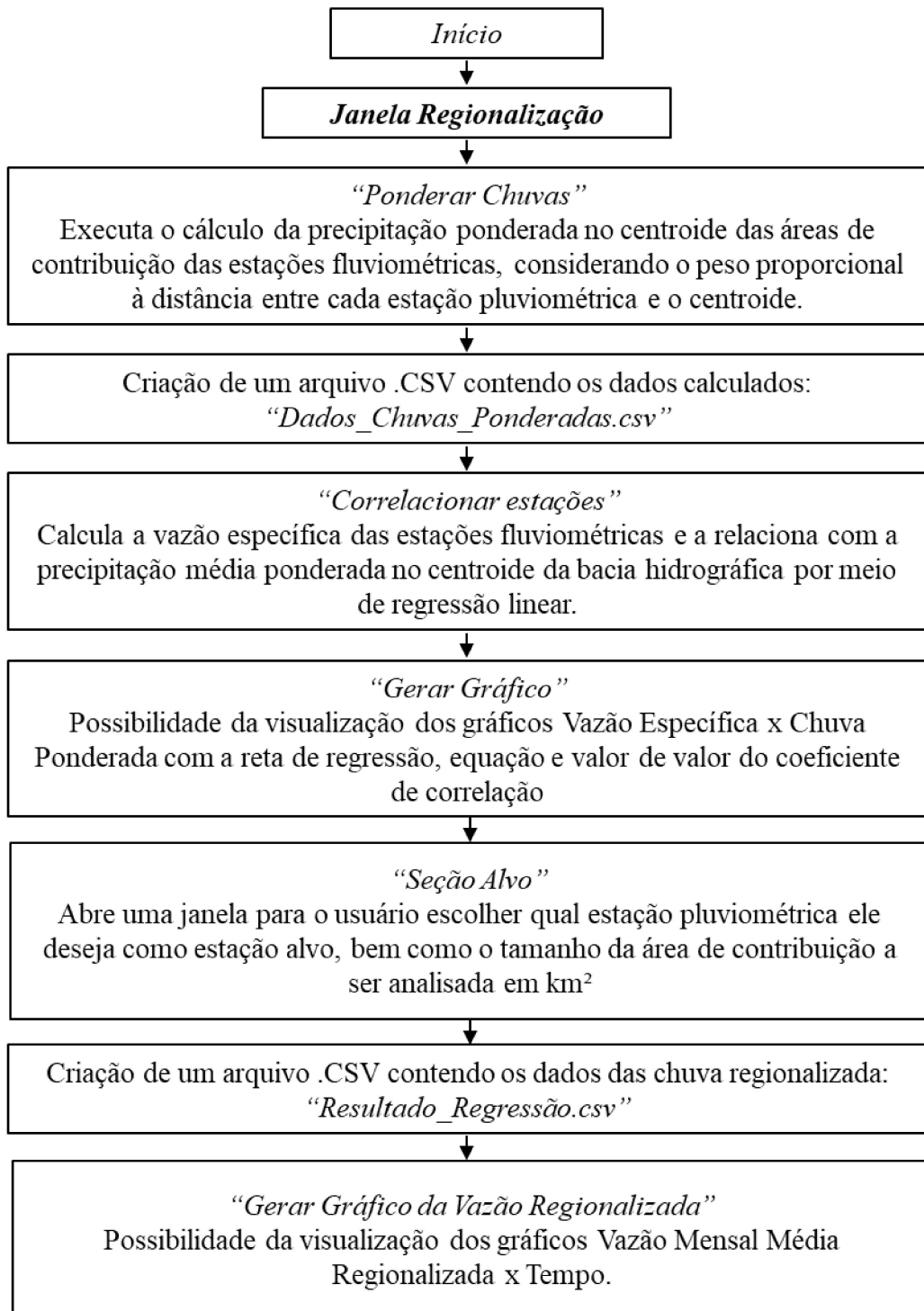
Figura 32 - Vazão média mensal regionalizada (para entrada do reservatório do córrego Mumbuca) x Data



Fonte: Do autor, 2025.

A Figura 33 apresenta o fluxograma correspondente à última aba do programa, ilustrando de forma sequencial as etapas envolvidas nos cálculos, na inserção de dados e na geração dos gráficos.

Figura 33 - Fluxograma do programa: Regionalização.



Fonte: Do autor, 2025.

3.3 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO E ESTIMATIVA DAS CARGAS DE POLUENTES

3.3.1 *Classificação dos grupos hidrológicos das áreas*

Para a classificação dos grupos hidrológicos das áreas da bacia, foi desenvolvido um código em Python integrado ao ambiente do QGIS. Esse código realiza a análise dos arquivos vetoriais (.shp) referentes aos tipos de solo presentes na área de estudo. Foram identificados três tipos principais de solos e litologias, conforme ilustrado na Figura 7, aos quais foram atribuídas classes hidrológicas com base nas características de permeabilidade e no potencial de escoamento superficial.

O tipo “Quartzito, Filito” foi classificado como pertencente ao grupo hidrológico A, uma vez que essas rochas metamórficas apresentam boa drenagem e elevada taxa de infiltração, resultando em baixo escoamento superficial. O tipo “Argilito Arenoso” foi enquadrado no grupo B, por apresentar textura intermediária e moderada capacidade de infiltração. Por fim, o tipo “Cascalho, Argila, Laterita” foram classificado no grupo C, considerando-se a tendência desse material em reduzir a infiltração e favorecer o escoamento superficial. A Tabela 12 apresenta um resumo da classificação hidrológica adotada.

Tabela 12 - Classificação hidrológica pelo tipo de solo presente na área estudada

Tipo de solo	Classificação hidrológica
Quartzito, Filito	A
Argilito, arenoso	B
Cascalho, Argila e Laterita	C

Fonte: Do autor, 2025.

Com base nessa análise, o código desenvolvido associa automaticamente a classificação hidrológica aos diferentes usos do solo identificados. A Tabela 13 apresenta os resultados correspondentes à situação atual, enquanto a Tabela 14 exibe a classificação projetada para a situação futura (cenário hipotético).

Tabela 13 - Grupo hidrológico x Uso do solo – Situação atual

Uso do Solo	Grupo hidrológico					
	A (km ²)	B (km ²)	C (km ²)	A (%)	B (%)	C (%)
Pastagem - condição precária	1.24	0.00	0.00	100.0%	0.0%	0.0%
Praças	0.16	0.04	0.00	79.9%	20.1%	0.0%
Área industriais	0.18	0.00	0.00	99.6%	0.4%	0.0%
Áreas comerciais	0.03	0.00	0.00	100.0%	0.0%	0.0%
Áreas impermeáveis	0.37	0.01	0.00	96.9%	3.1%	0.0%
Áreas residenciais - 3% Impermeável	0.54	0.00	0.00	100.0%	0.0%	0.0%
Áreas residenciais - 65% Impermeável	0.24	0.00	0.00	100.0%	0.0%	0.0%
Áreas verdes - Grande cobertura	2.04	0.83	0.00	70.9%	29.1%	0.0%
Áreas de campos e plantações intermitentes	2.69	6.82	0.02	28.2%	71.6%	0.2%
Áreas de plantação consolidadas	0.90	1.91	0.15	30.3%	64.5%	5.2%

Fonte: Do autor, 2025.

Tabela 14 - Grupo hidrológico x Uso do solo – Situação futura (cenário hipotético)

Uso do solo	Grupo hidrológico					
	A (km ²)	B (km ²)	C (km ²)	A (%)	B (%)	C (%)
Praças	0.12	0.04	0.00	75.5%	24.5%	0.0%
Área industriais	0.24	0.00	0.00	99.9%	0.1%	0.0%
Áreas comerciais	0.03	0.00	0.00	100.0%	0.0%	0.0%
Áreas impermeáveis	0.37	0.01	0.00	96.9%	3.1%	0.0%
Áreas residenciais - 65% Impermeável	1.99	0.02	0.00	99.1%	0.9%	0.0%
Áreas verdes - Grande cobertura	2.04	0.84	0.00	70.9%	29.1%	0.0%
Áreas de campos e plantações intermitentes	2.40	6.81	0.02	26.0%	73.8%	0.2%
Áreas de plantação consolidadas	0.58	2.46	0.21	17.9%	75.8%	6.3%

Fonte: Do autor, 2025.

3.3.2 Software para modelagem chuva-vazão e quantificação das cargas poluidoras

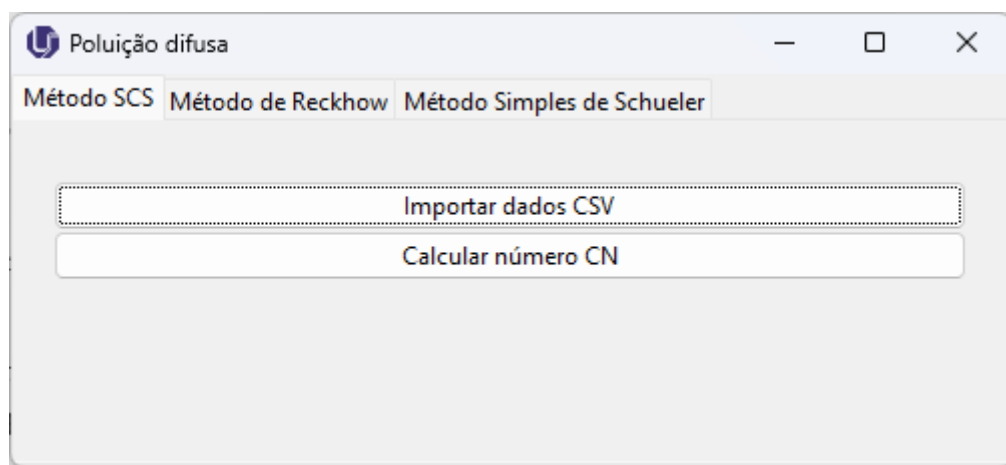
Para estimar a quantidade de poluentes, foi desenvolvido um software em Python denominado “Poluição Difusa”, utilizando a biblioteca Tkinter para a construção da interface gráfica e o recurso ttkthemes para aprimoramento estético. A ferramenta foi estruturada para processar os dados de área obtidos no QGIS e aplicar os cálculos necessários à modelagem chuva-vazão, viabilizando a quantificação das cargas poluidoras.

O software foi organizado em três módulos. O primeiro é destinado à estimativa do escoamento superficial, por meio do método do Soil Conservation Service (SCS). O segundo realiza o cálculo das cargas poluentes com base no Modelo de Coeficiente de Exportação (EMC). O

terceiro módulo aplica o método proposto por Schueler para estimativa adicional das cargas difusas.

Para o cálculo do escoamento superficial, foi criada uma aba no software denominada “Método SCS”, conforme ilustrado na Figura 34. A ferramenta desenvolvida permite a importação dos dados obtidos no QGIS por meio do botão “Importar dados CSV”, o qual realiza a leitura de arquivos no formato .csv gerados com os dados de área e tipos de solo.

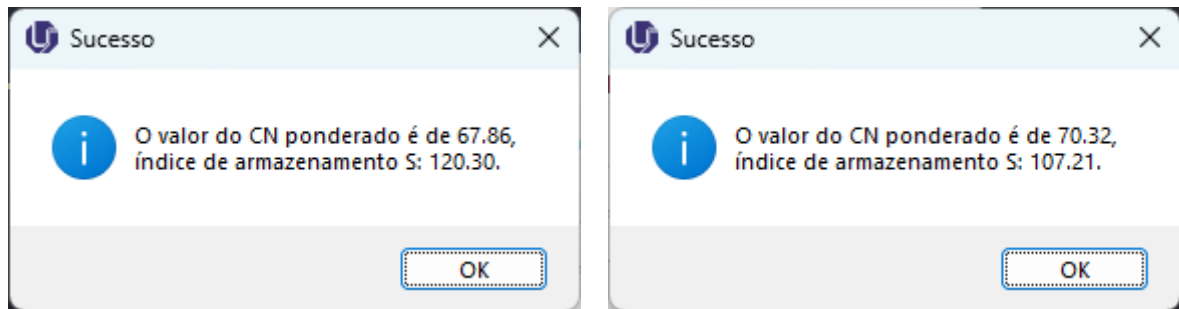
Figura 34 - Janela inicial do programa "Poluição difusa: Método SCS"



Fonte: Do autor, 2025.

Após a importação, o usuário pode acionar o botão “Calcular número CN” para estimar o Curve Number (CN) e a capacidade máxima de armazenamento (S). O cálculo é realizado com base nas informações de uso do solo, grupo hidrológico e área correspondente, contidas no arquivo importado. A partir dos valores individuais de CN, o programa calcula o CN médio ponderado pela área (CN_{total}), que é então utilizado para determinar a capacidade máxima de armazenamento (S). Os resultados são apresentados ao usuário por meio de uma janela, conforme ilustrado na Figura 35 sendo as situações atual e futura representadas pelas janelas esquerda e direita, respectivamente.

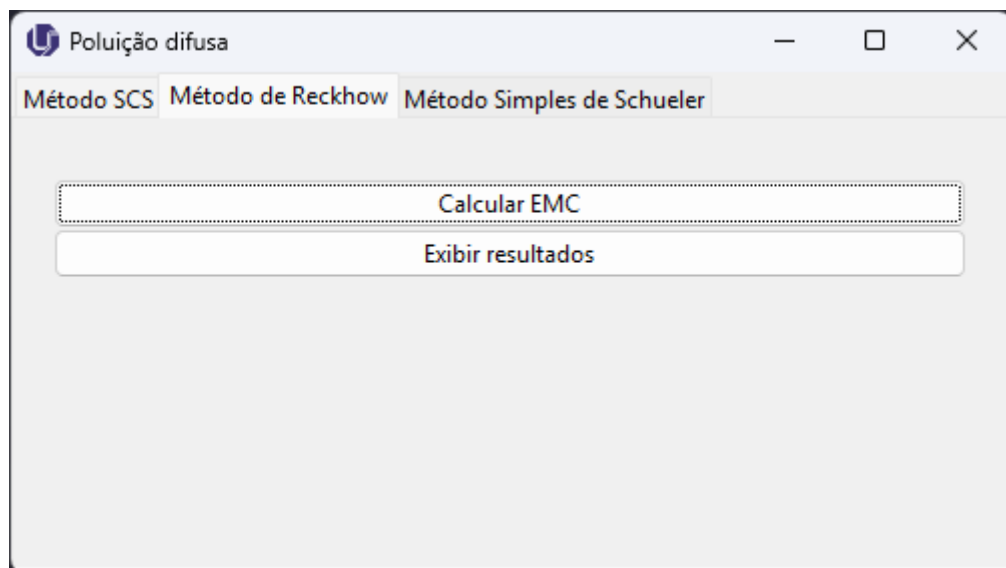
Figura 35 - Janela de resultado do método SCS. (Direita: Situação atual; Esquerda: Situação futura)



Fonte: Do autor, 2025.

Para a aplicação do Modelo de Coeficiente de Exportação, foi implementada uma aba no software intitulada “Método de Reckhow”, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Janela do programa "Poluição difusa: Método de Reckhow"

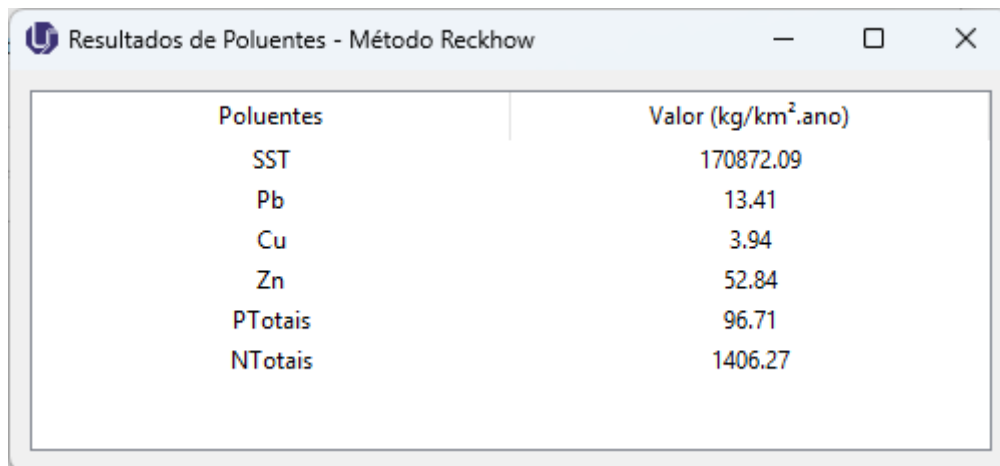


Fonte: Do autor, 2025.

