



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
MESTRADO EM ENERGIA E AMBIENTE**

SANDY KELLY MONTEIRO DE MENEZES

**RUPTURA DE UM PEQUENO RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO E
SEUS EFEITOS NA TOPOGRAFIA DO LEITO**

ACARAPE

2023

SANDY KELLY MONTEIRO DE MENEZES

**RUPTURA DE UM PEQUENO RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO E
SEUS EFEITOS NA TOPOGRAFIA DO LEITO**

Dissertação submetida como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Energia e Ambiente da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus de Auroras. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

ACARAPE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Menezes, Sandy Kelly Monteiro de.

M582r

Ruptura de um pequeno reservatório no semiárido Brasileiro e seus efeitos na topografia do leito / Sandy Kelly Monteiro de Menezes. - Redenção, 2023.
80fl: il.

Dissertação - Curso de Mestrado Acadêmico em Energia e Ambiente, Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

1. Barragem - Rompimento. 2. Dinâmica de Sedimentos. 3. Semiárido. I. Mamede, George Leite. II. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 636

SANDY KELLY MONTEIRO DE MENEZES

**RUPTURA DE UM PEQUENO RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO E
SEUS EFEITOS NA TOPOGRAFIA DO LEITO**

Dissertação submetida como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Energia e Ambiente da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus de Auroras. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovado em: 01/ 02/ 2023

BANCA EXAMINADORA



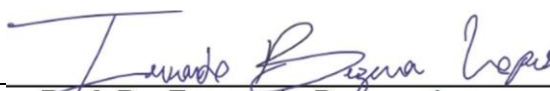
Prof. Dr. George Leite Mamede (Orientador)
Universidade de Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa
Universidade de Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Luís Gustavo Chaves da Silva
Universidade de Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“Nada te perturbe, Nada te espante, Tudo passa, Deus não muda, A paciência tudo alcança; Quem a Deus tem, Nada lhe falta: Só Deus Basta.”

(Santa Teresa D'Ávila)

AGRADECIMENTOS

À Deus por ser a minha força diária, que durante essa caminhada de pesquisa, me conduziu sempre na certeza de que essa seria mais uma das suas promessas em minha vida, crendo que no final tudo daria certo. A ti Senhor, toda a minha gratidão!

Aos meus pais, Maria Veleuda Monteiro de Menezes e Antônio Claudio de Menezes, que sempre me apoiaram e me deram condições para a realização dos meus sonhos, sempre presentes na minha vida, me acalmando e com palavras positivas quando tudo parecia impossível. Sem vocês esse sonho jamais se tornaria realidade. Aos meus amados pais, minha eterna gratidão, e amor, eu amo eternamente vocês!

Ao meu irmão Antônio Cláudio de Menezes Júnior, sempre disposto a me ajudar quando necessitei, me mostrando a importância de um irmão na vida de um ser humano.

Ao meu amado esposo, Ederson Patrício de Sousa, por nunca ter soltado minha mão, pelos inúmeros conselhos, por sempre estar presente na minha vida, me ajudando, me apoiando, acalentando e me tornando a cada dia uma pessoa melhor.

Aos meus sobrinhos, Antônio Enzo Oliveira de Menezes e Pedro Ícaro de Sousa Menezes, pela paz, felicidade e tranquilidade que transmitem em seus olhares de criança. Amo verdadeiramente os dois!

A minha cunhada, Raquel do Nascimento Oliveira, por sua amizade e companheirismo.

Aos amigos de sala, que de alguma forma me ajudaram em certos momentos da pesquisa.

Ao meu orientador, prof. Dr. George Leite Mamede, pela excelente orientação, compreensão e dedicação. Sempre disponível quando necessitei, me auxiliando nos momentos mais tensos da pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora, prof. Dr. Alexandre Cunha Costa, prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes, e prof. Dr. Luís Gustavo Chaves da Silva, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB), por me conceder toda estrutura para a realização da pesquisa e por ter feito parte de mais esse sonho realizado.

RESUMO

Barragens não monitoradas e construídas sem critérios técnicos adequados podem romper e causar sérios danos ao meio ambiente e a sociedade circunvizinha, como comumente registrado em barragens de áreas rurais do Estado do Ceará. O objetivo deste estudo é analisar a dinâmica de sedimentos na área de inundação de um pequeno reservatório do semiárido brasileiro, como resultado da ruptura da barragem e dos eventos de escoamentos posteriores com potencial para remobilização de sedimentos previamente depositados. Para geração do modelo digital de terreno e estimativa de alterações decorrentes de processos erosivos, realizou-se um levantamento topográfico baseado na combinação de dados de levantamento de solo (estação total e GNSS) e aéreo usando Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). A análise dos eventos extremos de precipitação máxima diária foi realizada utilizando a distribuição Gumbel para uma série de 49 anos de dados (1974-2022), com discretização pelo método de Tborga. Alternativamente, utilizou-se a curva IDF disponível para o Posto Pentecoste, localizado na Fazenda Experimental da UFC onde está situado o açude Escola, baseada em 19 anos de dados (1964 a 1981, e 1984). Para geração da vazão associada ao evento extremo que provocou a ruptura da barragem utilizou-se o método racional. Comparando-se dois modelos digitais de terreno do açude Escola (2017 e 2021) foi possível estimar um ganho percentual de 9,7% na capacidade de acumulação do reservatório como resultado de processos erosivos decorrentes da ruptura da barragem e de eventos posteriores de escoamento ocorridos pelo leito seco. O evento extremo que resultou no colapso da estrutura apresentou uma precipitação diária de 105,6 mm (sétimo maior evento da série) e 10,6 anos de tempo de retorno. A vazão máxima associado ao tempo de concentração na bacia estimada pode ter variado entre 4,03 m³/s e 14,97 m³/s, dependendo do método aplicado e da abrangência da área de contribuição. Os resultados mostram ainda que a onda de cheia gerada pode ter provocado o galgamento e consequente ruptura do maciço, que já apresentava alguns riscos à segurança detectado previamente como a presença de formigueiros e vegetação de grande porte na barragem e densa vegetação no canal de aproximação do vertedor.

Palavras-chave: Rompimento de barragem; Dinâmica de Sedimentos; Semiárido.

ABSTRACT

Unmonitored dams built without adequate technical criteria can break and cause serious damage to the environment and the surrounding society, as commonly seen in dams in rural areas of the State of Ceará. The objective of this study is to analyze the dynamics of sediments in the flood area of a small reservoir in the Brazilian semi-arid region, as a result of dam rupture and subsequent flow events with potential for remobilization of previously deposited sediments. To generate the digital terrain model and estimate alterations resulting from erosion processes, a topographic survey was carried out based on the combination of ground (total station and GNSS) and aerial survey data using a Remotely Piloted Aircraft (RPA). The analysis of extreme events of daily maximum precipitation was performed using the Gumbel distribution for a series of 49 years of data (1974-2022), with discretization using the Torga method. Alternatively, the IDF curve available for the Pentecoste Post, located at the UFC Experimental Farm where the Escola dam is located, was used, based on 19 years of data (1964 to 1981, and 1984). To generate the flow associated with the extreme event that caused the rupture of the dam, the rational method was used. Comparing two digital terrain models of the Escola dam (2017 and 2021) it was possible to estimate a percentage gain of 9.7% in the reservoir's storage capacity as a result of erosion processes resulting from the dam rupture and subsequent runoff events that occurred through the dry bed. The extreme event that resulted in the collapse of the structure presented a daily precipitation of 105.6 mm (seventh largest event in the series) and 10.6 years of return time. The maximum flow associated with the time of concentration in the estimated basin may have varied between 4.03 m³/s and 14.97 m³/s, depending on the method applied and the scope of the contribution area. The results also show that the flood wave generated may have caused the overtopping and consequent rupture of the massif, which already presented some security risks previously detected, such as the presence of anthills and large vegetation in the dam and dense vegetation in the approach channel of the spillway.

Key words: Dam failure; Sediment dynamics; Semiarid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo, com destaque para a Bacia Experimental do Vale do Curú – BEVC e a bacia hidrográfica do açude Pentecoste com sua rede de reservatórios

Figura 2 – Elevação da Bacia Experimental

Figura 3 – Declividade da Bacia Experimental

Figura 4 – Tipos de solos da Bacia Experimental

Figura 5 – Detalhes da estação e GNSS em operação no levantamento topográfico da área de inundação do açude Escola em janeiro de 2021

Figura 6 – Detalhes do Drone ainda em solo para levantamento topográfico da área de inundação do açude Escola em janeiro de 2021

Figura 7 – Posicionamento dos pontos de GNSS e estação total no açude Escola

Figura 8 – Pontos (K1, K2 e K3) demarcados ao longo do leito do açude Escola

Figura 9 – Obtenção da amostra de solo através de cilindro

Figura 10 – Série de peneiras utilizadas de abertura de malhas conhecidas

Figura 11 – Amostra do ponto K1 separada em solo de grãos grossos e finos

Figura 12 – Lavagem do solo com água corrente

Figura 13 – Material do ponto K1 retido nas peneiras

Figura 14 – Material do ponto K2 retido nas peneiras

Figura 15 – Material do ponto K3 retido nas peneiras

Figura 16 – Percentual de grãos dos pontos K1, K2 e K3

Figura 17 – Quebra dos torrões do solo

Figura 18 – Cápsulas com K1, K2 e K3 em estufa

Figura 19 – Posicionamento das seções traçadas na área

Figura 20 – Instalação de pinos de erosão confeccionados a partir de vergalhões de ferro de meia polegada, com detalhe do trecho do maciço que colapsou em abril de 2020

Figura 21 – Erosão a esquerda do pino implantado no leito do rio

Figura 22 – Detalhe da seção da parede da barragem que colapsou em 2020

Figura 23 – Imagens do Google Earth com vista do açude Escola em 08/2016 (a) e 08/2020 (b)

Figura 24 – Modelos Digitais de Terreno do açude Escola de 2017 (Silveira, 2019) e 2021 obtidos com base em levantamentos topográficos realizados

Figura 25 – Curvas de nível açude Escola geradas com base no levantamento topográfico realizado em 2021, no contexto desta pesquisa, com destaque para o traçado da calha natural por processos erosivos

Figura 26 – Variação de cota-volume do açude Escola em levantamentos distintos

Figura 27 – Evolução do perfil longitudinal de 2017 (Silveira, 2019) e de 2021

Figura 28 – Pinos instalados exposição de 30cm

Figura 29 – Erosão em um dos pinos instalados

Figura 30 – Vegetação no leito e vertedouro do açude Escola

Figura 31 – Estimativa dos níveis d'água atingidos no vertedor da barragem com o evento que resultou na ruptura da estrutura

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesos obtidos após granulometria por peneiramento

Tabela 2 – Valores de parâmetros para obtenção da massa específica aparente seca

Tabela 3 – Detalhamento da calha natural com base, estimativa de área das seções e volume de sedimentos erodidos

Tabela 4 – Procedimento de cálculo do volume do maciço erodido no processo de ruptura da parede da barragem em janeiro de 2021

Tabela 5 – Cota-área-volume da área em estudo

Tabela 6 – Cota-área-volume da área em estudo – levantamento realizado em 2017

Tabela 7 – Comparativo de volumes dos modelos digitais de terreno de 2017 (Silveira, 2019) e de 2021, realizado no contexto desta pesquisa

Tabela 8 – Estimativa de alterações do terreno nas seções transversais de monitoramento por pinos de erosão/deposição

Tabela 9 – Tempo de recorrência do evento que resultou na ruptura da barragem do açude Escola em 23 de abril de 2020, com base em séries de dados máximos do posto pluviométrico de Pentecoste (1974 – 2022) para diferentes durações (1, 3, 5, 7 e 10 dias)

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para estimativa da vazão

Tabela 11 – Intensidade da chuva para Tr de 10,6 anos

Tabela 12 – Vazão encontrada com base nos métodos utilizados

Tabela 13 – Estimativa do nível d'água atingido no vertedor

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ARP – Aeronave Remotamente Pilotada

BEVC – Bacia Experimental Vale do Curú

CAV – Cota-área-volume

GNSS – Sistema Global de Navegação por Satélite

MDT – Modelo Digital de Terreno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
	2.1 Objetivo geral	17
	2.2 Objetivos específicos	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
	3.1 Pequena Açudagem	18
	3.2 Sedimentos em Leito de Reservatórios	20
	3.3 Barragens	21
	3.4 Rompimento de Barragens	21
	3.4.1 Casos de rompimento de barragem	23
4	METODOLOGIA	26
	4.1 Área Experimental	26
	4.2 Levantamento Topográfico na Bacia do Açude Escola	29
	4.3 Análise granulométrica do leito do Açude Escola	31
	4.4 Análise da massa específica aparente seca do material depositado no açude Escola	38
	4.5 Estimativa de Alterações Topográficas no Perfil Longitudinal do Açude Escola	39
	4.6 Estimativa do Acréscimo da Capacidade de Armazenamento do Açude Escola	44
	4.7 Estimativa do evento extremo de precipitação e escoamento superficial na ruptura da barragem do açude Escola	45
	4.7.1 Análise de chuvas intensas pelo método de Gumbel	45
	4.7.2 Estimativa do Tempo de Concentração	45
	4.7.3 Estimativa da Vazão do Evento pelo Método Racional	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
	5.1 Análise de Alterações do Perfil Longitudinal do Açude Resultantes do Rompimento da Barragem	48
	5.2 Estimativa do Volume Erodido da Parede do Maciço no Processo de Rompimento	49
	5.3 Análise da Variação da Topografia do Açude Escola pelo Rompimento da Barragem	51
	5.4 Estimativa de alterações no terreno provocado por eventos de escoamento posteriores ao rompimento da barragem	57
	5.5 Análise das condições hidrológicas e de segurança na ruptura da barragem do Açude Escola	60

6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	64
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO I – SEÇÕES DO LEITO DO RIO	74
	ANEXO II – SEÇÕES DA PAREDE DA BARRAGEM	77
	ANEXO III – SEÇÕES DO LEITO DO RIO APÓS MONITORAMENTO	79

1 INTRODUÇÃO

A água é considerada um dos recursos naturais de maior intensidade de utilização, e fundamental para a existência e manutenção da vida, devendo estar disponível em quantidade e qualidade suficientes para suprir sua demanda (BRAGA et al., 2005). Verifica-se que apenas 0,3% da reserva total da água do planeta pode ser utilizada para o consumo, com 0,01% disponíveis em fontes de superficiais e 0,29% em fontes subterrâneas (FUNASA, 2004).

Considerando as condições climáticas da região semiárida do Brasil, com chuvas de grande intensidade e de curta duração, concentradas em poucos meses do ano, têm-se adotado nas últimas décadas, a construção de inúmeras barragens artificiais, como alternativa para armazenamento de grande massa de água (LIMA NETO et al. 2011; MALVEIRA et al. 2012; MAMEDE et al. 2012; DE ARAÚJO E MEDEIROS, 2013; PETER et al. 2014).

No semiárido brasileiro, uma alternativa para a distribuição dos recursos hídricos é a pequena açudagem associada à construção de reservatórios estratégicos. Mais de 90% da água demandada no estado do Ceará é fornecida através de barragens, contudo, os reservatórios no semiárido regularizam apenas 40% da vazão afluente, sendo “perdido” 60% do recurso por evaporação e vertimento (ARAÚJO et al., 2005).

As barragens ao passar dos tempos tornaram-se peças chaves no âmbito social, uma vez que por meio delas é garantido o acúmulo e abastecimento para a população, assegurando o fornecimento hídrico (SAMPAIO, 2014). No entanto, essas construções não são consideradas tecnologias atuais, dado que estão sendo implantadas a nível mundial a mais de 7.500 anos (OLIVEIRA, 2016). Considerando a pequena açudagem, a mesma representa a maior parcela dos reservatórios superficiais, porém, os estudos sobre sua importância na gestão de recursos hídricos ainda são incipientes (ALEXANDRE, 2012; BRAGA et al., 2017 e 2019).

Verifica-se que o estado do Ceará apresenta em média 105.813 barragens (FUNCEME, 2021), e a medida em que esse número aumenta no semiárido brasileiro, vem a ser inevitável que cada novo barramento cause impactos hidrológicos sensíveis nos demais barramentos localizados a jusante (ARAÚJO et al., 2005). O abastecimento de água no Ceará é majoritariamente suprido por reservatórios

superficiais, considerados essenciais para a sustentabilidade da região (MAMEDE *et al.*, 2012).

O estado do Ceará está localizado quase que inteiramente no polígono das secas, por esse motivo apresenta vulnerabilidade à garantia de oferta hídrica, dessa forma, uma alternativa para garantir esse recurso em quantidade e qualidade é o fortalecimento do sistema de gestão (ARAÚJO *et al.*, 2005). Dessa forma, a utilização de reservatórios no semiárido brasileiro, é uma das primeiras alternativas de Gestão de Recursos Hídricos para o controle e minimização dos impactos oriundos de um período de seca (NETO, 2017).

De acordo com Gomes (2019), na fase inicial na construção dos barramentos de pequeno porte, não há dados satisfatórios obtidos através de estudos preliminares, como por exemplo: laboratoriais e experimentos de campo, ou mesmo, a execução de análise de estabilidade, no qual acaba deixando a estrutura mais propícia ao aparecimento de rupturas, fissuras, infiltrações, entre outros. O autor ainda ressalta que um desastre causado pelo o rompimento de uma barragem, causa um dano imensurável em diversas áreas, seja ela social, ambiental e econômico.

De acordo com os Relatórios de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Água (ANA - 2019, 2020 e 2021) registrou-se na última década 83 casos de rompimento de barragens e outros 207 incidentes com barragens no território brasileiro, sendo que 67,5% dos acidentes e 73,9% dos incidentes ocorreram após 2019. Alguns destes eventos estão associados ao rompimento de pequenos barragens em cascata, como destaca-se a seguir para eventos no Estado do Ceará: açude Pontal em Quiterianópolis após o colapso de 5 barramentos a montante; e no caso dos açudes Valdemir, Orlando, Jardel, Gerardo Bastos, Olho D'água, Ipueiras e Pedro Peres em Hidrolândia, também com registro de rompimento em cascata. No contexto desta pesquisa, o açude Escola, localizado na Bacia Experimental do Vale do Curú, que também registrou ruptura da barragem ocorrida em 23 de abril de 2020, será investigado em detalhes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a dinâmica de sedimentos na área de inundação de um pequeno reservatório do semiárido brasileiro, como resultado da ruptura da barragem e escoamentos posteriores a isso.

2.2 Objetivos específicos

- Gerar modelo digital de terreno da área de inundação do açude Escola;
- Estimar a quantidade de sedimentos removidos do leito, oriundos do rompimento da barragem;
- Analisar a dinâmica de remobilização de sedimentos ao longo do perfil longitudinal do açude Escola;
- Estimar a magnitude e recorrência do evento extremo que causou o rompimento e outros fatores que contribuíram para o colapso da estrutura.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Pequena Açudagem

Uma rede com grandes quantidades de reservatórios ocorrem em boa parte do globo: Gana (ANNOR et al., 2009), Zimbábue (SAWUNYAMA et al., 2006), Austrália (Fowler et al., 2015), Nordeste do Brasil (MAMEDE et al., 2012, NETO, et al., 2021; RABELO, et al. 2021;), Sul da Amazônia brasileira (ARVOR et al., 2018), Sul do Brasil (COLLISCHONN et al., 2011), Etiópia (LASAGE et al., 2015), França (HABETS et al., 2014), Índia (MIALHE et al., 2008), África do Sul (HUGHES & MANTEL, 2010), Sul da Síria (AVISSE et al., 2017), Oeste da África (LIEBE et al., 2005).

Dessa forma, no território brasileiro as bacias hidrográficas estão sendo caracterizadas pelo alto número de construções de reservatórios, no qual, apresentam-se de forma isolada ou contínua (BARBOSA, 2010), sendo muito comum que as bacias possuam redes de alta densidade de reservatórios (MAMEDE et al., 2009).

A região Nordeste do Brasil é caracterizada pela frequente busca por soluções para as severas e recorrentes secas na região, e isso desencadeou à prática de construção de grandes números de reservatórios (CAMPOS, 2000). Nos últimos 100 anos foram construídos milhares de pequenos reservatórios no Nordeste, para suprir a demanda de água, na maioria dos casos, pelos próprios proprietários das terras (COLLISCHONN, et al., 2011).

No estudo de Malveira et al. (2012), foi avaliado o impacto de uma densa rede de reservatórios na disponibilidade hídrica na Bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, situada no semiárido do nordeste brasileiro, onde constataram que densas redes de reservatórios são comuns no cenário do semiárido Nordestino. Os autores ainda enfatizaram que a literatura não trata de redes consideradas igualmente densas em outra região do planeta.

Construções sequenciadas de reservatórios em uma mesma bacia hidrográfica geram diversos problemas, pois quando se constrói um reservatório, a vazão afluente é alterada, e os volumes de escoamento superficial, oriundos das precipitações, são retidos em maior ou menor intensidade no reservatório, ocasionando conflitos entre os usuários, uma vez que, o usuário no qual se encontra a jusante, supostamente sempre será o prejudicado (ROBAINA, 2013).

Rabelo et al. (2021) também afirmam que a presença de pequenos reservatórios em uma bacia hidrográfica, diminui a vazão e armazenamento de volumes de reservatórios a jusante, aumentando, dessa forma, os volumes de pequenos reservatórios ao longo da bacia.

A política utilizada no controle hídrico formou uma rede de reservatórios de alta densidade, considerada como um sistema complexo de ser gerido, os conflitos e usos pela água tende a aumentar a cada dia em esfera global, uma vez que a problemática de uma alta densidade de reservatórios pode acontecer também nas próximas décadas em áreas consideradas não secas (NETO et al., 2011).

Essa política de construção de reservatórios na maioria dos casos acontece sem nenhum controle ou conhecimento técnico-científico, resultando no surgimento de uma rede de reservatórios de alta densidade, com predominância de reservatórios pequenos e de médio porte, dificultando dessa forma, o manejo do sistema (TOLEDO & ALCANTARA, 2019).

