



Universidade Federal
de Campina Grande



Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Centro de Tecnologia de Recursos Naturais (CTRn)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais (PPGEGRN)

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE ROMPIMENTO DA
BARRAGEM SANTA TERESA, MICROBACIA DO RIO QUIXUDI, NA
ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE SOLEDADE-PB**

LÁZARO AVELINO DE SOUSA

Orientador: Sérgio Murilo Santos de Araújo

Campina Grande, 2025

LÁZARO AVELINO DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM SANTA
TERESA, MICROBACIA DO RIO QUIXUDI, NA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO
DE SOLEDADE-PB**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Área de concentração: Gestão de Recursos Naturais

Orientador: Sérgio Murilo Santos de Araújo

Campina Grande

2025

S725a

Sousa, Lázaro Avelino de.

Avaliação dos impactos de rompimento da barragem Santa Teresa, microbacia do Rio Quixudi, na área urbana do município de Soledade-PB / Lázaro Avelino de Sousa. – Campina Grande, 2025.

173 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.

"Orientação: Prof. Dr. Sérgio Murilo Santos de Araújo".

Referências.

1. Barragem de Santa Teresa – Soledade (PB). 2. Reservatório de Água. 3. Rompimento de Barragem. 4. Análise Hidromorfológica – Rio Quixudi. 5. Análise Ambiental – Rio Quixudi. 6. Modelagem Hidrodinâmica – Barragem de Santa Teresa – Soledade (PB). 7. Categoria de Risco (CRI). 8. Dano Potencial Associado (DPA). 9. Processamento de Dados - Sensoriamento Remoto. 10. Rio Temporário. 11. Semiárido – Paraíba. I. Araújo, Sérgio Murilo Santos de. II. Título.

CDU 627.82(813.3)(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Lázaro Avelino de Sousa

"AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM SANTA TERESA, MICROBACIA DO RIO QUIXUDI, NA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE SOLEDADE-PB"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 11/03/2025

Dr. Sérgio Murilo Santos de Araújo (Orientador PPGEGRN).

Dr. Hugo Moraes de Alcântara /PPGEGRN (Examinador Interno).

Dr. **José Otávio Aguiar /PPGEGRN** (Examinador Interno).

Dr. **Hamilcar José Almeida Filgueira/UFPB** (Examinador Externo).

Dr. **João Damasceno/UEPB**(Examinador Externo).



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO MURILO SANTOS DE ARAUJO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/03/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE OTAVIO AGUIAR, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2025, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **HUGO MORAIS DE ALCANTARA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2025, às 19:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Damasceno, Usuário Externo**, em 06/04/2025, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5277745** e o código CRC **804E8F76**.



Documento assinado digitalmente
HAMILCAR JOSE ALMEIDA FILGUEIRA
Data: 07/04/2025 18:51:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Referência: Processo nº 23096.007693/2025-10

SEI nº 5277745

Aos meus pais
Inácio Avelino e Jovelina Barbosa de Sousa Avelino
e tios
Enock Barbosa de Sousa (*in memoriam*)
Ana Avelino de Sousa (*in memoriam*)
e Maria José de Sousa (*in memoriam*)
com amor,
dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Campina Grande, pela excelência no ensino, pesquisa e extensão ofertados de forma pública e democrática, externo minha gratidão.

A todos os que fazem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, agradeço pelo acolhimento e pelo tratamento a mim dispensados durante todo o tempo em que permaneci no programa.

Às professoras Dra. Ângela Maria Cavalcanti Ramalho, Dra. Dayse Luna Barbosa, Dra. Isabel Lausanne Fontgalland, Dra. Janaína Barbosa da Silva, Dra. Maria de Fátima Martins, Dra. Maria de Fátima Nóbrega Barbosa e Dra. Patrícia Hermínio Cunha Feitosa, com as quais cursei as disciplinas da grade curricular do curso, agradeço por todo ensinamento.

Ao meu orientador, professor Dr. Sérgio Murilo Santos de Araújo, por toda a orientação e pela amizade que cultivamos durante esse percurso de troca de experiências e construção de conhecimento, dedico minha gratidão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa, sem a qual não seria possível a realização da pesquisa, agradeço imensamente.

Ao curso de Licenciatura em Geografia, por me acolher nas atividades de estágio docência, estendo minha gratidão.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa da tese, professores Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira, Dr. Hugo Moraes de Alcântara, Dr. João Damasceno, Dr. José Dantas Neto, Dr. José Otávio Aguiar, Dr. Rafael Albuquerque Xavier e Dr. Saulo Roberto de Oliveira Vital, agradeço pelas colaborações.

Às minhas amigas irmãs Hilda Carla Freire dos Santos e Hildênia Karoline Freire dos Santos, por todo apoio moral e ajuda de custos que sempre me dispensaram, minha eterna gratidão.

Aos meus amigos Dr. Antônio Pereira Cardoso da Silva Filho e Dr. Kleiton Wagner Alves da Silva Nogueira, pelo acolhimento e hospedagem completa quando precisei pernoitar em Campina Grande e pelo apoio moral que me dão desde a graduação, externo minha gratidão.

A Joselito de Araújo Souto, da J. A. Souto Engenharia e Projetos LTDA, pela orientação na delimitação dos bairros da cidade de Soledade, agradeço.

À Secretária Adjunta de Saúde do Município de Soledade, Ana Claudia Farias, e à Secretária Executiva de Atenção Básica, Elayne Carla Oliveira dos Santos, pela concessão dos

dados estatísticos da população envolvida na problemática da pesquisa, estou imensamente grato.

Às Agentes Comunitárias de Saúde, Beatriz da Silva Vasconcelos, Islânia Priscila Gabriel Couto, Maria Betânia Moreira Justino, e Tamara de Oliveira Melo, agradeço por todo o trabalho de identificação das famílias residentes nas áreas propensas à inundação e pelo levantamento dos dados socioeconômicos utilizados na pesquisa.

Ao grupo de pesquisas Gestão e Ordenamento Ambiental (Geoamb), do qual sou membro, agradeço pelo espaço cedido na sala de estudos, onde realizei a maior parte deste trabalho de tese.

Ao meu pai Inácio Avelino e minha mãe Jovelina Barbosa de Sousa Avelino, pelo amor incondicional e apoio irrestrito que me sustentaram durante toda a minha trajetória de vida e de estudos, sou grato eternamente.

Aos meus irmãos Joáp Avelino de Sousa e Manoel Avelino de Sousa Neto, e minha irmã Joágna Avelino de Sousa, por contribuírem da forma que puderam, me auxiliando inclusive nas visitas de campo, estarei sempre grato.

À Prefeitura Municipal de Soledade, pela concessão do transporte escolar para Campina Grande, e aos motoristas Jonadas de Alcantara Costa, José Nadilson Brito Garcia, Moizes Galdino Vieira e Valdemir da Silva, dedico minha gratidão.

Aos distraídos que não sentiram ou não perceberam a presença de Deus nos meus agradecimentos, desejo que Deus os abençoe.

"No dia em que você sentir que o mundo inteiro é sua casa, que o céu é seu teto, que a terra é seu piso e que cada árvore é seu jardim, então você estará realmente em casa."

(Sri Ravi Shankar)

RESUMO

A construção de barragens para contenção de água é uma técnica aprimorada ao longo dos séculos, adaptando-se aos diferentes usos e beneficiando-se da experiência adquirida com estudos sobre o rompimento dessas estruturas. Acidentes associados ao colapso de barragens vêm sendo documentados desde que sua construção sistemática se tornou comum, sendo que as principais causas observadas incluem galgamento, erosão interna e falhas nas fundações. Na sub-bacia do rio Taperoá, no estado da Paraíba, a microbacia do rio Quixudi abriga dois reservatórios principais que passaram por um rompimento em série no ano de 1985: o açude Tapuio e a barragem Santa Teresa. Esses reservatórios estão localizados em um trecho de rio temporário, classificado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) como suscetível à inundação. No entanto, apenas o açude Tapuio é monitorado pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAPB), sendo classificado como de alto risco. A barragem Santa Teresa, que recebe o deflúvio do açude Tapuio, situa-se a aproximadamente 3 km da área urbana do município de Soledade, onde o rio Quixudi permeia cinco bairros. Esta tese avaliou o impacto do rompimento da barragem Santa Teresa no vale a jusante, considerando a suscetibilidade à inundação desse trecho do rio. Para isso, foram analisados os atributos físicos (hidromorfológicos e ambientais) que influenciam essa suscetibilidade, e foi realizada uma modelagem hidrodinâmica do rompimento da barragem. Além disso, classificou-se a barragem segundo a Categoria de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA). A caracterização hidromorfológica e ambiental, bem como a modelagem hidrodinâmica, foram conduzidas por meio do processamento de dados de sensoriamento remoto em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Utilizaram-se os *softwares* livres HEC-HMS (para a delimitação da microbacia), QGIS (para o mapeamento) e HEC-RAS (para a modelagem hidrodinâmica). A classificação da barragem seguiu as diretrizes da Resolução nº 143 do CONAMA. Os resultados evidenciaram uma bacia hidrográfica amplamente antropizada, com extensas áreas de pastagem e urbanização, fatores que influenciam sua suscetibilidade à inundação de diferentes formas, sendo os eventos climáticos extremos os principais condicionantes, mais do que a morfologia da bacia. A modelagem hidrodinâmica indicou uma mancha de inundação que atingiu 118 edificações, majoritariamente residenciais, distribuídas entre cinco bairros do município de Soledade. Algumas dessas edificações permaneceram submersas por até 15 horas, com profundidades superiores a 2 metros. O número de pessoas atingidas registrou 192 indivíduos, distribuídos em 60 famílias, sendo majoritariamente adultos entre 30 e 59 anos. A classificação de risco da barragem apontou uma

categoria de risco médio, enquanto o dano potencial associado foi considerado alto, devido à presença predominante de residências na área urbana afetada, aumentando o risco de perda de vidas humanas.

Palavras -chave: Rompimento de barragens; Rios temporários; Semiárido.

ABSTRACT

The construction of water containment dams is a technique that has been refined over centuries, adapting to different uses and benefiting from experience gained through studies on dam failures. Accidents associated with dam collapses have been documented since their systematic construction became common, with the main observed causes including overtopping, internal erosion, and foundation failures. In the Taperoá River sub-basin, in the state of Paraíba, the Quixudi River micro-basin contains two main reservoirs that experienced a sequential failure in 1985: the Tapuio Reservoir and the Santa Teresa Dam. These reservoirs are located in a temporary river stretch, classified by the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA) as flood-prone. However, only the Tapuio Reservoir is monitored by the Executive Water Management Agency of the State of Paraíba (AESAPB) and is classified as high risk. The Santa Teresa Dam, which receives the outflow from the Tapuio Reservoir, is situated approximately 3 km from the urban area of the municipality of Soledade, where the Quixudi River flows through five neighborhoods. This thesis assessed the impact of the Santa Teresa Dam failure in the downstream valley, considering the flood susceptibility of this river stretch. To achieve this, the study analyzed the physical attributes (hydromorphological and environmental) that influence flood susceptibility and performed a hydrodynamic modeling of the dam failure. Additionally, the dam was classified according to the Risk Category (CRI) and the Associated Potential Damage (DPA). The hydromorphological and environmental characterization, as well as the hydrodynamic modeling, were conducted through the processing of remote sensing data in Geographic Information Systems (GIS). The open-source software HEC-HMS (for watershed delineation), QGIS (for mapping), and HEC-RAS (for hydrodynamic modeling) were used. The dam classification followed the guidelines of CONAMA Resolution No. 143. The results indicated a highly anthropized watershed, with extensive pasture and urbanized areas influencing its flood susceptibility in various ways, with extreme weather events being the main conditioning factors rather than the watershed's morphology. The hydrodynamic modeling revealed a flood extent affecting 118 buildings, mostly residential, distributed across five neighborhoods in the municipality of Soledade. Some of these buildings remained submerged for up to 15 hours, with water depths exceeding 2 meters. The number of affected people was recorded as 192 individuals, distributed among 60 families, with the majority being adults aged between 30 and 59 years. The dam risk classification indicated a medium-risk category, while the associated potential damage was

considered high due to the predominance of residential areas in the affected urban region, increasing the risk of loss of human lives.

Keywords: Dam failure; Temporary rivers; Semi-arid.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE TABELAS	22
LISTA DE QUADROS	23
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	24
1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Contextualização da situação problema	29
1.2 Objetivos.....	32
1.3 Justificativa	32
1.4 Estrutura da tese	35
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	36
2.1 Monitoramento e segurança de barragens	39
2.2 Vulnerabilidade social, segregação socioespacial e defesa civil na sociedade de risco	40
2.3 Rios intermitentes, modelagem hidrodinâmica e o modelo HEC-RAS.....	43
2.4 Eventos climáticos extremos.....	47
2.5 Variabilidades climáticas e o clima da Região Nordeste do Brasil	49
3 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1 Delimitação e localização da microbacia hidrográfica do rio Quixudi	53
3.2 Localização da barragem Santa Teresa	55
3.3 Caracterização hidromorfológica da microbacia hidrográfica do rio Quixudi	57
3.4 Caracterização ambiental da microbacia hidrográfica do rio Quixudi.....	62
3.5 Modelagem hidrodinâmica e simulação do rompimento da barragem Santa Teresa	64
3.6 Perfil da população atingida pela inundação	77
3.7 Classificação da barragem por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA).....	77

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1 Caracterização hidromorfológica da microbacia hidrográfica do rio Quixudi	80
<i>4.1.1 Análise linear</i>	80
<i>4.1.2 Análise areal</i>	84
<i>4.1.3 Análise altimétrica</i>	86
4.2 Caracterização ambiental da microbacia hidrográfica do rio Quixudi	92
<i>4.2.1 Uso e ocupação da superfície</i>	92
<i>4.2.2 Clima e distribuição das chuvas</i>	97
<i>4.2.3 Litologia e Pedologia</i>	101
4.3 Modelagem hidrodinâmica e simulação do rompimento da barragem Santa Teresa	107
4.4 Impactos da onda de cheia no vale a jusante da barragem Santa Teresa	117
4.5 Perfil da população envolvida na pesquisa	135
<i>4.5.1 Características demográficas e sociais do município de Soledade</i>	135
<i>4.5.2 Perfil socioeconômico da população atingida pela inundação e suas condições habitacionais</i>	138
4.6 Classificação da barragem Santa Teresa por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA)	151
5 CONCLUSÃO	159
6 REFERÊNCIAS	163

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Recorte espacial utilizado para baixar o Modelo Digital de Elevação (MDE)	54
Figura 2. Mapa de localização da microbacia do rio Quixudi	55
Figura 3. Mapa de localização da barragem Santa Teresa na microbacia do rio Quixudi	56
Figura 4. Fotografias da barragem Santa Teresa	57
Figura 5. Ilustração da classificação hierárquica de uma rede fluvial segundo o método de Strahler (1952)	58
Figura 6. Interface do <i>software</i> HEC-RAS 5.0.3	65
Figura 7. Área de abrangência do MDT sobre a barragem Santa Teresa e a cidade de Soledade	65
Figura 8. Geometria dos elementos notáveis traçados sobre o MDT	66
Figura 9. Perfil tridimensional das seções transversais e da estrutura em linha da barragem gerado no sobre MDT no <i>Ras Mapper</i>	67
Figura 10. Janela de inserção dos Coeficientes de <i>Manning</i> no HEC-RAS	69
Figura 11. Seção transversal com área de mesmo nível à direita da calha do rio e com a inserção de uma <i>levee</i> no ponto mais alto entre as duas áreas	69
Figura 12. Janela de inserção dos dados de altura e largura da estrutura em linha da barragem	70
Figura 13. Janela de edição da estrutura do vertedouro	71
Figura 14. Janela de edição da geometria da brecha no HEC-RAS	71
Figura 15. Medição do comprimento do talude de jusante da barragem Santa Teresa .	73
Figura 16. Medição do ângulo de inclinação do talude de jusante da barragem Santa Teresa	73

Figura 17. Esquema do perfil da parede da barragem com as inclinações dos taludes .	74
Figura 18. Janelas de inserção das condições de escoamento do modelo hidrodinâmico	75
Figura 19. Janela de simulação do HEC-RAS	76
Figura 20. Mapa da classificação hierárquica da rede de drenagem e da distribuição das nascentes por área de contribuição na microbacia do rio Quixudi	81
Figura 21. Mapa da extensão média do percurso superficial em relação aos canais de drenagem	83
Figura 22. Mapa hipsométrico da microbacia do rio Quixudi	87
Figura 23. Mapa de localização da zona de cisalhamento e do ponto de inflexão do relevo e da declividade do talvegue do rio principal	88
Figura 24. Perfil longitudinal do canal principal da microbacia do rio Quixudi	88
Figura 25. Mapa de classificação do relevo da Microbacia do rio Quixudi	91
Figura 26. Mapas da evolução do uso e ocupação da superfície da terra na microbacia do rio Quixudi	93
Figura 27. Mapa das áreas rurais consolidadas e das áreas edificadas rurais e urbanas na microbacia do rio Quixudi	97
Figura 28. Localização da microbacia do rio Quixudi em relação as zonas climáticas do Estado da Paraíba	98
Figura 29. Mapa de localização das estações pluviométricas e suas respectivas áreas de influência dentro da microbacia do rio Quixudi	99
Figura 30. Distribuição da precipitação média acumulada no período de 1912 a 2018 na microbacia hidrográfica do rio Quixudi	100
Figura 31. Mapa das unidades geológicas e litológicas da microbacia do rio Quixudi	101
Figura 32. Mapa dos tipos de solo presentes na microbacia do rio Quixudi	104

Figura 33. Mapas da evolução das áreas de Pastagem e da Área Urbanizada sobre os tipos de solo entre os anos de 1985 e 2022 na microbacia do rio Quixudi	105
Figura 34. Esquema do perfil do maciço da barragem sendo percolado pela água de montante através do modo de falha denominado <i>piping</i>	107
Figura 35. Barragem rompida por <i>piping</i> próximo à barragem Santa Teresa	108
Figura 36. Mapa da mancha de inundação projetada sobre o MDT	109
Figura 37. Perfil latitudinal da estrutura da barragem no momento da máxima inundação do vale a jusante	110
Figura 38. Perfil longitudinal da máxima inundação do vale a jusante	110
Figura 39. Identificação das seções onde ocorreram os valores extremos para os parâmetros analisados	111
Figura 40. Alcance e profundidade da mancha de máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa, ocorrida 3 horas e 16 minutos após o início do <i>piping</i>	112
Figura 41. Gradiente da elevação da superfície da água durante a máxima inundação do vale a jusante da barragem Santa Teresa com a inclinação da linha de energia	113
Figura 42. Gradiente da velocidade durante a máxima inundação do vale a jusante da barragem Santa Teresa com os perfis das seções de valores máximos no canal e nas margens	114
Figura 43. Gradiente de variação da vazão durante a máxima inundação do vale a jusante da barragem Santa Teresa com o gráfico de valores para cada seção	115
Figura 44. Gradiente do tempo de duração da passagem da onda de cheia a partir da máxima inundação registrada no vale a jusante da barragem Santa Teresa	116
Figura 45. Gradiente do percentual de tempo inundado durante a passagem da onda de cheia no vale a jusante da barragem Santa Teresa	116

Figura 46. Ilustração da propagação da onda de perturbação da superfície nos regimes de escoamento subcrítico, crítico e supercrítico	117
Figura 47. Gráfico do Número de Froude registrado ao longo das seções transversais no momento da máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa	118
Figura 48. Mapa de localização das Áreas de Preservação Permanente aguardando análise no curso do rio Quixudi de acordo com o Cadastro Ambiental Rural (CAR)	119
Figura 49. Mapa de uso e ocupação do solo nas faixas de APP do rio Quixudi com os limites da mancha de inundação	120
Figura 50. Gradiente da tensão de arrasto no momento da máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa com o gráfico dos valores no canal e nas margens	121
Figura 51. Mapa de uso e ocupação do solo das áreas afetadas pela mancha de inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa em 1985 e 2022	122
Figura 52. Percentual de área afetada pela mancha de inundação para cada classe de uso e ocupação do solo em 1985 e 2022	123
Figura 53. Aglomeração de Algaroba (<i>Prosopis juliflora</i>) nas margens do rio Quixudi no trecho a jusante da barragem Santa Teresa	124
Figura 54. Mapeamento da mancha de inundação no perímetro urbano do município de Soledade com as áreas edificadas atingidas	125
Figura 55. Mapa das áreas afetadas pela mancha de inundação no trecho urbano do rio Quixudi no município de Soledade	127
Figura 56. Panorama em 3D da área afetada pela mancha de inundação	128
Figura 57. Gradiente do tempo de duração da inundação na área urbana do município de Soledade	129
Figura 58. Profundidade e duração da inundação no bairro Jardim Cruzeiro I	130
Figura 59. Profundidade e duração da inundação no bairro Chico Pereira	130

Figura 60. Profundidade e duração da inundação no bairro Bela Vista	131
Figura 61. Profundidade e duração da inundação nos bairros Santa Teresa e Conjunto Mutirão	132
Figura 62. Residências localizadas no limite da calha do rio Quixudi num dos pontos de maior vazão e elevação da superfície da água no bairro Bela Vista	133
Figura 63. Comparação da área edificada atingida pela mancha de inundação em 2003 e 2025	134
Figura 64. Padrão das edificações na Rua Rômulo Nóbrega no bairro Jardim Cruzeiro I	135
Figura 65. Padrão das edificações na margem direita do rio Quixudi (bairro Chico Pereira)	135
Figura 66. Pirâmide etária do município de Soledade-PB	136
Figura 67. Mapa do <i>ranking</i> do Índice de Progresso Social (IPS Brasil) no Estado da Paraíba com destaque para o município de Soledade (2024)	137
Figura 68. <i>Scorecard</i> do município de Soledade-PB com relação ao Índice de Progresso Social (IPS Brasil, 2024)	138
Figura 69. Pirâmide etária da população total atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no município de Soledade, PB (2025)	139
Figura 70. Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no bairro Bela Vista em Soledade, PB (2025)	140
Figura 71. Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no bairro Chico Pereira em Soledade, PB (2025)	141
Figura 72. Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no bairro Jardim Cruzeiro I em Soledade, PB (2025)	141

Figura 73. Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa nos bairros Conjunto Mutirão e Santa Teresa em Soledade, PB (2025)	142
Figura 74. Renda familiar por número de famílias atingidas pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa em Soledade, PB (2025)	144
Figura 75. Gráfico da renda familiar média (em salários mínimos) da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa para cada bairro no município de Soledade, PB (2025)	145
Figura 76. Pontos de lançamento de efluentes domésticos nos rios Quixudi e Santa Luzia	147
Figura 77. Lagoa de tratamento de efluentes domésticos inacabada no município de Soledade	148
Figura 78. Degradação da infraestrutura da barragem Santa Teresa por erosão do maciço e proliferação de espécie vegetal lenhosa no talude de jusante	149
Figura 79. Extensão da avenida José Rufino de Carvalho em 2003 e 2025	150
Figura 80. Talude de montante da barragem Santa Teresa tomado por vegetação e com enrocamento descoberto na margem esquerda	153
Figura 81. Vertedouro de superfície da barragem Santa Teresa	154
Figura 82. Talude de jusante da barragem Santa Teresa em 2018 e 2025	154
Figura 83. Resposta da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAPB) sobre o pedido de informações sobre a barragem Santa Teresa	155
Figura 84. Notícia sobre a inspeção realizada na barragem Santa Teresa em fevereiro de 2024 veiculada em um portal de notícias local	156
Figura 85. Imóveis residenciais e comerciais na área urbana atingida pela inundação e curral cercado com cerca rústica dentro da calha do rio Quixudi em Soledade	158

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Valores de referência para classificação dos parâmetros morfométricos e do relevo da microbacia	61
Tabela 2. Valores para a ponderação do Coeficiente de Manning	68
Tabela 3. Valores informados ao HEC-RAS para a definição da geometria da brecha	72
Tabela 4. Hierarquia fluvial da microbacia do rio Quixudi	81
Tabela 5. Descrição das classes de uso e ocupação da superfície e suas áreas para cada ano mapeado	94
Tabela 6. Unidades geológicas e litológicas presentes na microbacia do rio Quixudi	102
Tabela 7. Classificação da população atingida por faixa etária	139
Tabela 8. Distribuição da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa por bairro do município de Soledade, PB (2025)	140
Tabela 9. Grau de escolaridade da população total atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa em Soledade, PB (2025)	143
Tabela 10. Renda familiar pelo total de famílias atingidas de cada bairro	144

LISTA DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1. Parâmetros utilizados na análise morfométrica da microbacia do rio Quixudi	59
Quadro 2. Quadro para a classificação de barragens de acumulação de água	78
Quadro 3. Características dos solos	104
Quadro 4. Classificação da barragem Santa Teresa por Categoria de Risco (CRI)	151
Quadro 5. Classificação da barragem Santa Teresa por Dano Potencial Associado (DPA)	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACS	Agente Comunitário de Saúde
AESA-PB	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APP	Área de Preservação Permanente
BHO	Base Hidrográfica Ottocodificada
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONPDEC	Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CRI	Categoria de Risco
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DPA	Dano Potencial Associado
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENOS	El Niño Oscilação Sul
FIOCRUZ	Fundação Oswaldo Cruz
GRASS - GIS	<i>Geographic Resources Analysis Support System – Geographic Information System</i>
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
IDEB	Índice de Desenvolvimento da Educação Básica
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
IPS	Índice de Progresso Social
LAPIS	Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno

NASA-JPL	<i>National Aeronautics and Space Administration - Jet Propulsion Laboratory</i>
ODP	Oscilação Decenal do Pacífico
ODS	Objetivos do desenvolvimento Sustentável
OMA	Oscilação Multidecenal do Atlântico
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PB	Paraíba
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RN	Rio Grande do Norte
SEIE	Secretaria de Estado da Infraestrutura da Paraíba
SEIRH	Secretaria de Infraestrutura e dos Recursos Hídricos
SEIRHMA-PB	Secretaria de Infraestrutura, Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Paraíba
SEMAS	Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SINPDEC	Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
USACE	<i>United States Army Corp of Engineers</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1 INTRODUÇÃO

Os rios urbanos estão no cerne do processo de formação das cidades, pois são assim chamados por conta do estabelecimento de construções e habitações humanas em suas imediações. A necessidade de água para o abastecimento humano em seus mais diversos usos levou ao surgimento de cidades nas proximidades de cursos d'água ao longo da história. As cidades mais antigas, a exemplo de Jericó na Palestina e Ur na antiga Suméria, se desenvolveram nas proximidades dos rios Jordão e Eufrates, respectivamente.

A exploração dos rios em benefício da população das cidades exige o controle de sua caudal através de equipamentos e técnicas que possibilitem armazenar e distribuir a água de acordo com as necessidades humanas. Para isso, o homem desenvolveu a técnica de construção de represas, barrando o fluxo dos rios com materiais sólidos e armazenando água para o seu consumo.

Essas represas — genericamente denominadas de barragens — são formadas por vários tipos de barramento, com diversas dimensões e formatos, constituídos de vários tipos de materiais (terra, enrocamento, concreto, etc.), com diversas finalidades (abastecimento de água, controle de inundação, irrigação, produção de energia, etc.). São estruturas transversais ao curso dos rios, formando lagoas artificiais cuja nomenclatura também é diversa, podendo ser chamadas de diques, açudes ou barreiros em algumas regiões, como é o caso do Nordeste brasileiro.

Pela legislação brasileira o conceito de barragem é definido como:

qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (Brasil, 2010).

De acordo com a *International Commission on Large Dams (ICOLD)*, até o mês de abril de 2023 existiam no mundo cerca de 42.169 grandes barragens, sendo que deste universo de barragens catalogadas, 31.167 estavam classificadas como de uso único, enquanto 11.002 eram barragens polivalentes ou de usos múltiplos.

No Brasil, de acordo com o Sistema Nacional de Informação sobre Barragens (SNISB), até o ano de 2023 existiam 26.046 barragens de todos os tipos distribuídas pelo país, considerando os diversos usos e dimensões. Deste total, 3.504 estavam localizadas na Região

Nordeste, sendo majoritariamente utilizadas para o abastecimento humano (40,5%), irrigação (23,8%) e dessedentação animal (13,9%).

A grande maioria das barragens cadastradas nesse sistema não é classificada quanto à categoria de risco (60,7%) e dano potencial associado (56,36%). Isso enseja uma preocupação com a falta de informação sobre essas construções, o que revela a carência de monitoramento de segurança.

A classificação do risco é aqui compreendida como uma antecipação da catástrofe que pode ou não ocorrer, como por exemplo a ruptura do barramento e o esvaziamento repentino do reservatório. Assim, por não ter concretude espaço-temporal, o risco é sempre um acontecimento futuro, uma ameaça em potencial que quando percebida a tempo pode antecipar uma medida de segurança. O dano potencial associado, por sua vez, é compreendido como a consequência da catástrofe, independentemente de sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais. Nesse contexto, o perigo reside no vale a jusante dos reservatórios, podendo ser entendido como a exposição ao risco.

No caso dos rios temporários ou efêmeros — aqueles que só apresentam caudal durante a ocorrência de chuvas imprevisíveis — o perigo é ainda maior. O fato de esses rios passarem a maior parte do tempo com o leito seco leva à negligência ou desconhecimento do risco que representa a ocupação de suas margens de forma desordenada. Por outro lado, a existência de barragens nos leitos desse tipo de rio — para além do benefício do armazenamento de água — potencializa o risco de inundação no vale a jusante em caso de ruptura dessas estruturas. Essa situação se agrava quando os rios permeiam áreas urbanas onde os limites da Área de Preservação Permanente (APP) são ultrapassados pela construção civil. Os eventos extremos de precipitação representam perigo iminente de desastre nessas áreas.

Na Região Nordeste do Brasil as implicações climáticas sobre a disponibilidade de recursos hídricos condicionaram, ao longo do tempo, a construção de barragens nos leitos dos rios para a acumulação de água para suprir os períodos de seca. A política de açudagem nesta região remonta aos tempos do império, impulsionada pela grande seca de 1877, e levada a diante nos anos subsequentes pelo governo federal com as ações do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).

Nesta região de Clima Semiárido a drenagem das bacias hidrográficas é composta majoritariamente por rios temporários ou efêmeros, tributários dos rios intermitentes principais. A dinâmica hidrológica desse sistema de drenagem obedece aos efeitos do clima, com períodos de cheia e de seca intercalados, provocados por chuvas irregulares. Os rios intermitentes têm

regime de escoamento sazonal, ou seja, podem apresentar caudal durante toda a estação chuvosa, cujos valores mais elevados de precipitação nesta região ocorrem em virtude da atuação da Zona de Convergência Intertropical, dos Complexos Convectivos de Mesoescala, dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis e das Linhas de Instabilidade.

A bacia do rio Taperoá — abordada neste trabalho de tese — faz parte da região semiárida do Nordeste brasileiro, e como tal, tem seus rios efêmeros drenando as águas pluviais para o rio intermitente principal — o Taperoá. O rio Taperoá é o principal afluente do rio Paraíba, de modo que sua área de captação é considerada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAPB) como uma sub-bacia do rio Paraíba. Dentro dos limites desta sub-bacia, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) identifica 8 trechos de cursos d'água inundáveis distribuídos entre os municípios de Boa Vista, Livramento, Olivedos, Santo André, São José dos Cordeiros, São Vicente do Seridó, Soledade e Taperoá. Este trabalho de tese aborda um desses trechos inundáveis localizado entre os municípios de São Vicente do Seridó e Soledade. Tal trecho é denominado de rio Quixudi. Neste trecho é avaliado o impacto de rompimento hipotético da barragem Santa Teresa e suas implicações no vale a jusante no município de Soledade-PB. Tal avaliação é calcada na análise da microbacia formada pelo trecho inundável — a microbacia do rio Quixudi — examinando a forma como os atributos físicos (hidromorfológicos e ambientais) afetam sua dada condição de susceptibilidade a inundação; na simulação do rompimento da barragem através de modelagem hidrodinâmica; e na classificação da barragem por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). O estudo se apoia essencialmente em dados secundários processados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e tem como premissa a susceptibilidade do trecho de rio a inundação, definida pela ANA.

O perigo que representa trechos inundáveis em rios temporários está relacionado ao fator surpresa, ou seja, em caso de evento extremo de precipitação pode ocorrer volumes de água inesperados nos leitos desses rios, potencializando sua condição de susceptibilidade à inundação. Ademais, na sub-bacia do rio Taperoá existe uma quantidade inestimada de pequenas barragens que não são inspecionadas. A barragem Santa Teresa, por exemplo, até a data de escrita deste texto, não figurava entre os reservatórios que são monitorados pela AESAPB, apesar de ter um histórico de rompimento provocado pelo excesso de chuvas ocorridas no ano de 1985. Tal acontecimento foi o gatilho que ativou a preocupação com o perigo que representa barragens sem monitoramento em leitos de rios temporários urbanos, e motivou o desenvolvimento desta tese.

Em termos de inovação e ineditismo esta pesquisa traz uma modelagem hidrodinâmica que simula a propagação de uma onda de cheia no leito de um rio efêmero, chamando a atenção para o perigo oculto nesse tipo de rio, quando existem barragens sem monitoramento em seus percursos, e áreas urbanizadas a jusante dessas barragens. Essa configuração da rede hidrográfica na região estudada, onde a preocupação com as barragens e os rios só tem destaque nos períodos de chuvas, faz com que os estudos envolvendo modelagem hidrodinâmica não sejam comuns na região abordada, dado o fato de que a suposição de desastre de grandes proporções envolvendo rupturas de barragens nessa região é uma hipótese remota.

1.1 Contextualização da situação problema

O estado da Paraíba tem seu território drenado por onze bacias hidrográficas, das quais as maiores são a do rio Piranhas — subdividida em quatro sub-bacias — e a do rio Paraíba — subdividida em alto, médio e baixo curso do rio Paraíba, mais a sub-bacia do rio Taperoá.

Na porção norte da sub-bacia do rio Taperoá, compondo a bacia do rio Soledade, encontra-se a microbacia do rio Quixudi. Este último nasce no limite oeste do município de Soledade com o município de Juazeirinho, na Serra do Quixudi. Seu principal afluente é o chamado riacho do Espinheiro, que tem nascente ao norte, no município de São Vicente do Seridó. Ambos se enquadram na categoria de rios temporários, só apresentando caudal durante a ocorrência de precipitações.

Neste trabalho de tese, é denominada de microbacia do rio Quixudi toda a área drenada por esses dois cursos d'água, sendo que a nascente do riacho do Espinheiro encontra-se mais distante do exutório do rio Quixudi, do que a nascente do próprio rio Quixudi. Por esse motivo, ao delimitar a microbacia, o rio principal — o de curso mais extenso da nascente até a foz — passa a ser formado pelo riacho do Espinheiro, desde a sua nascente até a confluência com rio Quixudi, e daí em diante, pelo rio Quixudi até a sua foz. Por ordem de importância (ou magnitude) manteve-se o nome deste último rio para denominar a microbacia.

O trecho formado por esses dois rios está incluído no Atlas de Vulnerabilidade a Inundações (ANA, 2014) como um trecho de curso d'água susceptível a inundação, com frequência de ocorrência baixa, porém, com grau médio de impacto e vulnerabilidade. A susceptibilidade de baixa frequência é definida no referido atlas como intervalos de mais de dez anos sem registro de inundação. O grau de impacto médio está relacionado à capacidade de causar danos razoáveis a serviços essenciais, instalações e obras de infraestrutura públicas e

residenciais. Já a vulnerabilidade de grau médio se dá pela associação do grau de impacto médio com a baixa frequência de inundações na área.

O rio principal da referida microbacia é interrompido por duas principais barragens de pequeno porte ao longo do seu curso: o açude Tapuio, em São Vicente do Seridó, e a barragem Santa Teresa em Soledade. O primeiro reservatório, de acordo com o relatório do SNISB de 2023, localiza-se no leito do riacho do Espinheiro, possui capacidade de armazenamento de 1.181.000 m³ e tem como empreendedor responsável a Secretaria de Estado de Infraestrutura e Recursos Hídricos.

Já a barragem Santa Teresa, objeto de análise desta tese, localiza-se no assentamento Antônio Avelino de Sousa, em Soledade, ao lado esquerdo da BR 230 (sentido Leste-Oeste), na altura do km 218, e tem uma capacidade de armazenamento de 6.000.000 m³ de água (Almeida, 2016). Esta barragem não consta no SNISB, porém, *in loco* é possível constatar que se trata de um barramento de terra enrocamento, medindo 380 m de comprimento, 6 m de altura, com largura de crista de 4 m, e de base dos taludes de 25 m. A estrutura interrompe o curso do rio Quixudi a uma distância de aproximadamente 3 km a Oeste da sede do município de Soledade. A barragem conta com um vertedouro tipo soleira livre com 60 m de comprimento e largura igual à da crista da barragem. O assentamento que engloba a barragem foi criado a partir da desapropriação da fazenda Santa Teresa pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), no ano de 2001. O nome da barragem deriva do nome da fazenda.

O vale a jusante da barragem Santa Teresa — trecho do rio Quixudi conhecido localmente como riacho Santa Teresa — permeia parte da área urbana do município de Soledade, entre os bairros Conjunto Mutirão, Santa Teresa, Chico Pereira, Jardim Cruzeiro I e Bela Vista. A referida barragem tem um histórico de rompimento ocorrido no ano de 1985, ano atípico, em que as precipitações superaram a média histórica dos 400 mm, chegando a atingir 1.190 mm (Nascimento, 2014). O evento de rompimento da barragem se deu por galgamento ocasionado pela onda de cheia oriunda do rompimento do açude Tapuio. A enxurrada provocada pelo rompimento em série das duas barragens inundou parte da zona oeste do atual bairro Jardim Cruzeiro I, em Soledade. Os bairros Chico Pereira e Bela Vista ainda não existiam em 1985. Os bairros Santa Teresa e Conjunto Mutirão não foram atingidos na época. Não há relato de vítimas fatais diante do ocorrido, mas os prejuízos materiais foram significativos. Animais que pastavam às margens do riacho Santa Teresa foram arrastados pela correnteza. *Trailers* de um circo montado em um terreno próximo ao riacho também foram carregados pela enxurrada. Não há registro documental sobre o ocorrido, mas este evento foi testemunhado pelo autor desta tese. No ano do rompimento, o trecho do rio que permeia a área urbana não tinha em suas

margens tantas construções civis como tem atualmente, fato este que evidencia a falta de planejamento urbano e ambiental, numa nítida demonstração de negligência ou desconhecimento do risco de que o evento se repita e a enchente provoque danos ainda maiores aos habitantes da área, isto, levando em conta que os reservatórios foram reconstruídos nos mesmos locais e no mesmo padrão de antigamente.

Estatisticamente, a probabilidade de que um evento extremo de precipitação como o ocorrido em 1985 se repita pode ser estimada calculando-se o período de retorno. Efetuando-se esses cálculos tem-se uma probabilidade de 5,4% para um período de retorno de 18,5 anos. Diante desta probabilidade, e sabendo-se da susceptibilidade do trecho abordado à inundação, a problemática deste trabalho gira em torno da falta de monitoramento de segurança na barragem, o que pode resultar em desastre. Um pedido de informação sobre a barragem Santa Teresa foi feito pelo autor desta tese à Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba no mês de fevereiro de 2023. A agência respondeu que não monitora a referida barragem, fato este que reforça a preocupação aqui enfatizada com a possibilidade de um novo rompimento desta estrutura.

Em resumo, o problema que se tem é que a barragem Santa Teresa situa-se numa bacia hidrográfica de drenagem efêmera, susceptível a inundação, que converge para área urbana e não é monitorada, suscitando a hipótese de que a intensificação dos eventos extremos de precipitação decorrentes do aquecimento global seja um agravante da condição de susceptibilidade a inundações apresentada pela microbacia do rio Quixudi, contribuindo para que uma possível recorrência do rompimento da barragem seja ainda mais impactante, dadas as condições atuais de ocupação do vale a jusante. Assim, supõe-se que os graus de impacto e vulnerabilidade que caracterizam a susceptibilidade da referida microbacia a inundação podem ser afetados ou potencializados — para além da dinâmica pluviométrica local — pela ocorrência de chuvas extremas associadas aos atributos do meio físico da bacia, tais como sua geologia, pedologia, geomorfologia e, principalmente, pelo uso e ocupação da superfície no vale a jusante da barragem. Diante disso, a questão problema que se coloca é: Qual o impacto de um novo rompimento da barragem Santa Teresa no vale a jusante, diante do quadro atual de ocupação das margens do rio Quixudi?

Os aspectos ambientais e socioeconômicos que envolvem a abordagem do tema giram em torno das condições habitacionais nas margens urbanas do rio Quixudi. O padrão das moradias verificadas nas áreas de inundação, apesar de variado, denuncia de antemão e de forma indireta que a população mais vulnerável de ser atingida de forma trágica na hipótese de rompimento da barragem é a população ribeirinha mais pobre. As habitações de arquitetura

mais simples e de menor porte são as que mais se aproximam das margens do rio, chegando a ocupar o limite do leito maior. Com a convicção de que não corre perigo porque “nunca chove”, essa população está sujeita às surpresas da natureza, que podem resultar em desastre em caso de evento extremo de precipitação.

1.2 Objetivos

Com base nesta problemática, este trabalho de tese definiu como objetivo geral: avaliar o impacto do rompimento hipotético da barragem Santa Teresa e suas implicações no vale a jusante no município de Soledade-PB.

Determinou-se como objetivos específicos:

- 1) Realizar uma caracterização hidromorfológica e ambiental da microbacia hidrográfica do rio Quixudi, a fim de elaborar um diagnóstico situacional acerca das características morfométricas da rede de drenagem, bem como dos elementos componentes do meio físico da referida bacia que afetam sua dada condição de susceptibilidade a inundação;
- 2) Simular a onda de cheia resultante do rompimento hipotético da barragem Santa Teresa e a conseqüente mancha de inundação através de modelagem hidrodinâmica;
- 3) Mapear as áreas propensas a risco de desastres por inundação no vale a jusante da barragem;
- 4) Classificar a barragem por categoria de risco e dano potencial associado.

1.3 Justificativa

No cerne do que se entende por bacia hidrográfica — um “conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes” (Guerra; Guerra, 2008, p. 76) — a rede hidrográfica e a dinâmica hidrológica são determinantes para a delimitação e para a configuração ambiental dessas unidades territoriais, tendo ligação direta com o aspecto climático da região onde se localiza a bacia. Diante disso, não se pode cogitar o estudo ambiental de uma bacia hidrográfica sem considerar as mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global e suas implicações na intensificação dos eventos meteorológicos extremos.

O sexto relatório do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC), intitulado *Climate Change 2021: the Physical Science Basis*, publicado em 09 de agosto de

2021, apontou que o aquecimento global provocado pela emissão de gases do efeito estufa pelos seres humanos está contribuindo para o aumento tanto da probabilidade quanto da severidade do calor extremo, da precipitação, das secas e dos ciclones tropicais. Segundo o documento, as mudanças projetadas nos extremos são maiores em frequência e intensidade, e prevê-se que os eventos de chuvas extremas se tornem mais frequentes e tragam uma quantidade significativa e crescente de água quando forem atingidos. Eventos extremos compostos — aqueles que ocorrem próximos uns dos outros ou ao mesmo tempo — aumentaram a chance de ocorrência desde 1950 com as interferências do homem sobre o clima (IPCC, 2021a, pp. 10-11, 19, 21-22).

Em ficha técnica suplementar, o mesmo relatório do IPCC prevê com grau médio de confiança que o avanço do aquecimento global para próximo dos 2°C — como já está em curso — “aumentará a intensidade e a frequência das precipitações extremas e das inundações pluviais no nordeste da América do Sul”, bem como assegura com alta confiança “um aumento dominante na duração das secas” para esta região do globo (IPCC, 2021b, p. 2).

No Brasil, a maior parte da Região Nordeste já convive com eventos de seca devido ao clima Tropical Semiárido. A mais nova delimitação desta zona climática ocupa 71,28% do território nordestino, segundo *shapefile* disponibilizada pelo Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS, 2024). Trata-se de uma zona de “forte insolação, temperaturas relativamente altas e regime de chuvas marcado pela escassez, irregularidade e concentração das precipitações em um curto período de três a quatro meses” (SUDENE, 2021, p. 8). Os dias secos, segundo mapeamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002), somam de seis a oito meses por ano, com pontos críticos que chegam a ficar de nove a onze meses sem chuva. Diante disso, a drenagem das bacias hidrográficas é composta majoritariamente por canais efêmeros, tributários de rios intermitentes.

Neste cenário, a intensificação dos eventos climáticos extremos representa risco de catástrofe ambiental, não só pela insegurança hídrica das secas prolongadas, mas pela relativa imprevisibilidade dos desastres hidrometeorológicos: “aqueles deflagrados por chuvas prolongadas ou por episódios de chuvas excepcionais e concentradas” (Moura *et al.*, 2016, p. 260). Estas últimas, de acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2019), são difíceis de serem previstas com antecedência satisfatória para envio de alertas. Neste caso, um volume hídrico acima da capacidade de drenagem da rede hidrográfica, precipitado em um curto espaço de tempo, pode acarretar diversos impactos, a exemplo de desastre por inundação, ou seja, “submersão de áreas fora dos limites normais de

um curso de água, em zonas que normalmente não se encontram submersas” (Souza *et al.*, 2022, p. 374).

No contexto das mudanças ambientais provocadas pelo aquecimento global, a premissa da susceptibilidade da microbacia do rio Quixudi a inundação é reforçada pela constatação da intensificação de eventos pluviométricos extremos no Nordeste da América do Sul e do Brasil, respaldando o interesse desta pesquisa em analisar as condições hidromorfológicas e ambientais da referida bacia mediante esta ameaça, bem como justificando a simulação do rompimento da barragem Santa Teresa nesse contexto de análise.

Observando-se os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidos pelas Nações Unidas como um conjunto de metas globais que visam melhorar a qualidade de vida das pessoas, proteger o planeta e garantir a prosperidade para todos até 2030, constata-se que a problemática levantada aqui é contemplada pelo ODS 13, que trata das ações contra a mudança global do clima, bem como pelo ODS 6, que estabelece medidas para proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo, rios, aquíferos e lagos. Esta constatação justifica ainda mais a realização deste trabalho, visto que inclui a abordagem aqui desenvolvida no contexto das preocupações socioambientais em discussão no mundo.

A avaliação do risco e dano potencial associado da barragem Santa Teresa se justifica, de modo particular, mediante o histórico de rompimento não documentado da barragem e da preocupante falta de informações oficiais sobre a mesma até a data de realização deste trabalho. Apesar de se localizar em um trecho de rio urbano considerado pela ANA como susceptível a inundação, a barragem não é monitorada regularmente e o vale a jusante da mesma é habitado de forma desordenada.

De forma geral, este trabalho se justifica pela necessidade de se conhecer os perigos e os riscos ambientais associados à falta de planejamento, gestão e ordenamento do território — que permite a expansão da área habitacional urbana para áreas com potencial de inundação — a fim de instrumentalizar medidas de conscientização ambiental para a prevenção de acidentes ligados ao sistema hidrográfico e à habitação em áreas de risco.

Realizar um estudo dessa natureza numa região tendencialmente seca é necessário pelo fato de não ser tão comum a percepção da problemática que envolve os rios temporários, seu regime de escoamento e seu represamento por barragens, em termos de desastre relacionado ao sistema hidrológico-hidrográfico. O perigo oculto dos rios temporários urbanos, está relacionado à exposição ao risco de enchentes e inundações por parte das populações habitantes a jusante de reservatórios d’água. As enchentes, via de regra, não ultrapassam a cota máxima da calha dos rios, porém, em áreas onde não há proteção das margens por mata ciliar, e onde as

construções civis avançam sobre as margens dos rios, como é o caso dos trechos urbanizados, o rompimento de barragens tem o potencial de provocar inundação, ou seja, o transbordamento do rio para além de sua calha natural. A falta de percepção do risco como uma ameaça em potencial leva a descrença de que a ocorrência de um evento extremo de precipitação possa representar qualquer tipo de perigo.

1.4 Estrutura da tese

Enquadrado na área de concentração Gestão de Recursos Naturais, este trabalho explora a linha de pesquisa Meio Ambiente, Legislação e Gestão Ambiental, abordando o sistema hidrológico-hidrográfico em sua dinâmica territorial e suas implicações socioambientais relacionadas aos riscos ambientais e ordenamento territorial.

A abordagem desta temática está estruturada neste trabalho de tese em quatro tópicos, além desta introdução. O tópico 2 traz uma revisão da literatura que aborda o monitoramento e a segurança de barragens; a vulnerabilidade social, a segregação socioespacial e a defesa civil na sociedade de risco; os rios intermitentes, a modelagem hidrodinâmica e o modelo HEC-RAS; os eventos climáticos extremos e a variabilidade climática do nordeste do Brasil. O tópico 3 trata-se do material e métodos utilizados na pesquisa e explica como foi feita a delimitação da microbacia que contém a barragem Santa Teresa, sua caracterização hidromorfológica e ambiental; a modelagem hidrodinâmica e a simulação do rompimento da barragem; o perfil da população atingida pela inundação e a classificação da barragem por categoria de risco e dano potencial associado. O tópico 4 apresenta os resultados da pesquisa iniciando pela caracterização hidromorfológica da microbacia que abriga a barragem Santa Teresa, seguida da caracterização ambiental da referida bacia; na sequência apresenta-se a modelagem hidrodinâmica e a simulação do rompimento da barragem; depois avalia-se os impactos do rompimento no vale a jusante da barragem e classifica-se a barragem por categoria de risco e dano potencial associado. O tópico 5 apresenta a conclusão da tese, reforçando os resultados mais importantes, revelando as limitações da pesquisa e sugerindo estudos futuros sobre a temática abordada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A técnica de construção de barragens tem séculos de aperfeiçoamento em função do tipo de uso e da experiência prática adquirida com os estudos de rompimento dessas estruturas. Pode-se considerar que acidentes associados ao rompimento de barragens vêm sendo observados desde que barragens passaram a ser construídas de forma sistemática para seus mais diversos propósitos (Paiva *et al.*, 2019).

Um dos primeiros acidentes com barragens de que se tem registro ocorreu há aproximadamente 3.000 anos antes de Cristo em *Wadi el-Garawi*, no Egito, quando a barragem *Sadd el-Kafara* rompeu por galgamento em função de um evento de cheia. Esta barragem, segundo Jansen (1983), possuía 11 metros de altura e 107 metros de comprimento, e foi construída com a intenção de realizar o represamento de água para os trabalhadores de pedreiras localizadas nas proximidades. Entretanto, acredita-se que não foi construído um vertedouro para que fosse possível a liberação do fluxo em períodos de grande precipitação, e esta teria sido a causa do rompimento.

Mais recentemente, Paiva (2019), baseado em estudos de Zhang *et al.* (2016) e Mao *et al.* (2017), estimou que havia aproximadamente um rompimento de barragem a cada 4 dias no mundo, considerando-se em escala global o período de 1954 a 2006. A perda de vidas humanas associadas a este tipo de tragédia apresenta números elevados. De acordo com Proske (2018), o número de pessoas mortas por rompimento de barragens no século 20, excluindo-se a China, é estimado em aproximadamente 13.500 vítimas fatais.

No cenário internacional alguns casos emblemáticos de acidentes com rompimento de barragens podem ser destacados, como o caso da St. Francis Dam, na Califórnia-EUA, ocorrido em 12 de março de 1928. Com problemas nas ombreiras, a barragem vitimou fatalmente 460 pessoas e destruiu dez pontes e 1.200 casas. Outro caso famoso ocorreu na Itália em 1º de outubro de 1963, quando o talude rochoso da barragem de Vajont rompeu e caiu sobre o reservatório a 50 m da crista da barragem. A onda sobre a crista destruiu a cidade de Longarone e vitimou fatalmente 1.925 pessoas. Na china, em 07 de agosto de 1975, após chuvas com período de retorno de 2 mil anos, 240 mil pessoas morreram e cerca de 2 milhões ficaram desabrigadas após o rompimento de duas barragens principais (Banqiao e Shimantan Henan) e outras 62 em seguida (Muller-Salzburg, 1987; Mccully, 1999; Spragens; Mayfield, 2005; Panizzo *et al.*, 2005; Pisaniello, Zhifang; Mckay, 2006 *apud* Sánchez, 2013, p. 362).

No Brasil, o pior acidente ocorrido com barragens foi a ruptura do açude de Orós, no Ceará, em 1960 (Veról, 2010). Em função de um evento hidrológico, em que a precipitação foi superior a 635 mm em menos de uma semana, houve a formação de uma brecha na estrutura, ocasionando um galgamento. As estruturas de proteção não foram erguidas em tempo suficiente e, como resultado, formou-se uma brecha de 201 metros de largura (Willinghoefer, 2015). A onda de cheia resultante do rompimento destruiu o vale a jusante e se estendeu por cerca de 338 quilômetros, atingindo o Oceano Atlântico (Mascarenhas, 1990). A vazão de pico foi estimada em 9.600 m³/s, e por volta de 90% do reservatório foi esvaziado (Lauriano, 2009). Aproximadamente 1.000 pessoas morreram em função deste acidente (Mccully, 2001).

Nos anos de 2015 e 2019 ganharam destaque os desastres de Mariana e Brumadinho ocorridos no Estado de Minas Gerais. Ambos os casos foram registrados em barragens de rejeitos de mineração.

No caso de Mariana, a barragem de Fundão rompeu no dia 05 de novembro de 2015, despejando 34 milhões de metros cúbicos de lama na bacia do rio Doce (ANA, 2016). De acordo com Castro e Almeida (2019), os rejeitos e detritos liberados pelo rompimento da barragem de Fundão seguiram os cursos do córrego Santarém e dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo por cerca de 77 km, até alcançar o rio Doce. Ao todo, a lama percorreu uma extensão de 663,2 km até a foz do rio Doce no oceano Atlântico, provocando danos em 41 municípios com a suspensão imediata do abastecimento de água, da atividade pesqueira e do turismo na região. De acordo com Laschefski (2020), o desastre de Mariana causou 19 mortes e deixou cerca de 1.200 famílias desabrigadas.

No caso de Brumadinho, no dia 25 de janeiro de 2019 a barragem de rejeitos B1 da mina de Córrego do Feijão, de propriedade da empresa Vale S.A., rompeu-se, soterrando mais de 270 pessoas e despejando 13 milhões de m³ de rejeitos úmidos, produzidos pela extração de minério de ferro, no leito do ribeirão Ferro-Carvão (Neves-Silva; Heller, 2020). De acordo com a Fundação Oswaldo Cruz (2019), a onda de lama alastrou-se pela comunidade de Córrego do Feijão e chegou a Brumadinho, atingindo várias cidades ao longo do rio Paraopeba. O desastre destruiu casas, afetou plantações e zonas de criação de animais, além de poluir o rio e dificultar o acesso à água em várias comunidades (FIOCRUZ, 2019).

No Estado da Paraíba, o rompimento da barragem de Camará foi destaque na imprensa nacional no ano de 2004. O caso ocorreu na cidade de Alagoa Nova, na região intermediária de Campina Grande, quando a parede da barragem rompeu por falhas na construção e provocou uma onda de inundação que atingiu a vizinha cidade de Alagoa Grande e adjacências, resultando em três mil moradores desabrigados e cinco vítimas fatais (SEIE, 2004).

Mais recentemente, Valverdes *et al.* (2012) realizaram o mapeamento das barragens que se romperam no Estado da Paraíba no ano de 2011 e identificaram 86 barragens rompidas em 25 municípios, entre os meses de janeiro e agosto daquele ano. Segundo os autores, devido a fatores climáticos, geomorfológicos e antrópicos, estes rompimentos provocaram eventos como pontes rompidas, trechos de rodovias estaduais fechadas e alagamentos, deixando populações desabrigadas e cidades isoladas das suas vizinhas. A maior densidade de municípios afetados se deu nas regiões intermediárias de João Pessoa e Campina Grande, nas bacias do rio Mamanguape (com 8 municípios afetados) e do rio Paraíba (com 16 municípios atingidos).

De acordo com Ferla (2018), as principais causas já observadas no rompimento de barragens de todos os tipos são as causas de galgamento, erosão interna e falhas nas fundações. Além disso, segundo a autora, outras causas podem ser destacadas, como as falhas de projeto, construção e operação, sismos, terremotos e ações de guerra.

Os estudos sobre rompimento de barragens disponíveis em forma de artigos científicos na rede mundial de computadores tratam, sobretudo, de modelagens matemáticas e hidrodinâmicas empregadas na simulação computadorizada de rompimento. Esta constatação procede de uma revisão bibliométrica realizada por Sousa *et al.* (2021). Estes autores analisaram a produção científica internacional sobre rompimento de barragens através de uma abordagem quantitativa que objetivou mensurar a dinâmica bibliométrica do tema no período compreendido entre os anos de 1945 e início de 2021. Foi feita uma pesquisa na coleção principal da base de dados interdisciplinar *Web of Science* e constatou-se que a ocorrência do tema na literatura internacional publicada em periódicos só se verifica a partir do ano de 1980, tendo como principal veículo de comunicação o *Journal of Hydraulic Research*, e o principal país de origem, a China.

Dentre as publicações de maior impacto sobre a temática rompimento de barragens, Sousa *et al.* (*op. cit.*) listaram 44 artigos com base no H-index (índice que mensura o impacto das publicações de um autor de acordo com o número de suas publicações e o respectivo número de citações por outros autores). No teor das publicações listadas é possível identificar, além do emprego das modelagens computadorizadas, outras abordagens como: o resgate de casos históricos de rompimento de barragens; as inundações urbanas provocadas por rompimentos; a análise de risco e a previsão de rompimento e de enchentes; o movimento de sedimentos induzidos por rompimento de barragens; e a propagação de ondas de rompimento em leito seco. As áreas de Recursos Hídricos e Engenharia Civil dominam as publicações sobre essas temáticas com 81% e 58,8% das publicações analisadas.