Ao acionar o botão “Calcular EMC”, o programa acessa os dados de área e de classificação previamente inseridos na aba inicial e realiza o cálculo ponderado dos coeficientes, com base nos diferentes usos do solo e respectivas áreas. Após a conclusão do processamento, o sistema emite uma mensagem informando o término do cálculo. Em seguida, o usuário pode visualizar os resultados por meio do botão “Exibir resultados”. A Figura 37 apresenta a janela de exibição dos resultados gerados pelo programa. Os valores apresentados correspondem às cargas poluidoras anuais estimadas (em kg/km²ano) para cada poluente e classe de uso do solo,

calculadas a partir dos coeficientes de exportação e das áreas associadas a cada uso. Portanto, os resultados não representam os coeficientes em si, mas sim as cargas resultantes da aplicação desses coeficientes sobre as áreas inseridas.

Figura 37 - Amostra da janela de resultado do método de Reckhow

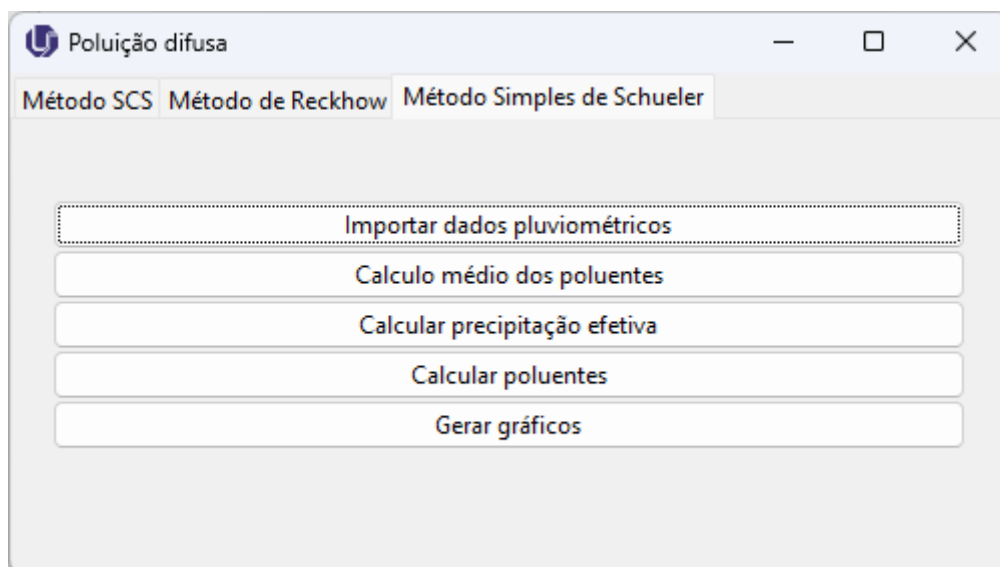


Poluentes	Valor (kg/km ² .ano)
SST	170872.09
Pb	13.41
Cu	3.94
Zn	52.84
PTotais	96.71
NTotais	1406.27

Fonte: Do autor, 2025.

Já para a aplicação do Modelo Simples de Schueler, foi implementada uma aba no software intitulada “Modelo Simples de Schueler”, conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Janela do programa "Poluição difusa: Método Simples de Schueler"

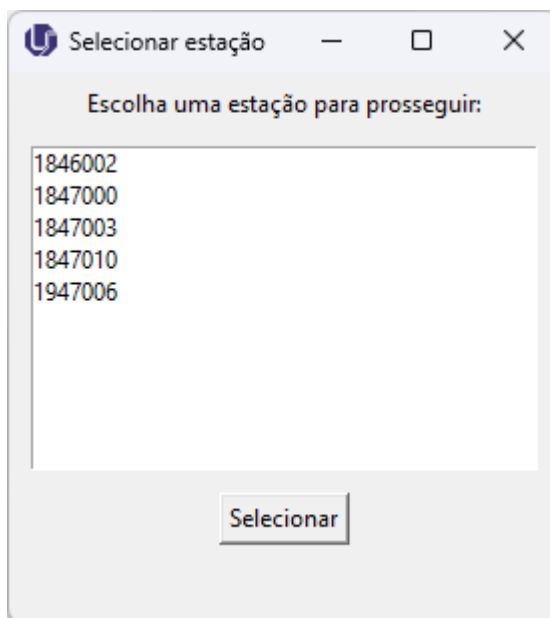


Fonte: Do autor, 2025.

Para iniciar o método, o usuário deve primeiramente importar os dados pluviométricos no formato .csv. Nessa etapa, foram utilizados os dados que foram tratados durante o processo de

regionalização. Após a importação dos dados no programa, será aberta uma janela para o usuário escolher qual será a estação considerada nos cálculos como mostra a Figura 39.

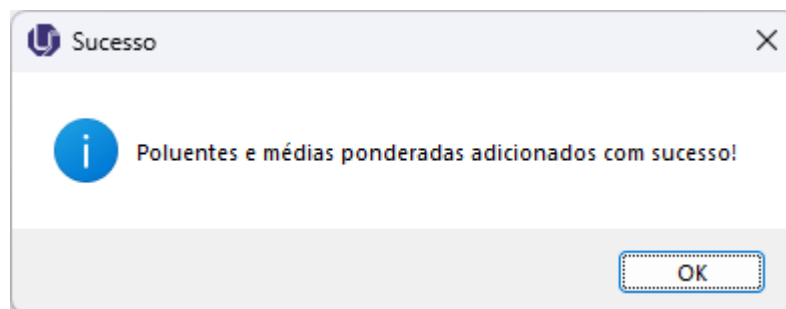
Figura 39 – Janela de seleção de estação



Fonte: Do autor, 2025.

Para o cálculo, foi escolhida a estação pluviométrica de Monte Carmelo (1847000) que é a estação mais próxima ao reservatório estudado. Após isso, o usuário deve acionar o botão “Cálculo médio de poluentes”. Isso faz com que o programa realize o cálculo ponderado dos coeficientes, com base nos diferentes usos do solo e respectivas áreas previamente inseridos. Quando o cálculo é concluído, o programa abre uma janela avisando o usuário, como mostra a Figura 40. O programa também exporta um arquivo .csv denominado “Resultado_poluentes_ponderados.csv” com os dados dos poluentes ponderados por área para o usuário analisar caso necessário.

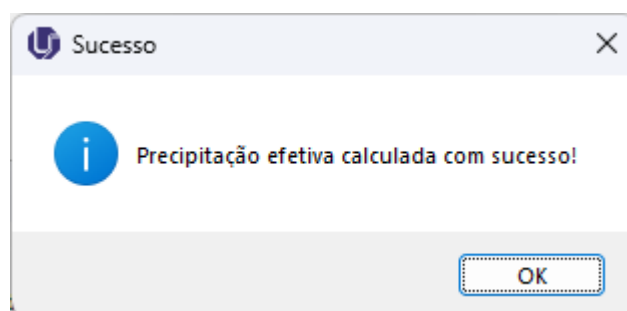
Figura 40 – Janela de aviso de conclusão do cálculo de poluentes ponderados



Fonte: Do autor, 2025.

Após essa etapa, o usuário aciona o botão “Calcular precipitação efetiva”, que faz com que o programa realize o cálculo de precipitação efetiva com base no método SCS e com base na estação selecionada. O programa gera um arquivo .csv denominado “Precipitação efetiva” com três colunas: Data, precipitação da estação e precipitação efetiva para a conferência do usuário caso necessário. Após o cálculo, o programa abre uma janela avisando o usuário, como mostra a Figura 41.

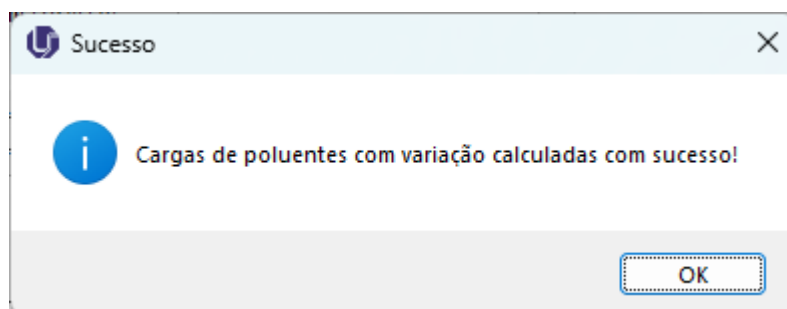
Figura 41 – Janela de aviso de conclusão do cálculo da precipitação efetiva



Fonte: Do autor, 2025.

Para o cálculo da carga poluidora, o usuário deve acionar o botão “Calcular poluentes”, o qual gera uma mensagem indicando o sucesso da operação, conforme ilustrado na Figura 42. Essa etapa também resulta na geração automática de um arquivo no formato .csv, denominado “Poluentes.csv”, que contém os valores de precipitação efetiva e as respectivas cargas poluidoras estimadas, organizadas em colunas por data.

Figura 42 – Janela de aviso de conclusão do cálculo de poluentes ponderados

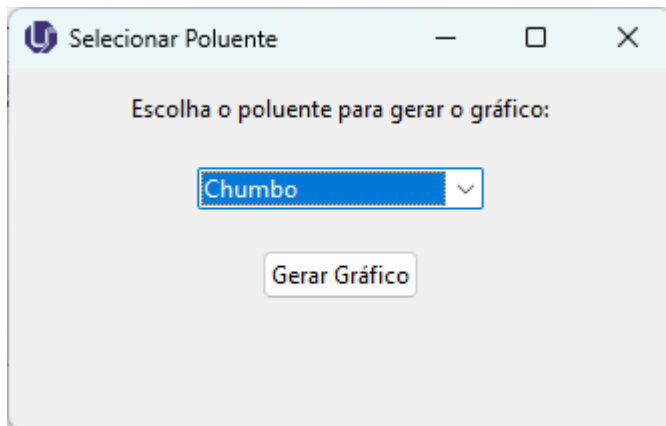


Fonte: Do autor, 2025.

O programa também possibilita a geração de gráficos de resultados por meio do botão “Gerar gráficos”. Ao acioná-lo, uma nova janela é aberta, permitindo ao usuário selecionar o poluente que deseja visualizar no gráfico intitulado “Carga estimada (ton/km².mês) x Precipitação efetiva

(mm)”. A Figura 43 apresenta essa janela de seleção. Os gráficos, gerados com essa metodologia, serão analisados na seção de Resultados.

Figura 43 – Janela de escolha dos poluentes para gerar os gráficos.



Fonte: Do autor, 2025.

3.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As análises granulométricas do solo do fundo do reservatório foram realizadas com o objetivo de avaliar as características dos depósitos de sedimentos da área estudada. Para isso, foram coletadas amostras de sedimentos de fundo e sólidos suspensos em uma seção localizada a montante do reservatório de Monte Carmelo no dia 19 de fevereiro de 2024. A campanha de amostragem seguiu os procedimentos estabelecidos por normas técnicas, garantindo a representatividade dos dados obtidos. A coleta foi realizada conforme os princípios da NBR 9898/1987 – Preservação e técnicas de amostragem de afluente líquidos e corpos receptores - Procedimento, assegurando que as amostras fossem obtidas de maneira adequada para as análises subsequentes.

O material sedimentar foi encaminhado para o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde foi realizada a análise granulométrica seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 7181/2016 – Solo: Análise Granulométrica. Inicialmente, a amostra bruta foi separada e algumas amostras passaram por um processo de preparação que incluiu pesagem e peneiramento preliminar para a separação de grãos maiores e a eliminação de torrões. Para garantir a confiabilidade dos resultados, a análise foi realizada em duplicata, seguindo a prática recomendada para controle de qualidade.

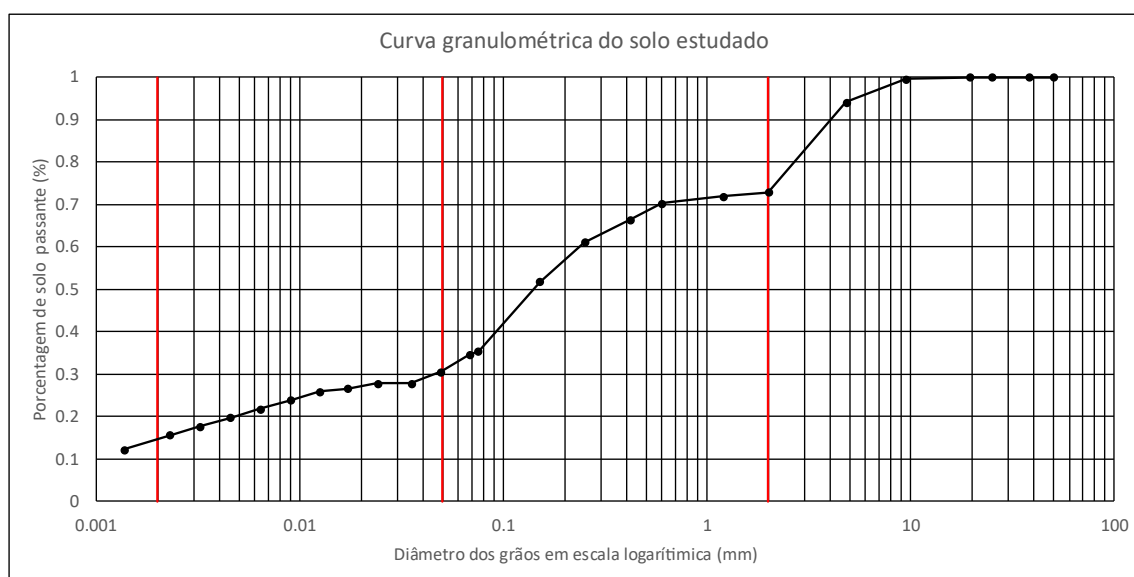
Após a preparação inicial, as amostras foram submetidas ao ensaio de sedimentação, conforme descrito no item 4.3 da NBR 7181/2016. Esse procedimento envolveu a dispersão do material

em provetas com solução dispersante e o posterior monitoramento da sedimentação ao longo de um período de 24 horas. As leituras foram realizadas com o auxílio de um densímetro, permitindo a determinação da distribuição granulométrica das partículas mais finas. Ao final do processo, foi realizada a etapa de peneiramento final para a separação das frações retidas, assegurando a caracterização detalhada dos sedimentos coletados.

Conforme mostra a Figura 44, a análise granulométrica indica que o solo estudado apresenta uma composição heterogênea, contendo frações significativas de cascalho, areia, silte e argila. A areia corresponde a uma parcela relevante, com aproximadamente 61% do material passando na peneira de 0,25 mm, evidenciando uma granulometria arenosa predominante.

A transição para frações mais finas é gradual, com o silte representando cerca de 26% do material para diâmetros próximos a 0,017 mm. Já a fração argilosa, correspondente a partículas menores que 0,002 mm, representa aproximadamente 12% do total.