Pequenos reservatórios, quando analisados individualmente, não causariam grandes impactos a um sistema hidrológico, pois sua capacidade máxima de armazenamento é insignificante, contudo, o efeito acumulado de uma densa rede de reservatórios pode ser maior do que o impacto de um único grande reservatório (NETO et al., 2021). O autor ainda ressalta que a falta de informações sobre pequenos reservatórios não monitorados, existentes em densas redes, não devem ser um fator de impedimento para considerá-los na gestão de recursos hídricos, uma vez que é possível estimar o volume armazenado, entre outras características em por meio de sensoriamento remoto

Portanto, uma densa rede de reservatórios pode impactar negativamente o armazenamento de água em grandes reservatórios, e consequentemente prolongar as secas hidrológicas na escala da bacia (NETO et al., 2021). Por outro lado, grandes quantidades de pequenos reservatórios em uma única bacia, podem ser uma alternativa para aumentar o acesso descentralizado à água para pequenas comunidades rurais, sem que haja competição pelo uso da água (RABELO et al., 2021).

Mamede et al. (2009) enfatizam, em seu estudo de retenção hídrica e de sedimentos em reservatórios de montante da bacia hidrográfica do Benguê/CE, a relevância de uma densa rede de reservatórios, uma vez que possibilita à espacialização dos recursos hídricos ao longo da bacia, e retenção hídrica dos

reservatórios localizados a montante, referente a uma parcela significativa do escoamento gerado na bacia, favorecendo as comunidades circunvizinhas o uso do recurso com mais facilidade, devido a distribuição espacial do recurso.

3.2 Sedimentos em Leito de Reservatórios

O sedimento é um elemento muito importante do ecossistema aquático, atuando como habitat de muitas espécies. Os sedimentos de um reservatório são compostos por material proveniente de constantes processos de intemperismo e erosão sobre superfícies com estrutura mineral e rochosa, que acabam soltando pequenas partículas desse material, sendo posteriormente transportadas pelo vento ou água, levando consigo compostos poluidores presentes no solo, na água e no ar (QUINÁGLIA, 2006).

O sedimento de um reservatório é tido como uma das partes mais complexas do reservatório, dado que, este é encarregado pelo transporte, liberação e acumulação de nutrientes e de compostos danosos ao meio ambiente (GUIMARÃES, 2011).

Peixoto (2019) ressalta que os sedimentos se depositam em leitos de reservatórios pela influência do próprio e se estendem para montante e para jusante, não possuindo distribuição uniforme. Zanin et al. (2017) enfatiza que a deposição dos sedimentos no reservatório é acomodada pela circulação das próprias águas do lago artificial, que na maioria dos casos é multidimensional e não uniforme, havendo circulações periódicas e permanentes.

Em bacias hidrográficas, parte dos sedimentos transportados pela rede de drenagem é depositada ao longo do curso d'água e outra atinge reservatórios superficiais ou lagos, com redução importante da velocidade dos fluxos e consequente assoreamento do corpo hídrico, com mudança nos padrões de qualidade da água. Portanto, no Nordeste do Brasil, a deposição de sedimentos produzidos nas bacias hidrográficas de densas redes de reservatórios superficiais acarreta impactos significativos na disponibilidade hídrica destas estruturas (SILVEIRA, 2019).

O sedimento é formado por uma fração composta por material inorgânico e uma fração de material orgânico, variando em proporção, tamanho e partículas e em composição conforme a dinâmica do local estudado, dessa forma, os processos naturais que são responsáveis pela formação dos sedimentos podem ser modificados

por atividades antrópicas, sendo que a análise de sedimentos oferece informações significativas sobre o meio ambiente em questão (GUIMARÃES, 2011).

3.3 Barragens

As barragens sempre foram peças fundamentais para o desenvolvimento da humanidade, portanto, sua construção está ligada sobretudo à escassez de água em períodos secos do ano e à consequente necessidade de armazenamento da mesma (SOARES, 2014).

Na construção de uma barragem o curso natural de um rio é interditado por uma estrutura, que permite o acúmulo da água a montante da construção que pode ser utilizada para diferentes fins (PEREIRA, 2019).

As barragens podem ser construídas de terra, enrocamento, concreto ou mista, podendo ser utilizado mais de um tipo de material em sua seção, como por exemplo, a barragem de terra e enrocamento (SOARES, 2014).

A barragem de terra ou aterro é considerada a mais comum no Brasil, possui vales muito largos e ombreiras suaves (SOUZA, 2013). Esses tipos de construções também possuem mais de uma finalidade, inclusive o uso múltiplo, como exemplo, a armazenagem de água potável, o controle de cheias, a irrigação, a navegação, geração de energia elétrica, entre outros (SOARES, 2014).

3.4 Rompimento de Barragens

Uma das maiores preocupações com barragens no território brasileiro, segundo especialistas nacionais, é que o projeto, a construção e a manutenção das barragens seguem normas e critérios diferentes, fator que reduz a confiabilidade na segurança dessas estruturas (ANA, 2013).

O Brasil, até o ano 2010, não tinha uma lei que regulasse a segurança de barragens, portanto, levando em conta o risco oferecido pelas barragens que estão distribuídas no País, em 2010, foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB), que estabelece um conjunto de atribuições e responsabilidades além de instrumentos para a gestão do risco de rompimento dessas estruturas (BRASIL, 2010).

A Lei de Segurança de Barragens no Brasil nº 12.334/2010 abrange barragens destinadas à acumulação de água para diversos fins (irrigação, abastecimento de

água, controle de cheias, geração de eletricidade, etc), até mesmo a disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (ANA, 2013).

Havendo uma falha e o rompimento desse tipo de estrutura, todo o ecossistema aquático sofre graves mudanças, na química da água, da morfologia do canal e da composição do leito e do sedimento (PINTO, 2018). Com isso, para que esses imprevistos não aconteçam, as barragens devem ser monitoradas e geridas para garantir um maior tempo de vida útil (MARIANI, 2006). É importante que a construção de uma barragem passe sempre por quatro etapas fundamentais: o projeto, a construção, a exploração e a observação (SOARES, 2014).

É de extrema importância a verificação da vida útil na construção de um reservatório, sendo levado em consideração o acréscimo da sedimentação, em seu volume total (TEIXEIRA, 2019).

Um estudo realizado pelo Banco Mundial mostrou que em média a vida útil dos reservatórios mundiais caiu de 100 para 22 anos, levando em comparação à média de todos os países (CARVALHO et al., 2000), e isso se deve à falta de planejamento antecedente a construção do reservatório.

Embora a construção de barragens seja algo comum, o risco de ruptura destas estruturas não é nulo, portanto, é necessário levá-lo em consideração, e ser quantificado, com o intuito de minimizar os potenciais efeitos negativos na pós ruptura de barragem (JÓNATAS, 2013). O autor ainda salienta que, por mais que a probabilidade de ocorrência de rompimento de barragens, com consequências catastróficas, seja hoje considerada reduzida, existem exemplos no mundo todo de acidentes que trouxeram prejuízos materiais e perdas irreparáveis, alguns com vítimas fatais, por isso, torna-se necessário o controle da segurança estrutural da barragem através de inspeções periódicas.

Mota (2017) destaca que barragens podem romper devido ao aparecimento de diversas causas, sendo elas: galgamento, erosão interna, escorregamento de fundação, ação de ondas da albufeira, e erosão da fundação a jusante da barragem.

O tempo que se leva desde o início de uma falha até à sua estabilização, em barramento do tipo terra pode ser bem variável, podendo variar entre poucos minutos (ruptura abrupta) ou durar horas (ruptura gradual) (JÓNATAS, 2013).

Sendo assim, é de extrema importância o conhecimento do desenvolvimento do processo de ruptura de uma barragem, que vai desde a formação da brecha até a propagação da onda de cheia que se forma a jusante do reservatório, ajudando a

elaboração de planos de ações emergenciais para a área, e reduzindo impactos oriundos da ruptura da barragem (MOTA, 2017).

3.4.1 Casos de rompimento de barragem

O primeiro rompimento de que se tem notícia, foi a Sadd el Kafara e ficava localizada no antigo Egito, ela foi construída com o objetivo de abastecimento e logo após sua conclusão sofreu um galgamento por não possuir uma estrutura vertente levando toda o maciço a destruição (AGUIAR, 2014).

Em 1219 rompeu uma barragem de terra perto de Grenoble na França (BERGHOUT & MEDDI 2016). Em 1923, 1935 e 1985, três casos de falha de barragem na Itália causaram a perda de muitas vidas humanas nas regiões de Gleno, Molare e Stava, respectivamente (LUINO et al., 2014), a barragem de Gleno, localizada nos Alpes centrais da Itália, rompeu alguns dias após o primeiro enchimento completo do reservatório, o que objetivou o rompimento da barragem foram as deficiências estruturais (PILOTTI et al., 2011). Em 1881, na Argélia, a barragem Fergoug I, ceifou aproximadamente 200 vidas humanas na região de Mascara (GAAGAI et al., 2020).

O histórico de rompimentos de barragens não é totalmente documentado, muitos dados podem apenas ser estimados, pois muitos dos eventos já ouvidos falar envolvendo barramentos aconteceram depois do ano 1000 a.C., os acidentes com barragens são tão antigos quanto o próprio histórico de construção das mesmas.

Levando em conta as barragens com objetivo de mineração, o registro mais recente iniciou-se em 1986 quando a barragem do grupo Itaminas rompeu-se, em Itabirito/MG, ceifando a vida de sete pessoas; 2001 foi a barragem da mineração Rio Verde, em Nova Lima/MG; 2003 houve rompimento da barragem da Indústria Cataguases de Papel em Minas Gerais que atingiu os rios Pomba e Paraíba do Sul, deixando 600 mil pessoas sem água, no entanto, o mais grave episódio que provocou a maior tragédia dessa natureza no mundo ocorreu em 05/11/2015 em Mariana/MG, com o rompimento da barragem de rejeitos Fundão, da mineradora Samarco, fundada em 1977 (LACAZ et al., 2016).

No Brasil, em 1960, foi o da barragem de Orós no Ceará, o rompimento da barragem se deu ainda quando a mesma estava em construção, a barragem de terra possuía um formato semicircular com 54 metros de altura e 620 metros de

comprimento, em março de 1960 uma onda de cheia iniciou o galgamento da estrutura, inicialmente com uma lâmina de 30 centímetros acima da crista (AGUIAR, 2014).

Os casos de acidentes e incidentes com barragens no Brasil são reportados anualmente. Em 2019, segundo a ANA, foram reportados 8 acidentes e 32 incidentes, no qual tiveram inúmeras causas, sendo mais comum o relato de risco de rompimento de barragens devido a cheias, erosões ou percolação excessiva, problemas em vertedores, inundações de galerias e rompimento do canal de adução, alguns desses casos foram: barragem Salgadinho em Sobral/CE; barragem Passagem da Onça em Viçosa do Ceará/CE; barragem Mimosos em Capoeiras/PE; barragem de rejeitos Top Trino em Ouro Preto/MG; barragem Prefeito Manoel Severo Lins Neto em Rancharia/SP (ANA, 2019). Em janeiro do mesmo ano, rompeu-se a barragem BI, da mina Córrego do Feijão, de responsabilidade da Vale S.A. O rompimento levou a óbito, de imediato, 272 pessoas, entre as quais, além de expor ambiente e população às toxicidades presentes nos rejeitos de mineração (COSTA et al., 2020).

No ano de 2020 foram relatados 44 acidentes e 95 incidentes com barragens em 16 diferentes estados brasileiros, sendo 40% deles concentrados apenas em Minas Gerais. Os quantitativos observados são superiores aos verificados em todos os anos anteriores, a maioria significativa dos acidentes e incidentes ocorreu devido a intensas precipitações, que ocasionaram cheias históricas que acabaram por transbordar muitas barragens, causando o rompimento de algumas, como por exemplo: Rompimento da Barragem Bom Jesus em Mata de São João/BA; Barragem Salu em Simões Filho/BA; Barragem da Fazenda Santa Cruz em Catalão/GO; Barragem Zumbi em Arcoverde/PE; Barragem em Arinos em Arinos/MG; Barragem de água da Fazenda Nossa Senhora de Lourdes em Ituitaba/MG; Barragem Fazenda São Lourenço em Pontalina/GO (ANA, 2020).

Já no ano de 2021 os quantitativos observados no Brasil foram superiores aos verificados em todos os anos anteriores, com exceção do ano de 2020, que foi um ano excepcionalmente atípico, os casos deram destaques na região central do País devido aos eventos de chuvas intensas nos meses de janeiro, fevereiro e sobretudo dezembro de 2021, portanto, os casos desses eventos em barragens em cascata destacam-se: Galgamento com rompimento de 6 barragens no município de Curral de Dentro/MG; galgamento com rompimento de 2 barragens no município de Vitória da

Conquista/BA; e galgamento sem rompimento de 4 barragens no município de Catalão/GO (ANA, 2021).

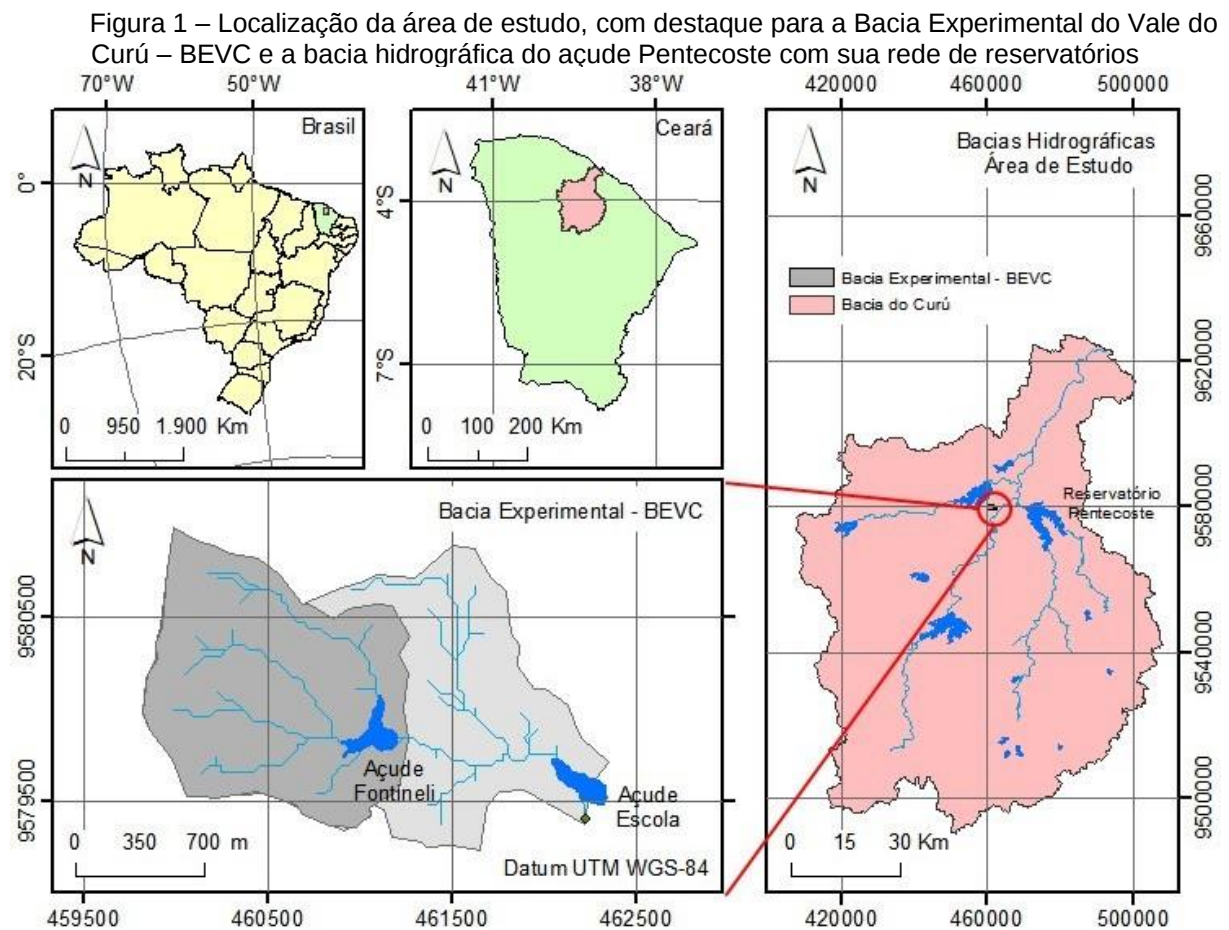
Um número ainda maior de rompimentos ocorre em barragens de pequeno porte, na grande parte das vezes, particulares, mas que mesmo assim podem causar danos significativos, embora seja relativamente abundante o material bibliográfico disponível sobre acidentes com grandes barragens, as informações disponíveis sobre as pequenas estruturas são difíceis de serem encontradas, sendo esse tipo de acidente muitas vezes sequer documentado (AGUIAR, 2014).

4 METODOLOGIA

4.1 Área Experimental

O estudo da dinâmica de sedimentos apresentado neste trabalho foi realizado no açude Escola, localizado na Bacia Experimental Vale do Curú (BEVC), na zona rural do município de Pentecoste/CE, pertencente à Universidade Federal do Ceará, com área de contribuição de 256 ha (Figura 1). O açude Fontineli com área de 156 ha controla aproximadamente 61% da BEVC, enquanto a porção de escoamento direto da BEVC (não controlada pelo açude Fontineli) perfaz uma área de 100 ha.

O açude Escola apresenta uma área de inundação de cerca de 3,6 ha e capacidade de armazenamento de aproximadamente 51.600 m³. Conforme Silveira (2019), o referido açude possui suas coordenadas em 3°48'12" S e 39°20'24" O, e de acordo com dados locais, o reservatório teve sua construção finalizada no ano de 1952, com objetivo de abastecimento humano e irrigação.



Fonte: autora, 2023

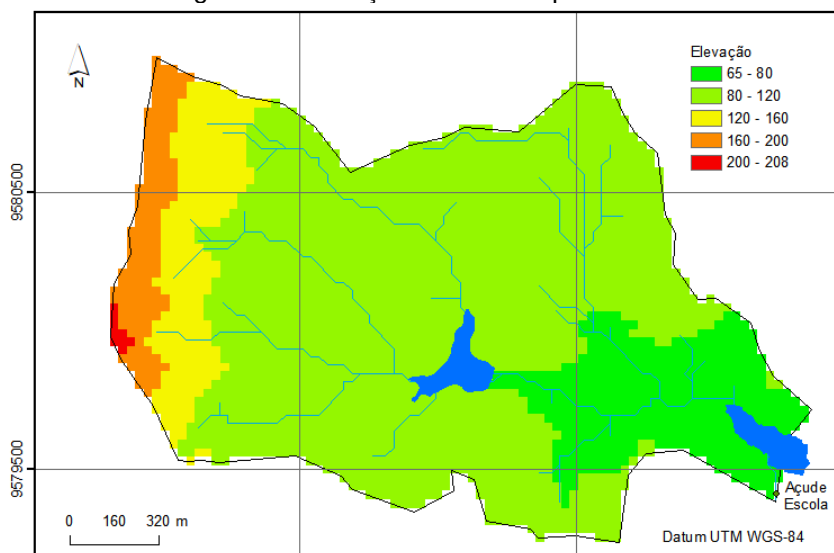
O município de Pentecoste está situado na porção centro-norte do estado do Ceará, e possui seus limites com os municípios de Umirim, Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Apuiarés, Tejuçuoca, Caridade, Maranguape, São Luís do Curú e Itapajé, compreendendo-se uma área de aproximadamente 1.352 km² (CPRM, 1998). O acesso rodoviário até o município de Pentecoste se dá, pela BR-222 e CE-235, possuindo distância da capital do Ceará de aproximadamente 100 Km.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSw'h', quente e semiárido com chuvas irregulares distribuídas de fevereiro a maio, com precipitação média anual de 801 mm, evapotranspiração potencial de 2.130 mm/ano; temperatura média anual de 27,1 °C e umidade relativa média do ar de 73,7% (EMBRAPA, 2001).

A vegetação predominante é a Caatinga, que de acordo com Lemos (2006) representa uma vegetação com particularidades florísticas singular, sendo que de acordo com a origem indígena é caracterizada como mata aberta e clara. O autor ainda ressalta que é uma “comunidade vegetacional padronizada pelo seu aspecto fisionômico, resultante da caducifolia de suas espécies no período seco, assumindo caráter tropofítico e refletindo a semiaridez no clamado polígono das secas.”

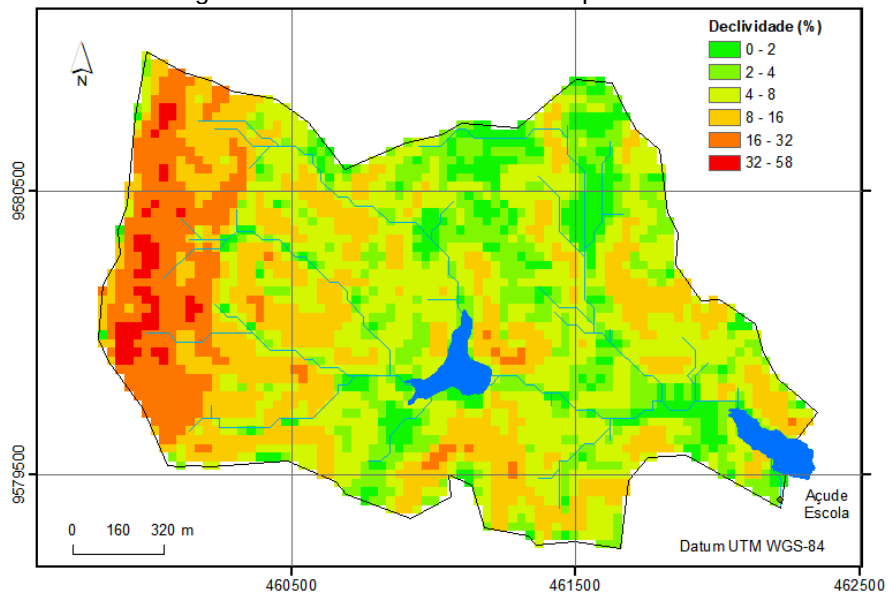
A BEVC apresenta elevação variando entre 65 a 208 metros acima do nível do mar (Figura 2), com maiores altitudes localizadas nos planaltos posicionados nas bordas a oeste da bacia, nessas áreas, prevalecem as maiores declividades da bacia (entre 16 e 58%), contudo, nas proximidades do exutório observa-se baixas declividades, variando de 0% a 2% (Figura 03).