2.1 Monitoramento e segurança de barragens

O monitoramento de sistemas aquáticos (hidrológico e hidrográfico) é de fundamental importância para a segurança hídrica, não só em termos de abastecimento humano e controle de qualidade da água, mas para a prevenção de acidentes provocados por rompimentos de barragens.

Nos Estados Unidos, desde o final dos anos 1970, já haviam sido desenvolvidos os primeiros estudos de risco de barragens, impulsionados pela ruptura de uma barragem no Estado da Geórgia (Spragens; Mayfield, 2005).

No Brasil, o Estado de Minas Gerais, através da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEMA), depois de diversos eventos de rupturas de barragens de rejeitos de minas e industriais, obrigou todas as empresas responsáveis por barragens a fazer cadastro, o primeiro passo para um programa público de gerenciamento de riscos (Torquetti; Farias, 2004).

Em nível de federação, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Lei Federal nº 12.334/2010, estabelece que a responsabilidade pela segurança, bem como pelas inspeções técnicas periódicas das barragens deve ser atribuída ao empreendedor do reservatório, este, compreendido como o “agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade” (BRASIL, 2010).

A PNSB, de acordo com seu Art. 1º, aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, bem como à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características: (i) altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros); (ii) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos); (iii) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; (iv) categoria de dano potencial associado médio ou alto em termos econômicos, sociais ou ambientais, ou perda de vidas humanas, conforme definido no Art. 6º (BRASIL, *op. cit.*).

No Estado da Paraíba, a Resolução Estadual nº 003, de 11 de fevereiro de 2016 – em conformidade com a PNSB e com a Resolução nº 134/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) – define a periodicidade, a qualificação da equipe responsável, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento das inspeções de segurança regular e espacial de barragens. O Artigo 10º, inciso VIII desta Resolução trata da classificação do nível de perigo das barragens,

conforme as seguintes definições: (a) Normal: quando não foram encontradas anomalias ou as anomalias encontradas não comprometem a segurança da barragem, mas devem ser controladas e monitoradas ao longo do tempo; (b) Atenção: quando as anomalias encontradas não comprometem a segurança da barragem a curto prazo, mas devem ser controladas, monitoradas ou reparadas ao longo do tempo; (c) Alerta: quando as anomalias encontradas representam risco à segurança da barragem, devendo ser tomadas providências para a eliminação do problema; (d) Emergência: quando as anomalias encontradas representam risco de ruptura iminente, devendo ser tomadas as medidas para prevenção e redução dos danos materiais e a humanos decorrentes de uma eventual ruptura da barragem. Para fins desta Resolução, “anomalia” é definida como: “qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa vir a afetar a segurança da barragem, tanto a curto como a longo prazo” (PARAÍBA, 2016).

A classificação quanto a categoria de risco e dano potencial associado é estabelecida na Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que em seu Art. 5º definiu os critérios gerias a serem utilizados para a classificação como sendo: (i) existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas; (ii) existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários; (iii) existência de infraestrutura ou serviços; (iv) existência de equipamentos de serviços públicos essenciais; (v) existência de áreas protegidas definidas em legislação; (vi) natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e (vii) volume (CNRH, 2012).

2.2 Vulnerabilidade social, segregação socioespacial e defesa civil na sociedade de risco

A vulnerabilidade social, no contexto da gestão ambiental, tem uma vertente geográfica importante de ser analisada: a segregação socioespacial. Vignoli (2001) conceitua este termo especificando as concepções sociológica e geográfica nele contidas:

En términos sociológicos, segregación significa la ausencia de interacción entre grupos sociales. En un sentido geográfico, significa desigualdad en la distribución de los grupos sociales en el espacio físico. La presencia de un tipo de segregación no asegura la existencia del otro (Vignoli, 2001, p. 11).

No Brasil, considerando especificamente a formação do espaço urbano, a segregação socioespacial está historicamente associada a vulnerabilidade social das camadas mais pobres da sociedade, em benefício dos interesses locacionais e imobiliários das camadas sociais mais

abastadas. Esta afirmação se apoia em estudo desenvolvido por Negri (2008) que coloca o processo de desenvolvimento capitalista no cerne do desenvolvimento periférico das cidades.

Segundo o referido autor, os problemas urbanos brasileiros começam principalmente a partir da criação da Lei de Terras de 1850, que criou restrições ao acesso da terra para as camadas de renda mais baixa da população. Essa situação só se agravou com o passar dos anos, como explica o autor:

Com a intensificação do modelo agroexportador no século XIX, baseado principalmente na cultura do café e na industrialização incipiente, começou a predominar a ideia nos grandes centros urbanos de que o Brasil não poderia ter cidades que refletissem o atraso econômico e tecnológico do país, mas sim, fazer frente às cidades mais desenvolvidas da Europa.

As reformas realizadas no final do século XIX e início do século XX lançaram modelos estéticos e paisagísticos de embelezamentos das cidades e de ocultamento da pobreza. Para isso, ocorreu a regulação da atuação de alguns instrumentos urbanísticos, como a legalização de atuação do mercado imobiliário, implantação de projetos de saneamento ambiental e paisagismo, enquanto a população de baixa renda era expulsa para as áreas mais afastadas da cidade (Negri, 2008, p. 145-146).

No contexto da gestão ambiental urbana, o papel do Estado na elaboração e execução de políticas públicas de ordenamento territorial é de fundamental importância para a mitigação da segregação socioespacial. No entanto, segundo Villaça (1997), o Estado historicamente desenvolve uma relação de subordinação aos interesses da classe econômica dominante, fato que favorece o controle da produção e consumo do espaço urbano por esta classe nas esferas econômica, política e ideológica. Na esfera política, destaca o autor, a subordinação do Estado favorece a classe dominante legislando sobre o uso e ocupação do solo urbano, e condicionando a localização da infraestrutura urbana e dos aparelhos do Estado aos interesses desta classe.

Por todas as suas condicionantes históricas, a segregação socioespacial relega as camadas economicamente mais vulneráveis da sociedade à ocupação de áreas de risco nas periferias das cidades. No entanto, nos últimos anos, o Estado tem se mobilizado no sentido de aperfeiçoar a legislação relativa à gestão de risco ambiental e à defesa civil.

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), Lei federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) e autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres (BRASIL, 2012). De acordo com Bertone e Marinho (2013), esta lei provê o amparo legal à nova orientação de foco na prevenção de desastres, pois determina a identificação de áreas de risco como obrigatória para o planejamento municipal, autoriza a criação de um sistema de informações e monitoramento de desastres e organiza as

competências dos órgãos governamentais e dos entes federativos no âmbito do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil.

Para Soriano (2012), embora se configure como o principal órgão público para mitigar as consequências de um desastre, a Defesa Civil ainda apresenta uma série de dificuldades estruturais e de recursos que limitam suas ações. No entanto, para Londe *et al.* (2015), as dificuldades comumente verificadas, como falta de equipamentos, instalações físicas precárias e baixa remuneração, não são apontadas pelos agentes da Defesa Civil como os principais obstáculos para a realização dos trabalhos nos municípios. Segundo estes autores, o maior e mais importante desafio colocado pelos agentes da Defesa Civil nos municípios é a interação com a comunidade, crucial para o bom funcionamento dos trabalhos.

Nota-se, a partir desta última afirmação de Londe, que o aspecto sociológico da vulnerabilidade socioambiental é sobressalente em relação ao aspecto geográfico quando se trata de defesa civil. Ou seja, a ausência de interação entre os grupos sociais (defesa civil e comunidade), tem maior influência na segregação socioespacial do que a desigualdade na distribuição dos grupos sociais no espaço físico destacado por Vignoli (2001). Isto é um traço da sociedade de risco definida pelo sociólogo alemão Ulrich Beck.

Os contornos da sociedade de risco foram definidos pelo sociólogo alemão Ulrich Beck em obra intitulada “Sociedade de Risco: rumo a uma outra modernidade”, lançada em 1986. Nesta obra, a concepção de Sociedade de Risco é tida como “uma fase do desenvolvimento da sociedade moderna onde os riscos sociais, políticos, ecológicos e individuais criados por ocasião do momento de inovação tecnológica escapam das instituições de controle e proteção da sociedade industrial” (Beck, 1998).

Para Beck, assim como ocorreu a transição do feudalismo para o capitalismo, também a sociedade industrial clássica passa por um momento de transformação em que há uma ruptura histórica com a concepção de modernidade. A diferença é que essa ruptura não representa o fim da sociedade moderna, e sim sua reconfiguração a partir de uma modernização reflexiva que implica na obsolescência da sociedade industrial e na emergência da sociedade de risco.

A modernização reflexiva, de acordo com Guerra (2006), está levando a sociedade industrial moderna a um estágio de transformação e progresso que destrói e modifica as diversas formas sociais, acabando com as formações de classe, camadas sociais, papéis dos sexos, família nuclear, agricultura e setores empresariais, em nome dos pré-requisitos e formas contínuas do progresso técnico-econômico.

Na sociedade de risco, a modernização reflexiva conduz a um rompimento com os tradicionais controles institucionais — o Estado e a família — e com seus correspondentes

controles morais — a educação e o direito. Assim o risco passa a ser construído socialmente e escapa a percepção sensorial direta, passando a ser adotado por cada sujeito, que assume a responsabilidade pelas próprias escolhas diante as incertezas. Isso coloca o indivíduo em condição de vulnerabilidade diante da imprevisibilidade de suas escolhas com relação ao futuro.

2.3 Rios intermitentes, modelagem hidrodinâmica e o modelo HEC-RAS

Os rios intermitentes podem ser categorizados em efêmeros e temporários (Bayly; Williams, 1973; Towns, 1985). Os efêmeros apresentam fluxo de água superficial apenas após uma precipitação não previsível, e comumente representam riachos de baixa hierarquia, enquanto os rios temporários apresentam um fluxo de água superficial mais longo durante o seu ciclo hidrológico, que pode durar semanas ou meses (Terra *et al.*, 2021). No Brasil, os rios intermitentes e temporários são peculiares à região semiárida e têm seus fluxos regulados pelos efeitos do clima.

Apesar de o clima semiárido atuar sobre porção considerável do território brasileiro, para Lima *et al.* (2014) os estudos sobre os canais de drenagem intermitentes e efêmeros são escassos no âmbito da geomorfologia nacional. Segundo estes autores, o contrário ocorre no cenário internacional, onde trabalhos sobre esse tema são amplamente realizados em regiões secas do norte da África e em países como Austrália, Espanha, Estados Unidos e Israel.

Na Região Semiárida, devido ao regime hidrológico dos rios de terras secas, com pronunciadas descontinuidades espaciais e temporais de vazão, torna-se difícil a definição de descargas fluviais formativas e o estabelecimento das formas padrões do canal fluvial (Powell, 2009; Dornelas *et al.*, 2020). Estudos de rompimento de barragens também são escassos nessa região. Porém, a modelagem matemática é capaz de embasar análises de reservatórios e canais fluviais dos mais diversos tipos com o emprego de tecnologias computacionais avançadas e produtos de satélite, em diversas situações.

A modelagem matemática é uma importante ferramenta de planejamento e apoio à segurança de barragens, uma vez que permite a simulação da ruptura hipotética de uma estrutura de barramento e a propagação da onda decorrente do acidente (Veról, 2010). Modelos hidrodinâmicos aplicam equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, que regem a onda de cheia resultante do colapso de uma barragem, descrevendo a variação do fluxo ao longo do canal (Katopodes; Schamber, 1983).

De acordo com Veról *et al.* (2012), a precisão das respostas fornecidas pelos modelos hidrodinâmicos varia conforme o modelo utilizado. Estes modelos podem ser: modelos simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2D) e, finalmente, os modelos hidrodinâmicos tridimensionais (3D).

Este projeto de tese utilizará o modelo numérico unidimensional HEC-RAS (*River Analysis System*). Este modelo foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrological Engineering Center*) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*USACE – United States Army Corp of Engineers*) e está disponível gratuitamente na rede mundial de computadores.

O HEC-RAS é um dos modelos hidráulicos mais populares na delimitação das zonas inundáveis fluviais (*U.S. Army Corps of Engineers*, 2008). De acordo com Fernandez *et al.* (2013) trata-se de um modelo 1D que resolve as equações de Saint-Venant completas, por aplicação do método de diferenças finitas, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável.

De acordo com Lauriano (2009), as equações de Saint-Venant são equações unidimensionais originais de fluxo não permanente em leitos fluviais, desenvolvidas por Adhémar Jean Claude Barre de Saint-Venant e publicadas em 1870. Estas equações, quando trabalhadas sob o aspecto unidimensional, como no modelo em questão, podem ser descritas pelas equações de Conservação da Massa (Equação 1) e de Conservação da Quantidade de Movimento (Equação 2).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - Sf) \quad (2)$$

onde:

t = variável independente relativa ao tempo (s);

x = variável independente relativa à direção do escoamento (m);

u = velocidade média do escoamento (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);
 h = espessura da lâmina líquida (m);
 S_0 = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e
 S_f = declividade média da linha de energia (m/m), equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito.

A lei de resistência aplicada pelo HEC-RAS é a Equação de Manning-Strickler (Equação 3) e a seção transversal de escoamento é considerada uma seção composta.

$$Q = K \cdot \frac{S}{n} \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto (L/min);

S = área da seção molhada (m^2);

n = coeficiente de rugosidade;

Rh = raio hidráulico (m);

i = declividade da calha (m/m);

$K = 60.000$ (conversão de m^3/s para L/min).

Além disso, considera-se que: $Rh = S/P$, onde:

Rh = raio hidráulico (m);

S = área da seção molhada (m^2);

P = perímetro molhado (m).

A topografia do canal é caracterizada pelo resultado do levantamento topográfico de uma série de seções transversais ao longo do traço do rio em estudo. Para delimitar a zona inundada são calculadas as alturas de água nas seções transversais referidas. Dado a cota da superfície livre ser constante na seção, a zona inundada é limitada pela intercepção da topografia do terreno com a superfície livre em cada seção e o resultado da interpolação entre os perfis das seções transversais (Fernandez *et al.*, 2013).

Todas essas equações são calculadas de forma automática pelo software HEC-RAS, tendo como dado de entrada o modelo digital de elevação do terreno e as devidas seções transversais traçadas sobre ele.

A calibração dos modelos matemáticos depende de vários fatores e é o elemento mais importante para a confiabilidade dos resultados. A calibração de um modelo visa minimizar a diferença entre os dados que foram observados e os resultados das simulações, através do ajuste dos parâmetros implícitos do modelo (Mark *et al.*, 2004).

O coeficiente de rugosidade é um parâmetro importante para ajuste do modelo hidráulico e, é utilizado para calcular a capacidade de escoamento no canal e a velocidade nas seções. Assim, determinar o coeficiente de Manning implica em estimar a resistência ao escoamento no canal e, por não ser um método exato, pode se tornar uma tarefa complicada (Chow, 1959). Por isso o HEC-RAS disponibiliza um rol de configurações pré-estabelecidas de canais fluviais com seus respectivos coeficientes de rugosidade, que podem ser testados de acordo com as semelhanças entre as configurações físicas do canal que se pretende estudar e os modelos pré-estabelecidos no software. Ou seja, o Coeficiente de Manning pode ser ajustado de acordo com indicações do próprio software, até que se tenha a representação mais fiel ao canal fluvial estudado.

Zanandrea *et al.* (2019), compararam o modelo hidrodinâmico HEC-RAS com o algoritmo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) na representação de manchas de inundação e concluíram que ambos os modelos possuem limitações, porém quando existem dados precisos e confiáveis para a região, a modelagem hidrodinâmica é mais indicada, pois fornece resultados mais precisos. O algoritmo HAND – desenvolvido por Rennó *et al.* (2008) – realiza uma estimativa da extensão máxima da mancha de inundação estacionária a partir da descrição do terreno (Nobre *et al.*, 2016).

Willinghoefer (2015) utilizou o HEC-RAS para simular a ruptura hipotética da barragem PCH Águas de Ouro, situada na divisa entre os municípios de Ouro e Capinzal, no Oeste de Santa Catarina. O autor buscou avaliar os impactos causados pela propagação da onda de cheia no vale a jusante com base nas características de uso e ocupação do solo da região, bem como classificar a barragem por categoria de risco e dano potencial associado. O estudo concluiu que a onda resultante da ruptura da barragem não altera de forma significativa as condições de jusante. Assim, classificou-se a barragem como sendo de risco e dano potencial associado baixos.

Parmigiani (2017) utilizou o modelo HEC-RAS para avaliar dados como áreas inundadas e elevação dos níveis da água gerados pelo referido modelo, bem como os impactos socioambientais decorrentes, após o rompimento hipotético da barragem de Monjolinho, localizada no Rio Passo Fundo no Município de Nonoai-RS. Os resultados revelam que as

modificações nas áreas inundadas foram significantes para todos os trechos de rio estudados, e variaram de acordo com os diferentes valores de rugosidade de canal utilizados.

Santos *et al.* (2019) utilizaram o HEC-RAS para avaliar o comportamento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da Barragem de Juturnaíba no Rio de Janeiro, após hipotético rompimento da estrutura. O estudo estimou o alcance da mancha de inundação, a profundidade e a velocidade máxima da lâmina d'água. A mancha de inundação alcançou 30 km e atingiu com velocidade pouco expressiva áreas rurais de assentamentos, fazendas e agroindústrias, além de áreas urbanas de três municípios.

2.4 Eventos climáticos extremos

A definição de evento extremo é tema de muita discussão científica e disciplinar, uma vez que há muitas abordagens que confundem o evento em si com seus impactos. Conforme observa Stephenson (2008), “eventos extremos são geralmente fáceis de reconhecer, mas difíceis de definir”.

Mcphillips *et al.* (2018) realizaram uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema e identificaram que as abordagens disciplinares da Ecologia, das Ciências da Terra, da Hidrologia, da Engenharia e das Ciências Sociais se utilizam dos termos “perturbação”, “perigo” e “desastre” para descrever eventos de magnitude variável, ou mesmo eventos com impactos substanciais.

Os autores supracitados fazem uma crítica as abordagens disciplinares e afirmam que não há clareza na definição de evento extremo, uma vez que, em 23% da bibliografia por eles analisada (244 artigos), não se separa os eventos de seus impactos, o que é recomendável que se faça. Também colocam como preocupante que 12% de todos os artigos examinados não apresentassem qualquer definição de evento extremo, e 51% não tivessem clareza sobre qual era sua definição ou conotação de evento extremo. Por fim, os autores reconhecem a complexidade de se unificar uma definição para o termo, e recomendam que os estudiosos do tema se esforcem para esclarecer o máximo possível as especificidades de suas abordagens.

Não achamos que podemos apresentar um único limite unificador para definir eventos extremos, pois o limite apropriado pode variar dependendo do tipo de evento, dos limites do sistema, do contexto geográfico ou social, dos objetivos do pesquisador ou gestor, ou outros fatores. Ao endossar meios variáveis de definir eventos extremos, torna-se crítico que todos sejamos muito claros e deliberados ao articular nossa definição. Para tornar essas definições mais úteis, recomendamos que elas incluam o tipo de evento, os sistemas técnico-ecológico-sociais potencialmente afetados, o limite

que está sendo usado para caracterizar o evento como extremo e a justificativa para o limite escolhido. (Mcphillips *et al. op. cit.*, p. 451)

É imperioso salientar que este projeto de tese abordará os eventos extremos do tipo climático (especificamente extremos de precipitação), definindo-os como aqueles em que as médias pluviométricas históricas são superadas, afetando o sistema hidrológico-hidrográfico ligado ao uso e ocupação da superfície terrestre, com potencial de provocar o colapso das infraestruturas de captação, armazenamento e escoamento da água.

No tocante aos eventos extremos referentes ao clima, a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2021) publicou no dia 1º de setembro de 2021 um atlas intitulado “*Climate and Water Extremes (1970–2019)*”, em que trata da mortalidade e das perdas econômicas ocasionadas por eventos climáticos. Este documento revela que a ocorrência de eventos climáticos extremos se multiplicou por 5 nos últimos 50 anos, resultando em 2 milhões de pessoas mortas e num prejuízo econômico de 3,4 trilhões de dólares.

Entre os anos de 1970 e 2019 foram contabilizados mais de 11 mil eventos como secas, enchentes, deslizamentos de terra, tempestades e incêndios. Só na década de 1970, foram registrados 711 fenômenos dessa natureza. Na década de 2000 esse número subiu para 3.536 e, na década seguinte, registrou-se 3.165 eventos climáticos extremos, significando um aumento de cinco vezes em relação aos anos 70.

Ainda de acordo com a OMM (2021), as inundações correspondem aos principais desastres registrados (44%), seguidas por tempestades tropicais (35%). Os países em desenvolvimento concentram 91% das perdas humanas decorrentes destes tipos de desastre. Apenas no continente asiático, ocorreram 3.400 desastres ao longo das últimas cinco décadas, tendo resultado em quase 1 milhão de mortes. Na América do Sul, foram 867 eventos climáticos extremos, com um saldo de 58 mil vítimas. No Brasil, desde 1970, foram registrados 193 eventos extremos, entre os quais, o desastre mais caro da América do Sul — a seca de 2014 no sudeste do país — que acumulou perdas de mais de 5 bilhões de dólares.

O sexto relatório do IPCC (2021) atribui o aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos às emissões de gases do efeito estufa induzidas pelo homem. De acordo com o relatório, evidências de mudanças observadas e atribuição à influência humana se fortaleceram para vários tipos de extremos desde o relatório de 2014, em particular para precipitações extremas, secas, ciclones tropicais e extremos compostos.

Entre as principais causas deste problema, o fenômeno da urbanização tem potencializado a emissão de gases do efeito estufa e, conseqüentemente, contribuído de forma acentuada para as mudanças climáticas desencadeadoras dos eventos extremos. Mais de 50%

da população mundial vive em cidades, lócus crítico de ex-posição, risco e vulnerabilidade a eventos extremos (McPhillips *et al.* 2018).

De acordo com Crippa *et al.* (2021), as emissões de gases poluentes induzidas pelo homem no período de 1970 a 2015 estão concentradas nos centros urbanos. Só nesse último ano, os centros urbanos produziram aproximadamente um terço das emissões antropogênicas de CO₂ (35%) e as seguintes proporções de NO_x (29%), PM₁₀ (27%), CO (26%), SO₂ (37%) emitidos em todo o mundo.

Em comparação, o ano de 1970 apresentou proporções bem menores de emissões totais oriundas dos centros urbanos: em média, 20% para NO_x, PM₁₀ e CO; 26% para CO₂; 27% para SO₂ e 5% para NH₃. A proporção de emissões globais de áreas urbanas mais amplas também foi menor em 1970, variando de 40% a 70%, dependendo do poluente.

Ao incluir todas as áreas urbanas, e não apenas centros urbanos, Crippa *et al.* (2021) afirmam que cerca de 70% a 80% das emissões globais são oriundas destas áreas. A única exceção é o NH₃, onde as áreas rurais respondem por mais de 50% das emissões globais, principalmente associadas às atividades agrícolas. Nos centros urbanos, as principais fontes de emissão estão relacionadas com a combustão, principalmente a queima de combustíveis fósseis.

Com maior densidade populacional e infraestrutura potencialmente frágil, as cidades são frequentemente mais vulneráveis às ondas de calor extremas do que suas áreas circundantes, isto, devido à exacerbação dos impactos da ilha de calor urbana e a poluição do ar (Méndez-Lázaro *et al.*, 2015, 2017). Alto grau de vulnerabilidade urbana também se verifica em relação aos terremotos (Pelling, 2003), ciclones ou inundações costeiras (Sherbinin *et al.*, 2007). Assim, é praticamente impossível conceber qualquer resposta mitigadora ou ação adaptativa a esses fenômenos sem enfrentar a discussão sobre cidades, urbanização e governança local (Martins; Ferreira, 2011).

2.5 Variabilidades climáticas e o clima da Região Nordeste do Brasil

A variação espacial e a flutuação temporal são características inerentes ao tempo e ao clima. Inúmeros estudos demonstraram que o campo de temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos pode apresentar variações lentas que se manifestam em escalas de várias décadas. De acordo com Kayano e Andreoli (2021), as variações que ocorrem no campo de TSM ocasionam alterações também na circulação atmosférica. Esses padrões anômalos de TSM

e os correspondentes na circulação atmosférica são denominados modos de variabilidade climática de baixa frequência com escalas de variação temporal interdecenal ou multidecenal.

Angelocci e Sentelhas (2010) ressaltam que, para um melhor entendimento do estudo das flutuações climáticas, é necessário entender os conceitos de variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática. Segundo estes autores, a combinação das escalas temporal e espacial dos fenômenos meteorológicos gera a variabilidade climática, que se refere às flutuações das condições meteorológicas e, por extensão, das condições climáticas em torno da média climatológica de um determinado período observado. Já as tendências (crescentes ou decrescentes) são flutuações ocorridas em tempos curtos e, por isso, não devem ser confundidas com mudanças do clima. As anomalias, por sua vez, referem-se ao desvio acentuado do padrão observado de variabilidade, geralmente associado a um fator causal que pode ter várias origens. O mais comum atualmente são as anomalias associadas aos eventos El Niño e La Niña. No caso de mudança climática, este é um termo que designa uma tendência de alteração estatística significativa da média de um elemento climatológico ou de sua variabilidade em períodos de tempo mais extensos, como décadas ou séculos.

Angelocci e Sentelhas (2010) ainda chamam a atenção para o fato de que não há uma distinção absoluta entre os termos variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática, pois dependendo da escala de tempo de estudo, certa flutuação que poderia ser considerada uma variabilidade numa escala de milênios, pode ser considerada uma mudança na escala de décadas ou séculos.

Com relação as anomalias, os eventos El Niño e La Niña são as mais comumente estudadas com fins de previsão meteorológica, porém, para a Região Nordeste do Brasil, Kayano e Andreoli (2006) afirmam que em apenas 36% das vezes uma previsão baseada no El Niño Oscilação Sul (ENOS) para o clima do Nordeste Brasileiro seria correta. Esta porcentagem relativamente baixa se dá, principalmente, porque as variações interanuais do clima do Nordeste Brasileiro estão mais intimamente ligadas aos modos de variabilidade de TSM do Atlântico Sul tropical do que ao modo de variabilidade do Pacífico tropical.

Sobre a Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA), Kayano e Andreoli (2006) afirmam que este modo de variabilidade de TSM caracteriza-se por apresentar, na fase quente, anomalias de temperatura positivas no Atlântico Norte e negativas no Atlântico Extratropical Sul. Já a fase fria da OMA apresenta um padrão similar de anomalias de TSM nesses mesmos setores oceânicos, porém, com sinais invertidos. Com isso, os campos de anomalias de TSM associados à OMA podem constituir um estado básico para fenômenos com escala de variação temporal mais rápida.

No contexto dos efeitos da OMA sobre os extremos climáticos, Kayano *et al.* (2016) analisaram como os anos de secas e de chuvas extremas no Nordeste Brasileiro são modulados por essa oscilação de baixa frequência.

Os autores afirmam que a principal diferença nos padrões de anomalia da TSM nos trópicos, entre as fases OMA responsáveis pelas diferenças nos padrões de anomalia de precipitação, é o posicionamento diferencial em longitude do aquecimento ou resfriamento das águas superficiais no Atlântico equatorial. Em consequência disso, as circulações anômalas de Hadley e Walker no Atlântico também mostram diferenças entre as fases de OMA, o que justifica as anomalias de precipitação observadas sobre a América do Sul tropical.

As circulações de Hadley e Walker são utilizadas para explicar os fenômenos extremos, principalmente o El Niño e La Niña, que estão ligados a mudanças no posicionamento do principal sistema causador de precipitação, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Bezerra, 2006).

Kayano *et al.* (2016) afirmam que a forte célula anômala de Atlantic Hadley determina a estrutura dipolar das anomalias de precipitação entre o Nordeste brasileiro e o norte da América do Sul para os casos de anos secos e de anos úmidos incluídos na fase quente da OMA. Já a célula anômala forte Atlantic Walker define a secura sobre o Nordeste brasileiro para os anos secos incluídos na fase fria da OMA, e ambas as células anômalas Atlantic Hadley e Walker atuam juntas para produzir uma condição seca anômala sobre o Nordeste brasileiro e condição úmida sobre o norte da América do Sul.

No tocante à previsibilidade climática na Região Nordeste, Martins e Vasconcelos Júnior (2017) também concordam que as anomalias de TSM do Oceano Atlântico Tropical têm papel mais direto, sendo uma forçante menos remota e mais transiente que a do ENOS. Os autores explicam que o gradiente de anomalias de TSM na Região Nordeste modula a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Segundo eles, gradientes positivos, orientados sul-norte no Atlântico Tropical, ou seja, anomalias mais quentes no Atlântico Tropical Norte do que no Atlântico Tropical Sul, mantêm a ZCIT ancorada em posições mais ao sul durante a estação úmida do Nordeste – fevereiro, março, abril e maio (FMAM) – produzindo condições de seca para a região. Por outro lado, gradiente de anomalia de TSM negativa provoca incursões mais ao sul da ZCIT, levando a anos, em geral, com acumulados acima da média histórica (Martins; Vasconcelos Júnior, *op. cit.* p. 65).

Ainda segundo estes autores, nos últimos anos, os valores de índices dos gradientes da anomalia de TSM (calculados a partir da subtração da média das anomalias de TSM no Atlântico Tropical Norte e Atlântico Tropical Sul) se mantiveram com valores positivos em

2010, próximos à normalidade em 2011 e novamente positivos em 2012 e 2013. A marcada variabilidade sazonal e interanual também mostrou tendências de acréscimo nos últimos anos, o que indica a concordância com os períodos de seca intensa observados na Região Nordeste.

3 MATERIAL E MÉTODOS

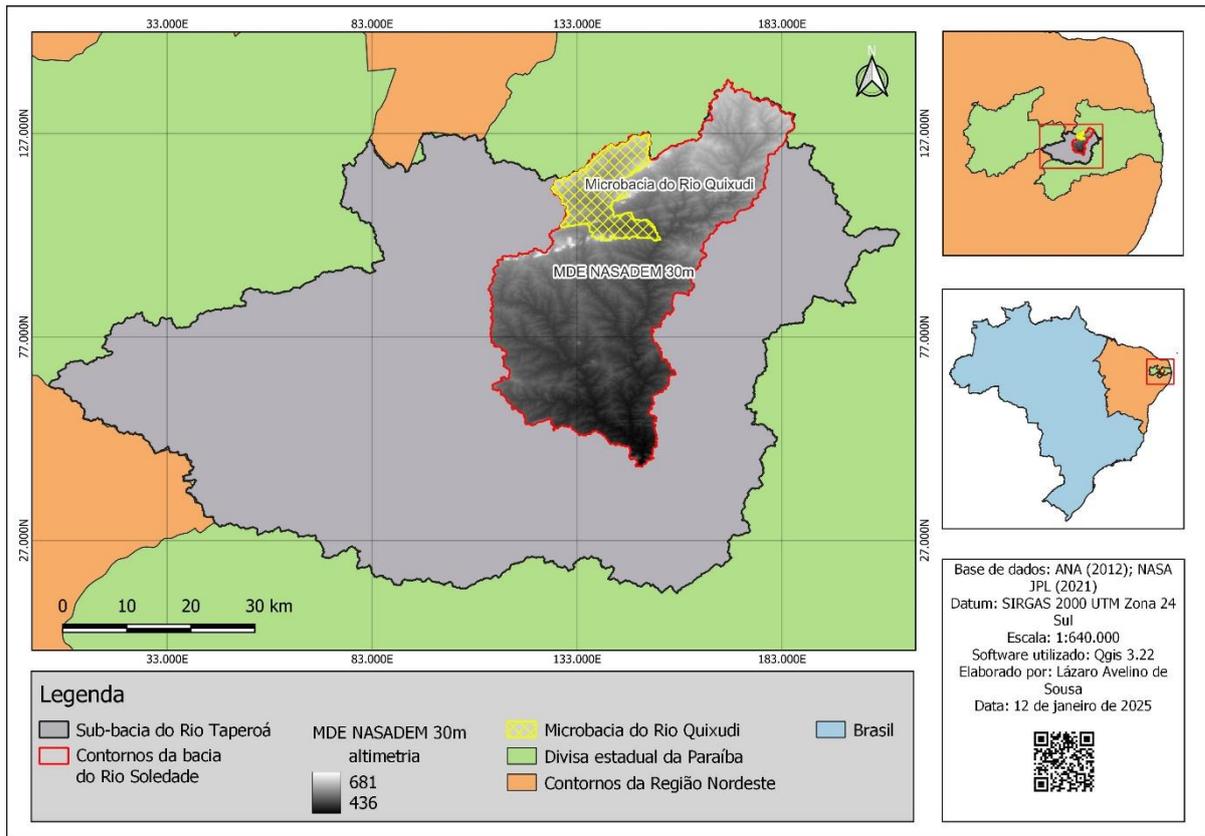
Este trabalho de tese está ambientado dentro dos limites da sub-bacia do rio Taperoá, tendo como recorte específico a microbacia do rio Quixudi, onde se encontra localizada a barragem Santa Teresa, no município de Soledade. Neste recorte territorial, através do processamento digital de dados secundários em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), procedeu-se uma análise hidromorfológica e ambiental, bem como realizou-se uma modelagem hidrodinâmica para estudar o impacto de rompimento da barragem Santa Teresa e classificá-la por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA).

3.1 Delimitação e localização da microbacia hidrográfica do rio Quixudi

A delimitação da microbacia do rio Quixudi foi realizada através dos *softwares* livres QGIS (*Quantum Geographic Information System*) versão 3.22 e HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System*) versão 4.9. Ambos são Sistemas de Informação Geográfica que permitem modelar e mapear as características do ambiente físico de forma integrada, seja a partir de dados coletados em campo, ou a partir de dados secundários.

Para modelar a bacia foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) NASADEM (NASA JPL, 2021), com resolução espacial de 30 metros, adquirido gratuitamente através do *plugin Open Topography DEM Downloader* associado ao QGIS. Utilizou-se como referência espacial para baixar o referido MDE os limites territoriais da bacia do rio Soledade (Figura 1), extraídos do arquivo *GeoPackage* das bacias Ottocodificadas de nível cinco da ANA, disponível na Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO, 2017) (ANA, 2012).

Figura 1 – Recorte espacial utilizado para baixar o Modelo Digital de Elevação (MDE)



Fonte: Autoria própria (2025)

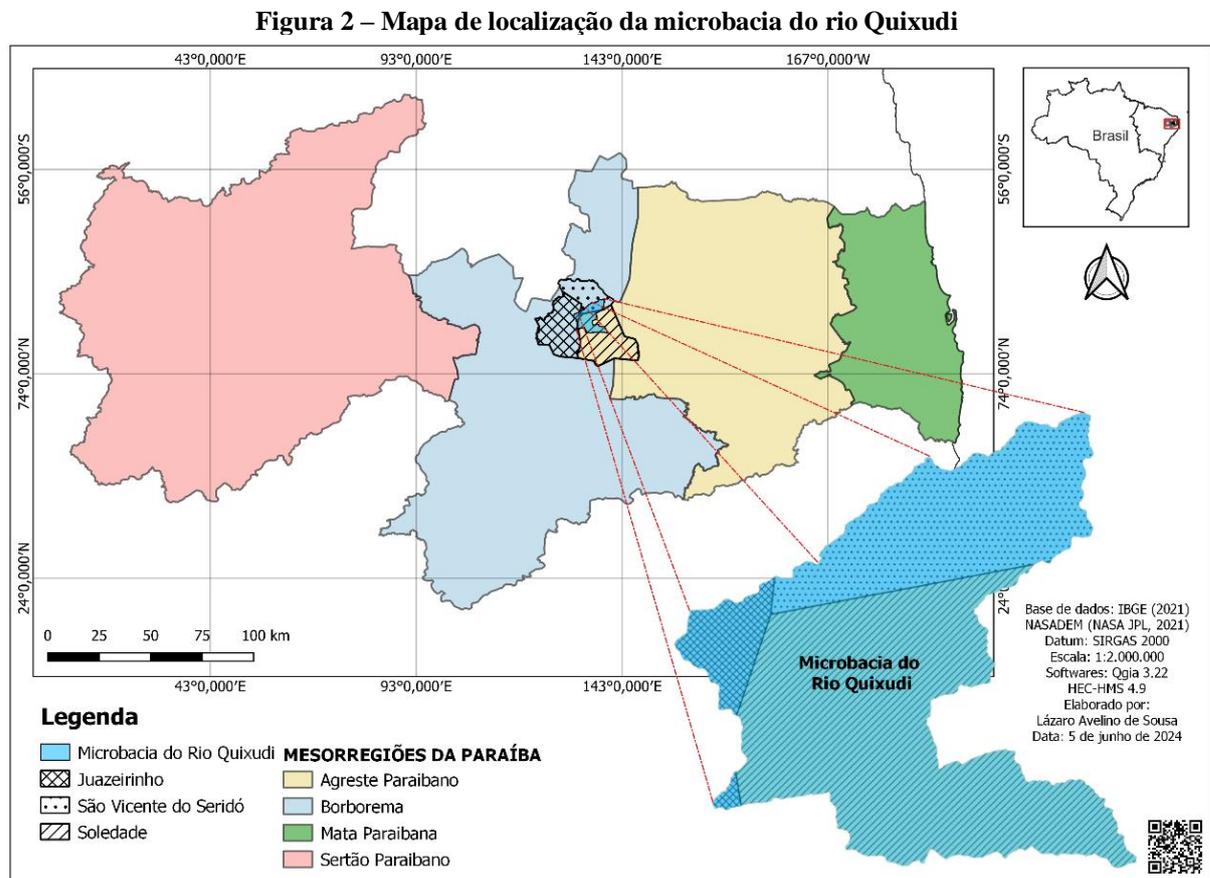
Ainda no QGIS, o arquivo MDE em formato Tiff foi reprojetoado para o sistema de coordenadas planas SIRGAS 2000 UTM Zona 24 Sul, para que se pudesse obter dados métricos da bacia através do HEC-HMS.

No HEC-HMS foi feita a delimitação da microbacia e a extração da rede de drenagem. Primeiro fez-se uma correção no MDE através do comando *Preprocess Sinks*, que identificou qual é a quantidade de preenchimento que é necessário para mover a água de célula para célula no terreno representado no MDE, preenchendo seus vazios. Depois, utilizou-se o comando *Preprocess Drainage*, para gerar a direção do fluxo (*Flow Direction*) entre as células do MDE e o número de células a montante que estão drenando para um ponto de jusante (*Flow Accumulation*). Em seguida, com o comando *Identify Streams*, identificou-se os cursos d'água ou canais de drenagem de acordo com área mínima estabelecida de 1 km² para uma maior riqueza de detalhes. Feito isso, determinou-se o *breack point*, indicando na imagem o exutório do rio Quixudi e, por último, com o comando *Deliniate Elements*, o *software* delimitou automaticamente a microbacia sobre o MDE. Dentro dos limites da microbacia o *software* gerou automaticamente três áreas de contribuição que foram nomeadas de AC1, AC2 e AC3.

Depois de delimitada a bacia, seus contornos e sua rede de drenagem foram exportados em formato *Shapefile* para serem trabalhados novamente no QGIS. A área e o perímetro da microbacia serão descritos adiante, na análise morfométrica.

A localização da microbacia abrange o território de três municípios pertencentes às mesorregiões da Borborema e do Agreste Paraibano, sendo 2,3% do município de Juazeirinho e 17,7% do município de São Vicente do Seridó — na mesorregião da Borborema — e 14,5% do município de Soledade — na mesorregião do Agreste.

O mapa da Figura 2 traz a localização da microbacia do rio Quixudi em relação aos três municípios e às mesorregiões estaduais da Paraíba.

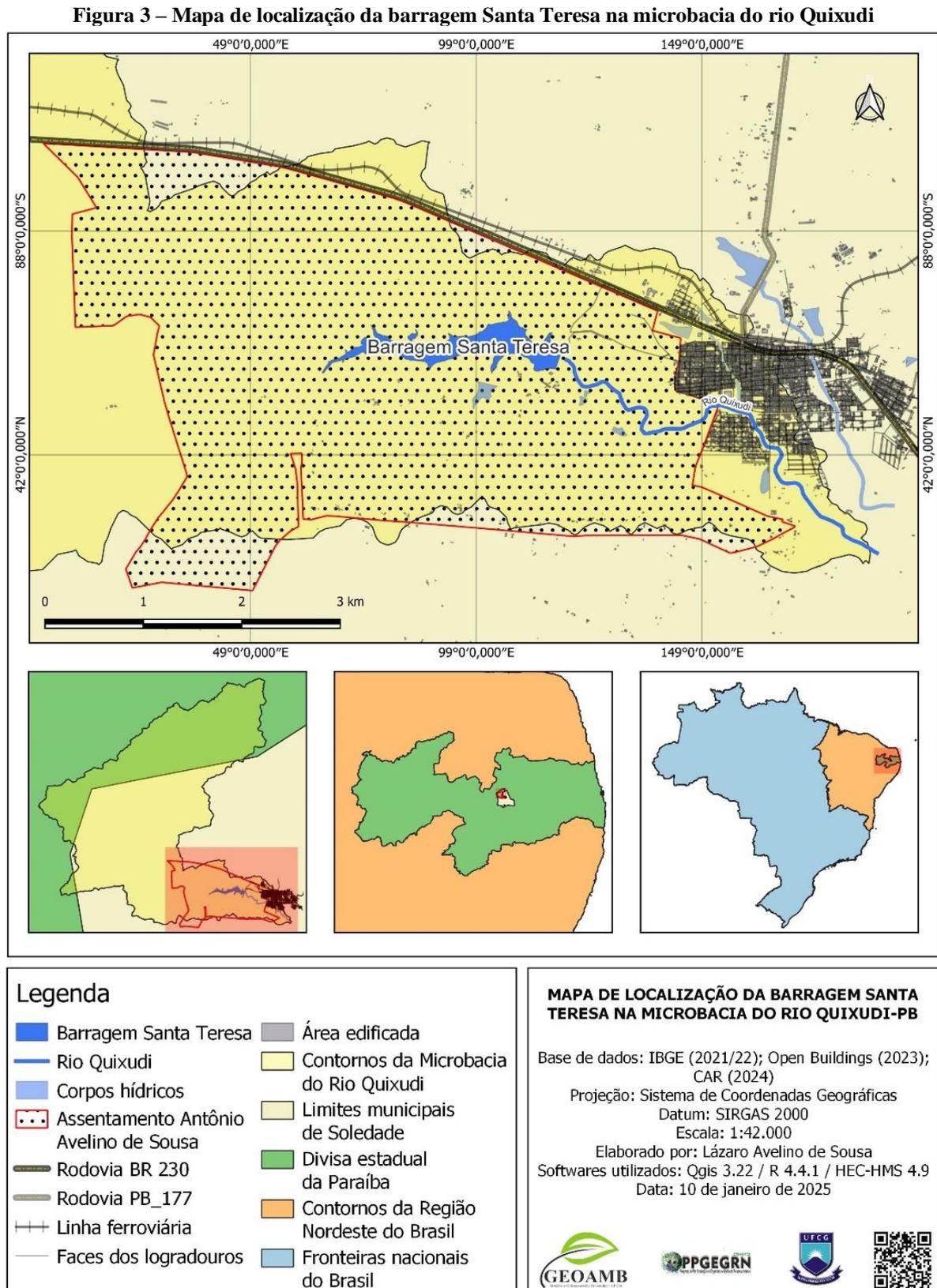


Fonte: Autoria própria (2024)

3.2 Localização da barragem Santa Teresa

Dentro dos limites da microbacia do rio Quixudi, a barragem Santa Teresa localiza-se no Assentamento Antônio Avelino de Sousa, ao lado esquerdo da BR 230 (sentido oeste), na

altura do km 218 (Figura 3). A estrutura interrompe o curso do rio Quixudi a uma distância de aproximadamente 3 km a oeste da sede do município de Soledade.



Fonte: Autoria própria (2025)

A referida barragem tem uma capacidade de armazenamento de 6.000.000 m³ de água (Almeida, 2016). Trata-se de um barramento de terra não-homogênea medindo 6 m de altura e 380 m de comprimento, com largura de crista de 4 m, e de base dos taludes de 25 m. A barragem conta com um vertedouro de concreto, tipo soleira livre, com 60 m de comprimento e largura igual à da crista da barragem. A diferença de altura entre a crista da barragem e a crista do vertedouro é de 1,5 m (Figura 4). Em dezembro de 2024 a crista da barragem foi pavimentada com calçamento em paralelepípedo.

Figura 4 – Fotografias da barragem Santa Teresa



Fonte: Autoria própria (2025). **Legenda:** A) Panorama da barragem vista de Norte para Sul; B) Panorama da barragem vista de Sul para Norte; C) Pavimentação da crista vista de Sul para Norte; D) Pavimentação da crista vista de Norte para Sul.

3.3 Caracterização hidromorfológica da microbacia hidrográfica do rio Quixudi

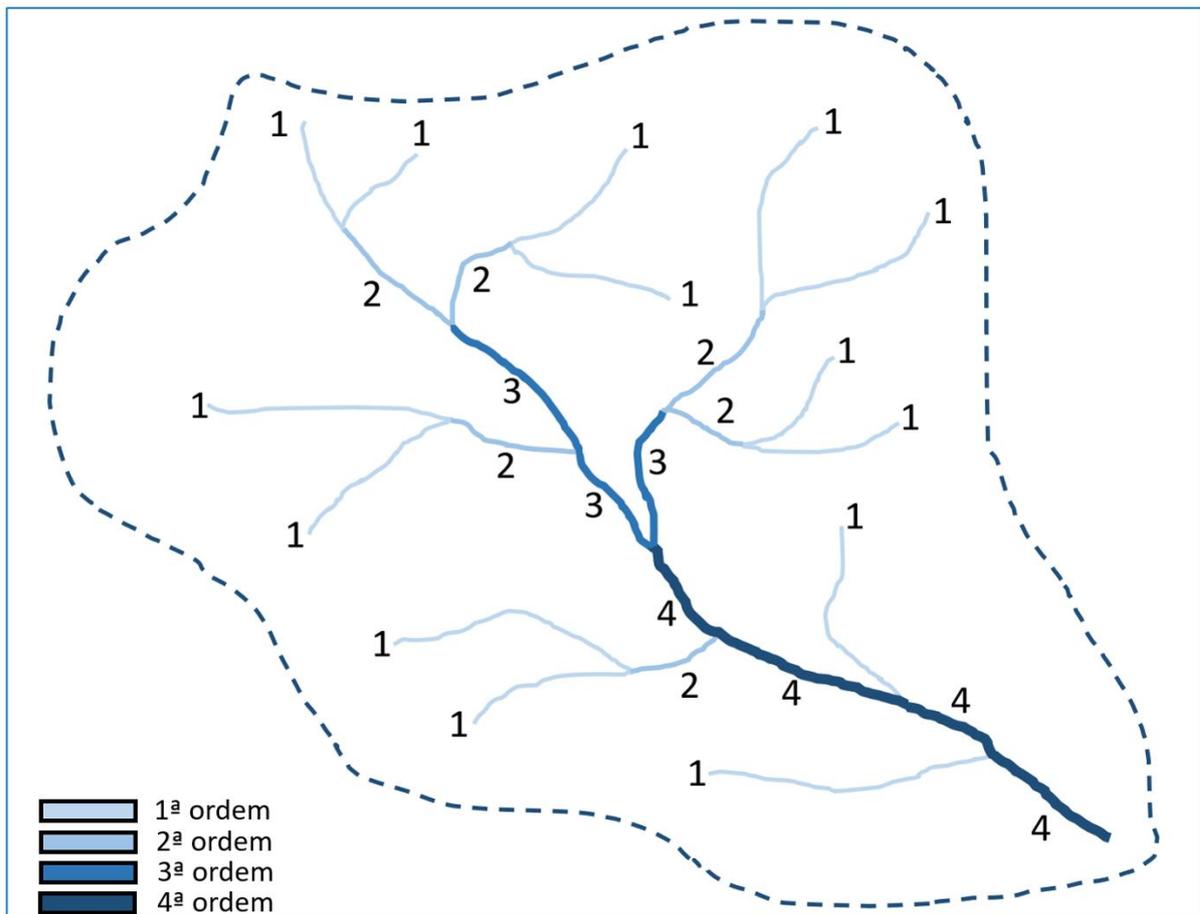
A análise morfométrica e da hierarquia fluvial embasaram a caracterização hidromorfológica da microbacia. A classificação hierárquica da rede de drenagem foi feita

segundo o método de Strahler (1952), através do qual verificou-se o número total de canais da microbacia, assim como o total de canais de cada ordem. Por este método,

os menores canais, sem tributários, são considerados como de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e de primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de dois canais de terceira ordem, podendo receber tributários das ordens inferiores. E assim sucessivamente. (Christofolletti, 1974, p. 106-107).

A Figura 5 ilustra a hierarquia fluvial classificada segundo o método de Strahler (1952).

Figura 5 – Ilustração da classificação hierárquica de uma rede fluvial segundo o método de Strahler (1952)



Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: os números indicam as ordens dos canais de drenagem

O canal principal da microbacia foi definido pela magnitude, ou seja, pela quantidade de nascentes ou de canais de primeira ordem que lhes são tributários.

A caracterização morfométrica contemplou a análise linear da rede de drenagem, depois a análise areal da microbacia e, por fim, a análise altimétrica.

Utilizando-se das ferramentas “Estatística Zonal” e “Calculadora de Campo” do QGIS, obteve-se, a partir do MDE, a área da microbacia (km²); o perímetro (km); o comprimento do canal principal (km); o comprimento do equivalente vetorial — canal principal desconsiderando os meandros (km); o comprimento de todos os canais (km); o comprimento do Eixo axial — soma do comprimento do equivalente vetorial com a distância da sua nascente ao divisor topográfico mais remoto (km); a altimetria mínima, máxima e média (m); e a amplitude altimétrica máxima (m). Todos estes valores métricos foram utilizados para calcular os parâmetros morfométricos descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros utilizados na análise morfométrica da microbacia do rio Quixudi

Nº	Parâmetro	Equação	Descrição	Unidade	Fonte
1	Comprimentos médios dos canais (L _m)	$L_m = \frac{L_u}{N_u}$	L _m = Comprimento médio dos canais; L _u = Comprimento dos canais de uma dada ordem; N _u = Número de canais da mesma ordem.	m	Horton (1945)
2	Extensão do percurso superficial (E _{ps})	$E_{ps} = \frac{1}{2 \times D_d}$	E _{ps} = Extensão do percurso superficial; D _d = Densidade de drenagem.	km	Christofoletti (1980)
3	Sinuosidade do canal principal (S _{in})	$S_{in} = \frac{R_p}{L_{Rp}}$	S _{in} = Sinuosidade do canal principal; R _p = Comprimento do rio principal; L _{pr} = Comprimento do equivalente vetorial.	Km·km ⁻¹	Schumm (1963)
4	Frequência dos canais (F _r)	$F_r = \frac{N_u}{N_t} \times 100$	F _r = Frequência dos canais; N _u = Número de canais de uma dada ordem; N _t = Número total de canais.	%	Horton (1945)
5	Razão de bifurcação (R _b)	$R_b = \frac{N_u}{N_u + 1}$	R _b = Razão de bifurcação; N _u = Número de canais de uma dada ordem; N _u + 1 = Número de canais de ordem imediatamente superior acrescido de 1.	-	Horton (1945)
6	Densidade de drenagem (D _d)	$D_d = \frac{C_r}{A}$	D _d = Densidade de drenagem; C _r = Comprimento total dos rios da bacia; A = Área da bacia.	Km·km ⁻²	Horton (1945)
7	Densidade hidrográfica (D _h)	$D_h = \frac{N_t}{A}$	D _h = Densidade hidrográfica; N _t = Número total de canais; A = Área da bacia.	canais·km ⁻²	Christofoletti (1969) <i>apud</i> Souza <i>et al.</i> (2021)
8	Coefficiente de compacidade	$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	K _c = Coeficiente de compacidade; P =	-	Villela e Mattos (1975)

	(Kc)		Perímetro da bacia; A = Área da bacia		<i>apud</i> Rodrigues <i>et al.</i> (2013)
9	Coefficiente de manutenção (Cm)	$C_m = \frac{1}{D_d} \times 1000$	Cm = Coeficiente de manutenção; Dd = Densidade de drenagem.	m ² ·m ⁻¹	Christofoletti (1980)
10	Razão de Textura (T)	$T = \frac{N_t}{P}$	T = Razão de textura; Nt = Número total de canais da bacia; P = Perímetro da bacia.	-	Smith (1950) <i>apud</i> França (1968)
11	Tempo de Concentração (Tc)	$T_c = 57 \times \left(\frac{L^2}{S}\right)^{0,385}$	Tc = Tempo de concentração; L = Comprimento do talvegue (km); S = declividade equivalente do talvegue (m/km).	minutos	Kirpich (1940) <i>apud</i> Mostarda Neto (2018)
12	Gradiente do canal principal (GP)	$GP = \frac{A_{cp}}{C_{cp}} \times 100$	GP = Gradiente do canal principal; Acp = Diferença de altitude ao longo do curso d'água principal; Ccp = Comprimento do rio principal.	%	Horton (1945)
13	Razão de Relevô (Rr)	$R_r = \frac{\Delta H}{L'}$	Rr = Razão de relevo; ΔH = Amplitude altimétrica máxima; L' = Comprimento do eixo axial.	-	Strahler (1964)
14	Índice de Rugosidade (Ir)	$I_r = \Delta H * D_d$	Ir = Índice de rugosidade; ΔH = Amplitude altimétrica; Dd = Densidade de drenagem.	-	Christofoletti (1969) <i>apud</i> Souza <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Autoria própria (2024)

Os mapas de altimetria e declividade foram produzidos no QGIS a partir do Modelo Digital de Elevação NASADEM. O mapa hipsométrico foi confeccionado reclassificando o *raster* MDE através do algoritmo *r.recode* do sistema GRASS GIS, convertendo-o de um *raster* contínuo para um *raster* discreto, onde as altitudes máximas e mínimas foram representadas por cores quentes e frias respectivamente. Já o mapa da declividade foi gerado automaticamente pelo QGIS a partir do MDE, optando-se pela declividade expressa em porcentagem. A partir da declividade, classificou-se o relevo da microbacia de acordo com os parâmetros de classificação da EMBRAPA (1979), que considera o percentual de inclinação zenital do terreno em relação ao plano para distinguir as classes de relevo. Para isso o *raster* com a declividade foi reclassificado através do comando “Reclassificar por Tabela”, onde os percentuais de declividade foram agrupados em classes que foram nomeadas de acordo com a norma da Embrapa.

A declividade equivalente do canal principal foi calculada de acordo com a Equação (4), proposta por Taylor e Schwarz (1952), citados por Borsato (2005, p. 105), na qual, a

declividade de cada trecho do canal (D_i) foi obtida da relação entre o valor do desnível entre as extremidades de cada trecho i e o comprimento do respectivo trecho.

$$D_i = \frac{\Delta H_i}{L_i} \quad D_{eq} = \left(\frac{\sum L_i}{\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{D_i}} \right)} \right)^2 \quad (4)$$

Onde: D_{eq} = declividade equivalente (adimensional); L_i = comprimento horizontal de cada trecho i (km); D_i = declividade de cada trecho i (m/m); ΔH_i = desnível entre as extremidades de cada trecho i (m).

O valor total da declividade equivalente foi utilizado na fórmula de Kirpich, adotada para calcular o tempo de concentração (T_c) da microbacia, conforme indicado por Mostarda Neto (2018, p. 34). O método de Kirpich foi adotado por ser o mais amplamente utilizado na literatura para o estudo de bacias rurais de médio e grande porte. Embora sua validade teórica requeira sua aplicabilidade precípua em bacias de no máximo 0,45 km², estudos de Silveira (2005), apontados por Sampaio et al. (2016), mostraram que este método também funcionou bem para bacias entre 153 e 11.162 km².

Os valores de referência para a análise morfométrica, bem como para a classificação do relevo da microbacia, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de referência para classificação dos parâmetros morfométricos e do relevo da microbacia.

