



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**THAIS RODRIGUES ALMEIDA**

**DINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO NÃO-UNIFORME EM UM  
MICRO-RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO**

**FORTALEZA**

**2019**

THAIS RODRIGUES ALMEIDA

DINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO NÃO-UNIFORME EM UM MICRO-  
RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Hidrologia e Hidrossedimentologia.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A451d Almeida, Thais Rodrigues.  
Dinâmica de transporte de sedimento não-uniforme em um micro-reservatório no semiárido / Thais Rodrigues Almeida. – 2019.  
81 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. George Leite Mamede.
1. Erosão. 2. Hidrossedimentologia. 3. Assoreamento de micro-reservatório. I. Título.

CDD 630

---

THAIS RODRIGUES ALMEIDA

DINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO NÃO-UNIFORME EM UM MICRO-  
RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Hidrologia e Hidrossedimentologia.

Aprovado em: 13 / 09 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. George Leite Mamede (Orientador)

Universidade de Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Andrea Almeida Cavalcante

Universidade Estadual do Ceará (UECE)

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelo o dom da vida e pela força nos momentos difíceis, dons concedidos e por sempre está ao meu lado, sem ele nada seria possível.

À toda minha família por ser o alicerce da minha vida.

Aos meus pais por todo amor incondicional, e apoio irrestrito.

À minha mãe, Ednilda, por toda dedicação e incentivo desde o início e durante o período da minha pesquisa. Minha gratidão eterna, sem a contribuição da senhora nada disso seria possível.

Ao meu irmão, Thiago, e minha cunhada, Julliana, por todo apoio e torcida.

Ao Prof. Dr. George Leite Mamede pela excelente orientação, compreensão e dedicação. O senhor foi um anjo enviado por Deus na minha vida acadêmica. Ao senhor minha eterna gratidão.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. José Carlos de Araújo, Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa, Prof. Dr<sup>a</sup>. Andrea Almeida Cavalcante pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao meu trevo da sorte, Luisa, Raissa e Thais. Obrigada pelo suporte, companheirismo, paciência e amizade.

A minha amiga Raissa Gondim, sem a sua singela e simples atitude eu não teria iniciado e nem tampouco concluído mais essa etapa da minha vida acadêmica. Nunca irei esquecer da sua grande ajuda, meu muito obrigada.

Ao Laboratório de Física do Solo – UFC, pelo o espaço concedido para análises e pela colaboração de todos os servidores, em especial o Engenheiro Agrônomo Francisco José (Franzé).

À Magda Cristina e toda equipe do Laboratório de Análise Mineral – LAMIN/BH, pela atenção e apoio concedido com a pesquisa.

Aos colegas da turma de mestrado, em especial Emanuel Firmino, pelas reflexões, colaborações, críticas e sugestões recebidas.

Aos meus colegas de trabalho: Jean, Mariana e Larisse por todo carinho, conselho e suporte.

“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)

## RESUMO

A dinâmica do processo de erosão e a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica tem grande relevância para a gestão dos recursos hídricos. Todos os cursos d'água transportam sedimentos com maior ou menor intensidade, sendo responsáveis pelo o processo de assoreamento. Esse processo provoca a redução da calha do rio e volume de reservatórios, comprometendo assim, o abastecimento humano, sistemas de geração de energia, navegação. Por isso, há interesse em compreender a dinâmica dos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos, principalmente em regiões semiáridas pois são importantes para conservação e preservação das bacias hidrográficas. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar a dinâmica de sedimentos não-uniforme, utilizando a equação de Haan et al. (1994), em um micro-reservatório, a montante do açude escola, localizado na Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC) – Pentecoste/CE. A parte experimental da pesquisa foi realizada com coleta de dados pluviométricos e hidrossedimentológicos, amostras de solo e escoamento superficial durante a quadra chuvosa nos anos de 2018 e 2019. O monitoramento da erosão do solo no micro-reservatório, assim como, o de deposição do sedimento, foi feito com o uso de pinos de erosão. No micro-reservatório, foram aplicados os modelos de transporte de sedimento propostos por Haan *et al.* (1994) e Fifield (2011). Os resultados obtidos indicaram que houve uma mudança na dinâmica do processo erosivo em relação aos monitoramentos realizados na área de estudo. A observação comparativa dos eventos de escoamento monitorados com as alterações observadas no leito do micro-reservatório mostrou que há uma inter-relação entre os eventos de vazões de maiores magnitudes com o aumento da erosão, em comparação a eventos de vazões de menores magnitudes. A partir da espacialização dos parâmetros físicos do solo pode-se perceber a dinâmica do processo erosão e deposição de sedimentos na área monitorada. O modelo proposto por Haan *et al.* (1994), apresentou bom desempenho em simulações de balanço de sedimentos para reservatórios maiores, na aplicação para escala de micro-reservatório, obteve-se uma superestimativa do sedimento depositado.