Figura 44 - Curva granulométrica do depósito de sedimentos do reservatório do córrego Mumbuca

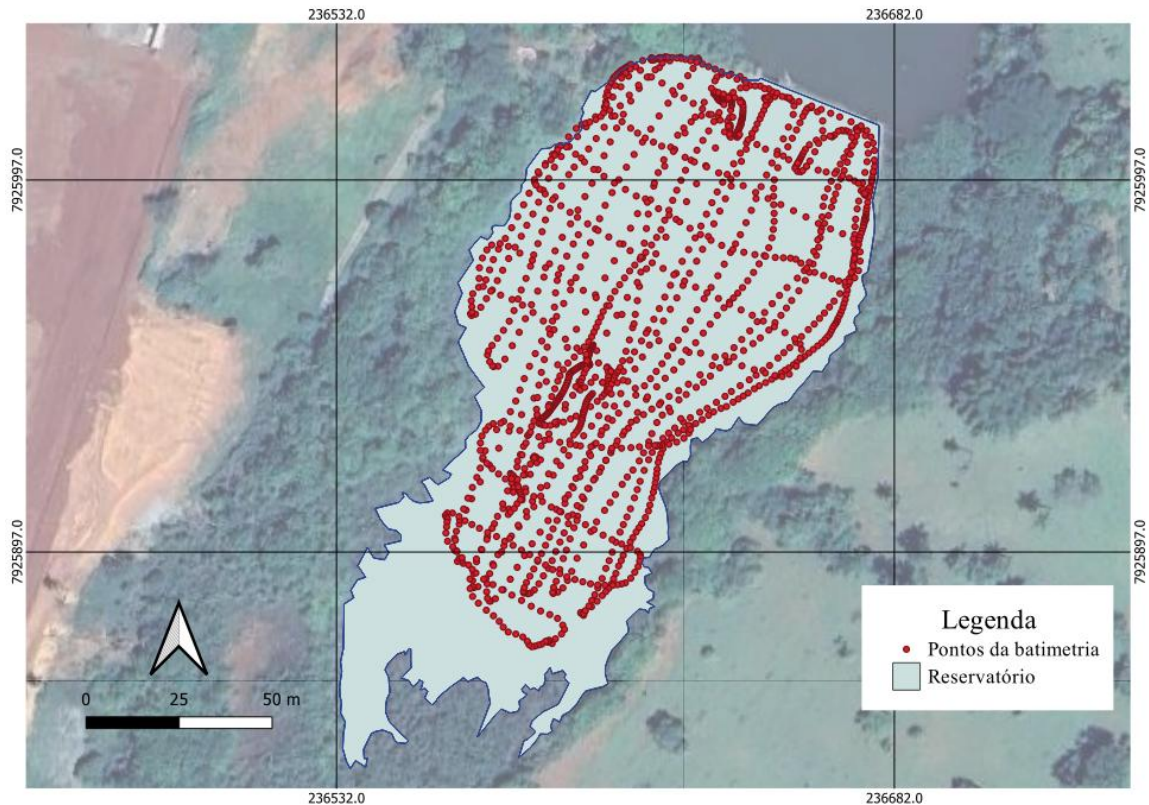


Fonte: Do Autor, 2025.

3.5 ADAPTAÇÃO DOS DADOS DE BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO

Nesta pesquisa, foram utilizados os dados batimétricos brutos disponibilizados por Cunha (2019) com a finalidade de gerar um Modelo Digital do Terreno (MDT), mais oportunamente um Modelo Batimétrico Digital (MBD) representativo do fundo do reservatório. A Figura 45 apresenta os pontos de batimetria considerados.

Figura 45 – Pontos de batimetria utilizados



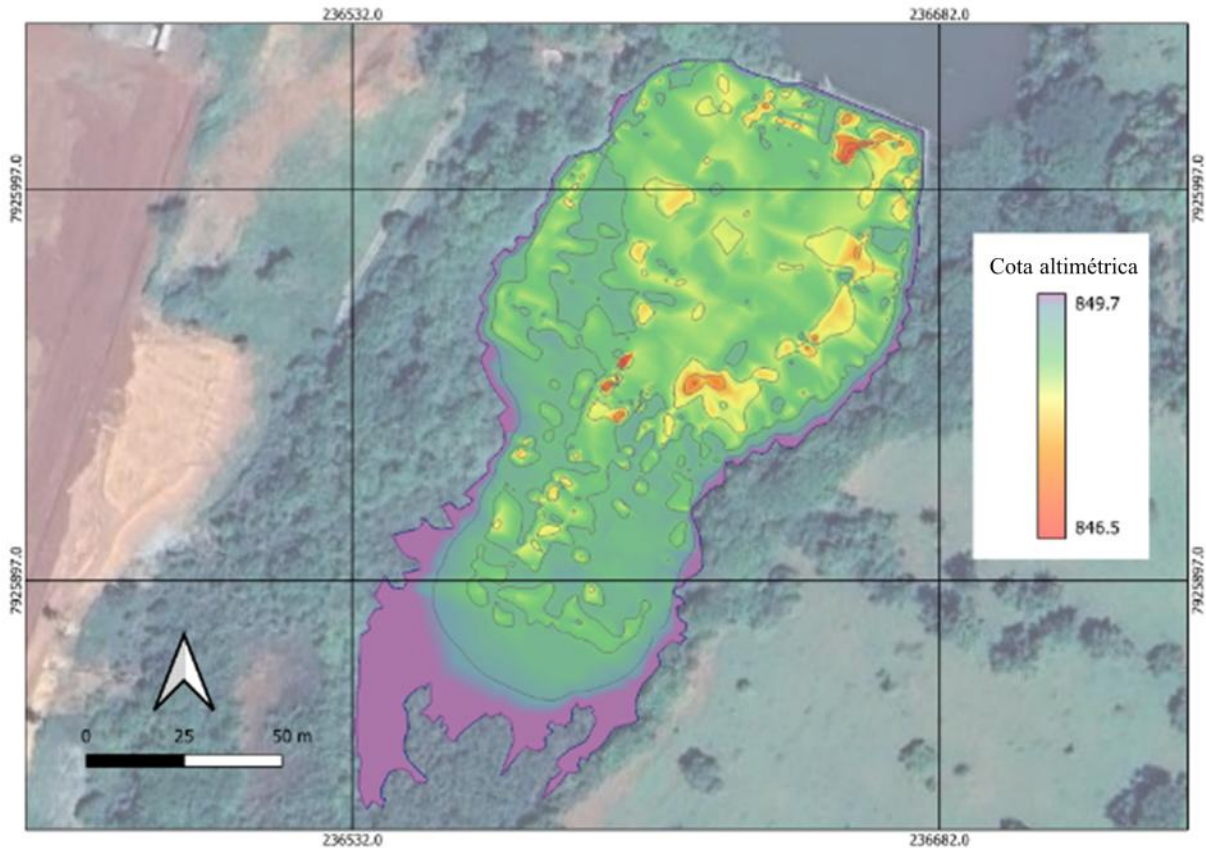
Fonte: Do Autor, 2025.

Os dados foram importados para o software QGIS a partir de um arquivo contendo as coordenadas e respectivas elevações (cotas de fundo). O limite do reservatório foi delimitado com base em imagens de satélite obtidas pelo Google, por meio do próprio QGIS. Cada ponto da superfície livre foi associado à cota de 849,78 m, de forma a manter um volume estimado de 11,1 hm³, valor próximo ao apresentado no trabalho de Cunha (2019).

A geração do Modelo Batimétrico Digital (MBD) foi realizada por meio da ferramenta TIN Interpolation do QGIS. Essa ferramenta cria uma superfície contínua composta por triângulos, conectando pontos vizinhos com base em suas elevações.

Durante o processo de interpolação, utilizou-se o campo de elevação dos pontos como atributo principal. O parâmetro Pixel Size foi definido como 0,01, o que determina a resolução espacial do raster de saída, influenciando o detalhamento do MBD gerado. A Figura 46 apresenta o produto resultante desse processo de interpolação.

Figura 46 – Visualização da batimetria do Modelo Batimétrico Digital (MBD)



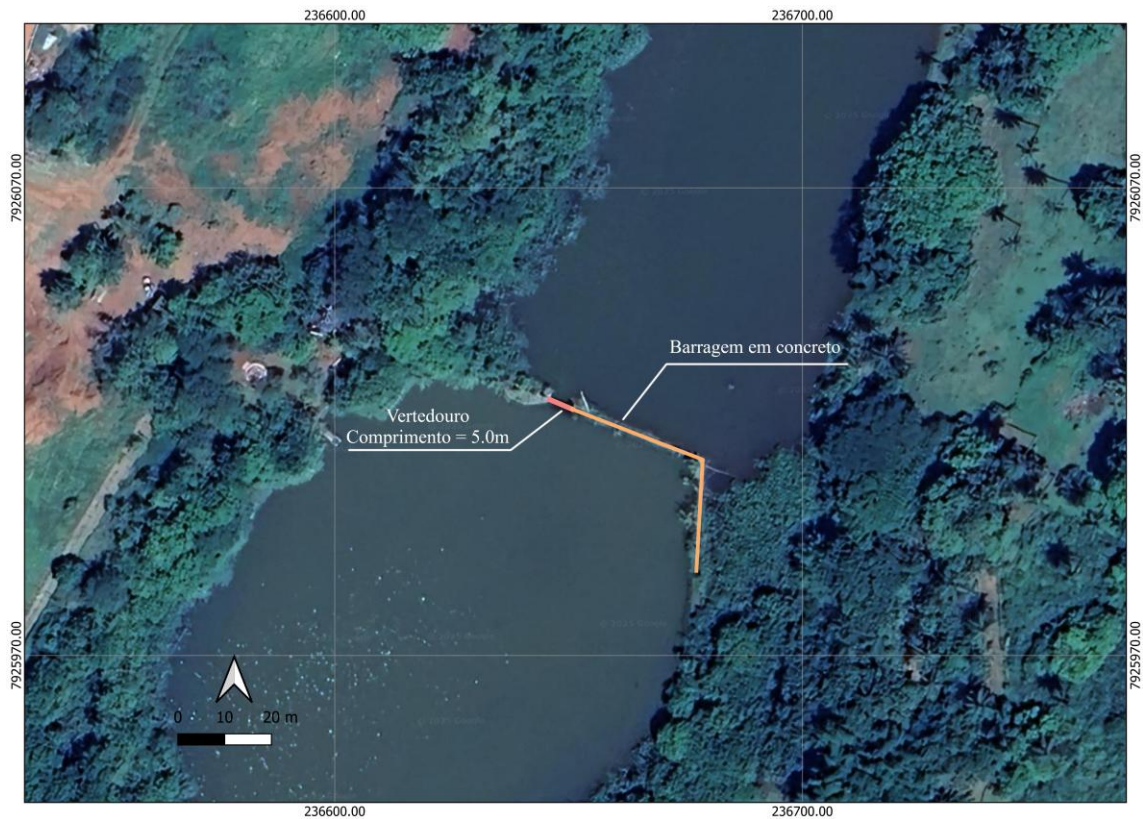
Fonte: Do Autor, 2025.

A partir do MBD gerado, a superfície foi exportada em formato GeoTIFF, com extensão .tif, para posterior utilização no software HEC-RAS.

3.6 ESTIMATIVA DAS DIMENSÕES DO VERTEDOURO

O reservatório estudado possui um sistema de extravasão em crista, configurado como um vertedouro. Para estimar suas dimensões, foram utilizadas imagens aéreas obtidas por drone, comparadas com medições aproximadas realizadas em imagens de satélite. A Figura 47 apresenta o ponto do vertedouro e sua dimensão estimada a partir das imagens do Google Satélite.

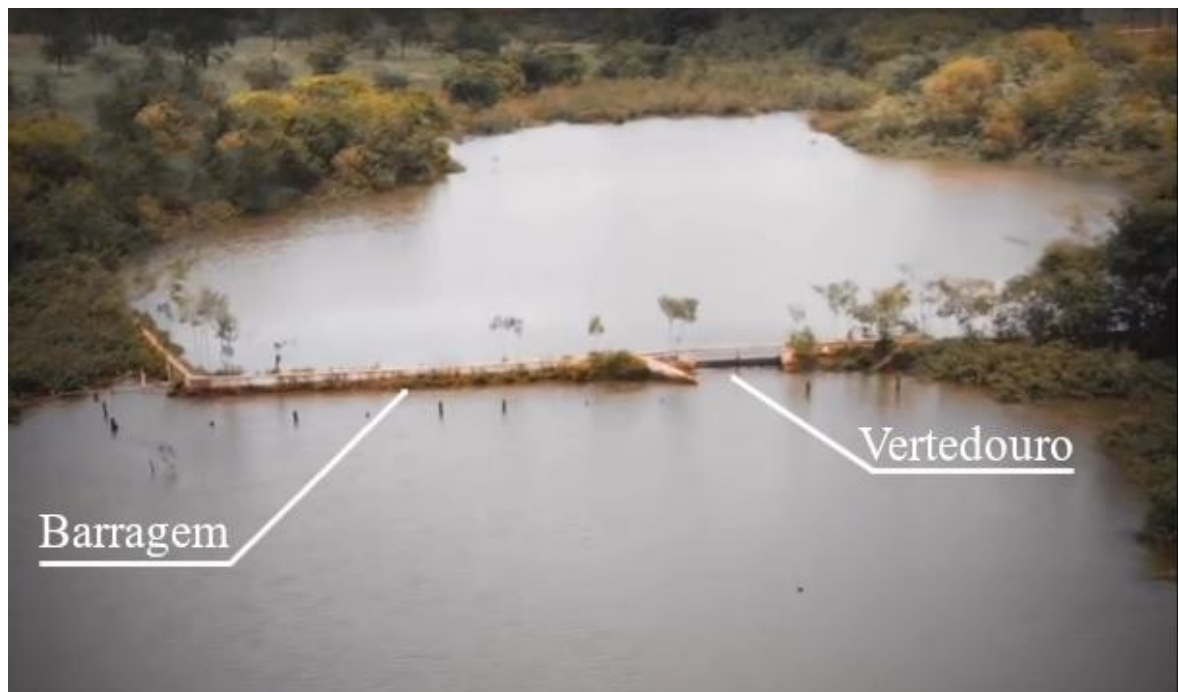
Figura 47 — Localização e estimativa de comprimento do vertedouro por imagem aérea



Fonte: Do Autor, 2025.

Já a Figura 48 exibe o vertedouro e a barragem em concreto, a partir de uma vista aérea.

Figura 48 - - Imagem aérea do vertedouro e da barragem do reservatório



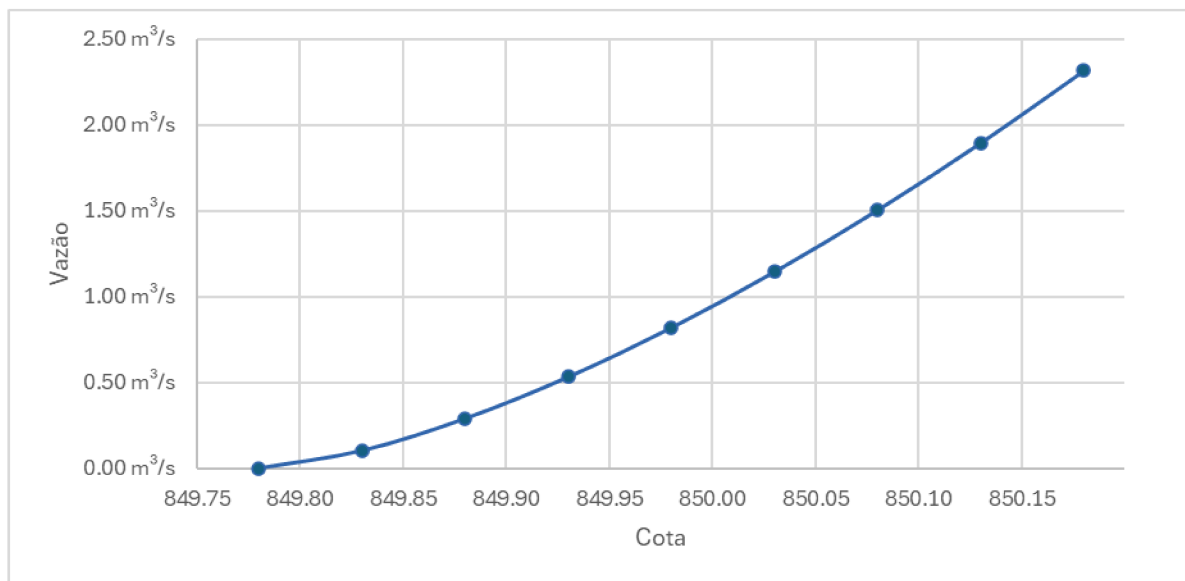
Fonte: Monte Drone Imagens Aéreas, 2024.

Com base na Figura 48, foi possível estimar a altura do vertedouro em aproximadamente 40 cm acima da cota de 849,78 m da superfície livre, por meio da medição dos pixels da imagem, considerando como referência uma medida conhecida de 5 metros. A partir dessas informações, foi possível configurar uma curva cota x vazão de saída para o reservatório. Para isso, utilizou-se a Equação (19), em que Q_s representa a vazão de saída, C_d é o coeficiente de descarga médio (adotado como 0,62), L o comprimento do vertedouro e H a carga hidráulica sobre a soleira, em metros.

$$Q_s = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{3/2} \quad (19)$$

Tomando como referência a soleira e o nível de água estimado em 849,78 metros, a Figura 49 apresenta a cota-vazão de vazão de saída do reservatório.

Figura 49 – Curva Cota x Vazão da saída do reservatório



Fonte: Do Autor, 2025.