Figura 2 – Elevação da bacia experimental



Fonte: autora, 2023

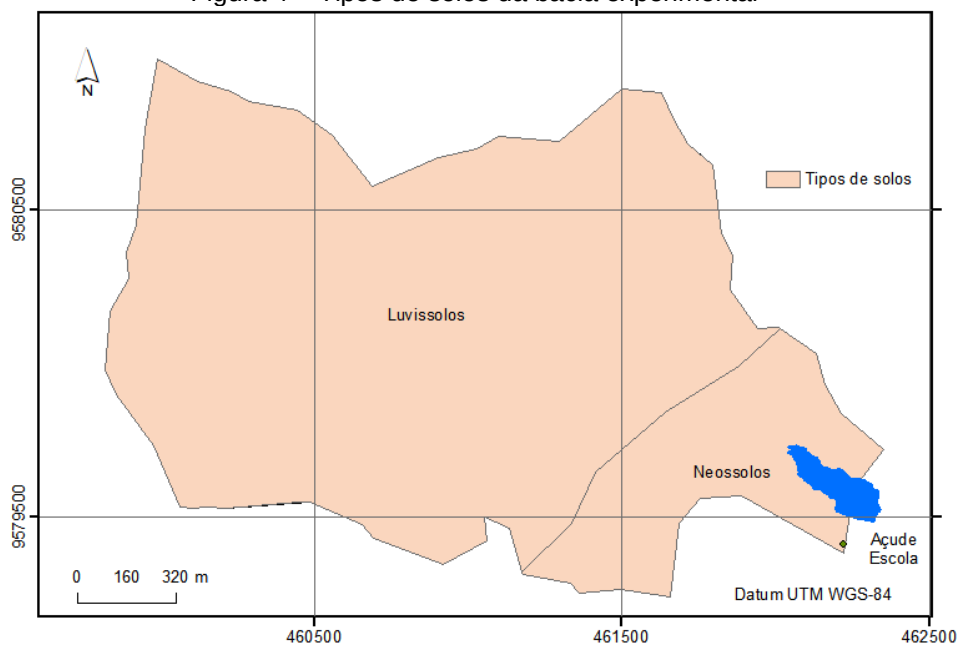
Figura 3 – Declividade da bacia experimental



Fonte: autora, 2023

Os tipos de solos presentes na BEVC são luvisolos (solos apresentando acúmulo de argila), e neossolos (solos pouco evoluídos). De acordo com a Figura 4, o solo de menor proporção existente na bacia são os neossolos, com área de 0,46 km² de extensão, onde o açude Escola encontra-se inserido, e em sua maior extensão têm-se os luvisolos, com uma área de aproximadamente 2,38 km².

Figura 4 – Tipos de solos da bacia experimental



Fonte: Silveira, 2019

4.2 Levantamento Topográfico na Bacia do Açude Escola

Para geração do modelo digital de terreno e estimativa de alterações decorrentes de processos erosivos, realizou-se levantamento topográfico baseado na combinação de três bases de dados, sendo: estação total, Sistema Global de Navegação por Satélite – GNSS (Figura 5), e Aeronave Remotamente Pilotada – ARP do tipo multirrotor (Figura 6). Observa-se nas Figuras 5 e 6 os equipamentos em operação utilizados no início do levantamento topográfico da área de inundação do reservatório.

Figura 5 – Detalhes da estação total e GNSS em operação no levantamento topográfico da área de inundação do açude Escola em janeiro de 2021



Fonte: autora, 2023

Figura 6 – Detalhes do drone ainda em solo para levantamento topográfico da área de inundação do açude Escola em janeiro de 2021



Fonte: autora, 2023

Uma estação total Topcon ES-105 foi utilizada para detalhamento do terreno sobretudo ao longo do perfil longitudinal do reservatório que sofreu maiores alterações em decorrência da ruptura da barragem e dos eventos de escoamento posteriores.

A estação total é um instrumento eletrônico utilizado na medida de ângulos e distâncias, a evolução de equipamentos de medida de ângulos e distâncias trouxe como consequência o surgimento deste novo instrumento. Portanto, com uma estação total é possível determinar ângulos e distâncias do instrumento até pontos a serem examinados. Com o auxílio de trigonometria, os ângulos e distâncias podem ser usados para calcular as coordenadas das posições atuais (X, Y e Z) dos pontos examinados, ou a posição dos instrumentos com relação a pontos conhecidos, em termos absolutos (LBB Engenharia, 2019).

A tomada de pontos detalhados no terreno natural foi realizada com o GNSS Trimble R6 RTK, no qual serviu como referência para correções entre aerolevanteamento e as condições no terreno, definindo também os pontos de controle e checagem.

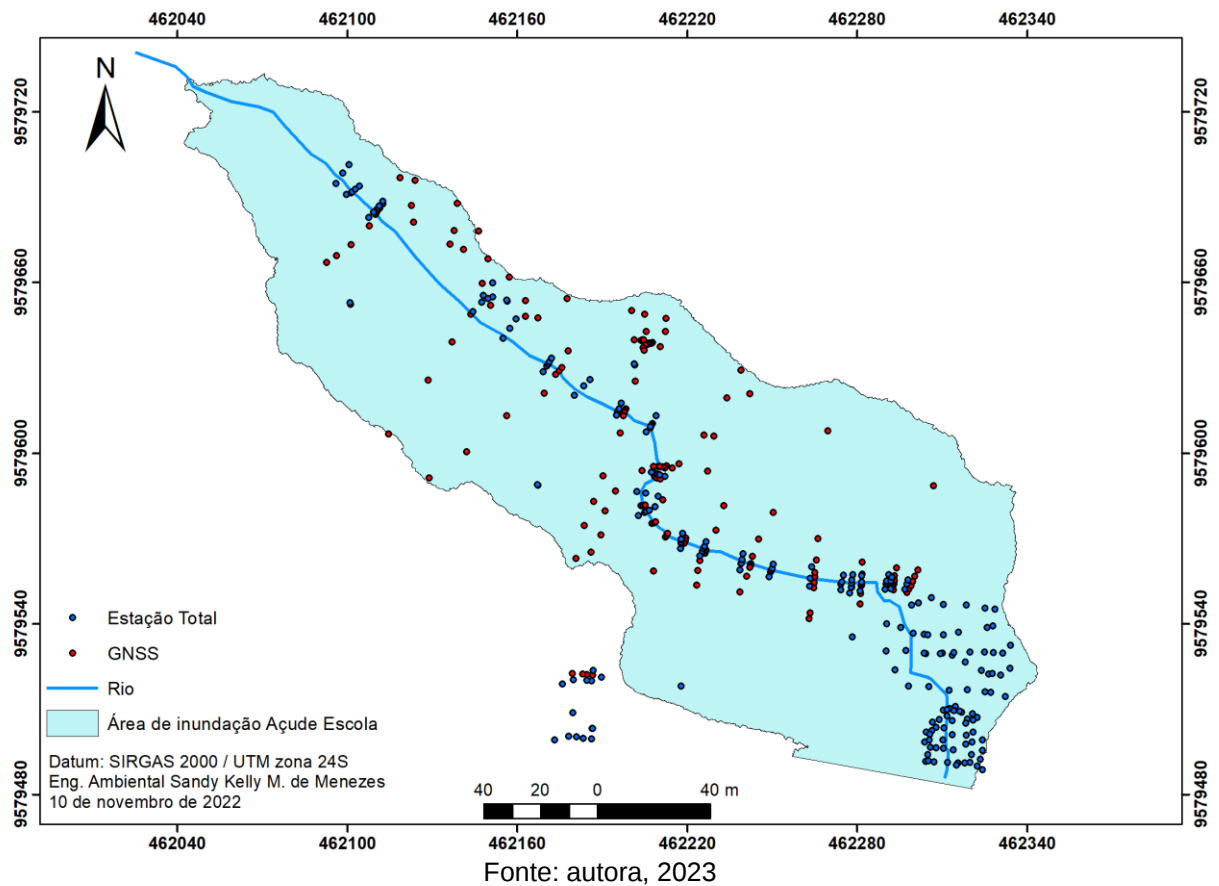
O Sistema GNSS é um Sistema utilizado para determinação de coordenadas, onde uma constelação de satélites permite determinar o posicionamento e localização de um ponto. Esteja ele em qualquer parte do mundo, sob condições climáticas diversas. Desse modo, dentre essas constelações têm-se: GPS – EUA; GLONASS – Rússia; GALILEO – Europa; BEIDOU (COMPASS) – China; SBAS (Sistema de correção de sinais) (BLOG da Topografia, 2019).

No aerolevanteamento foi utilizado um DRONE Modelo Mavic 2 Pro DJI, com sensor 1" em único voo cobrindo toda a área de inundação do reservatório. Esse tipo de equipamento consiste em uma alternativa de baixo custo para o mapeamento e modelagem 3D por meio de nuvens de pontos produzidas pelo processamento estereoscópico das ortofotos obtidas durante o voo (FIGUEIREDO et al., 2016).

Abaixo, a Figura 7 apresenta a localização dos pontos coletados pelo GNSS (pontos vermelhos) e pela estação total (pontos azuis), na área em estudo.

Em complementação da tomada de pontos, foram implantados vergalhões para marcações de pontos, no qual, foi dado ênfase, principalmente, na parte do leito do reservatório que se encontrava mais erodida pelo processo de ruptura da barragem e pelos eventos posteriores a isso. Vale ressaltar que a implantação dos vergalhões e o levantamento topográfico foram realizados após a ruptura da barragem do açude escola.

Figura 7 – Posicionamento dos pontos de GNSS e estação total no açude Escola



4.3 Análise granulométrica do leito do Açude Escola

A granulometria de um solo é um método utilizado para a realização da análise do solo, é classificado por sua subdivisão de diferentes tamanhos e classes dos materiais, sendo possível a determinação de suas dimensões e porcentagens (MORAIS et al., 2021).

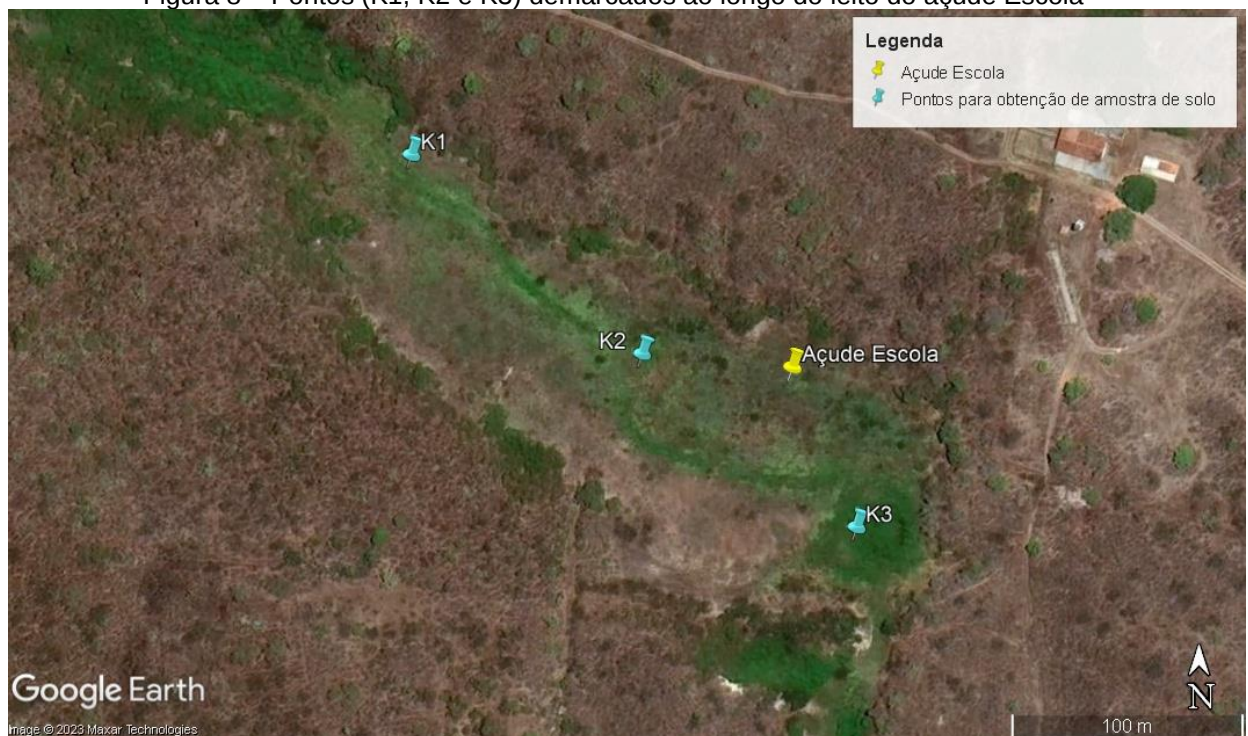
No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/NBR 6502/95) define da seguinte forma a terminologia de rochas e solo:

- Bloco de rocha: Fragmentos de rocha transportados ou não, com diâmetro superior a 1,0 m.
- Matacão: Fragmento de rocha transportado ou não, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com uma dimensão compreendida entre 200 mm e 1,0 m.
- Pedregulhos: São constituídos por solos minerais ou partículas de rocha, com diâmetro assimilado cerca de 2,0 e 60,0 mm. Podem ainda ser fragmentados em pedregulhos finos, médios ou grossos.

- Areia: Não plástico e não coesivo os sólidos são compostos por pequenos fragmentos de rochas e por minerais possuindo o diâmetro entre 0,06 mm e 2,0 mm. Sendo subdividido em areias grossas, finas e médias.
- Silte: Por possui baixa ou nenhuma plasticidade, os solos apresentam uma resistência quando seco o ar baixa. Seus atributos essenciais são correspondentes à parte composta pela fração silte. É constituído por fragmentos com diâmetros entre 0,002 mm e 0,06 mm.
- Argila: Solo de granulação fina composto por fragmentos com dimensões inferiores que 0,002 mm, sendo assim apresentam, podendo ser moldado em diferentes formas.

Dessa forma, o ensaio realizado nesta pesquisa foi de granulometria por peneiramento. Os materiais granulares foram obtidos a partir de três pontos (K1, K2 e K3) do leito do açude escola (ver Figura 8), sendo K1 localizado mais a jusante do reservatório, mais próximo da entrada do açude, K2 no interior do açude (parte central) e K3 próximo a barragem. Na Figura 9 observa-se a coleta realizada em campo do ponto K1 por meio de um cilindro com dimensões conhecidas.

Figura 8 – Pontos (K1, K2 e K3) demarcados ao longo do leito do açude Escola



Fonte: autora, 2023

Figura 9 – Obtenção da amostra de solo através de cilindro



Fonte: autora, 2023

O ensaio de granulometria por peneiramento se deu através da metodologia utilizada na norma ABNT/NBR 7181/84. Portanto, foi utilizado uma série de peneiras de abertura de malhas conhecidas (Figura 10), determinando-se a porcentagem em peso retida ou passante em cada peneira. Este processo divide-se em peneiramento grosso, partículas maiores que 2 mm, e peneiramento fino, partículas menores que 2mm.

Figura 10 – Série de peneiras utilizadas de abertura de malhas conhecidas



Fonte: autora, 2023

As amostras foram, inicialmente, separadas em solo mais grossos e mais finos, por meio de peneira de malha 2,0 mm, a fim de desagregar o material fino aderente (Figura 11). Após separadas foram umedecidas e lavadas com água corrente (Figura 12) e foram então secadas em estufa a 110 °C. Posteriormente foram medidas as suas respectivas massas.

Figura 11 – Amostra do ponto K1 separada em solo de grãos grossos e finos



Fonte: autora, 2023

Figura 12 – Lavagem do solo com água corrente



Fonte: autora, 2023

Após a secagem das amostras, as mesmas foram colocadas na peneira de maior abertura da série previamente escolhida e levadas a um vibrador de peneiras onde permaneceu pelo tempo necessário para separação das frações.

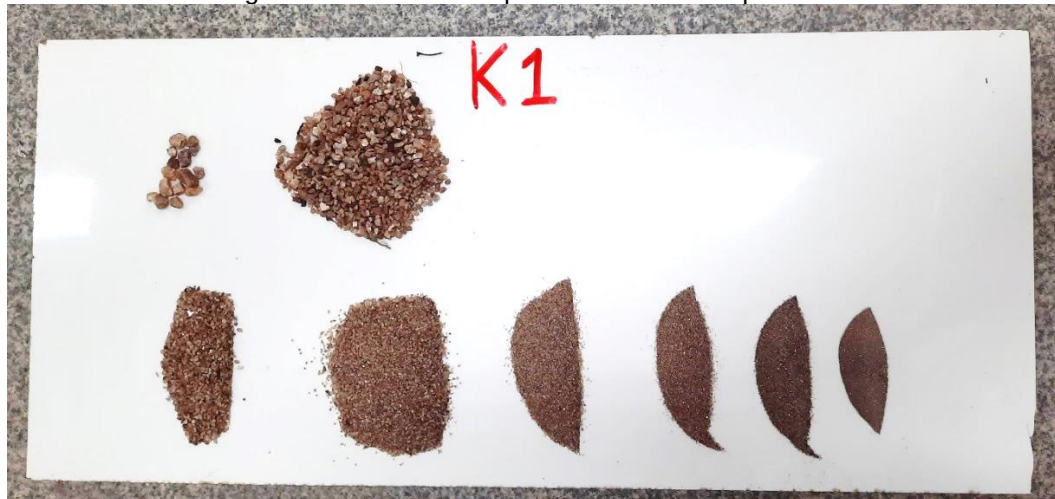
Para finalizar o ensaio, as frações retidas foram pesadas de forma precisa, no qual serviram de base para o cálculo da distribuição granulométrica. Abaixo, na Tabela 1, é mostrado os pesos obtidos após a granulometria por peneiramento nos pontos K1, K2 e K3, e suas respectivas imagens (Figuras 13, 14 e 15), apresentando os materiais obtidos.

Tabela 1 – Pesos obtidos após granulometria por peneiramento

PONTO K1			
GRÃOS GROSSOS		GRÃOS FINOS	
POLEGADAS	PESO RETIDO (g)	POLEGADAS	PESO RETIDO (g)
38 1/9	0	1,18	13,54
25,4	0	0,6	36,88
19,1	0	0,425	13,52
12,27	0	0,3	7,49
9,52	0	0,15	6,42
4,76	4,24	0,075	3,15
2	45,85		
PONTO K2			
GRÃOS GROSSOS		GRÃOS FINOS	
POLEGADAS	PESO RETIDO (g)	POLEGADAS	PESO RETIDO (g)
38 1/9	0	1,18	18,81
25,4	32,2	0,6	24,1
19,1	0	0,425	12,16
12,27	5,78	0,3	9,06
9,52	12,83	0,15	8,27
4,76	46,28	0,075	3,24
2	150,3		
PONTO K3			
GRÃOS GROSSOS		GRÃOS FINOS	
POLEGADAS	PESO RETIDO (g)	POLEGADAS	PESO RETIDO (g)
38 1/9	0	1,18	0,31
25,4	0	0,6	0,43
19,1	0	0,425	0,15
12,27	0	0,3	0,09
9,52	0	0,15	0,23
4,76	0	0,075	0,59
2	0		

Fonte: autora, 2023

Figura 13 – Material do ponto K1 retido nas peneiras



Fonte: autora, 2023

Figura 14 – Material do ponto K2 retido nas peneiras



Fonte: autora, 2023

Figura 15– Material do ponto K3 retido nas peneiras

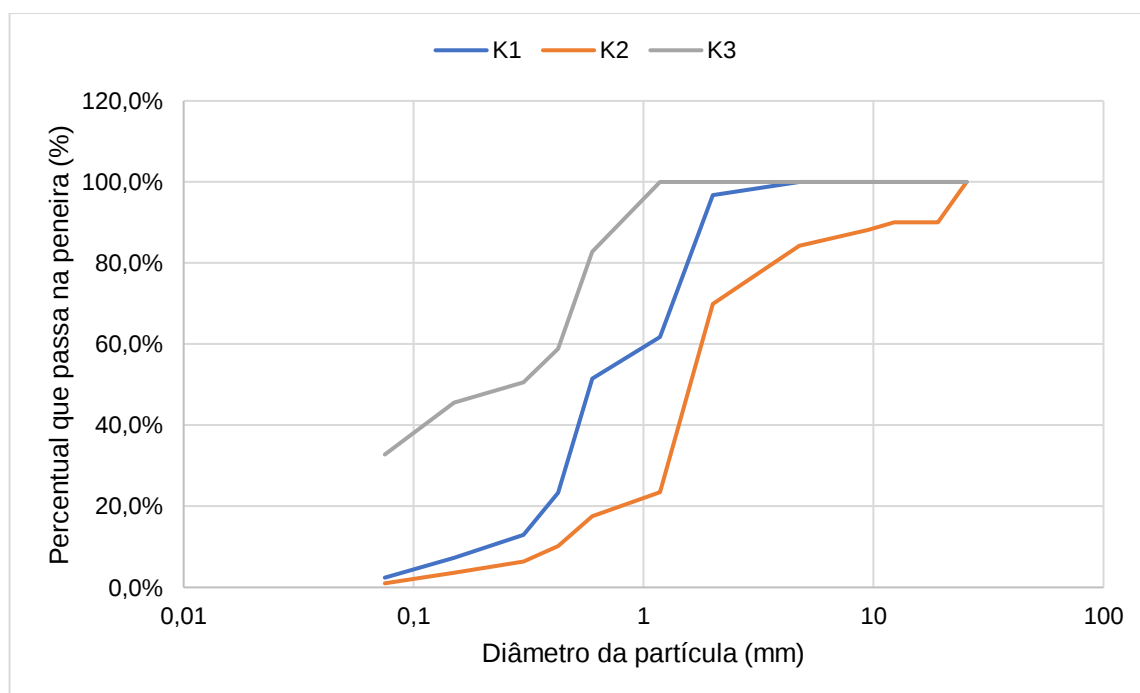


Fonte: autora, 2023

No ponto K3 (Figura 15), foi retido material granular apenas nas peneiras de grãos finos, isso se deu pelo fato de que o solo próximo a barragem possui grande quantidade de silte, argila e matéria orgânica, a última sendo possível observar durante a lavagem do solo em água corrente como mencionado na metodologia acima.