**Palavras-chave:** Erosão. Hidrossedimentologia. Assoreamento de micro-reservatório.

## ABSTRACT

The dynamics of the erosion process and sediment production in a watershed have great relevance for water resources management. All watercourses carry sediments with greater or lesser intensity, being responsible for the silting process. This process causes the reduction of the river trough and reservoir volume, thus compromising human supply, power generation systems, navigation. Therefore, there is interest in understanding the dynamics of hydrological and hydrosedimentological processes, especially in semiarid regions as they are important for the conservation and preservation of watersheds. Thus, the objective of the study was to evaluate the non-uniform sediment dynamics using the equation of Haan *et al.* (1994), in a micro-reservoir, upstream of the school dam, located at the Curu Valley Experimental Farm (FEVC) - Pentecoste / CE. The experimental part of the research was carried out with rainfall and hydrosedimentological data collection, soil samples and runoff during the rainy season in 2018 and 2019. The monitoring of soil erosion in the micro-reservoir, as well as the sediment deposition, was done with the use of erosion pins. In the micro-reservoir, were applied, sediment transport models proposed by Haan *et al.* (1994) and Fifield (2011). The results indicated that there was a change in the dynamics of the erosive process in relation to the monitoring performed in the study area. Comparative observation of the flow events monitored with the changes observed in the micro-reservoir riverbed that there is an interrelation between the events of larger flow rates and the erosion increase, compared to the events of smaller flow rates. From the spatialization of the physical parameters of the soil, it was possible to observe the dynamics of the erosion process and sediment deposition in the monitored area. The model proposed by Haan *et al.* (1994), showed good performance in sediment balance simulations for larger reservoirs, in the application to micro-reservoir scale, an overestimation of the deposited sediment was obtained.

**Keywords:** Erosion. Hydrosedimentology. Micro-reservoir siltation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Tipos de depósitos de sedimentos nos reservatórios .....	22
Figura 2	– Curvas de sedimento depositado em relação à profundidade para cada tipo de reservatório .....	26
Figura 3	– Curvas de profundidade relativa em relação à área relativa para cada tipo de reservatório .....	27
Figura 4	– (a) Localização do micro-reservatório monitorado; (b) foto do rio principal do micro-reservatório; e (c) rio afluente.....	30
Figura 5	– Hipsometria da bacia de estudo (Bacia Experimental vale do Curu – BEVC) .....	32
Figura 6	– Declividade da bacia de estudo (Bacia Experimental vale do Curu – BEVC) .....	32
Figura 7	– Instrumentos de medida de dados pluviométricos .....	34
Figura 8	– Vertedouro triangular de parede espessa existente na BEVC e localizado na entrada do açude escola .....	35
Figura 9	– Pinos de erosão .....	37
Figura 10	– Pinos de erosão recebendo base de tinta para posterior instalação .....	37
Figura 11	– Distribuição dos pinos no micro-reservatório .....	38
Figura 12	– Instalação dos pinos a montante do vertedouro triangular .....	38
Figura 13	– Instrumento utilizado para o monitoramento dos pinos .....	39
Figura 14	– Amostrador Uhland e amostras indeformadas coletadas .....	40
Figura 15	– Amostras deformadas passando pelo o processo de secagem ao ar livre (TFSA) .....	41
Figura 16	– Amostras sendo preparadas para análise granulométrica (Método da Pipeta) .....	43
Figura 17	– Agitador mecânico e procedimento de sedimentação do solo .....	44
Figura 18	– Conjunto de peneiras utilizadas no processo de fracionamento da areia .....	45