3.7 PROGRAMA SILTINGZ

O programa SILTINGZ (ALAMY FILHO, 2020), desenvolvido em ambiente Excel com uso de macros em VBA, foi utilizado neste estudo para estimar a vida útil do reservatório, com base nos métodos de Brune, Churchill, Heineman e USDA-SCS. Trata-se de um programa que estima a evolução dos volumes de sedimentos acumulados no fundo de reservatórios, com o passar dos anos. Esse programa basicamente divide o reservatório em uma sequência de compartimentos ao longo da direção longitudinal, calculando a eficiência de retenção e,

consequentemente, os volumes depositados em cada compartimento. Para sistemas de pequeno porte, como é o caso do reservatório do córrego Mumbuca, é recomendável adotar apenas um compartimento. Isso porque foi observado que o modelo subestima o assoreamento de corpos de água divididos em compartimentos muito pequenos. O software é estruturado em três abas para inserção de dados e uma aba destinada à visualização dos resultados.

Na primeira aba, como mostra a Figura 50, foram inseridos os seguintes dados: a cota do nível d'água, fixada em 849,78 m; o número de compartimentos em que o reservatório seria dividido, sendo adotado apenas um compartimento devido ao pequeno porte do reservatório; e o ângulo, em graus, entre o eixo principal do reservatório e o eixo X (direção Oeste-Leste) da malha UTM, medido em 61,41°.

Figura 50 - Primeira aba do programa Siltingz

COTA DO NÍVEL DE ÁGUA (m)	POLÍGONO CIRCUNSCREVENTE		MODELO TOPOBATIMÉTRICO DIGITAL		
	X = E UTM (m)	Y = S UTM (m)	X = E UTM (m)	Y = S UTM (m)	COTA (m)
849.78	236645.4608	7926023.833	236539.5117	7925848.004	853.00
NÚMERO DE COMPARTIMENTOS	236641.6	7926023.85	236540.9344	7925848.004	853.00
1	236640.39	7926024.87	236542.357	7925848.004	853.00
ÂNGULO COM A DIREÇÃO X UTM (graus)	236637.99	7926025.52	236543.7797	7925848.004	853.00
61.41	236635.4	7926026.07	236545.2023	7925848.004	853.00
CALCULAR O VOLUME DO RESERVATÓRIO	236633.65	7926026.84	236546.625	7925848.004	853.00
VOLUME DO RESERVATÓRIO (hm3)	236631.93	7926027.52	236548.0476	7925848.004	853.00
0.011912273	236630.32	7926028.18	236549.4703	7925848.004	853.00
ÁREA INUNDADA (km2)	236629.43	7926029.2	236550.8929	7925848.004	853.00
0.012493963	236629.12	7926029.79	236552.3156	7925848.004	853.00
MAIOR COMPRIMENTO (m)	236627.29	7926029.8	236553.7382	7925848.004	853.00
184.3523798	236624.4	7926030.07	236555.1609	7925848.004	853.00
COMPR. DE COMPARTIMENTO (m)	236622.17	7926029.95	236556.5835	7925848.004	853.00
184.3523798	236620.98	7926030.01	236558.0062	7925848.004	853.00
	236620.39	7926030.16	236559.4288	7925848.004	853.00
	236619.87	7926029.95	236560.8515	7925848.004	853.00
	236618.85	7926029.98	236562.2741	7925848.004	853.00
	236616.62	7926029.93	236563.6968	7925848.004	853.00
	236614.22	7926029.14	236565.1194	7925848.004	853.00
	236611.08	7926028.08	236566.5421	7925848.004	853.00
	236610.86	7926028	236567.9647	7925848.004	853.00
	236610.86	7926028	236569.3874	7925848.004	853.00

Fonte: Do Autor, 2025.

Também foram inseridas as coordenadas X e Y do polígono circunscvente ao reservatório (a borda do reservatório) e as coordenadas X, Y e Z dos pontos batimétricos coletados. Tanto o polígono quanto os pontos de batimetria já foram apresentados na Figura 45. Com essas informações, o programa calcula automaticamente o volume do reservatório, a área da superfície livre, o comprimento do eixo principal e apresenta graficamente os pontos inseridos.

Na segunda aba, conforme ilustrado na Figura 51, foram especificadas as entradas de afluentes, podendo ser contribuições pontuais ou difusas. No presente estudo, foram considerados múltiplos pontos como entradas difusas no reservatório.

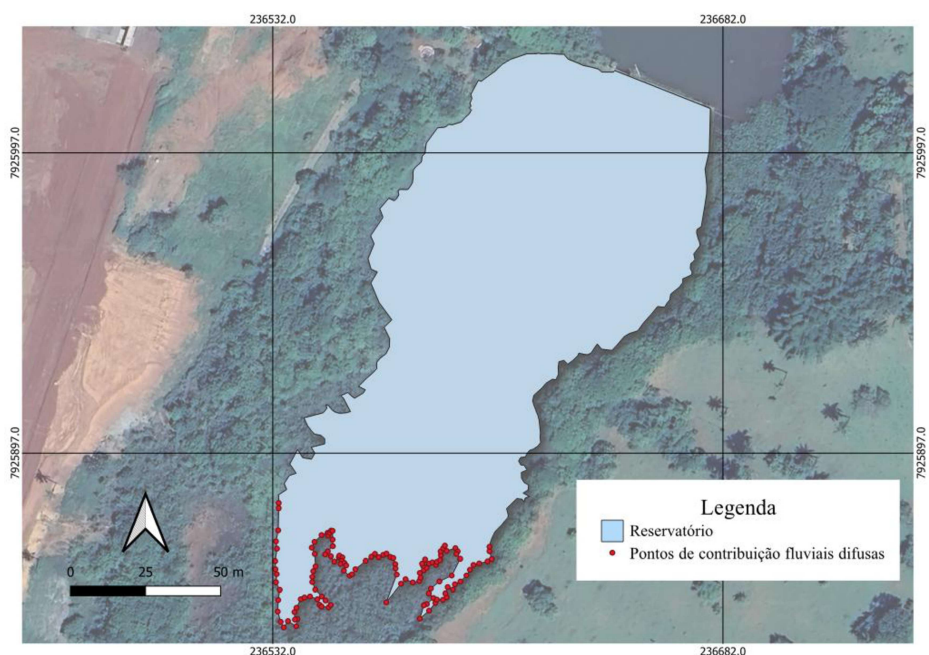
Figura 51 - Segunda aba do programa Siltinzg

ENTRADAS DE AFLUENTES - CONTRIBUIÇÕES FLUVIAIS (PONTUAIS) + DIFUSAS				SÉRIE FLUVIOMÉTRICA FONTE		CALCULAR A VAZÃO ESPECÍFICA FONTE
IDENTIFICAÇÃO	X = E UTM (m)	Y = S UTM (m)	ÁREA BACIA CONTRIBUINTE (km2)	ÁREA BACIA (km2):	18	Q° VAZÃO ESPECÍFICA (m3/s/km2)
				TEMPO (MÊS)	VAZÃO MÉDIA MENSAL (m3/s)	
Difusa	236533.862	7925880.168	0.14516129	1	0.700474115	0.038915229
Difusa	236533.862	7925878.475	0.14516129	2	0.654774571	0.036376365
Difusa	236533.694	7925871.036	0.14516129	3	0.467859317	0.025992184
Difusa	236532.942	7925867.358	0.14516129	4	0.36644201	0.020357889
Difusa	236533.276	7925864.934	0.14516129	5	0.352855659	0.019603092
Difusa	236532.691	7925860.838	0.14516129	6	0.181310822	0.010072823
Difusa	236532.775	7925858.164	0.14516129	7	0.191191805	0.010621767
Difusa	236533.193	7925856.492	0.14516129	8	0.183232124	0.010179562
Difusa	236532.942	7925853.733	0.14516129	9	0.170606425	0.009478135
Difusa	236534.196	7925851.226	0.14516129	10	0.220560281	0.012253348
Difusa	236533.694	7925847.882	0.14516129	11	0.352581187	0.019587844
Difusa	236533.527	7925844.037	0.14516129	12	0.472525337	0.026251408
Difusa	236534.53	7925840.61	0.14516129	13	0.633091303	0.035171739
Difusa	236535.533	7925838.688	0.14516129	14	0.731077714	0.040615429
Difusa	236536.954	7925840.861	0.14516129	15	0.408573422	0.022698523
Difusa	236539.713	7925839.106	0.14516129	16	0.357521678	0.019862315
Difusa	236540.131	7925841.53	0.14516129	17	0.279022761	0.015501268
Difusa	236539.295	7925841.362	0.14516129	18	0.192564164	0.010698009
Difusa	236539.128	7925843.87	0.14516129	19	0.201896203	0.011218456
Difusa	236539.796	7925845.291	0.14516129	20	0.170606425	0.009478135
Difusa	236541.217	7925848.133	0.14516129	21	0.170606425	0.009478135
Difusa	236542.471	7925848.718	0.14516129	22	0.18570237	0.010316798
Difusa	236544.31	7925849.053	0.14516129	23	0.398692439	0.02214958
Difusa	236546.734	7925848.133	0.14516129	24	0.489542584	0.02719681
Difusa	236547.486	7925846.294	0.14516129	25	0.477465828	0.026525879
Difusa	236548.155	7925845.709	0.14516129	26	0.534007006	0.029667056
Difusa	236550.495	7925845.458	0.14516129	27	0.43355035	0.024086131
Difusa	236551.248	7925846.211	0.14516129			

Fonte: Do Autor, 2025.

A Figura 52 apresenta a disposição desses pontos em relação ao reservatório. A área de contribuição atribuída a cada ponto foi determinada com base na área total de drenagem do reservatório (18,2 km²), dividida pelo número de pontos considerados. Nesta aba, também foram inseridas a série fluviométrica obtida por meio da regionalização de vazões e a área de contribuição total. Com esses dados, o programa gera automaticamente a série de vazão específica.

Figura 52 – Pontos de contribuição fluviais difusas



Fonte: Do Autor, 2025.

Na terceira aba, inseriu-se a curva chave de sedimentos estimada. Para isso, foi utilizado o gráfico gerado pelo programa desenvolvido com base no método de Schueler, tanto para a situação atual quanto para o cenário futuro, além da definição da função matemática que melhor representa a curva ajustada.

Por fim, na aba de resultados, o usuário deve selecionar o método de cálculo desejado, informar as características granulométricas dos depósitos (percentuais de argila, silte e areia), com base na curva granulométrica obtida, e definir o horizonte temporal da simulação. Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos na seção de Resultados.

3.8 HEC-RAS

O software HEC-RAS na sua versão 6.6 com modelagem bidimensional integrada na profundidade (2DH) foi utilizado neste estudo com o objetivo de realizar uma simulação hidrodinâmica integrada ao transporte de partículas de sedimentos, a fim de estimar o processo de assoreamento no reservatório. Essa simulação foi conduzida no modo bidimensional (2D) do HEC-RAS.

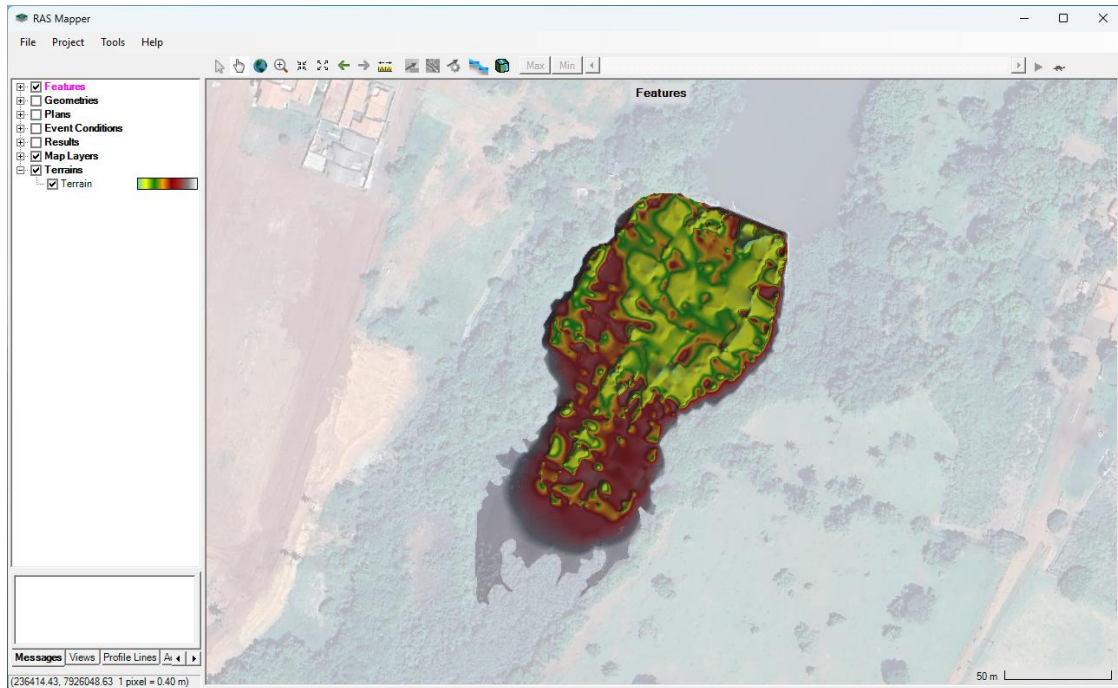
O projeto foi criado utilizando o Sistema Internacional de Unidades (SI), e, para evitar conflitos com o programa, as configurações regionais do sistema operacional foram ajustadas para o formato de data, hora e número correspondente ao padrão inglês (Estados Unidos). Como o HEC-RAS é um programa estadunidense, seu padrão não incorre em unidades do SI. Por isso é importante realizar essa mudança para unidades do SI, antes de proceder a qualquer alimentação de dados.

O equipamento utilizado para a simulação possui um processador Intel i7 10750H, placa de vídeo GTX 1650 Ti e 16 GB de memória RAM DDR4 com frequência de 2666 MHz, operando com o sistema Windows 11. Ressalta-se que a simulação de um período de aproximadamente 55 anos de assoreamento demandou elevado custo computacional, sendo o equipamento inteiramente dedicado à execução do processo durante o período de simulação.

Na janela RAS Mapper, o projeto foi configurado com um arquivo de projeção (.prj) nas coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Esse arquivo, obtido no site Spatial Reference, é um arquivo de texto que contém as informações da projeção cartográfica correspondente ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). Em seguida, foi inserida a batimetria do Modelo Batimétrico Digital (MBD), no formato GeoTIFF, previamente gerado

no QGIS. A Figura 53 apresenta o MDB já configurado no RAS Mapper, com a projeção adequada.

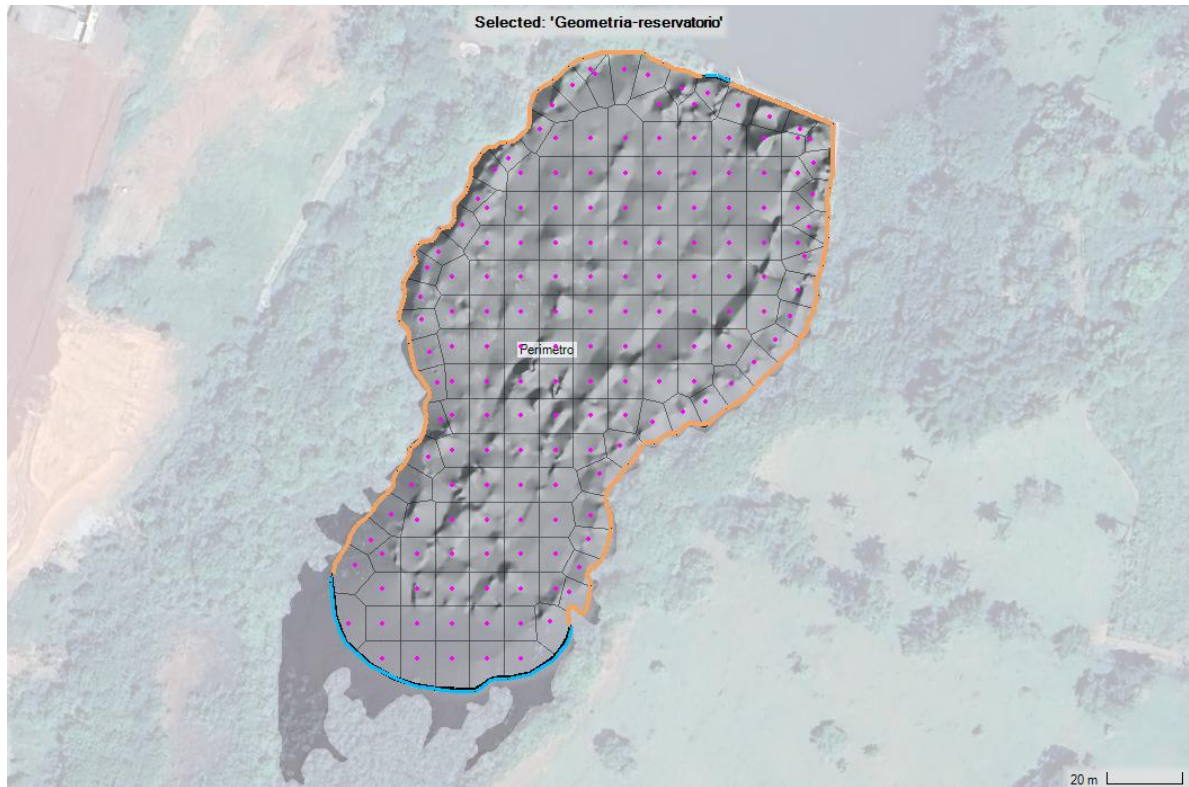
Figura 53 – Visualização Modelo Batimétrico Digital (MDB)



Fonte: Do Autor, 2025.