As curvas granulométricas das amostras K1, K2 e K3, coletadas no leito do açude Escola ao longo do perfil longitudinal estão apresentadas na Figura 16. As curvas indicam claramente uma granulometria mais fina da amostra coletada mais próxima do barramento (K3), onde ocorre predominantemente o depósito de partículas menores de silte e argila que são transportadas em suspensão até atingir as áreas próximas do maciço. As amostras K1 e K2 apresentam granulometria maior que K3, o que pode ser explicada pela dinâmica do riacho que flui pelo leito seco do reservatório onde o trecho da coleta K1 (mais a montante) é retilíneo e favorece o transporte das partículas mais grosseiras, já no trecho da amostra K2, localizada em um ponto curvilíneo do traçado do rio a deposição de partículas maiores pode prevalecer.

Figura 16 – Percentual de grãos dos pontos K1, K2 e K3



Fonte: autora, 2023

4.4 Análise da massa específica aparente seca do material depositado no açude Escola

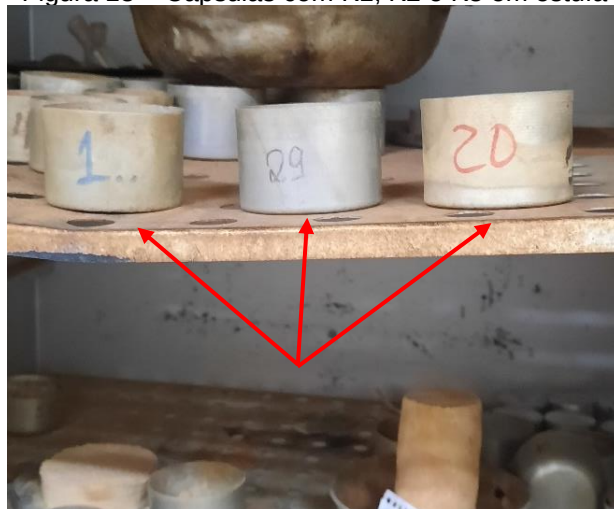
Para checagem da massa específica aparente seca das três amostras (K1, K2 e K3) de solo do leito do açude escola, foi utilizado o método da estufa. Inicialmente, as amostras de solo foram destorroadas (Figura 17), passadas na peneira nº 10 (2,0 mm), transferidas para cápsulas metálicas, determinado as massas das amostras em seu estado natural e levadas para estufa a 110°C por 24 horas (Figura 18) para que seja retirado toda a água presente no solo.

Figura 17 – Quebra dos torrões do solo



Fonte: autora, 2023

Figura 18 – Cápsulas com K1, K2 e K3 em estufa



Fonte: autora, 2023

Após retirada do conjunto de cápsulas da estufa foi efetuada nova pesagem para posteriores cálculos. Dessa forma, a massa específica aparente seca média encontrada foi de $1,45 \text{ g/cm}^3$. Abaixo, na Tabela 2, observa-se os valores obtidos.

Tabela 2 – Valores de parâmetros para obtenção da massa específica aparente seca

PARÂMETROS	AMOSTRAS		
	K1	K2	K3
Massa úmida da cápsula com tara (g)	72,23	99,28	55,33
Massa seca da cápsula com tara (g)	71,43	98,44	54,15
Tara (g)	12,05	22,19	14,19
Massa úmida da cápsula (g)	60,18	77,09	41,14
Massa seca da cápsula (g)	59,38	76,25	39,96
Massa de água na cápsula (g)	0,80	0,84	1,18
Umidade (%)	1,35%	1,10%	2,95%
Umidade de referência (%)	1,33%	1,09%	2,87%
Massa da amostra úmida no saco (g)	1370,64	1309,60	1116,24
Massa da amostra úmida na bacia (g)	1307,75	1305,48	1113,85
Massa da água na amostra (g)	17,38	14,22	31,95
Massa da amostra seca na bacia (g)	1290,37	1291,26	1081,90
Volume da amostra (cm^3)	923,72	784,42	829,30
Massa específica aparente úmida (g/cm^3)	1,42	1,66	1,34
Massa específica aparente seca (g/cm^3)	1,40	1,65	1,30

Fonte: autora, 2023

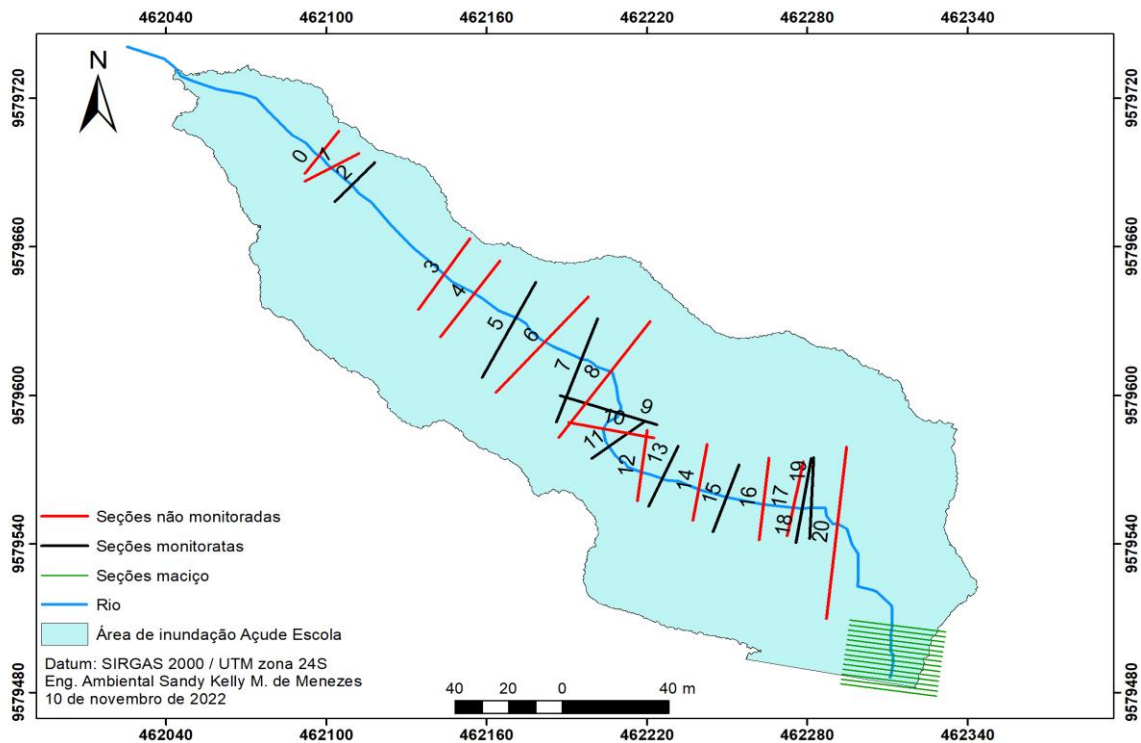
4.5 Estimativa de Alterações Topográficas no Perfil Longitudinal do Açude Escola

De acordo com observações de campo subsidiados por dados topográficos, percebeu-se que a ruptura da barragem do açude escola resultou na formação de uma calha natural resultante de eventos de escoamentos ocorridos após ruptura, com leito seco e sedimentos prontamente disponíveis para serem remobilizados pelo potencial erosivo destes fluxos.

Com base no levantamento topográfico de solo realizado com estação total estimou-se o perfil longitudinal da calha do rio formada. O perfil longitudinal do açude foi então dividido em 21 seções transversais perpendiculares à calha natural e outras

14 seções no trecho do maciço que sofreu a ruptura (Figura 19). Estas últimas foram usadas para a estimativa do volume de material sedimentar do corpo do maciço que foi erodido no processo de formação da fenda pelo rompimento.

Figura 19 – Posicionamento das seções traçadas na área.



Após realizado o traçado das seções transversais no percurso do leito, foi feito o esboço do perfil do rio utilizando as 21 seções, com objetivo de calcular em cada seção a quantidade de sedimentos removidos no leito no processo de formação de uma calha natural ao longo do reservatório durante o rompimento da barragem e nos eventos de escoamento posteriores.

Após a ruptura do açude escola, o monitoramento da erosão do solo no açude, assim como, o de deposição do sedimento foi feito através do uso de vergalhões de erosão de acordo com Almeida (2019). Essa técnica é considerada simples, de fácil monitoramento e economicamente viável.

Os vergalhões foram instalados em nove das 21 seções transversais demarcadas, fabricados a partir de material de ferro de meia polegada, com comprimento de 70 cm cada (Figura 18), deixando aproximadamente 30 cm acima do solo, após implantados. Estes vergalhões foram pintados com tinta do tipo Zarcão, para retardar e prevenir o processo de oxidação do ferro pela ação da água.

Os traçados das seções com detalhamento da calha natural estão apresentados no Anexo I. Vale destacar que o limite superior da seção é definido com base nos pontos levantados em campo com estação total que delimitam a largura da calha natural.

Figura 20 – Instalação de pinos de erosão confeccionados a partir de vergalhões de ferro de meia polegada, com detalhe do trecho do maciço que colapsou em abril de 2020.



Fonte: autora, 2023

A implantação dos pinos em questão, teve como objetivo a delimitação e monitoramento da evolução da calha do rio em período chuvoso com fluxos de água potencialmente erosivo passando pelo leito natural seco.

Dessa forma, os pinos instalados foram analisados após a estação chuvosa para análise da erosão e deposição de material sedimentar no leito do rio. Desse modo, é observado na Figura 21, na seção 9, situada em uma das curvas oriundas do formato do rio, um dos pinos implantados, havia erosão, ocasionada pela velocidade da água que acabava escavando a calha do rio.

Figura 21 – Erosão a esquerda do pino implantado no leito do rio



Fonte: autora, 2023

Portanto, como observa-se no Anexo I, a área encontrada foi estimada abaixo da linha de cor laranja que liga os dois pontos em cada seção. A área para cada seção foi calculada empregando-se a fórmula do trapézio, de acordo com a equação 1, em que h_i e h_{i+1} representam as alturas das seções em pontos consecutivos da calha do canal natural; e d_i e d_{i+1} são os comprimentos acumulados na seção transversal para pontos consecutivos.

$$\hat{Área} = \frac{(h_i + h_{i+1}) \cdot (d_{i+1} - d_i)}{2}$$

Equação 1

Com o traçado do perfil longitudinal do reservatório acompanhando a calha natural formada foi possível estimar as distâncias entre seções. De posse dos valores de distâncias e áreas correspondentes, estimou-se o volume em metros cúbicos (m^3) de sedimentos removidos no trecho de canal natural formado entre as seções, a partir do emprego da fórmula de tronco de cone (Equação 2).

O procedimento consiste no cálculo do volume do tronco do cone (V_i) representado pela distância d_i entre seções consecutivas. Em seguida calcula-se o volume total de sedimentos removidos no reservatório (V_{total}), como sendo a soma do volume V_i e o tronco de cone (ΔV) representado pelas áreas A_1 e A_2 e distância (d).

Os valores de área e distância referente a cada seção foram obtidos a usando ferramentas de SIG, utilizado para processamento dos dados levantados em campo durante este estudo.

$$\Delta V = \frac{1}{3} \cdot d_i \cdot \left[A_i + A_{i+1} + \left(A_i \cdot A_{i+1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{Equação 2}$$

em que:

$$V_{total} = V_i + \Delta V \quad \text{Equação 3}$$

A massa específica aparente seca média encontrada do açude foi de 1,45 t/m³. Portanto, utilizou-se desse valor para obter a massa de sedimentos removidos em toneladas (ton) no processo de formação da calha natural do rio passando pelo reservatório, através do produto entre o volume total de sedimentos erodido e a massa específica aparente seca do solo.

Dessa forma, a massa de sedimento removido em toneladas M_{sed} é dada pela equação 4, sendo a massa específica aparente seca (ρ_d) (em ton/m³) e V_{total} o volume total de sedimento removido (m³).

$$M_{sed.} = \rho_d \cdot V_{total} \quad \text{Equação 4}$$

Para cálculo do volume de sedimentos removidos na parede da barragem foram traçadas 14 seções como mencionado anteriormente, apresentando distância de 2 metros entre elas. A Figura 22 destaca o trecho da parede da barragem que colapsou em 2020.

O cálculo da área de sedimentos removidos em cada seção da parede seguiu a mesma metodologia acima citada para as seções do leito de rio, como também, para o cálculo de volume de sedimentos removidos em m³ e a quantidade de massa de sedimento em toneladas. Admitiu-se, para tanto, que a largura de topo da seção corresponde a cota de coroamento da barragem, para assim estimar o volume de maciço erodido na ruptura. Na Figura 22 apresenta-se um registro fotográfico do trecho da parede da barragem do açude Escola que colapsou em 2020.

Figura 22 – Detalhe da seção da parede da barragem que colapsou em 2020



Fonte: autora, 2023

4.6 Estimativa do Acréscimo da Capacidade de Armazenamento do Açude Escola

Para estimativa da evolução da capacidade de armazenamento do açude Escola realizou-se uma análise comparativa dos modelos digitais de terreno gerados no contexto desta pesquisa em janeiro de 2021 e em janeiro de 2017 na pesquisa de Silveira (2019).

Cabe destacar que para o levantamento topográfico realizado em 2017 utilizou-se apenas pontos tomados em solo com estação total. Para que a comparação de volumes associados a cada cota foi necessária realizar uniformização do referencial geométrico das bases de dados admitindo como comum a cota de soleira do vertedor nos dois levantamentos.

4.7 Estimativa do evento extremo de precipitação e escoamento superficial na ruptura da barragem do açude Escola

4.7.1 Análise de chuvas intensas pelo método de Gumbel

Para caracterização do evento extremo de precipitação que resultou na ruptura da barragem do açude Escola, realizou-se uma análise estatística dos dados de precipitação diária do posto pluviométrico Pentecoste com registro em 49 anos (1974 a 2021), localizado no município de mesmo nome e distante aproximadamente 11 km do local investigado, utilizando o Método de Gumbel, como segue:

$$X = x + \frac{S_x}{S_n}(Y - Y_n) \quad \text{Equação 5}$$

em que: x é a chuva média da série; S_x é o desvio padrão da série; Y é a variável reduzida e; Y_n e S_n são, respectivamente a média e desvio padrão da variável reduzida. A variável reduzida Y é estimada para diferentes tempos de retorno T , como a seguir:

$$Y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad \text{Equação 6}$$

Foram analisadas as séries diárias de precipitações máximas e as acumuladas de 3, 5, 7 e 10 dias para avaliar o efeito da precipitação antecedente no evento que gerou o rompimento da barragem do açude Escola.

4.7.2 Estimativa do Tempo de Concentração

Os parâmetros fisiográficos de interesse para os estudos hidrológicos e hidráulicos são:

- a) Área da bacia hidrográfica (km²);
- b) Cota do exutório da bacia hidrográfica (m);
- c) Cota da nascente do rio principal (m);
- d) Comprimento do rio principal (km);
- e) Desnível máximo do rio principal (m);

f) Tempo de concentração (h).

Os parâmetros listados de (a) a (d) foram determinados por meio de técnicas de geoprocessamento em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o MDE da área de estudo.

O Desnível máximo do rio principal (DM) em metros foi calculado da seguinte forma:

$$DM = CN - CE \quad \text{Equação 7}$$

em que CN é a cota da nascente do rio principal (m) e CE a cota do exutório da bacia hidrográfica (m).

O Tempo de concentração (T_c) em horas foi calculado pela fórmula de Kirpich modificada da seguinte forma:

$$T_c = 1,42 \cdot \left(\frac{CR^3}{DM} \right)^{0,385} \quad \text{Equação 8}$$

em que CR é o comprimento do rio principal (km).

4.7.3 Estimativa da Vazão do Evento pelo Método Racional

Para estimativa da vazão do evento que resultou na ruptura da barragem do açude Escola utilizou-se o método racional descrito a seguir, aplicável com maior segurança para bacias hidrográficas com áreas inferiores a 10 km², o que é o caso:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot A}{3,6} \quad \text{Equação 9}$$

em que c é o coeficiente de escoamento superficial. Neste estudo foi assumido c de 0,25, que de acordo com o estudo de Gomes (2016), foi constatado para a área da bacia em que o açude Escola está situado, um coeficiente de escoamento de aproximadamente 25%. i a intensidade da chuva de projeto associada ao tempo de concentração da bacia (mm/h), e A a área da bacia hidrográfica (km²).

Para estimativa da intensidade da chuva de projeto foram aplicadas duas metodologias: intensidade de chuva máxima diária pelo Método de Gumbel e discretização em intervalo de 1h pelo Método de Taborga Torrico; intensidade de chuva para o tempo de concentração de 1h pela equação de intensidade-duração-frequência do posto pluviométrico Pentecoste, localizado na Fazenda Experimental da UFC onde situa-se o açude Escola (RODRIGUES et al., 2008).

$$i = \frac{2.847,22 \cdot Tr^{0,30}}{(D + 43)^{0,97}} \quad \text{Equação 10}$$

em que i é a intensidade associada ao tempo de concentração da bacia (mm/h), Tr o período de retorno (anos), e D a duração da chuva de projeto (min).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de Alterações do Perfil Longitudinal do Açude Resultantes do Rompimento da Barragem

Com base nos procedimentos metodológicos descritos no item 4.5, estimou-se as áreas da calha natural formada por processos erosivos em cada uma das 21 seções investigadas e o volume entre seções, conforme sumarizado na Tabela 3.

Tabela 3 – Detalhamento da calha natural com base, com estimativa de área das seções e volume de sedimentos erodidos

SEÇÃO	MONITORAMENTO	DISTÂNCIA (m)	COMPRIMENTO (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
Sec_0	-	0,0	0,0	0,0	
Sec_1	-	6,6	6,6	1,9	4,2
Sec_2	Pinos	10,4	17,0	1,0	14,8
Sec_3	-	50,1	67,1	0,0	18,7
Sec_4	-	13,9	81,1	0,0	0,2
Sec_5	Pinos	18,5	99,5	0,2	1,3
Sec_6	-	14,8	114,3	0,0	1,0
Sec_7	Pinos	15,4	129,7	0,8	4,7
Sec_8	-	12,3	142,0	0,2	6,0
Sec_9	Pinos	17,8	159,8	0,1	2,4
Sec_10	-	9,0	168,8	0,0	0,3
Sec_11	Pinos	7,6	176,4	0,0	0,1
Sec_12	-	16,5	192,9	0,2	1,4
Sec_13	Pinos	8,2	201,1	0,1	1,1
Sec_14	-	14,6	215,7	0,2	2,0
Sec_15	Pinos	10,8	226,5	0,1	1,7
Sec_16	-	14,1	240,6	0,0	0,8
Sec_17	-	11,3	251,9	0,0	0,3
Sec_18	Pinos	3,4	255,3	0,2	0,3
Sec_19	Pinos	3,5	258,8	0,1	0,4
Sec_20	Riacho	14,3	273,0	0,0	0,3

Fonte: autora, 2023

A Tabela 3 acima, destaca ainda as seções em que há monitoramento por pinos instalados. Com base no levantamento das seções transversais foi possível estimar um volume erodido de sedimentos de 62 m^3 , o que corresponde a uma massa de sedimentos de aproximadamente 90 toneladas, considerando uma massa específica aparente seca média de $1,45 \text{ ton/m}^3$. Portanto, percebe-se uma quantidade de material sedimentar removido significativo, uma vez que com o rompimento da barragem e eventos posteriores houve modificações no leito do reservatório, tendo uma parte de seus sedimentos arrastados a jusante do barramento.

Comparando-se imagens históricas do Google Earth de 08/2016 e 08/2020, pode-se perceber este processo de escavação de uma calha natural ao longo do perfil longitudinal do açude Escola, indicando a ocorrência de processos erosivos no rompimento e eventos posteriores de escoamento (Figura 23). Sendo que em 2016 o açude Escola já possuía uma delimitação em seu interior, porém menos atenuada referente ao ano de 2020, após o reservatório sofrer o rompimento.

Figura 23 – Imagens do Google Earth do açude Escola em 08/2016 (a) e 08/2020 (b)



Fonte: Google Earth Pro, 2023

5.2 Estimativa do Volume Erodido da Parede do Maciço no Processo de Rompimento

Aplicando-se o mesmo método de cálculo de área das 14 seções definidas no trecho do maciço rompido e volumes entre estas, foi possível estimar o volume de material erodido durante o processo de formação da fenda na ruptura da barragem do açude escola.

Os resultados de áreas das seções e volumes da cubagem do trecho onde ocorreu a ruptura estão detalhados na Tabela 4. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, o volume total de material removido da estrutura do maciço

de terra foi de aproximadamente 923 m³, correspondente a uma massa de sedimentos de 1.338 toneladas. Essa alta quantidade de sedimentos removidos, pode ser explicada pela grande quantidade de solo presente na estrutura da barragem, uma vez que a mesma era de terra.

Tabela 4 – Procedimento de cálculo do volume do maciço erodido no processo de ruptura da parede da barragem em janeiro de 2021.