Parâmetro	Unidade	Formato da bacia	Limite	Classe
Índice de Sinuosidade ¹	Adim.	-	0 a 1,0	Canais Retilíneos
		-	1,0 a 2,0	Canais Transicionais
		-	>2,0	Canais Sinuosos
Razão de Textura ²	Adim.	-	< 2,5	Grosseira
		-	2,5 a 6,2	Média
		-	> 6,2	Fina
Coeficiente de Compacidade ³	Adim.	Redonda	1,00 a 1,25	Alta tendência a enchentes
		Ovalada	1,25 a 1,50	Tendência média a enchentes
		Oblonga	1,50 a 1,70	Baixa tendência a enchentes
		Comprida	>1,70	Tendência a conservação
Densidade de Drenagem ⁴	Km/km ²	-	< 1,50	Baixa
		-	1,50 a 2,50	Média
		-	2,50 a 3,00	Alta
		-	> 3,00	Super-alta
Densidade Hidrográfica ⁵	Nº de Rios/km ²	-	< 3	Baixa
		-	3 a 7	Média
		-	7 a 15	Alta
		-	>15	Muito alta
Tempo de Concentração ¹	Minutos	-	< 6 horas	Curto, Rápido (inundações bruscas)

		-	> 6 horas	Longo, Lento (inundações graduais)
Índice de Rugosidade ¹	Adim.	-	0 a 150	Fraca
		-	151 a 550	Média
		-	551 a 950	Forte
		-	> 950	Muito forte
Razão de Relevo ⁶	Adim.	-	0 a 0,1	Baixa
		-	0,11 a 0,30	Média
		-	0,31 a 0,60	Alta
Classificação do Relevo ⁷	Declividade (%)	-	0 a 3	Plano
		-	3 a 8	Suave Ondulado
		-	8 a 20	Ondulado
		-	20 a 45	Forte Ondulado
		-	45 a 75	Montanhoso

Fonte: Autoria própria (2024). Referências: ¹Azambuja e Conceição (2024); ²França (1968); ³Villela e Mattos (1975) *apud* Rodrigues *et al.* (2013); ⁴Horton (1945), Strahler (1975) e França (1968) *apud* Rodrigues *et al.* (*op. cit.*); ⁵Lollo (1995) *apud* Santos *et al.* (2012); ⁶Piedade (1980) *apud* Rodrigues *et al.* (*op. cit.*); ⁷Embrapa (1979). Legenda: (Adim. = Adimensional)

3.4 Caracterização ambiental da microbacia hidrográfica do rio Quixudi

A caracterização ambiental contemplou o uso e ocupação da superfície, o clima e distribuição das chuvas, bem como a litologia e a pedologia verificáveis dentro dos limites da microbacia.

O mapeamento do uso e ocupação da superfície da terra na microbacia do rio Quixudi foi feito com base nos dados matriciais do projeto MapBiomas Brasil – Coleção 8. Esses dados são produto da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, através de extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina que se utilizam da plataforma *Google Earth Engine*, com imensa capacidade de processamento na nuvem. Os *rasters* do MapBiomas foram recortados no QGIS utilizando-se os limites da microbacia do rio Quixudi como camada de máscara, ou seja, como referência espacial. A distinção de cada classe de uso e ocupação no mapa tomou por base a paleta de cores oficial do projeto MapBiomas. A descrição das características de cada classe de uso e ocupação também é fornecida pelo projeto. Para ver a evolução do uso e ocupação da superfície foi feito o mapeamento considerando o intervalo de dez em dez anos, a partir do ano mais antigo da série disponível até o ano mais recente. Ou seja, 1985, 1995, 2005, 2015 e, o último ano disponível, 2022.

Ainda na análise do uso e ocupação da superfície, para demonstrar os processos de antropização na microbacia foi gerado um mapa no qual se sobrepôs às áreas rurais consolidadas identificadas pelo Cadastro Ambiental Rural (CAR) todas as edificações verificadas dentro dos limites da microbacia. Este mapa se utilizou das bases de dados do CAR

e da *Open Buildings*, esta última contendo os polígonos relativos a todas as edificações do mundo, sendo necessário o uso do software gratuito R (versão 4.4.1) para filtrá-los para área de interesse.

O clima na microbacia do rio Quixudi foi identificado de acordo com a localização da bacia em relação as zonas climáticas mapeadas pela Universidade de São Paulo (USP, 2021) através da “Base Cartográfica Digital Georreferenciada das Zonas Climáticas, Conforme Köppen, do Brasil”.

O mapa de distribuição das chuvas seguiu o modelo de distribuição de Thiessen (1911), segundo o qual a precipitação média (P_m) dá-se pela Equação (5):

$$P_m = \frac{\sum A_i * P_i}{A} \quad (5)$$

Onde: P_m = precipitação média (mm); A_i = área de influência do i -ésimo posto pluviométrico (km^2); P_i = precipitação registrada no i -ésimo posto pluviométrico (mm); A = área total da bacia (km^2).

Os postos pluviométricos utilizados foram os de São Vivente do Seridó (636074/AESA-PB); Santa Luzia/Riacho do Saco (636082/AESA-PB); Juazeirinho (736070/AESA-PB); Soledade (736007[08] / INMET/DNOCS); e Soledade (736075/AESA-PB), cujos dados pluviométricos são disponibilizados pelo portal Hidroweb da ANA (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>). Toda a série de dados analisada compreende ao período de 1912 a 2018, totalizando 106 anos de registros pluviométricos. Estes postos pluviométricos foram escolhidos por estarem dentro ou próximos da área de estudo, conforme indica o já citado método de Thiessen.

As áreas de influência de cada posto pluviométrico dentro da microbacia do rio Quixudi foram definidas no QGIS através da elaboração de um diagrama de Voronoi sobreposto ao mapa dos limites da microbacia. Os polígonos de Voronoi foram elaborados a partir do algoritmo *v.voronoi* do sistema GRASS GIS, no qual foi feita a triangulação entre os postos pluviométricos plotados no mapa, e foi calculada a área que cada polígono ocupa dentro dos limites da microbacia.

A partir da distribuição de Thiessen obteve-se a precipitação média anual para cada posto pluviométrico. Tais valores de precipitação foram distribuídos na área da microbacia através de uma interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted*) feita no QGIS, gerando-se assim o mapa do padrão de distribuição das chuvas na microbacia. Em cima deste mapa foram geradas

isoietas de pluviometria que foram sobrepostas também aos mapas de uso e ocupação da superfície para verificar a relação da cobertura vegetal com os índices pluviométricos históricos.

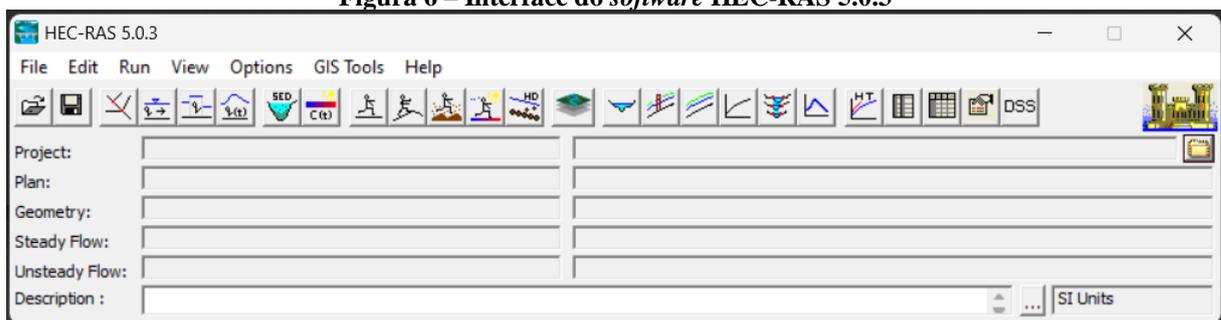
O mapa das unidades geológicas e suas formações litológicas, bem como o mapa dos tipos de solo foram elaborados de acordo com a classificação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), consultando-se a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, folha SB-24 - Jaguaribe, com escala de 1:1.000.000, disponível no Repositório Institucional de Geociências (<https://rigeo.cprm.gov.br/>). A referida Carta Geológica foi recortada utilizando-se o *shapefile* dos limites da microbacia do rio Quixudi para gerar os mapas de solo e geológico. As características de cada tipo de solo identificado na área de estudo foram descritas com base no Portal Embrapa Solos Tropicais.

3.5 Modelagem hidrodinâmica e simulação do rompimento da barragem Santa Teresa

Para simular o rompimento da barragem e analisar os impactos decorrentes no vale a jusante procedeu-se uma modelagem hidrodinâmica bidimensional através da utilização do *software* livre HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System*), versão 5.0.3 (Figura 6).

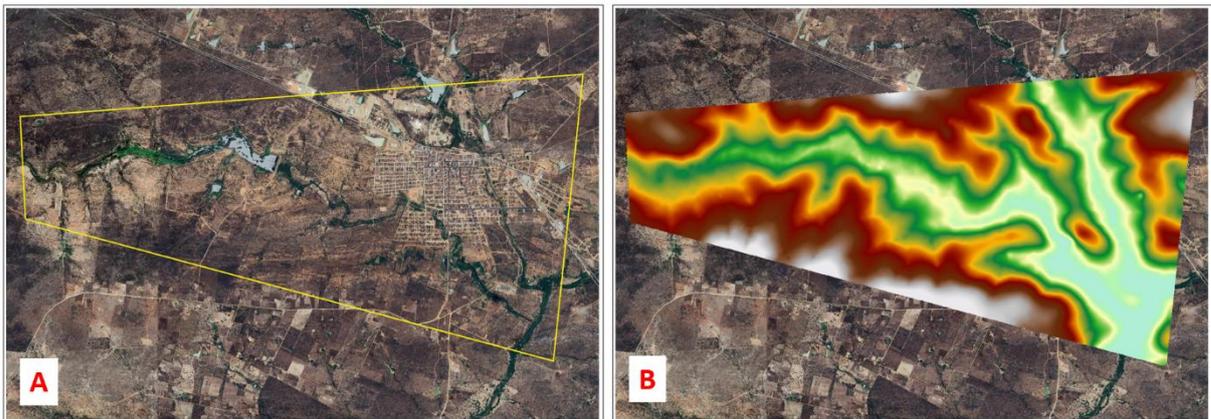
Como dado de entrada utilizou-se um Modelo Digital de Terreno (MDT) *World DEM NEO* com altimetria ortométrica (elevação em relação ao geóide) e resolução espacial de 5 m. Tal modelo foi adquirido mediante pagamento na empresa “Elemento Terra: Biologia Treinamento e Processamento de Dados Ltda”, sediada em Curitiba no Paraná. O arquivo de pontos flutuantes (*floating points*) tem o formato GeoTIFF 32 bits, projetado no Datum SIRGAS 2000 UTM, Zona 24 Sul. O *raster* cobre uma área de 16,4 km² (Figura 7).

Figura 6 – Interface do *software* HEC-RAS 5.0.3



Fonte: Print da tela principal do *software* (2025)

Figura 7 – Área de abrangência do MDT sobre a barragem Santa Teresa e a cidade de Soledade

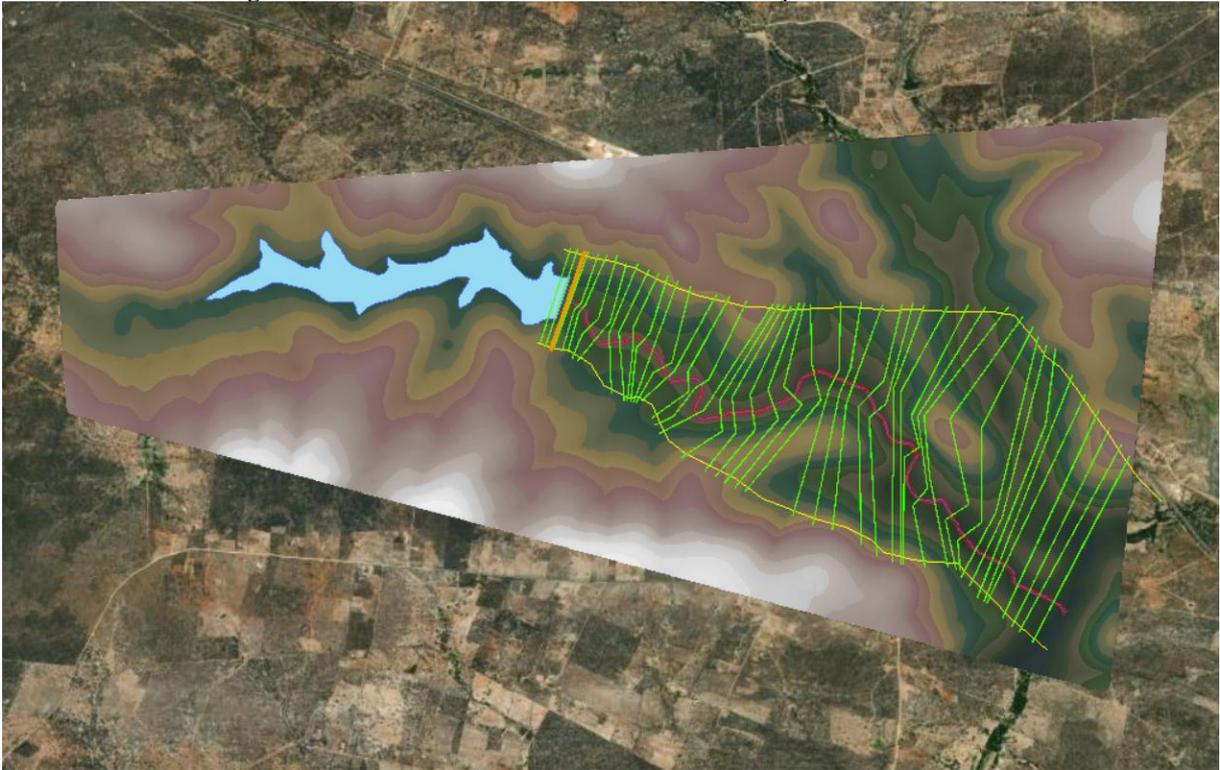


Fonte: Google Satélite (2025); World DEM NEO. Legenda: A) Perímetro coberto pelo MDT; B) MDT processado sobreposto ao terreno.

Para projetar a geometria dos elementos notáveis necessários para a realização da simulação do rompimento da barragem utilizou-se a ferramenta *Ras Mapper* do HEC-RAS. Nesta área de trabalho foram traçadas sobre o MDT as geometrias do canal a jusante da barragem e de suas margens esquerda e direita, bem como a geometria da estrutura em linha da barragem, do reservatório e das seções transversais.

Inicialmente configurou-se a projeção do *software* fazendo-se o *upload* do Datum SIRGAS 2000 UTM Zona 24 Sul na área de trabalho do *Ras Mapper*. Este dado foi baixado gratuitamente (em formato .prj) do *site* spatialreference.org. Após configurada a projeção, fez-se a importação do MDT sobre o qual foram traçadas manualmente as geometrias do eixo do rio a jusante da barragem, as margens esquerda e direita do rio, 44 seções transversais de montante para jusante ao longo do canal, a estrutura em linha da barragem com os contornos do reservatório e as *flowpaths*, que são linhas que cortam as extremidades das seções transversais nas margens e no centro para que o *software* possa calcular as distâncias entre as seções. Neste caso, o eixo do rio foi utilizado como *flowpath* de centro (Figura 8).

Figura 8 – Geometria dos elementos notáveis traçados sobre o MDT

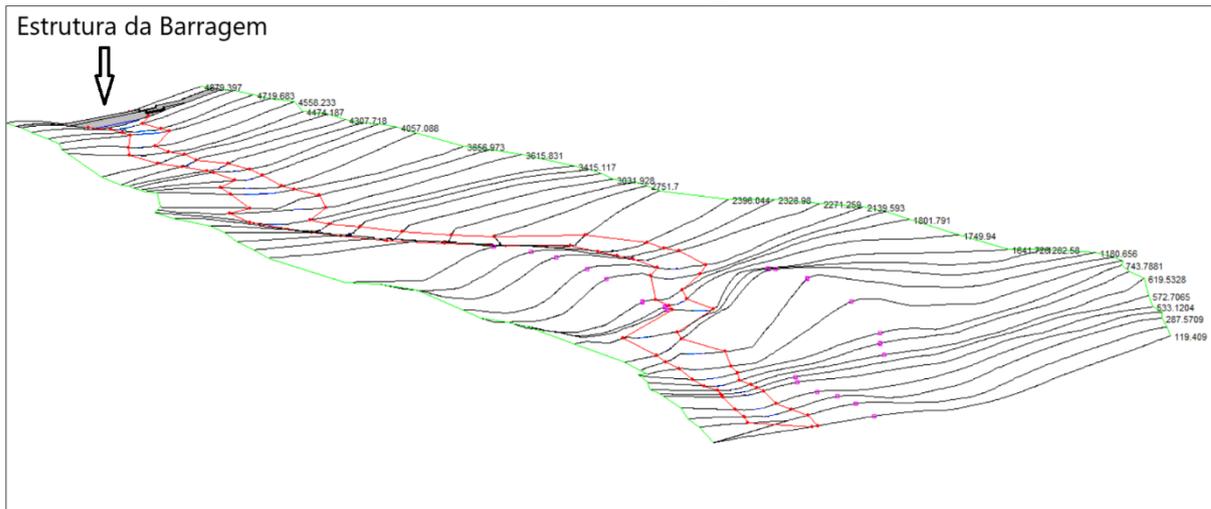


Fonte: Print da geometria na área de trabalho do *Ras Mapper* (2025)

Na Figura 8, o polígono hachurado em azul claro representa o reservatório da barragem; a estrutura em linha da barragem está representada em laranja; o eixo do rio aparece em linha azul escuro; as margens do rio em linhas vermelhas e as seções transversais em verde limão. Cortando as extremidades das seções transversais, nas margens esquerda e direita, aparecem as *flowpaths* em linhas amarelas. As duas primeiras seções de montante foram traçadas obrigatoriamente dentro do reservatório.

Com base nessa geometria o *software* colheu as informações do MDT e calculou automaticamente alguns parâmetros. Da geometria do rio, o *software* capturou a topologia do canal, o comprimento do rio e a direção do fluxo. Das seções transversais, o *software* identificou a estação de cada seção, a localização das margens do rio em cada seção, a distância entre as seções transversais e, por fim, extraiu as informações de elevação de cada ponto das seções, gerando uma camada tridimensional (Figura 9). Da estrutura em linha da barragem, o *software* calculou a altura, bem como a elevação de cada ponto ao longo da seção correspondente a barragem, gerando também uma camada tridimensional. Do reservatório, o *software* extraiu o alcance de elevação máxima e mínima e a curva cota/volume.

Figura 9 – Perfil tridimensional das seções transversais e da estrutura em linha da barragem gerado no sobre MDT no Ras Mapper.



Fonte: Print da tela do HEC-RAS (2025)

A modelagem hidrodinâmica foi feita em método integrado, ou seja, a simulação da ruptura, a geração do hidrograma e sua propagação pelo vale a jusante da barragem foi toda desenvolvida ao mesmo tempo dentro do software HEC-RAS. A modelagem simula o rompimento da barragem adotando o modo de falha *piping*, com escoamento não-permanente, já que se trata da passagem de uma onda de cheia, de fluxo instável, pelo vale a jusante.

Para se proceder a modelagem, as informações geométricas captadas do MDT foram editadas e complementadas na área de dição geométrica do HEC-RAS. Para isso, a geometria gerada no *Ras Mapper* foi aberta na referida área de edição, onde, inicialmente, se procedeu a inserção dos coeficientes de Manning para definir a rugosidade da calha do rio e de suas margens esquerda e direita. O coeficiente de rugosidade de Manning (n) é utilizado pelo HEC-RAS para quantificar a resistência ao escoamento da água no canal fluvial. Para calcular esse coeficiente utilizou-se a metodologia proposta por Cowan (1944), apresentada por Te Chow (1959, pp. 110-113). Os cálculos foram feitos conforme a Equação (6).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (6)$$

Onde n_0 é o valor básico de n para um canal reto, uniforme e liso, livre de materiais naturais envolvidos; n_1 é o valor adicional a n_0 para correção dos efeitos das irregularidades da superfície; n_2 é um valor para variações na forma e tamanho do canal através da seção; n_3 é o valor para obstruções; n_4 é o valor para a vegetação e condições de escoamento, e m_5 é um fator de correção das sinuosidades do canal. Os valores para a obtenção destes coeficientes foram

ponderados de acordo a Tabela 2 fornecida por Te Chow (*op. cit.*). Vale salientar que o *software*, por ser norte-americano, utiliza o ponto como separador decimal.

Tabela 2 – Valores para a ponderação do Coeficiente de Manning

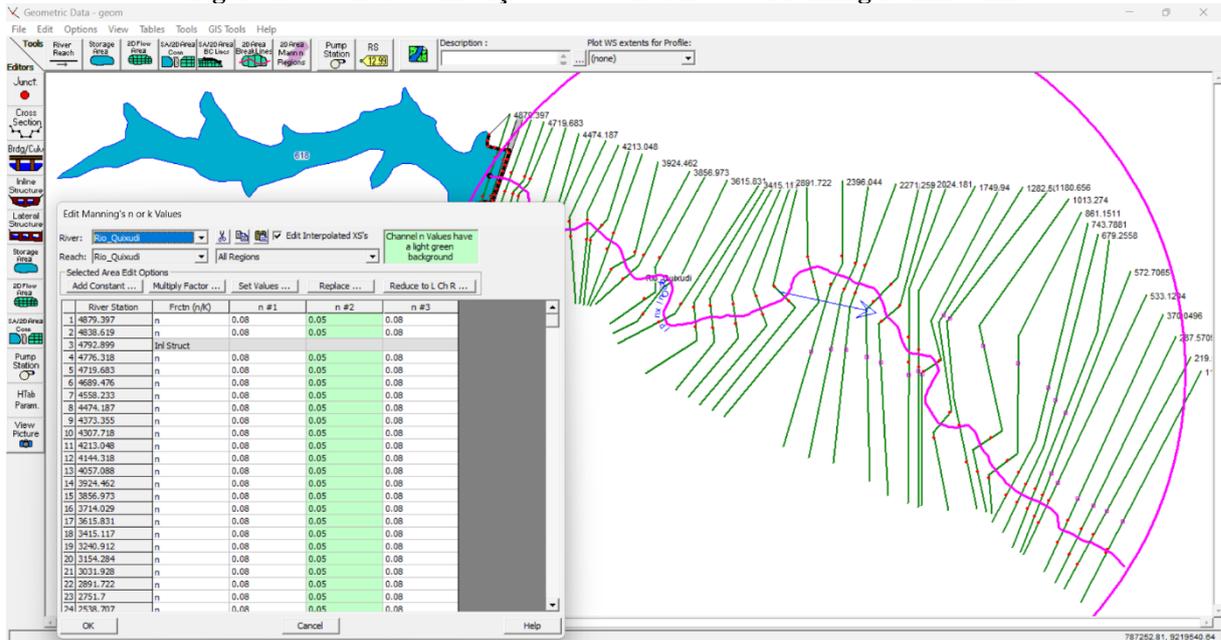
Condições do canal		Valores	
Material envolvido	Terra	n_0	0.020
	Rocha cortada		0.025
	Cascalho fino		0.024
	Cascalho grosso		0.028
Grau de irregularidade	Liso	n_1	0.000
	Insignificante		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variações na seção transversal	Gradual	n_2	0.000
	Alternado ocasionalmente		0.005
	Alternado frequentemente		0.010 - 0.015
Efeito relativo das obstruções	Desprezível	n_3	0.000
	Insignificante		0.010 - 0.015
	Apreciável		0.020 - 0.030
	Severo		0.040 - 0.060
Vegetação	Baixa	n_4	0.005 - 0.010
	Média		0.010 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.050
	Muito alta		0.050 - 0.100
Grau de sinuosidade	Insignificante	m_5	1.000
	Apreciável		1.150
	Severa		1.300

Fonte: Te Chow (1959, pp. 110-113)

Com $n_0 = 0.02$, n_1 e $n_2 = 0.005$, n_3 e $n_4 = 0.01$ e $m_5 = 1$, chegou-se ao valor de 0.05 para a rugosidade do canal. Para as margens esquerda e direita do canal, os valores de $n_0 = 0.02$, $n_1 = 0.01$, $n_2 = 0.005$, $n_3 = 0.02$, $n_4 = 0.025$ e $m_5 = 1$, resultaram num coeficiente de 0.08. Esses valores foram fornecidos ao *software* na janela *Edit Manning's n or k Values*, conforme ilustra a Figura 10.

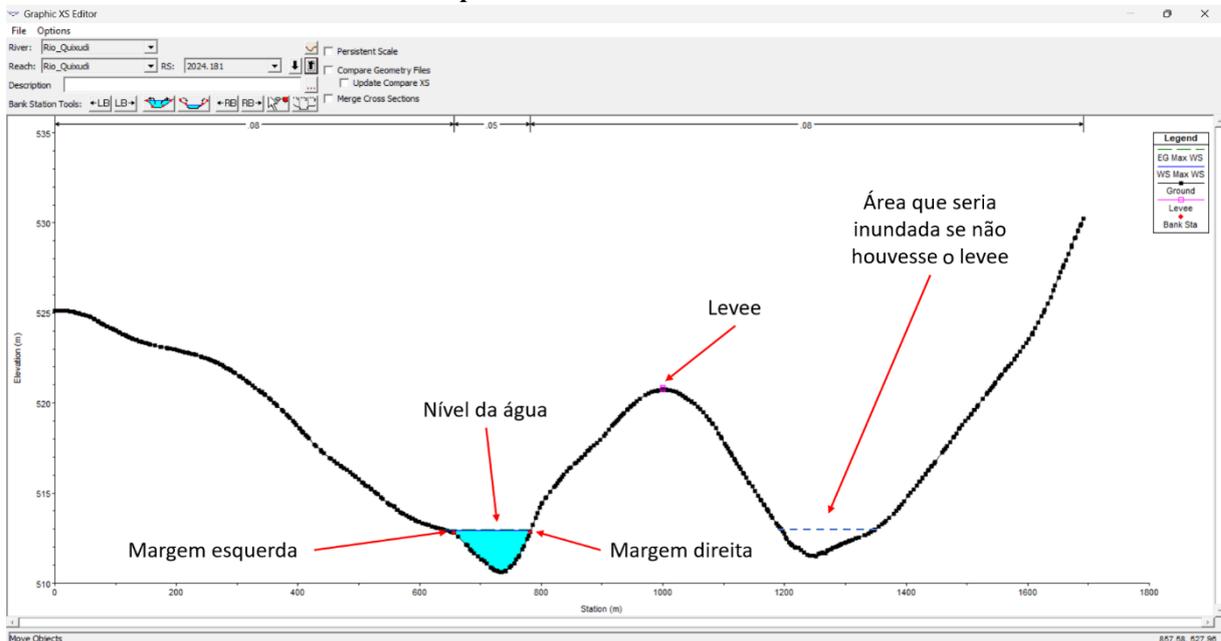
O próximo passo foi a edição das seções transversais, ajustando as margens do rio em cada seção e adicionando *levees* onde foi necessário. Os *levees* (ou diques) são pontos demarcados em seções cujo nível da água no canal possa se comunicar com áreas de mesmo nível dentro da mesma seção. O *software* entende que há um vaso comunicante entre áreas de mesmo nível na mesma seção. Por isso é necessário colocar os *levees* para indicar para o programa que a água só deve inundar uma área de mesmo nível na mesma seção quando ultrapassar o ponto onde se localiza o *levee* (Figura 11).

Figura 10 – Janela de inserção dos Coeficientes de Manning no HEC-RAS.



Fonte: Print da área de edição geométrica do HEC-RAS (2025)

Figura 11 – Seção transversal com área de mesmo nível à direita da calha do rio e com a inserção de um levee no ponto mais alto entre as duas áreas.

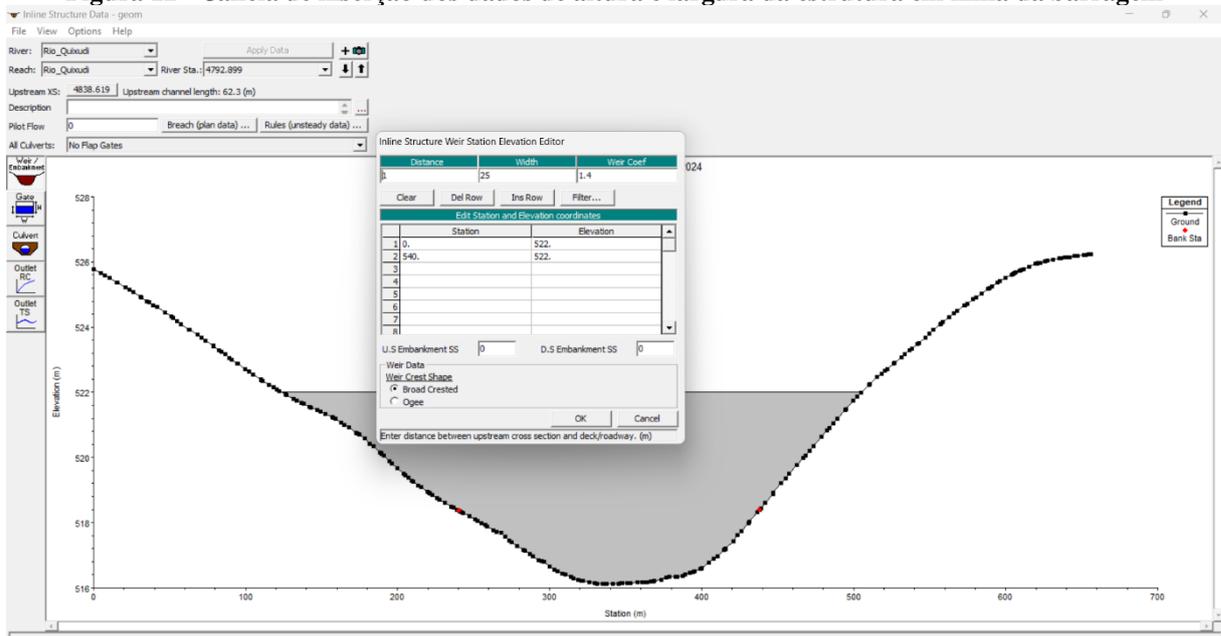


Fonte: Print da tela de edição das seções transversais no HEC-RAS (2025)

Na edição das seções transversais também se fez necessária uma filtragem no número de pontos de cada seção, pois o HEC-RAS só aceita o máximo de 500 pontos por seção. Optou-se por fazer essa filtragem apenas nas margens das seções, para não se perder o detalhamento da calha do rio. Colocou-se como valor máximo 498 pontos por seção.

O passo seguinte foi a edição da geometria da barragem, informando na janela *Inline Structure Weir Station Elevator Editor* a distância de 1m entre a estrutura em linha da barragem e a seção imediatamente a montante, bem como a largura de 25 m para o maciço da barragem. Indicou-se em seguida, no eixo horizontal da estrutura em linha, a estação 0 como estação inicial da barragem e a estação 540 como estação final, mantendo-se a elevação da crista da barragem até a cota 522, no eixo vertical, em ambas as estações da estrutura em linha (Figura 12).

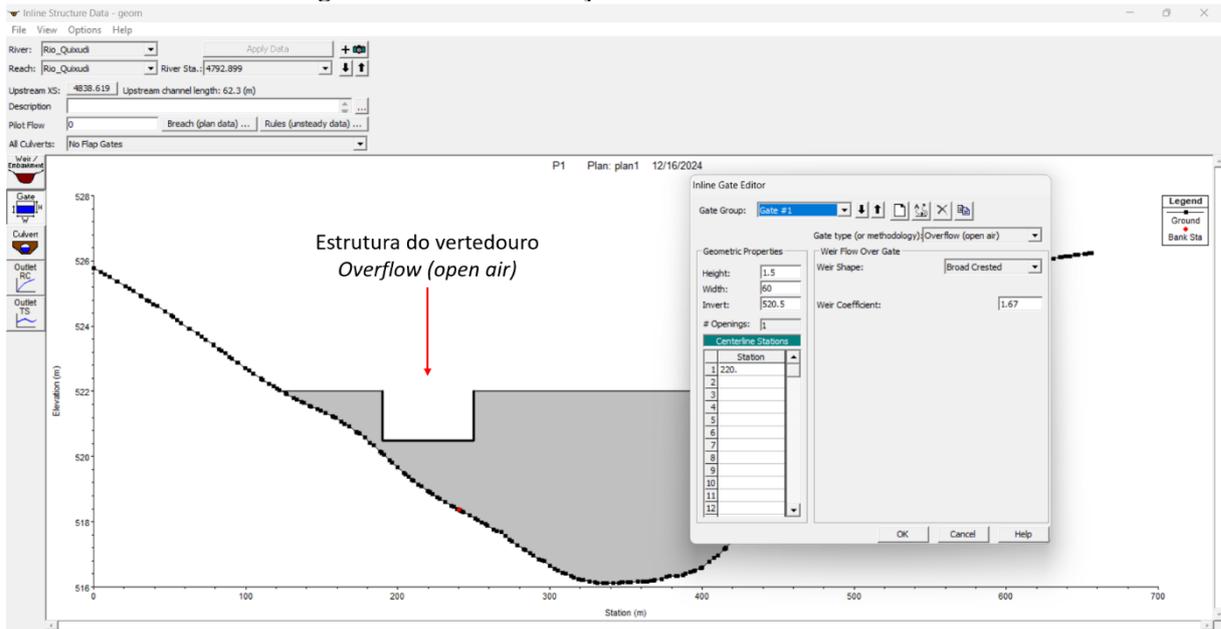
Figura 12 – Janela de inserção dos dados de altura e largura da estrutura em linha da barragem



Fonte: Print da tela de edição da estrutura em linha da barragem no HEC-RAS (2025)

Para a inserção da estrutura do vertedouro acessou-se a janela *Inline Gate Editor*, na qual informou-se ao *software* o tipo de vertedouro e suas dimensões. Quanto ao tipo de vertedouro (*Gate type*) escolheu-se a opção *Overflow (open air)* para designar o tipo soleira livre. Logo em seguida informou-se a diferença de 1.5 m entre a crista da barragem e a crista do vertedouro (*Height*), a largura de 60 m para o vertedouro (*Width*), a cota 520.5 para a crista do vertedouro (*Invert*) e a estação 220 como estação de centro do vertedouro (*Centerline Station*) conforme ilustra a Figura 13.

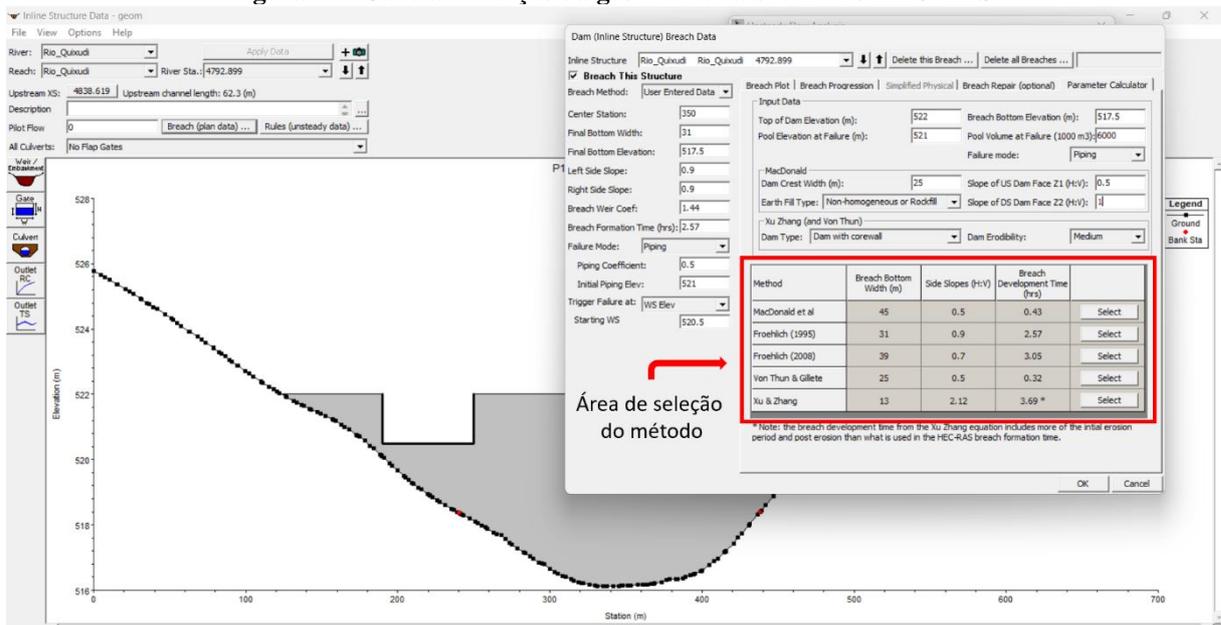
Figura 13 – Janela de edição da estrutura do vertedouro



Fonte: Print da tela de edição da estrutura do vertedouro no HEC-RAS (2025)

O passo seguinte foi a edição da geometria da brecha, informando ao *software* os parâmetros de abertura da fenda e da ruptura da barragem. Para isso, o HEC-RAS oferece metodologias empíricas pré-configuradas no próprio *software* que trazem definidos parâmetros de largura inferior para a brecha (*Breach Bottom Width*), de inclinação lateral da brecha (*Side Slope*) e de tempo de abertura total da brecha (*Breach Development Time*) de acordo com vários autores, conforme o destaque em vermelho na Figura 14.

Figura 14 – Janela de edição da geometria da brecha no HEC-RAS.



Fonte: Print da tela de edição da geometria da brecha no HEC-RAS (2025)

Para a adoção de algum dos métodos empíricos propostos pelo HEC-RAS é preciso preencher na janela *Dam (Inline Structure) Breach Data* o valor em metros da estação de centro da brecha (*Center Station*); o valor da cota altimétrica da crista da barragem (*Top of Dam Elevation*); o valor da cota altimétrica da base da brecha (*Breach Bottom Elevation*); o valor da cota altimétrica do reservatório durante a ruptura (*Pool Elevation at Failure*); o volume do reservatório (em 1.000³) correspondente a cota altimétrica informada (*Pool Volume at Failure*); o modo de falha (*Failure Mode*); a largura em metros da parede da barragem (*Dam Crest Width*); o tipo de material de construção da barragem (*Earth Fill Type*); as declividades esquerda e direita da barragem (*Slope of US Dam Face Z1 / Slope of DS Dam Face Z2*); o valor da cota altimétrica do reservatório no início do *piping* (*Initial Piping Elev*) e a elevação inicial do reservatório (*Starting WS*).

Os valores e condições informadas ao *software* para a definição da geometria da brecha estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores informados ao HEC-RAS para a definição da geometria da brecha.

<i>Parameters</i>	<i>Values and Conditions</i>
<i>Center Station (m)</i>	350
<i>Top of Dam Elevation (m)</i>	522
<i>Breach Bottom Elevation (m)</i>	517.5
<i>Pool Elevation at Failure (m)</i>	521
<i>Pool Volume at Failure (1.000³)</i>	6.000
<i>Dam Crest Width (m)</i>	25
<i>Slope of US Dam Face Z1 (H:V)</i>	0.5
<i>Slope of DS Dam Face Z2 (H:V)</i>	1
<i>Initial Piping Elev (m)</i>	521
<i>Starting WS (m)</i>	520.5
<i>Earth Fill Type</i>	<i>Non-Homogeneous or Rockfill</i>
<i>Failure Mode</i>	<i>Piping</i>

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A cota de 522 m atribuída a cista da barragem corresponde a uma altura do barramento de 6 m, valor correspondente à altura real verificada *in loco*. Para se chegar a este valor, mediu-se o comprimento entre a crista e a base do talude de jusante da barragem com uma trena de fita (Figura 15), e verificou-se o ângulo de inclinação do referido talude em relação ao plano da crista através de um inclinômetro digital (*Angle Meter*) em forma de aplicativo de *Smartphone* (Figura 16).

Figura 15 – Medição do comprimento do talude de jusante da barragem Santa Teresa.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 16 – Medição do ângulo de inclinação do talude de jusante da barragem Santa Teresa.



Fonte: Autoria própria (2024)

Com as medidas de 16 m de comprimento e 22° de inclinação verificadas no talude de jusante, utilizou-se a trigonometria para calcular a altura do barramento. Para isso, considerando-se o referido talude como sendo a hipotenusa de um triângulo retângulo, e o horizonte da base da crista como sendo o cateto adjacente, calculou-se o cateto oposto ao ângulo através da Equação (7), chegando-se ao valor de 6 m, sendo esta medida equivalente à altura da barragem.

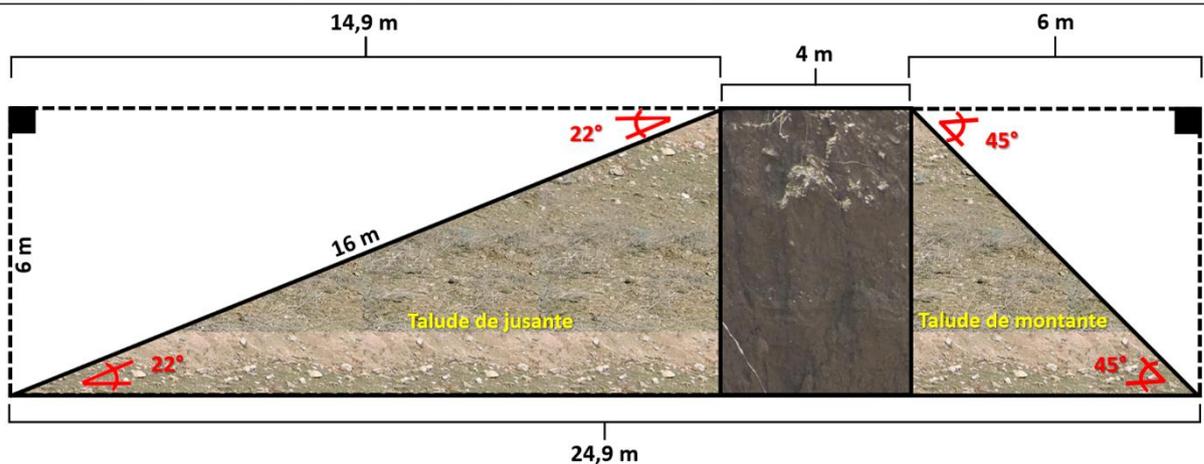
$$a = c \times \sin(\theta) \quad (7)$$

Onde, a = cateto oposto ao ângulo θ ; c = hipotenusa; θ = ângulo agudo do triângulo.

Já para se chegar aos 25 m de largura informados ao HEC-RAS como sendo a largura total do maciço da barragem, mediu-se a largura da crista e a inclinação do talude de montante, constatando-se 4 m de largura para a crista e inclinação de 45° para o talude. Com isso, sabendo-se da altura de 6 m já calculada para a barragem, e observando-se que os 45° de inclinação do talude de montante forma um quadrado perfeito, concluiu-se que a largura total da parede da barragem mede aproximadamente 25 m (Figura 17).

O tipo de material de construção do barramento (não-homogêneo ou preenchimento de rocha) também foi informado com base em observações de campo.

Figura 17 – Esquema do perfil da parede da barragem com as inclinações dos taludes



Fonte: Autoria própria (2025)

Após o preenchimento dos valores dispostos na Tabela 3 na janela de edição da geometria da brecha, selecionou-se o método de Froehlich (1995) para desenvolver a simulação da ruptura da barragem. A opção por este método se deu porque ele integra uma abordagem empírica amplamente utilizada no *software* HEC-RAS para estimar a evolução de um

rompimento de barragem e as condições de escoamento resultantes em cenários de fluxo não-permanente. É um método que se baseia em um conjunto de dados históricos de rompimentos reais de barragens e integra equações para calcular parâmetros críticos, como a largura e a taxa de crescimento da brecha.

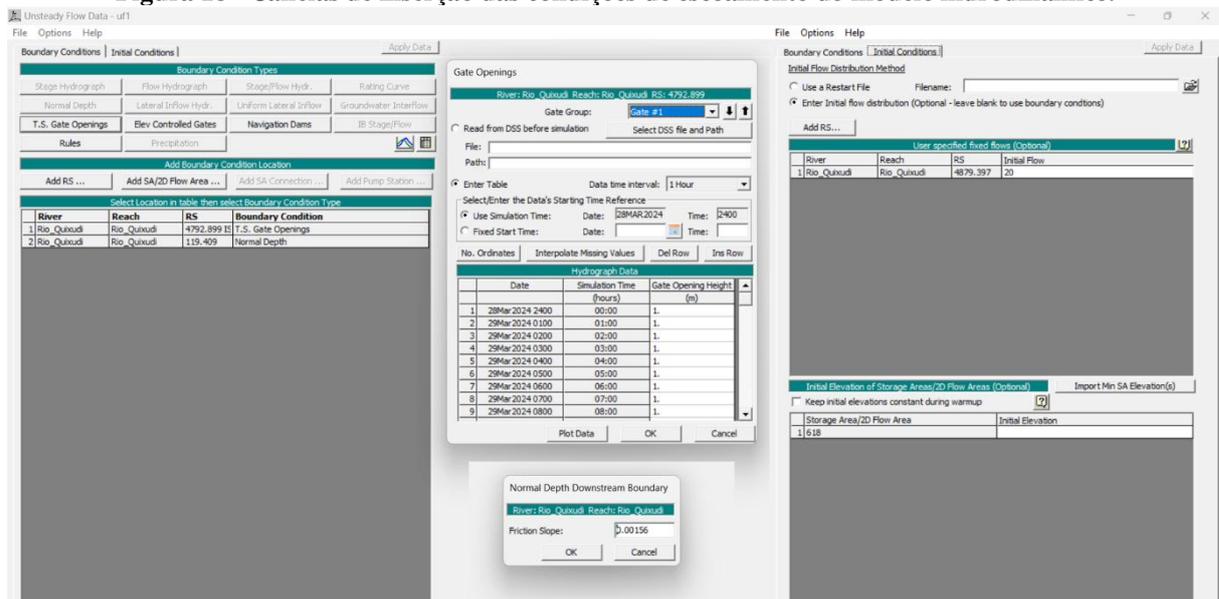
Ao selecionar-se o método de Froehlich (1995), o *software* atribuiu automaticamente valores de base para os cálculos, sendo 31 m para a largura da base da brecha (*Breach Bottom Width*), 0.9 (H:V) para a inclinação lateral da brecha (*Side Slope*), e 2.57 horas para o tempo de abertura total da brecha (*Breach Development Time*).

O passo seguinte foi a inserção das condições de contorno, ou condições de escoamento do modelo. Para a seção de montante, na janela *Unsteady Flow Data*, optou-se por definir a abertura dos vertedores (*T. S. Gate Openings*) como condição de contorno inicial, definindo-se uma abertura constante de 1 m na coluna *Gate Opening Height* e um intervalo de dados (*Data Time Interval*) de 1h.

Como condição de contorno na seção de jusante, foi utilizada a declividade da linha d'água, ou profundidade normal (*Normal Depth*), sendo esta informação adquirida consultando-se o perfil longitudinal do rio no próprio HEC-RAS. Na janela *Normal Depth Downstream Boundary* informou-se a inclinação de atrito (*Friction Slope*) de 0.00156.

Além da inserção das condições de contorno, inseriu-se como condição inicial do escoamento (*Initial Condition*) uma vazão inicial (*Initial Flow*) de 20 m³/s. A Figura 18 ilustra as janelas de inserção das condições de contorno.

Figura 18 – Janelas de inserção das condições de escoamento do modelo hidrodinâmico.

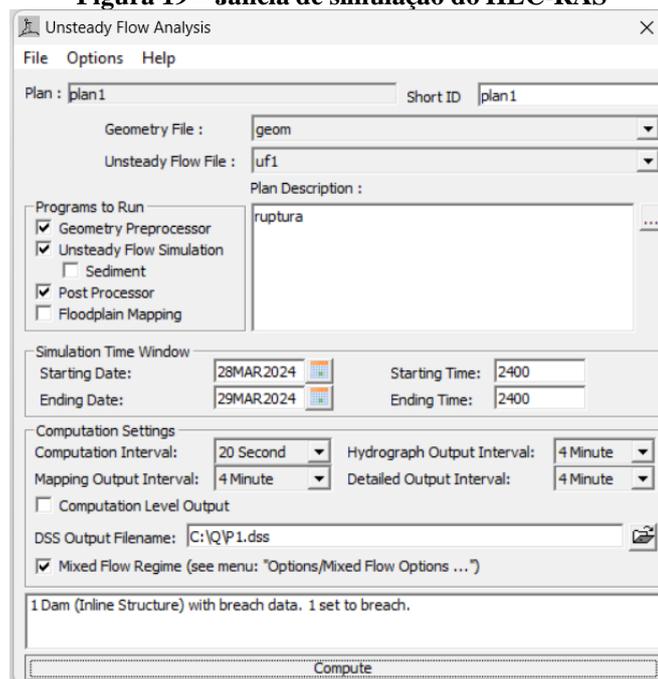


Fonte: Prints da tela do HEC-RAS (2025)

O último passo antes de rodar o modelo é definir o intervalo de simulação e o tipo de regime que será adotado no escoamento. Para isso acessou-se a janela *Unsteady Flow Data* através do menu *Run* e selecionou-se as informações a serem retornadas no cômputo da modelagem, quais sejam: Pré-processador de Geometria (*Geometry Preprocessor*), Simulação de Fluxo Instável (*Unsteady Flow Simulation*) e Pós-Processador (*Post Processor*). Em seguida colocou-se a descrição “ruptura” para designar o plano de simulação e inseriu-se data e hora de início e de fim, estabelecendo um tempo total de 24 horas para a simulação, entre as 24h:00 do dia 28 de março de 2024 e as 24h:00 do dia 29 de março de 2024.

Para o intervalo de cálculo (*Computation Interval*), o valor recomendado é de 1/20 (um vinte avos) do pico do hidrograma. Em geral, este valor fica abaixo de 1 minuto. Porém, sabendo-se que o hidrograma só seria gerado após a computação do modelo, optou-se por inserir um intervalo de cálculo pequeno, sendo este equivalente a 20 segundos. Para o intervalo de saída do mapa (*Mapping Output Interval*) definiu-se um tempo de 4 minutos. O intervalo de saída dos hidrogramas (*Hydrograph Output Interval*) e dos demais detalhamentos da simulação (*Detailed Output Interval*) foram definidos também em 4 minutos. Por último, marcou-se a opção *Mixed Flow Regime* para deixar a cargo do HEC-RAS a definição das regiões onde vai se considerar o escoamento supercrítico e o subcrítico, de acordo com as condições de escoamento. A Figura 19 ilustra o preenchimento da janela de simulação. Após todo o preenchimento, procedeu-se a simulação clicando-se na opção *compute*.

Figura 19 – Janela de simulação do HEC-RAS



Fonte: Print da tela do HEC-RAS (2025)

3.6 Perfil da população atingida pela inundação

O aspecto socioambiental da pesquisa levou em conta a população residente na área de risco de inundação, seu nível de exposição no tocante à profundidade da coluna d'água e ao tempo de duração da inundação, e seu perfil socioeconômico baseado na renda familiar e no grau de escolaridade. Os dados relativos às famílias atingidas foram adquiridos junto à secretaria de saúde do município de Soledade através do contato direto com as Agentes Comunitárias de Saúde (ACS) que atendem nos bairros Bela Vista, Chico Pereira, Conjunto Mutirão, Jardim Cruzeiro I e Santa Teresa. A partir desses dados foi possível traçar o perfil socioeconômico dos atingidos, classificando-os por idade, gênero, grau de escolaridade e renda familiar. Cada bairro foi analisado separadamente, exceto os bairros Conjunto Mutirão e Santa Teresa, que foram incluídos num só mapa por serem os menos afetados. Dados socioeconômicos do município de Soledade também foram coletados no *site* do Índice de Progresso Social (IPS Brasil, 2024).

3.7 Classificação da barragem por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA)

Mediante a situação hipotética do rompimento da barragem Santa Teresa e o potencial de impacto avaliado para esta conjuntura, este trabalho de tese realizou uma classificação da referida barragem por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) com o objetivo de fechar um diagnóstico para a situação de vulnerabilidade a inundação da microbacia do rio Quixudá, e chamar a atenção para o perigo oculto que representa a existência de barragens nessas condições em leitos de rios temporários urbanos.

A classificação da barragem Santa Tersa por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) foi feita com base na Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Trata-se de uma classificação não oficial, uma vez que não foi realizada por nenhuma autoridade do poder público (agente fiscalizador), como estabelece o Art. 7º da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). A classificação atende apenas aos propósitos deste trabalho de tese, o que não impede de ser considerada pelos órgãos competentes em algum momento.

Para barragens de contenção de água, a Resolução N° 143 do CNRH classifica o risco de acordo com as Características Técnicas (CT), com o Estado de Conservação (EC) e com o Plano de Segurança de Barragens (PS).

As Características Técnicas observadas são: altura; comprimento; tipo de barragem quanto ao material de construção; tipo de fundação; idade da barragem; vazão de projeto. Quanto ao Estado de Conservação, é analisada a confiabilidade das estruturas extravasoras; a confiabilidade das estruturas de adução; a percolação; as deformações e recalques; a deterioração dos taludes/parâmetros e a eclusa. Quanto ao Plano de Segurança de Barragens, investiga-se a existência de documentação de projeto; a estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem; os procedimentos de roteiros de inspeção de segurança e de monitoramento; a regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; o relatório de inspeção de segurança com análise e interpretação.

Já para a classificação de dano potencial associado, os parâmetros estabelecidos são: volume total do reservatório; potencial de perdas de vidas humanas; impacto ambiental; impacto socioeconômico.

Todas as informações sobre a barragem utilizadas na classificação foram ponderadas de acordo com a inspeção pessoal da infraestrutura por parte do autor desta tese, bem como pela investigação sobre a existência, ou não, de informações documentais sobre a barragem. Registros fotográficos e medições *in loco* das condições da estrutura física da barragem foram feitos em trabalho de campo para embasar a classificação.

O quadro 2 especifica os critérios de classificação para barragens de acumulação de água, como é o caso da barragem Santa Tereza (Quadro 2).

Quadro 2 – Quadro para a classificação de barragens de acumulação de água

CATEGORIA DE RISCO		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	-
2	Estado de Conservação (EC)	-
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	-
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO		
Faixas de Classificação	CATEGORIAS DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 60 OU EC* ≥ 8 (*)
	MÉDIO	36 a 60
	BAIXO	≤ 35
(*) Pontuação maior ou igual a 8 em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem		

DANO POTENCIAL ASSOCIADO		Pontos
PONTUAÇÃO TOTAL (DPA)		0
Faixas de Classificação	ALTO	≥ 16
	MÉDIO	$10 < DPA < 16$
	BAIXO	≤ 10
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO		
CATEGORIA DE RISCO	Alto / Médio / Baixo	
DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto / Médio / Baixo	

Fonte: Adaptado do Anexo II da Resolução nº 134 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, do Ministério do Meio Ambiente (2012)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e a discussão são apresentados a seguir em cinco tópicos que contemplam: (i) a caracterização hidromorfológica da microbacia do rio Quixudi; (ii) a caracterização ambiental da referida microbacia; (iii) a modelagem hidrodinâmica e a simulação de rompimento da barragem Santa Teresa; (iv) os impactos do rompimento da barragem no vale a jusante; e (v) classificação da referida barragem por Categoria de Risco e Dano Potencial Associado (DPA).

4.1 Caracterização hidromorfológica da microbacia hidrográfica do rio Quixudi

4.1.1 *Análise linear*

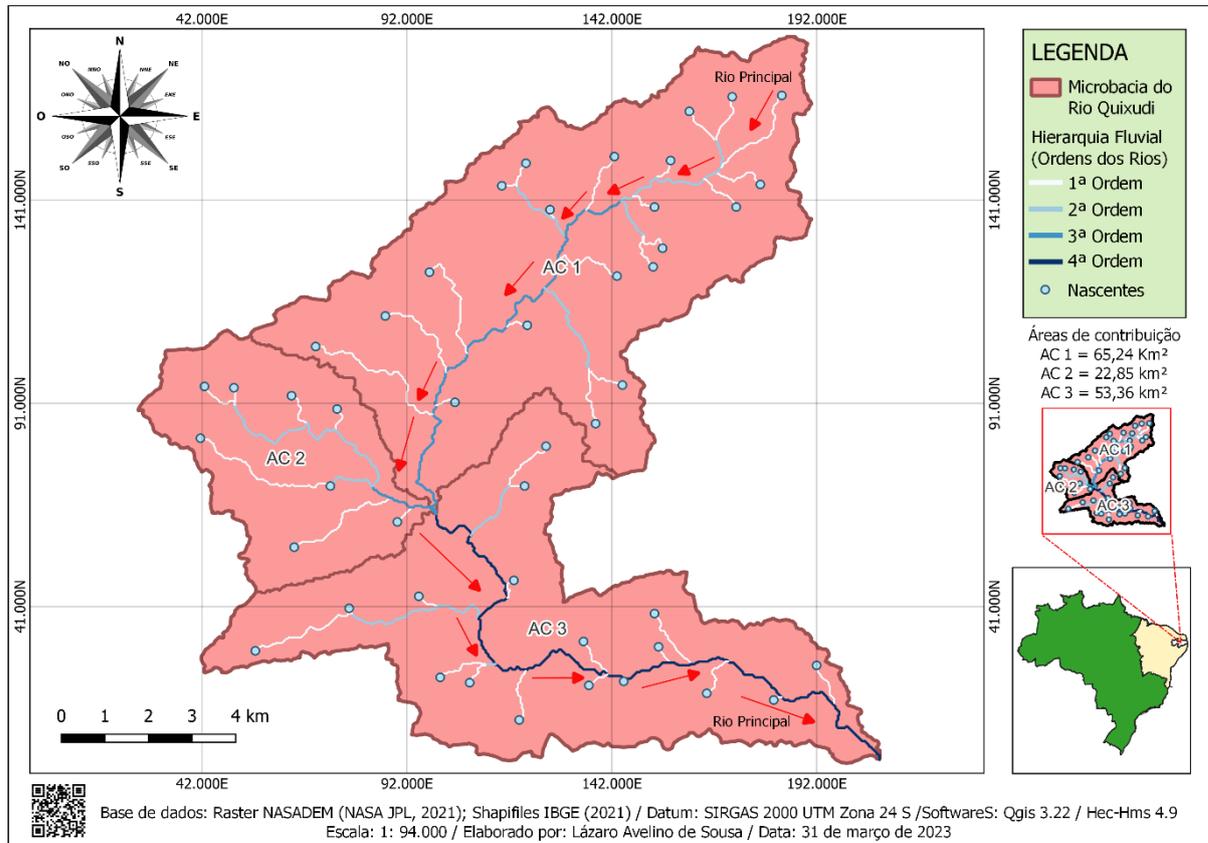
Com área equivalente a 141,5 km² e perímetro de 84,3 km, a microbacia do rio Quixudi comporta um total de 90 canais de drenagem distribuídos em três áreas de contribuição, sendo duas de 3^a ordem e uma de 4^a ordem. Estas áreas foram denominadas de AC1, AC2 e AC3, sendo que o rio principal nasce na AC1 e deságua na AC3, que também recebe as águas da AC2 no ponto de confluência entre as três áreas de contribuição.