Figura 19 – Vertimento no micro-reservatório (a) e amostras coletadas para análise laboratorial (b) .....	46
Figura 20 – Triângulo da classificação textural .....	48
Figura 21 – Composição granulométrica do solo (U.S.D.A) .....	48
Figura 22 – Trajetória da partícula de sedimento em um reservatório retangular hipotético .....	49
Figura 23 – Seções divididas do micro-reservatório .....	52
Figura 24 – Hidrógrafas dos eventos monitorados .....	54
Figura 25 – Espacialização da dinâmica dos processos erosivos na seção de controle: medição de 22 de março de 2018 (a) e medição de 10 de maio de 2018 (b).....	56
Figura 26 – Massa específica aparente seca do solo: (a) Ano referência 2018 e (b) Ano referência 2019 .....	60
Figura 27 – Diâmetro de referência $D_{50}$ (a) Ano referência 2018 e (b) Ano referência 2019 .....	62
Figura 28 – Classificação textural do solo na área monitorada nos anos de 2018 e 2019 .....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Granulometria do solo matriz em cada seção .....	67
Gráfico 2 – Granulometria do sedimento em suspensão .....	68
Gráfico 3 – Modelagem da quantidade total de sedimentos afluentes, efluentes e depositados, em toneladas, no micro-reservatório no período de 1970-2017 .....	69
Gráfico 4 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados, afluente e efluentes no micro-reservatório, pelo modelo proposto por Haan <i>et al.</i> (1994) (a) e distribuição granulométrica dos sedimentos depositados, afluente e efluentes no Açude Escola, pelo modelo proposto por Haan <i>et al.</i> (1994) (b) .....	71
Gráfico 5 – Curvas granulométricas modeladas nas dez seções da área monitorada .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação e equações do método da redução de área de Borland & Mille .....	25
Tabela 2	– Descrição dos instrumentos utilizados para o monitoramento das variáveis .....	33
Tabela 3	– Precipitação média mensal da BEVC .....	34
Tabela 4	– Tempo de sedimentação de partículas de diâmetro $\leq 0,05$ mm a $\geq 0,02$ mm em suspensão aquosa, para uma profundidade de 5 cm, em diferentes temperaturas da suspensão ( $\rho_p = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ ) .....	44
Tabela 5	– Volume e Fator de Volume (FV) de cada seção .....	53
Tabela 6	– Dinâmica do processo de erosão e deposição de sedimentos com base na cota topográfica, área, volume da seção monitorada .....	55
Tabela 7	– Massa específica aparente seca do solo ( $D_s$ ); Diâmetro de Refrência ( $D_{50}$ ); Classificação textural .....	57
Tabela 8	– Granulometria do solo no micro-reservatório (25 de outubro de 2018) .....	62
Tabela 9	– Granulometria do solo no micro-resevatório (08 de junho de 2019) .....	64
Tabela 10	– Vazões escoadas nos diferentes eventos monitorados no ano de 2019 .....	67