SEÇÃO	DISTÂNCIA (m)	COMPRIMENTO ACUMULADO (m)	COTA MÍNIMA (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
B1	0,0	0	47,6	6,3	0,0
B2	2,0	2	47,5	9,2	15,4
B3	2,0	4	47,5	18,3	26,9
B4	2,0	6	47,4	29,6	47,5
B5	2,0	8	47,3	35,6	65,2
B6	2,0	10	47,3	45,9	81,3
B7	2,0	12	47,3	51,3	97,2
B8	2,0	14	47,4	51,8	103,1
B9	2,0	16	47,6	51,1	102,9
B10	2,0	18	47,5	46,6	97,6
B11	2,0	20	47,5	40,5	87,0
B12	2,0	22	47,5	35,5	75,9
B13	2,0	24	47,3	30,8	66,2
B14	2,0	26	47,3	26,2	56,9

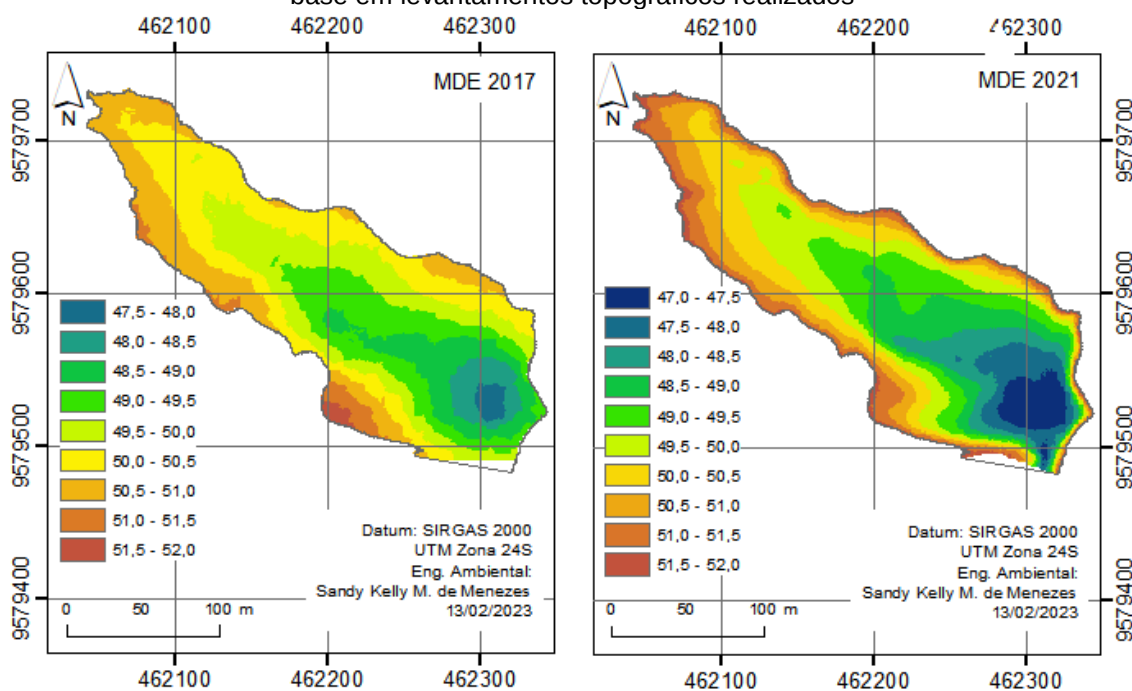
Fonte: autora, 2023

As seções traçadas possuem distância constante de 2 metros entre si. É possível observar que a seção que houve maior área de escavação e consequentemente maior volume de sedimento retirado, foi a seção 8, com 51,8 m² e 103,1 m³, respectivamente, sendo essa localizada aproximadamente no centro da parede da barragem, e com nesse trecho da seção 8, a calha formada possui uma formação mais curvilínea favorecendo a erosão naquele trecho.

5.3 Análise da Variação da Topografia do Açude Escola pelo Rompimento da Barragem

Com base nos modelos digitais de terreno baseados no levantamento topográfico de Silveira (2019), realizado em janeiro de 2017, e do presente estudo, com levantamento topográfico ocorrido em janeiro de 2021, foi possível avaliar as alterações topográficas do terreno resultantes do rompimento da barragem e eventos de escoamentos subsequentes quando o reservatório estava completamente seco e sem capacidade de acumulação de água. Os modelos digitais de terreno de 2017 e 2021 estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Modelos digitais de terreno do açude escola de 2017 (Silveira, 2019) e 2021 obtidos com base em levantamentos topográficos realizados



Fonte: autora, 2023

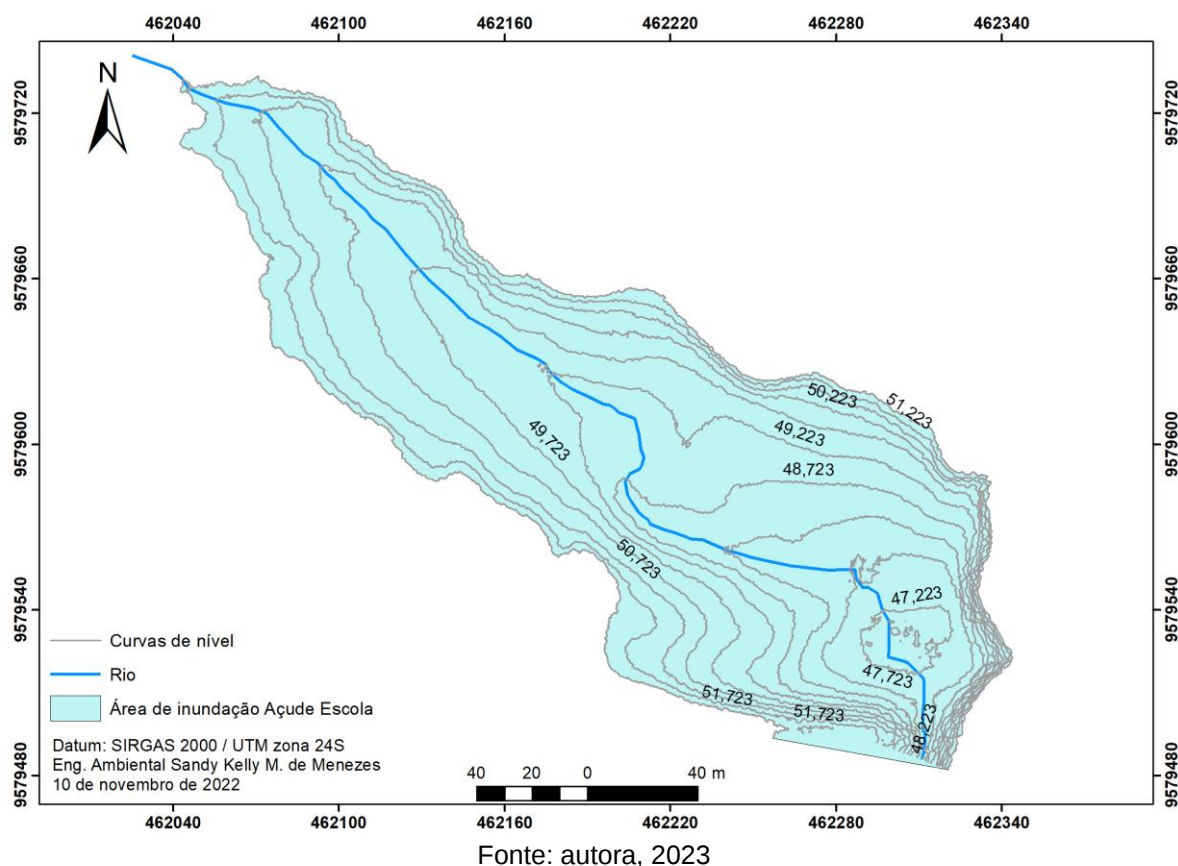
A ruptura da barragem do açude Escola provocou alterações relevantes na topografia da área de inundação do reservatório como resultados do processo de mobilização de sedimentos previamente depositados, conhecido como *flushing*. Outros eventos de escoamentos posteriores podem também terem contribuído para o contínuo processo de erosão dos sedimentos depositados.

Como visto acima no modelo digital de elevação da área (Figura 24), após rompimento da barragem a topografia do leito foi alterada, assim também como a

jusante do barramento, e isso pode ser notado pela topografia rebaixada representada pela cor azul escuro, indicando áreas de escavação.

A Figura 25, por sua vez, destaca as curvas de nível da área do açude Escola e o traçado da calha do rio geradas com base no modelo digital de terreno, elaborada com os dados obtidos em campo.

Figura 25 – Curvas de nível açude Escola geradas com base no levantamento topográfico realizado em 2021, no contexto desta pesquisa, com destaque para o traçado da calha natural por processos erosivos



Comparando-se os MDTs de 2017 (Silveira, 2009) e 2021 (realizado no contexto desta pesquisa), observa-se que a capacidade de armazenamento do reservatório variou de 55.460 m³ para 61.751 m³ neste intervalo (Tabelas 5 e 6). Cabe destacar que as cotas do levantamento de 2017 (Tabela 6) foram atualizadas usando o mesmo plano de referência horizontal do levantamento de 2021, considerando a cota de soleira do vertedor da barragem nos dois levantamentos.

Outro fato a considerar é que o volume estimado pelo MDT de 2021 inclui a área do maciço erodida durante o processo de rompimento da barragem e formação da fenda. Portanto, deduzindo-se deste total o volume de material do maciço erodido de

923 m³, obtém-se uma capacidade de armazenamento naquele ano de 2021 de 60.828 m³, o que representa um ganho percentual de 9,7% (5.368 m³).

Observa-se ainda nas Tabelas 5 e 6, que a profundidade do açude Escola também aumentou de 4,09 m para 4,71 m na cota de soleira do vertedor, após o rompimento do maciço de terra, indicando que houve escavação do terreno com máxima de 0,62 centímetros, ocorrida no processo de rompimento da barragem e nos eventos posteriores de escoamentos que fluíram pelo leito seco do reservatório com sedimentos previamente depositados e plenamente disponíveis para serem remobilizados.

Tabela 5 – Cota-área-volume do açude Escola em 2021

COTA (m)	ALTURA (m)	ÁREA (m²)	VOLUME (m³)
47,01	0,0	0	0
47,22	0,2	554	33
47,72	0,7	2.149	697
48,22	1,2	4.025	2.227
48,72	1,7	6.559	4.839
49,22	2,2	10.355	9.049
49,72	2,7	14.820	15.305
50,22	3,2	19.451	23.824
50,72	3,7	23.790	34.666
51,22	4,2	27.194	47.440
51,72	4,7	29.916	61.751

Fonte: autora, 2023

Tabela 6 – Cota-área-volume do açude Escola em 2017

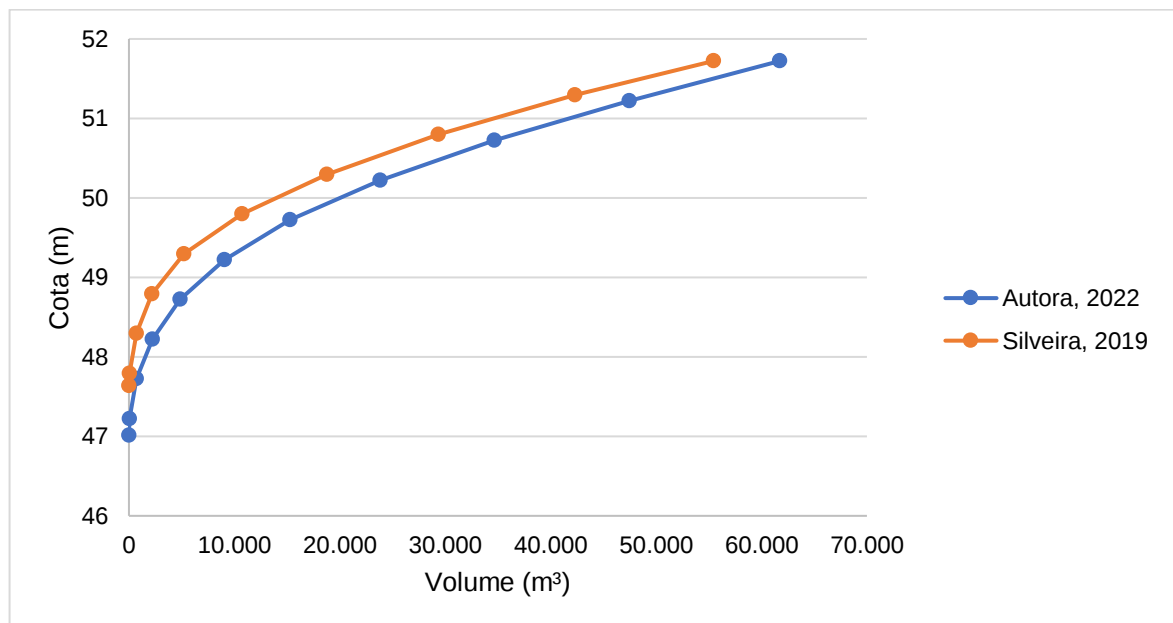
COTA (m)	ALTURA (m)	ÁREA (m²)	VOLUME (m³)
47,64	0,0	0	0
47,80	0,2	575	39
48,30	0,7	2.027	722
48,80	1,2	4.177	2.201
49,30	1,7	8.303	5.230
49,80	2,2	13.544	10.747
50,30	2,7	18.573	18.755
50,80	3,2	23.631	29.352
51,30	3,7	28.219	42.287
51,72	4,1	34.180	55.460

Fonte: Silveira, 2019

A Figura 26 destaca as curvas cota-área-volume (CAV) do açude Escola resultante dos modelos digitais de terreno gerados a partir dos levantamentos topográficos realizados nos anos de 2017 (Silveira, 2019) e em 2021 no contexto desta pesquisa.

Comparando-se as CAVs apresentadas na Figura 26 pode-se perceber os incrementos de volumes acumulados no ano de 2021 em relação ao ano de 2017, indicando a predominância de processos erosivos como resultado do rompimento da barragem.

Figura 26 – Variação de cota-volume do açude Escola em levantamentos distintos



Fonte: autora, 2023

Com o intuito de avaliar as zonas de maiores alterações na topografia de leito do reservatório, apresenta-se na Tabela 7 uma análise comparativa dos volumes nos dois levantamentos realizados em 2017 (Silveira, 2019) e em 2021 (nesta pesquisa). Os resultados indicam a predominância de processos erosivos nos 2m mais profundos do açude Escola, em regiões que podem ser mais afetadas por processos erosivos decorrentes de fluxos pelo reservatório com leito seco e durante o processo de rompimento que produz capacidade de transporte suficiente para remobilizar sedimentos do reservatório.

A ruptura do reservatório se assemelha a técnica de manejo de sedimentos conhecida com *flushing*, em que ocorre esvaziamento completo do reservatório pela comporta de fundo com o propósito de remoção de sedimentos previamente

depositados. O valor negativo observado, apesar de indicar processo de deposição de sedimentos na faixa de maior elevação do açude, pode também ser resultado de imprecisões na interpolação de dados topográficos para geração do MDT ou mesmo pela adoção de técnicas diferentes de levantamento do terreno, uma vez que em 2017 utilizou-se apenas a estação total e em 2021 uma combinação de três bases (estação total, GNSS e aerofotogrametria).

Tabela 7 – Comparativo de volumes dos modelos digitais de terreno de 2017 (Silveira, 2019) e de 2021, realizado no contexto desta pesquisa

COTA (m)	VOLUME EM 2017 (m³)	VOLUME EM 2021 (m³)	DIFERENÇAS DE VOLUME ACUMULADA (m³)	DIFERENÇAS DE VOLUME PONTUAL (m³)
47,01	0	0	0	0
47,22	0	33	33	33
47,72	22	697	675	642
48,22	623	2.227	1.604	928
48,72	1.988	4.839	2.851	1.247
49,22	4.794	9.049	4.255	1.405
49,72	9.953	15.305	5.352	1.096
50,22	17.602	23.824	6.222	870
50,72	27.826	34.666	6.840	618
51,22	40.424	47.440	7.016	176
51,72	55.460	61.751	6.291	-725

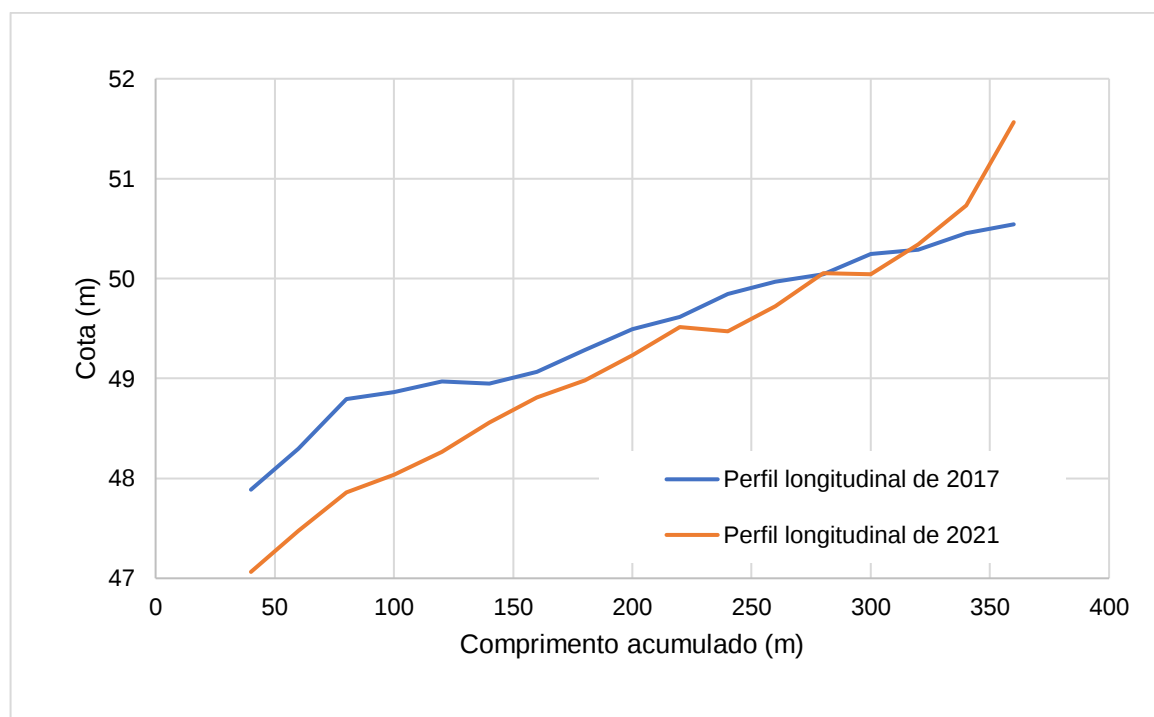
Fonte: autora, 2023

Além dos efeitos à montante do barramento com alterações significativas da topografia de leito do açude Escola, os sedimentos remobilizados do reservatório e o material erodido do maciço da barragem de terra durante o processo de rompimento e formação da fenda, podem impactar consideravelmente os trechos de jusante do curso d'água com deposição de sedimentos ao longo do seu percurso. No caso do açude Escola, não há reservatório de jusante para receber esta elevada carga de sedimentos, que segue diretamente para o rio Curú, impactando também a foz do rio e ecossistema local.

O rompimento de pequenas barragens de terra pode também promover uma intensificação do risco de colapso em cascata de outros reservatórios localizados a jusante, com barramentos muitas vezes construídos sem a adequada análise de estabilidade do talude, ausência de estudos hidrológicos para dimensionamento do vertedor e falta de monitoramento das condições de segurança do maciço, o que poderia potencializar os riscos de severidade do evento e ampliação da área afetada pela onda de cheia. Por não haver reservatórios localizados a jusante do açude Escola, a onda de cheia desagua diretamente no rio Curú, localizado imediatamente à jusante, que apresenta calha do rio com capacidade de recepção e condução dos fluxos gerados no evento.

Utilizando-se dos dois modelos digitais de terreno dos levantamentos topográficos realizados nos anos de 2017 (Silveira, 2009) e 2021, com contexto desta pesquisa, foi possível avaliar as alterações no perfil longitudinal, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Evolução do perfil longitudinal de 2017 (Silveira, 2019) e de 2021



Fonte: autora, 2023

A evolução do perfil longitudinal (Figura 27) observa-se a escavação que ocorreu no reservatório, vista a partir da diminuição da cota do perfil longitudinal de 2021. Algumas diferenças mostradas entre os dois perfis nas cotas mais elevadas,

podem ser explicadas pelo fato de as duas bases de dados serem distintas, uma vez que o levantamento topográfico foi com tomadas de pontos diferentes, sendo que Silveira (2019) utilizou apenas estação total e, no levantamento de 2021, foi utilizado GNSS, estação total e Aeronave Remotamente Pilotada.

O traçado do rio considerado no levantamento de 2021 foi utilizado como base para traçado dos dois perfis longitudinais referentes aos anos de 2017 e 2021. Contudo, o processo de escavação de uma calha natural em 2021 decorrente do rompimento da barragem e eventos de escoamentos posteriores pode ter alterado o traçado do perfil longitudinal no período entre os dois levantamentos. Apesar das incertezas apresentadas, os resultados da análise comparativa dos perfis longitudinais corroboram com a dos MDTs, indicando uma escavação do terreno sobretudo nas cotas mais profundas (até 2m de profundidade), indicando os efeitos do rompimento da barragem na topografia de leito do reservatório.

5.4 Estimativa de alterações no terreno provocado por eventos de escoamento posteriores ao rompimento da barragem

Após a instalação dos pinos, no monitoramento realizado após eventos chuvosos, foi verificado erosão (Figura 29), e deposição em alguns trechos do leito do açude Escola. Os pinos foram instalados com 30cm acima do solo (Figura 28). Portanto, percebeu-se que houve erosão em certos trechos do leito, como na Figura 29 onde é observada uma erosão de aproximadamente 10cm entre o pino e a margem do rio.