Os limites da microbacia, sua subdivisão em áreas de contribuição e sua rede de drenagem com indicação das nascentes estão representados no mapa da Figura 19, onde se tem a classificação hierárquica dos canais de drenagem segundo o método de Strahler (1952).

Nota-se que o rio principal — indicado no mapa pelas setas vermelhas — não se enquadra em apenas uma ordem de classificação, tendo sido definido pela magnitude, ou seja, pelo número de nascentes ou canais de primeira ordem que lhes são tributários, isto porque, se considerado o critério da distância entre o exutório e a nascente mais remota, o rio principal seria o trecho que segue para noroeste do exutório, contemplando a AC2 (Figura 20).

A hierarquia fluvial está detalhada na Tabela 4, onde se observa também a razão de bifurcação e a frequência dos canais.

Figura 20 – Mapa da classificação hierárquica da rede de drenagem e da distribuição das nascentes por área de contribuição na microbacia do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024) a partir do método de Strahler (1952).

Tabela 4 – Hierarquia fluvial da microbacia do rio Quixudi

Ordem	Quantidade de canais	Extensão (km)	Razão de bifurcação (adimensional)	Frequência de canal (%)	Comprimento médio (m)
1ª	46	53,71	2,42	51,1	1,17
2ª	18	21,44	1,29	20,0	1,19
3ª	13	13,02	0,93	14,4	1,00
4ª	13	17,03	0,14	14,4	1,31
Total	90	105,20	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2024)

A bacia é do tipo endorréica com padrão de drenagem dendrítica, em que “as correntes tributárias distribuem-se (*ipsis litteris*) em todas as direções sobre a superfície do terreno, e se unem formando ângulos agudos de graduações variadas, mas sem chegar nunca ao ângulo reto” (Christofoletti, 1980, p. 103).

No tocante à frequência dos canais (Fr), predomina na bacia os canais de 1ª ordem, com 51,1%. Isto indica que metade da drenagem da bacia concentra-se nas áreas de relevo mais acentuado, favorecendo a formação de nascentes.

A AC1, com 65,24 km² de área, conta com 21 nascentes, dez canais de 2ª ordem e dez de 3ª ordem. A AC2 mede 28,85 km² e possui oito nascentes, quatro canais de 2ª ordem e três

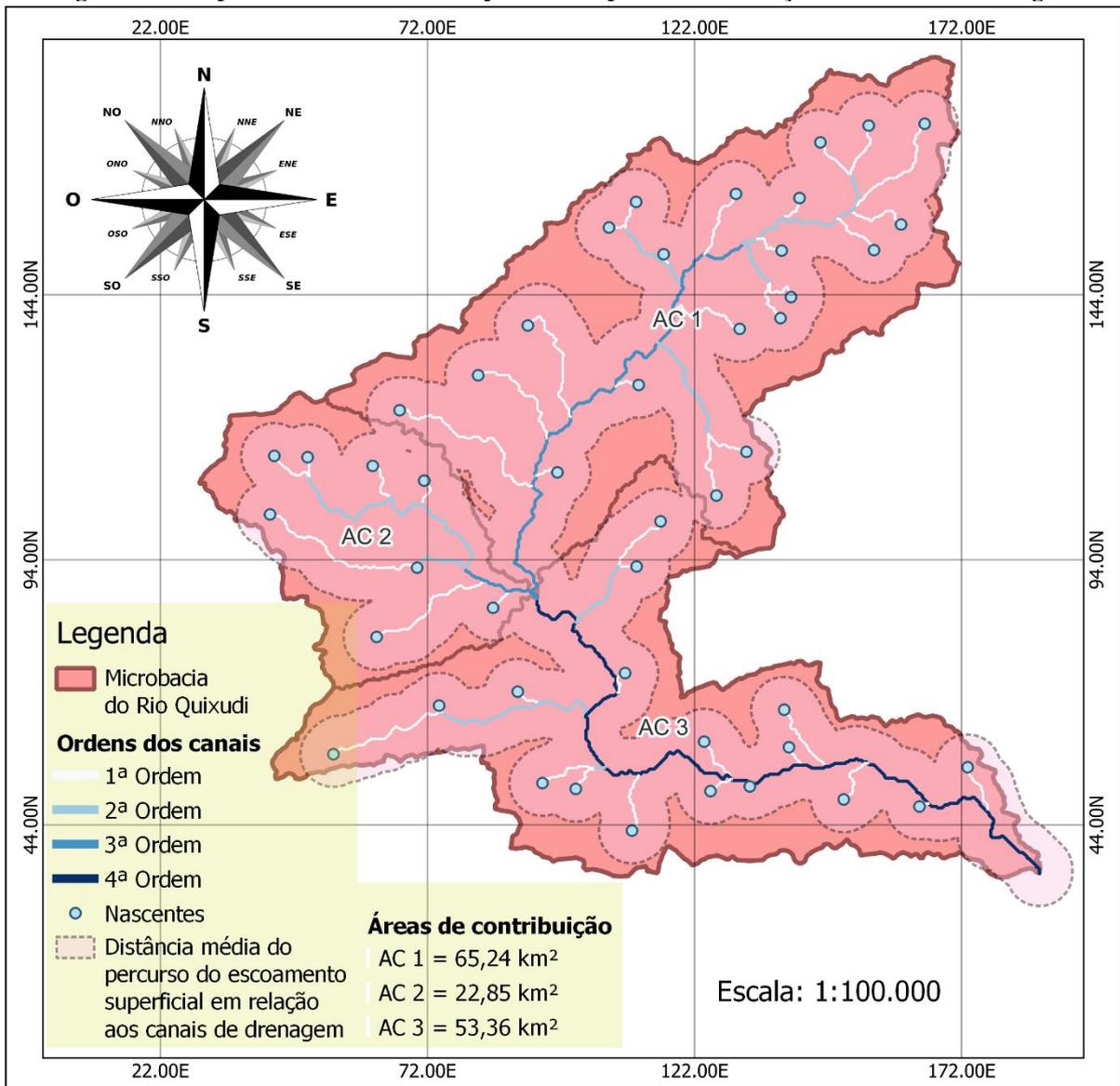
de 3ª ordem. A AC3, em seus 53,36 km² de área, conta com 17 nascentes, 4 canais de 2ª ordem e 13 de 4ª ordem.

Apesar do grande número de nascentes, quando se observa a razão de bifurcação (Rb) na microbacia como um todo, os baixos valores registrados em todas as ordens, com média de 1,19, indicam uma tendência à conservação, ou seja, uma baixa propensão à erosão. Isto se reflete no comprimento médio dos canais, que não ultrapassa 1,31 m. De acordo com Dornellas et al. (2020, p. 608), “a razão de bifurcação representa o número de canais de uma ordem necessários para formar um canal de ordem superior”. Assim, na microbacia do rio Quixudi essa razão é quase de um para um.

Ainda na análise linear da rede de drenagem o canal principal registrou um comprimento total, da nascente à foz, de 33,75 km. O equivalente vetorial registrou 28,17 km. A distância entre a nascente principal e o divisor topográfico mais remoto registrou 1,38 km. Com isso, o eixo axial da bacia totalizou 29,55 km de comprimento. O comprimento de todos os canais somou 105,20 km. Com isso, a extensão do percurso superficial (Eps) foi de 0,67 km, significando que a água da chuva precipitada na bacia percorre uma distância média de 670 m na vertente até encontrar um canal para escoamento permanente. Para representar essa distância no terreno, foi gerado um buffer com a Eps em relação aos canais de drenagem (Figura 21).

A Eps tem influência sobre o tempo de concentração (Tc) da bacia, que é definido como “o tempo necessário para que a água que caiu no ponto mais distante chegue até o exutório da bacia” (Targa *et al.*, 2012, p. 125). Assim, tem-se por óbvio que quanto maior for a Eps, maior será o Tc da bacia e, por consequência, menor será a tendência de alagamentos e inundações. O Tc da microbacia do rio Quixudi será discutido no âmbito da análise altimétrica. Porém, a distância registrada para a Eps já indica que o Tc na bacia deve ser longo, condizente com inundações graduais. Isto se percebe na Figura 20, onde se observa que a linha pontilhada do buffer se aproxima dos contornos da bacia, chegando a ultrapassá-los em alguns pontos. Isto significa que os 670 m da Eps representam quase que a totalidade dos vertedouros da bacia. Isto se comprova pela área ocupada pelo buffer dentro da microbacia, que registrou 106,6 km², ou 75,3% da área.

Figura 21 – Mapa da extensão média do percurso superficial em relação aos canais de drenagem



Fonte: Autoria própria (2024)

No tocante ao índice sinuosidade (I_s), Nardini *et al.* (2013) citados por Silva *et al.* (2018, p. 248) explicam que este índice “relaciona o comprimento verdadeiro do canal (em projeção ortogonal) à distância vetorial (comprimento em linha reta) entre os dois extremos do canal principal”. Dummer e Verdum (2023, p. 3) afirmam que “a sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos, pela compartimentação litológica, pela estruturação geológica e pela declividade”. Assim, a sinuosidade é uma característica que “está relacionada à velocidade do escoamento nos canais de drenagem e, em síntese, sua relação com o solo em produzir erosão” (Azambuja; Conceição; Pereira, 2021, p. 16). Segundo estes autores, quanto maior for a sinuosidade, maior será a dificuldade de o fluxo de água atingir o exutório do canal, por tanto, a velocidade de escoamento será menor.

No caso em tela, o Is registrou $1,20 \text{ km}\cdot\text{km}^{-1}$, significando que o canal principal da microbacia é do tipo transicional, ou seja, há trechos com sinuosidade moderada contrastando com trechos mais retilíneos. No trecho formado pela AC1 o canal tem 16,72 km de extensão, sendo mais curto que o canal do trecho formado pela AC3, que tem 17,03 km. Ambos esses trechos, quando analisados separadamente, registraram o mesmo valor de sinuosidade do rio principal, ao passo que na AC2 o Is registrou $1,31 \text{ km}\cdot\text{km}^{-1}$ para um comprimento de canal de apenas 8,35 km de extensão, sendo este, portanto, o trecho mais curto e mais sinuoso de todos. Moura *et al.* (2023), estudando a sub-bacia do rio Taperoá — que envolve toda a área de estudo aqui abordada — encontraram Is de $1,45 \text{ km}\cdot\text{km}^{-1}$, significando que este rio é mais sinuoso que o Quixudi, mas também é do tipo transicional. Azambuja, Conceição e Pereira (*op. cit.*), afirmam que áreas drenadas por canais com essas características são mais favoráveis à conservação e à preservação das bacias.

Em resumo, a análise linear da microbacia do rio Quixudi mostrou uma bacia de 4ª ordem, com sinuosidade transicional, baixa razão de bifurcação e extensão do percurso superficial relativamente longa. Essa morfologia da drenagem, aliada a Eps, indicam que, em condições normais de precipitação, a microbacia é pouco susceptível a inundação, dado o comprimento longo do canal principal, sua sinuosidade transicional — que alterna a velocidade do fluxo — além da Eps longa em relação ao tamanho da bacia. No entanto, em caso de eventos extremos de precipitação, pode ocorrer inundação na AC3, pois esta área recebe as águas da AC1 e da AC2, que possuem rios de terceira ordem e contam juntas com o maior número de nascentes. Dessa forma, percebe-se que a configuração física da microbacia tem pouca influência sobre sua susceptibilidade a inundação, ficando esta susceptibilidade a cargo de anormalidades no campo meteorológico. Isso já fica implícito na classificação da ANA, quando estabelece que a susceptibilidade é de baixa frequência de ocorrência, por se tratar de um rio temporário.

4.1.2 Análise areal

No tocante a análise areal, o coeficiente de compacidade (K_c), calculado com base em Villela e Mattos (1975), mostrou que a microbacia do rio Quixudi tem o formato comprido com tendência à conservação. Segundo esta referência, o K_c relaciona a forma da bacia com a forma de um círculo de área equivalente, sendo que, quanto mais próximo de 1 for o coeficiente, mais arredondada é a bacia, e, por consequência, mais propensa a inundação. O K_c na microbacia do

rio Quixudi registrou o valor de 1,99 (adimensional). Este valor confirma o formato comprido e a tendência a conservação da bacia, uma vez que a área de captação é drenada por uma rede hidrográfica longilínea, onde a extensão média do escoamento superficial é relativamente longa, havendo pouca atividade erosiva e maior tendência a infiltração.

Lopes *et al.* (2022) estudaram a microbacia do Açude Grande, de formato similar à do rio Quixudi, localizada no município de Caraúbas-RN, na qual encontraram valores de 1,86 para o Kc, 0,59 para o Kf e 0,28 para o Ic. Estes valores, segundo os autores, condizem com uma bacia alongada e, como tal, com baixa propensão a enchentes e inundações.

No caso da microbacia do rio Quixudi, o formato alongado ou comprido da bacia é uma característica física que reforça a afirmativa de que a condição de susceptibilidade que lhe é atribuída é fruto da ocorrência excepcional de precipitações, pois, em bacias com esse formato a influência da morfologia sobre as inundações é mínima, uma vez que o tempo de concentração é maior do que nas bacias arredondadas.

Ainda na análise areal, os cálculos da Densidade de drenagem (Dd) e da Densidade hidrográfica (Dh) tiveram como referência Horton (1945), França (1968) Strahler (1975) e Lollo (1995), conforme indicado na legenda da Tabela 1. Segundo estas referências, a Dd é extraída da relação entre o comprimento total dos canais de drenagem da bacia com sua respectiva área. Já a Dh resulta da relação entre o número de seguimentos de canais de drenagem e a área da bacia.

Na microbacia do rio Quixudi a Dd registrou 0,74 km de canal por km² de área, sendo considerada uma densidade baixa. Já a Dh registrou o número de 0,64 canais por km², também sendo considerada baixa. Isto significa que o escoamento superficial na bacia é alto, pois há poucos e curtos trechos de rios por quilômetro quadrado de área. O coeficiente de manutenção (Cm) de 1.344,7 m²·m⁻¹ condiz com os baixos valores de densidade registrados. Este índice, de acordo com Schumm (1956), fornece a área mínima necessária para a manutenção de um metro de canal de escoamento, no caso em tela, mais de mil metros quadrados.

As baixas densidades de drenagem e hidrográfica registradas na microbacia do rio Quixudi favorecem, teoricamente, a infiltração da água da chuva na bacia, uma vez que a extensão do percurso superficial é relativamente longa. Porém, quando se observa uma razão de textura (T) de 1,07 (adimensional) registrada na bacia, percebe-se uma textura grosseira, típica de ambientes com rochas maciças e resistentes, o que interfere na capacidade de infiltração. Com isso, “o escoamento superficial é mais intenso e provoca, conseqüentemente, maior dissecação hídrica do terreno, aspecto similar ao de ravinas” (Campanharo 2010, p. 26).

Na vizinha bacia do Alto Paraíba, com uma área mais de 40 vezes maior do que a do Quixudi, Dornellas *et al.* (2020) registraram uma Dd igual à da nossa área de estudo, e uma Dh 40,6% menor. Isto implica que naquela bacia os valores de densidade também são baixos, porém, os rios são mais longos, embora sejam menos numerosos por quilômetro quadrado de área do que na bacia do rio Quixudi. Os referidos autores afirmam que esses valores baixos de Dd e de Dh são típicos de regiões semiáridas.

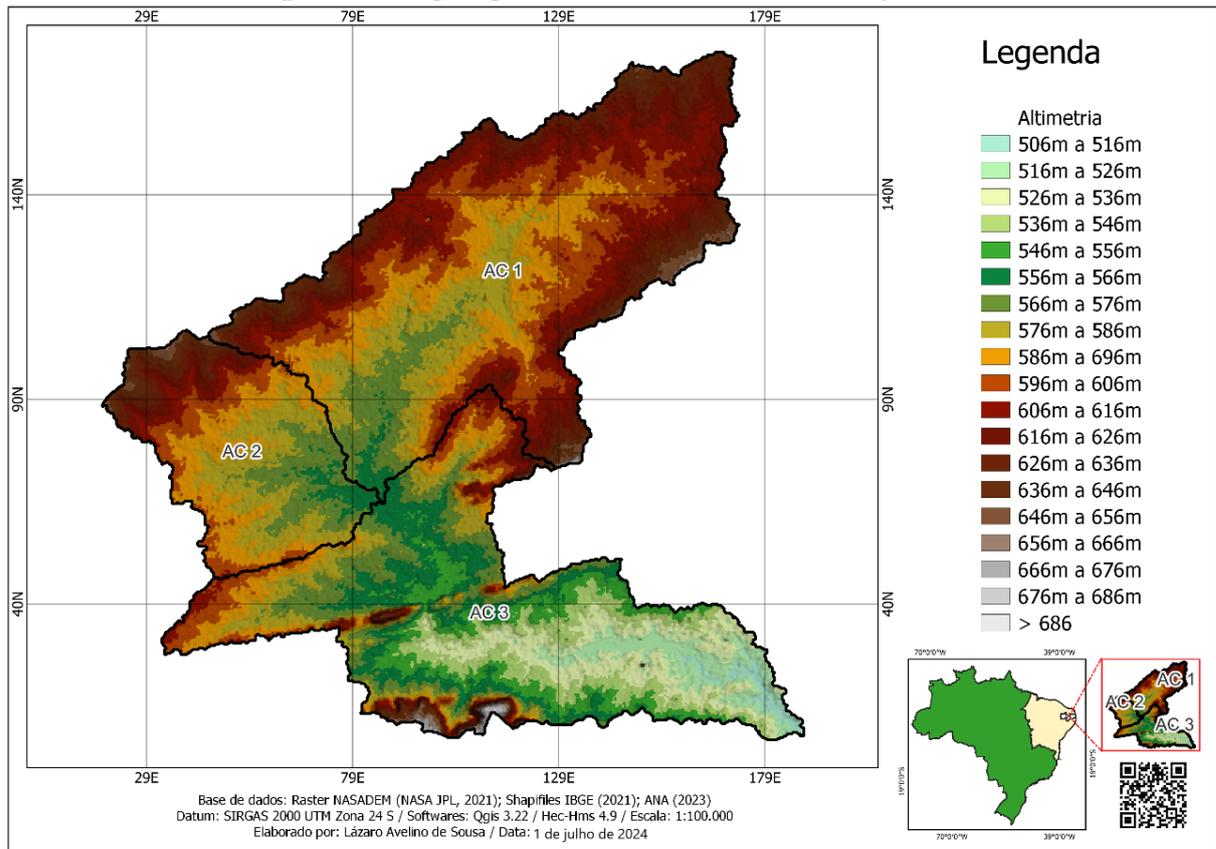
Em suma, a análise areal da microbacia aponta que, apesar de ser uma bacia de forma comprida com tendência a conservação, a condição de susceptibilidade a inundação pode ser afetada pelas baixas densidades de drenagem e hidrográfica. Isso implica que, em caso de eventos extremos de precipitação, o escoamento superficial aumentado sobre uma textura grosseira pode conduzir ao acréscimo repentino de água nos rios, potencializando os alagamentos e inundações.

4.1.3 Análise altimétrica

No âmbito da análise altimétrica, o mapeamento hipsométrico mostrou um relevo praticamente plano, com altimetria variando entre 506,0 m e 690,0 m, resultando numa amplitude altimétrica máxima de 184,0 m. Por isso, para uma melhor visualização, o mapa da Figura 22 traz o relevo sombreado em 3D, cotado de dez em dez metros.

As maiores elevações ficam no extremo sul da microbacia, compreendendo parte da Serra das Melancias, no município de Soledade. A menor cota altimétrica constitui o exutório do rio Quixudi, na mesma latitude da referida serra.

Figura 22 – Mapa hipsométrico da microbacia do rio Quixudi



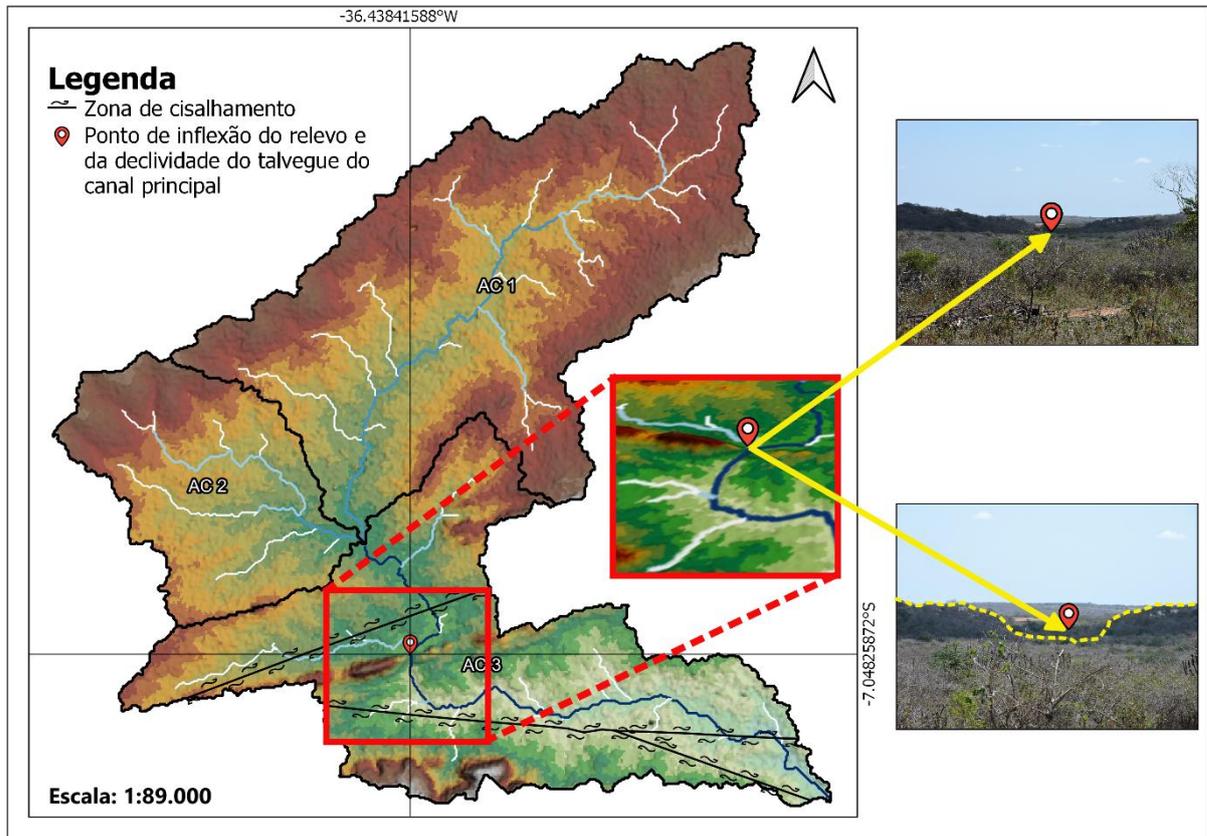
Fonte: Autoria própria (2024)

Nota-se que a amplitude altimétrica máxima está concentrada na AC3, causando uma notável diferença no relevo desta área em relação às outras duas áreas de contribuição. Essa diferença é marcada por uma zona de cisalhamento que atravessa a AC3 longitudinalmente, a cerca de 2 km do ponto de confluência entre as três áreas de contribuição. Nesta zona localiza-se um ponto de inflexão — de coordenadas $-7.04825872^{\circ}\text{S}$ e $-36.43841588^{\circ}\text{W}$ — onde há uma saliência topográfica que separa a parte mais alta da bacia (ao sul) da parte mais baixa (ao norte) (Figura 23). Neste ponto o rio principal encontra uma passagem por entre as elevações e, após cruzar esta zona, sofre uma queda brusca de 21 m em seu talvegue para poder assim continuar seu curso rumo ao exutório. No destaque do retângulo vermelho na Figura 23 tem-se um recorte em 3D do ponto de inflexão, onde se observa a descida do rio principal por entre as saliências da topografia. Fotografias do local ilustram as elevações topográficas permeadas pelo rio.

No perfil longitudinal do canal principal (Figura 24) fica clara a diferença na declividade do talvegue quando o rio passa por esta zona, entre os quilômetros 21 e 22, sendo este, portanto, um ponto de inflexão do relevo, da declividade do talvegue e da velocidade do rio principal por

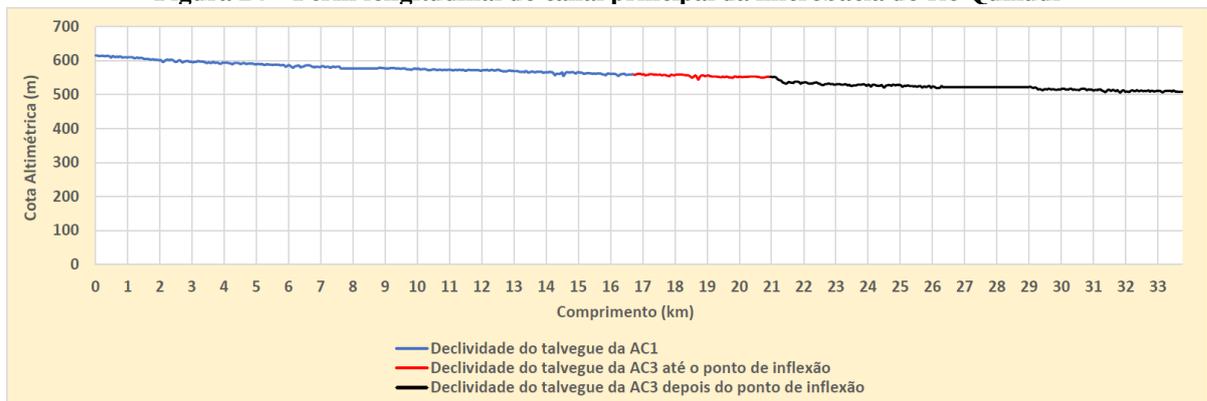
consequência, resultando na alteração do tempo de concentração entre os trechos de montante e de jusante deste ponto.

Figura 23 – Mapa de localização da zona de cisalhamento e do ponto de inflexão do relevo e da declividade do talvegue do rio principal



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 24 – Perfil longitudinal do canal principal da microbacia do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024)

O perfil longitudinal do canal principal da microbacia compreende os rios da AC1 e da AC3, sendo que o rio da AC2 integra a drenagem da microbacia como afluente do rio principal, confluindo com os rios da AC1 e da AC3 na altura do km 16,72 no gráfico da Figura 24.

Portanto, o trecho em azul no referido gráfico — localizado entre a nascente e o km 16,72 — representa o canal da AC1. Já o trecho em vermelho e preto que completa o gráfico representa os 17,03 km do canal da AC3, totalizando os 33,75 km de extensão do canal principal. O canal da AC2, obviamente, não compõe o perfil longitudinal. O trecho destacado em vermelho entre os quilômetros 16,72 e 20,95 compreende o trecho do canal da AC3 que integra a parte alta da microbacia. Este trecho mede 4,23 km e se estende desde o ponto de confluência entre as três áreas de contribuição até o ponto de inflexão do relevo e da declividade. Os trechos com declividade zero identificados entre os quilômetros 7,6 e 8,7 do canal da AC1 e 26,4 e 29,0 da AC3 representam, respectivamente, o açude Tapuio, no município de São Vicente do Seridó, e a barragem Santa Teresa, no município de Soledade.

No trecho correspondente a AC1, o gradiente do canal principal registrou 0,34%, ou seja, para cada 100 m de distância ao longo do canal, a elevação muda 34 cm. Com isso, a declividade equivalente do talvegue neste trecho foi de 5,19 m/km. Já no trecho correspondente a AC3 o gradiente registrou 0,29%, para uma declividade equivalente de 3,61 m/km. No canal principal como um todo o gradiente registrou 0,31%, e a declividade equivalente do talvegue resultou em 4,35 m/km.

A declividade do talvegue tem influência direta sobre o tempo de concentração (T_c) na microbacia, uma vez que interfere na velocidade de fluxo dos rios. Quanto maior for a declividade, maior será a velocidade do fluxo e menor será o T_c . O T_c é calculado, então, a partir da relação entre o comprimento do canal principal e a declividade equivalente de seu talvegue. Dessa forma, o T_c na AC1 — onde o canal é mais curto e a declividade é maior — registrou 4 horas e 24 minutos, enquanto na AC3, o maior comprimento e a menor declividade do talvegue resultaram num T_c de 5 horas e 6 minutos. Na microbacia como um todo o T_c registrou 8 horas e seis minutos, significando um tempo longo, ou lento, condizente com inundações graduais. Esta é mais uma característica da microbacia que reforça a afirmativa de que sua susceptibilidade a inundações tem pouca influência dos fatores puramente físicos. Ou seja, em condições normais de precipitação, o comprimento e a declividade do talvegue do canal principal da microbacia propiciam uma velocidade de fluxo lenta da água dos rios, resultando num tempo de concentração longo, o que evita inundações bruscas.

No entanto, a partir da observação do mapa hipsométrico e do perfil longitudinal do canal principal da microbacia é possível constatar que, internamente, a velocidade do rio principal da microbacia é alterada a partir do ponto de inflexão destacado no mapa da Figura 23. Quando se considera a extensão do canal da AC1 até este ponto de inflexão, o acréscimo de 4,23 km no comprimento do referido canal resulta no aumento da diferença altimétrica entre

seus extremos de 57 m para 64 m e da declividade equivalente do talvegue de 5,19 m/km para 5,40 m/km. Assim, o Tc também é alterado entre os trechos do canal principal separados por este ponto de inflexão, uma vez que, na mesma medida em que o canal da AC1 tem seu comprimento aumentado, no canal da AC3 o comprimento é reduzido. Com isso, no trecho de montante do ponto de inflexão o Tc passa a registrar 5 horas de 12 minutos, enquanto no trecho de jusante o Tc muda para 4 horas e 18 minutos.

Outro parâmetro que também é alterado entre os trechos de montante e de jusante do ponto de inflexão é a sinuosidade. Como visto na análise linear, a sinuosidade na AC1 e na AC3 corresponde ao mesmo índice registrado no canal principal como um todo, ou seja, $1,20 \text{ km} \cdot \text{km}^{-1}$. No entanto, considerado a partir do ponto de inflexão, o trecho de jusante registrou um índice de sinuosidade menor, qual seja, $1,18 \text{ km} \cdot \text{km}^{-1}$. O trecho de montante, por sua vez, manteve o mesmo índice de $1,20 \text{ km} \cdot \text{km}^{-1}$.

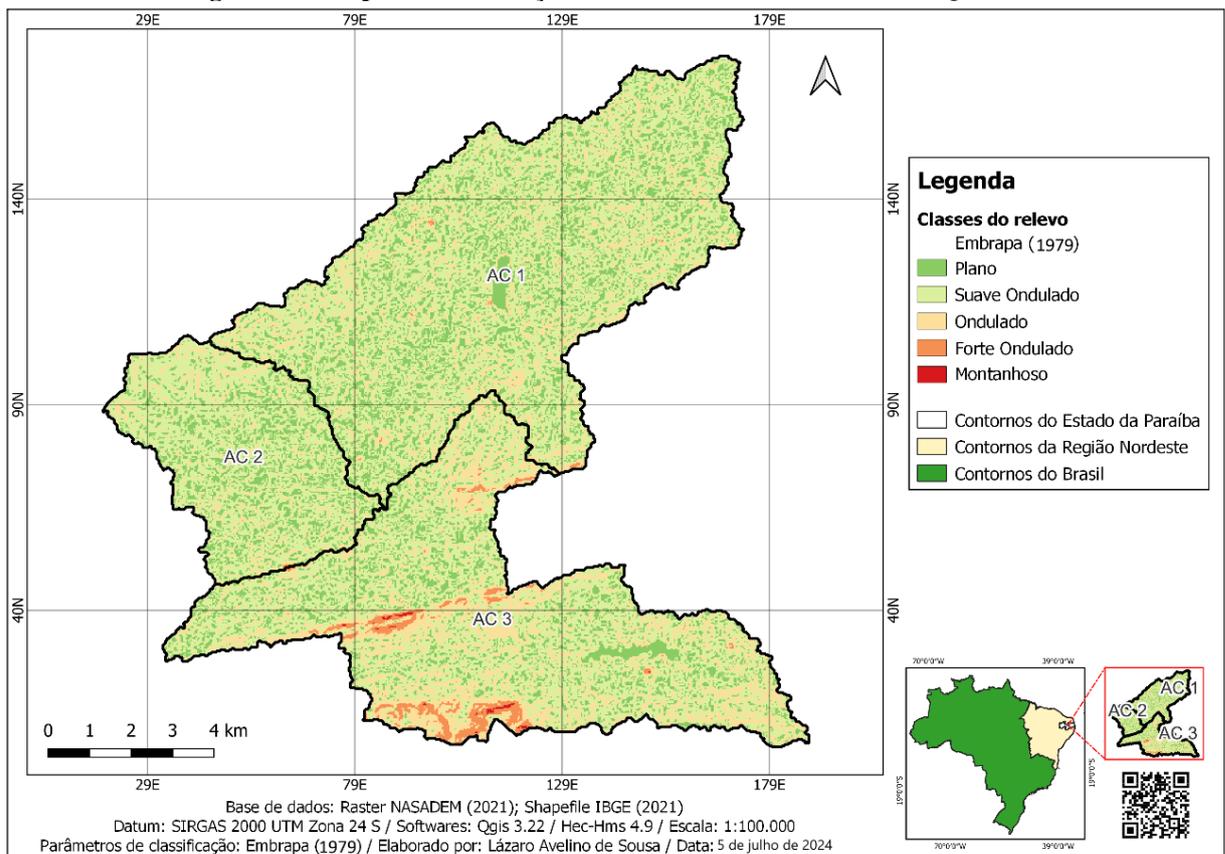
Em resumo, considerando o ponto de inflexão como referência, têm-se um trecho de rio mais longo, mais sinuoso e mais declivoso na área de montante, ao passo que, na área de jusante, tem-se um trecho de rio mais curto, mais retilíneo e menos declivoso, sendo este trecho mais propenso a inundação do que o trecho de montante. Neste caso, percebe-se que a morfologia da microbacia afeta sua condição de susceptibilidade a inundação, na medida em que tal inflexão no relevo propicia que toda a água da parte alta da microbacia — que tem uma área de captação bem maior — seja despejada no curto trecho de jusante, que também é menos sinuoso e, por isso, tem menor tempo de concentração. O fato de o trecho de jusante ser menos declivoso também contribui com a formação de inundações, pois propicia que toda a água provinda de montante — após descer bruscamente os 21 m no ponto de inflexão — tenha sua velocidade de fluxo refreada, ocasionando rápida acumulação. Conclui-se, então, que em caso de evento extremo de precipitação, a configuração física da microbacia potencializa a ocorrência de inundação em sua área de jusante.

Quanto à classificação do relevo da microbacia, o mapa da Figura 25 confirma um relevo predominantemente plano a suave ondulado, com pequenas parcelas com declividades mais acentuadas próximo da zona de cisalhamento e no extremo sul da AC3, chegando ao máximo de 67,97% de inclinação zenital em relação ao plano.

A declividade média na microbacia registrou 5,78%. Valores como este, menores que 6%, representam uma declividade muito fraca de acordo com Ross (2011). Isso implica que a susceptibilidade a erosão nos solos da microbacia, a depender do fator declividade, também é muito fraca. Sabino *et al.* (2020) encontraram valores médios de declividade bem menores, variando entre 1,8% e 4,2%, em bacias hidrográficas localizadas nos Estados de Mato Grosso

do Sul, São Paulo e Goiás. Valores baixos como esses colaboram com a lentidão do escoamento superficial e, como consequência, propiciam maior infiltração da água no solo, inibindo a formação de enchentes nos rios. Diante disso, observando-se o caso particular da microbacia do rio Quixudi, percebe-se que o relevo plano a suave ondulado dificulta a formação de inundações em condições normais de precipitação. No entanto, em caso de evento extremo de precipitação, o aumento repentino no volume de chuvas pode provocar a saturação hídrica do solo, resultando em alagamento de áreas planas.

Figura 25 – Mapa de classificação do relevo da Microbacia do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024)

A razão de relevo, por sua vez, representa a relação entre a amplitude altimétrica máxima e o comprimento do eixo axial da bacia. Quanto maior for o valor da razão de relevo, maior será o desnível entre a cabeceira e o exutório, consequentemente maior será a declividade média da bacia. No caso em tela, a razão de relevo foi de apenas 0,01 km, ou 10 m. Esse baixo valor condiz com as características do relevo plano a suave ondulado já verificadas na bacia, ou seja, com essa razão de relevo a declividade média é muito fraca na bacia.

Quanto ao índice de rugosidade, o valor é obtido da relação entre a amplitude altimétrica da bacia e a densidade de drenagem. Este índice mostra a relação da declividade com os

comprimentos dos canais, sendo que “quanto maior for o índice implica em relevo mais colinoso e dissecado e canais mais entalhados” (Castro; Carvalho, 2009, p. 6). A rugosidade na microbacia do rio Quixudi é considerada fraca, tendo registrado um índice de 137 (adimensional), condizendo com um relevo pouco dissecado.

Em resumo, a análise altimétrica revelou uma bacia com relevo majoritariamente plano a suave ondulado, com amplitude altimétrica concentrada na área de jusante, onde se observa também as maiores declividades. Essa configuração física da bacia — que apresenta um relevo pouco dissecado, com declividade média muito fraca — propicia uma drenagem de fluxo lento, contribuindo com a conservação da bacia. A inflexão no padrão de relevo a partir da zona de cisalhamento é uma peculiaridade da microbacia que potencializa sua susceptibilidade a inundação em caso de evento extremo de precipitação, dada a alteração na dinâmica interna da drenagem a partir dessa inflexão.

4.2 Caracterização ambiental da microbacia hidrográfica do rio Quixudi

4.2.1 Uso e ocupação da superfície

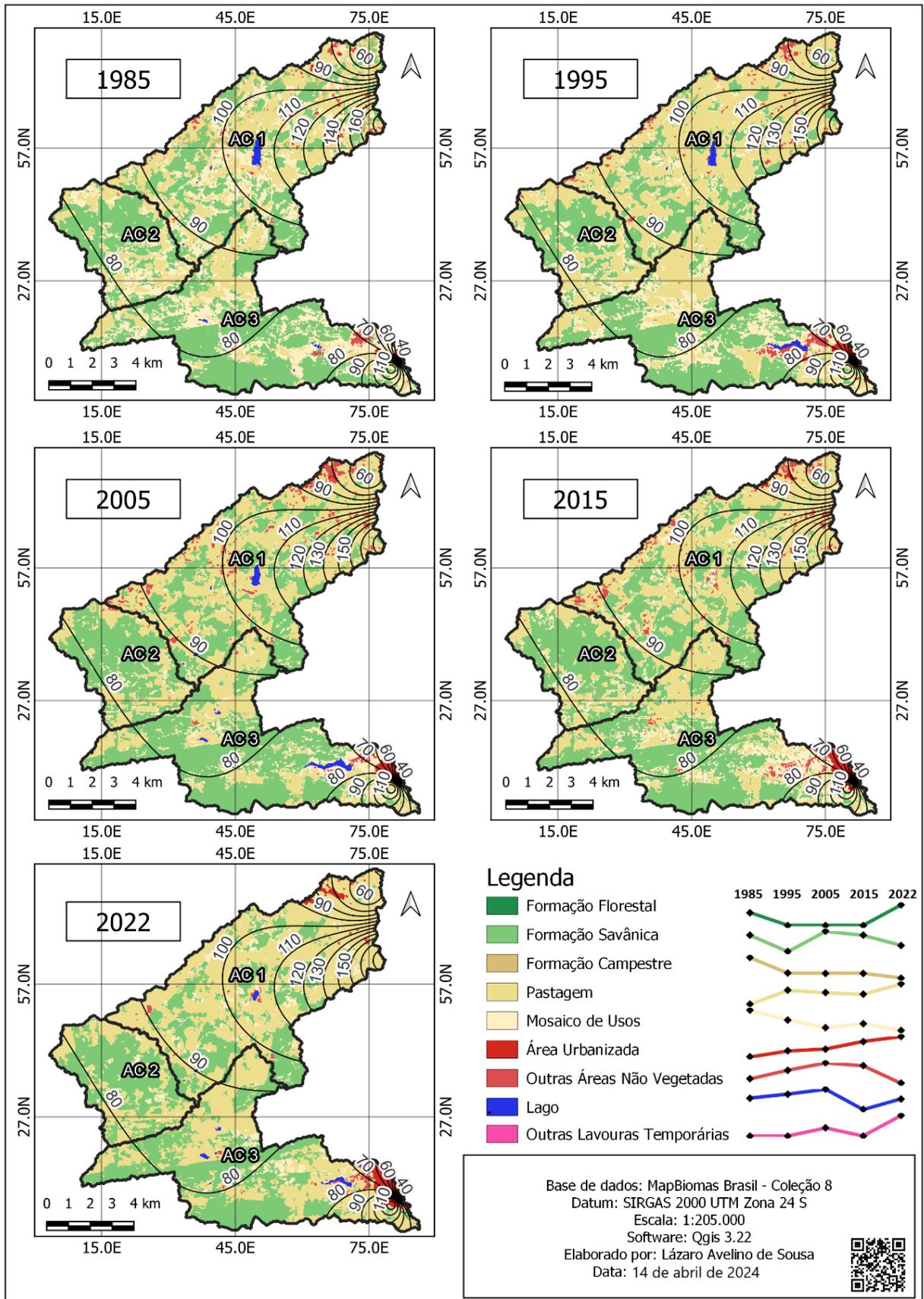
Após delimitada a microbacia, foi feito o mapeamento da evolução do uso e ocupação da superfície da terra entre os anos de 1985 e 2022 dentro deste recorte territorial, conforme ilustrado na Figura 26.

Foram identificadas nove classes de uso e ocupação que foram distinguidas conforme a paleta de cores oficial do projeto MapBiomas Brasil, coleção 8.

As isoietas de precipitação média acumulada colocadas sobre os mapas indicam o padrão histórico de distribuição das chuvas no território da microbacia em comparação com a dinâmica evolutiva do uso e ocupação da superfície. Este padrão será discutido adiante, na análise pluviométrica.

A Tabela 5 traz uma breve descrição de cada classe de uso e ocupação registrada e a área ocupada por cada uma delas em cada ano analisado.

Figura 26 – Mapas da evolução do uso e ocupação da superfície da terra na microbacia do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 5 – Descrição das classes de uso e ocupação da superfície e suas áreas para cada ano mapeado.

CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO	DESCRIÇÃO BREVE	ÁREAS PARA CADA ANO (ha)				
		1985	1995	2005	2015	2022
Formação Florestal	Tipos de vegetação com predomínio de dossel contínuo - Savana-Estépica. Florestada, Floresta Estacional Semidecidual e Decidual.	2,5	0,0	0,0	0,0	4,0
Formação Savânica	Tipos de vegetação com predomínio de espécies de dossel semicontínuo - Savana-Estépica Arborizada, Savana Arborizada.	5.970,1	4.788,4	6.271,2	5.969,1	5.236,9
Formação Campestre	Tipos de vegetação com predomínio de espécies herbáceas (Savana-Estépica. Parque, Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa, Savana Parque, Savana. Gramíneo-Lenhosa) + (Áreas inundáveis com uma rede de lagoas interligadas, localizadas ao longo dos cursos de água e em áreas de depressões que acumulam água, vegetação predominantemente herbácea a arbustiva).	242,7	60,5	57,5	57,5	0,4
Pastagem	Área de pastagem, predominantemente plantadas, vinculadas a atividade agropecuária. As áreas de pastagem natural são predominantemente classificadas como formação campestre que podem ou não ser pastejadas.	3.871,6	6.510,6	6.036,8	5.771,4	7.713,8
Mosaico de Usos	Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura.	3.803,3	2.352,6	1.218,0	1.845,5	811,1
Área Urbanizada	Áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura.	43,0	97,6	112,5	179,0	224,8
Outras Áreas Não Vegetadas	Áreas de superfícies não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes.	174,5	280,0	370,6	336,3	119,4
Lago	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água.	54,3	72,3	95,3	3,2	51,0
Outras Lavouras Temporárias	Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir.	0,0	0,0	0,2	0,0	0,4
TOTAIS		14.161,9	14.161,9	14.161,9	14.161,9	14.161,9

Fonte: Classificação MapBiomias Brasil – Coleção 8 (2022)

As classes mais expressivas de uso e ocupação da superfície para os anos analisados foram Formação Savânica, Pastagem e Mosaico de Usos, com valores de área que variam de 811,1 ha a 6.510,6 ha.

A Formação Savânica na Caatinga é compreendida como “Savana Estépica Florestada, composta de vegetação de média densidade, com a presença de espinhos e acúleos, onde a maioria das espécies são decíduas na estação de escassez hídrica, com alguns indivíduos ultrapassando os sete metros de altura” (Silva *et al.* 2022, p. 135).

Curiosamente, na área analisada, não há muita Formação Savânica nas áreas onde historicamente se registraram índices pluviométricos maiores que 100 mm. Principalmente em 1995, essas áreas de maiores precipitações estavam ocupadas por Pastagem, levando a crer que são áreas mais antropizadas por serem mais chuvosas. A maior parte da Formação Savânica concentra-se na AC2 e na AC3, onde as precipitações giram em torno de 80 e 90 mm, sendo que nas maiores altitudes do extremo sul da bacia essa vegetação se manteve preservada ao longo dos anos analisados.

Quanto às classes menos expressivas de uso e ocupação da superfície identifica-se a Formação Florestal e Outras Lavouras Temporárias, que juntas não ultrapassam 5,0 % da área da microbacia. A classe Formação Florestal aparece em 1985, ocupando 2,5 ha, e só reaparece em 2022 com 4,0 ha. Já a classe Outras Lavouras Temporárias surge em 2005 com apenas 0,2 ha e só reaparece em 2022 com 0,4 ha.

Em termos percentuais gerais, só houve crescimento de área em 2022, relativamente a 1985, para as classes Formação Florestal (+160,8%), Pastagem (+199,2%) e Área Urbanizada (+522,7%). Para a classe Formação Florestal, mesmo o percentual sendo alto, ele só representa um aumento de 1,5 ha. Já a classe Área Urbanizada cresceu 181,8 ha entre 1985 e 2022. Esse crescimento se verifica, sobretudo, em cima das classes Formação Campestre e Mosaico de Usos.

No tocante às perdas de área, a classe Mosaico de Usos registrou a maior queda, saindo de 3.803,3 ha em 1985, para 811,1 ha em 2022. Verifica-se no mapa da Figura 25 que essa perda se deu em decorrência do aumento das áreas de Pastagem. Áreas antes não distinguidas entre pastagem e agricultura figuram em 2022 como Pastagem, aumentando a área desta classe em 3.824,2 ha. Já as menores perdas de área foram registradas para as classes Lago (-3,3 ha) e Outras Áreas Não Vegetadas (-55,1 ha).

O aumento das áreas de pastagem e a consequente perda das Formações Campestre (-242,3 ha) e Savânica (-733,2 ha) se explica pelo avanço da agropecuária no bioma Caatinga como um todo. Segundo o Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra na Caatinga

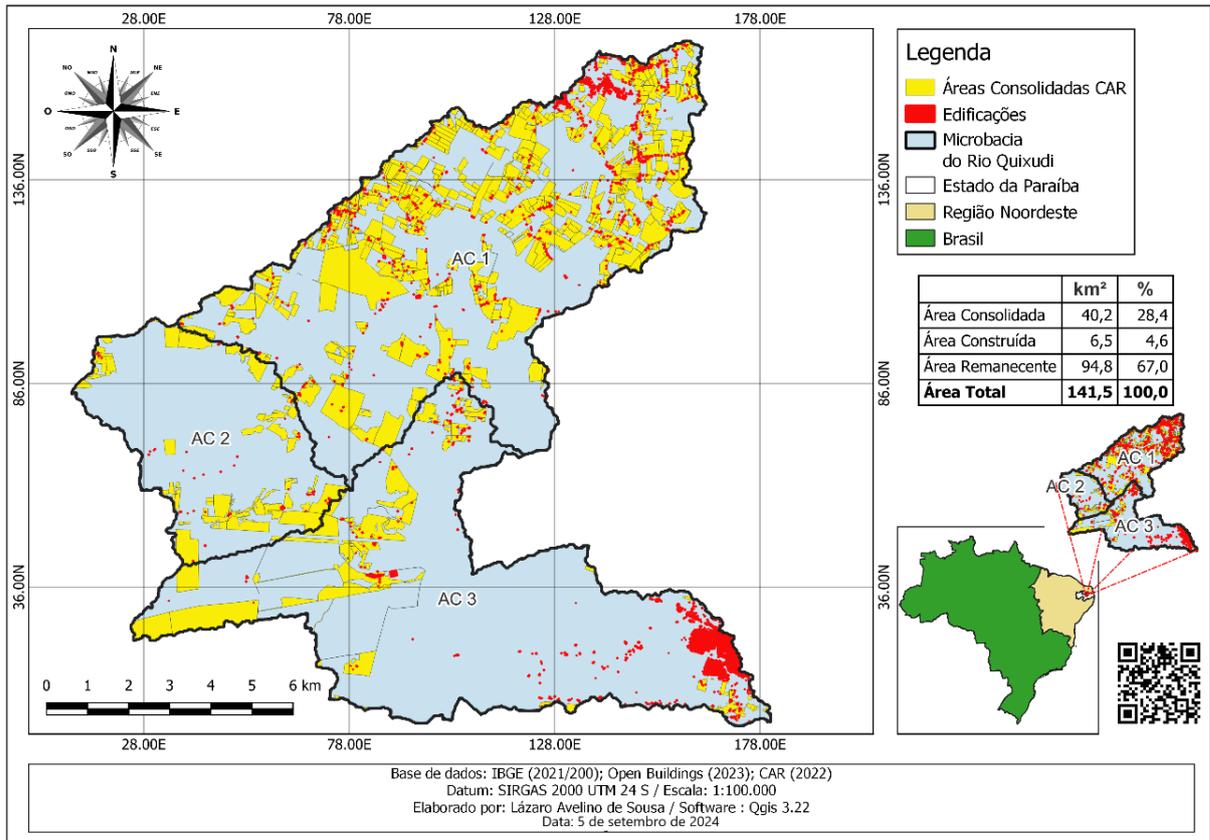
(MapBiomas, 2022), a atividade agropecuária nesse bioma ganhou 5.772.724,20 ha nos últimos 37 anos, representando 24,15% da área inicial de 1985.

De forma geral, o padrão de uso e ocupação da superfície da terra na microbacia revela uma bacia predominantemente rural, com manchas urbanizadas nos extremos norte e sul, relativas às cidades de São Vicente do Seridó e Soledade, respectivamente. A AC1 concentra a maior parte das áreas de Pastagem e Mosaico de Usos, sendo, portanto, a área que apresenta a maior antropização em área rural da microbacia. Nestas áreas, segundo especifica a Tabela 5, predominam as pastagens plantadas, vinculadas a atividade agropecuária, bem como as pastagens naturais formadas por espécies herbáceas que podem ou não serem pastejadas. Também são identificadas áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Já na AC2 e na AC3 predomina a Formação Savânica, sendo que a AC3 apresenta maior antropização em área urbana, próximo do exutório da microbacia.

Essas áreas antropizadas dentro da microbacia não deixam de ter sua influência na susceptibilidade à inundação que lhe é atribuída. A atividade agropecuária na área rural remove a cobertura natural do solo, tanto para plantações quanto para a criação de gado. Com isso, o solo exposto e compactado pelo pisoteio dos rebanhos potencializa o escoamento superficial e, por consequência, aumenta a susceptibilidade a inundação. Já nas áreas urbanas, a impermeabilização da superfície do solo pelas pavimentações tem efeito igual.

A Figura 27 traz um mapa representativo da antropização dentro da microbacia, tendo por base as áreas rurais consolidadas identificadas pelo CAR e as áreas de edificações rurais e urbanas disponibilizadas na base de dados *Open Buildings*. Essas áreas representam intervenções humanas no ambiente natural, modificando-o e adaptando-o às suas necessidades. As áreas rurais consolidadas são definidas pelo Art. 3º, inciso IV da Lei Federal nº 12.651/2012 como “área de imóvel rural com ocupação antrópica preexistente a 22 de julho de 2008, com edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris, admitida, neste último caso, a adoção do regime de pousio”. A base de dados do CAR utilizada no mapa é datada de 2022. Já a base *Open Buildings* refere-se a 2023. Ou seja, ambas representam o que especifica a lei.

Figura 27 – Mapa das áreas rurais consolidadas e das áreas edificadas rurais e urbanas na microbacia do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024)

O mapeamento das áreas rurais consolidadas e das áreas edificadas dentro da microbacia demonstra o grau de antropização dentro da microbacia. As áreas rurais consolidadas ocupam 28,4% do território da microbacia, totalizando 40,2 km². Já as áreas edificadas representam 4,6% do território, com 6,5 km². As áreas edificadas, obviamente, têm uma densidade maior nas áreas urbanas dos municípios de São Vicente do Seridó e Soledade. O mapeamento confirma, então, a maior antropização concentrada na AC1. Nesta área também se observa o maior número de edificações rurais, demonstrando as intervenções do homem sobre o meio natural da microbacia.

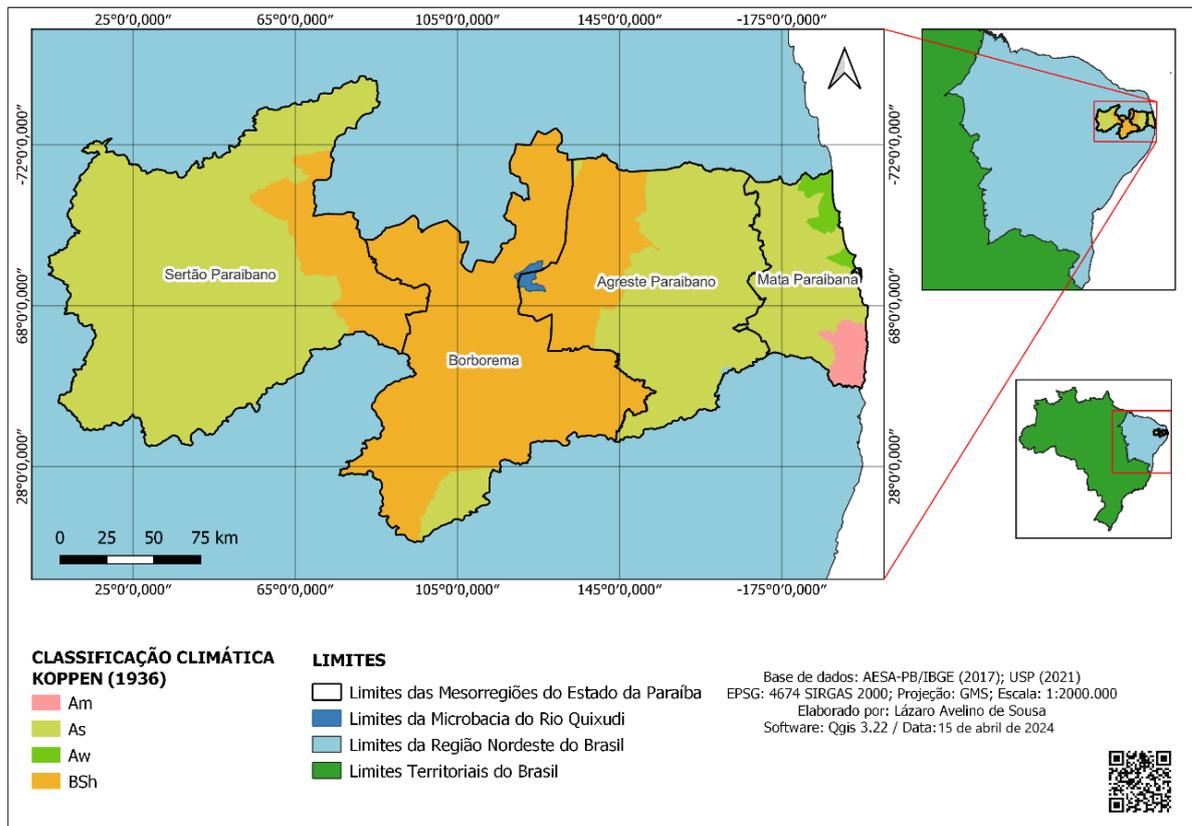
4.2.2 Clima e distribuição das chuvas

A Base Cartográfica Digital Georreferenciada das Zonas Climáticas, conforme Köppen, do Brasil, publicada pela Universidade de São Paulo (USP, 2021), classifica o Estado da Paraíba em quatro zonas climáticas onde se identificam os climas dos tipos Am (tropical monçônico),

As (tropical com seca no verão), Aw (tropical com seca no inverno) e BSh (semiárido de estepe, de baixa latitude e altitude), conforme se observa no mapa da Figura 28.

A microbacia do rio Quixudi está localizada na zona de clima BSh, numa área de transição entre as mesorregiões estaduais do Agreste e da Borborema, sendo que 59,3% do seu território fica no Agreste, e 40,7% fica na Borborema. As temperaturas na região giram em torno de 18° C em dias de inverno e 30° C no verão. A umidade relativa do ar varia de 20% a 82% ao longo do ano. O período chuvoso é de verão a outono, tendo início em fevereiro e estendendo-se até maio.