Posteriormente, foi criada uma geometria do tipo 2D Flow Areas para a delimitação da área de estudo. Após a definição do perímetro, estabeleceu-se o tamanho da malha computacional em $9,0 \text{ m} \times 9,0 \text{ m}$, com base em testes de sensibilidade que buscaram um equilíbrio entre a estabilidade numérica e o desempenho computacional. Adotou-se o valor de 0,035 para o coeficiente de rugosidade de Manning, conforme indicado na literatura. Definiram-se ainda as Breaklines, que representam regiões com restrições ao escoamento, bem como as linhas de condição de contorno a montante e a jusante. A Figura 54 mostra essas configurações, sendo as Breaklines representadas na cor laranja e as linhas de condição de contorno em azul.

Figura 54 – Visualização da 2D Flow Areas e breaklines no HECRAS



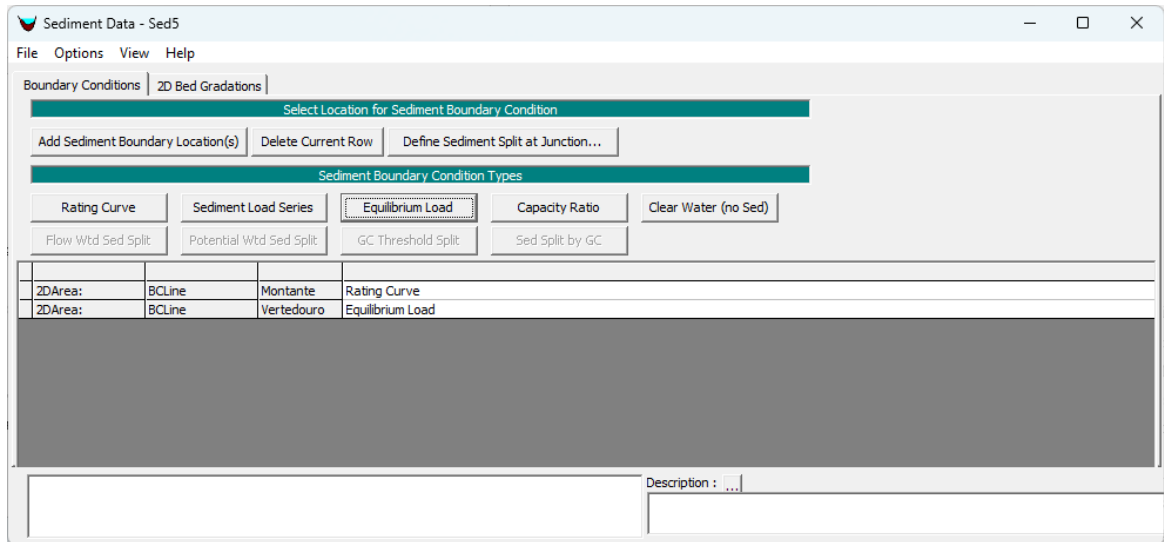
Fonte: Do Autor, 2025.

Para a simulação, utilizou-se o módulo Unsteady Flow Data, responsável pelo cálculo do escoamento variado no tempo com base nas equações de continuidade e de quantidade de movimento (equações de Saint-Venant). Para a condição de contorno a montante, adotou-se a opção Flow Hydrograph, com a inserção da série de vazões mensalmente regionalizadas, obtidas ao longo do desenvolvimento do estudo. O período simulado teve início em 01 de janeiro de 1970 e término em 05 de outubro de 2025. Nos alinhamentos de contorno de entrada (azuis) a inclinação da linha de energia foi ajustada para 0,005, visando distribuir a vazão ao longo da linha de condição de contorno. Na condição de contorno a jusante, foi utilizada a opção Rating Curve, com os dados da curva cota–vazão estimada para o vertedouro.

Conforme apresentado na Figura 55, na aba Sediment Data, foram criados dois planos de simulação: um correspondente à condição atual e outro à condição futura. Em ambos, inseriram-se os dados da curva granulométrica obtida no estudo, na aba 2D Bed Gradations. Para a condição de contorno a jusante, foi selecionada a opção Clear Water, assumindo que todos os sedimentos permanecem no interior do reservatório. Na condição a montante, o plano atual recebeu as cargas de sólidos suspensos totais calculadas pelo método de Schueler,

correspondentes ao uso do solo atual. Já no plano futuro, foram inseridas as cargas estimadas para o cenário de uso do solo futuro.

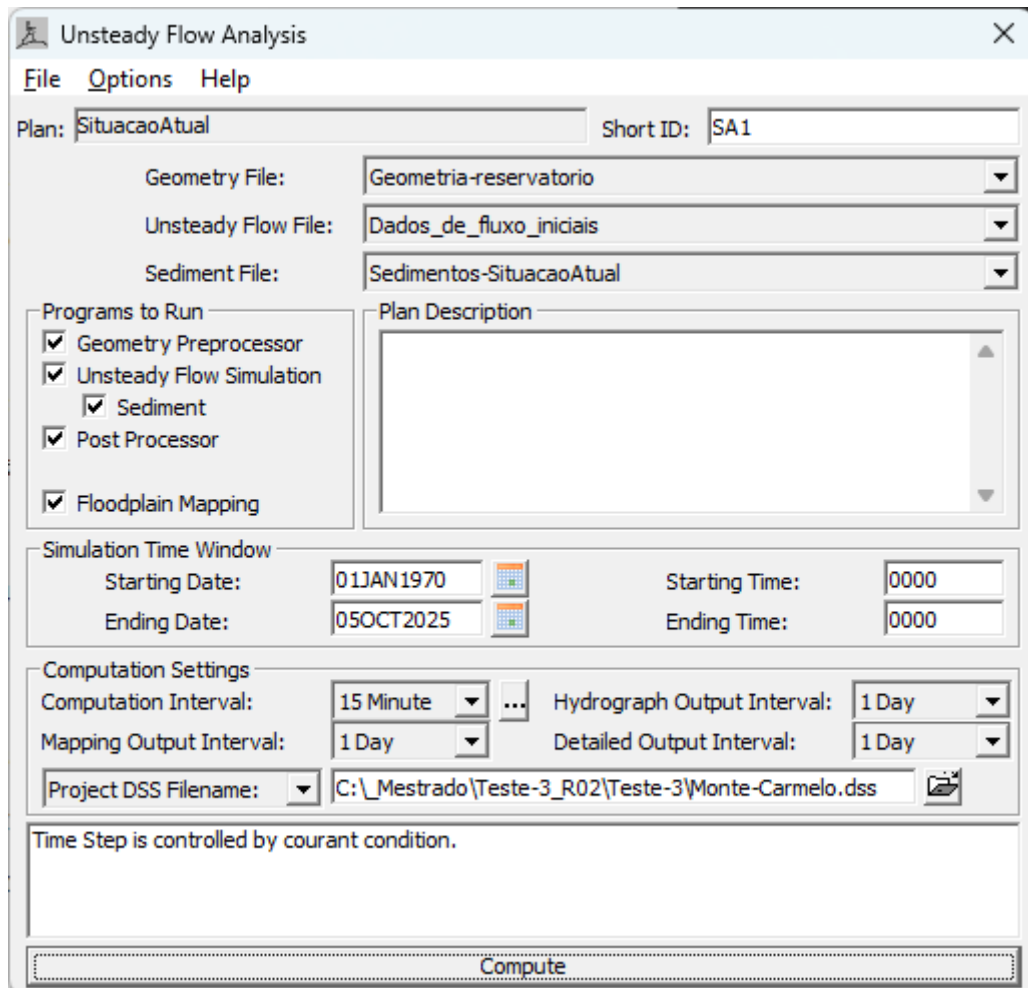
Figura 55 - Aba Sediment Data -HECRAS



Fonte: Do Autor, 2025.

Com todos os parâmetros configurados, foram elaborados dois planos de simulação (cenário atual e cenário futuro) idênticos em termos de geometria e parâmetros hidrodinâmicos, diferenciando-se apenas pelas condições de carga de sedimentos consideradas em cada situação de sedimentação. Na janela Unsteady Flow Analysis, foi configurado o processamento da geometria 2D, incluindo a simulação de fluxo variável, sedimentação e os recursos de pós-processamento do programa. O período simulado foi de 01 de janeiro de 1970 a 05 de outubro de 2025, com intervalo computacional de 15 minutos e gravação dos dados de saída a cada 1 dia. A Figura 56 mostra a janela de configuração do plano de simulação atual.

Figura 56 - Janela de simulação utilizando sedimentos no HECRAS

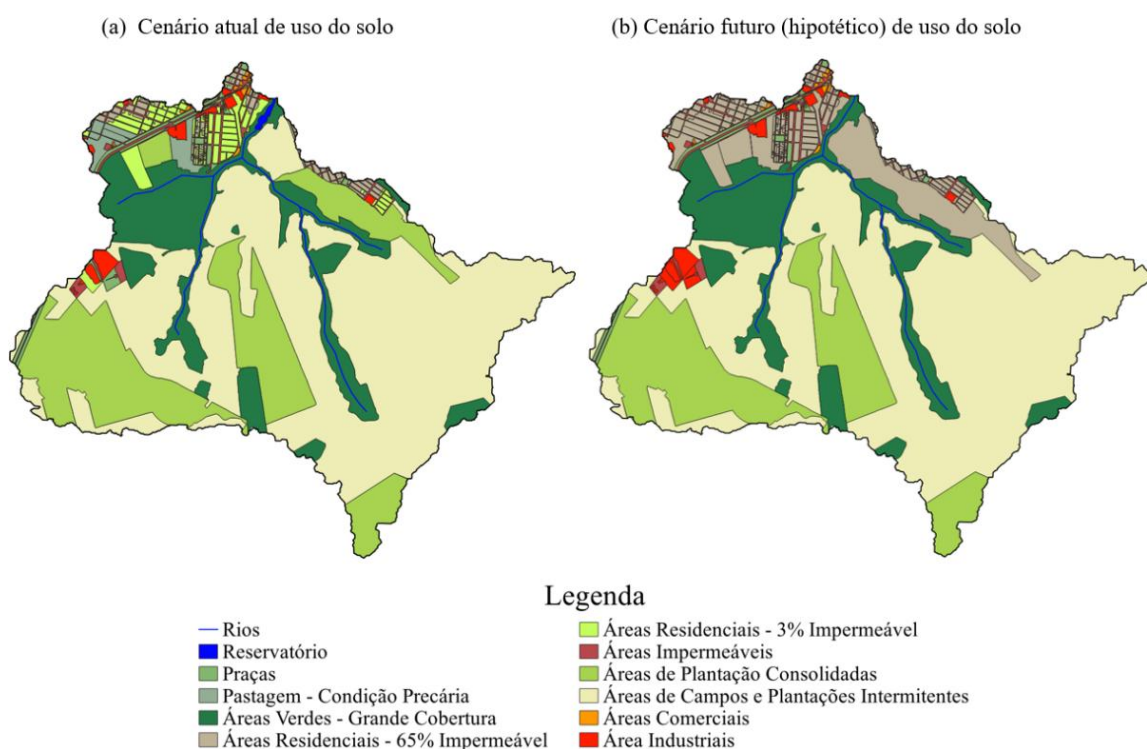


Fonte: Do Autor, 2025.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo estão organizados em duas partes principais. A primeira parte consiste na análise da carga de poluentes que afluem até o reservatório. Nesse contexto, são utilizados dois diferentes métodos para estimar a contribuição da bacia ao reservatório, permitindo uma compreensão da geração dos poluentes na bacia de contribuição. A segunda parte foca na estimativa de vida útil do reservatório, considerando a influência da deposição de sedimentos e a consequente perda de volume pelo assoreamento. Além disso, será analisada a situação atual da bacia de contribuição e um cenário projetado para os próximos dez anos, assumindo a total ocupação das áreas residenciais e lotes atualmente vazios como mostra a Figura 57.

Figura 57 - Bacia do reservatório do córrego Mumbuca: cenários de uso do solo considerados no estudo



Fonte: Do Autor, 2025.

Note-se que a diferença entre os dois cenários consiste no avanço da ocupação urbana, demarcada com áreas cinzas. No cenário atual, essa ocupação urbana representa 4.34% da área da bacia, ao passo que, no cenário futuro, a ocupação urbana avança para 11.70% da área total da bacia. Esse último cenário, embora hipotético, é viável, uma vez que os incrementos urbanos ocorrem a partir de áreas residenciais já estabelecidas no cenário inicial.

Essa abordagem possibilita uma avaliação dos impactos do crescimento urbano sobre a qualidade da água e os processos de assoreamento, permitindo inferir possíveis alterações nas taxas de aporte de sedimentos e de outros poluentes ao reservatório. Dessa forma, os resultados obtidos podem servir como subsídio para pesquisas futuras e estratégias de gestão e planejamento ambiental.

4.1 CARGAS POLUENTES

4.1.1 Modelo De Coeficiente De Exportação (ECM)

O modelo de coeficiente de exportação foi empregado neste estudo como uma ferramenta inicial para uma análise preliminar da bacia de contribuição, fornecendo parâmetros que permitem uma compreensão geral dos processos de exportação de poluentes. Ressalta-se que esse modelo não tem o propósito de fornecer valores absolutos e precisos, mas sim de indicar tendências e auxiliar a compreensão da influência do uso e ocupação do solo sobre a qualidade da água.

Com base nessa abordagem, foi elaborada a Tabela 15, na qual são apresentadas as concentrações dos poluentes nas situações atual e futura, considerando-se, neste último cenário, a total ocupação das áreas residenciais e dos lotes atualmente vagos. A análise comparativa entre os dois cenários, também disposta na Tabela 15, indica o percentual de incremento na concentração de cada poluente.

Tabela 15 - Resultados estimados pelo método ECM: Situação atual x Situação Futura

Poluente	Situação Atual	Situação Futura	% de Incremento
Sólidos Suspensos Totais	80.473 ton/km ² .ano	82.393 ton/km ² .ano	2.4%
Chumbo	0.762 ton/km ² .ano	0.803 ton/km ² .ano	5.4%
Cobre	0.069 ton/km ² .ano	0.087 ton/km ² .ano	27.3%
Zinco	0.002 ton/km ² .ano	0.003 ton/km ² .ano	25.7%
Fósforos Totais	0.006 ton/km ² .ano	0.007 ton/km ² .ano	25.4%
Nitrogênio Totais	0.021 ton/km ² .ano	0.026 ton/km ² .ano	24.0%

Fonte: Do Autor, 2025.

As cargas poluidoras mensais podem ser calculadas pelo produto entre as concentrações e as vazões médias mensais afluentes ao reservatório. Considerando que a ocupação urbana, introduzida no cenário hipotético, não interfere significativamente no aumento das vazões médias mensais, por ocorrer nas adjacências do reservatório e não nos fragmentos de bacia a

montante do mesmo, os incrementos percentuais de concentração tornam-se representativos dos incrementos percentuais de carga poluidora mensal.

Observa-se que os poluentes com maior aumento estimado foram o cobre, com incremento de 27,30%, e o zinco, com aumento de 25,70%. Em seguida, destacam-se os fósforos totais e o nitrogênio total, com variações de 25,40% e 24,00%, respectivamente. O chumbo apresentou um acréscimo mais moderado, de 5,40%, enquanto os sólidos suspensos totais registraram o menor incremento entre os constituintes avaliados, com aumento de apenas 2,40%. Esses resultados indicam uma tendência de intensificação na carga de nutrientes e metais pesados no cenário futuro, o que pode comprometer a qualidade da água e reduzir a eficiência do reservatório ao longo do tempo.