Figura 28 – Pinos instalados exposição de 30cm



Fonte: autora, 2023

Figura 29 – Erosão em um dos pinos instalados



Fonte: autora, 2023

Os traçados das seções transversais onde estão instalados os pinos de erosão/deposição podem ser visualizados no Anexo III. Como se pode observar abaixo na Tabela 8 e no Anexo III, não houve alterações significativas do leito do reservatório ao longo do perfil longitudinal da calha do riacho formado no processo de ruptura da barragem e nos eventos posteriores com leito seco, com algumas zonas de discreta deposição de sedimentos e baixa erosão nas seções 9 e 18. Este comportamento pode ser explicado pelo intenso crescimento de vegetação (Ver Figura 30) no leito seco do reservatório, que funcionou como atenuador do potencial erosivo do fluxo de água durante os eventos de escoamento ocorridos.

Tabela 8 – Estimativa de alterações do terreno nas seções transversais de monitoramento por pinos de erosão/deposição.

SEÇÃO	TIPO	COMPRIMENTO* (m)	ÁREA (m²)
Sec_0	Riacho	0	0,000
Sec_2	Vergalhão	17,03129	0,122
Sec_5	Vergalhão	99,51899	0,036
Sec_7	Vergalhão	129,72129	0,012
Sec_9	Vergalhão	159,79169	-0,052
Sec_11	Vergalhão	176,4033	0,013
Sec_13	Vergalhão	201,12056	0,047
Sec_15	Vergalhão	226,48866	0,059
Sec_18	Vergalhão	255,25764	-0,079
Sec_21	Vergalhão	258,76279	0,067

*Comprimento ao longo do perfil longitudinal do reservatório em direção ao barramento

Fonte: autora, 2023

Figura 30 – Vegetação no leito e vertedouro do açude Escola
a) leito



b) vertedouro



Fonte: autora, 2023

5.5 Análise das condições hidrológicas e de segurança na ruptura da barragem do Açude Escola

A análise de eventos extremos das séries de dados de precipitação máxima para diferentes durações (1, 3, 5, 7 e 10 dias), pelo método de Gumbel, permitiu avaliar a frequência e recorrência do evento ocorrido em 23 de abril de 2020, que resultou no rompimento da barragem do açude Escola, conforme destacado na Tabela 9. Os resultados mostram que o evento ocorrido no dia da ruptura da barragem apresentou um tempo de recorrência 10,6 anos, sendo o sétimo maior evento em 49 anos de dados. Entretanto, analisando-se a série das precipitações máximas acumuladas de três dias, observou-se que o evento ocorrido para esta duração apresentou uma recorrência de 27,3 anos sendo o segundo maior evento do período analisado (49 anos), indicando que a chuva antecedente pode ter potencializado o escoamento superficial no dia que ocorreu o colapso da estrutura.

Tabela 9 – Tempo de recorrência do evento que resultou na ruptura da barragem do açude Escola em 23 de abril de 2020, com base em séries de dados máximos do posto pluviométrico de Pentecoste (1974 – 2022) para diferentes durações (1, 3, 5, 7 e 10 dias)

Duração (dia)	Média (mm/h)	Desvio padrão (mm/h)	TR (anos)	Y	X (mm/h)	Pmax (mm)
1	2,79	1,06	10,6	2,31	4,4	105,6
3	1,33	0,44	27,3	3,29	2,4	171,3
5	0,98	0,33	9,6	2,21	1,4	173,8
7	0,81	0,25	5,7	1,64	1,0	176,0
10	0,67	0,22	3,7	1,16	0,8	187,6

Fonte: autora, 2023

Outro fato a destacar é que a precipitação nos três dias que antecederam a ruptura da parede da barragem foi de 65,8 mm, sendo este o maior valor de precipitação antecedente de todos os seis eventos que apresentaram magnitude superior à precipitação de 105,6 mm ocorrida na data do colapso, o que reforça a hipótese de que este evento pode ter sido potencializado pelas condições de umidade do solo. A Tabela 10 sintetiza os valores dos parâmetros usados para estimativa da vazão gerada no evento de 105,6 mm ocorrido na data de ruptura da barragem do açude Escola.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para estimativa da vazão

Parâmetro	Valor	Unidade
Área da bacia hidrográfica	2,83	km ²
Cota do exutório da bacia hidrográfica	65	m
Cota da nascente do rio principal	188	m
Comprimento do rio principal	2,805	km
Desnível máximo do rio principal	123	m
Tempo de concentração	0,73	h

Fonte: autora, 2023

Os resultados obtidos de intensidade de chuva com base nos métodos utilizados estão descritos na Tabela 11, após a obtenção da intensidade de chuva para o tempo de concentração da bacia do açude Escola foi possível estimar a vazão do evento ocorrido no dia da ruptura da barragem, podendo variar de 4,03 m³/s a 14,97 m³/s (Tabela 12) a depender do método escolhido e da situação do açude Fontineli (em caso de não haver vertimentos oriundos do açude Fontineli e considerando haver vertimentos no açude Fontineli, desprezando a atenuação da onda de cheia naquele açude no passo de tempo do evento).

Tabela 11 – Intensidade da chuva para Tr de 10,6 anos

Tr (anos)	i (mm/h)	
	Gumbel-Taborga	IDF-Pentecoste
10,6	48,3	76,2

Fonte: autora, 2023

Tabela 12 – Vazão encontrada com base nos métodos utilizados

Área geradora de escoamento	Bacia (km²)	Qmax para T = 10,6 anos (mm/h)	
		Gumbel-Taborga	IDF-Pentecoste
Área não controlada	1,20	4,027	6,348
Área total	2,83	9,497	14,971

Fonte: autora, 2023

Na Tabela 13 e Figura 31 observa-se o nível d'água atingido no vertedor da barragem do açude Escola considerando o coeficiente de descarga Cd de 1,4 para soleira espessa e Cd*=75%, para considerar o efeito de rugosidade decorrente da presença de vegetação densa no canal de aproximação na data de ruptura da barragem, com vazão de projeto estimada por dois métodos a) Gumbel-Taborga e

método racional; e b) Curva IDF de Pentecoste e método racional. A ausência de dados medidos de vazão de entrada no açude Escola e de volumes acumulados do açude Fontineli, representam fontes de incertezas na estimativa da vazão do evento extremo ocorrido na data de ruptura do projeto.

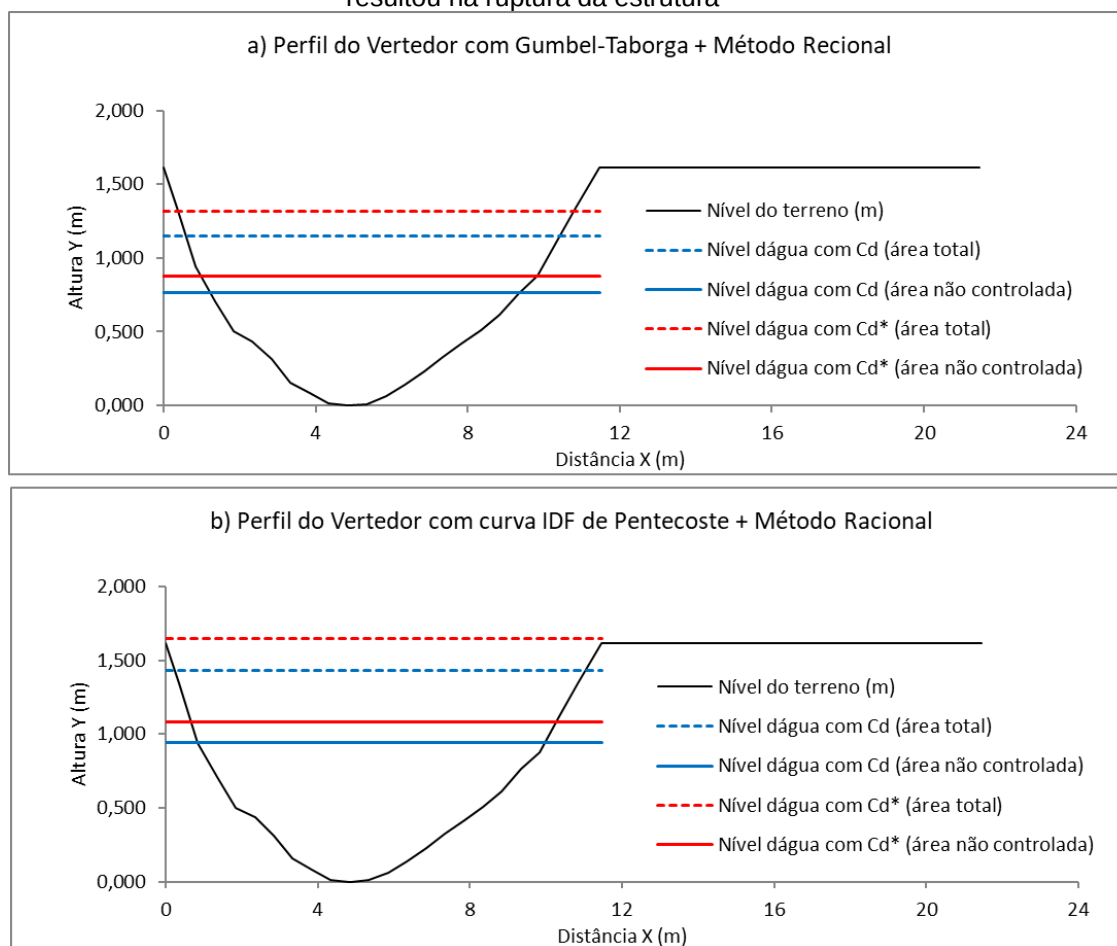
Tabela 13 – Estimativa do nível d'água atingido no vertedor

Simulação	Gumbel-Taborga		IDF-Pentecoste	
	Cd	Cd*	Cd	Cd*
Altura d'água para vazão na área total (m)	1,147	1,318	1,431	1,648
Altura d'água para vazão na área não controlada (m)	0,764	0,874	0,946	1,085

Cd é o coeficiente de descarga para vertedor de soleira espessa com escavação do terreno natural e
Cd* é o coeficiente de descarga ajustado

Fonte: autora, 2023

Figura 31– Estimativa dos níveis d'água atingidos no vertedor da barragem com o evento que resultou na ruptura da estrutura

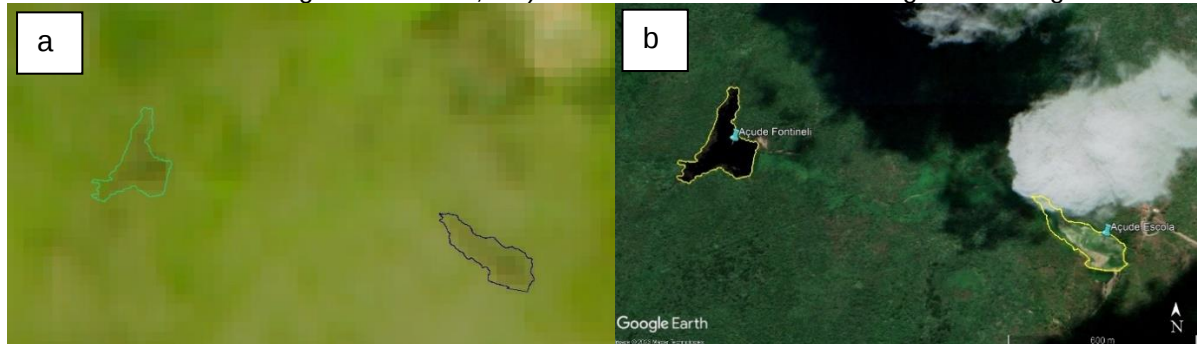


Fonte: autora, 2023

Na Figura 32, é observado dois períodos distintos referentes as áreas dos açudes Escola e Fontineli, sendo Figura 32(a) antes do rompimento e Figura 32(b)

após o rompimento. Portanto, é possível perceber que ambos os reservatórios se encontravam com volumes acumulados próximos da capacidade de armazenamento no mês de abril, pouco antes do colapso da barragem do açude Escola, o que pode ter potencializado os riscos de ruptura com a onda de cheia registrada.

Figura 32 – Registro da situação do açude Escola e Fontinelle em termos de acúmulo de água: a) em 15/04/2020 usando imagem Landsat 8; e b) em 06/2020 com base em imagem do Google Earth Pro



Fonte: autora, 2023

Com base no que foi observado em campo, alguns fatores também podem ter contribuído para a ruptura do barramento, como a presença formigueiros na barragem, e a existência de árvores de grande porte identificados no maciço.

Outro fato que merece destaque é a grande quantidade de vegetação o presente no canal de aproximação do vertedouro do açude Escola, conforme relatos de moradores próximo ao açude, no qual este aspecto de grande quantidade de vegetação, aumenta a rugosidade e diminui a capacidade de extravasamento daquela estrutura hidráulica. Portanto, o rompimento da barragem pode ter sido resultante deste conjunto de fatores que comprometeram diretamente a segurança da estrutura.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados deste estudo, pode-se concluir que de acordo com o MDE gerado, houve uma perceptível alteração na área de inundação do açude Escola, havendo uma formação de um canal natural ao longo do perfil longitudinal, apontando que houve uma importante remobilização dos sedimentos do leito do reservatório provocado pelo rompimento da barragem. O sedimento mobilizado supostamente seguiu seu percurso em direção ao rio Curú, que amorteceu a onda de cheia gerada e recebeu a carga de sedimentos exportado do açude Escola.

Esta pesquisa mostra, ainda, que os eventos de escoamento nos anos subsequentes à ruptura da barragem não tiveram capacidade de transporte de sedimentos suficiente para gerar processos erosivos adicionais importantes, seja pelo crescimento da vegetação no leito do reservatório ou pela baixa magnitude dos eventos de escoamento.

Por fim, o estudo de cheia realizado, confirma que mesmo um evento com baixa recorrência como este registrado na data da ruptura da barragem do açude Escola, com precipitação diária de 105,6 mm e 10,6 anos de tempo de retorno, pode provocar o colapso da estrutura, quando não há a adoção de práticas de controle de segurança do talude e instalações hidráulicas, ou ainda quanto tal estrutura não foi adequadamente dimensionada, como é comum em pequenos reservatórios do Estado do Ceará.

Este estudo de rompimento de uma pequena barragem no Ceará com a caracterização da fenda onde ocorreu a ruptura, e os efeitos deste evento na topografia de leito do reservatório, é pioneiro no Estado, portanto podendo derivar em muitas outras pesquisas futuras, sobretudo em um Estado que a grande maioria dos pequenos barramentos são antigos e não monitorados.

Vale ressaltar que o presente estudo sugere que investimentos em gestão pública de recursos hídricos no monitoramento de pequenas barragens quanto à segurança da estrutura são justificáveis com custos relativamente baixos, quando comparado aos danos negativos de um rompimento de barragem, que podem custar vidas humanas, de animais e estragos físicos e psicológicos à comunidade afetada.

Como recomendação a trabalhos futuros, aponta-se investigar o processo de rompimento e propagação da onda de cheia a jusante da barragem; modelar os impactos da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura da barragem na

topografia de leito do riacho nos trechos de jusante e estimar os riscos de rompimento de pequenas barragens do Semiárido Brasileiro para vazões associados a tempos de retornos mais recorrentes.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional das Águas; Ministério do Meio Ambiente. **Classificação de Barragens: Melhores Práticas Nacionais e Internacionais** [Documento Técnico]. Brasília, DF: ANA; 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2013). **Serviços analíticos e consultivos em segurança de barragens**. Agência Nacional de Águas, Brasília.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2019). **Relatório de segurança de barragens 2018**. Agência Nacional de Águas, Brasília.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2020). **Relatório de segurança de barragens 2019**. Agência Nacional de Águas, Brasília.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2021). **Relatório de segurança de barragens 2020**. Agência Nacional de Águas, Brasília.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2022). **Relatório de segurança de barragens 2021**. Agência Nacional de Águas, Brasília.
- AGUIAR, D. P. O. **Contribuição ao Estudo do Índice de Segurança de Barragens – ISB**. 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, Campinas, 2014.
- ALEXANDRE, D.M.B. **Gestão de pequenos sistemas hídricos no semiárido nordestino**. 2012. Tese – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- ALMEIDA, T. R. **Dinâmica de Transporte de Sedimento não-uniforme em um Micro-reservatório no Semiárido**. 2019. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- ANNOR, F. O.; VAN DE GIESEN, N.; LIEBE, J.; VAN DE ZAAG, P.; TILMANT, A.; ODAI, S. N. (2009). Delineation of small reservoirs using radar imagery in a semi-arid environment: A case study in the upper east region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 34(4–5), 309–315.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.08.005>
- ARAÚJO, J. C.; MOLINAS, P. A.; JOCA, E. L. L.; BARBOSA, C. P.; BEMFEITO, C. J. S.; BELO, P. S. C. Custo de Disponibilização e Distribuição da Água por Diversas Fontes no Ceará. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 36, nº 2, 2005.
- ARVOR, D.; DAHER, F. R. G.; BRIAND, D.; DUFOUR, S.; ROLLET, A.-J.; SIMÕES, M.; FERRAZ, R. P. D. (2018). Monitoring thirty years of small water reservoirs proliferation in the southern Brazilian Amazon with Landsat time series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 145, 225–237.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.015>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995) **ABNT NBR 6502: SOLO – Rochas e Solos**. Rio de Janeiro/RJ.

AVISSE, N.; TILMANT, A.; MÜLLER, M. F.; ZHANG, H. (2017). Monitoring small reservoirs storage from satellite remote sensing in inaccessible áreas (preprint).

Water Resources Management/Remote Sensing and GIS.

<https://doi.org/10.5194/hess-2017-373>

BARBOSA, A. S. Os impactos ambientais dos reservatórios artificiais. **ECODEbate**, 2010. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2010/08/04/os-impactos-ambientais-dos-reservatorios-artificiais-artigo-de-altair-sales-barbosa/>. Acesso em: 23 julho 2021.

BELLOS, C., HRISSANTHOU, V. (1998) Numerical Simulation of Sediment Transport Following a Dam Break. **Water Resources Management**. 12, 397-407. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1008077821353>

BELLOS, C., HRISSANTHOU, V. (2003) Numerical Simulation of Morphological Changes in Rivers and Reservoirs. **Computers and Mathematics with Application**. 45, 453-467. doi: [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(03\)80030-5](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(03)80030-5)

BERGHOUT, A.; MEDDI, M. Sediment transport modelling in Wadi Chemora during flood flow events. **J. Water Land Dev**. 2016, 31, 23–31. DOI: 10.1515/jwld-2016-0033

BLOG da Topografia. BLOG da Topografia por cpe tecnologia. C2019. Página inicial. Disponível em: < <https://blog.cpetecnologia.com.br/gnss-global-navigation-satellite-system/> >. Acesso em 29 de dez. de 2022.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRAGA, B.B., CARVALHO, T.R.A., BROSINSKY, A., FÖRSTER, S., MEDEIROS, P.H.A. (2019) From waste to resource: cost-benefit analysis of reservoir sediment reuse for soil fertilization in a semiarid catchment. **Science of the Total Environment**, 670, 158-169. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.083

BRAGA, B.B., NUNES JÚNIOR, F.H., BARBOSA, R.M., BRITO, P.O.B., MARTINS, K., MEDEIROS, P.H.A., GONDIM, F.A. (2017) Biomass production and antioxidative enzyme activities of sunflower plants growing in substrates containing sediment from a tropical reservoir. **Journal of Agricultural Science**, 9, 95-106. doi: 10.5539/jas.v9n5p95

BRASIL. Lei nº 12.234, 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. **Diário Oficial da União**. 21 Set 2010.

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. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm Acesso em: 17 de jan. de 2022.

CAMPOS, J. N. B.; NETO, J. V.; QUEIROZ, E. A. Impacto cumulativo da pequena açudagem: estudo de caso do açude várzea do boi, em Tauá-CE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5., 2000, Natal, RN. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2000. v.1. p. 231-237.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. Guia de avaliação de assoreamento em reservatórios. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2000b.

CARVALHO, N. O.; GUILHON, L. G.; TRINDADE, P. A. O Assoreamento de um Pequeno Reservatório - Itiquira, um Estudo de Caso. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v 5, n.1, p. 69-79, 2000.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; SCHETTINI, E. B. C.; FAN, F. M. Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.16, n.4, p. 119-133, 2011.

COSTA, G. B. R.; LAU, G. R.; SILVA, C. F.; MANTEL, M. C. B.; PERES, M. C. M.; LUNA, T. N. S. S.; SILVA, P. N. Rompimento da barragem em Brumadinho: um relato de experiência sobre os debates no processo de desastres. **Saúde em Debate**. Rio de Janeiro, v. 44, n. especial 2, p. 377-387, 2020.

CPRM – **SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL**. Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará - Diagnóstico do Município de Pentecoste, Fortaleza, 1998.

DE ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A. (2013). Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments. **Australian Journal of Water Resources**, v.17, p. 87-100.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical. **Dados climatológicos**: Estação de Pentecoste. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2001. 14 p.

EMMETT, M. & MOODIE, T. B., (2008). Dam-break flows with resistance as agents of sediment transport. **Phys Fluids**, 20(8), p. 086603. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2967534>

EMMETT, M., MOODIE, T. B., (2009). Sediment transport via dam-break flows over sloping erodible beds. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, v. 63, ISSN 1743-3533.

FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; LOCKS, C. J.; PAPA, D. A. Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2016.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. Mapeamento das barragens dos pequenos reservatórios d'água situados no Estado do Ceará, **Relatório Técnico**, fevereiro, 2021.

GAAGAI, A.; BOUDOUKHA, A.; BENAABIDATE, L. Failure simulation of Babar dam - Algeria and its impact on the valley downstream section. **J. Water Land Dev.** 2020, 44, 75–89. <https://doi.org/10.24425/jwld.2019.127048>

GOMES, F. E. F. **Processos Hidrossedimentológicos em uma Bacia Experimental do Semiárido Brasileiro**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GOMES, T. B. S. **Modelagem e Caracterização Geotécnica do solo da Barragem do Assentamento Olivencia localizada no Município de Quixadá/CE**. 2019. 89 f. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

GUIMARÃES, G. M. **Avaliação da Concentração de Metais e Elementos Traço em amostras de Sedimento do Reservatório Guarapiranga, São Paulo – SP, Brasil**. 2011. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HABETS, F.; PHILIPPE, E.; MARTIN, E.; DAVID, C. H.; LESEUR, F. (2014). Small farm dams: Impact on river flows and sustainability in a context of climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, 18(10), 4207–4222. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4207-2014>

HUDSON, J., SWEBY, P.K., (2003). Formulations for numerically approximating hyperbolic systems governing sediment transport. *J. Sci. Comput.* 19(1e3), 225-252. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1025304008907>.