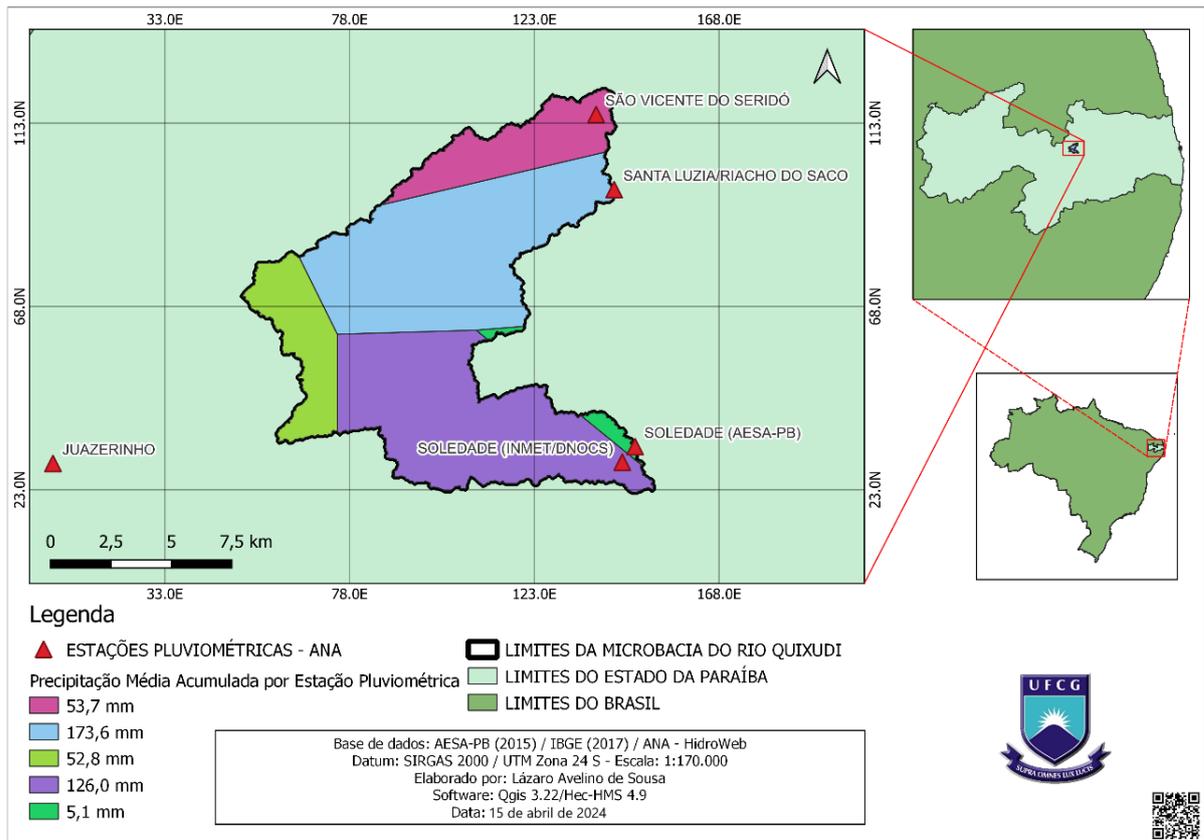
Figura 28 – Localização da microbacia do rio Quixudi em relação as zonas climáticas do Estado da Paraíba



Fonte: Autoria própria (2024)

No tocante a distribuição das chuvas, a precipitação média acumulada por estação pluviométrica foi feita pelo método de Thiessen. A representação das estações pluviométricas e suas respectivas áreas de influência está expressa no mapa da Figura 29.

Figura 29 – Mapa de localização das estações pluviométricas e suas respectivas áreas de influência dentro da microbacia do rio Quixudi

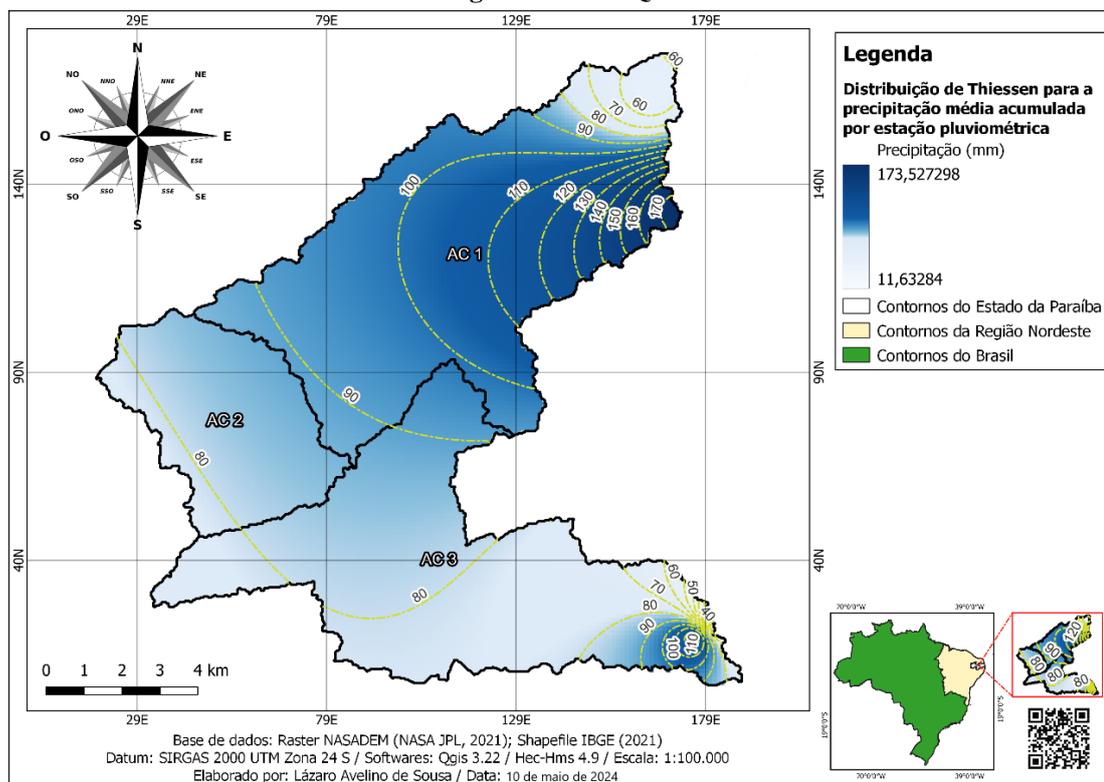


Fonte: Autoria própria (2024)

As estações pluviométricas que registraram maior influência na distribuição das chuvas na microbacia foram as de Santa Luzia/Riacho do Saco, com precipitação média acumulada de 173,6 mm, e Soledade INMET/DNOCS, com 126 mm.

Distribuindo-se essas médias de precipitação acumulada pelo território da microbacia tem-se o que se vê no mapa da Figura 30, onde os maiores índices pluviométricos concentram-se na parte lés-nordeste do território, no município de São Vicente do Seridó, chegando a atingir médias maiores que 100 mm. Esse mesmo valor também se registra em um pequeno círculo territorial localizado a sudeste, próximo ao exutório da microbacia.

Figura 30 – Distribuição da precipitação média acumulada no período de 1912 a 2018 na microbacia hidrográfica do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024)

Os índices mais baixos registraram-se na parte equivalente a área urbana do município de Soledade, na porção sudeste, bem como no extremo norte da microbacia, com variação entre 50,0 mm e 60,0 mm.

A média geral da precipitação acumulada, considerando-se todas as cinco estações pluviométricas, é de 411,3 mm.

Observando-se o padrão de distribuição das chuvas na microbacia percebe-se que a AC1 é a área de contribuição mais chuvosa, sendo este, talvez, o motivo da maior antropização verificada nesta área, dada a maior disponibilidade hídrica. Como se trata de uma região semiárida, o aproveitamento das áreas mais úmidas para as atividades agropecuárias propicia maior impacto sobre as paisagens naturais, resultando num ambiente mais modificado e adaptado às necessidades humanas.

Percebe-se, então, que o benefício da maior disponibilidade hídrica parece acarretar a maior antropização na AC1 e, como consequência, a susceptibilidade a inundação é potencializada na medida em que resulta em superfícies mais desprotegidas de cobertura vegetal, onde o escoamento superficial é maior. Em compensação, a área tida como mais chuvosa é também uma das mais planas e mais compridas da microbacia. Isto implica que, em condições normais de precipitação, o formato da AC1, associado às suas baixas declividades,

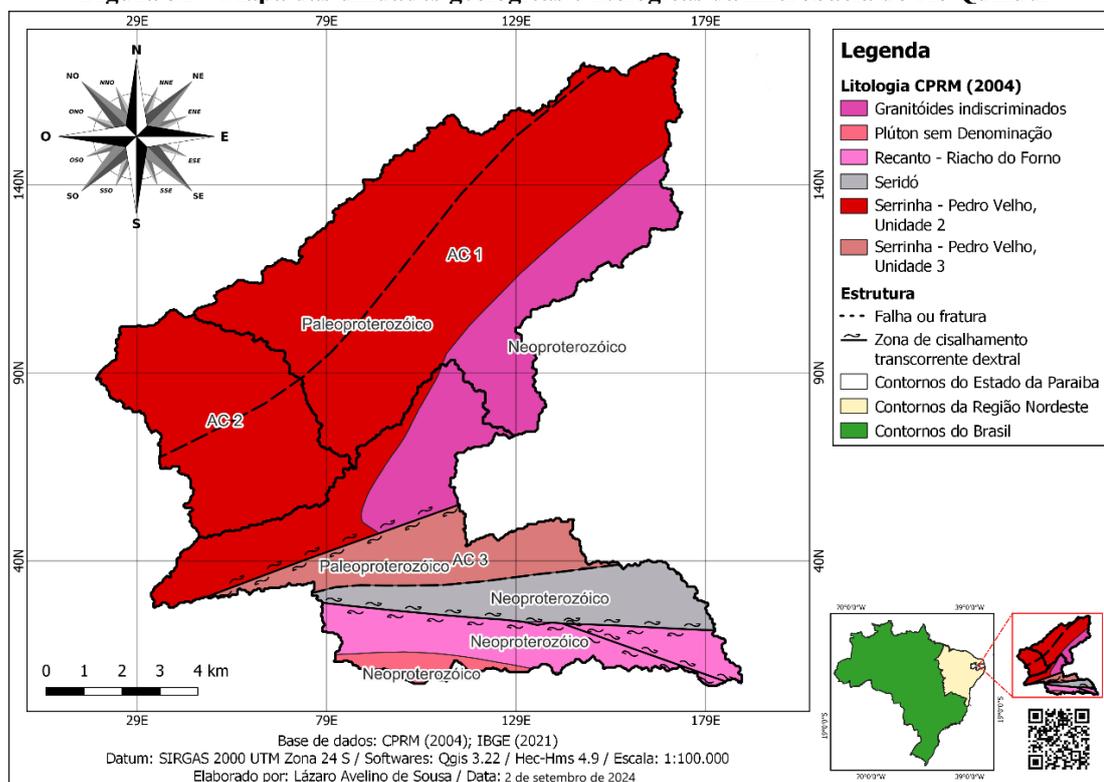
propicia a dissipação do volume pluviométrico antes que resulte em inundação. Portanto, a susceptibilidade a inundação, apesar de estar ligada à pluviometria da microbacia, muito mais que às suas características físicas, é condicionada principalmente pela ocorrência de extremos de precipitação.

4.2.3 Litologia e Pedologia

O mapeamento das unidades geológicas, litológicas e pedológicas ocorrentes na área de estudo revela a origem e a composição mineralógica do substrato da microbacia, tendo influência direta sobre suas formas de relevo.

Geologicamente, a microbacia do rio Quixudá faz parte da Província Borborema. No mapa da Figura 31 observa-se uma estrutura geológica datada do Paleoproterozóico ao Neoproterozóico, com litologias Granitóides, Plútons, além de formações como Recanto-Riacho do Forno, Seridó e Serrinha-Pedro Velho. Essas formações também foram relatadas por Cordeiro *et al.* (2017) na vizinha microbacia do riacho Santa Luzia, no município de Soledade. A Tabela 6 especifica cada uma dessas unidades geológicas e suas litologias.

Figura 31 – Mapa das unidades geológicas e litológicas da microbacia do rio Quixudá



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 6 – Unidades geológicas e litológicas presentes na microbacia do rio Quixudi.

UNIDADE	ÁREA (Km ²)	LITOLOGIA
Corpo Granitóides indiscriminados	20,3	Biotita granito, Granito pórfiro, Granodiorito, Metagranito, Monzogranito, Quartzo diorito, Quartzo monzonito, Sienogranito, Tonalito
Complexo Serrinha-Pedro Velho	95,9	Biotita gnaisse granítico migmatizado, biotita-hornblenda migmatito com mesossoma de ortognaisse tonalítico-granítico com diques de anfibolitos trondhjemítico, ortognaisse tonalítico com granada e rocha calcissilicática
Recanto riacho do Forno	12,01	Granada-biotita-muscovita metagranito e migmatito de composição sieno à monzogranítica, de fonte crustal metassedimentar
Formação Seridó	11,13	Granada-biotita xisto, cordierita-granada-biotita xisto, quartzito, biotitaclorita xisto, clorita-sericita xisto, filito, localmente com paragnaisse, calcário cristalino, rocha calcissilicática e formação ferrífera
Plúton sem Denominação*	2,12	*Pertence à categoria dos granitóides de quimismo indiscriminado (N _γ). São intrusivas graníticas conhecidas apenas petrograficamente ou que são referidas genericamente como granitos ou granitóides, não se dispoendo de dados litoquímicos para enquadrá-los em nenhuma suíte. Incluem-se neste grupo também duas pequenas intrusões de rochas ultramáficas dominadas por serpentinitos e mineralizadas em níquel (Farina, 1969) (N _ν), que ocorrem na parte sudeste da Faixa Piencó-Alto Brígida.

Fonte: Adaptado de Cordeiro et al. (2017); * Ferreira e Santos (2000)

Observa-se na Tabela 6 que o complexo Serrinha-Pedro Velho, somadas as unidades 2 e 3, representa a maior cobertura de área na microbacia, totalizando 95,9 km². Esta formação se estende pela maior parte da AC1, por toda a AC2 e pela porção da AC3 que vai do centro ao oeste, conforme se vê no mapa da Figura 31. De acordo com Ferreira e Santos (2000), a idade-modelo TDM (Two-Stage Depleted Model-Age) dessa unidade geológica concentra-se em torno de 2,3 milhões de anos, mas algumas amostras da unidade Pedro Velho são mais antigas. “Geralmente, idades-modelo (TDM) representam uma média do tempo durante o qual uma determinada amostra é residente na crosta, derivada de um manto comum (fonte única) ou de fontes mistas, podendo ser gerada em diferentes épocas” (Arndt; Goldstein, 1987; Dickin, 1995 apud Dantas *et al.*, 2002, p. 121). Esse modelo é usado para estimar a idade da crosta continental com base em informações sobre a formação e evolução dos minerais e das rochas. O princípio é que a crosta continental se forma a partir do manto terrestre e, ao longo do tempo, evolui através de processos como a fusão e a diferenciação.

No processo de formação da crosta continental podem ocorrer descontinuidades como falhas e zonas de cisalhamento. Como visto na análise altimétrica, a microbacia do rio Quixudi é cortada longitudinalmente por uma zona de cisalhamento que representa um marco na configuração do relevo. Esta zona de cisalhamento é identificada como Z. C. Barra de Santa Rosa pela Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, folha SB-24 – Jaguaribe. Observa-se no mapa da Figura 31 que parte desta zona de cisalhamento divide os complexos Serrinha-Pedro Velho 2 e 3, enquanto outra parte divide este último complexo da formação Granitoides

Indiscriminados. Além da Z. C. Barra de Santa Rosa, a folha SB-24 – Jaguaribe identifica mais duas zonas de cisalhamento cortando a AC3, uma dividindo a formação Seridó da formação Recanto riacho do Forno, e outra internamente a esta última formação. Estas zonas de cisalhamento, de acordo com Santos *et al.* (2002), fazem parte do Lineamento Patos, que divide o Estado da Paraíba em dois superterrenos: um ao norte, com crosta densa e magnética — sugerindo a existência de um amplo assoalho crustal inferior/embasamento — e outro ao sul, com crosta menos densa e magnética — onde predomina rochas supracrustais e granitos, com restritas exposições de embasamento. A maior parte da microbacia do rio Quixudi faz parte do superterreno norte, onde a maior densidade da crosta resulta na textura grosseira verificada na área, justificando a tendência à conservação.

As zonas de cisalhamento identificadas na microbacia, de acordo com a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, são do tipo transcorrente dextral (ou destral), ou seja, são falhas onde as rochas estão sujeitas a forças de cisalhamento que provocam movimentos horizontais e paralelos à direção da falha, sem um componente vertical significativo. O termo dextral, ou destral, refere-se ao tipo de movimento horizontal ao longo da falha, significando que, ao olhar na direção do movimento, o bloco de rocha do lado direito da falha se move para frente em relação ao bloco do lado esquerdo.

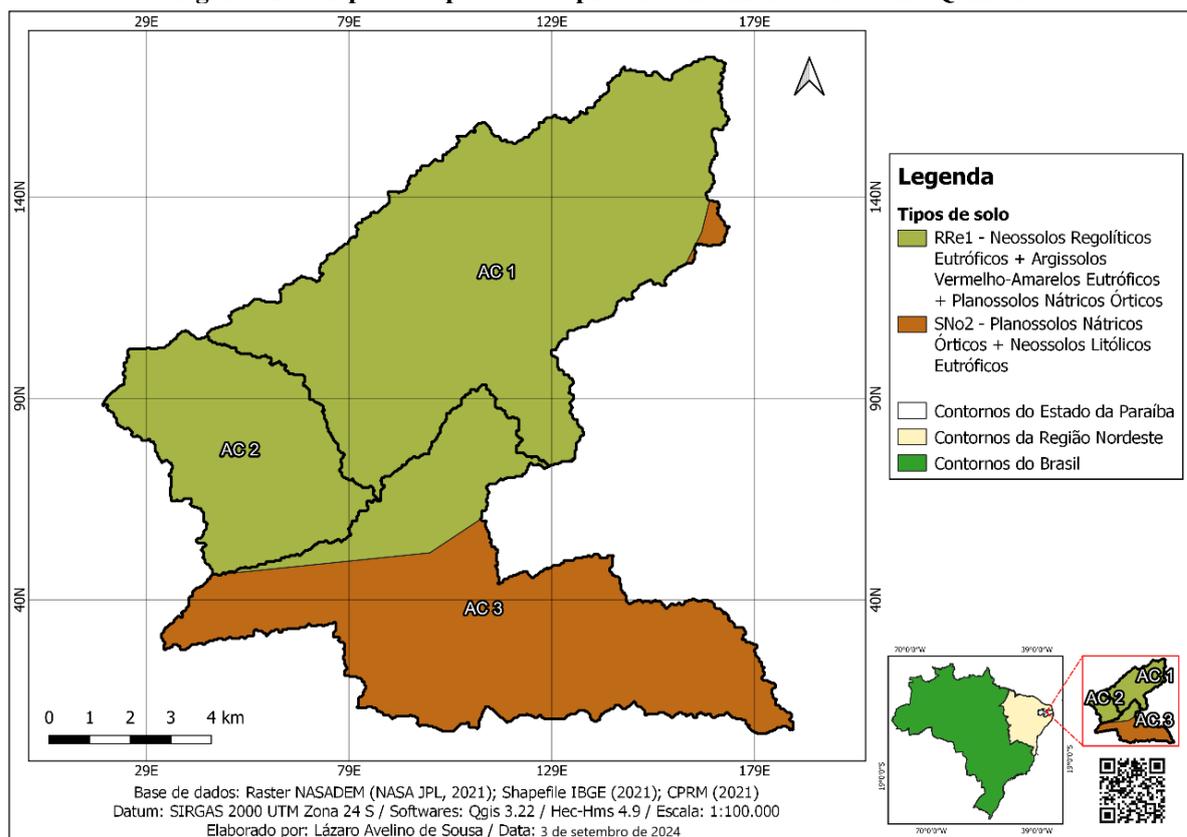
Duas fraturas ou falhas geológicas também são identificadas dentro dos limites da microbacia, uma cortando a AC1 e AC2 de nordeste a sudoeste, e outra dividindo o complexo Serrinha-Pedro Velho 3 da formação Seridó, conforme se observa no mapa da Figura 31.

Em resumo, a geologia-litologia da microbacia determinaram suas formas de relevo, uma vez que sua dinâmica evolutiva ao longo do tempo geológico, com suas falhas e zonas de cisalhamento, resultaram numa estrutura crustal que oferece resistência à erosão pluvial e fluvial, e como tal, garantiram uma textura grosseira com tendência à conservação da microbacia em termos geomorfológicos.

No tocante aos tipos de solo que ocorrem na microbacia, o mapa da Figura 32 mostra a distribuição em dois grandes grupos que reúnem Neossolos Regolíticos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Planossolos Nátricos Órticos, ocupando uma área de 48,04 Km²; e Planossolos Nátricos Órticos + Neossolos Litólicos Eutróficos, ocupando 43,42 Km² de área. O primeiro grupo domina quase que a totalidade da AC1, toda a AC2 e a parte oeste da AC3. O segundo grupo, por sua vez, se estende por toda a parte baixa da microbacia, além de uma pequena porção no extremo leste da AC1.

O Portal Embrapa Solos Tropicais coloca como principais características desses tipos de solo as seguintes sentenças contidas no Quadro 3.

Figura 32 – Mapa dos tipos de solo presentes na microbacia do rio Quixudi.



Fonte: Autoria própria (2024) a partir das bases de dados CPRM (2004); IBGE (2021)

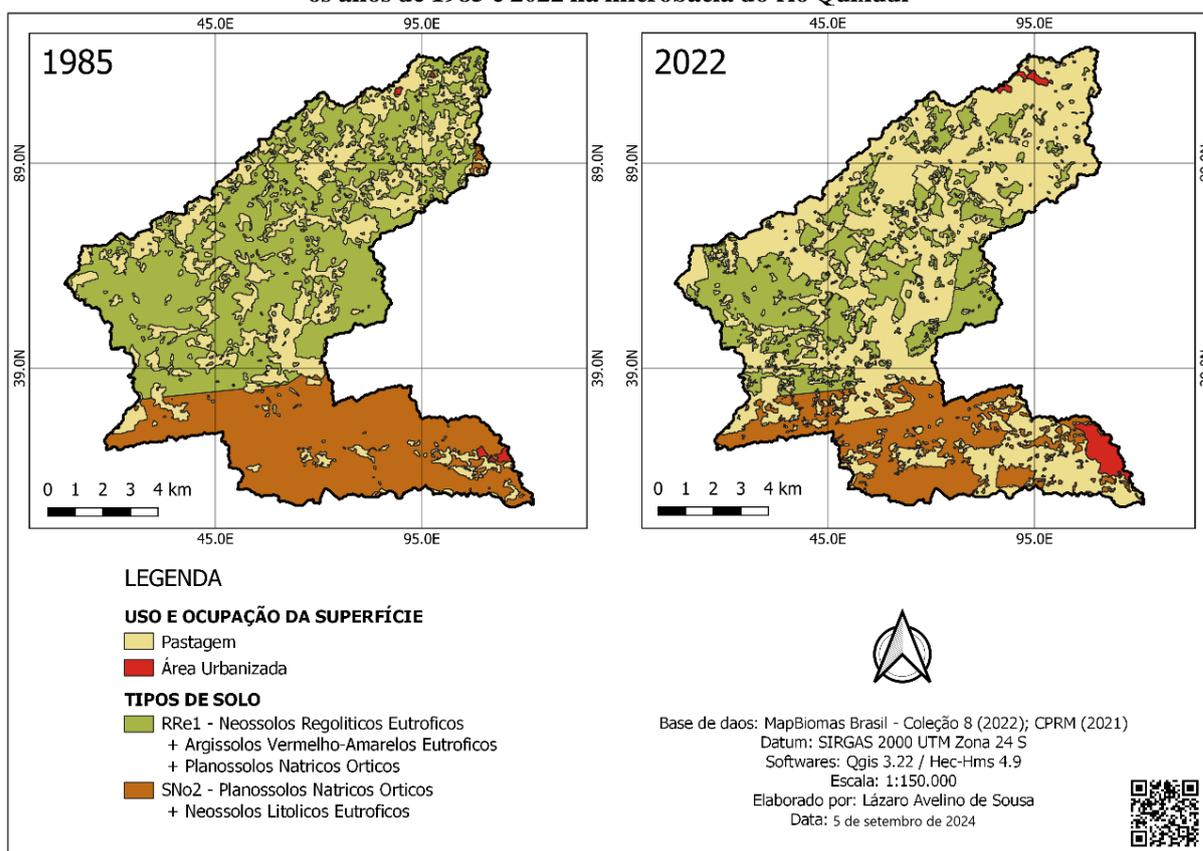
Quadro 3 – Características dos solos

TIPO DE SOLO	CARACTERÍSTICAS
Neossolos Regolíticos Eutróficos	São solos pouco desenvolvidos, não hidromórficos e de textura normalmente arenosa, apresentando alta erodibilidade principalmente em declives mais acentuados. No Nordeste do Brasil, no agreste, são muito utilizados para algodão mocó, sisal, abacaxi, milho, feijão, tomate e pastagens. Por serem eutróficos, apresentam alta fertilidade.
Neossolos Litólicos Eutróficos	São solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos. A pouca profundidade, a presença da rocha e os declives acentuados são fatores limitantes ao uso de máquinas e ao crescimento radicular, e elevam o risco de erosão. No entanto, por serem eutróficos, são normalmente indicados para preservação da flora e fauna, mas também são utilizados para produção de café, milho, feijão, soja, viticultura e pastagem.
Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	São identificados pelo maior teor de argila nos horizontes subsuperficiais em relação aos superficiais, que caracteriza um gradiente textural ao longo do perfil. Ocorrem em áreas de relevos mais acidentados e dissecados, e são susceptíveis à erosão. Porém, por serem eutróficos, são solos férteis.
Planossolos Nátricos Órticos	Possuem alta saturação por sódio, estrutura prismática ou colunar. O gradiente textural elevado causa grande suscetibilidade à erosão, também favorecida pela baixa permeabilidade do horizonte B, devido à alta concentração de sódio. A pecuária extensiva na vegetação natural constitui o principal aproveitamento destes solos no Nordeste semiárido e no pantanal. No Estado da Paraíba, apresentam horizontes superficiais mais espessos, e são utilizados para cultivo do sisal e da palma forrageira. São mais recomendados para pastagem, porém, como são órticos, não apresentam restrição ao uso e manejo.

Fonte: Portal EMBRAPA Solos Tropicais

Quando se verifica as formas de uso e ocupação desses tipos de solo, tem-se que, na região onde predominam os Neossolos Regolíticos e os Argissolos, o mapeamento de uso e ocupação do ano de 2022 mostra uma maior extensão de áreas de Pastagem, significando maior antropização em decorrência de atividades agropecuárias. Já na região sul da microbacia, onde predominam os Neossolos Litólicos e os Planossolos Nátricos, as áreas de Pastagem cresceram muito entre os anos de 1985 e 2022, seguidas pela Área Urbanizada do município de Soledade. No mapa da Figura 33 observa-se a distribuição das áreas de Pastagem e das Áreas Urbanizadas sobre os tipos de solo verificados na microbacia. A Área Urbanizada a sudeste corresponde ao município de Soledade, ao passo que os fragmentos de Área Urbanizada ao norte da bacia pertencem ao município de São Vicente do Seridó.

Figura 33 – Mapas da evolução das áreas de Pastagem e da Área Urbanizada sobre os tipos de solo entre os anos de 1985 e 2022 na microbacia do rio Quixudi



Fonte: Autoria própria (2024)

Percebe-se no mapa da Figura 33 que o grupo dos Neossolos Regolíticos e dos Argissolos — que compõem a parte norte da microbacia — foram os mais antropizados entre os anos de 1985 e 2022. Esses tipos de solo ocupam a região mais plana e mais chuvosa da microbacia, sendo, por isso, mais utilizados nas atividades agropecuárias do que os Neossolos

Litólicos, que estão presentes na parte mais declivosa da bacia, sendo mais identificados com a preservação da flora e fauna. Apesar de a geomorfologia da microbacia indicar uma tendência à conservação, com baixo potencial erosivo, verifica-se no Quadro 3 que todos os tipos de solo identificados na microbacia são susceptíveis à erosão. Dessa forma, a ampliação das pastagens sobre solos propensos à erosão afeta a condição de susceptibilidade à inundação da microbacia na medida em que interfere na dinâmica fenológica da vegetação xerófila da Caatinga, desnudando o solo e potencializando o assoreamento dos reservatórios de água. No caso em tela, o rio principal abastece os dois principais reservatórios de água da microbacia: o açude Tapuio, em São Vicente do Seridó, e a barragem Santa Teresa, em Soledade, como visto na análise altimétrica. A barragem Santa Teresa, localizada na AC3, recebe toda a água advinda da parte norte da microbacia, sendo, portanto, mais propenso ao assoreamento. Este reservatório, que controla a vazão do rio principal antes de atingir a zona urbana do município de Soledade, é de fundamental importância para evitar inundações na cidade. Seu assoreamento coloca em risco a população que reside a jusante, pois diminui sua capacidade de retenção do fluxo de água no rio principal.

De forma geral, a caracterização ambiental da microbacia do rio Quixudi mostrou um ambiente bastante antropizado. No ambiente rural, o mapa de uso e ocupação da superfície na microbacia mostra um expressivo crescimento das áreas de Pastagem entre o primeiro e o último ano analisado, evidenciando uma forte antropização da área estudada. Porém, o fator que mais evidencia o crescimento da antropização na microbacia é o aumento de mais de 500% da área urbanizada.

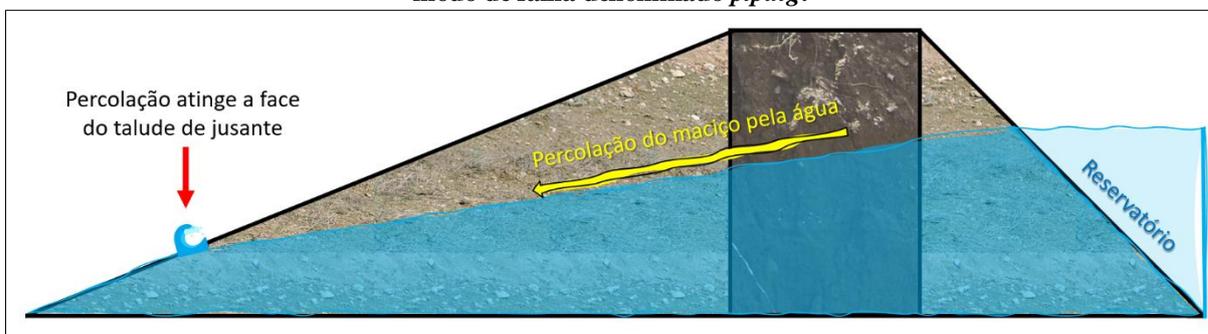
Essas características ambientais da microbacia afetam sua condição de susceptibilidade a inundação, potencializando o grau de impacto e vulnerabilidade sobretudo na área urbana. O aumento da área urbanizada exatamente na parte mais baixa da microbacia, próximo ao exutório do rio principal, pode agravar o risco de inundação em caso de eventos extremos de precipitação, pois, como já visto, o rio principal permeia parte dessa área habitada.

A condição de susceptibilidade à inundação da microbacia foi definida pela ANA levando em consideração a frequência de ocorrência de eventos de inundação. Nesse sentido, o fator climático é o que tem maior implicância na definição da susceptibilidade, já que se trata de uma bacia de drenagem efêmera, com clima semiárido de estepe. Assim, pode-se afirmar que a ocorrência de eventos extremos de precipitação tem maior influência sobre as inundações na microbacia do que as características morfométricas e físicas analisadas.

4.3 Modelagem hidrodinâmica e simulação do rompimento da barragem Santa Teresa

Para a simulação do rompimento da barragem propôs-se o seguinte cenário: a ruptura se dá por *piping*, que é a percolação do maciço da barragem pela água do reservatório, até que a erosão atinja a face do talude de jusante, conforme ilustra a Figura 34. Esse processo se dá pela infiltração da água por falhas contidas na compactação do maciço da barragem, até que a umidade sature esse material e inicie-se o processo de erosão da estrutura. Vale salientar que esse é um tipo de ruptura comum na região estudada. Nas imediações da própria barragem Santa Teresa, encontra-se as ruínas de uma pequena barragem rompida por *piping* (Figura 35).

Figura 34 – Esquema do perfil do maciço da barragem sendo percolado pela água de montante através do modo de falha denominado *piping*.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 35 – Barragem rompida por *piping* próximo à barragem Santa Teresa*



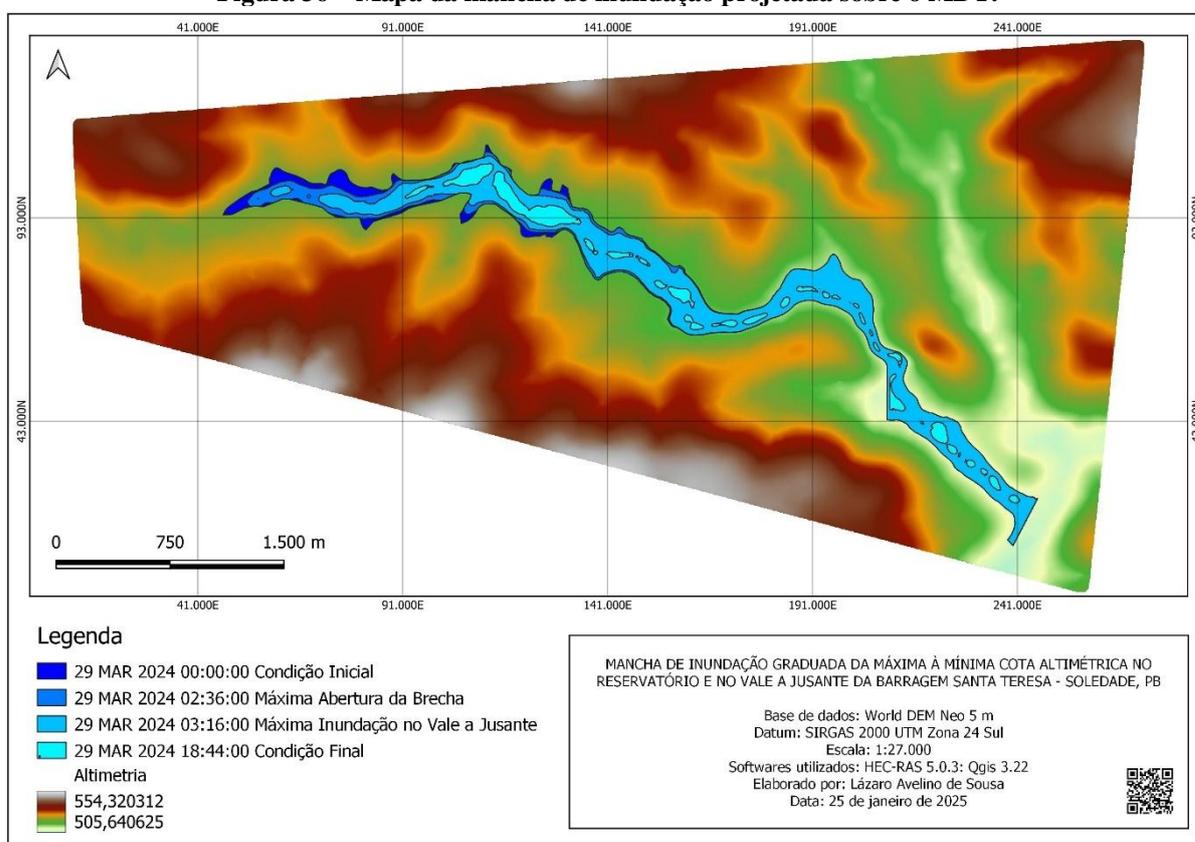
Fonte: Autoria própria (2024). *No quadro em destaque, aponta-se a localização e a distância da pequena barragem em relação a barragem Santa Teresa.

Complementando o cenário de ruptura, considerou-se para o início do *piping* a situação hipotética em que o volume da barragem estivesse acima de sua capacidade máxima de armazenamento (6 milhões de m³), transbordando uma vazão de 20 m³/s no vertedouro de superfície, sendo tal situação verificada às zero horas do dia 29 de março de 2024.

Nessas condições, com todas as especificações de entrada definidas no tópico Material e Métodos, o HEC-RAS retornou um modelo hidrodinâmico em que os resultados possibilitaram a análise do impacto de rompimento da barragem no vale a jusante a partir de informações como: tempo de chegada da onda de ruptura; nível máximo de água; tempo até que se atinja este nível máximo; profundidade e velocidade da onda de cheia; duração da inundação, entre outras.

A mancha de inundação resultante da modelagem hidrodinâmica está representada em quatro estágios na Figura 36, onde se verifica que a abertura máxima da brecha de ruptura ocorreu duas horas e 36 minutos após o início do *piping*, sendo que a máxima inundação no vale a jusante da barragem só ocorreu às três horas e 16 minutos do dia 29 de março de 2024.

Figura 36 – Mapa da mancha de inundação projetada sobre o MDT.

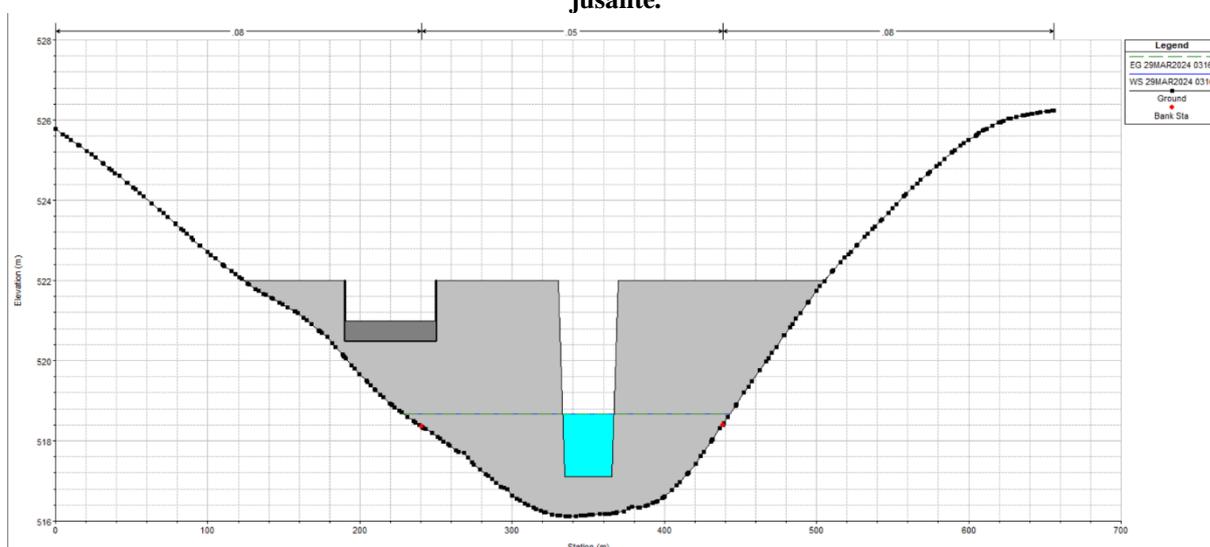


Fonte: Autoria própria a partir dos dados de saída do HEC-RAS (2025)

Para a análise do impacto de rompimento da barragem, considerou-se apenas a máxima elevação da mancha de inundação no vale a jusante, ou seja, a elevação da superfície da água às três horas e 16 minutos, uma vez que seu alcance atingiu as maiores profundidades e áreas de inundação.

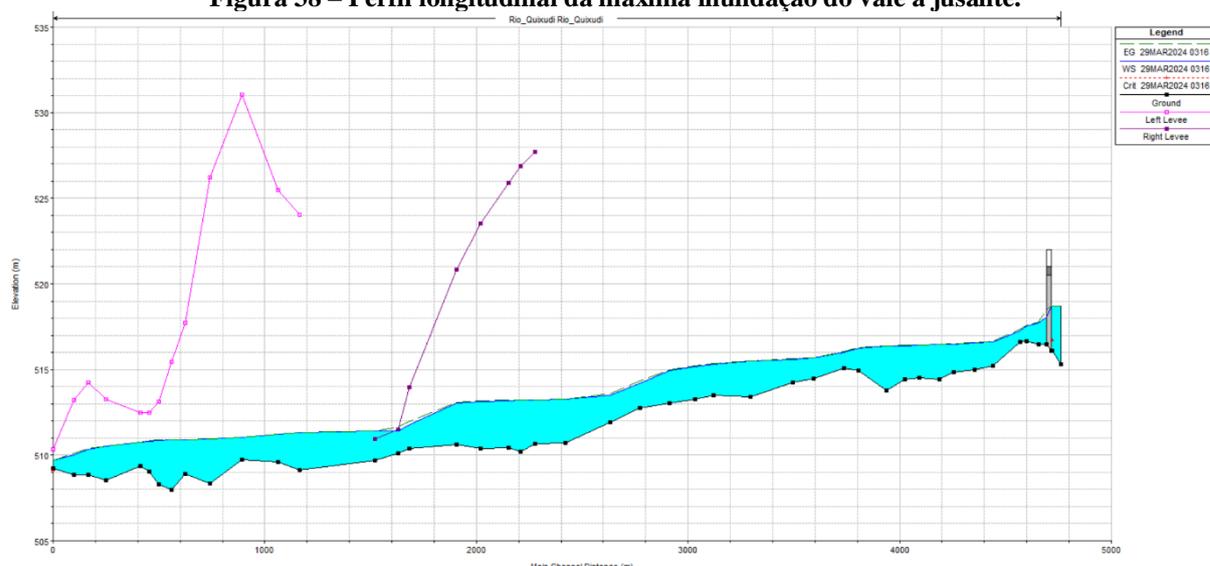
As Figuras 37 e 38 mostram os perfis latitudinal da barragem e longitudinal do canal no momento da máxima inundação do vale a jusante. Verifica-se que o nível da água no reservatório neste momento atinge a cota 518,68 m, tendo caído 2,66 m desde o início do *piping*.

Figura 37 – Perfil latitudinal da estrutura da barragem no momento da máxima inundação do vale a jusante.



Fonte: Dados de saída do HEC-RAS (2025)

Figura 38 – Perfil longitudinal da máxima inundação do vale a jusante.



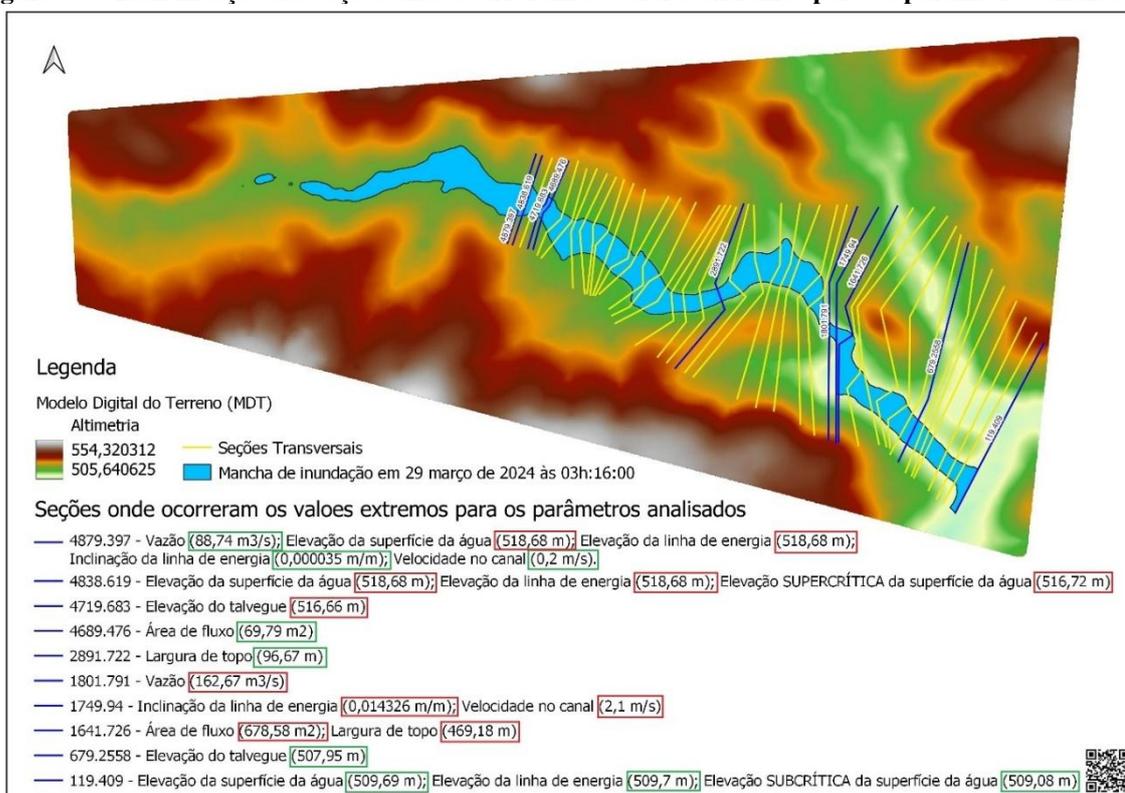
Fonte: Dados de saída do HEC-RAS (2025)

No perfil longitudinal da Figura 38, cada ponto de elevação do talvegue corresponde a uma seção transversal, sendo que a inclinação total do talvegue registrou 7,28 m de altitude, e a distância horizontal entre os extremos do canal mediu 4,76 km. As linhas verticais nas cores rosa e roxa representam as *levees*, que contemplam 13 seções na margem esquerda e 8 seções na margem direita. Vale salientar que, para melhorar o aspecto visual da representação dos perfis, o HEC-RAS mostra os gráficos de resultados exagerados no eixo y.

Para cada seção transversal o HEC-RAS calculou parâmetros como vazão, elevação do talvegue, elevação da superfície da água, elevação e inclinação da linha de energia, velocidade e área de fluxo, largura de topo da onda de cheia, entre outros. Para cada quatro minutos decorridos no tempo, os valores desses parâmetros foram atualizados em cada seção, resultando num grande número de informações.

Para este trabalho, extraiu-se apenas os valores máximos e mínimos ocorridos no momento da máxima inundação no vale a jusante. Na Figura 39, as seções transversais numeradas e em cor azul são as seções onde ocorreram os valores extremos. Os valores destacados com um retângulo verde na legenda da figura são os valores mínimos, enquanto os destacados em vermelho representam os valores máximos para cada parâmetro.

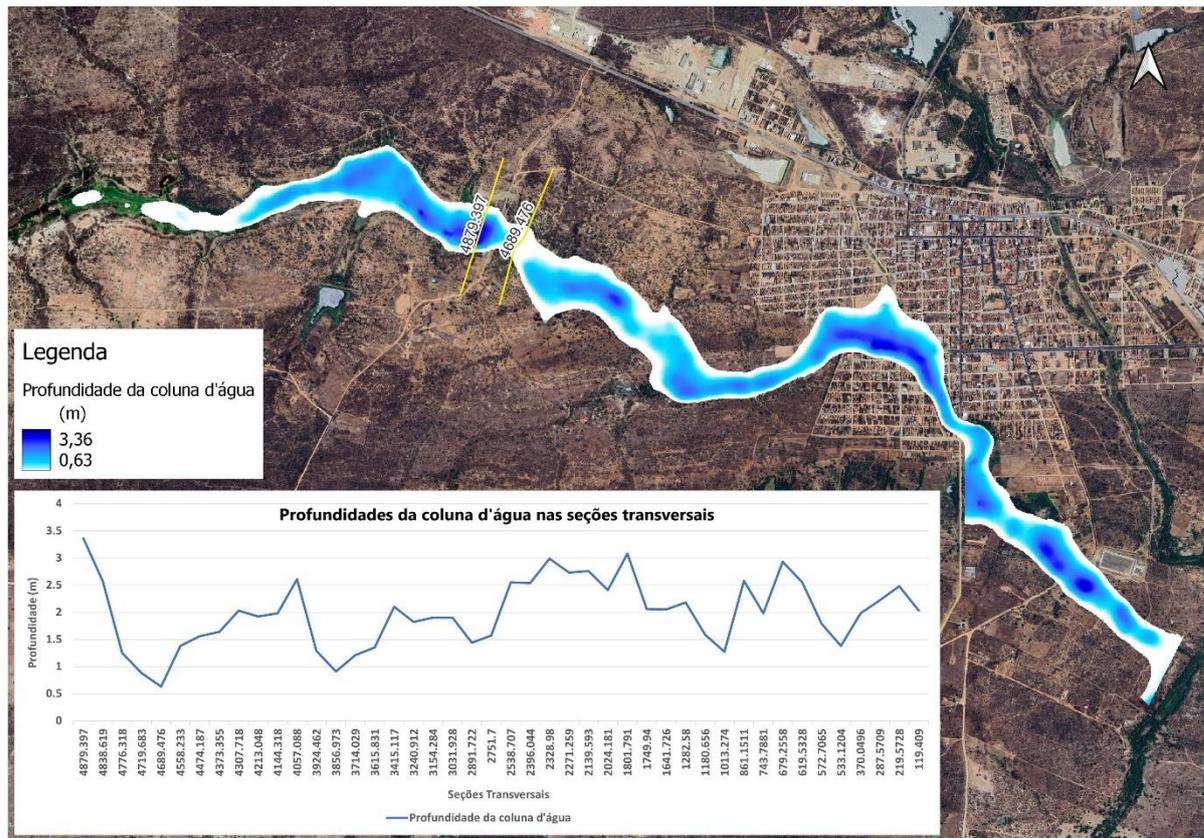
Figura 39 – Identificação das seções onde ocorreram os valores extremos para os parâmetros analisados.



Fonte: Autoria própria (2025)

Projetando-se a mancha de inundação sobre a imagem do *Google Satélite*, é possível ver seu alcance e profundidade da coluna d'água nos trechos de área urbana e rural do município de Soledade. A Figura 40 ilustra o gradiente da profundidade da mancha de inundação, com destaque para as seções transversais onde ocorreram os valores máximo e mínimo, e com o gráfico dos valores de profundidade em todas as seções.

Figura 40 – Alcance e profundidade da mancha de máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa, ocorrida 3 horas e 16 minutos após o início do *piping*.



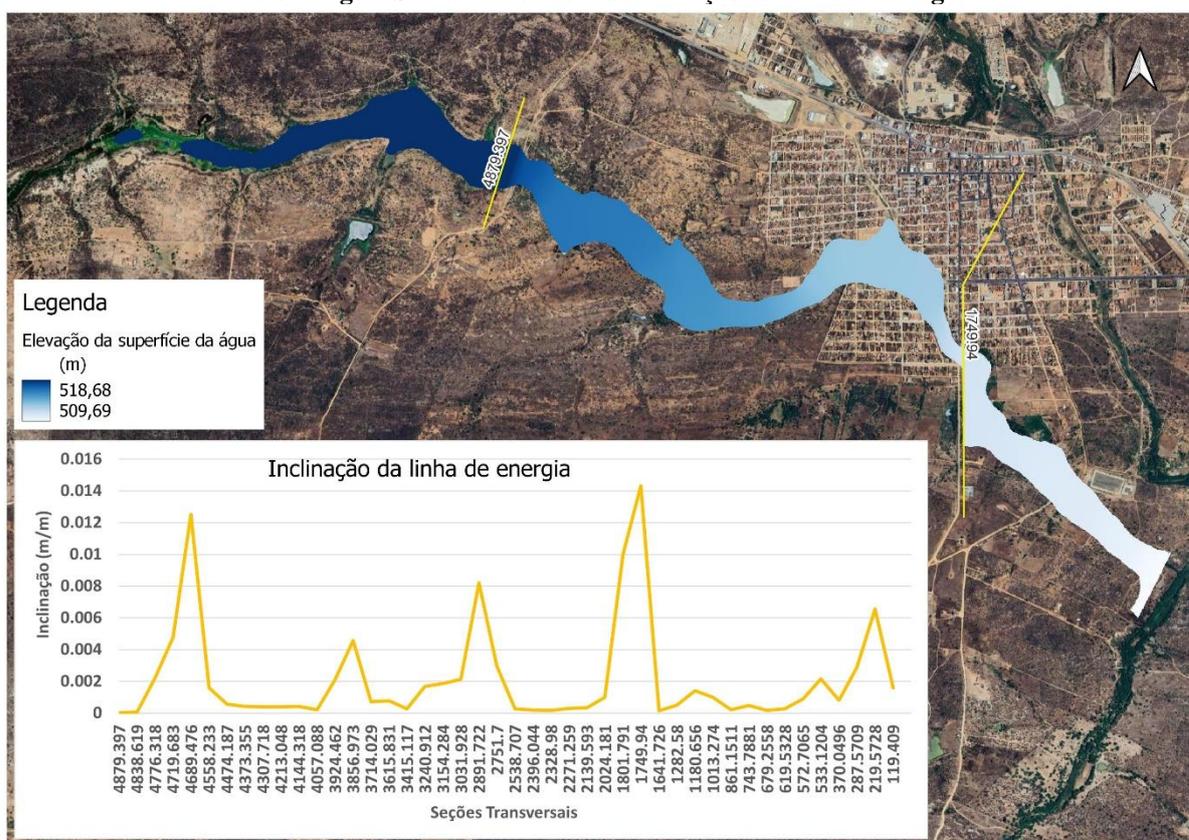
Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* e em gráfico do *Excel* (2025)

Com uma área total de 1,009 km², e volume de 1.027.950 m³, a mancha de máxima inundação simulada no vale a jusante da barragem Santa Teresa registrou profundidade máxima na coluna d'água igual a 3,36 m na seção de número 4879.397 — localizada no reservatório — e profundidade mínima igual a 0,63 m na seção de número 4689.476 — segunda seção a jusante da barragem. Nestes trechos, a elevação da superfície da água atingiu as cotas de 518,68 m e 517,26 m, respectivamente. Já a elevação da linha de energia preservou o mesmo valor de elevação da superfície da água na seção localizada no reservatório, enquanto na segunda seção de jusante esse parâmetro registrou uma queda de 1,31 m, descendo para a cota 517,37 m. A

descida da água do reservatório até os níveis mais baixos do vale a jusante resultou numa inclinação da linha de energia que variou entre 0,000035 m/m e 0,014326 m/m.

A variação total da elevação da superfície da água ao longo da mancha de máxima inundação está representada em gradiente na Figura 41, onde se destacam as seções que registraram os valores máximo e mínimo de inclinação da linha de energia, além do gráfico geral de inclinação para cada seção.

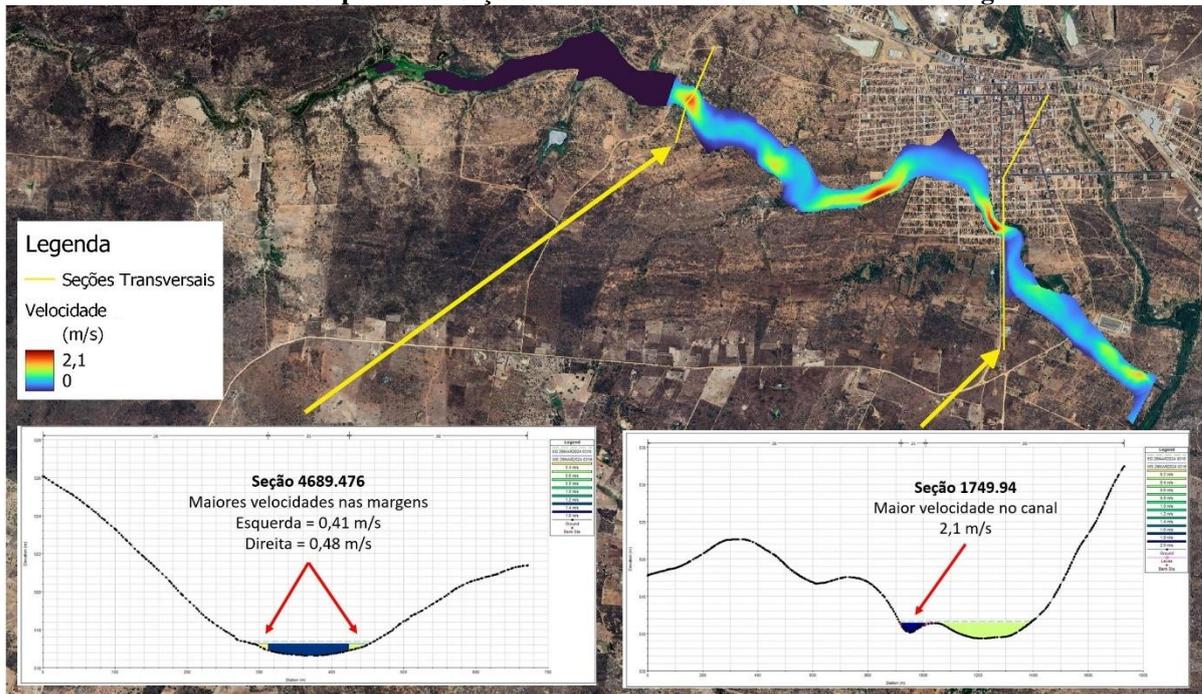
Figura 41 – Gradiente da elevação da superfície da água durante a máxima inundação do vale a jusante da barragem Santa Teresa com a inclinação da linha de energia.



Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* e em gráfico do *Excel* (2025)

A maior inclinação da linha de energia resultou na maior velocidade de escoamento no canal, que registrou 2,1 m/s. O gradiente de velocidade da onda de cheia está representado na Figura 42, onde se vê os perfis das seções onde ocorreram as maiores velocidades no canal e nas margens e seus respectivos valores.