4.1.2 *Método simples de Schueler*

O método de Schueler, utilizado neste estudo, apresenta maior nível de detalhamento em relação ao modelo de coeficiente de exportação (ECM), uma vez que requer um conjunto mais abrangente de dados de entrada como o a precipitação. Isso permite uma representação mais elaborada da carga poluidora gerada na bacia, incorporando variáveis adicionais que possibilitam melhor adaptação às condições reais da área de estudo e, conseqüentemente, podem reduzir incertezas associadas às estimativas de carga difusa

A Tabela 16 apresenta as concentrações estimadas dos poluentes para as situações atual e futura, bem como o percentual de incremento entre os cenários. Observa-se que os maiores aumentos ocorreram para o zinco (13,90%), seguido pelos fósforos totais (7,80%) e pelos sólidos suspensos totais (7,70%). O chumbo, o nitrogênio total e o cobre apresentaram variações mais discretas, com aumentos inferiores a 5%. Esses resultados refletem diretamente a intensificação da urbanização de alta densidade na bacia, uma vez que, conforme demonstrado na Tabela 16, áreas urbanas de alta densidade apresentam concentrações significativamente superior desses poluentes em comparação a outros usos do solo. Por exemplo, o uso residencial de alta densidade apresenta concentrações médias de 0,058 mg/L para zinco, enquanto áreas de baixa densidade apresentam 0,022 mg/L.

Tabela 16 - Resultados estimados pelo método de Schueler: Situação atual x Situação Futura

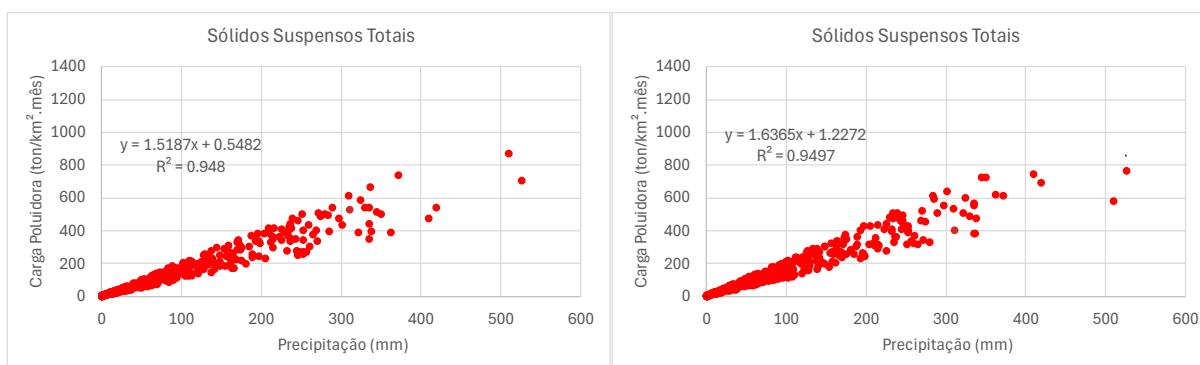
Poluente	Situação Atual	Situação Futura	% de Incremento
Sólidos Suspensos Totais	55.89 mg/L	60.19 mg/L	7.7%
Chumbo	2.23 µg/L	2.34 µg/L	4.8%
Cobre	4.53 µg/L	4.72 µg/L	4.1%
Zinco	22.45 µg/L	25.57 µg/L	13.9%
Fósforos Totais	0.95 mg/L	1.02 mg/L	7.8%
Nitrogênio Totais	3.10 mg/L	3.23 mg/L	4.3%

Fonte: Do Autor, 2025.

Esse cenário aponta para um possível comprometimento da capacidade de suporte do reservatório, tanto em termos de qualidade da água quanto nos processos de tratamento. O aumento nas concentrações de metais e nutrientes reforça a influência das mudanças no uso e ocupação do solo sobre a dinâmica de transporte de poluentes na bacia de contribuição.

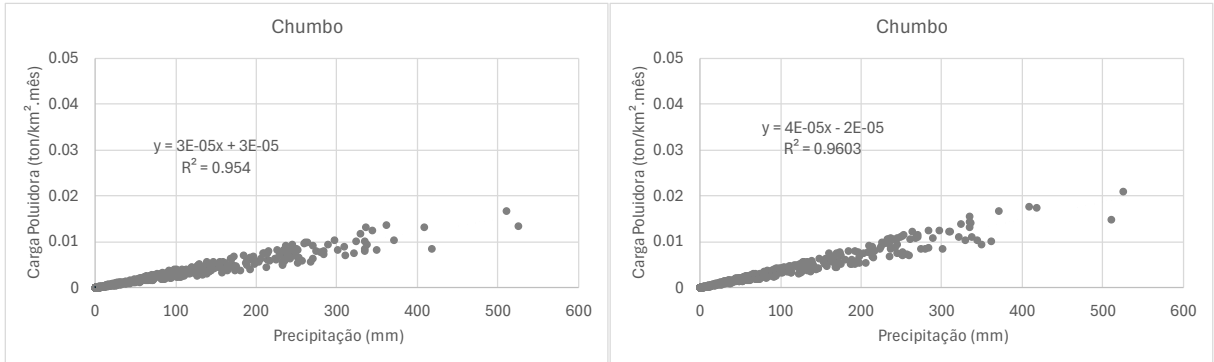
O programa desenvolvido permite visualizar de forma gráfica as diferenças entre as cargas poluidoras estimadas nas situações atual e futura, facilitando a interpretação dos resultados e aprimorando a análise comparativa entre os cenários simulados. Essa abordagem gráfica contribui para a identificação dos poluentes com maior sensibilidade às mudanças no uso do solo, auxiliando na tomada de decisão quanto às medidas de controle. Os Gráficos de 1 a 6 apresentam, respectivamente, os resultados comparativos das concentrações estimadas nas situações atual e futura para cada poluente analisado.

Gráfico 1 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Sólidos Suspensos Totais



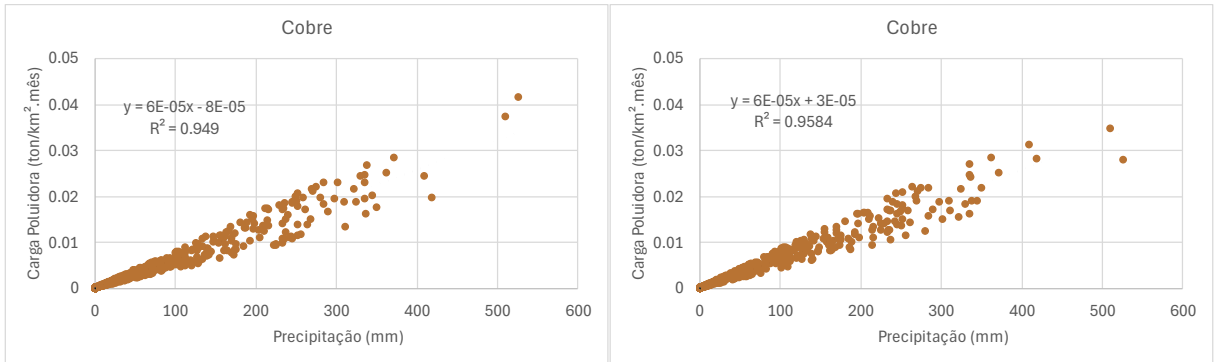
Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Gráfico 2 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal – Chumbo



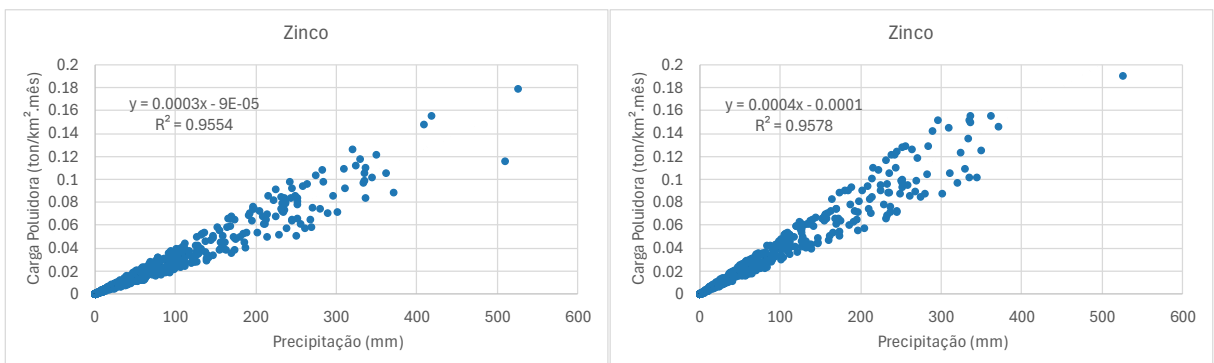
Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Gráfico 3 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal – Cobre



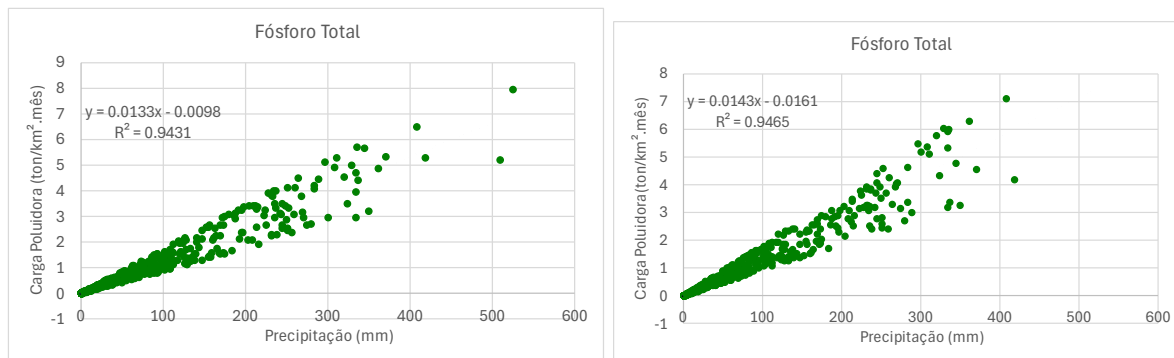
Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Gráfico 4 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Zinco



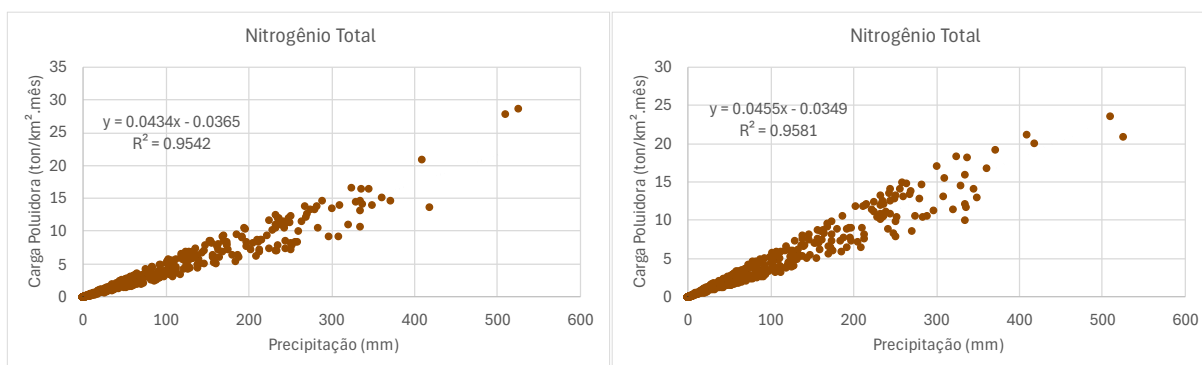
Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Gráfico 5 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Fósforos Totais



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Gráfico 6 - Carga Poluidora Específica x Precipitação mensal - Nitrogênio Totais



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Observa-se um aumento nos coeficientes angulares das regressões lineares entre carga poluidora e volume precipitado para todos os poluentes analisados no cenário futuro. Esse incremento está diretamente relacionado ao aumento das concentrações entre os cenários atual e futuro, conforme apresentado na Tabela 16, e evidencia uma maior taxa de geração de poluentes em função da precipitação. O comportamento é mais expressivo para o zinco e o chumbo, cujos coeficientes apresentaram acréscimos superiores a 13%, indicando maior sensibilidade desses metais pesados à intensificação do uso urbano do solo.

Para o fósforo total e o nitrogênio total, os aumentos nos coeficientes foram mais moderados, com variações de 7,8% e 4,3%, respectivamente, refletindo uma elevação consistente na exportação de nutrientes. O cobre apresentou uma variação discreta, acompanhando o pequeno

aumento de 4,1% em sua concentração, o que sugere estabilidade relativa na sua resposta às alterações de precipitação.

No caso dos sólidos suspensos totais, a variação no coeficiente angular da regressão linear foi de 1,5187 para 1,6365, representando um incremento de aproximadamente 7,8%. Esse aumento reforça a tendência de maior exportação de sedimentos no cenário futuro para um mesmo volume precipitado, atribuída à intensificação da impermeabilização e à redução da cobertura vegetal na bacia de contribuição. Tal incremento impacta diretamente os processos de assoreamento do reservatório, reduzindo sua vida útil e comprometendo sua capacidade de armazenamento.

4.2 ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO

A avaliação do assoreamento do reservatório do Córrego Mumbuca foi conduzida a partir da análise batimétrica computada pelo Qgis. Essa batimetria constituiu, portanto, o cenário inicial do reservatório. Nessa condição, o volume atual do reservatório foi estimado em aproximadamente 0,0119 hm³, servindo como referência para as projeções futuras de deposição de sedimentos.

Para estimar o tempo de vida útil do reservatório, o assoreamento foi calculado utilizando os programas SILTINGZ e HEC-RAS. Em ambas as ferramentas, os cálculos foram realizados com base na curva granulométrica dos sedimentos, na batimetria do reservatório, na regionalização das vazões e na curva-chave de sedimentos, elaborada a partir das concentrações de sólidos suspensos totais determinadas pelo método de Schueler. A escolha desse método se justifica pelo fato de a geração de poluentes estar relacionada à precipitação pluviométrica, permitindo considerar a influência dos volumes precipitados sobre a carga de sedimentos transportada até o reservatório.

4.2.1 ESTIMATIVAS PELO SILTINGZ

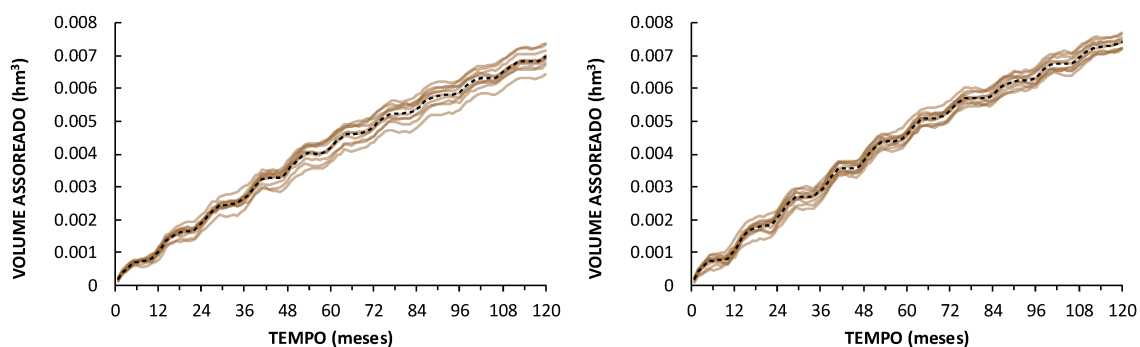
No SILTINGZ, foram aplicados três métodos disponíveis no programa: Churchill, Brune e Heineman. Para cada método, foram realizadas dez simulações, e a média dos resultados foi adotada para análise comparativa, tanto para a situação atual quanto para a futura.

A realização de múltiplas simulações no SILTINGZ se justifica pela forma como o programa trata a entrada de dados de concentração de sedimentos. O modelo utiliza uma abordagem

estocástica, aplicando variações aleatórias em torno de um valor médio de concentração, com base em um coeficiente de variação predefinido, o que visa representar a variabilidade natural do sistema. Dessa forma, foram realizadas dez simulações para cada método (Churchill, Brune e Heineman), e a média dos resultados foi adotada para fins comparativos, reduzindo os efeitos de flutuações aleatórias e garantindo maior robustez nas estimativas de deposição sedimentar. Para alimentar o modelo, foi utilizada uma série sintética de vazão média mensal regionalizada, construída a partir dos dados históricos das estações da região, conforme discutido anteriormente. A relação entre precipitação mensal e descarga de sedimentos (Qs^*) foi estabelecida com base em regressões lineares obtidas a partir do método de Schueler, possibilitando transformar a série de chuvas em uma sequência de cargas mensais de sedimentos afluentes ao reservatório.