HUGHES, D. A.; MANTEL, S. K. (2010). Estimating the uncertainty in simulating the impacts of small farm dams on streamflow regimes in South Africa. **Hydrological Sciences Journal**, 55(4), 578–592. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.484903>

JÓNATAS, R. J. L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento Ensaios experimentais com aterros homogêneos**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional Ensaio**. ISSN: 2317-6369, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-6369000016016>

LASAGE, R.; AERTS, J. C. J. H.; VERBURG, P. H.; SILESHI, A. S. (2015). The role of small scale sand dams in securing water supply under climate change in Ethiopia. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 20(2), 317–339. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9493-8>

LAX, P. D., WENDROFF, B. (1964) Difference schemes for hyperbolic equations with high order of accuracy, **Comm. Pure Appl. Math.** 17, 381–398. doi: <https://doi.org/10.1002/cpa.3160170311>

LBB. LBB Engenharia e Topografia, c2019. Página inicial. Disponível em: <<https://www.lbbengenharia.com.br/estacao-total-como-funciona-e-pra-que-serve/>>. Acesso em 29 de dez. de 2022.

LEMOS, J. R **Florística, estrutura e mapeamento da vegetação de caatinga da estação ecológica de Aiuaba, Ceará**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 139p. 2006.

LIANG, Q.H., (2011). A coupled morphodynamic model for applications involving wetting and drying. **J. Hydrodyn. Ser. B** 23(3), 273-281. doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60113-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60113-8).

LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. (2005). Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 30(6–7), 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.06.011>

LIMA NETO, IE; WIEGAND, MC; de ARAÚJO, JC (2011) Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, 56, 319-333. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.553616>

LIRA, D. L. C. **Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem Pereira de Miranda, CE**. 2012. 86 f. (Mestrado Acadêmico em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012.

LIU, X., LANDRY, B.J., GARCIA, M.H., (2008). Two-dimensional scour simulations based on coupled model of shallow water equations and sediment transport on unstructured meshes. **Coast Eng.** 55(10), 800-810. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.012>.

LUINO, F.; TOSATTI, G.; BONARIA, V. Dam Failures in the 20th Century: Nearly 1000 Avoidable victims in Italy Alone. **J. Environ. Sci. Eng.** 2014, 3, 19–31.

MACCORMACK, R. W. (1969). The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering, AIAA Paper 69-354, Amer. Inst. Aeronautics and Astronautics, Cincinnati, Ohio.

MALVEIRA, V. T. C. ARAÚJO, J. C. GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, 17, p. 109-117, 2012. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000404

MAMEDE, G. L., ARAÚJO, N. A. M., SCHNEIDER, ARAÚJO, J. C., C. M., HERRMANN, H. J. (2012) Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of América**. 109:19, 7191-7195.

MAMEDE, G. L.; ARAUJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A. Modelagem hidrossedimentológica de pequenos reservatórios da bacia hidrográfica do Benguê. In: Carlos Nobuyoshi Ide; Luiz Augusto Araújo do Val; Maria Lúcia Ribeiro. (Org.). **Produção de sedimentos e seus impactos ambientais, sociais e econômicos**. Campo Grande: Editora Oeste, 2009, v 4., p. 393-410.

MARIANI, C. F. **Reservatório Rio Grande: caracterização limnológica da água e biodisponibilidade de metais-traços no sedimento**. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MENESCAL, R. A., PERINI, D. S., SCHERER-WARREN, M., CARVALHO, M. S. B. S., MARTINS, E. S. P. R.; SOARES, A. M. L., CHAVES, L. C. G., OLIVEIRA, F. A. J. Identificação de reservatórios naturais e artificiais no Brasil. In: XVIII **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009, Campo Grande – MG: nov, 2009.

MIALHE, F.; GUNNELL, Y.; MERING, C. (2008). Synoptic assessment of water resource variability in reservoirs by remote sensing: General approach and application to the runoff harvesting systems of south India: Assessing runoff harvesting potential IN India. **Water Resources Research**, 44(5).
<https://doi.org/10.1029/2007WR006065>

MORAIS, A. L. S., MARTINS, D. A., ANDRADE, L. M., PEREIRA, R. S. F.; OLIVEIRA, T. M. Análise Granulométrica: uma revisão bibliográfica. **Journal of Exact Sciences**. ISSN online: 2358-0348. v.28, n.1, pp. 05-10, 2021.

MOTA, K. R. R. **Rompimento Hipotético e Delimitação da Área de Inundação da Barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

NETO, I. E. L., WIEGAND, M. C., ARAÚJO, J. C. (2011) Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin, **Hydrological Sciences Journal**, 56:2, 319-333.

NETO, M. C. P. Perspectivas da açudagem no Semiárido Brasileiro e suas implicações na região do Seridó Potiguar. **Sociedade & Natureza**, v. 29, n. 2, pp. 285-294, 2017.

NETO, R. G. G.; MELSEN, L. A.; MARTINS, E. S. P. R.; WALKER, D. W., VAN OEL, P. R. Drought Cycle Analysis to Evaluate the Influence of a Dense Network of Small Reservoirs on Drought Evolution. **Water Resources Research**, 58, 2021, e2021WR030799. <https://doi.org/10.1029/2021WR030799>

OLIVEIRA, A. M. **Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Inundação por Rompimento de Barragem em Ambiente Semiárido**. 2016. 143 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PEIXOTO, R. A. O. **Estudo do Transporte de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão – UPGRH-PN 1**. 2019. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PEREIRA, E. C. B. **Avaliação do Sedimento e Nutrientes aportados em um Reservatório no Semiárido**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PETER, S.; DE ARAÚJO, J. C.; ARAUJO, N.; HERRMANN, H. J. Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. **Journal of Hydrology (Amsterdam)**, v. 512, p. 408-420, (2014). doi: 10.1016 / j. jhydrol.2014.03.001

PILOTTI, M.; MARANZONI, A.; TOMIROTTI, M.; VALERIO, G. 1923 Gleno Dam Break: Case Study and Numerical Modeling. **Journal of Hydraulic Engineering**. 137, 4, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000327](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000327)

PINTO, T. J. S. **Macroinvertebrados como Bioindicadores em Riacho Tropical: uma avaliação de impactos por Sedimentação, Rompimento de Barragens e de Recuperação após medidas de Restauração**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

PRITCHARD, D. & HOGG, A., (2002). On sediment transport under dam-break flow. **J. Fluid Mech**, 473, pp. 265–274. doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112002002550>

QUINÁGLIA, G. A. **Caracterização dos Níveis Basais de Concentração de Metais nos Sedimentos do Sistema Estuarino da Baixada Santista**. 2006. 269 f. Tese – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

RABELO, U. P.; DIETRICH, J.; COSTA, A. C.; SIMSHÄUSER, M. N.; SCHOLZ, F. E.; NGUYEN, V. T.; NETO, I. E. L. Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. **Journal of Hydrology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>

RITTER, A., Die fortpflanzung der wasserwellen. Z Verein Deutsch Ing, 36, pp. 947–954, 1892.

ROBAINA, A. D., ANDREIS, C., PEITER, M. X., ROSSO, R. B., KOPP, L. M., BARZOTTO, F. Dinâmica hídrica de um reservatório afetado pela construção de um segundo reservatório à montante. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v.7, n.4, p. 43-48, 2013.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; OLIVEIRA, T. S.; LOBATO, F. A. O. Equações de Intensidade – duração – frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agraria**. Curitiba, v. 9, n. 4, p. 511-519, 2008.

SAMPAIO, M. V. N. **Segurança de Barragens de terra: um relato da experiência do Piauí**. 2014. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SAWUNYAMA, T.; SENZANJE, A.; MHIZHA, A. (2006). Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane catchment. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 31(15–16), 935–943. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.08.008>

SCS (1957). Engineering Handbook: Section 4 Hydrology. Washington: U.S. Dept. Agr. Supplement A.

SILVEIRA, P. R. S. **Dinâmica de Sedimentos e Granulometria em Ambiente Semiárido**. 2019. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SOARES, E. C. **Projeto Estrutural de uma Barragem de Concreto com Contraforte**. 2014. 98 f. TCC (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SOARES-FRAZÃO, S., ZECH, Y., (2011). HLLC scheme with novel wave-speed estimators appropriate for two-dimensional shallow-water flow on erodible bed. **Int. J. Numer. Meth. Fluid**. 66(8), 1019-1036. doi: <https://doi.org/10.1002/fld.2300>.

SOUZA, M. M. **Estudo para o Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC**. 2013. 139 f. TCC (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

STOKER, J. J., (1957) Water Waves: The Mathematical Theory with Applications. Interscience.

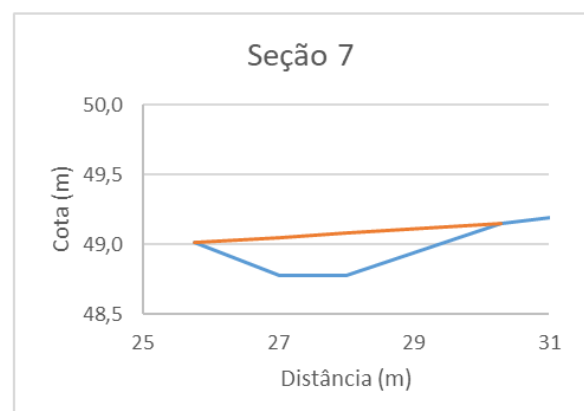
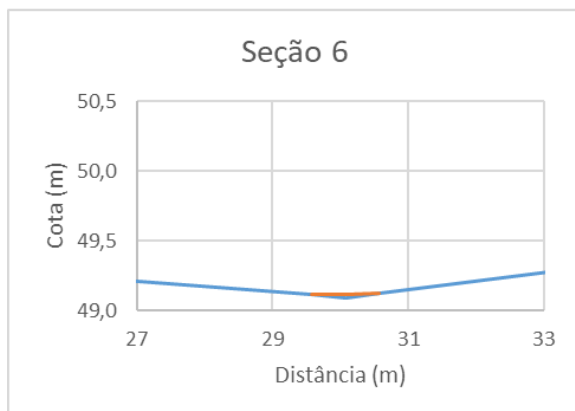
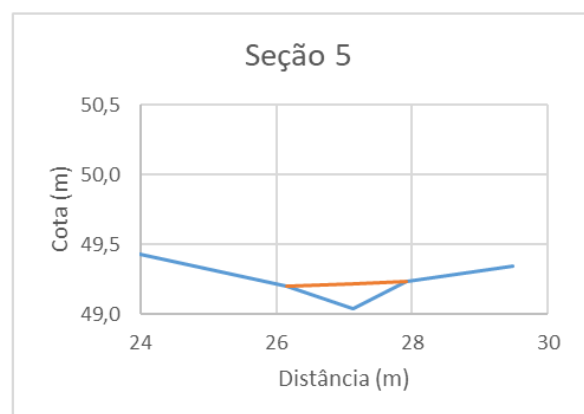
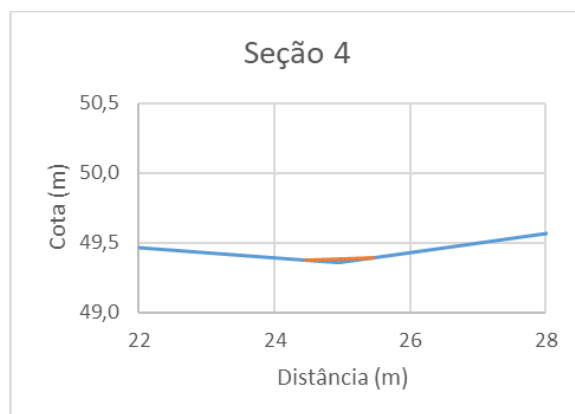
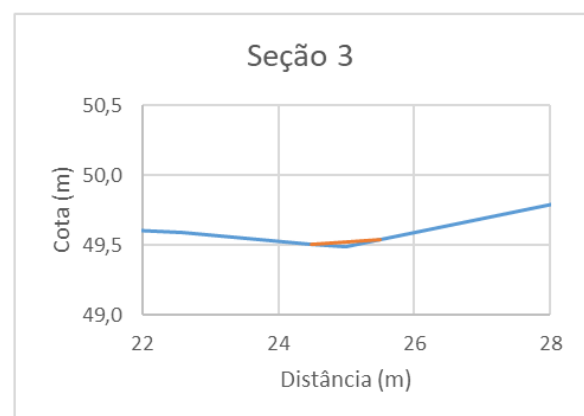
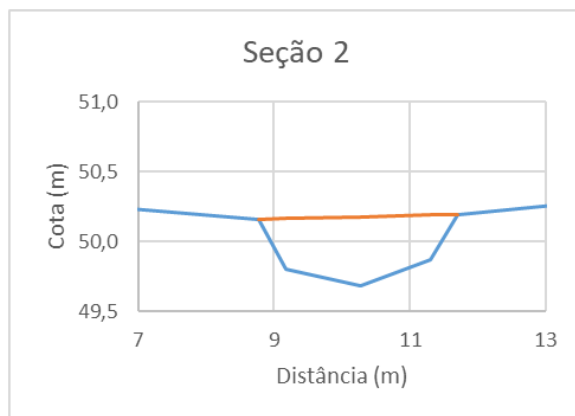
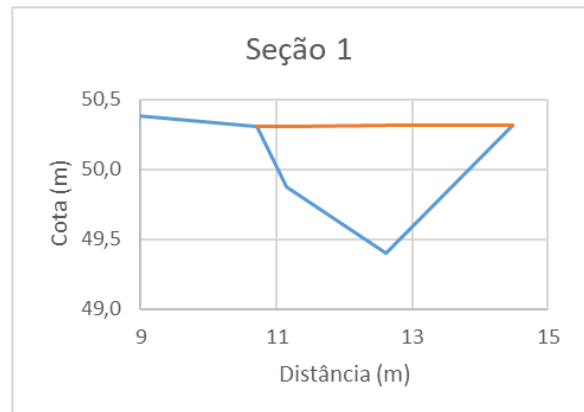
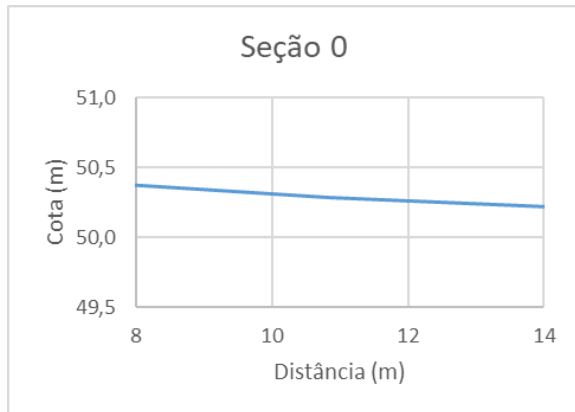
TOLEDO, C. E. ALCANTARA, N. R. Sensitivity of hydrological connectivity in a semiarid basin with a high-density reservoir network. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. ISSN 1980-993X, abril, 2019. doi:10.4136/1980-993X

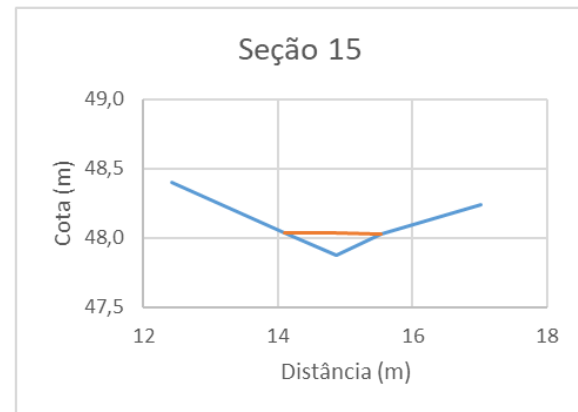
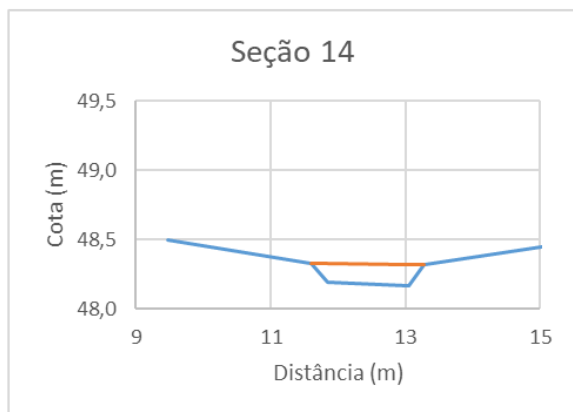
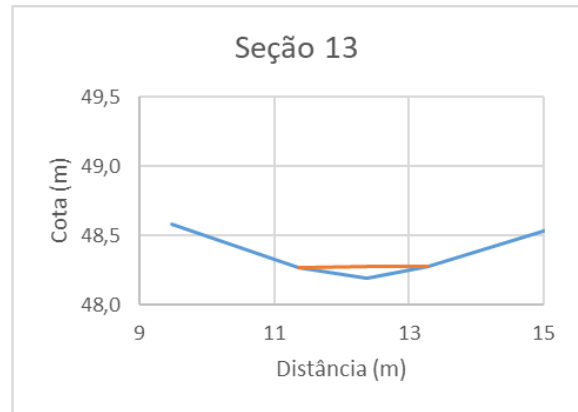
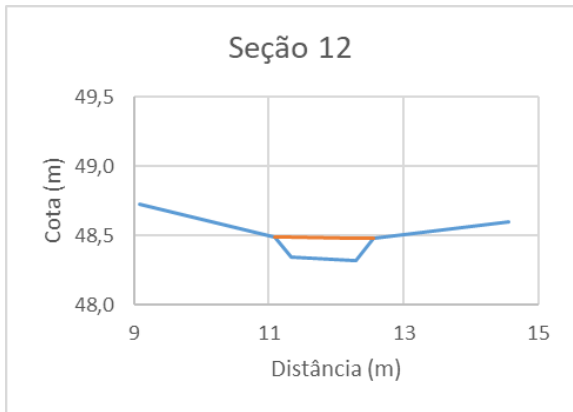
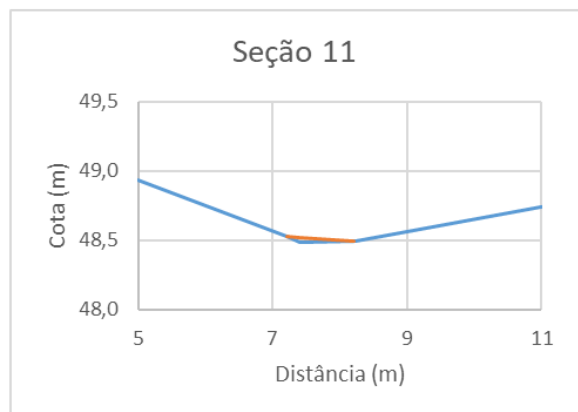
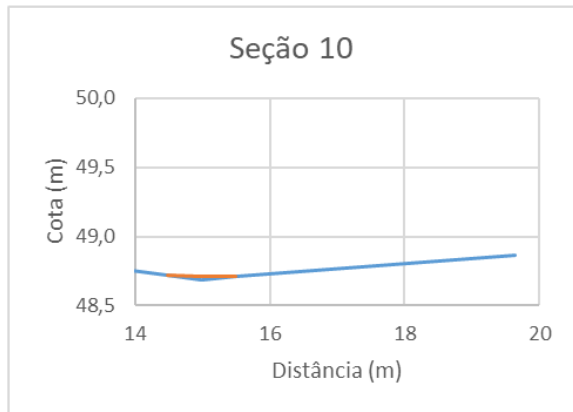
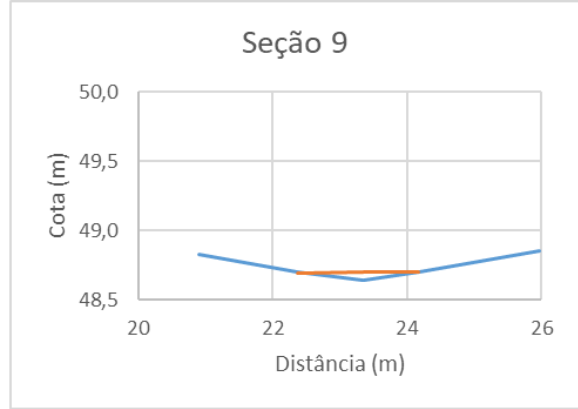
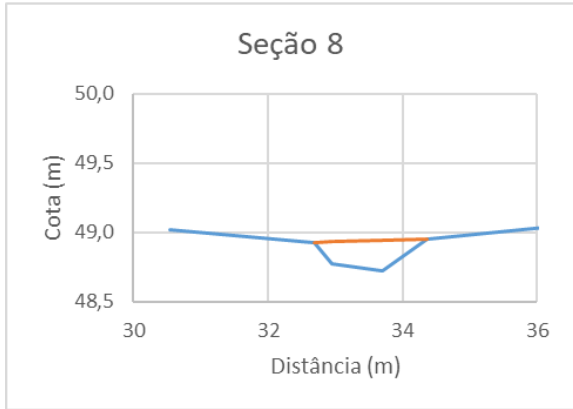
TUCCI, C.E.M (1995). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Editora UFRGS, Porto Alegre.