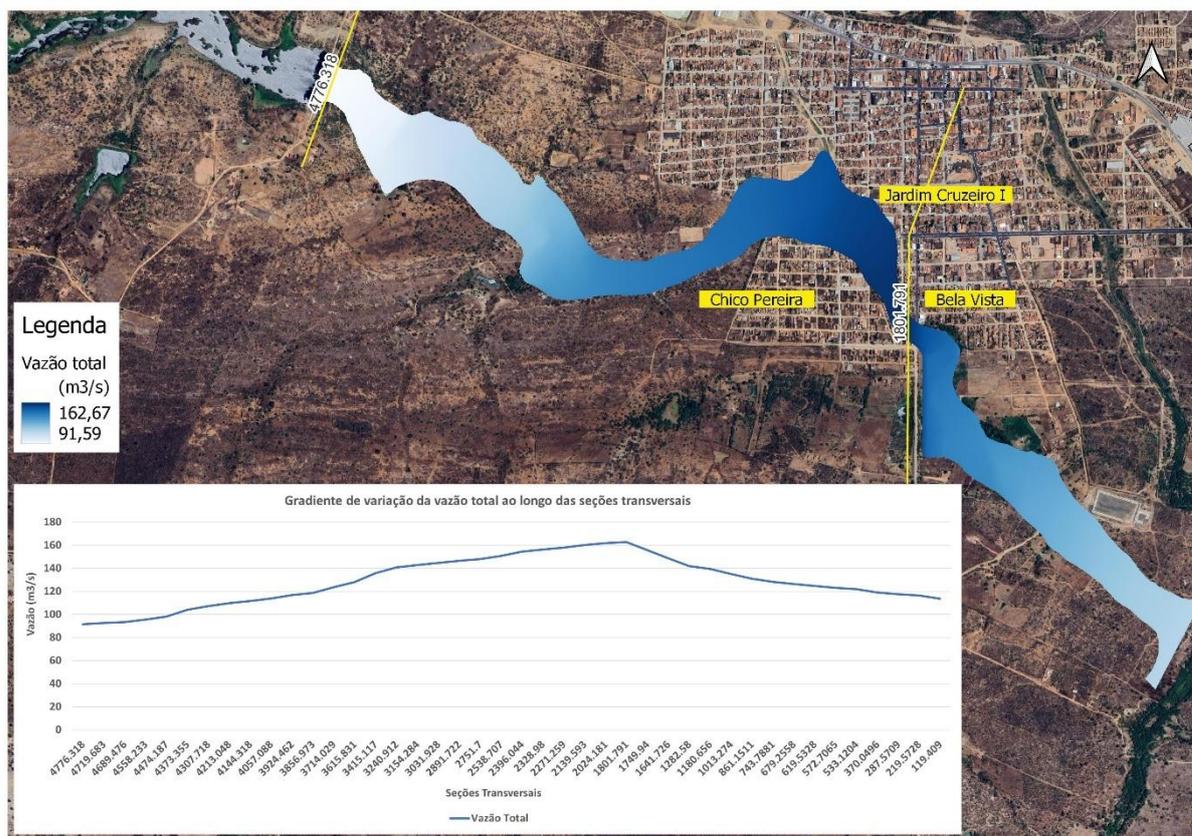
Figura 42 – Gradiente da velocidade durante a máxima inundação do vale a jusante da barragem Santa Teresa com os perfis das se es de valores máximos no canal e nas margens.



Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* (2025)

Quanto aos dados de vazão, os valores variaram entre 91,59 m³/s e 162,67 m³/s entre as se es de número 4776.318 e 1801.791. O gradiente de vazão total ao longo da mancha de inunda o está representado na Figura 43, com a indica o das se es onde ocorreram os valores máximo e mínimo e o gráfico com os valores de vazão para cada se o. Percebe-se que o trecho de maior vazão corresponde ao perímetro urbano do município de Soledade, entre os bairros Chico Pereira — na margem direita — Jardim Cruzeiro I e Bela Vista — na margem esquerda do fluxo.

Figura 43 – Gradiente de variação da vazão durante a máxima inundação do vale a jusante da barragem Santa Teresa com o gráfico de valores para cada seção.

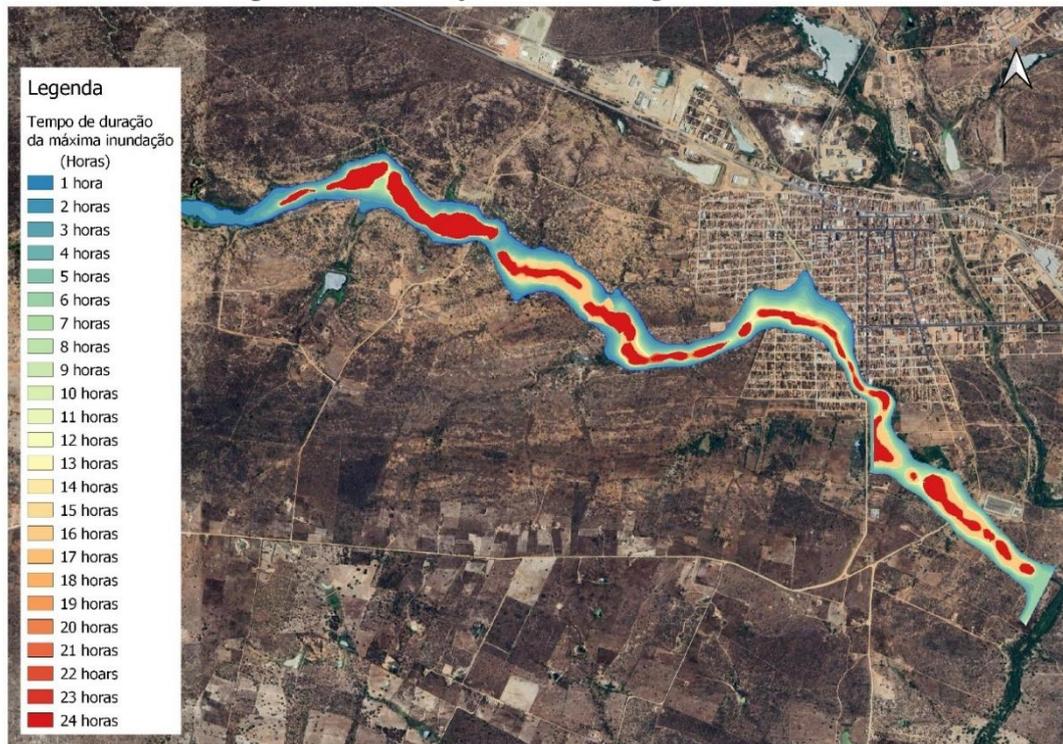


Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* e em gráfico do *Excel* (2025)

O tempo total da passagem da onda de cheia pelo vale a jusante da barragem Santa Teresa perdurou das zero horas até às 18 horas e 44 minutos do dia 29 de março de 2024, sendo que a máxima inundação no vale a jusante teve início às três horas e 16 minutos e perdurou até às 13 horas e oito minutos, quando retornou à calha natural do rio. Assim, o tempo de duração da máxima inundação registrou nove horas, 55 minutos e 12 segundos. O gradiente do tempo de duração da inundação a partir do nível máximo atingido no vale a jusante está representado em horas na Figura 44. Os pontos do vale a jusante que permaneceram com água após às 18 horas e 44 minutos representam as menores elevações do talvegue, onde ficaram retidas partes da água da inundação após a passagem da onda de cheia. No reservatório, o volume de água restante representa os valores críticos para a elevação da superfície da água e da linha de energia, bem como para profundidade da coluna d'água.

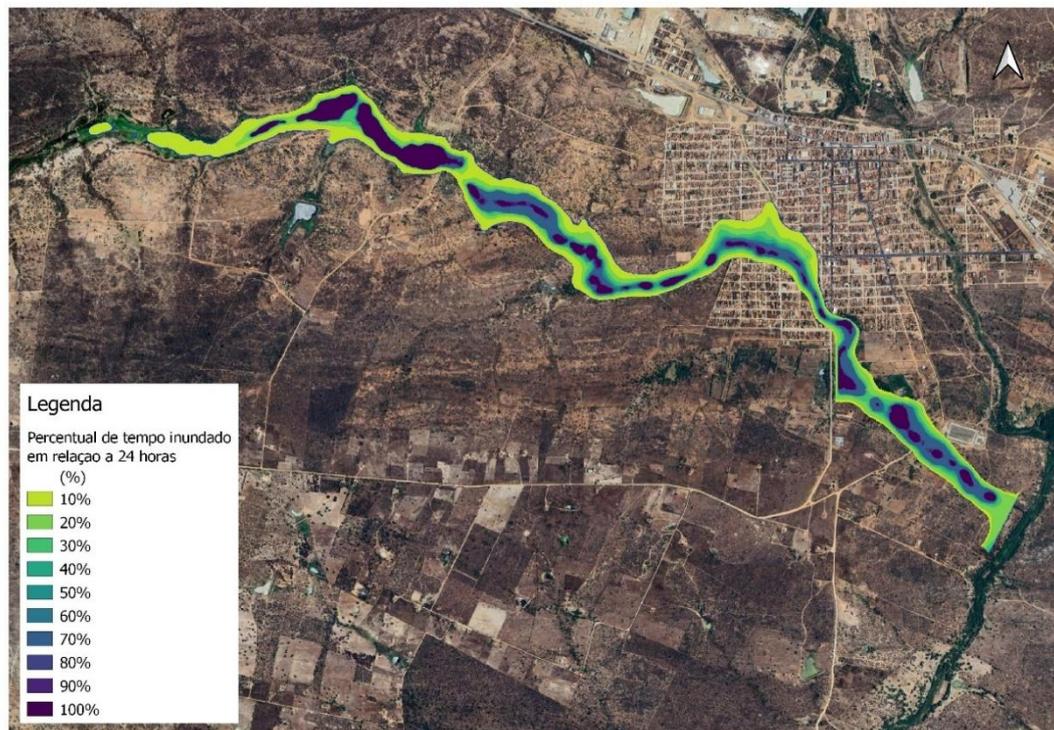
A duração da inundação também foi computada em percentual de tempo inundado em relação ao tempo total de 24 horas. O resultado está expresso no gradiente da Figura 45, onde se observa que o espalhamento da mancha de inundação para além dos limites da calha do rio perdurou por cerca de 70% a 80% do tempo total da inundação.

Figura 44 – Gradiente do tempo de duração da passagem da onda de cheia a partir da máxima inundação registrada no vale a jusante da barragem Santa Teresa



Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* (2025)

Figura 45 – Gradiente do percentual de tempo inundado durante a passagem da onda de cheia no vale a jusante da barragem Santa Teresa



Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* (2025)

Além desses parâmetros, o HEC-HAS também retornou para cada seção transversal o número de Froude. Este número é um parâmetro adimensional amplamente utilizado na engenharia hidráulica e na mecânica dos fluidos para caracterizar o regime de fluxo de um fluido em canais abertos. Ele representa a relação entre a inércia do fluxo e a gravidade que atua sobre ele. Quando o número de Froude é menor que 1, o fluxo é considerado subcrítico e as perturbações na superfície da água podem se propagar rio acima. Ou seja, nesse regime de escoamento, a celeridade — que é velocidade de propagação da onda de perturbação em relação a própria água — é maior que a velocidade do rio, por isso a onda de perturbação também se propaga a montante. Quando o número de Froude é igual a 1, o fluxo está em um estado crítico, onde a velocidade do fluxo é igual à velocidade das ondas de perturbação, ou seja, a celeridade é igual a velocidade do rio. Nesse caso, ocorre uma onda estacionária no ponto de perturbação da superfície. Já se o número de Froude é maior que 1, o fluxo é dominado pela inércia (fluxo supercrítico), e as perturbações na superfície não conseguem se propagar rio acima. A Figura 46 ilustra as perturbações de superfície analisadas a partir do número de Froude, demonstrando a propagação da onda de perturbação provocada pelo lançamento de um tijolo no rio, nos regimes de escoamento subcrítico, crítico e supercrítico.

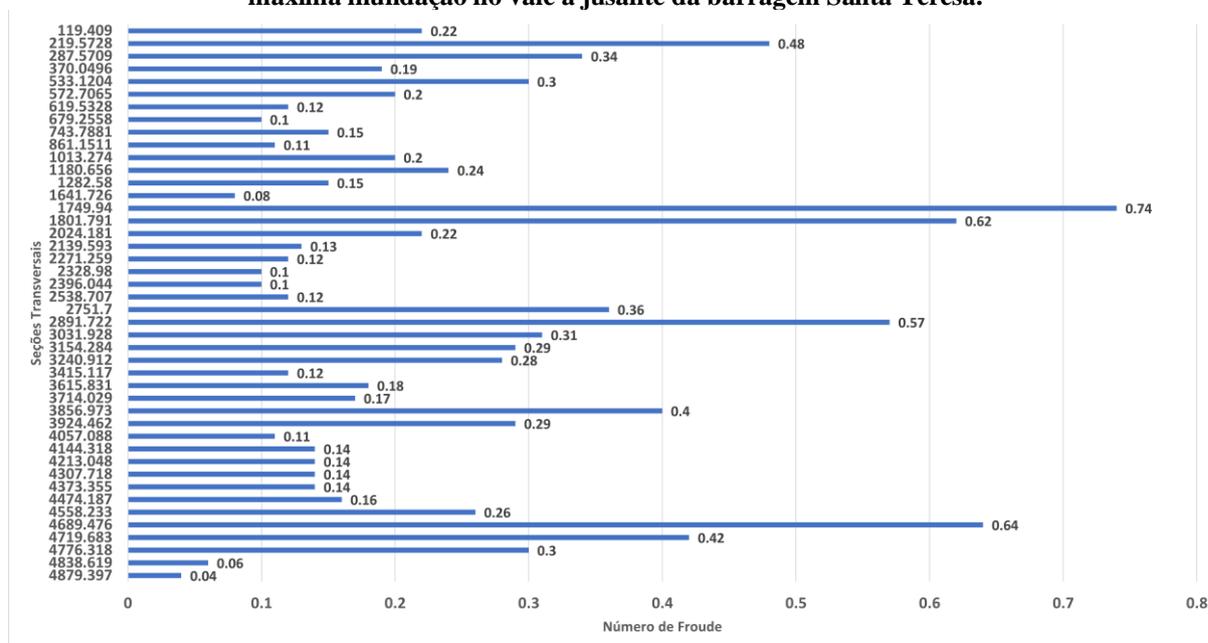
Figura 46 – Ilustração da propagação da onda de perturbação da superfície nos regimes de escoamento subcrítico, crítico e supercrítico



Fonte: Gerado por inteligência artificial (2025). Legenda: A) Fluxo normal do rio antes da perturbação pelo lançamento do tijolo; B) Propagação da onda de perturbação no regime subcrítico, onde a celeridade da onda é maior que a velocidade do rio, propagando-se tanto para montante quanto para jusante; C) Propagação da onda de perturbação no regime crítico, onde a celeridade é igual a velocidade do rio, ocorrendo uma onda estacionária apenas no ponto de perturbação; D) Propagação da onda de perturbação no regime supercrítico, onde a celeridade é menor que a velocidade do rio, ocorrendo propagação somente para jusante.

No caso em tela, o número de Froude calculado para o rio Quixudi não ultrapassou 0.74, significando um fluxo lento ou subcrítico (Figura 47).

Figura 47 – Gráfico do Número de Froude registrado ao longo das seções transversais no momento da máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa.

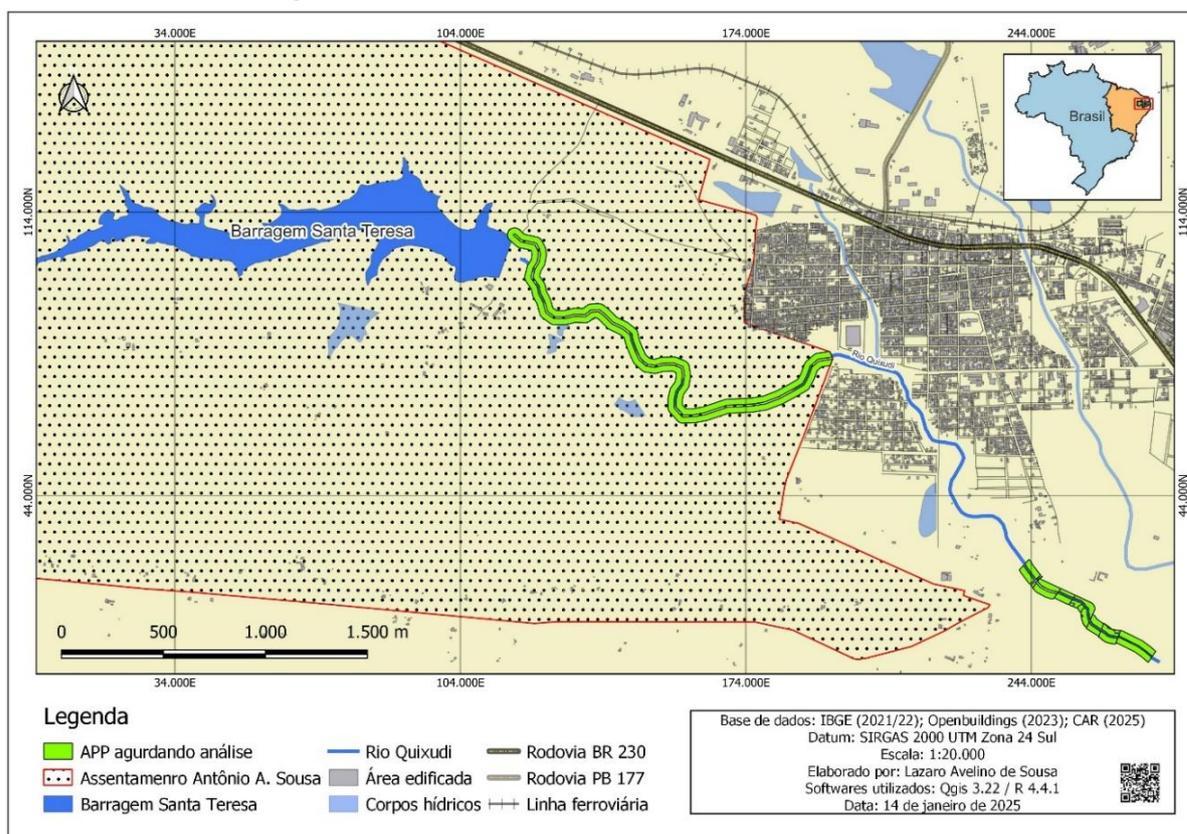


Fonte: Autoria própria (2025)

4.4 Impactos da onda de cheia no vale a jusante da barragem Santa Teresa

Como visto, o rio Quixudi, ao ultrapassar os limites do assentamento rural em que se encontra a barragem Santa Teresa, permeia um trecho do perímetro urbano do município de Soledade, antes de continuar seu curso até a confluência com o rio Soledade. Os trechos de rio que estão fora do perímetro urbano são considerados pelo Cadastro Ambiental Rural (CAR, 2025) como áreas de Preserva o Permanente (APP) aguardando análise (Figura 48). Porém, como se trata de um curso d'água ef mero, o Código Florestal Brasileiro — lei federal que regulamenta a demarca o de faixas de APP — desobriga sua demarca o, pois, em seu Artigo 4 , inciso I, exclui os cursos d'água efêmeros da demarca o de APP.

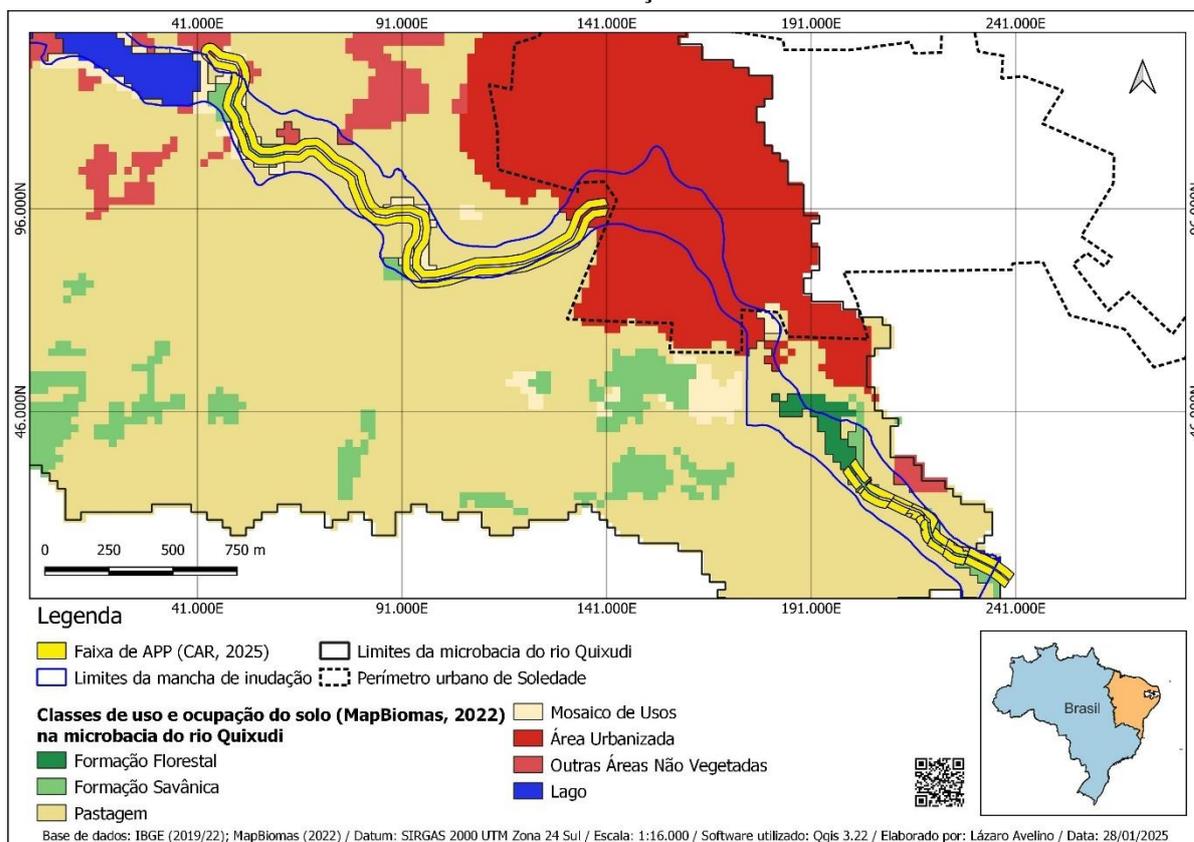
Figura 48 – Mapa de localização das Áreas de Preservação Permanente aguardando análise no curso do rio Quixudi de acordo com o Cadastro Ambiental Rural (CAR)



Fonte: Autoria própria (2025)

Sem garantia legal de preservação, ou aguardando por análise, de qualquer forma essas faixas marginais do rio Quixudi têm sua importância na análise das cheias e inundações no local. A ocupação dessas faixas essencialmente por pastagens, conforme mapeamento do projeto MapBiomas (2022), prejudica a preservação das matas ciliares, acelerando os processos erosivos, e resultando no assoreamento dos trechos de rio. Como consequência do assoreamento, a cota de superfície da água aumenta, potencializando as inundações. O mapa da Figura 49 mostra o alcance da mancha de inundação ultrapassando os limites das pretendidas Áreas de Preservação Permanente do rio Quixudi, ambas dominadas por pastagens.

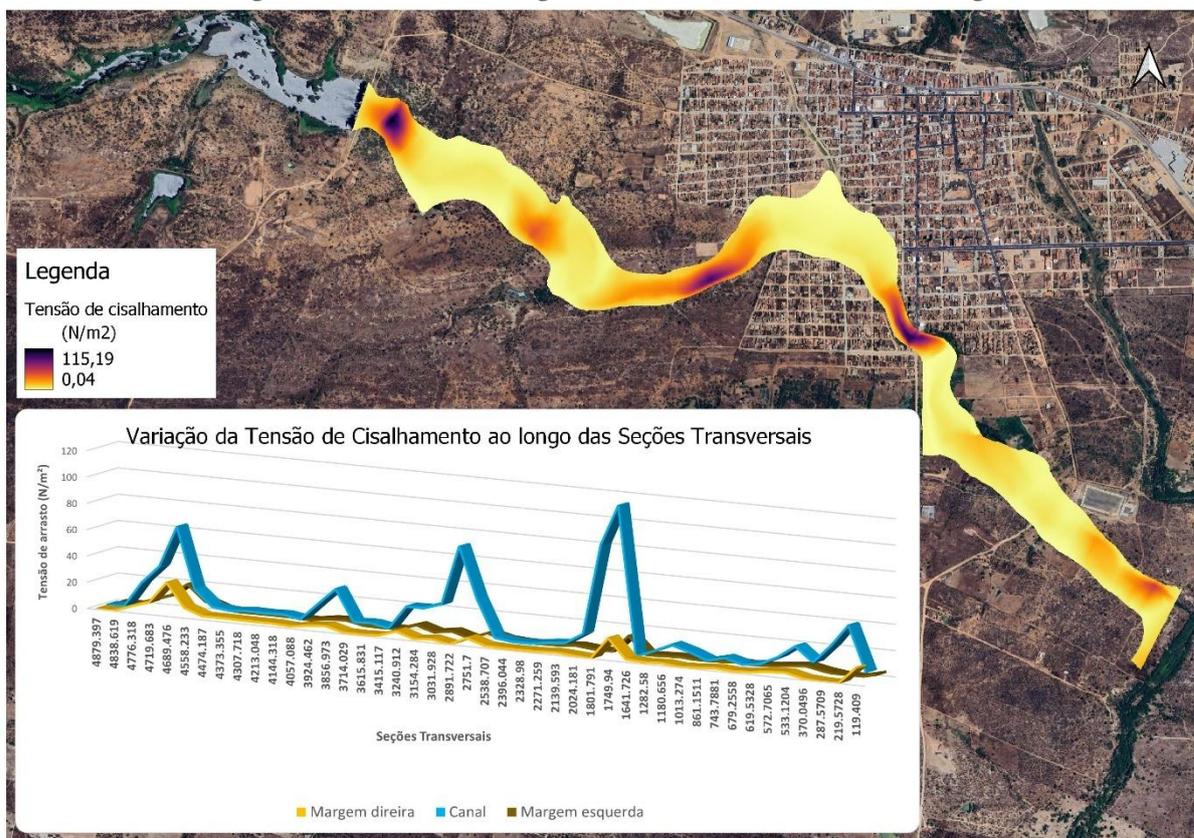
Figura 49 – Mapa de uso e ocupação do solo nas faixas de APP do rio Quixudi com os limites da mancha de inundação.



Fonte: Autoria própria (2025)

O efeito erosivo da passagem da onda de cheia pelo canal fluvial também é analisado pelo modelo HEC-RAS através do cômputo da tensão de cisalhamento, ou tensão de arrasto. Este parâmetro representa a força por unidade de área, atuando tangencialmente à superfície da água, necessária para que se inicie um processo de erosão no canal. Tal força erosiva da água se manifesta tanto no eixo central do rio quanto nas margens, daí a importância da preservação da mata ciliar e da demarcação de faixas de APP, condições essas, ausentes no rio Quixudi. A Figura 48 mostra o gradiente da tensão de arrasto expresso em Newtons por metro quadrado (N/m^2) no momento da máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa. Percebe-se que os trechos do rio com os maiores valores para a tensão de arrasto coincidem com os trechos onde a velocidade — apresentada no gradiente da Figura 42 do tópico anterior — também foi maior. Isto ocorre porque a força erosiva da corrente fluvial deriva da velocidade do fluxo. O gráfico que acompanha o gradiente da tensão de cisalhamento na Figura 50 distingue os valores de tensão registrados no canal do rio e nas suas margens esquerda e direita.

Figura 50 – Gradiente da tensão de arrasto no momento da máxima inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa com o gráfico dos valores no canal e nas margens.



Fonte: Dados de saída do HEC-RAS plotados sobre a imagem do *Google Satélite* no *Ras Mapper* e em gráfico do *Excel* (2025)

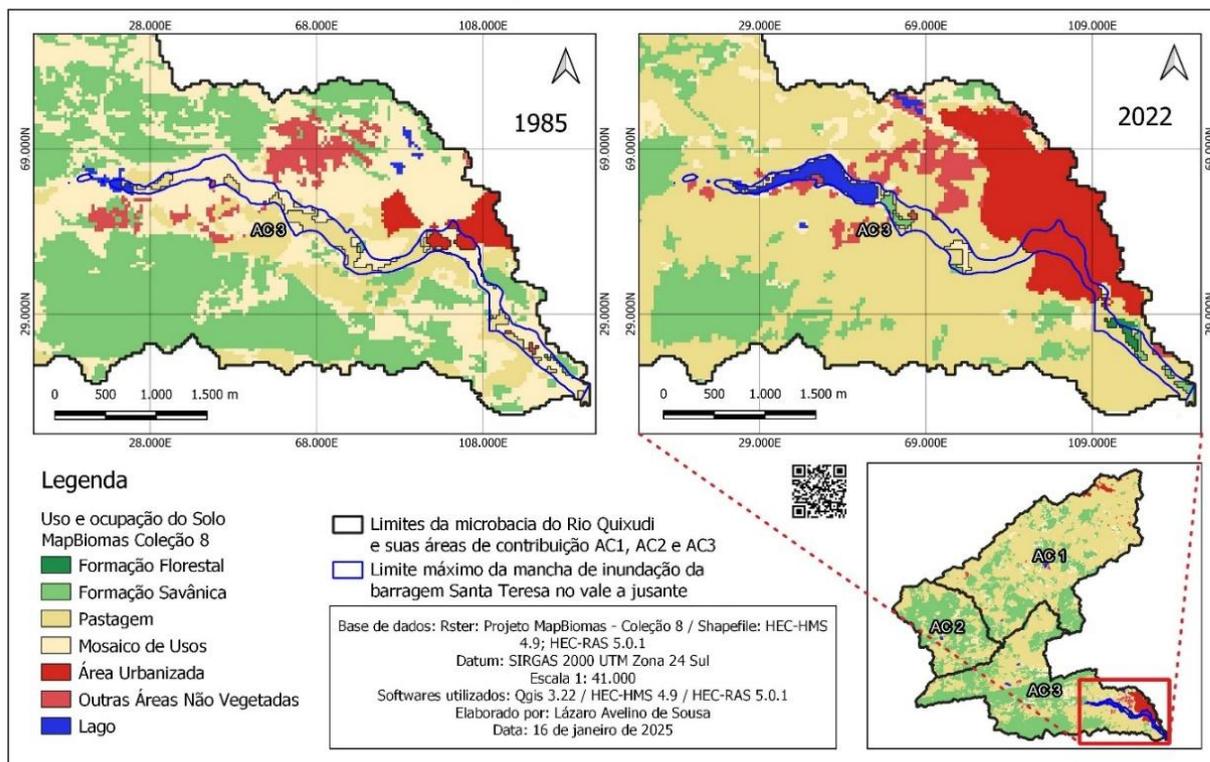
No canal fluvial, os valores da tensão de arrasto variaram entre 0,74 N/m² e 115,19 N/m². Na margem direita, a maior tensão registrou 25,52 N/m², enquanto que na margem esquerda o maior valor foi de 19,66 N/m². Ao longo de todas as seções transversais, a tensão de arrasto se manifestou ligeiramente maior na margem direita do rio em relação à margem esquerda. Desta forma, a margem direita sofre mais o efeito erosivo da tensão de arrasto, principalmente nos trechos onde o rio faz curvas.

Para além das áreas de Pastagem, nos trechos rurais do percurso do rio, a onda de cheia afetou outras formas de uso e ocupação do solo, conforme ilustra a Figura 51.

A classificação mais antiga do projeto MapBiomás (de 1985), coincide com o ano em que a barragem Santa Teresa rompeu de fato pela primeira vez e, por isso, foi utilizada para comparar com a classificação mais recente (de 2022) no intuito de verificar as mudanças ocorridas nas formas de uso e ocupação do solo ao longo do vale a jusante da barragem nesse período de 37 anos. Vale salientar que o rompimento ocorrido em 1985 se deu por galgamento, quando a cota de crista da barragem foi superada pelo excesso de água, fazendo com que a estrutura do barramento não suportasse a pressão da água e descesse rio a baixo. Nesse

processo, a onda de cheia é mais volumosa e devastadora do que a onda proveniente do *piping*, que é controlada pela abertura gradual da brecha, de acordo com a erosão do material do barramento.

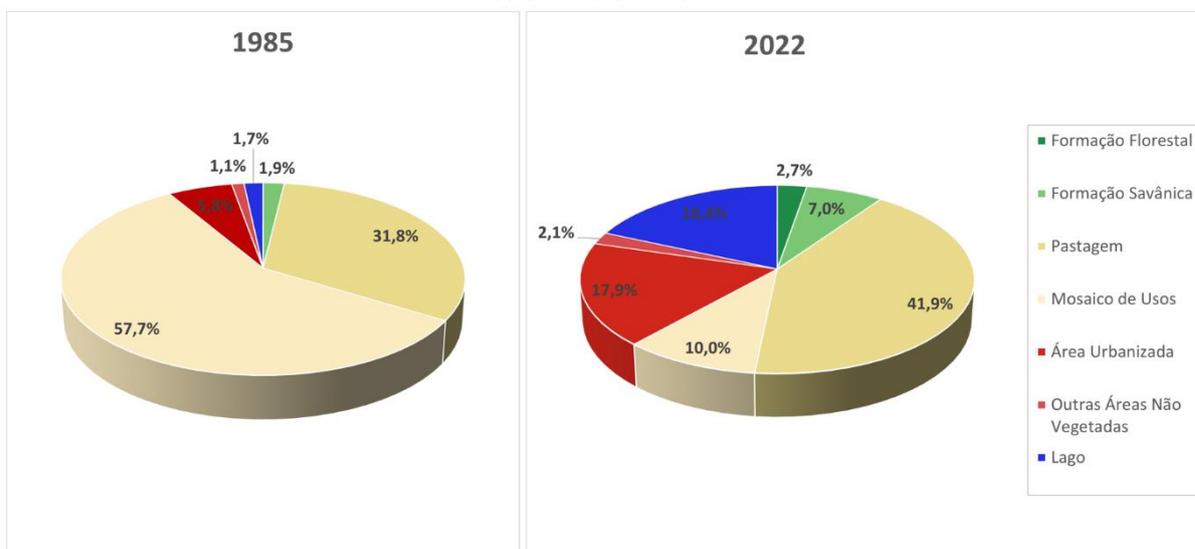
Figura 51 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas afetadas pela mancha de inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa em 1985 e 2022.



Fonte: Autoria própria (2025)

O gráfico da Figura 52 mostra o percentual de área afetada para cada classe de uso e ocupação do solo representada nos mapas da Figura 51. Nota-se que os maiores percentuais da área inundada em 1985 correspondiam às classes Mosaico de Usos, Pastagem e Área Urbanizada. Estas mesmas classes continuam entre as mais expressivas no ano de 2022, com algumas diferenças de percentual.

Figura 52 – Percentual de área afetada pela mancha de inundação para cada classe de uso e ocupação do solo em 1985 e 2022.



Fonte: Autoria própria (2025)

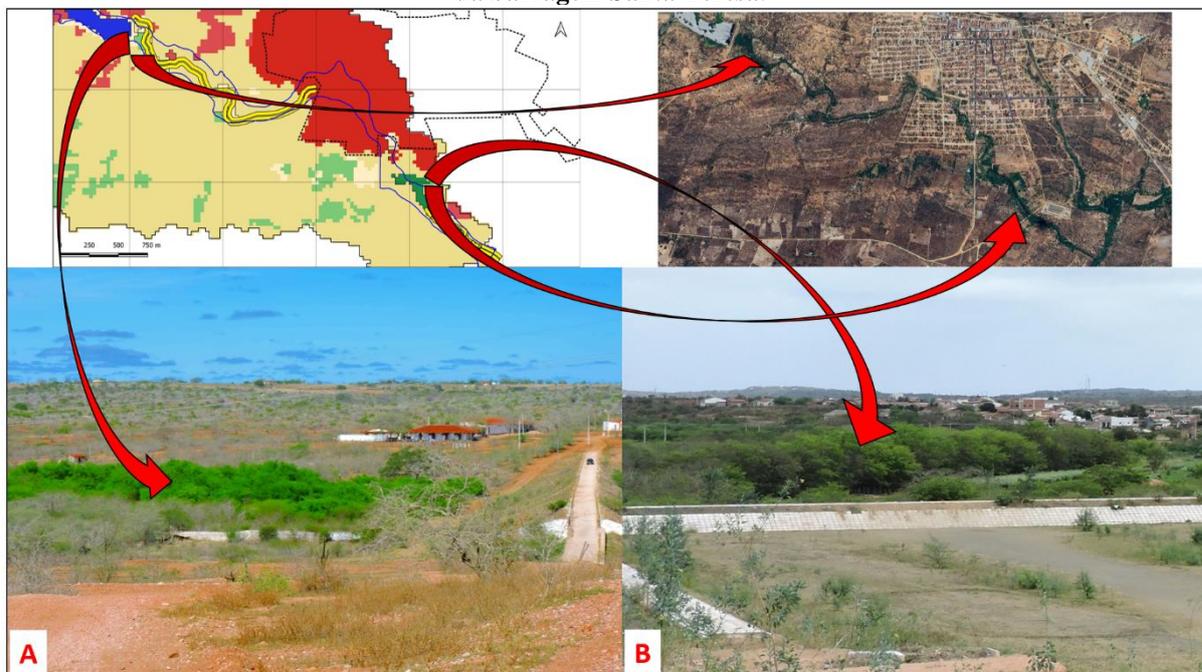
A diferença mais expressiva diz respeito à classe Mosaico de Usos que, segundo a definição do projeto MapBiomass, representa áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Como visto nos mapas da Figura 51, a grande diferença verificada nesta classe, em relação aos dois anos analisados, diz respeito ao reservatório da barragem. Enquanto a classificação de 1985 não distinguia o uso e ocupação desta área entre pastagem e agricultura, na classificação de 2022 a mesma área confirma-se como sendo lago, representando indubitavelmente o reservatório da barragem. Isto leva a crer que a imagem de satélite que deu origem a classificação de 1985 foi captada após o rompimento de fato da barragem, visto que tal evento ocorreu naquele mesmo ano, e não se sabe a data precisa.

Nos trechos fora do perímetro urbano a mancha de inundação também atingiu classes de uso e ocupação definidas como Formação Florestal e Formação Savânica. Segundo a definição do projeto MapBiomass, a principal diferença verificada entre essas classes é que, na primeira, predomina tipos de vegetação com dossel contínuo, enquanto na segunda o predomínio é de dossel semicontínuo. As visitas de campo constataram que essa vegetação assim classificada se trata de Algaroba (*Prosopis juliflora*) aglomerada em manchas de diferentes tamanhos e densidades, conforme ilustra a Figura 53. A presença dessa vegetação no canal e nas margens do rio pode alterar o Coeficiente de Manning, aumentando a resistência ao escoamento e elevando o nível da mancha de inundação.

Vale salientar que a proliferação de Algarobas ao longo do rio Quixudi é de certa forma controlada pela atuação dos lenhadores, que fazem o corte das árvores quando estas atingem

suas maiores espessuras de tronco. Portanto, não se trata de uma vegetação permanente no caminho das águas.

Figura 53 – Aglomeração de Algaroba (*Prosopis juliflora*) nas margens do rio Quixudi no trecho a jusante da barragem Santa Teresa.

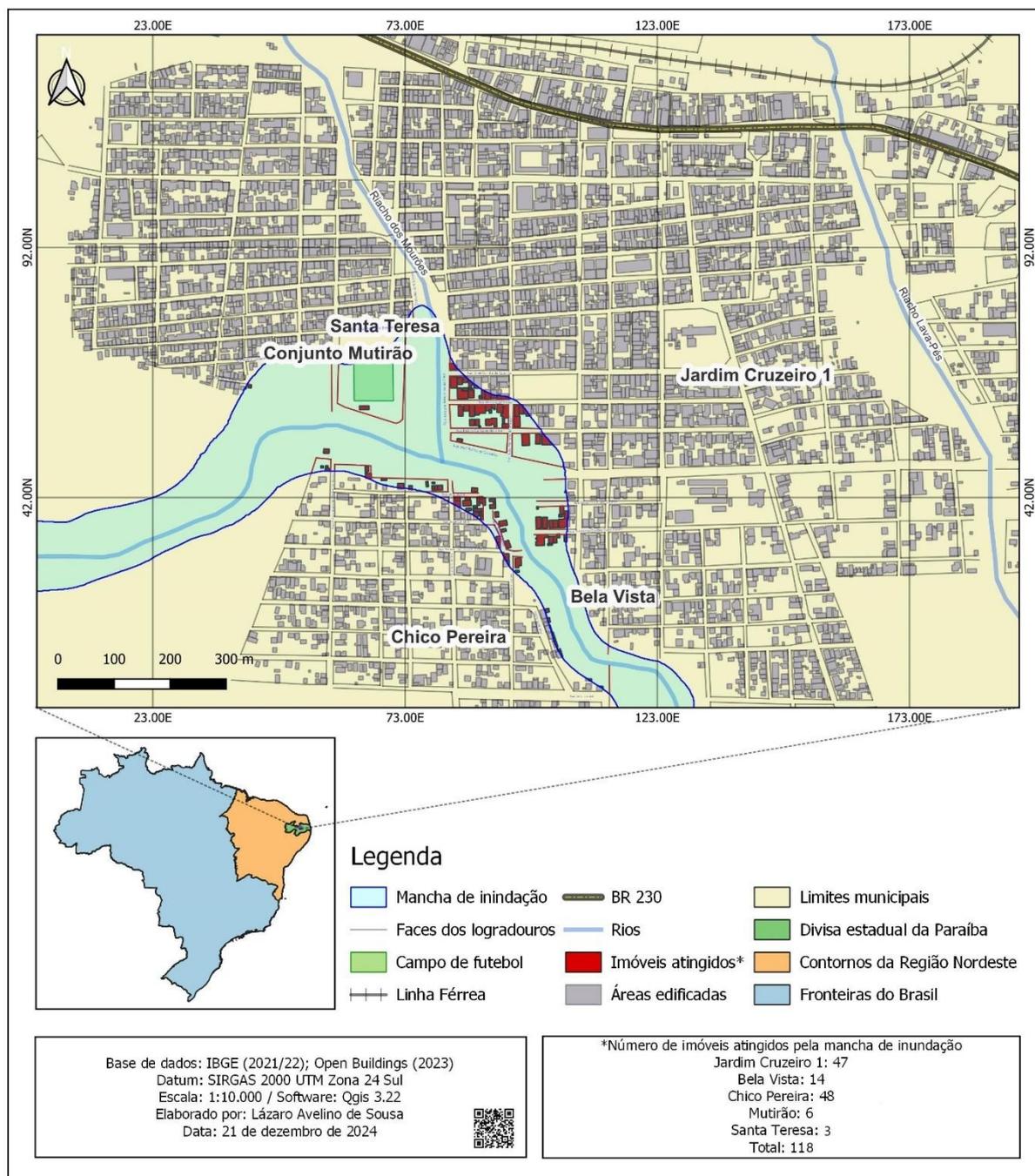


Fonte: Autoria própria (2021/24). Legenda: A) Aglomeração de Algaroba (*Prosopis juliflora*) próxima ao talude de jusante da barragem Santa Teresa. B) Aglomeração da mesma espécie próxima ao exutório do rio Quixudi.

Outra classe de uso e ocupação da superfície atingida pela mancha de inundação foi a Área Urbanizada. Entre os anos de 1985 e 2022 a área afetada pela mancha de inundação sobre essa classe cresceu 12,1 pontos percentuais. Para a classificação do MapBiomas, essa classe é formada por “áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura”.

Na área urbana do município de Soledade, a mancha de inundação atingiu o território de cinco bairros em diferentes proporções. O mapa da Figura 54 ilustra as áreas impactadas pela passagem da onda de cheia quando esta atingiu o seu máximo nível. As áreas edificadas atingidas estão destacadas em vermelho, revelando que estas são as áreas de impacto mais significativo dentre toda a abrangência da inundação, pois se trata de áreas habitadas. Por isso, a análise do risco e dano potencial associado à barragem também foi realizada neste trabalho de tese, e será apresentada no tópico seguinte.

Figura 54 – Mapeamento da mancha de inundação no perímetro urbano do município de Soledade com as áreas edificadas atingidas.



Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme se vê no mapa, os bairros com maior número de edificações atingidas foram os bairros Chico Pereira, na margem direita do rio (com 48 imóveis atingidos) e Jardim Cruzeiro I, na margem esquerda (com 47 imóveis). Em terceiro lugar está o bairro Bela Vista (com 14 imóveis afetados), também na margem esquerda do rio. Os bairros Conjunto Mutirão e Santa Teresa tiveram respectivamente 6 e 3 imóveis atingidos pela inundação. Ao todo, a mancha de

inundação atingiu 118 edificações, que juntas ocupam uma área de 10.606 m². A maior área afetada está no bairro jardim Cruzeiro I, que registrou 5.343 m². No bairro Chico Pereira, 3.213 m² de área edificada foi atingida pela inundação. Já no bairro da Bela Vista foram afetados 1.816 m², enquanto nos bairros Santa Teresa e Conjunto Mutirão as áreas atingidas registraram 125 m² e 108 m², respectivamente.

Vale salientar que a base de dados *Open Buildings*, utilizada para representar as áreas edificadas, não fornece polígonos cem por cento fidedignos com a área real das edificações, pois são dados captados para o mundo inteiro, e não contam com averiguação de campo. Portanto o mapeamento das edificações atingidas mostra apenas uma estimativa da realidade.

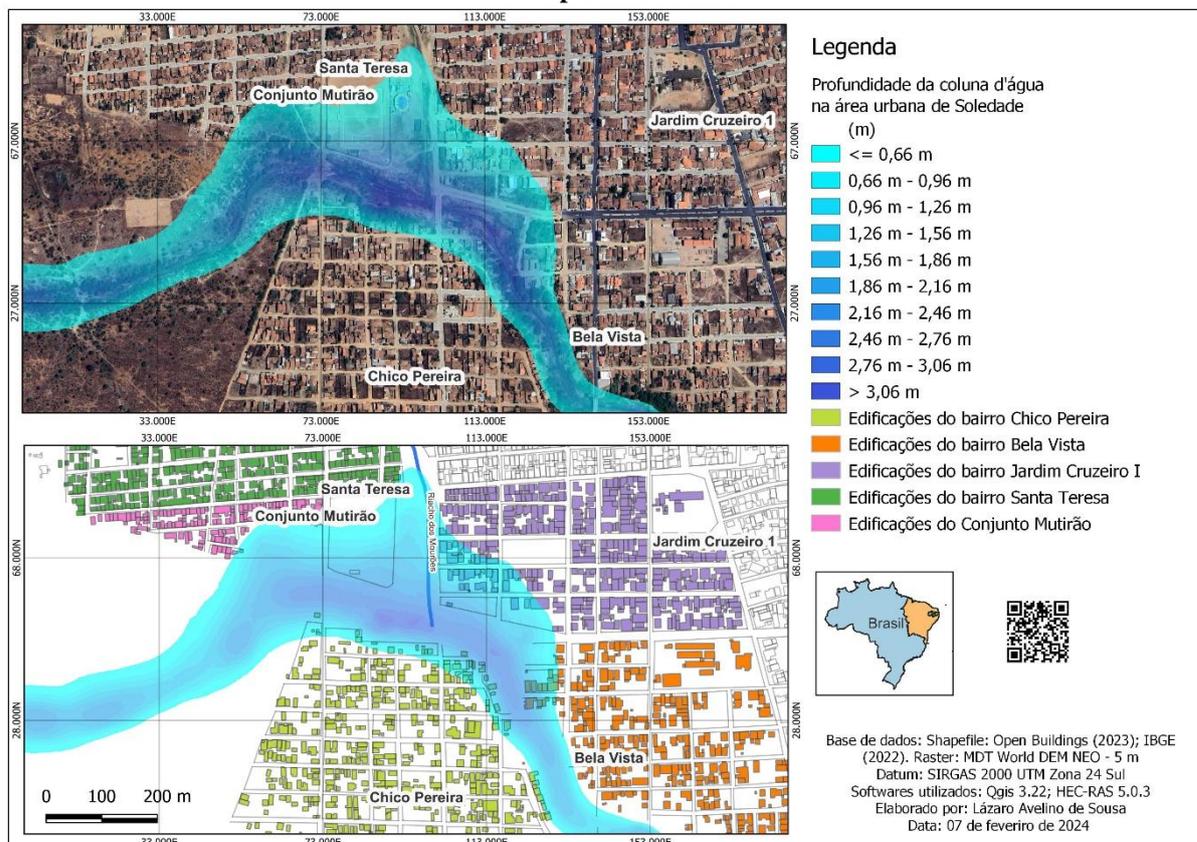
Contudo, a confiança desses dados vetoriais é expressa em um valor adimensional que representa o grau de certeza de que cada polígono enquadra de fato uma edificação. Este valor acompanha os atributos da camada vetorial e varia de 0 a 1, sendo que, quanto maior o valor, maior é a certeza de que o polígono enquadra uma edificação real. No caso em tela, a confiança registrou valores entre 0,6 e 0,96. Alguns dos polígonos da área de estudo não conseguiram distinguir edificações muito pequenas que se encontram muito juntas. Com isso a área calculada, em alguns casos, englobou mais de uma edificação em um só polígono. Por isso o número de imóveis atingidos em cada bairro foi definido em trabalho de campo, observando-se o polígono sobreposto a imagem de satélite e comparando com a realidade.

Com base nesses polígonos representativos da área edificada do município de Soledade elaborou-se os mapas da área de inundação com os dados de localização, profundidade da coluna d'água sobre cada edificação e tempo de duração da inundação em cada local atingido.

O trecho urbano da mancha de inundação com o gradiente de profundidade está ilustrado no mapa da Figura 55 com uma transparência de 60% para permitir a percepção das edificações atingidas na imagem do *Google Satélite* e no *Shapefile* das edificações de cada bairro.

O trecho urbano permeado pelo rio Quixudi coincide com uma curva do rio onde há uma confluência com um pequeno riacho efêmero de menor vazão, vindo do Norte — o riacho dos Mourões. Por ocasião da passagem da onda de cheia por esta confluência, e considerando um fluxo muito maior da onda provinda do rompimento da barragem em relação ao fluxo do riacho menor, neste ponto de encontro entre os dois rios a mancha de inundação adentrou o leito do riacho dos Mourões, atingindo a maior largura de topo registrada dentro da área urbana (338,8 m). Comprova-se no mapa da Figura 53 que a porção sudoeste do bairro Jardim Cruzeiro I é área mais afetada pela inundação exatamente por estar localizada nas margens da confluência entre esses dois leitos fluviais.

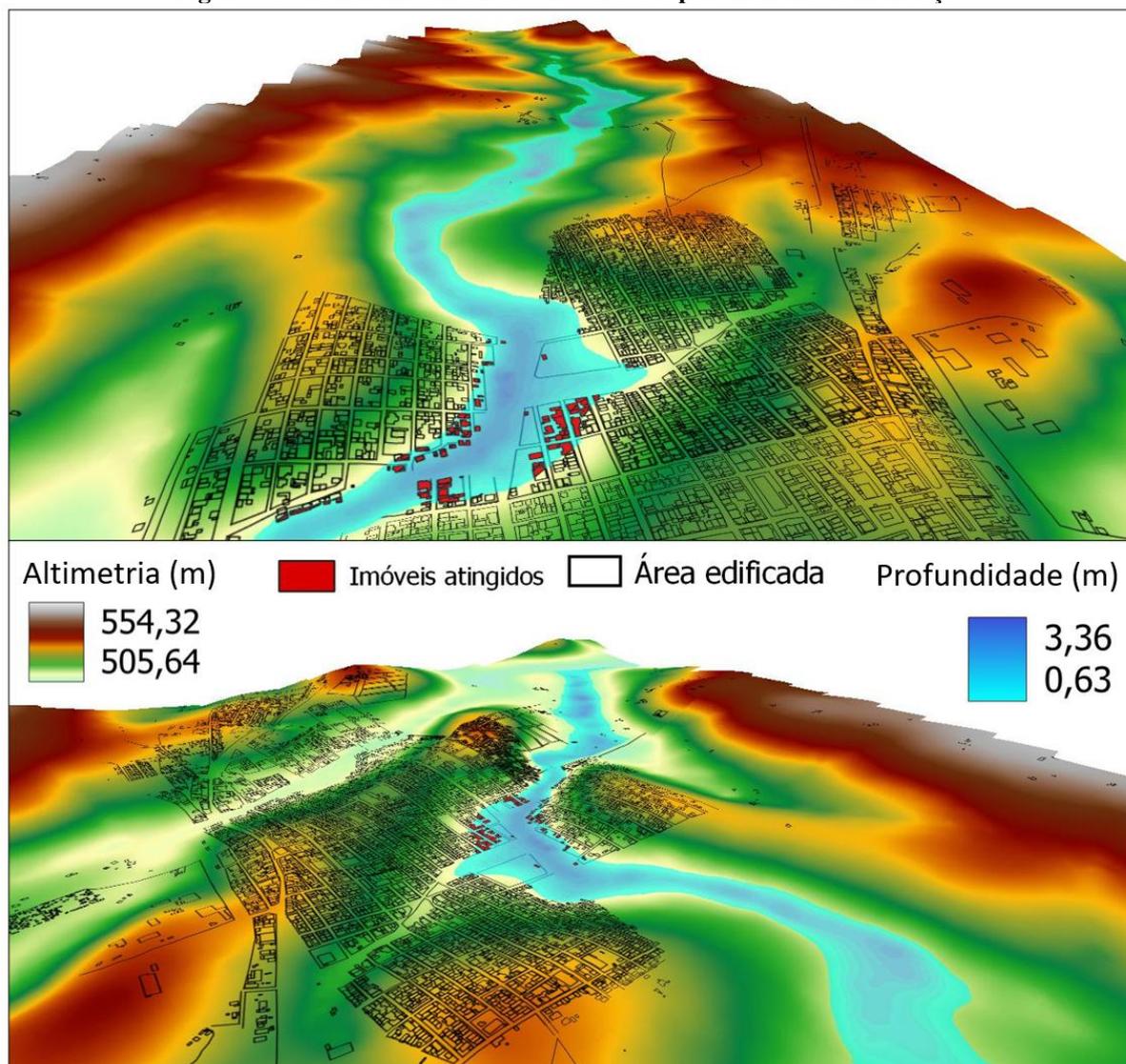
Figura 55 – Mapa das áreas afetadas pela mancha de inundação no trecho urbano do rio Quixudi no município de Soledade



Fonte: Autoria própria (2025)

Um panorama em 3D do espalhamento da mancha de inundação sobre a topografia geral do terreno está representado na Figura 56, onde se vê na parte superior uma cena angulada de jusante para montante, com a barragem ao fundo, e na parte inferior vê-se a área urbana afetada de montante para jusante. A representação no terreno está com um exagero vertical de 3x para poder melhorar o aspecto tridimensional da visualização. A altimetria real varia entre 505 e 554 m. As edificações atingidas permanecem destacadas em vermelho.

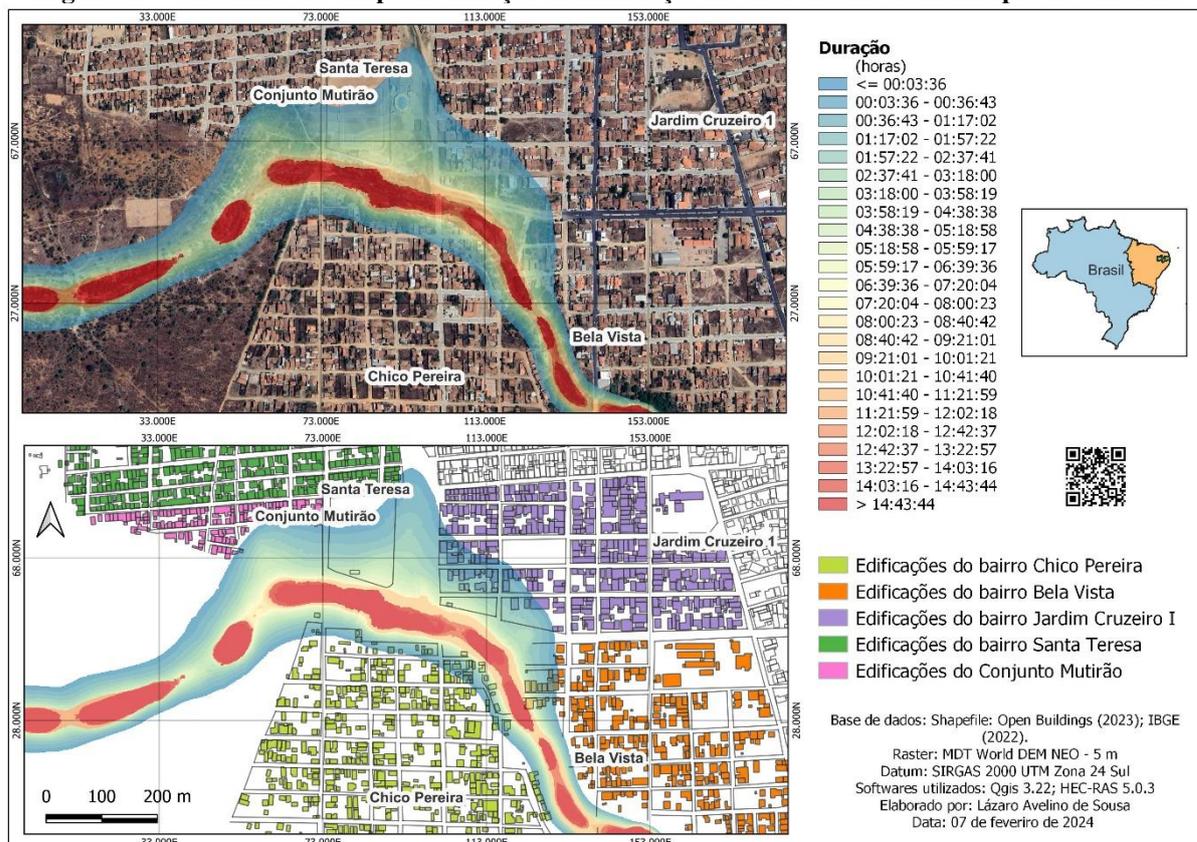
Figura 56 – Panorama em 3D da área afetada pela mancha de inundação



Fonte: Autoria própria (2025)

O tempo de duração da inundação em cada ponto atingido sobre a área urbana está representado em gradiente na Figura 57. Este parâmetro sofre a influência direta de vários fatores já observados até aqui, como por exemplo, a vazão e a velocidade de fluxo da onda de cheia. Como visto, a maior vazão registrada na mancha de máxima inundação ocorreu exatamente no trecho urbano do rio, entre as seções 2538.707 e 1801.791. Neste trecho percebe-se que a morfologia do terreno propicia que o fluxo hídrico venha de um trecho mais estreito e veloz do rio, preencha uma área de planície, e prossiga para outro trecho mais estreito, contendo a velocidade do fluxo e represando a mancha de inundação no trecho urbano por mais de 9 horas.