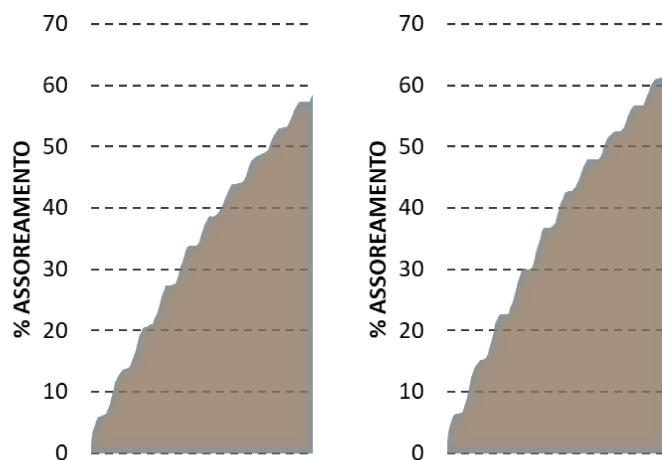
A Figura 58 apresenta os resultados obtidos pelo método de Churchill, sendo que, no lado direito, está representada a situação atual e, no lado esquerdo, a situação futura. Observa-se que, na situação atual, o volume assoreado foi de $0,0069 \text{ hm}^3$ em 10 anos simulados, enquanto na situação futura foi de $0,0074 \text{ hm}^3$, indicando um incremento de 6,6% no mesmo período, conforme evidenciado na Figura 59.

Figura 58 - Média das simulações do volume assoreado na simulação de 10 anos pelo método de Churchill



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

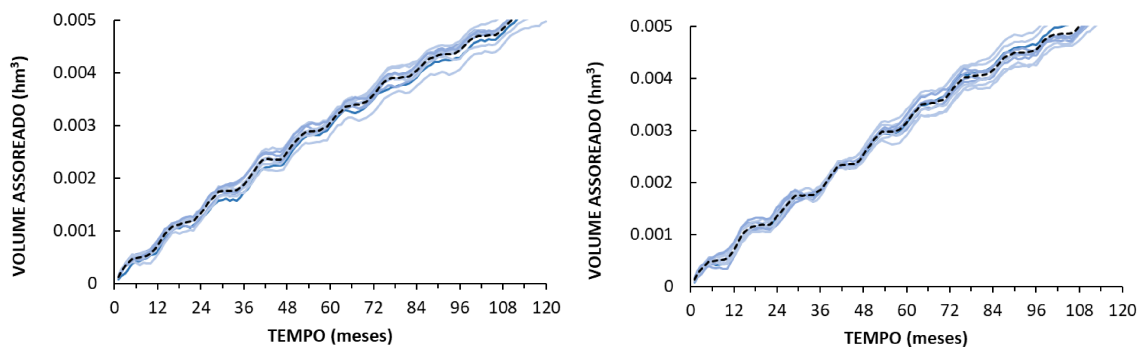
Figura 59 - Porcentagem do volume assoreado do reservatório pelo método de Churchill, considerando intervalo de 10 anos.



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

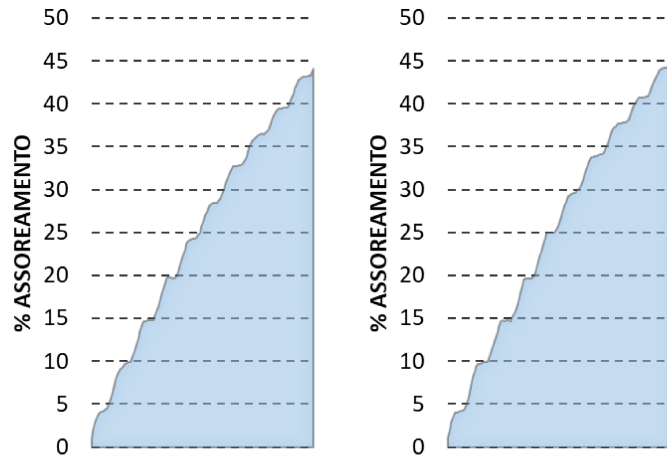
No método de Brune, o volume assoreado na situação atual foi de 0,0052 hm³, passando para 0,0054 hm³ na simulação futura, como ilustrado na Figura 60 (lado esquerdo, situação atual; lado direito, situação futura). Embora a diferença visual entre os cenários não seja marcante, os resultados indicam um aumento aproximado de 2,55%, conforme apresentado na Figura 61.

Figura 60 - Média das simulações do volume assoreado na simulação de 10 anos pelo método de Brune



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

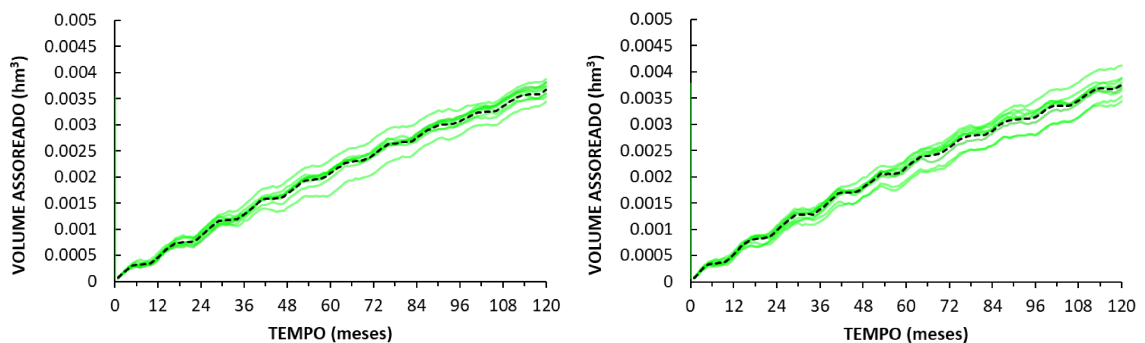
Figura 61 - Porcentagem do volume assoreado do reservatório pelo método de Brune, considerando intervalo de 10 anos.



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

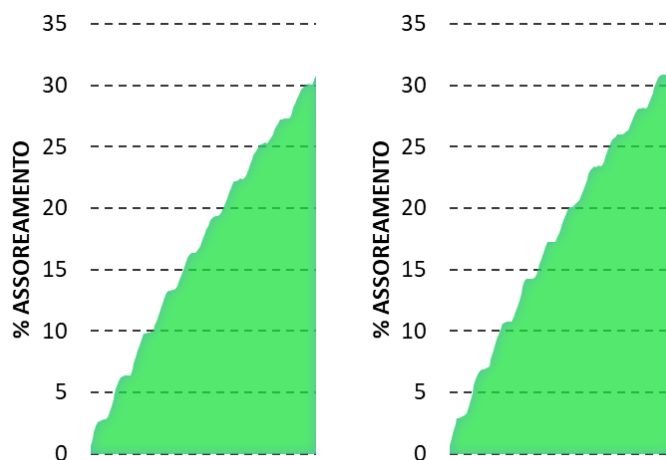
Já no método de Heineman, o volume assoreado na situação atual foi de 0,0037 hm³, enquanto na situação futura foi de 0,0038 hm³, conforme mostrado na Figura 62 (lado esquerdo, situação atual; lado direito, situação futura). Assim como no método de Brune, a diferença gráfica é pouco perceptível, mas os resultados apontam um incremento de aproximadamente 2,32%, como evidenciado na Figura 63.

Figura 62 - Média das simulações do volume assoreado na simulação de 10 anos pelo método de Heineman



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

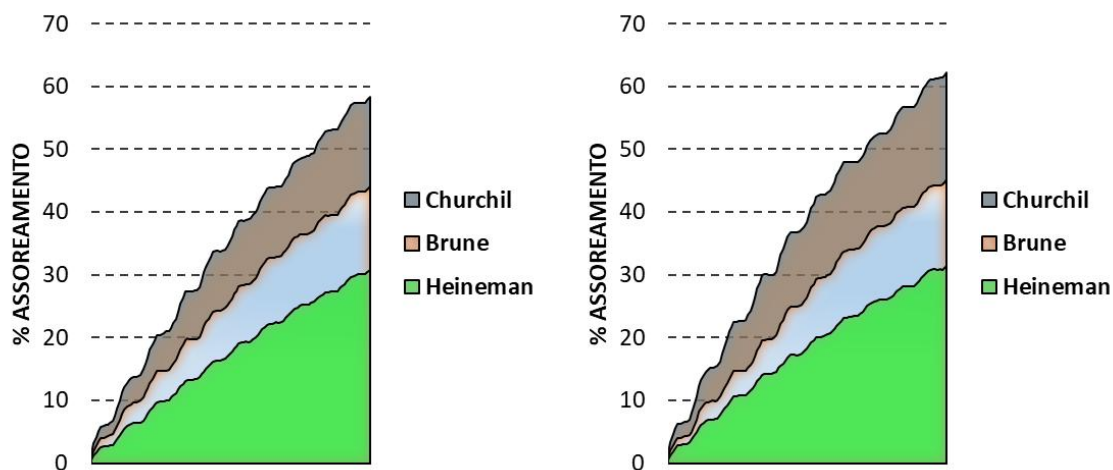
Figura 63 - Porcentagem do volume assoreado do reservatório pelo método de Heineman, considerando intervalo de 10 anos.



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

Para uma melhor visualização das diferenças percentuais de assoreamento entre os cenários, foi elaborada a Figura 64, na qual são comparadas as porcentagens de assoreamento estimadas para a situação atual (lado esquerdo) e futura (lado direito).

Figura 64 - Comparação da porcentagem do volume assoreado do reservatório entre os métodos utilizados, considerando intervalo de 10 anos.



Fonte: Do Autor, 2025. Esquerda: Situação atual; Direita: Projeção futura

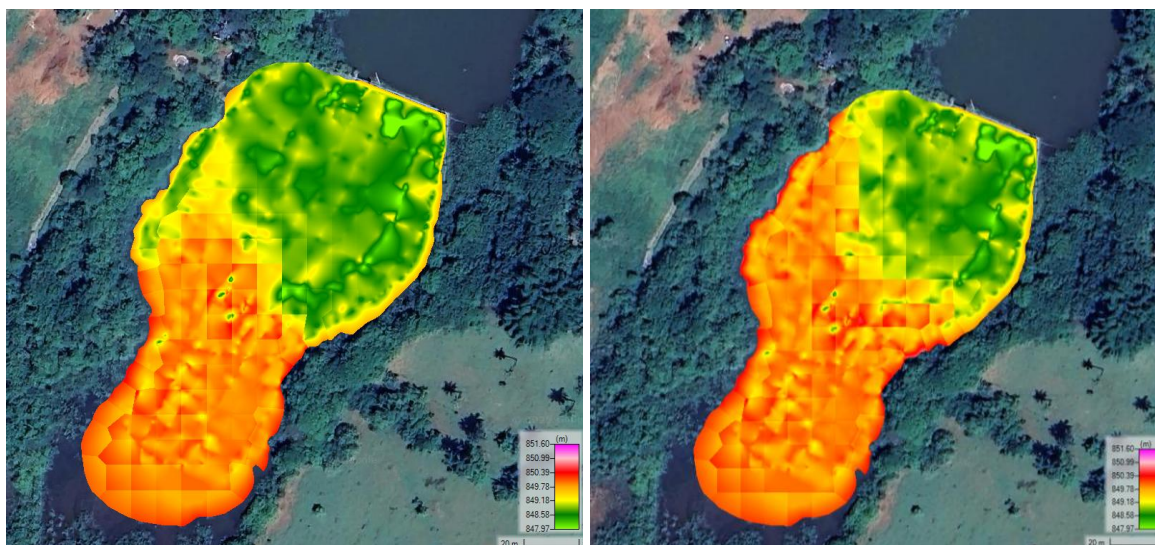
Com base nesses resultados, estima-se que, no período de 10 anos, o reservatório poderá assorear entre 30,77% e 58,41% no cenário atual, resultando em uma vida útil projetada de 17

a 33 anos. No cenário futuro, a estimativa de assoreamento varia entre 31,48% e 62,30%, reduzindo a vida útil projetada para 16 a 31 anos.

4.2.2 ESTIMATIVAS PELO HEC-RAS

A modelagem hidrossedimentológica realizada em escoamento bidimensional, promediado ao longo da profundidade (2DH), no HEC-RAS também indicou um aumento na taxa de assoreamento do reservatório no cenário de urbanização total. A Figura 65 apresentam a evolução do assoreamento ao longo de 5 e 10 anos para a situação atual. Observa-se que as áreas de menor profundidade são as primeiras a serem afetadas pelo processo de deposição sedimentar. Já na simulação de 10 anos, nota-se que o assoreamento avança progressivamente em direção às áreas mais profundas do reservatório.

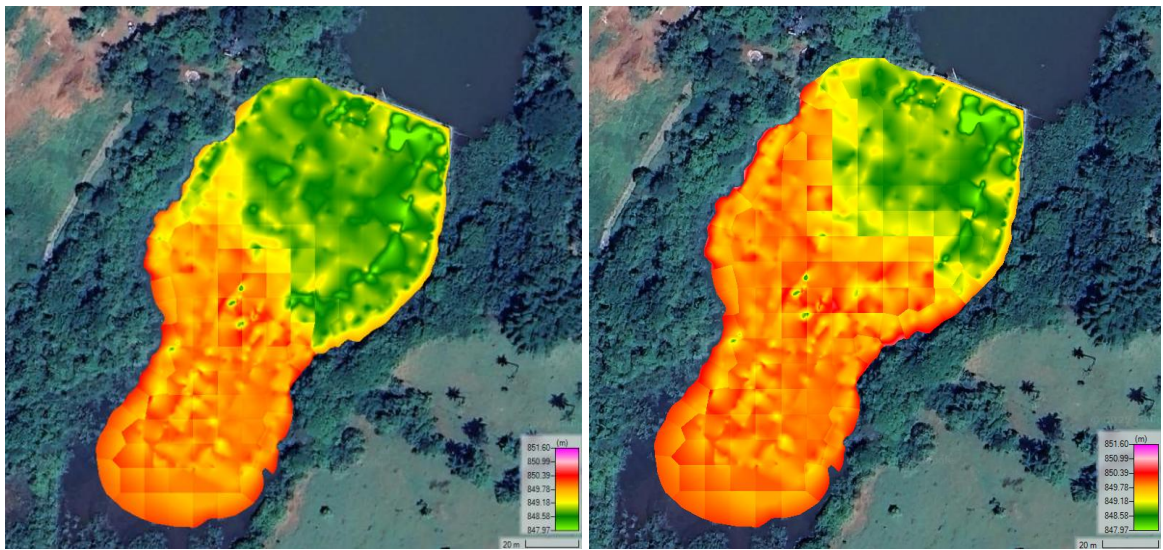
Figura 65 - Evolução da mancha de assoreamento estimada para intervalos de 5 e 10 anos, considerando cenário de uso do solo atual



Fonte: Do Autor, 2025.

A Figura 66 mostra, à esquerda, a simulação para o cenário futuro após 5 anos, e, à direita, após 10 anos. Destaca-se que, no cenário de urbanização total, o avanço do assoreamento é mais acentuado e ocorre em ritmo acelerado em relação à situação atual. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento nas cargas de sedimentos provenientes da bacia de contribuição, resultante da intensificação da urbanização e da consequente ampliação de áreas impermeáveis, que favorecem a geração de escoamento superficial e transporte de sedimentos para o reservatório.

Figura 66 - Evolução da mancha de assoreamento estimada para intervalos de 5 e 10 anos, considerando cenário futuro de uso do solo



Fonte: Do Autor, 2025.

Os resultados da simulação indicam que, após dez anos, o assoreamento do reservatório já começa a comprometer a captação de água realizada pelo DMAE para fins de abastecimento público. A elevação progressiva do fundo do reservatório, causada pela deposição de sedimentos, reduz a profundidade útil na região da captação, o que pode afetar a eficiência do sistema e aumentar os riscos de interrupção no fornecimento, especialmente em períodos de estiagem. A Figura 67 destaca o ponto de captação utilizado pelo DMAE, permitindo visualizar sua posição em relação à superfície assoreada ao final do período analisado.