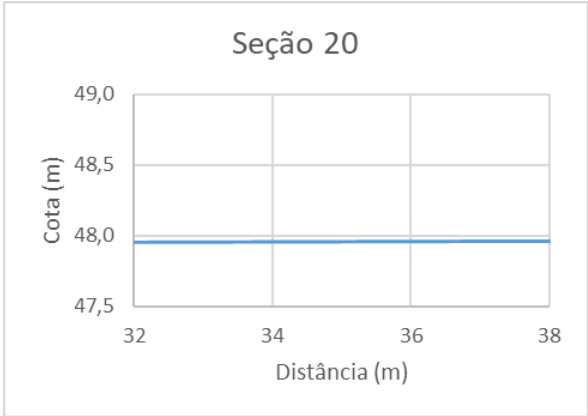
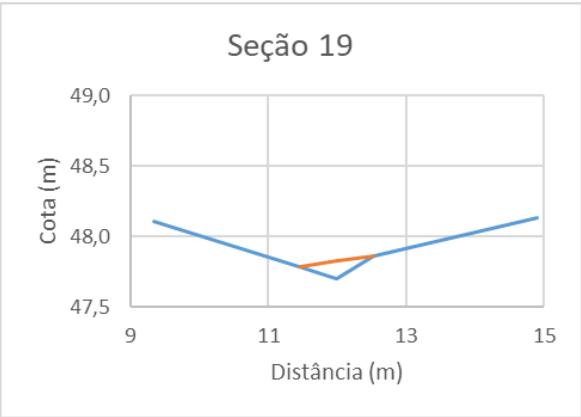
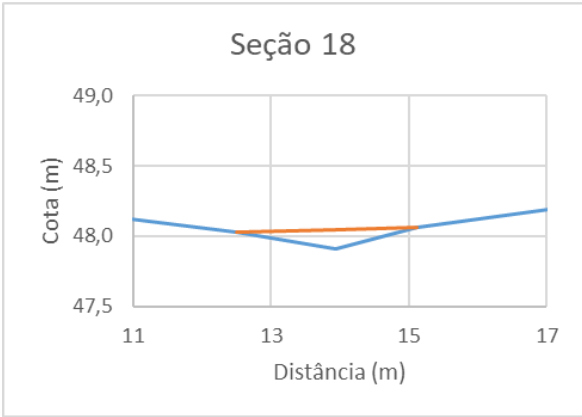
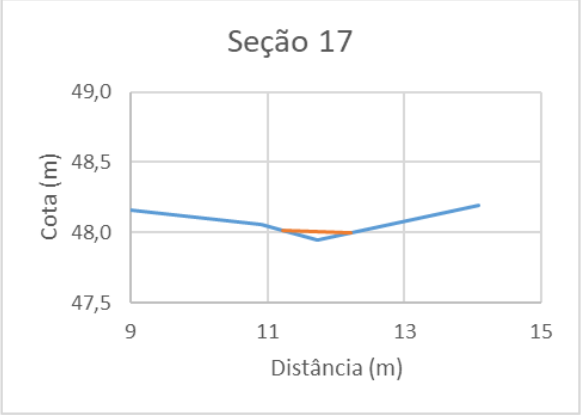
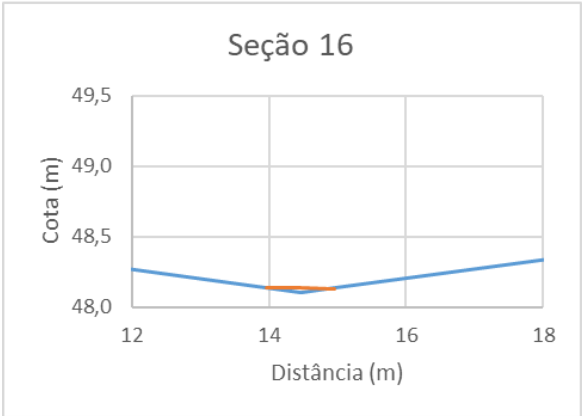
ZANIN, P. R.; BONUMÁ, N. B.; FRANCO, D. Comportamento Hidrossedimentológico de Bacia Hidrográfica com Reservatório. **Geociências**. São Paulo, UNESP, v. 36, n. 1, p. 185-203, 2017.

ZHAO, J., OZGEN, I., LIANG, D., HINKELMANN, R. (2017). Comparison of depth-averaged concentration and bed load flux sediment transport models of dam-break flow. **Water Science and Engineering**. v. 10. p. 287-294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.12.006>

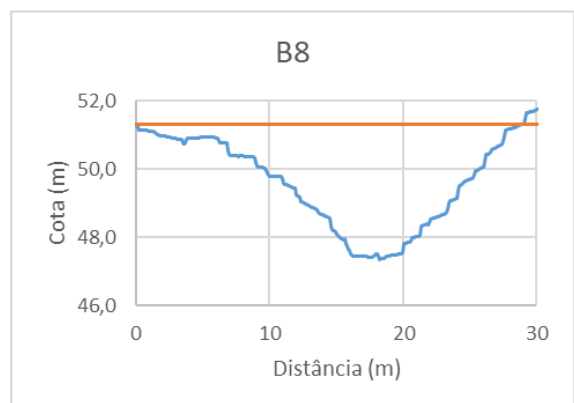
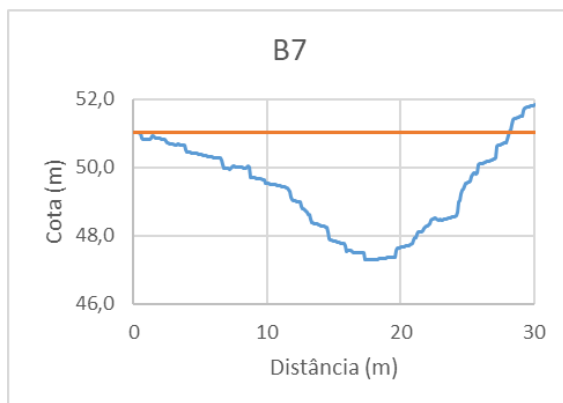
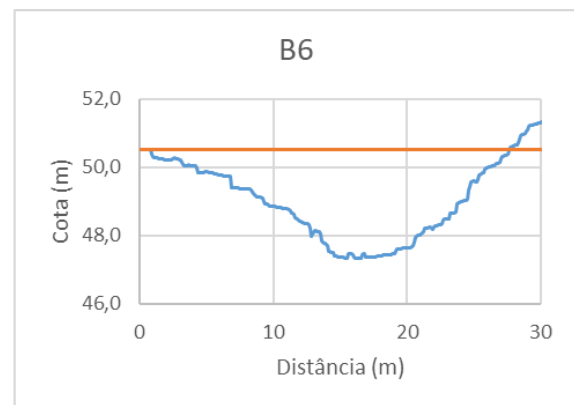
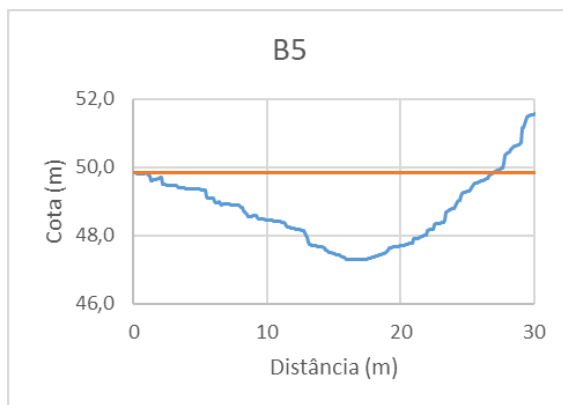
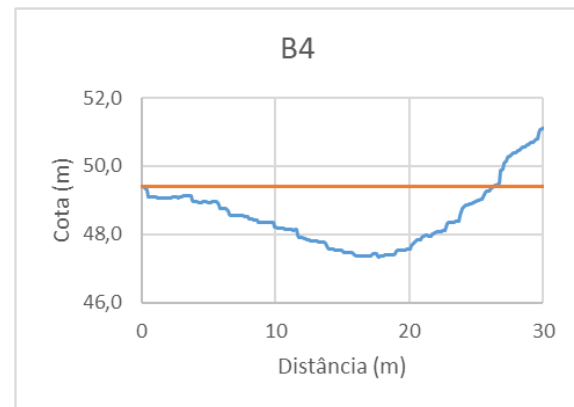
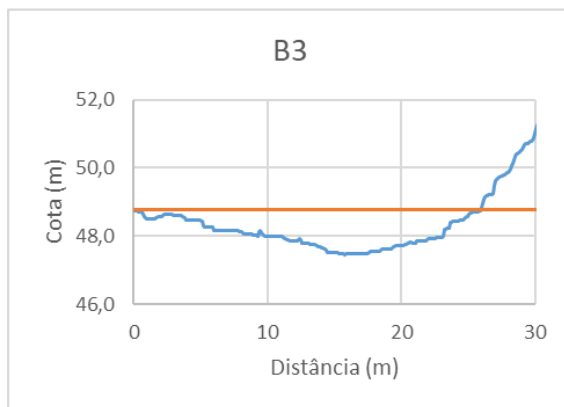
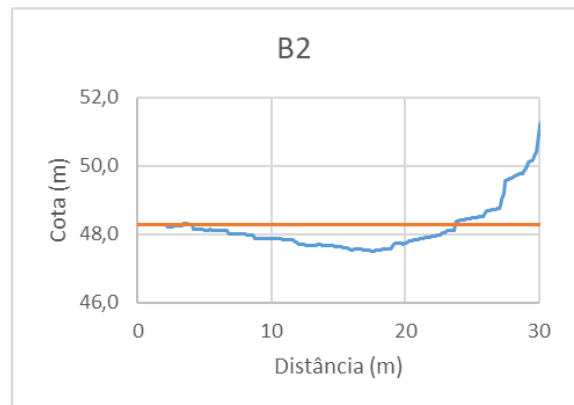
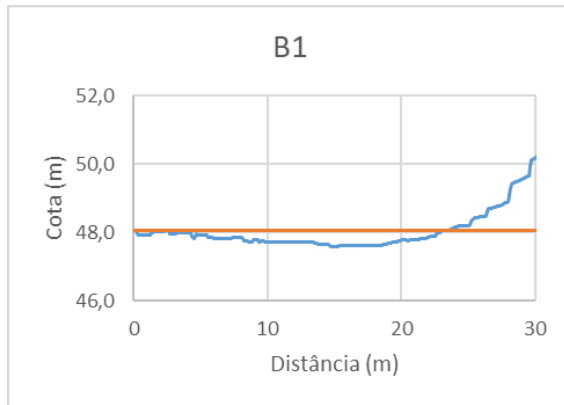
ANEXO I – SEÇÕES DO LEITO DO RIO

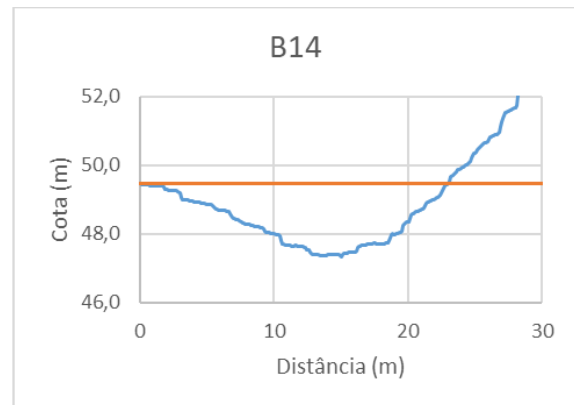
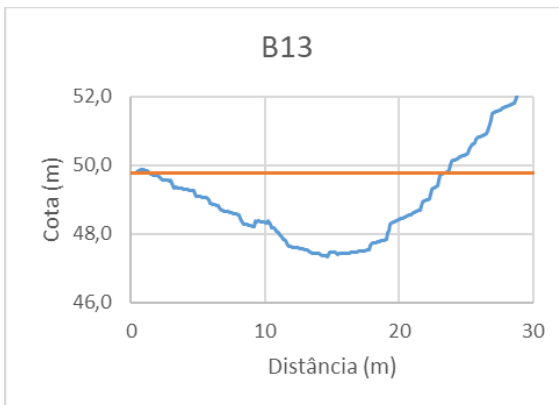
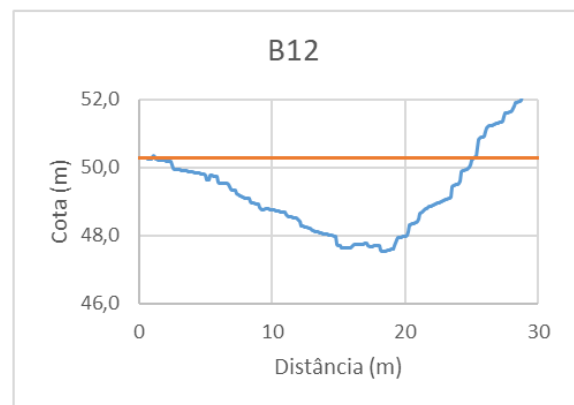
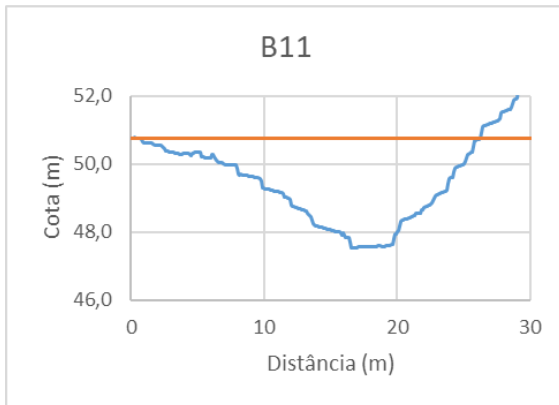
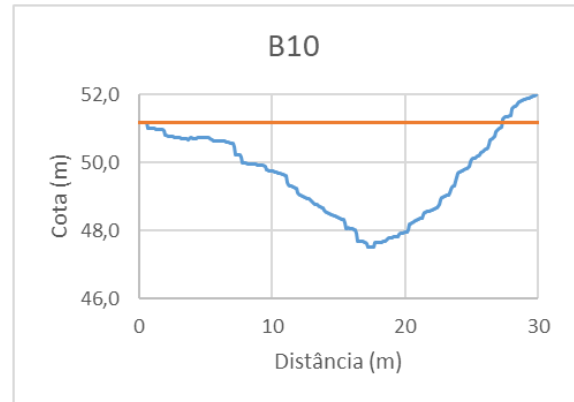
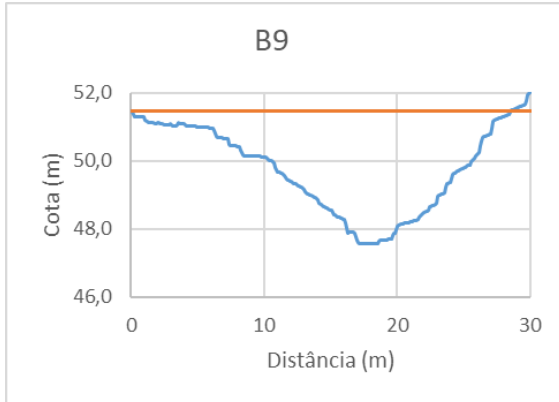






— Seção após rompimento — Seção antes do rompimento

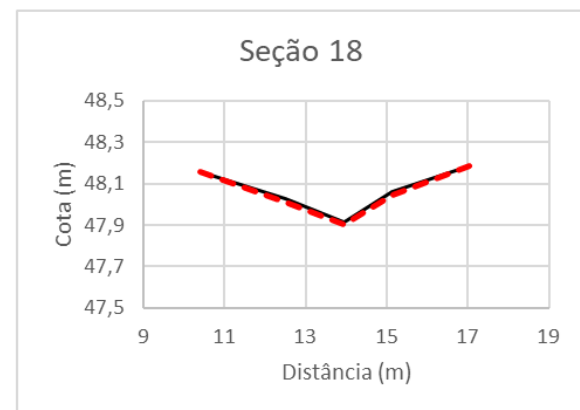
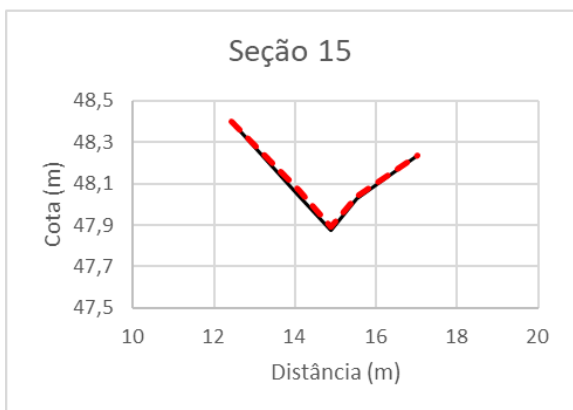
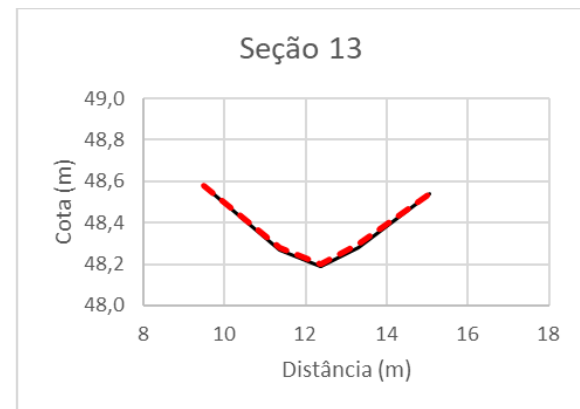
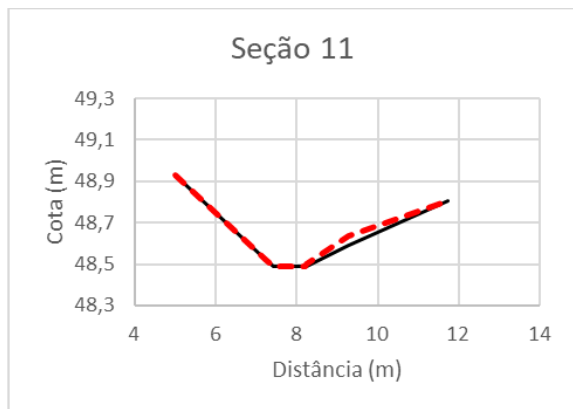
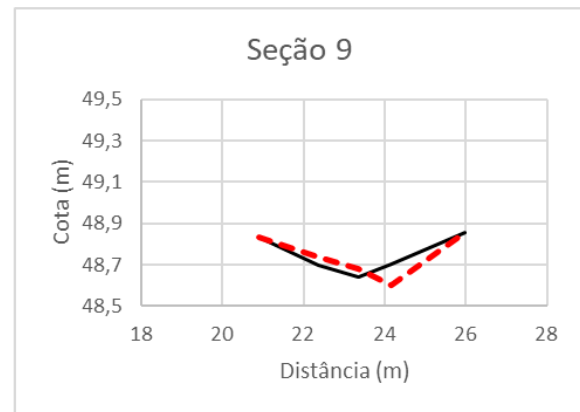
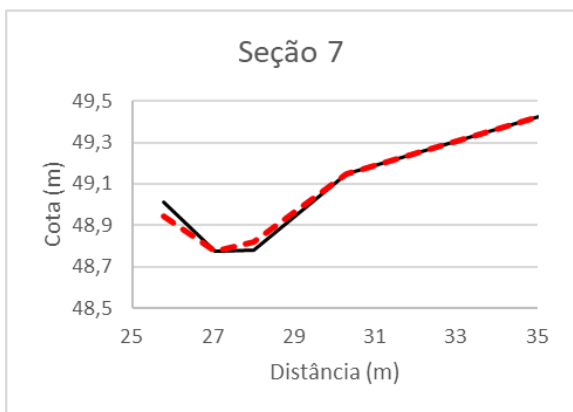
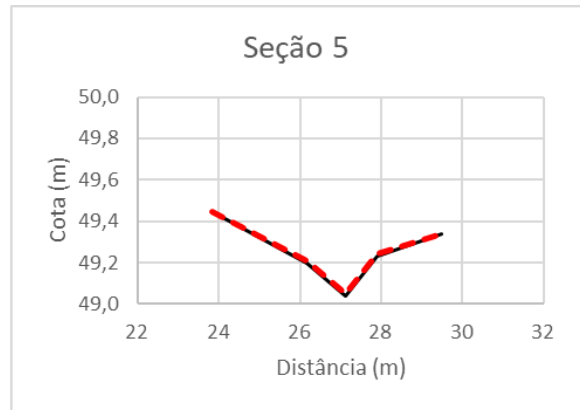
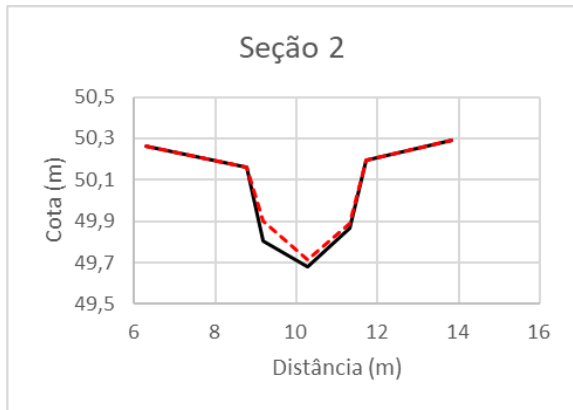
ANEXO II – SEÇÕES DA PAREDE DA BARRAGEM

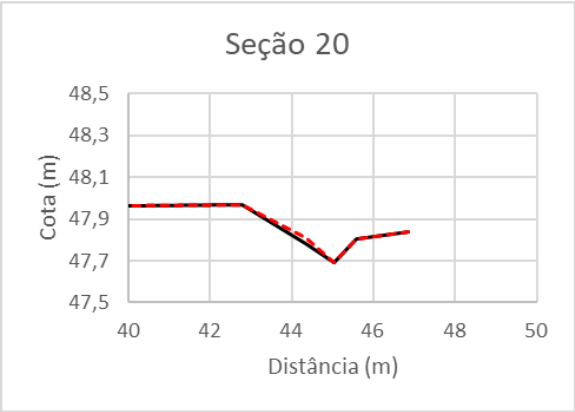


— Seção após rompimento

— Seção antes do rompimento

ANEXO III – SEÇÕES DO LEITO DO RIO APÓS MONITORAMENTO





— 2021 - - - 2022