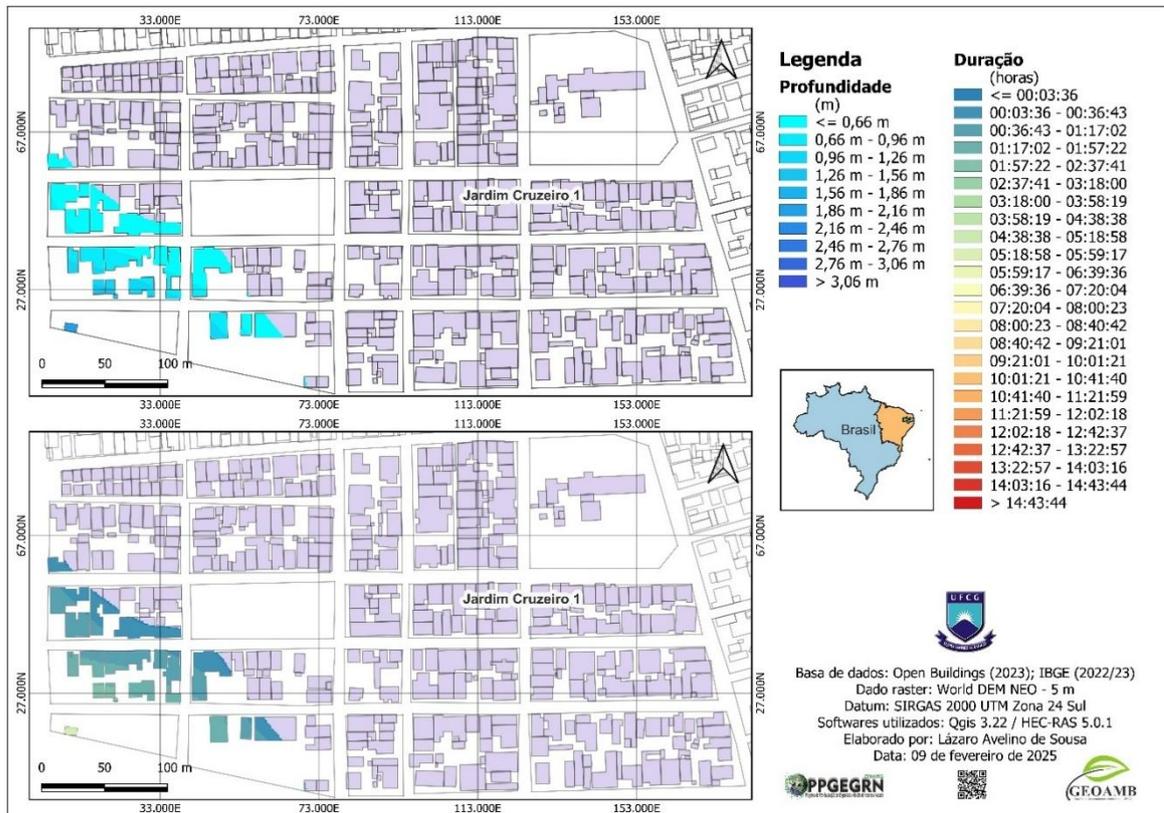
Figura 57 – Gradiente do tempo de duração da inundação na área urbana do município de Soledade



Fonte: Autoria própria (2025)

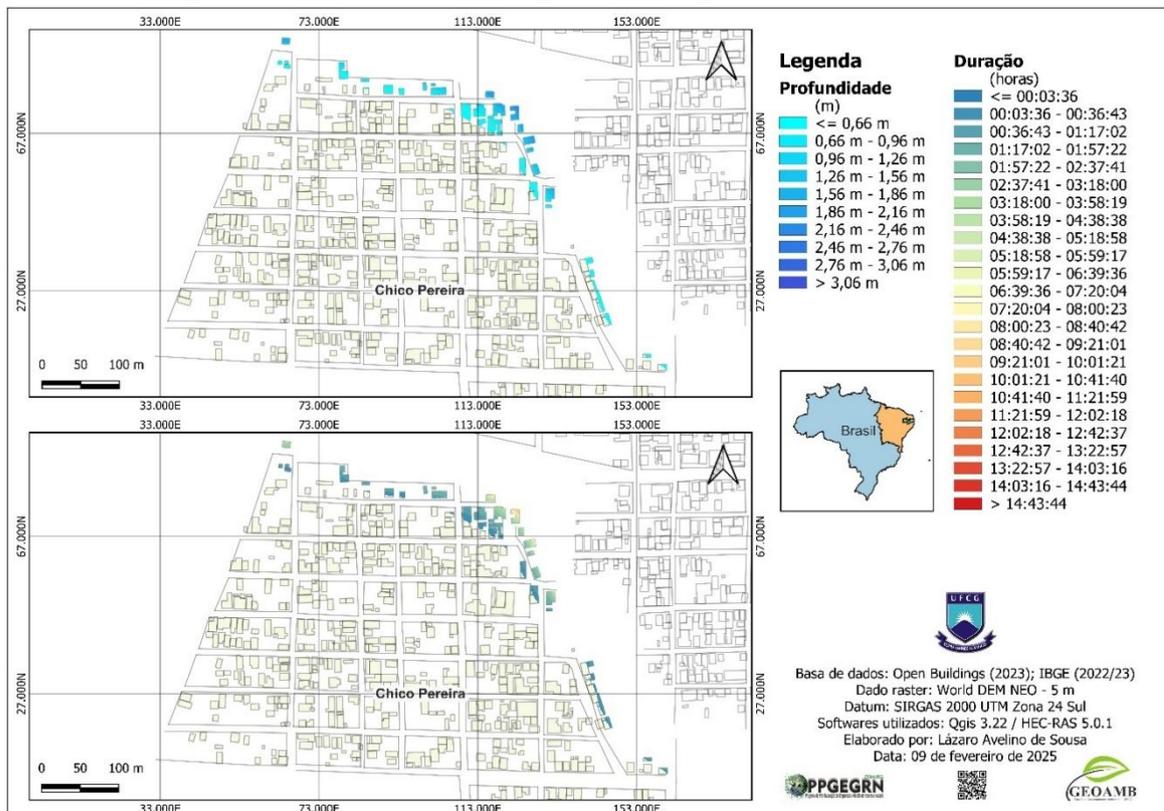
A profundidade da coluna d'água e o tempo de inundação sobre as áreas edificadas de cada bairro foi representada graficamente nas figuras que se seguem. No bairro Jardim Cruzeiro I os imóveis afetados pela maior profundidade da coluna d'água registraram 2,06 m e permaneceram inundados por 5 horas, 43 minutos e 8 segundos (Figura 58). No bairro Chico Pereira a maior profundidade da coluna d'água sobre os imóveis registrou 2,38 m e perdurou por 9 horas, 43 minutos e 8 segundos (Figura 59). Já no bairro Bela Vista os imóveis mais afetados permaneceram inundados por 15 horas, 7 minutos e 8 segundos por uma coluna d'água de 2,31 m de profundidade (Figura 60). Neste caso, após a passagem da onda de máxima inundação pelos imóveis dos demais bairros, no bairro Bela Vista, os imóveis atingidos ainda permaneceram inundados por mais seis horas aproximadamente, até a passagem total da onda de cheia pelo vale a jusante, que se estendeu até às 18 horas e 44 minutos. Isto denota que as construções atingidas no bairro Bela Vista estão ocupando uma área crítica de profundidade do rio, onde a água permanece por mais tempo após a redução da inclinação da linha de energia e da conseqüente redução da velocidade do escoamento.

Figura 58 – Profundidade e duração da inundação no bairro Jardim Cruzeiro I



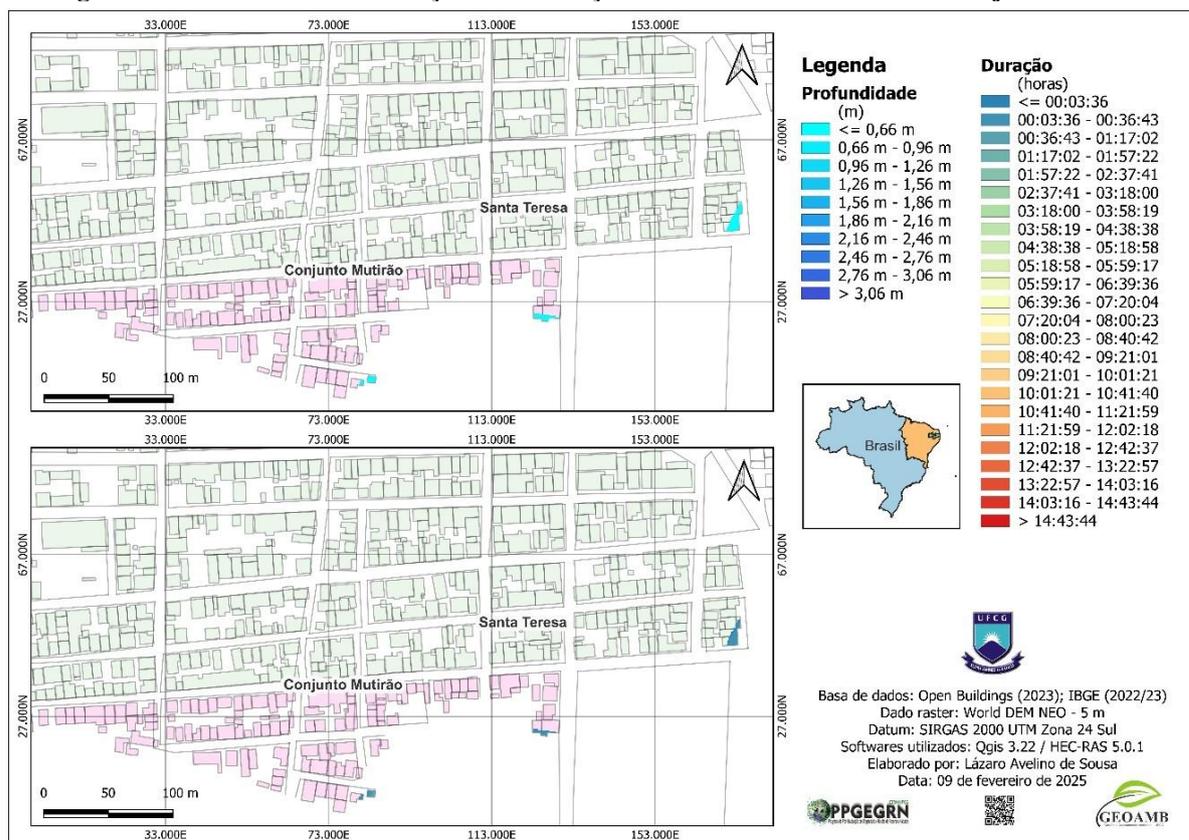
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 59 – Profundidade e duração da inundação no bairro Chico Pereira



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 61 – Profundidade e duração da inundação nos bairros Santa Teresa e Conjunto Mutirão



Fonte: Autoria própria (2025)

Os bairros Chico Pereira e Bela Vista registraram os imóveis atingidos pelas maiores profundidades da coluna d'água e com maior tempo de exposição à inundação. Percebe-se nos mapas desses bairros que esses imóveis estão localizados mais próximos do eixo central do rio, chegando a ocupar o limite do leito maior. A figura 62 mostra a localização real dos imóveis que registraram maior profundidade na coluna d'água e maior tempo de exposição à inundação no bairro Bela Vista.

Figura 62 – Residências localizadas no limite da calha do rio Quixudi num dos pontos de maior vazão e elevação da superfície da água no bairro Bela Vista



Fonte: Autoria própria (2025)

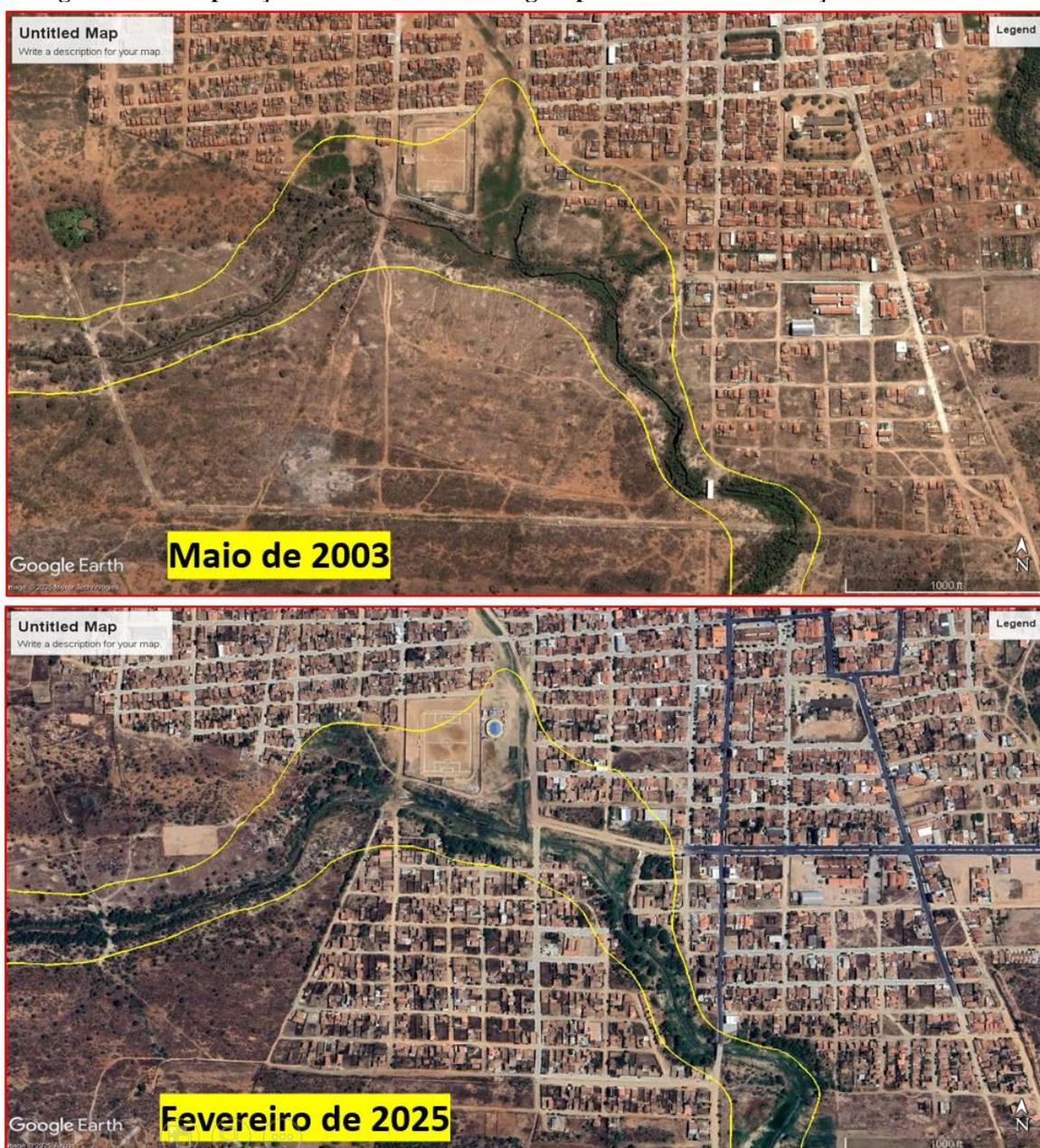
A Lei de Parcelamento do Solo Urbano (Lei Federal nº 6.766/1979) originalmente estabelecia em seu Art. 4º, inciso IIIA, que “ao longo das águas correntes e dormentes seria obrigatória a reserva de uma faixa não edificável de, no mínimo, 15 m de cada lado” (Brasil, 1979). Com nova redação dada pela Lei nº 14.285/2021, a Lei do Parcelamento do Solo Urbano agora deixa a cargo dos municípios a definição das faixas não edificáveis, estabelecendo em seu Art. 4º, inciso IIIB, que

ao longo das águas correntes e dormentes, as áreas de faixas não edificáveis deverão respeitar a lei municipal ou distrital que aprovar o instrumento de planejamento territorial e que definir e regulamentar a largura das faixas marginais de cursos d’água naturais em área urbana consolidada [...] com obrigatoriedade de reserva de uma faixa não edificável para cada trecho de margem, indicada em diagnóstico socioambiental elaborado pelo Município (Brasil, 2021).

A mudança recente nesta lei enseja uma preocupação com a manutenção do avanço da construção civil sobre as áreas com potencial de inundação no município estudado, pois, se antes a legislação foi negligenciada a ponto de permitir a ocupação dessas áreas, mesmo com a

expressa proibição da lei, agora que a definição da faixa não edificável ficou a cargo do município, é provável que o desinteresse pelo tema só aumente, visto que o município em questão não possui sequer um plano diretor. Acerca disto, o histórico de imagens do *Google Earth* revela que no ano de 2003 a área edificada atingida pela mancha de inundação era bem menor (Figura 63). Na imagem vê-se que há 21 anos o bairro Chico Pereira ainda não existia, portanto, a margem direita do rio não era ocupada pela expansão urbana.

Figura 63 – Comparação da área edificada atingida pela mancha de inundação em 2003 e 2025.



Fonte: *Google Earth* (2003/25)

Atualmente o padrão das edificações que se encontram em áreas potencialmente inundáveis nas proximidades do rio Quixudi varia em tamanho e qualidade das construções, revelando de forma indireta o poder aquisitivo dos seus proprietários e diferenciando o extrato social dos atingidos, mesmo quando compartilham a mesma rua (Figuras 64 e 65).

Figura 64 – Padrão das edificações na Rua Rômulo Nóbrega no bairro Jardim Cruzeiro I



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 65 – Padrão das edificações na margem direita do rio Quixudi (bairro Chico Pereira)



Fonte: Autoria própria (2025)

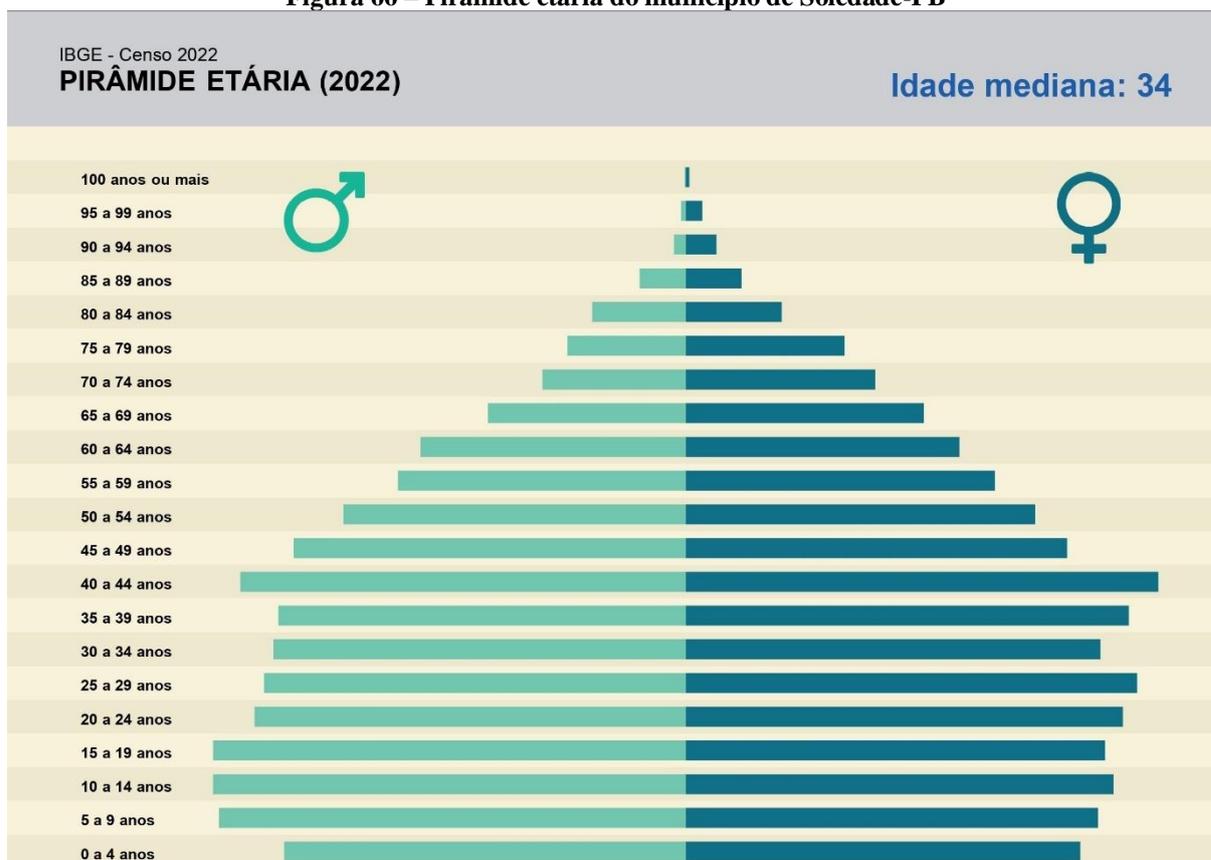
De forma geral, a estética das paisagens observadas em campo revela claramente que a margem direita do rio Quixudi, no bairro Chico Pereira, encontra-se ocupada pela parcela mais desfavorecida socioeconomicamente da população atingida pela inundação. Tal constatação foi verificada — para além do aspecto paisagístico — através do levantamento de dados socioeconômicos da população atingida em cada bairro. A estratificação social dos atingidos é apresentada e discutida no tópico seguinte.

4.5 Perfil da população envolvida na pesquisa

4.5.1 Características demográficas e sociais do município de Soledade

De acordo com censo demográfico do IBGE (2022), o município de Soledade tem uma população de 13.968 habitantes, sendo 6.925 do sexo masculino e 7.043 do sexo feminino (Figura 66). O município ocupa a 62ª posição no *ranking* populacional dos municípios da Paraíba. Esta população está distribuída num território de 578,178 km², resultando numa densidade demográfica de 24,16 hab./km². O PIB *Per Capita* (2021) do município era de R\$ 13.377,14. A taxa de mortalidade infantil em 2022 registrou 6,1 óbitos para cada mil nascidos vivos. O Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB, 2023) dos anos finais do ensino fundamental da rede pública de ensino registrou uma nota de 3,9.

Figura 66 – Pirâmide etária do município de Soledade-PB

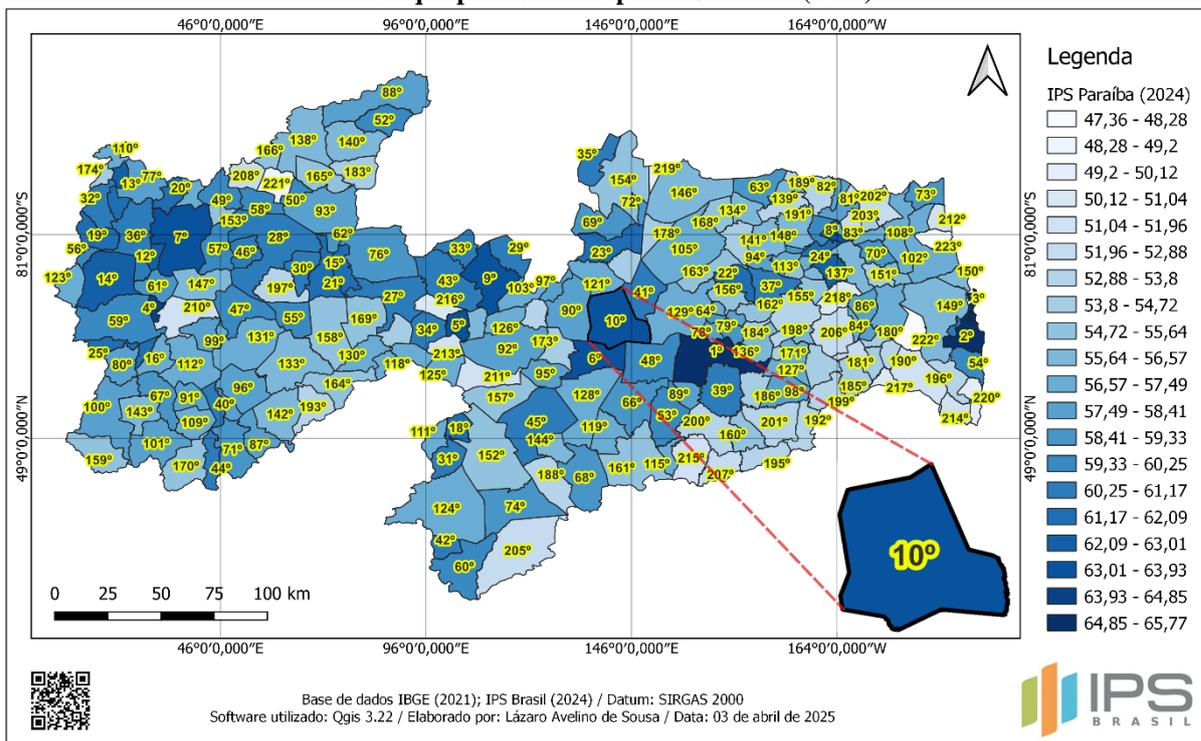


Fonte: IBGE (2022)

No *ranking* do Índice de Progresso Social (IPS Brasil, 2024), o município de Soledade figura na 10ª posição no Estado da Paraíba, com 63,04 pontos (Figura 67). O IPS Brasil, desenvolvido por meio da metodologia do *Social Progress Imperative*, é definido em seu próprio *site* como:

uma ferramenta de gestão territorial baseada em dados públicos, que identifica e apresenta, em uma mesma escala, se as pessoas têm o que precisam para prosperar, desde necessidades básicas como abrigo, alimentação e segurança, até se possuem acesso à informação e comunicação, e se são tratadas igualmente, independentemente de gênero, raça ou orientação (IPS Brasil, 2024).

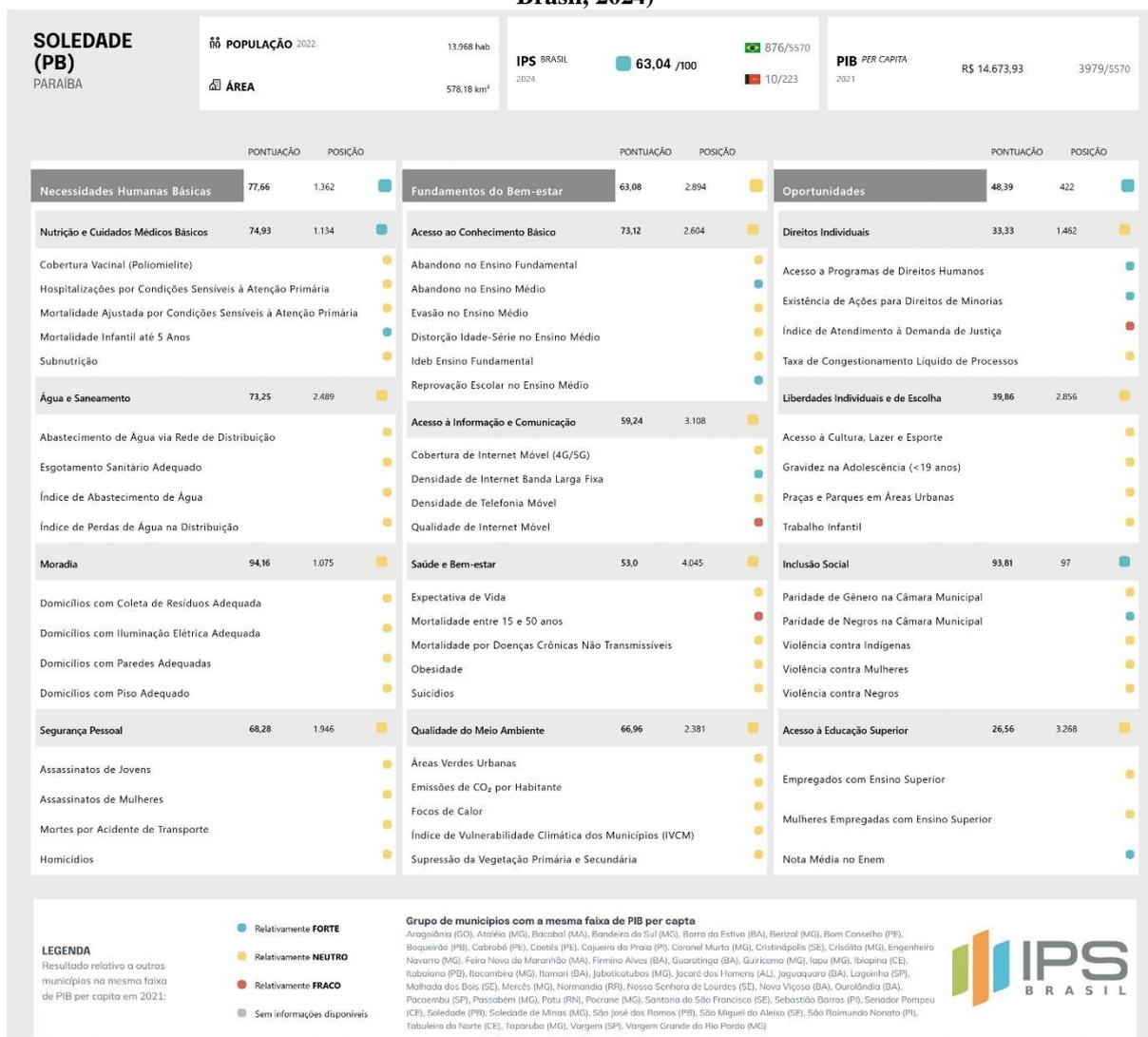
Figura 67 – Mapa do ranking do Índice de Progresso Social (IPS Brasil) no Estado da Paraíba com destaque para o município de Soledade (2024)



Fonte: IPS Brasil (2024)

O IPS proporciona um panorama multidimensional e acessível sobre a performance de municípios e estados em atender às necessidades básicas de seus cidadãos, pois é um índice composto por 57 indicadores provenientes de pesquisas globais conduzidas por instituições como *Institute For Health Metrics and Evaluation* e *United Nations Department of Economic and Social Affairs* agregados em um índice geral, com nota de 0 a 100, e índices para 3 dimensões (Necessidades Humanas Básicas, Fundamentos do Bem-estar e Oportunidades) e 12 componentes (Nutrição e Cuidados Médicos Básicos, Água e Saneamento, Moradia, Segurança Pessoal, Acesso ao Conhecimento Básico, Acesso à Informação e Comunicação, Saúde e Bem-estar, Qualidade do Meio Ambiente, Direitos Individuais, Liberdades Individuais e de Escolha, Inclusão Social e Acesso à Educação Superior). A Figura 68 mostra o desempenho do município de Soledade com relação a essas variáveis do IPS.

Figura 68 – Scorecard do município de Soledade-PB com relação ao Índice de Progresso Social (IPS Brasil, 2024)

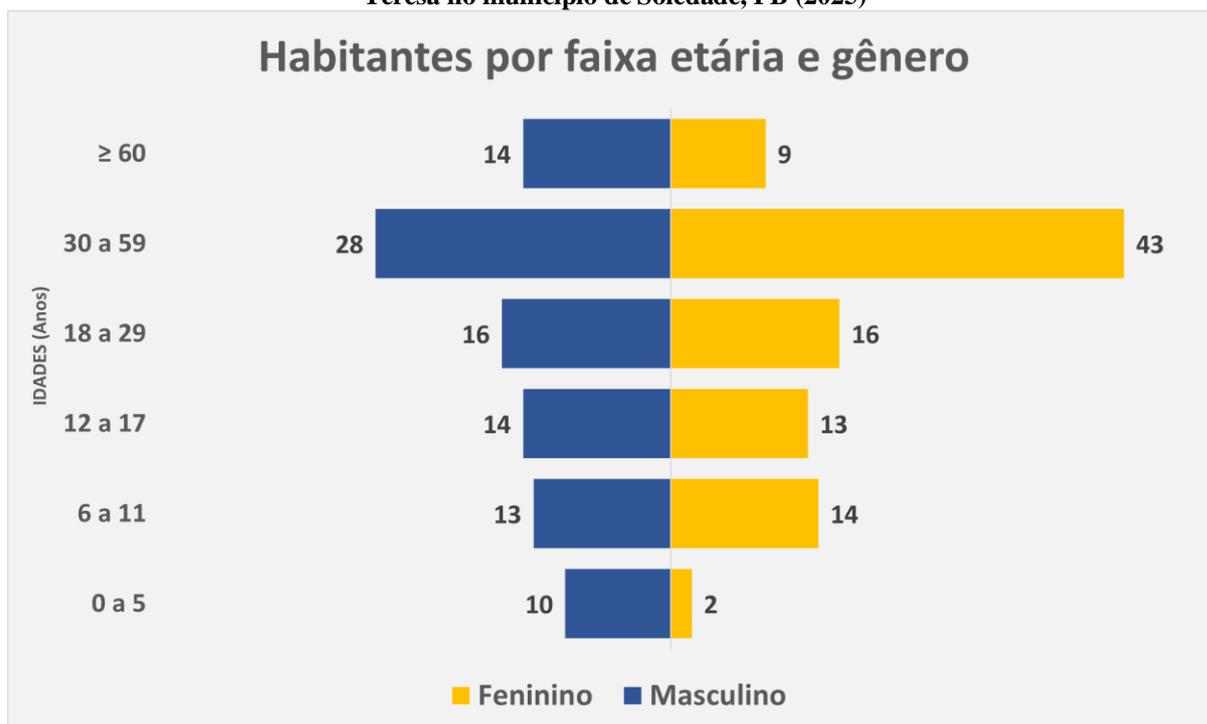


Fonte: IPS Brasil (2024)

4.5.2 Perfil socioeconômico da população atingida pela inundação e suas condições habitacionais

Em linhas gerais, o número de indivíduos ocupantes das áreas potencialmente inundáveis registrou 192 pessoas, sendo 95 do gênero masculino e 97 do gênero feminino, ambas autodeclaradas cisgênero. Esta população está distribuída em 60 famílias e é composta por 51% de indivíduos com idade entre 1 e 29 anos, e 49% de indivíduos com idade entre 31 e 90 nos. O Gráfico da Figura 69 mostra a pirâmide etária da população total atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa. As faixas etárias foram classificadas conforme a Tabela 7.

Figura 69 – Pirâmide etária da população total atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no município de Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

Tabela 7 – Classificação da população atingida por faixa etária

Faixa etária	Designação	Total de indivíduos atingidos	Percentual da população atingida
0 a 5 anos	Bebê	12	6,3
6 a 11 anos	Criança	27	14,1
12 a 17 anos	Adolescente	27	14,1
18 a 29 anos	Jovem	32	16,7
30 a 59 anos	Adulto	71	37,0
60 anos ou mais	Idoso	23	12,0
Total		192	100,0

Fonte: Autoria própria (2025)

Entre as famílias atingidas, 18 pertencem ao bairro Bela Vista, 17 ao bairro Chico Pereira, 2 ao bairro Conjunto Mutirão, 22 ao bairro Jardim Cruzeiro I e apenas 1 pertence ao bairro Santa Teresa. A distribuição geral da população atingida por bairro e por gênero está na Tabela 8.

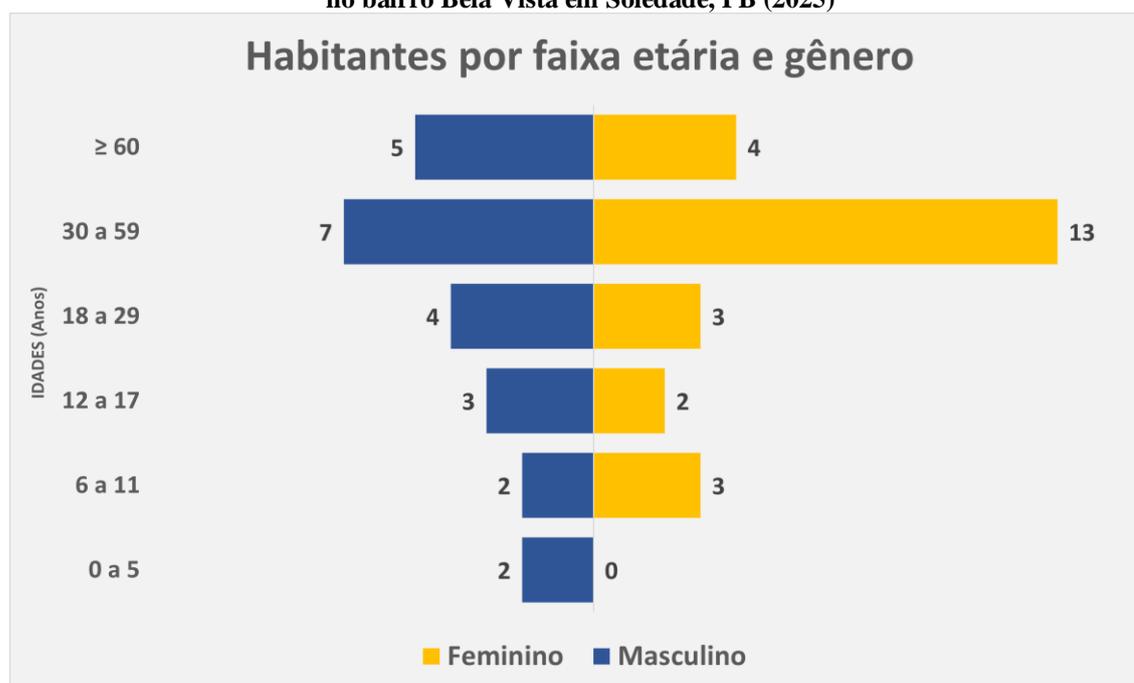
Tabela 8 – Distribuição da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa por bairro do município de Soledade, PB (2025)

Bairro	Atingidos do gênero masculino	Atingidos do gênero feminino	Total
Bela Vista	23	25	48
Chico Pereira	28	29	57
Conjunto Mutirão	7	2	9
Jardim Cruzeiro I	36	39	75
Santa Teresa	1	2	3
Total	95	97	192

Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

No bairro Bela Vista, a maior parte dos atingidos (41,7%) são adultos com idades entre 30 e 59 anos, sendo majoritariamente do gênero feminino, conforme ilustra o gráfico da Figura 70.

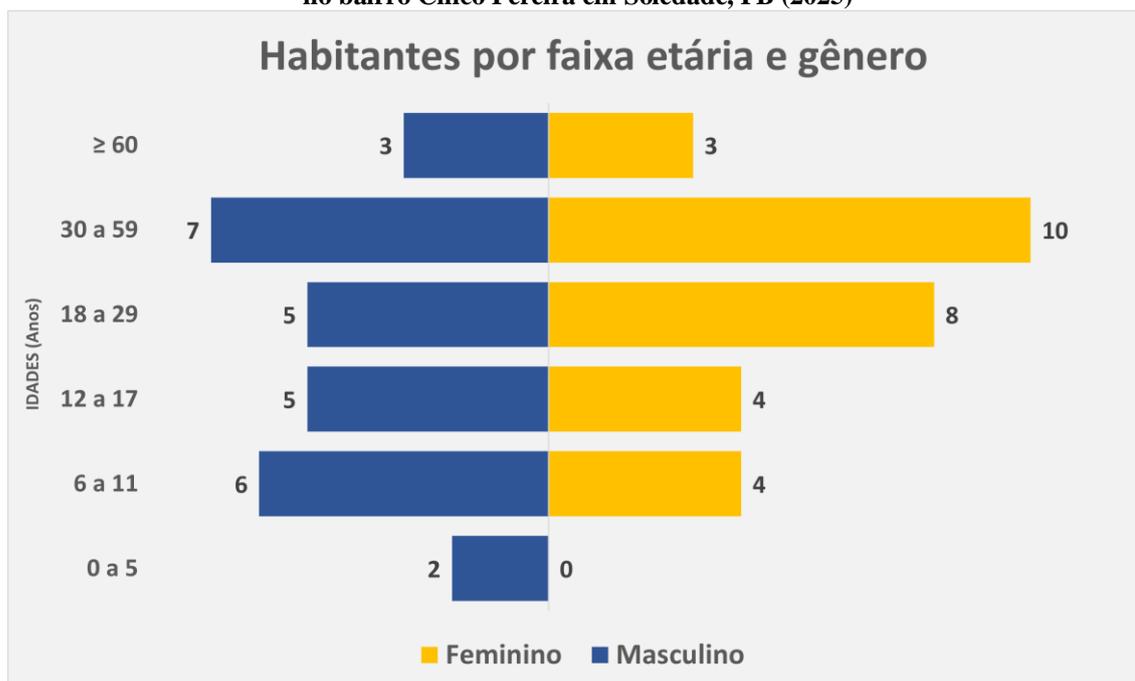
Figura 70 – Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no bairro Bela Vista em Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

No bairro Chico Pereira, o maior percentual da população atingida (29,8%) também se concentra na faixa etária entre 30 e 59 anos, seguida da população jovem (entre 18 a 29 anos) com 22,8%, conforme ilustra o gráfico da Figura 71.

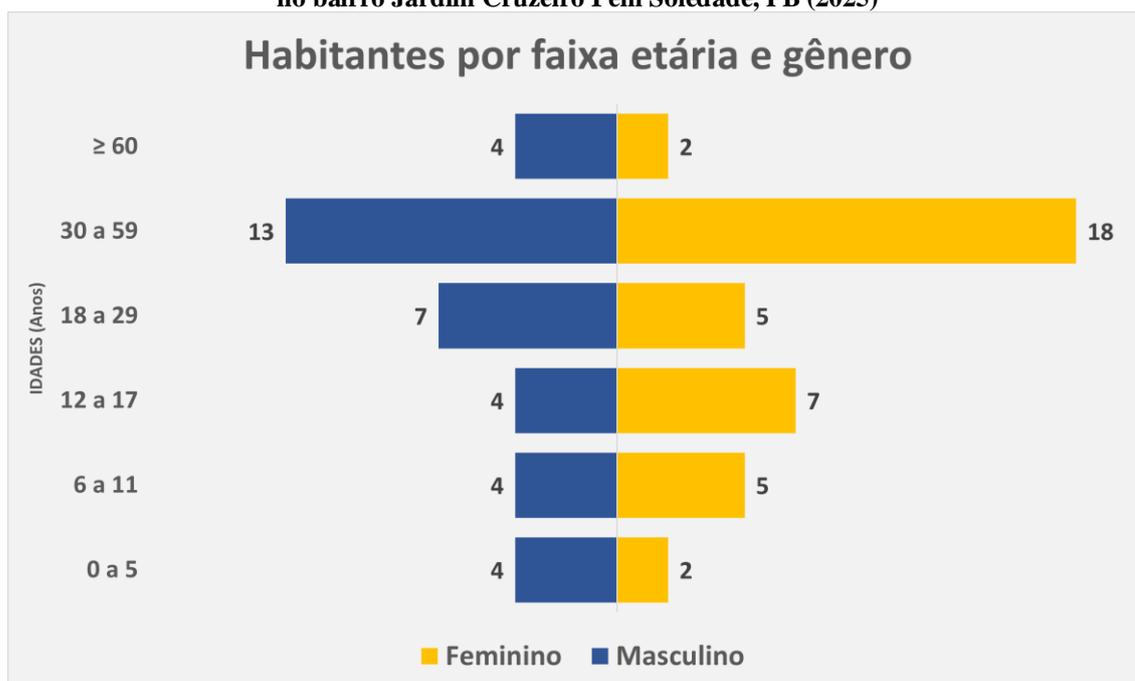
Figura 71 – Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no bairro Chico Pereira em Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

Já no bairro Jardim Cruzeiro I, os adultos da faixa etária entre 60 e 59 anos registraram 41,3% da população atingida, se consolidando como a faixa etária com maior número de pessoas atingidas dentre todas as faixas da pirâmide (Figura 72).

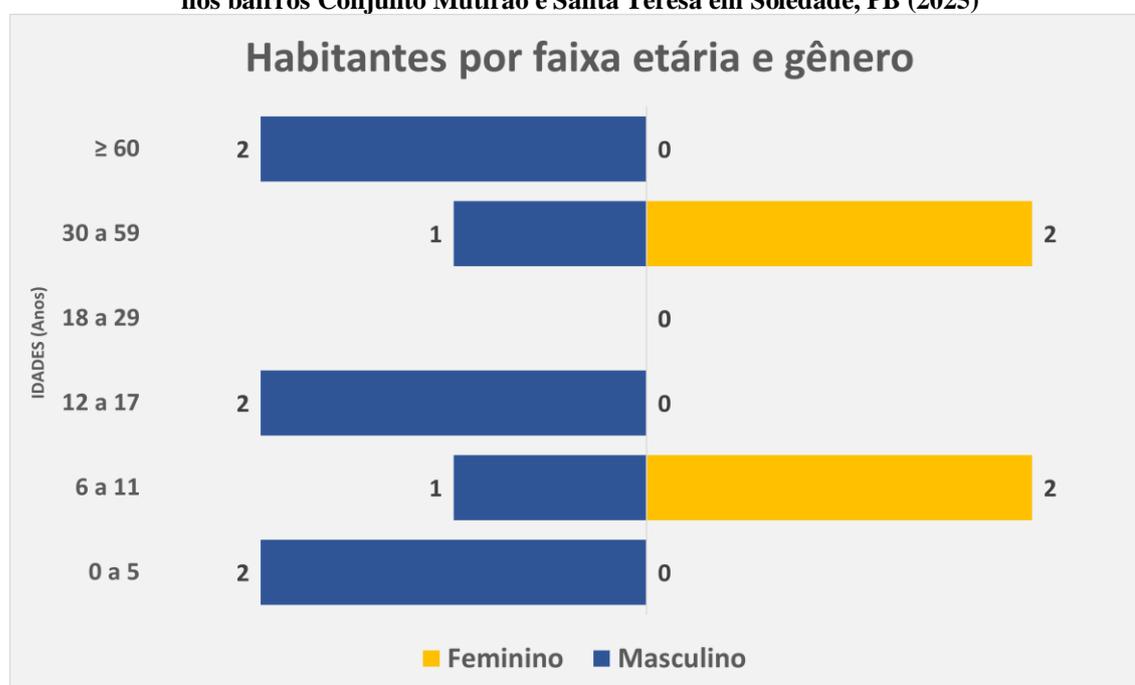
Figura 72 – Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa no bairro Jardim Cruzeiro I em Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

Os bairros Conjunto Mutirão e Santa Teresa registraram o menor número de pessoas atingidas pela inundação, sendo representados em um só gráfico na Figura 73. Nota-se que a população adulta (entre 30 e 59 anos) registrou os mesmos números da população de crianças (entre 6 e 11 anos), enquanto as faixas etárias classificadas como bebê (entre 0 e 5 anos), adolescente (entre 12 e 17 anos) e idoso (60 anos ou mais) também empataram nas estatísticas. Apenas nestes dois bairros a faixa etária classificada como jovem (entre 18 e 29 anos) não registrou nenhum indivíduo. Em todos os bairros a população feminina registrou o maior número de atingidos.

Figura 73 – Pirâmide etária da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa nos bairros Conjunto Mutirão e Santa Teresa em Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

Quando se investigou o grau de escolaridade da população total atingida pela mancha de inundação simulada, chegou-se ao que se vê na Tabela 9, em que o grau definido como “Completo e Inativo” representa os indivíduos que concluíam determinada escolaridade e pararam de estudar. O grau definido como “Incompleto e Inativo” representa os indivíduos que pararam de estudar antes de concluir determinada escolaridade. Já o grau definido como “Incompleto e Ativo” representa os indivíduos que ainda não concluíram determinada escolaridade, mas ainda estão estudando.

Tabela 9 – Grau de escolaridade da população total atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa em Soledade, PB (2025)

Escolaridade	Completo e Inativo (nº de indivíduos)	Incompleto e Inativo (nº de indivíduos)	Incompleto e Ativo (nº de indivíduos)	Total
Ensino Fundamental 1	11	33	17	61
Ensino Fundamental 2	14	12	20	46
Ensino Médio	41	3	7	51
Ensino Médio Técnico	3	-	1	4
Ensino Superior	6	-	2	8
Não tem idade escolar	4	-	-	4
Creche	-	-	2	2
Pré-Escolar	-	-	5	5
Analfabeto	9	-	-	9
Alfabetizado	2	-	-	2
Total	90	48	54	192

Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

A maior parte da população total atingida (46,9%) se enquadra no grau de escolaridade “Completo e Inativo”, ou seja, são indivíduos que completaram determinado grau de escolaridade e pararam de estudar. A maior parte desses indivíduos (45,6%) pararam de estudar quando completaram o Ensino Médio. Apenas 6 indivíduos completaram o Ensino Superior.

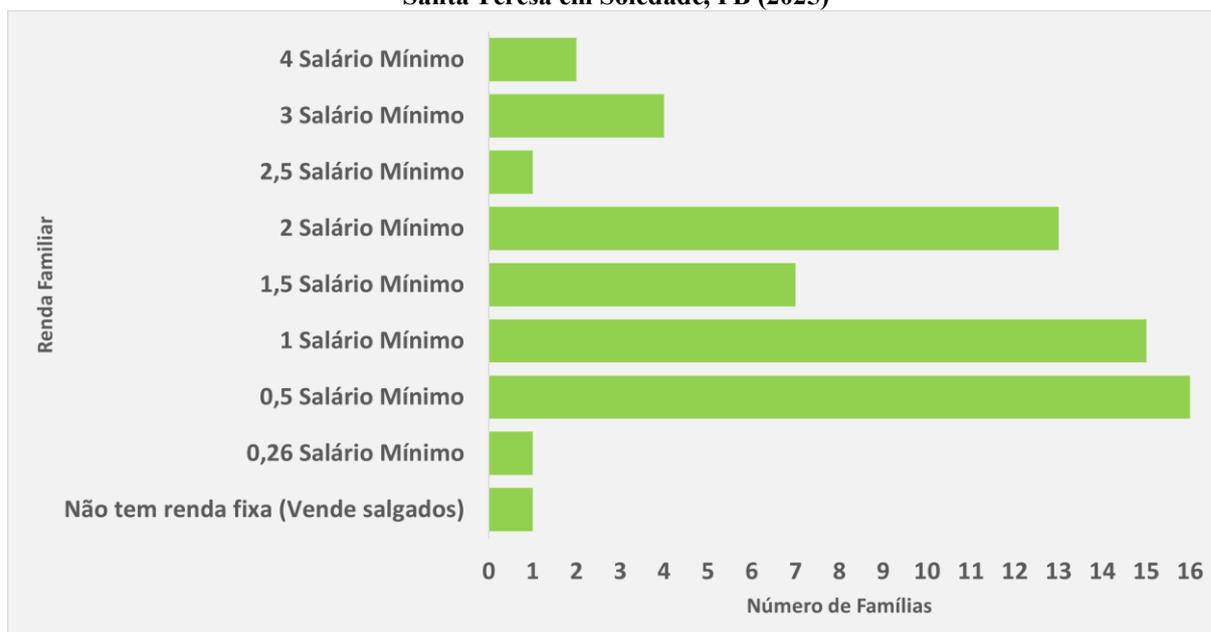
No grau de escolaridade classificado como “Incompleto e Inativo” 33 indivíduos pararam de estudar antes de concluírem o Ensino Fundamental 1 (do 1º ao 5º ano), enquanto 12 indivíduos abandonaram a escola sem concluir o Ensino Fundamental 2 (do 6º ao 9º ano). Estas duas categorias de indivíduos representam juntas 23,4% da população total atingida.

Dentre os 54 indivíduos que ainda estão estudando, a maior parte (68,5%) está cursando o Ensino Fundamental 1 e 2. Apenas 4 indivíduos não têm idade escolar; 5 crianças estão na Pré-Escola e 2 estão na Creche; 9 indivíduos são analfabetos e 2 são apenas alfabetizados.

No tocante à renda familiar, a abordagem levou em conta o salário mínimo em vigor no mês de março de 2025, qual seja R\$ 1.518,00 (um mil, quinhentos e dezoito Reais). A partir deste parâmetro salarial verificou-se que 73,3% das famílias habitantes em áreas potencialmente inundáveis no vale a jusante da barragem Santa Teresa possuem renda familiar entre 0,5 e 2,0 salários mínimos mensais. Apenas duas famílias possuem renda igual a 4 salários mínimos, e uma das famílias não possui renda fixa, sendo dependente da venda de salgados para sobreviver, conforme se vê na Figura 74.

A distribuição da renda familiar pelo total de famílias atingidas de cada bairro está representada na Tabela 10.

Figura 74 – Renda familiar por número de famílias atingidas pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa em Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

Tabela 10 – Renda familiar pelo total de famílias atingidas de cada bairro

Bairro	Renda Familiar	Total de Famílias
Bela Vista	Não tem renda fixa (Vende salgados)	1
	0,5 Salário Mínimo	5
	1 Salário Mínimo	3
	1,5 Salário Mínimo	3
	2 Salário Mínimo	5
	2,5 Salário Mínimo	1
Chico Pereira	0,5 Salário Mínimo	10
	1 Salário Mínimo	4
	1,5 Salário Mínimo	1
	2 Salário Mínimo	2
Conjunto Mutirão	1 Salário Mínimo	2
Jardim Cruzeiro I	0,26 Salário Mínimo	1
	0,5 Salário Mínimo	1
	1 Salário Mínimo	5
	1,5 Salário Mínimo	3
	2 Salário Mínimo	6
	3 Salário Mínimo	4
	4 Salário Mínimo	2
Santa Teresa	1 Salário Mínimo	1

Fonte: Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

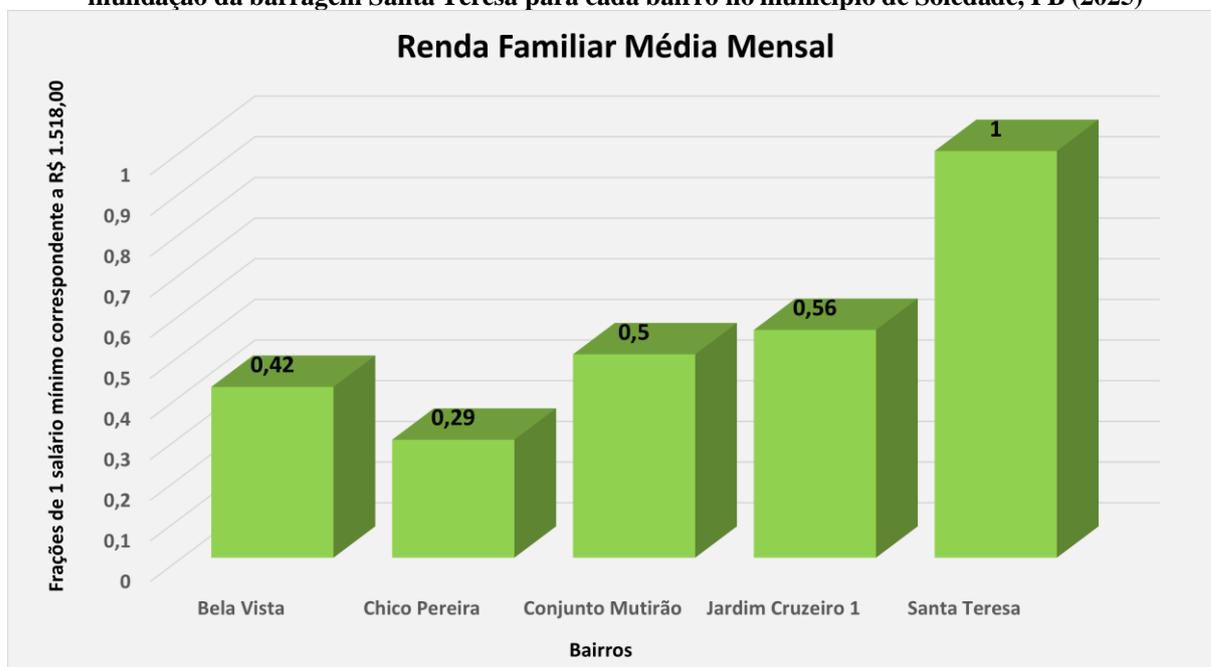
No bairro Bela Vista, 27,8% das famílias atingidas possuem renda familiar mensal entre 0,5 e 2,0 salários mínimos. No bairro Chico Pereira, para 58,8% das famílias atingidas a renda familiar é de 0,5 salário mínimo mensal. Já no bairro Jardim Cruzeiro I, 27,3% da população

atingida possui renda familiar igual a 2 salários mínimos mensais. Nos bairros Conjunto Mutirão e Santa Teresa cem por cento da população atingida tem 1 salário mínimo de renda familiar mensal.