Figura 67 - Ponto de captação de água realizada pelo DMAE



Fonte: Do Autor, 2025.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar o assoreamento e a influência da poluição difusa no reservatório do Córrego Mumbuca, avaliando os impactos do uso do solo na qualidade da água e na disponibilidade hídrica para abastecimento público. Para isso, foram empregados modelos hidrossedimentológicos e simulações computacionais, permitindo uma abordagem quantitativa e preditiva sobre os processos de sedimentação e sobre estimativa de cargas poluidoras na bacia de contribuição do reservatório.

A partir da aplicação dos modelos Coeficiente de Exportação (ECM) e Método Simples de Schueler, foi possível estimar as cargas poluidoras de diferentes constituintes ou substâncias, incluindo sólidos suspensos totais, metais pesados (chumbo, cobre e zinco) e nutrientes (fósforo e nitrogênio). Os resultados demonstraram que a intensificação da urbanização eleva a carga de sedimentos e de poluentes afluentes ao reservatório. Essas tendências indicam a necessidade de ações preventivas e de mitigação para reduzir os impactos ambientais associados ao escoamento superficial e à degradação da qualidade da água, como o aumento de áreas vegetadas nas zonas urbanas, a implantação de sistemas de drenagem sustentável como valas de infiltração, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, a construção de bacias de retenção ou detenção para contenção de picos de vazão e sedimentação e o controle do uso de fertilizantes e insumos agrícolas nas áreas rurais.

É importante ressaltar que tanto o método de Schueler quanto o método de ECM dependem de estudos prévios para a determinação da concentração de poluentes por uso do solo. Durante esta pesquisa, foram adotadas tabelas que contêm essas concentrações mais especificadas para diferentes tipos de uso do solo. No entanto, percebeu-se uma falta de dados brasileiros dentro deste contexto, o que torna interessante que pesquisas futuras trabalhem na calibração desses coeficientes para áreas mais detalhadas dentro de um cenário de uso do solo nacional.

A modelagem do assoreamento, realizada por meio dos softwares SILTINGZ e HEC-RAS, permitiu avaliar a evolução temporal dos depósitos sedimentares, sendo possível, no caso do HEC-RAS, identificar as áreas mais suscetíveis à deposição de sedimentos. Os cenários analisados no SILTINGZ indicaram que, na situação atual, o reservatório poderá sofrer um assoreamento entre 30,77% e 58,41% em um horizonte de 10 anos, enquanto, no cenário de urbanização futura, esse percentual poderá variar de 31,48% a 62,30%, evidenciando o impacto do avanço da urbanização na intensificação do assoreamento. De forma consistente, as

projeções da dinâmica sedimentar obtidas no HEC-RAS reforçam esse comportamento, indicando que as áreas de menor profundidade são as primeiras a serem impactadas, com avanço gradual do assoreamento para as áreas mais profundas, comprometendo, em médio prazo, a capacidade útil do reservatório e, conseqüentemente, o abastecimento hídrico de Monte Carmelo – MG.

Dessa forma, este estudo contribui para o aprimoramento do conhecimento sobre os impactos do uso do solo na dinâmica de assoreamento e na qualidade dos recursos hídricos, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias de manejo e planejamento ambiental voltadas à sustentabilidade de reservatórios destinados ao abastecimento público. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de ações preventivas e de um planejamento ambiental integrado, visando assegurar a disponibilidade hídrica e a qualidade da água para as gerações futuras.

Por fim, sugere-se que a partir de campanhas posteriores que envolvam batimetria e coletas de amostras hidrossedimentológicas, possam colaborar para a aferição da modelagem aplicada para o reservatório Mumbuca, além da previsão mais assertiva da sua vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAMY FILHO, J. E. Software for reservoir silting forecast based on sediment trapping efficiency methods. **Revista Brasileira Engenharia Civil**. v.1. n. 1. 2021. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/rbengcivil/article/view/55900>. Acesso em: 22 set. 2024.

AMARAL, D. R. **Estimativa Do Assoreamento Do Reservatório Do Bom Jardim A Partir De Modelos De Eficiência De Retenção De Sedimentos**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/23953>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Base Nacional de Usos da Água e as Resoluções ANA nº 92 e nº 93/2021. **Boletim do SNIRH**. 2022. Disponível em: < <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/search?keyword=usos%20da%20%C3%A1gua> >. Acesso em: 15 fev. 2025.

APRÍGIO, P. O. **Avaliação de Modelos de Simulação de Cargas Difusas em Bacias Urbanas**. 2012. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. Disponível em: < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17102012-150047/pt-br.php> >. Acesso em: 15 fev. 2025.

AUTODESK. **O que é o Autodesk InfraWorks?** 2025. Disponível em: < <https://www.autodesk.com/br/products/infracore/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> >. Acesso em: 15 fev. 2025.

BAIERLE, M., VALENTINI, J., PANIZ, C., MORO, A., BARBOSA JUNIOR, F., GARCIA, S. C. Possíveis efeitos do cobre sanguíneo sobre parâmetros hematológicos em idosas. **Jornal Brasileiro de Patologia e Medicina Laboratorial**. v.46, n.6, p-463-470. 2010. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/jbpm/a/C9bTrTP6BmHYXgyScV3SdCj/?format=pdf&lang=pt> >. Acesso em: 15 fev. 2025. <https://doi.org/10.1590/S1676-24442010000600006>

BOYD, P. M.; GIBSON, S. A. Regional Sediment Management (RSM) Modeling Tools: Integration of Advanced Sediment Transport Tools into HEC-RAS. **ERDC/CHL CHETN-XIV-36**. 2014. U.S. Army Corps of Engineers. Disponível em: < <https://erdc-library.erdcren.dren.mil/items/81b728f7-6d26-4ef8-e053-411ac80adeb3> >. Acesso em: 15 fev. 2025.

CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. **Caminhos de geografia**, v. 6, n. 14, p. 62-69, 2005. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15371>. Acesso 15 jul. 2024. <https://doi.org/10.14393/RCG61415371>

CARVALHO N. O; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS P. M. C.; LIMA J. E. F. W. **GUIA DE AVALIAÇÃO DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais/entidades/guia-avaliacao-assoreamento-reservatorios-aneel-2000.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Zinco. **FIT - Ficha de Informação Toxicológica**. 2017. Disponível em < <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/05/Zinco.pdf>>. Acesso em: 15 fev 2025.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357**. 17 mar. 2005. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

CORNELLI, R., SCHNEIDER, V. E., BORTOLIN, T. A., CEMIN, G., SANTOS, G. M. **Análise da Influência do Uso e Ocupação do Solo na Qualidade da Água de Duas Sub-Bacias Hidrográficas do Município de Caxias do Sul**. 2016. Disponível em: < <https://sou.uces.br/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/1017>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

COSTA, E. S. **Estudo de otimização do aproveitamento hídrico superficial no alto curso do Rio Uberaba, UPGRH-GD8**. 2015. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: < https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14217?locale=pt_BR>. Acesso em: 15 fev. 2025.

COSTA, A. M. **Estimativa da concentração de sólidos suspensos em águas opticamente complexas a partir de sensores remotos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas. Disponível em: <

<https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/5327/1/Estimativa%20da%20concentra%C3%A7%C3%A3o%20de%20s%C3%B3lidos%20suspensos%20em%20%C3%A1guas%20opticamente%20complexas%20a%20partir%20de%20sensores%20remotos.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

CUNHA, S. R. **Estudo batimétrico da represa do DMAE e utilização de geotecnologias para análise da ocupação do entorno**. 2019. Monte Carmelo. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25799>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

DING, X.; SHEN Z.; HONG Q.; YANG Z.; WU Z.; LIU R. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River. **Journal of Hydrology**, v. 383, n. 3-4, p. 233-244, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409008336>. Acesso em: 10 jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.039>

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Monte Carmelo**. 2013. Monte Carmelo: Prefeitura Municipal de Monte Carmelo. Disponível em: <<https://www.dmae.montecarmelo.mg.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

FORTES, A. C., BARROCAS, P. R., KLIGERMAN, D. C. **A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso**. 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sdeb/a/MScwKFMGMHc9j5yv49ZwhHM/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

FUNASA - Fundação Nacional De Saúde (BRASIL). **Manual de saneamento**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/506>. Acesso em: 13 ago. 2024.

GARCIA, J. M., MANTOVANI, P., GOMES, R. C., LONGO, R. M., DEMANBORO, A. C., BETTINE, S. C. **Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos**. 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sn/a/DvNMBqxxQbSvQ4xhtQv36Ts/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

GIBSON, S.; CRAIN, J. Modeling Sediment Concentrations during a Drawdown Reservoir Flush: Simulating the Fall Creek Operations with HEC-RAS. **ERDC/TN RSM-19-7**. 2019.

Disponível em: < <https://erdc-library.erdcdren.mil/items/67f7122c-5c68-4df8-b669-d9d7ca1bd6da>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

HALUCH, F. C.; RODRIGUES, G. M.; BURY, H.; HALUCH S. M. Remoção de nitrogênio amoniacal em efluentes industriais – implantação em estação de tratamento – caso real. **Revista F&T**, v. 28, n. 130, 2025. Disponível em: <https://revistaft.com.br/remocao-de-nitrogenio-amoniaco-em-efluentes-industriais-implantacao-em-estacao-de-tratamento-caso-real/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

HELMINIAK, J.; GIBSON, S. **Bloomsbury Dam Removal: Simulating Flood Risk Downstream of Passive Sediment Releases with a One-Dimensional Sediment Transport Model**. 2019. Disponível: < https://www.researchgate.net/figure/Bloomsbury-Dam-Removal-Site_fig1_334654845>. Acesso em: 15 fev. 2025.

HILLSBOROUGH COUNTY. **Rocky/Brushy Creek Watershed Management Plan: chapters 1-15**. Tampa: Hillsborough County, Stormwater Management Section, 2007. Disponível em: <https://hillsborough.wateratlas.usf.edu/upload/documents/Rocky-Brushy-Creek-WMP-All-Parts.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

JOVINO, E. S., ANGELINI, R., COSTA, C. W., BRESSIANI, D. A., CUNHA, K. P. **Impactos do uso e cobertura do solo na produção de sedimentos em área de manancial peri-urbano tropical**. 2022. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/sn/a/X3GCTg8RMckG55wbF7MtPTH/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 15 fev. 2025. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)

JOHNES, P.J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. **Journal of Hydrology**. 1996. n. 183, p. 323–349. Disponível em: < Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. >. Acesso em: 15 fev. 2025. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)

LIN, J. P. Review of Published Export Coefficient and Event Mean Concentration (EMC) Data. **WRAP Technical Notes Collection (ERDC TN-WRAP-04-3)**. 2004. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. Disponível em: <www.wes.army.mil/el/wrap>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MAIA, A. G. **As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18022007-204402/en.php>. Acesso em 16 ago. 2024.

MENESES FILHO, A. S.; TUCCI, C.E.M. Impacto da urbanização na produção anual de cargas poluentes, com incerteza. 2003. **Anais do 6o Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos países de língua oficial portuguesa**. Lisbon, pp. 889-917. Disponível em: <https://www.aprh.pt/6_silusba/6silusba-vol3_APRH_LF_889_.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

NCDENR – North Carolina Department of Environment and Natural Resources Division of Water Quality. **Updated Draft Manual Updated Draft Manual of Stormwater Best of Stormwater Best Management Practices**. 2025. Disponível em: <<https://p2infohouse.org/ref/41/40159.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

NOGUEIRA, F. F. **Métodos para monitoramento e estimativa de cargas poluidoras difusas em bacias hidrográficas**. 2020. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-05112020-112944/pt-br.php>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

OMS - Organização Mundial da Saúde. **Guias para la calidad del agua potable: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. (4º)**. 2011. Disponível em: <<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

PALU, M. C. **ATUALIZAÇÃO QUANTO AO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS NO BRASIL**. 2022. Disponível em <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/188/XV-ENES0005-1-0-20220929-141656.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RAUEN, W. B.; SILVA, M. G.; HILGERT, S.; SOTIRI, K.; KNAPIK, H. G.; FERNANDES, C. V. S.; DZIEDZIC, M.; SCHEER, M. B.; BLENINGER, T. B. Avaliação do assoreamento em reservatórios: análise crítica com base em reservatório de abastecimento público em região urbanizada. In: XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos / I Partículas das Américas, Vitória, ES, Brasil, 24 a 28 de setembro de 2018. **Anais [...]**. Vitória: ABRHidro, 2018. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4062>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RECKHOW, K. H.; BEAULAC M. N.; SIMPSON J. T. **Modeling Phosphorus Loading and Lake Response Under Uncertainty – A Manual and Compilation of Export Coefficients.**

East Lansing: Michigan State University, Department of Resource Development, 1980.

Disponível em: <

https://www.academia.edu/2606491/Modeling_phosphorus_loading_and_lake_response_under_uncertainty_A_manual_and_compilation_of_export_coefficients>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RIBEIRO, A. A. **Caracterização dos parâmetros de qualidade de água do Rio Aurá, Belém-Pará: aplicação de índice de qualidade malasiano (DOE-IQA).** 2019. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Pará. Disponível em:

https://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/13762/1/Dissertacao_CaracterizacaoParametrosQualidade.pdf. Acesso em: 13 fev. 2025.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos (2ª ed.).** Brasil: RiMa Editorial. 2023.

RODRIGUES, A. A., COSTA, E. S., MATSUOKA, J. V. **AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE MONTE CARMELO/MG, A PARTIR DO PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO.** 2019. Disponível em: <

[file:///C:/Users/gimas/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/_Dowloads/1614-Texto%20do%20Artigo-5801-1-10-20190211%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/gimas/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/_Dowloads/1614-Texto%20do%20Artigo-5801-1-10-20190211%20(1).pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RODRIGUES, R. L., SAIANI, C. C., VERÍSSIMO, M. **IMPACTOS AMBIENTAIS E INVESTIMENTOS EM ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL.** 2022. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 35, pp. 37-54. Disponível em: <

<https://ddd.uab.cat/record/266580>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SANTOS, M. G., ROCHA, G. A., PORTELLA, A. R. **Impacto da agricultura na qualidade da água: uma breve revisão.** 2022. Disponível em: <

https://www.researchgate.net/profile/Aline-Portella/publication/361100190_Impact_of_agriculture_on_water_quality_a_brief_review/links/63286f1b071ea12e36466c62/Impact-of-agriculture-on-water-quality-a-brief-review.pdf?origin=journalDetail&_tp=eyJwYWdlIjoiam91cm5hbERldGFpbCJ9>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; DE CESARE, G. Reservoir sedimentation. 2016.

Journal of Hydraulic Research, 54(6), 595-614. Disponível em: <

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686.2016.1225320>>. Acesso em: 15 fev. 2025. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>

SCHUELER, T. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs**. 1987. Metropolitan Washington Council of Governments. Washington, DC. Disponível em: < <https://www.mwcog.org/documents/1987/07/01/controlling-urban-runoff-bmp-stormwater/>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SIMÕES, J. M.; ALMEIDA, F. T.; ULIANA, E. M.; VENDRUSCULO, L. G. **Uso de sensoriamento remoto no monitoramento de sólidos em suspensão do reservatório de uma usina hidrelétrica na transição Cerrado-Amazônia**. *Gaia Scientia*, v. 15, n. 3, p. 69-88, 2021. Disponível em: < <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1138716/1/AP-Uso-sensorimento-remoto-2021.pdf> >. Acesso em: 15 fev. 2025. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2021v15n3.57559>

SILVA, L. R., & PASSOS, C. J. **CONTROLE DE SEDIMENTOS EM RIOS E RESERVATÓRIOS**. 2022. Disponível em: < <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/188/XV-ENES0008-1-0-20220928-174635.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SOUZA, I. D. **Mapa Metabólico da Intoxicação por Chumbo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Bioinformática) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: < <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24620> >. Acesso em: 15 fev. 2025.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater – Best management practices and detention for water quality drainage and CSO management**. 1993. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS Guides and Tutorials**. 2025. Disponível em: < <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/hgt/latest>>. Acesso em: 15 fev 2025.

VAN RIJN, L. C. **Sedimentation of sand and mud in reservoirs in rivers**. Disponível em: <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Reservoirsiltation2013.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2024.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4^a ed., v. 1. Belo Horizonte: UFMG. 2018.

ZENDRON, R. Mecanismos de neurotoxicidade e doenças neurológicas relacionadas à intoxicação por metais pesados. 2015. **Revista Brasileira de Nutrição Funcional**, pp. 45-51.