Nota-se que a população com maior renda familiar dentre os atingidos de todos os bairros corresponde à população do bairro Jardim Cruzeiro I, que recebe por mês um total de 12,26 salários mínimos, sendo neste bairro que residem as únicas famílias com renda familiar igual a 4 salários mínimos. Por outro lado, também é neste bairro que reside a única família cuja renda mensal não ultrapassa 0,26 salário mínimo.

Quando se verifica a renda média mensal para cada bairro, ou seja, o total da renda de todas as famílias dividido pelo total de famílias de cada bairro, tem-se o que se vê no gráfico da Figura 75, onde o bairro Santa Teresa aparece com renda média de 1 salário mínimo correspondente a renda da única família atingida neste bairro. Dentre os demais bairros, a maior renda média também se verifica no bairro Jardim Cruzeiro I, com 0,56 salário mínimo mensal por família. O bairro Chico Pereira é o menos favorecido socioeconomicamente, com renda familiar média de apenas 0,29 salário mínimo mensal.

Figura 75 – Gráfico da renda familiar média (em salários mínimos) da população atingida pela mancha de inundação da barragem Santa Teresa para cada bairro no município de Soledade, PB (2025)



Fonte: Secretaria de Saúde de Soledade, PB (2025)

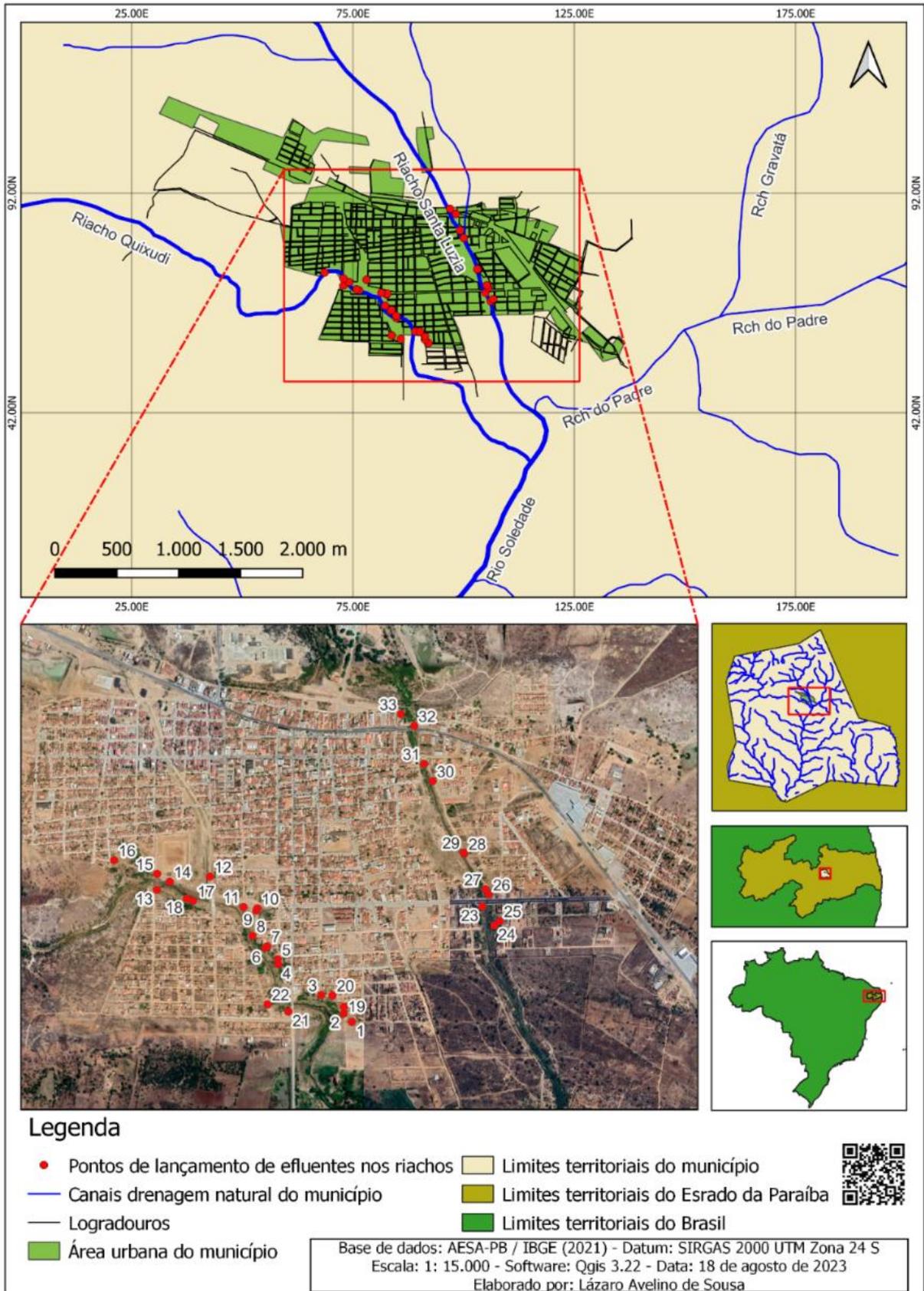
De forma geral, a população mais vulnerável socioeconomicamente ocupa a margem direita do trecho urbano do rio Quixudi, no bairro Chico Pereira. As condições socioambientais desta margem do rio requerem maior atenção, pois a mesma é habitada por 57 indivíduos,

pertencentes a 17 famílias de baixa renda, as quais — talvez pelo baixo nível de instrução educacional que possuem — não têm a devida percepção dos perigos que o ambiente onde vivem proporciona em caso de colapso da barragem localizada a montante. Ademais, os perigos ambientais a que está exposta esta população já é visível na própria configuração da paisagem, que revela suas condições habitacionais. O rio que margeia suas residências é completamente contaminado pelo lançamento de esgoto a céu aberto, contrariando o que estabelece os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O lançamento de esgoto no leito do referido rio foi analisado pelo autor desta tese em artigo publicado nos anais do V Simpósio de Geografia Física do Nordeste, ocorrido em Recife-PE, em outubro de 2023. O trabalho identificou 33 pontos de lançamento de efluentes domésticos nos leitos dos rios Quixudi e Santa Luzia no perímetro urbano do município de Soledade, sendo que 22 desses pontos estavam localizados no rio Quixudi (Figura 76). Neste artigo o autor concluiu que o trecho contaminado por esgotamento doméstico sem tratamento, apenas no rio Quixudi, tem uma extensão de 2,56 km, partindo do ponto de lançamento mais a montante até a confluência do rio Soledade.

O impacto da contaminação do leito do rio Quixudi por efluentes domésticos, que já é sentido pela população ribeirinha, é um agravante na hipótese do rompimento da barragem Santa Teresa. O mau cheiro e a proliferação de mosquitos já expõem os moradores locais a efeitos nocivos sobre a saúde, situação que pode piorar com o espalhamento da onda de cheia sobre as residências. A água contaminada pelo esgoto, quando da passagem da onda de cheia, subirá de nível e alcançará áreas antes não afetadas pela poluição.

Figura 76 – Pontos de lançamento de efluentes domésticos nos rios Quixudi e Santa Luzia.



Fonte: Sousa (2023).

Os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) sintetizam metas a serem alcançadas pelas nações até 2030 que englobam os problemas abordados até aqui com relação aos impactos do rompimento da barragem Santa Teresa e os riscos ambientais verificados em seu vale de jusante.

O ODS 6 estabelece a meta de melhorar a qualidade da água até 2030, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura da água. No município de Soledade, há alguns anos, foi iniciada a construção de uma lagoa de tratamento para receber as águas residuais provindas de todos os rios do município e trata-las, antes de devolve-las à rede de drenagem natural, na altura do rio Soledade. Porém, em visita de campo, verificou-se que a construção da lagoa se trata de uma obra parada (Figura 77).

Figura 77 – Lagoa de tratamento de efluentes domésticos inacabada no município de Soledade.



Fonte: Imagem do *Google Earth* e foto do autor (2023)

Ainda com relação à água, o ODS 6 estabelecia para 2020 proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos. No caso em tela, cinco anos após vencido o prazo do estabelecimento da meta de proteção e restauração dos ecossistemas relacionados com a água, ainda se verifica a destinação de esgotos sem tratamento ao leito natural dos rios urbanos em um município de 139 anos de emancipação política e mais de 13 mil habitantes como Soledade. Este trabalho chama

a atenção para esta realidade, já que a poluição do rio em questão está dentro da problemática ambiental referente ao rompimento da barragem Santa Teresa. A conclusão das obras da lagoa de tratamento seria apenas uma etapa das ações necessárias para mitigar os efeitos maléficos da poluição do rio Quixudi, em observância aos ODS. O problema maior reside no vale a montante da referida lagoa, pois, mesmo que seja tratado o efluente que chega até a lagoa, o percurso do rio até chegar na estação de tratamento continua a céu aberto. Assim, é preciso aperfeiçoar o sistema coletor para poder despoluir o trecho urbano do rio.

Ainda mais relacionado com a problemática deste trabalho de tese está o ODS 13, que trata das ações contra a mudança global do clima. A instabilidade das chuvas na região semiárida em questão já é por si só um fator climático preocupante com relação à segurança da barragem em foco neste trabalho. Nos períodos de seca o risco que a barragem oferece enquanto potencial causadora de desastre por inundação é negligenciado a ponto de haver descuido com a infraestrutura, a exemplo da erosão do barramento e da proliferação de vegetação nos taludes (Figura 78).

Figura 78 – Degradação da infraestrutura da barragem Santa Teresa por erosão do maciço e proliferação de espécie vegetal lenhosa no talude de jusante.



Fonte: Autoria própria (2024). **Legenda:** A) Erosão verificada no talude de jusante. B) Proliferação de Algaroba (*Prosopis juliflora*) sobre o talude de jusante.

Com as mudanças climáticas, o risco de acontecer eventos extremos de precipitação potencializa o perigo que a barragem representa para a população que habita a jusante.

O ODS 13 também enfoca a necessidade de reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais, integrando medidas relacionadas a mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais. No município de Soledade percebe-se que as ações políticas, as estratégias e o planejamento urbano com relação ao problema abordado nesta tese não o percebem ou não o concebem com a

gravidade devida. A prova disto é que a própria administração municipal abriu e está planejando pavimentar a extensão da avenida José Rufino de Carvalho para as margens do rio Quixudi, dentro do limite da mancha de inundação (Figura 79).

Figura 79 – Extensão da avenida José Rufino de Carvalho em 2003 e 2025



Fonte: Imagens do *Google Earth* (2003/25)

Diante de todas as condições apresentadas até aqui, este trabalho de tese percebeu a necessidade de classificar a barragem Santa Teresa por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA), conforme se aborda no próximo tópico.

4.6 Classificação da barragem Santa Teresa por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA)

Com base no Quadro 2 e nos procedimentos elencados no tópico 3.6 dos materiais e métodos, elaborou-se o Quadro 4 com as ponderações sobre as características técnicas observadas na barragem Santa Teresa, o estado de conservação da barragem e o plano de segurança. O referido quadro mostra a pontuação atribuída para cada condição observada na barragem, de acordo com a Resolução nº 143 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), e a justificativa para tal pontuação. Quando possível, a justificativa foi ilustrada com fotografias feitas *in loco*. A soma da pontuação atribuída às características técnicas, ao estado de conservação da barragem e ao plano de segurança resultou em 49 pontos, enquadrando a barragem na categoria de risco médio.

Quadro 4 – Classificação da barragem Santa Teresa por Categoria de Risco (CRI)

CATEGORIA DE RISCO (CRI)		
1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)	PONTUAÇÃO/CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA
a) Altura	0 pontos Altura \leq 15 m	Como visto, a barragem possui uma altura de 6 m.
b) Comprimento	3 pontos Comprimento $>$ 200 m	A barragem possui 380 m, incluindo o vertedouro, e 320 m sem o vertedouro.
c) Tipo de barragem quanto ao material de construção	3 pontos Terra homogênea/enrocamento/terra enrocamento	O maciço da barragem é composto de Terra enrocamento, conforme ilustra a Figura 80.
d) Tipo de fundação	4 pontos Rocha alterada mole/saprólito/solo compacto	Solo compacto
e) Idade da barragem	4 pontos < 5 anos ou > 50 anos ou sem informação	Não há informação precisa sobre a idade da barragem. Sabe-se que foi reconstruída após o rompimento ocorrido em 1985.
f) Vazão de projeto	10 pontos TR < 500 anos ou desconhecido/estudo não confiável	Tempo de Retorno desconhecido
Total (CT)	24 pontos	
2. ESTADO DE CONSERVAÇÃO (EC)	PONTUAÇÃO/CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA

g) Confiabilidade das estruturas extravasoras	0 pontos Estruturas civis e hidroelctromecânicas em pleno funcionamento/canais de aproximação ou restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos	Vertedouro tipo soleira livre desobstruído conforme ilustra a Figura 81.
h) Confiabilidade das estruturas de adução	Não se aplica	A barragem não possui nenhum tipo de estrutura de adução
i) Percolação	0 pontos Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem	Percolação controlada sem efeitos visíveis
j) Deformações e recalques	0 pontos Inexistente	Não deslocamento visível no maciço da barragem.
k) Deterioração dos taludes/paramentos	1 ponto Falhas na proteção dos taludes e paramentos/presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo	Observou-se <i>in loco</i> que no ato da pavimentação da crista da barragem (realizada em dezembro de 2024) foram removidas as calhas de drenagem do talude de jusante. Tal medida já surtiu efeito negativo mediante as primeiras chuvas de 2025. As águas pluviais iniciaram um processo de erosão do talude que se não for contido de alguma forma pode prejudicar a estabilidade do maciço. Também no alude de jusante foi verificada a presença de arbustos de Algaroba, que se não forem removidos antes de crescerem podem danificarem a estrutura do maciço da barragem com suas raízes profundas (Figura 82).
l) Eclusa	0 pontos Não possui eclusa	A barragem não possui eclusa
Total (EC)	1 ponto	
3. PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (PS)	PONTUAÇÃO/CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA
m) Existência de documentação de projeto	8 pontos Inexiste documentação de projeto	A pesquisa não identificou documentação alguma da barragem.
n) Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem	8 pontos Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem	A pesquisa não identificou responsável técnico pela barragem. No dia 7 de fevereiro de 2023 foi feito um pedido de informação sobre a barragem junto a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAPB). A agência respondeu ao pedido no dia 15 de fevereiro de 2023, informando apenas que não monitora a referida barragem no município de Soledade, conforme se vê na Figura 83.
o) Procedimentos de roteiros de inspeção de segurança e de monitoramento	3 pontos Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção	Esporadicamente, o poder público municipal solicita inspeção na barragem, porém,

		nenhum órgão oficial monitora o reservatório de forma regular. Em fevereiro de 2024 uma equipe da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA-PB) e da Defesa Civil do Estado da Paraíba fizeram uma vistoria na barragem com o objetivo de viabilizar reparos necessários (Figura 84). Observou-se que a pavimentação da crista da barragem feita pela prefeitura municipal ocorreu dez meses após esta vistoria.
p) Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem	0 pontos Sim ou vertedouro tipo soleira livre	Vertedouro tipo soleira livre
q) Relatório de inspeção de segurança com análise e interpretação	5 pontos Não emite os relatórios	A pesquisa não identificou relatório de inspeção de segurança, mesmo depois da visita da defesa civil e da EASA.
Total (PS)	24 pontos	
TOTAL GERAL	CT + EC + PS 49 pontos	CRI Médio

Fonte: Elaborado pelo autor com base na resolução nº 143 do Conama

Figura 80 – Talude de montante da barragem Santa Teresa tomado por vegetação e com enrocamento descoberto na margem esquerda.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 81 – Vertedouro de superfície da barragem Santa Teresa



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 82 – Talude de jusante da barragem Santa Teresa em 2018 e 2025



Fonte: Autoria própria (2018/25). Legenda: A) Foto do talude de jusante da barragem Santa Teresa com as calhas de drenagem no ano de 2018. B) Foto do talude de jusante da barragem Santa Teresa sem as calhas de drenagem, com erosão pelas águas pluviais e com presença de arbusto de algaroba em 2025.

Figura 83 – Resposta da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAPB) sobre o pedido de informações sobre a barragem Santa Teresa.

DESCRIÇÃO:

João Pessoa, 15 de fevereiro de 2023

Lázaro Avelino de Sousa

Prezado senhor, em atendimento a vossa solicitação através do sistema de gestão processual - serviço de informação ao cidadão, que gerou o processo 00099.000206/2023-0 de 07/02/2023, informamos que a AESA não monitora o Açude Santa Teresa, mencionado. No município de Soledade a AESA monitora a Barragem Soledade cujos dados podem ser visualizados através do link: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/volume-acude/?id_acude=5621

Agradecemos pelo contato indicando-lhe nosso sítio eletrônico como fonte de estudos e pesquisas, www.aesa.pb.gov.br

Para fins de aprimoramento do Serviço de Informação ao Cidadão – SIC, solicitamos a gentileza de avaliar nosso atendimento. atenciosamente, João Pedro Chaves da Silva Rodrigues, gerente executivo de operação de mananciais.

Local de entrega: não informado.

Custo: r\$ 0,00

Fonte: *Print* do e-mail de resposta da AESA-PB (2023)

Figura 84 – Notícia sobre a inspeção realizada na barragem Santa Teresa em fevereiro de 2024 veiculada em um portal de notícias local.

02/02/2024 às 18h16 / Atualizada em 03/02/2024 às 10h35
 Por: Heleno Lima / Fonte: Ascom/PMS

Defesa Civil da Paraíba e AESA vistoriam o açude Santa Tereza em Soledade

O objetivo é viabilizar reparos necessários naquele manancial

Últimas notícias

COMPROMISSO! - Há 7 horas
Emenda da presidente da Câmara garante pagamento retroativo do incentivo para servidores da saúde em São Vicente do Seridó

NÃO DEVO NADA! - Há 8 horas
TCE-PB aprova prestação de contas de 2012 de ex-prefeito juazeirinhense e retira imputação de débito

OPERAÇÃO GELARE! - Há 9 horas
Carga de ar-condicionado roubada em Soledade é recuperada pela PC com apoio da 23ª Delegacia de Juazeirinho

ARTICULAÇÕES! - Há 18 horas
Adriano é recebido por Hugo Motta na presidência da Câmara para tratar de ações para a Paraíba

Fonte: <https://helenolima.com/noticia/4126/defesa-civil-da-paraiba-e-aesa-vistoriam-o-acude-santa-tereza-em-soledade>

A Resolução nº 143 do Conama concebe o Dano Potencial Associado a uma barragem como o “dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais”.

No caso em tela, o mapeamento da mancha de inundação revelou que, na hipótese do rompimento da barragem, o Dano Potencial Associado classifica-se como “Alto”, com 25 pontos. A condição que mais contribuiu com essa pontuação foi o fato de que o vale a jusante da barragem é uma área urbanizada onde há habitações construídas de forma irregular, que negligenciam ou desconhecem as legislações de segurança e ocupam áreas com potencial de inundação nas margens mais críticas do rio. Isto coloca em evidência o potencial de perda de vidas humanas, que é fator preponderante na definição do Dano Potencial Associado.

O tempo para que a máxima inundação ocorra, considerando a situação hipotética analisada, registrou três horas e 16 minutos, podendo ser considerado tempo suficiente para a evacuação da área a jusante. Porém, a depender do tipo de rompimento e da hora de ocorrência da catástrofe, pode ocorrer perda de vidas humanas nas áreas mais profundas do terreno, onde o poder de fluxo é maior e a onda de inundação chega primeiro. Some-se a isso o fato de que a barragem se localiza a cerca de 3 km apenas da área urbana afetada.

O Quadro 5 atribui as pontuações para cada condição analisada na barragem e no vale a jusante e justifica a pontuação atribuída.

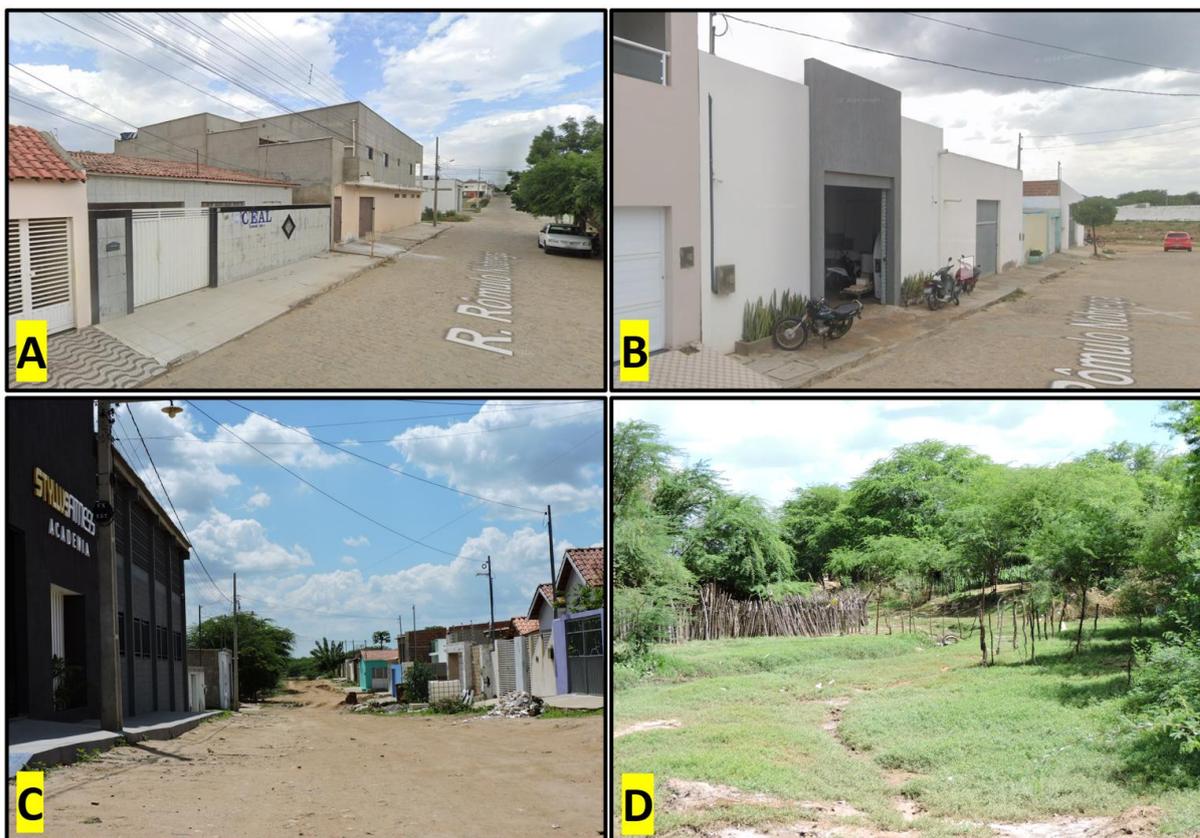
Quadro 5 – Classificação da barragem Santa Teresa por Dano Potencial Associado (DPA)

DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		
Condição	Pontuação	Justificativa
a) Volume total do reservatório	2 pontos Médio: 5 milhões a 75 milhões m ³	De acordo com Almeida (2016), o reservatório possui uma capacidade de acumular um volume de 6 milhões de metros cúbicos.
b) Potencial de perdas de vidas humanas	12 pontos EXISTENTE (Existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)	O mapeamento da mancha de inundação revelou que a maior parte dos imóveis atingidos são imóveis residenciais, portanto, há potencial de perda de vidas humanas.
c) Impacto ambiental	3 pontos SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais)	A pesquisa revelou que a área afetada se encontra totalmente descaracterizada de suas condições naturais, com a faixa de proteção das margens do rio completamente desrespeitada, além da poluição verificada no leito do rio.
d) Impacto socioeconômico	8 pontos ALTO Existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação	A área afetada pela inundação é uma área urbana onde 118 edificações de diferentes padrões arquitetônicos são atingidas. A maioria das edificações são residenciais, mas há entre os atingidos academia de musculação, fábrica de móveis, escola particular, oficina de fogões e geladeiras, além de currais improvisados no leito do rio. As residências mais simples, em sua maioria localizadas na margem direita do rio – no bairro Chico Pereira – revelam que neste bairro os atingidos são cidadãos de menor poder aquisitivo, que geralmente constroem

		suas habitações em terrenos “invadidos” ou ganhos em troca de votos (Figura 85).
TOTAL GERAL	25 pontos	DPA
		Alto

Fonte: Elaborado pelo autor com base na resolução nº 143 do Conama

Figura 85 – Imóveis residenciais e comerciais na área urbana atingida pela inundação e curral cercado com cerca rústica dentro da calha do rio Quixudi em Soledade



Fonte: Imagens A e B extraídas do *Google Earth Street View* (2025); imagens C e D feitas *in loco* pelo autor (2025). **Legenda:** A) Escola particular infantil na Rua Rômulo Nóbrega, no bairro Jardim Cruzeiro I; B) Fábrica de móveis projetados na Rua Rômulo Nóbrega, no bairro Jardim Cruzeiro I; C) Academia de musculação (à esquerda) e residências (à direita) na Rua Inácio Ouriques de Lima, no bairro Jardim Cruzeiro I; D) Curral improvisado com cerca rústica dentro da calha do rio Quixudi no trecho que permeia o bairro Bela Vista.

5 CONCLUSÃO

O impacto de rompimento da barragem Santa Teresa no vale a jusante se manifestou de forma multifacetada, incluindo desde fatores indiretos como os ligados às características gerais da microbacia do rio Quixudi, até fatores mais diretos como os efeitos da onda de cheia especificamente no vale a jusante da barragem. O perigo oculto do rio Quixudi enquanto rio efêmero, é um atributo de seu regime hidrológico. O fato de o leito do rio permanecer sem água durante a maior parte do tempo resulta na ocupação de suas margens mais críticas de forma desordenada e alheia ao perigo de rompimento da barragem em caso de evento extremo de precipitação.

O diagnóstico geral da microbacia do rio Quixudi mostrou que a mesma é caracterizada em seus aspectos hidromorfológicos gerais como uma área de drenagem do tipo endorréica, com 141,5 km², composta por uma rede hidrográfica efêmera, de padrão dendrítico com extensão total de 105,20 km.

A análise linear da rede hidrográfica mostrou uma bacia de 4ª ordem, com sinuosidade transicional, baixa razão de bifurcação e extensão do percurso superficial relativamente longa. Essa morfologia da drenagem indica que, em condições normais de precipitação, a microbacia é pouco susceptível a inundações, ficando esta susceptibilidade a cargo de anormalidades no campo meteorológico.

A análise areal mostrou uma bacia de formato comprido, com textura grosseira e baixas densidades de drenagem e hidrográfica, resultando num coeficiente de manutenção de 1.344,7 m²·m⁻¹. O formato comprido da bacia, teoricamente, afasta a possibilidade de ocorrência de inundações, porém, em caso de evento extremo de precipitação, a susceptibilidade da microbacia a esses eventos é potencializada pelas baixas densidades de drenagem e hidrográfica.

A análise altimétrica revelou uma amplitude máxima de 184,0 m, concentrada na área de jusante da microbacia, causando uma notável diferença no relevo dessa área em relação ao restante da bacia. Essa diferença é marcada por uma zona de cisalhamento que atravessa a bacia longitudinalmente, separando a parte mais alta da bacia (ao sul) da parte mais baixa (ao norte). Esta inflexão no relevo interfere na dinâmica interna da drenagem, alterando a declividade e a sinuosidade do canal principal e potencializando a susceptibilidade à inundações em caso de evento extremo de precipitação.

O relevo na microbacia é classificado como predominantemente plano a suave ondulado, com declividade média de 5,78%, sendo considerada muito fraca. Com isso, a razão de relevo é de apenas 10 m e o índice de rugosidade de 137 (adimensional) condiz com um relevo pouco dissecado. Isto implica que a susceptibilidade a erosão nos solos da microbacia, a depender do fator declividade, também é muito fraca.

A análise do uso e ocupação da superfície revelou uma bacia predominantemente rural, com manchas urbanizadas nos extremos norte e sul, relativas às cidades de São Vicente do Seridó e Soledade, respectivamente. O ambiente é caracterizado por uma forte antropização, com destaque para as áreas de pastagem e áreas consolidadas na zona rural, e para as áreas edificadas nas zonas rural e urbana, fato que potencializa a susceptibilidade a inundação.

O fator climático é a característica que tem maior implicância na definição da susceptibilidade da microbacia a inundação, já que se trata de uma bacia de drenagem efêmera, com clima semiárido de estepe, sendo possível afirmar que a ocorrência de eventos extremos de precipitação tem maior influência sobre as inundações na microbacia do que as características morfométricas analisadas. A média da precipitação acumulada na microbacia é de 411,3 mm, sendo que a área mais chuvosa, em decorrência da maior disponibilidade hídrica, é também a mais antropizada.

A análise da litologia e pedologia da microbacia mostrou uma estrutura geológica datada do Paleoproterozóico ao Neoproterozóico, com litologia marcada predominantemente pelo Complexo Serrinha-Pedro Velho. A microbacia faz parte da Província Borborema e é cortada pela zona de cisalhamento Barra de Santa Rosa e pelo Lineamento Patos. O grupo dos Neossolos Regolíticos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Planossolos Nátricos Órticos ocupa uma área de 48,04 Km² dentro da microbacia, correspondente a área mais chuvosa e mais antropizada. A susceptibilidade à erosão desses solos potencializa o assoreamento dos reservatórios identificados na microbacia, diminuindo sua capacidade de contenção de enchentes e aumentando a chance de inundação na área de jusante.

A modelagem hidrodinâmica revelou que a mancha de inundação no vale a jusante da barragem Santa Teresa se estendeu por 1,009 km², com um volume total de 1.027.950 m³, que afetaram diversas formas de uso e ocupação da superfície nas zonas rural e urbana, sendo que o impacto sobre a área urbana foi maior em alcance, em profundidade da onda de cheia e em tempo de duração da inundação. A quantidade de imóveis atingidos registrou 118 edificações, em sua maioria residenciais, localizadas em cinco bairros do município de Soledade.

A população residente nesses imóveis atingidos é composta por um total de 192 pessoas, sendo 95 identificadas com sexo masculino e 97 com o sexo feminino, ambas autodeclaradas

(ou declaradas pelos pais, no caso das crianças e bebês) cisgênero. Esta população foi classificada por faixa etária em seis categorias que contabilizaram 12 bebês (entre 0 e 5 anos), 27 crianças (entre 6 e 11 anos), 27 adolescentes (entre 12 e 17 anos), 32 jovens (entre 18 e 29 anos), 71 adultos (entre 30 e 59 anos) e 23 idosos (pessoas com 60 anos ou mais). Este total da população atingida está distribuído em 60 famílias, sendo que 18 dessas famílias habitam as áreas potencialmente inundáveis do bairro Bela Vista, 17 famílias habitam o bairro Chico Pereira, 2 famílias pertencem ao bairro Conjunto Mutirão, 22 famílias são afetadas no bairro Jardim Cruzeiro I e apenas uma família é atingida pela mancha de inundação do bairro Santa Teresa.

O perfil socioeconômico da população atingida pela mancha de inundação revelou que, apesar de o município de Soledade ocupar a 10ª posição no *ranking* estadual do Índice de Progresso Social (IPS), a maior parte da população afetada se encontra em condição de vulnerabilidade social, com 73,3% das famílias habitantes em áreas potencialmente inundáveis possuindo renda familiar entre 0,5 e 2,0 salários mínimos mensais, tendo como base de cálculo o salário mínimo em vigor no mês de março de 2025, qual seja R\$ 1.518,00 (um mil, quinhentos e dezoito Reais).

Na simulação, o impacto da onda de cheia submergiu algumas edificações urbanas em uma coluna d'água de mais de 2 m de profundidade, por mais de 15 horas, como no caso específico do bairro Bela Vista. O tempo de chegada da onda de máxima inundação no vale a jusante foi de três horas e 16 minutos. Até que se atinja o máximo nível, pode-se considerar que o tempo de evacuação do vale a jusante é razoavelmente favorável. Isto, considerando a situação hipotética proposta na modelagem. Em caso de evento extremo de precipitação pode ser que o rompimento ocorra por galgamento ocasionado pelo rompimento em série dos reservatórios de montante, como já ocorreu no passado na própria barragem analisada, resultando numa inundação mais brusca e forte.

A pontuação alcançada pela barragem na classificação do risco mostrou uma categoria de risco média, para um dano potencial associado alto. Isto porque a área urbana afetada é formada por habitações residenciais em sua maioria, fato que resulta no potencial de perda de vidas humanas.

Vale salientar que esta pesquisa tem várias limitações, que vão desde o tipo de dado analisado — que são dados secundários, sem a devida averiguação de campo — até a classificação da barragem feita sem o devido conhecimento técnico das metodologias e procedimentos adequados. Porém, a crítica com relação a carência de monitoramento regular com divulgação de relatório de segurança permanece válida, uma vez que a população

ribeirinha tem direito a saber sobre os riscos que corre sem que se perceba. Também, o atraso na aquisição de dados e no processamento dos mesmos só permitiu a delimitação da mancha de inundação poucos dias antes da apresentação deste trabalho, fato que prejudicou uma análise mais profunda no campo socioambiental.

Uma sugestão para estudos futuros é a simulação do rompimento em série dos dois reservatórios (Açude Tapuio e Barragem Santa Teresa) utilizando dados espaciais de maior acurácia, bem como os dados de precipitação do ano de 1985. Assim seria possível simular com mais fidelidade o evento de rompimento ocorrido naquele ano e comparar seus efeitos no quadro atual do vale a jusante da barragem.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Mayza Lopes de. **Análise social no Assentamento Santa Tereza no município de Soledade-PB**. 2016. Monografia (Licenciatura Plena em Geografia) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

AMORIM, A. T.; PIROLI, E. L. Análise ambiental da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Bonito: uma abordagem morfométrica e do uso e cobertura das terras. **Entre-Lugar**, v. 11, n. 22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.30612/el.v11i22.11318>. Acesso em: 20 jun. 2024.

AMORIM, C. D.; LOUREIRO, C. V.; SOPCHAKI, C. H. **Caracterização ambiental do município de Quixadá-CE como subsídio ao planejamento ambiental e gestão territorial**. Revista Equador, v. 10, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26694/equador.v10i3.12977>. Acesso em: 6 jul. 2024.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Encarte especial sobre a bacia do Rio Doce: rompimento da barragem em Mariana/MG**. 2016. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf. Acesso em: [data de acesso].

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas de Vulnerabilidade a Inundações**. 2014. ISBN: 978-85-8210-025-7. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/2cfa808b-b370-43ef-8107-5c3bfd7acf9c/attachments/Atlas_de_Vulnerabilidade_a_Inundaes.pdf. Acesso em: 4 jul. 2024.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **GeoPackage (Bacias Hidrográficas Ottocodificadas [Níveis Otto 1-7])**. Catálogo de metadados da ANA. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 (BHO 2017). 2012. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b228d007-6d68-46e5-b30d-ale191b2b21f>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, Paulo César. **Variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática**. Material didático de uso na disciplina LCE, v. 30, 2010.

AZAMBUJA, A. M. S.; CONCEIÇÃO, R. A. C. **Caracterização fisiográfica da bacia do Rio Parauapebas/PA**. Revista Foco, v. 17, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n2-116>. Acesso em: 23 jun. 2024.

AZAMBUJA, A.; CONCEIÇÃO, A.; PEREIRA, V. R. Caracterização fisiográfica da Bacia do Ribeirão Xambioazinho, Xambioá-TO. **Repositório Institucional de Geociências**, v. 2, 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22759.5>. Acesso em: 11 ago. 2024.

BARBOSA, P. G. et al. **Uso de geotecnologias integradas a um sistema de Informações Geográficas (SIG) na análise da situação ambiental da região do parque estadual do Jabre/PB**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0013>. Acesso em: 5 set. 2024.

BAYLY, Ian Albert Edgar; Williams, William David. **Inland waters and their ecology**. Longman Publishing Group, 1973.

BECK, Ulrich. **La sociedade del riesgo**. Madri: Paidós, 1998.

BERTONE, Pedro; MARINHO, Clarice. **Gestão de riscos e resposta a desastres naturais: A visão do planejamento**. 2013.

BEZERRA, Ana Cleide Nascimento. **Aspectos da circulação atmosférica de grande escala sobre o Norte e Nordeste do Brasil relacionados com a temperatura da superfície do mar**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

BORSATO, F. H. **Caracterização física das bacias de drenagem do município de Maringá e os postos de combustíveis como potenciais poluidores**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/2010/artigos_teses/teses_geografi_a2008/dissertacaouemfabianohugoborsato.pdf. Acesso em: 6 jul. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.285, de 29 de dezembro de 2021**. Altera as Leis nos 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, 11.952, de 25 de junho de 2009, que dispõe sobre regularização fundiária em terras da União, e 6.766, de 19 de dezembro de 1979, que dispõe sobre o parcelamento do solo urbano, para dispor sobre as áreas de preservação permanente no entorno de cursos d'água em áreas urbanas consolidadas. Brasília, DF, 29 de dezembro de 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens Destinadas à Acumulação de água Para Quaisquer Usos, à Disposição Final Ou Temporária de Rejeitos e à Acumulação de Resíduos Industriais, Cria o Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens e Altera a Redação do Art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF, 20 set. 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nº 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF, 10 de abr. 2012.

CAMPANHARO, W. A. **Diagnóstico físico da bacia do rio Santa Maria do Doce-ES**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010. Disponível em: https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/TCC_Wesley%20Augusto%20Campanharo.pdf. Acesso em: 8 ago. 2024.

CASTRO, Lucas Siqueira de; ALMEIDA, Eduardo Simões de. **Desastres e desempenho econômico: avaliação do impacto do rompimento da barragem de Mariana**. Geosul, v. 34, n. 70, p. 406-429, 2019.

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo-GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e

geoprocessamento. **Scientia Plena**, v. 5, 2009. Disponível em: <https://scientiaplenu.org.br/sp/article/view/623>. Acesso em: 5 jul. 2024.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Anuário da sala de situação do CEMADEN**. v. 3, n. 1, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/aceso-a-informacao/anuario-da-sala-de-situacao/anuario-da-sala-de-situacao-do-cemaden-ano-2019-vol-3-2022.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.

CHELIZ, P. M.; RODRIGUES, J. A.; LADEIRA, F. S. B. **O papel do meio físico e relevo na ocupação humana: potencialidades, vulnerabilidades e impactos ambientais (enchentes, erosão e assoreamento) na trajetória histórica da região de Araraquara (SP)**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p584-632>. Acesso em: 8 jul. 2024.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. Reimpressão da edição de 1959. Caldwell, NJ, 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Editora Blucher, 1999.

CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos). **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**. Estabelece Critérios Gerais de Classificação de Barragens Por Categoria de Risco, Dano Potencial Associado e Pelo Volume do Reservatório, em Atendimento Ao Art. 7º da Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 04 set. 2012.

CORDEIRO, L. M. M. et al. **Diagnóstico geoambiental da microbacia hidrográfica do Riacho Santa Luzia no município de Soledade–PB**. Laboratório de Cartografia e Geoprocessamento (LCG), Centro de Ciências Aplicadas e Educação (CCA), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2017. Disponível em: http://www.cca.ufpb.br/lcg/contents/documentos/artigos/a14_luciola_diagnostico-geoambiental.pdf/view. Acesso em: 9 jul. 2024.

CRIPPA, Monica et al. **Global anthropogenic emissions in urban areas: patterns, trends, and challenges**. Environmental Research Letters, v. 16, n. 7, p. 074033, 2021.

DAMASCENO SOUZA, M. D. et al. **Physiographic and land use and land cover characterization of the Treze de maio watershed in Western Amazonia**. Research, Society and Development, v. 12, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39278>. Acesso em: 15 jul. 2024.

DANTAS, E. L. et al. **Sistema Sm-Nd em rocha-total aberto versus fechado: comportamento isotópico em zonas de alta deformação**. Geologia USP. Série Científica, v. 2, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2002000100010>. Acesso em: 13 ago. 2024.

DIAS, O. L. L.; LIMA, G. B.; HOLLANDA, M. P. **Caracterização morfométrica da sub-bacia hidrográfica do Alto Santa Maria da Vitória, Espírito Santo–Brasil**. Revista

Interdisciplinar da FARESE, v. 3, 2021. Disponível em: <https://revista.grupofaveni.com.br/index.php/revistainterdisciplinardafarese/article/view/19>. Acesso em: 10 ago. 2024.

DORNELLAS, C. P. et al. Análise Morfométrica da Bacia Do Alto Rio Paraíba, Região Semiárida Do Estado Da Paraíba. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1757>. Acesso em: 11 ago. 2024.

DORNELLAS, Patrícia da Conceição et al. **Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio Paraíba, Região Semiárida do Estado da Paraíba**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 21, n. 3, 2020.

DUMMER, J.; VERDUM, R. Controle estrutural nos processos erosivos hídricos e na arenização, bacia hidrográfica do Arroio Miracatu - Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 24, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2318>. Acesso em: 4 jul. 2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Súmula da 10. reunião técnica de levantamento de solos**. 1979. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212100/1/SNLCS-Miscelania-1-1979.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2024.

FALCÃO, C. L. C. A teoria geral dos sistemas e o entendimento dos processos erosivos em uma bacia hidrografia. **Revista Equador**, v. 9, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.26694/equador.v9i4.10621>. Acesso em: 8 ago. 2024.

FARIAS, A.; MENDONÇA, F. **Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do Sistema Ambiental Urbano**. Sociedade & Natureza, v. 34, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63717>. Acesso em: 8 ago. 2024.

FERNANDEZ, Paulo; MOURATO, Sandra; MOREIRA, Madalena. **Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis**. Revista Recursos Hídricos, v. 34, n. 1, p. 63-73, 2013.

FERREIRA, V. Rios temporários. **Revista de Ciência Elementar**, v. 11, 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.24927/rce2023.023>. Acesso em: 9 ago. 2024.

FERREIRA; Santos. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE, Folha SB.24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco**. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM, 2000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5359>. Acesso em: 16 jun. 2024.

FIOCRUZ. **Avaliação dos impactos sobre a saúde do desastre da mineração da Vale (Brumadinho, MG)**. 2019. Disponível em: https://www.icict.fiocruz.br/sites/www.icict.fiocruz.br/files/Relat_Brumadinho_impacto_Saude_01022019.pdf. Acesso em: [data de acesso].

FRANÇA, G. V. D. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba**. 1968. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.1900.tde-20231122-093027>. Acesso em: 11 ago. 2024.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

GUERRA, Sidney. **Direito internacional ambiental**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2006.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, 1945. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2). Acesso em: 18 jul. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Clima do Brasil**. 2002. Disponível em: https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf. Acesso em: 9 set. 2024.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>. Acesso em: 11 jun. 2024.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Regional fact sheet – Central and South America**. 2021b. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Central_South_America.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

IPS Brasil, **Índice de Progresso Social**. [livro eletrônico]: qualidade de vida nos 5.570 municípios do Brasil. Belém, PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2024. Disponível em: [https://fly.storage.tigris.dev/small-sky-6309/8693c991-3601-449d-a1b1-6681890f9e2e-IpsBrasil2024_Geral_PT_WEB_nova%20-%20\(ajustado\).pdf](https://fly.storage.tigris.dev/small-sky-6309/8693c991-3601-449d-a1b1-6681890f9e2e-IpsBrasil2024_Geral_PT_WEB_nova%20-%20(ajustado).pdf) Acesso em 13 de março de 2025.

JANSEN, R. B. **Dams and public safety**. [Washington, D.C.?]: Denver, Colo.: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation; For sale by the Supt. of Docs., U.S. G.P.O., 1983.

KATOPODES, N.; SCHAMBER, D. **Applicability of Dam-Break Flood Wave Models**. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 5, p. 702-721, 1983.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. **Variabilidade Decenal e Multidecenal**. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J. (Org.). **Clima das Regiões Brasileiras e Variabilidade Climática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

KAYANO, Mary T. *et al.* **A further analysis of the tropical Atlantic SST modes and their relations to north-eastern Brazil rainfall during different phases of Atlantic Multidecadal Oscillation**. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 12, p. 4006-4018, 2016.

KAYANO, Mary T.; ANDREOLI, Rita V. **Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño–Southern Oscillation**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 111, n. D13, 2006.

LAPIS. Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélite. **Baixe o Shapefile do novo Semiárido brasileiro e elabore mapas incríveis com a nova delimitação da região**. 2024. Disponível em: <https://mapadamina.org.br/shapefile>. Acesso em: 17 ago. 2024.

LASCHEFSKI, Klemens Augustinus. **Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão.** AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política, v. 2, n. 1, p. 98, 2020.

LAURIANO, André William. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação Entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LIMA, Kleber Carvalho; PEREZ FILHO, Archimedes; CUNHA, Cenira Maria Lupinacci. **Características morfológicas e morfométricas dos canais de drenagem da bacia hidrográfica do rio Bom Sucesso-Semiárido da Bahia/Brasil.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, n. 4, 2014.

LONDE, Luciana de Resende; SORIANO, Erico; COUTINHO, Marcos Pellegrini. **Capacidades das instituições municipais de Proteção e Defesa Civil no Brasil: desafios e perspectivas.** Revista do Departamento de Geografia, v. 30, p. 77-95, 2015.

LOPES, J. R. A. et al. Caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica do Açude Grande no semiárido do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p429-442>. Acesso em: 11 jul. 2024.

MAO, Jian *et al.* **Management system for dam-break hazard mapping in a complex basin environment.** ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 6, n. 6, p. 162, 2017.

MARK, O.; WEESAKUL, S.; APIRUMANEKUL, C.; ARRONNET, S. B.; DJORDJEVIC, S. **Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding.** Journal of Hydrology, p. 284-299, 2004.

MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues; VASCONCELOS JÚNIOR, Francisco das Chagas. **O clima da Região Nordeste entre 2009 e 2017: monitoramento e previsão.** Parcerias Estratégicas, v. 22, n. 44, p. 63-79, 2017.

MARTINS, Rafael D'Almeida; FERREIRA, Leila da Costa. **Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local?.** Revista de Administração Pública, v. 45, p. 611-641, 2011.

MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens.** 1990. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MCCULLY, P. **When things fall apart: The Technical Failure of Large Dams.** In: _____. **Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams.** p. 101-132, 2001.

MCCULLY, P. **World rivers review.** v. 10, n. 1, p. 1-16, 1999.

MCPHILLIPS, Lauren E. et al. **Defining extreme events: A cross-disciplinary review.** Earth's Future, v. 6, n. 3, p. 441-455, 2018.

MÉNDEZ-LÁZARO, Pablo et al. **A heat vulnerability index to improve urban public health management in San Juan, Puerto Rico.** International Journal of Biometeorology, v. 62, n. 5, p. 709-722, 2017.

MOSTARDA NETO, N. **Uso de diferentes métodos de obtenção do tempo de concentração e suas implicações no cálculo de vazão na bacia do Ribeirão Itaim, Taubaté-SP**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/6981>. Acesso em: 17 jul. 2024.

MOURA, B. T. et al. Análise Morfométrica Da Bacia Do Rio Taperoá, Semiárido Do Nordeste Brasileiro Utilizando O Modelo Swat. **XXV Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**, 2023. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/191/XXV-SBRH0860-1-0-20230618-215940.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.

MOURA, M. O. et al. Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública. **Caderno de Geografia**, v. 26, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p259>. Acesso em: 6 jul. 2024.

MULLER-SALBURG, L. **Vajont catástrofe – a personal review**. Engineering Geology, v. 24, n. 1-4, p. 423-444, 1987.

NASA JPL. **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001**. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G93T9FD9>. Acesso em: 27 jun. 2024.

NASCIMENTO, Joelma Vieira do. **Física e Meio Ambiente: uma análise harmônica de dados pluviométricos**. 2014. Monografia (Licenciatura Plena em Física) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

NASCIMENTO, R. B. et al. **Caracterização hidrogeomorfológica da microbacia do rio Marobá, para o planejamento das práticas agropecuárias e conservação dos recursos naturais**. Revista Brasileira de Ciências da Amazônia, v. 13, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.47209/2317-5729.v.13.n.1.7371>. Acesso em: 2 set. 2024.

NEGRI, Silvio Moisés. **Segregação sócio-espacial: alguns conceitos e análises**. Coletâneas do Nosso Tempo, v. 8, n. 8, 2008.

NEVES-SILVA, Priscila; HELLER, Léo. **Rompimento da barragem em Brumadinho e o acesso à água das comunidades atingidas: um caso de direitos humanos**. Ciência e Cultura, v. 72, n. 2, p. 47-50, 2020.

NOBRE, Antonio Donato et al. **HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent**. Hydrological Processes, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.

NOBRE, N. C. *et al.* **Caracterização morfométrica, climática e de uso do solo da Bacia hidrográfica do rio Farinha-MA**. Acta Iguazu, v. 9, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v9i1.19021>. Acesso em: 5 jul. 2024.

OMM (Organização Meteorológica Mundial). **Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970-2019)**, 2021.

PAIVA, R. *et al.* **Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/05/CriteriosAdaptacaoMudancaClimaticaChuvasCheiasExtremasSul.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2024.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de *et al.* **Barragens e rompimentos: compilação histórica nacional e internacional**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2019.

PANIZZO, A. *et al.* **Great landslide event in Italian artificial reservoirs**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 5, p. 733-740, 2005.

PARAÍBA. **Resolução Nº 003, de 11 de fevereiro de 2016**. Define a periodicidade, a qualificação da equipe responsável, o conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança regular e especial de Barragem. AESA-PB, 11 fev. 2016.

PARMIGIANI, Marcos Andrei. **Análise das áreas inundadas e os respectivos impactos devido aos diferentes valores do coeficiente de rugosidade no rompimento da Barragem de Monjolinho**. 2017. Monografia (Graduação) – Universidade Federal da Fronteira Sul, 2017.

PELLING, M. **The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience**. Sterling, VA: Earthscan Publications Ltd., 2003.

PISANIELLO, J. D.; ZHIFANG, W.; MCKAY, J. M. **Small dams safety issues – engineering/policy models and Community responses from Australia**. *Water Policy*, v. 8, p. 81-95, 2006.

POWELL, D. M. **Drylands Rivers: processes and forms**. In: Parsons, A. J.; Abrahams, A. D. (eds.). **Geomorphology of Desert Environments**. 2. ed. Springer Science+Business Media B.V., 2009. p. 333-373.

PROSKE, Dirk. **Comparison of dam failure frequencies and failure probabilities**. *Beton- und Stahlbetonbau*, v. 113, p. 2-6, 2018.

RENNÓ, C. D. *et al.* **HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia**. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RODRIGUES, M. C. **Geoprocessamento**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Agropecuária) – Escola Técnica Estadual Professor Carmelino Corrêa Júnior, 2023. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/19101>. Acesso em: 4 ago. 2024.

RODRIGUES, V. A. *et al.* Análise morfométrica da microbacia do Ribeirão das Araras-SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 21, 2013. Disponível em: <https://faef.revista.inf.br/site/e/engenharia-florestal-21-edicao-12013.html#tab360>. Acesso em: 5 jul. 2024.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 8, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>. Acesso em: 11 ago. 2024.

SABINO, H. et al. Morfometria de bacias hidrográficas de primeira ordem em áreas agrícolas sob sistema plantio direto: delimitação e propensão à erosão e inundação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1770>. Acesso em: 10 jun. 2024.

SAMPAIO, A. S. *et al.* Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias rurais. **XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2016. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=544>. Acesso em: 5 jul. 2024.

SANCHEZ, Luiz Enrique. **Conceitos e Definições**. In: _____. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 18-45.

SANTOS, A. M. D. *et al.* **Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil**. Revista Ambiente & Água, v. 7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.945>. Acesso em: 9 ago. 2024.

SANTOS, Ana Jéssica de Sousa *et al.* **Açudagem na sub-bacia hidrográfica do Rio Jaibaras**. Revista da Casa da Geografia de Sobral, v. 21, n. 2, p. 771-783, 2019.

SANTOS, E. J. D.; FERREIRA, C. A.; SILVA JR., J. M. F. **Geologia e recursos minerais do Estado da Paraíba**. CPRM, 2002. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/5034>. Acesso em: 24 ago. 2024.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, 1956. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2). Acesso em: 8 ago. 2024.

SCHUMM, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. **Geological Society of America Bulletin**, v. 74, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[1089:SOAROT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[1089:SOAROT]2.0.CO;2). Acesso em: 9 ago. 2024.

SEIE (Secretaria de Estado da Infraestrutura da Paraíba). **Relatório sobre o Processo de Licitação, Contratação e Execução da Barragem de Camará**. Paraíba, 2004.

SHERBININ, Alex de; SCHILLER, Andrew; PULSIPHER, Alex. **The vulnerability of global cities to climate hazards**. Environment and Urbanization, v. 19, n. 1, p. 39-64, 2007.

SILVA, E. D. G. *et al.* **Biomassa e nutrientes na parte aérea de espécies arbóreas da Caatinga, Rio Grande do Norte**. Nativa, v. 10, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i1.13093>. Acesso em: 4 jun. 2024.

SILVA, G. C. *et al.* Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho Rangel-Piauí, Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, 2018. Disponível em: http://doi.org/10.18677/EnciBio_2018B22. Acesso em: 3 jul. 2024.

SORIANO, E. **Confiança, incertezas e discursos sobre os riscos de colapso de barragem na UHE Itaipu Binacional: o processo de vulnerabilização dos moradores a jusante**. 2012. 184 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOUSA, L. A.; SILVA, J. B.; ARAÚJO, S. M. S. Uso e ocupação da superfície a partir do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) na Área de Proteção Permanente (APP) do açude Santa Teresa em Soledade-PB. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36489>. Acesso em: 3 jun. 2024.

SOUZA, Ê. G. F. *et al.* Delimitação e caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho do Navio, Pernambuco, a partir de dados SRTM processados no QGIS. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 14, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1530-1540>. Acesso em: 21 ago. 2024.

SOUZA, L. D. S. *et al.* Modelagem Espacial de Chuvas Intensas no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863730059>. Acesso em: 22 ago. 2024.

SPRAGENS, L. C.; MAYFIELD, S. M. **In safe hands: a profile of the ASDSO**. International Water Power & Dam Construction, 10 maio 2005. Disponível em: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurein-safe-hands-a-profile-of-the-asdso/>. Acesso em: [data de acesso].

STEPHENSON, David B.; DIAZ, H. F.; MURNANE, R. J. **Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events**. In: _____. **Climate Extremes and Society**. p. 11-23, 2008.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, 1952. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2). Acesso em: 1 jul. 2024.

STRAHLER, A. **Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks**. In: CHOW, V. (Ed.). **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1964. p. 439-476.

SUDENE. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do Semiárido**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024.

TARGA, M. D. S. *et al.* Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.905>. Acesso em: 11 jul. 2024.

TE CHOW, Ven. **Open channel hydraulics**. 1959.

TERRA, Bianca de Farias *et al.* **Ecologia de peixes de riachos intermitentes**. *Oecologia Australis*, v. 25, n. 2, p. 619-634, 2022.

THIESSEN, A. H. **Precipitation averages for large areas**. *Monthly Weather Review*, v. 39, 1911. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2). Acesso em: 4 ago. 2024.

TORQUETTI, Z. S. C.; Farias, R. S. **Barragens industriais em MG: classificação quanto ao potencial de dano**. *Brasil Mineral*, n. 232, p. 32-38, 2004.

TOWNS, D. R. **Limnological characteristics of a south Australian intermittent stream, Brown Hill Creek**. *Marine and Freshwater Research*, v. 36, n. 6, p. 821-837, 1985.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS. Hydrologic Modeling System – User’s Manual (version 2.1.2)**. Hydrologic Engineering Center, Davis, 2008.

USP (Universidade de São Paulo). **Base Cartográfica Digital Georreferenciada das Zonas Climáticas, conforme Köppen, do Brasil**. 2021. Distribuída pelo Centro de Estudos da Metrópole da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP. Disponível em: <http://doi.org/10.55881/CEM.db.clk001>. Acesso em: 5 jun. 2024.

USP. Universidade de São Paulo. **Base Cartográfica Digital Georreferenciada das Zonas Climáticas, conforme Köppen, do Brasil**. 2021. Distribuída pelo Centro de Estudos da Metrópole da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://doi.org/10.55881/CEM.db.clk001>. Acesso em: 5 jun. 2024.

VERÓL, Aline Pires. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. 2010. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VERÓL, Aline Pires; MIGUEZ, Marcelo Gomes; MASCARENHAS, Flávio Cesar Borba. **Propagação da Onda de Ruptura de Barragem Através de um Modelo Quasi-2D**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 1, p. 165-176, 2012.

VIGNOLI, Jorge Rodríguez. **Segregación residencial socioeconómica: ¿qué es?, ¿cómo se mide?, ¿qué está pasando?, ¿importa?**. Santiago: CEPAL, n. 16, 2001. (Série Población y Desarrollo).

VILLAÇA, Flávio. **Efeitos do Espaço Sobre o Social na Metrópole Brasileira**. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPUR, 7., 1997. **Anais**. Disponível em: <http://agbcampinas.com.br/site/wp-content/uploads/2021/03/efeitos96.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

WILLINGHOEFER, Matheus *et al.* **Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe**. 2015. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

ZANANDREA, Franciele *et al.* **Capacidade do modelo HAND na representação de uma mancha de inundação comparado ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2019.

ZHANG, Limin *et al.* **Dam failure mechanisms and risk assessment**. John Wiley & Sons, 2016.