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
3	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
3.1	<b>Semiárido brasileiro</b> .....	17
3.2	<b>Transporte de sedimentos e erosão hídrica em bacias hidrográficas</b> .....	18
3.3	<b>Assoreamento e deposição de sedimentos</b> .....	20
3.4	<b>Modelos de assoreamento de reservatórios</b> .....	24
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	29
4.1	<b>Descrição da área de estudo</b> .....	29
4.1.1	<i>Bacia experimental Vale do Curu</i> .....	29
4.1.2	<i>Monitoramento da área</i> .....	33
4.1.2.1	<i>Precipitação</i> .....	34
4.1.2.2	<i>Escoamento superficial</i> .....	35
4.2	<b>Monitoramento da erosão e deposição na bacia hidráulica do vertedor triangular</b> .....	36
4.3	<b>Caracterização do solo</b> .....	40
4.3.1	<i>Peso específico seco aparente do solo (<math>\rho_s</math>)</i> .....	40
4.3.2	<i>Densidade das partículas (<math>\rho_p</math>)</i> .....	41
4.3.3	<i>Análise granulométrica</i> .....	42
4.3.4	<i>Granulometria do sedimento em suspensão</i> .....	46
4.3.5	<i>Classificação da textura do solo</i> .....	47
4.4	<b>Modelagem do transporte de sedimento não-uniforme</b> .....	49
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	54
5.1	<b>Dinâmica do processo erosivo na seção monitorada</b> .....	54
5.2	<b>Espacialização dos parâmetros físicos do solo</b> .....	57
5.3	<b>Modelagem da dinâmica de sedimento na área monitorada</b> .....	66
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	75
6.1	<b>Recomendações</b> .....	75
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	77

## 1 INTRODUÇÃO

O Semiárido brasileiro se localiza entre as regiões mais propensas e frágeis do mundo. Aproximadamente um terço da superfície terrestre é coberta por esse clima e vegetação, onde tais condições tão adversas são devido às ocorrências de secas periódicas e a ações antrópicas na exploração dos recursos naturais nessas áreas.

As regiões semiáridas do Nordeste brasileiro são conhecidas pelas suas características climáticas específicas, pois as precipitações pluviométricas costumam ser irregulares, tanto espacialmente quanto temporalmente e tem como vegetação predominante a caatinga. Por isso, a compreensão do funcionamento dos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos sobre essa vegetação tão abundantes em nosso Estado são de fundamental importância para os estudos de bacias hidrográficas.

Um processo relevante e característico dessa região é a erosão. Ela está relacionada aos processos de desgastes superficiais do terreno, por meio do desprendimento, transporte e deposição de sedimentos, tendo como principais agentes o vento e a água. Como evidenciado anteriormente, a atuação do homem nesse geossistema, através de práticas agrícolas, desequilibram as condições naturais, acelerando o processo erosivo. (BIGARELLA, 2007).

Entre os tipos de erosão, a hídrica é considerada a mais comum. Esse tipo de erosão é condicionada, basicamente, pelos fatores: precipitação, solo, cobertura, uso e ocupação, topografia e práticas conservacionistas (COGO, LEVIEN & SCHWARZ, 2003). Conforme afirmam os autores, conjuntamente, esses fatores estabelecem a intensidade e as variações nas taxas de perda de solos e nutrientes, através dos sedimentos deixados ao longo dos percursos dos corpos hídricos.

Os sedimentos resultantes do processo erosivo são transportados pela água através do escoamento superficial. Quando a potência de corrente do escoamento é pequena, os sedimentos vão se depositando nos pontos mais baixos da bacia hidrográfica. Segundo Arroio Júnior (2013), “nesse processo o material também pode atingir a rede de drenagem e ser transportado até os reservatórios hídricos, onde se acumularão, causando o assoreamento do mesmo e também a redução da disponibilidade hídrica do reservatório.

A maior parte desses sedimentos se acumula nos reservatórios que são carregados a sua bacia hidráulica, desembocando apenas uma parcela mínima desses detritos. Esse acúmulo de sedimentos nos reservatórios superficiais, na maioria dos casos, é provocado pelo fato de que a energia do escoamento em aquíferos como rios e córregos, é maior que naqueles.

Assim, os sedimentos com maior granulometria, como pedregulho e areia, são os primeiros a sedimentarem-se, enquanto o material mais fino, com uma menor massa, é transportado por mais tempo pelo reservatório, podendo depositar-se mais próximo da barragem ou até mesmo ser vertido à jusante do reservatório. Segundo Araújo *et al.* (2003), o assoreamento dos reservatórios no estado do Ceará reduz em 2% a capacidade de acumulação dos reservatórios a cada década.

Assim a depleção na capacidade de armazenamento hídrico dos reservatórios, geralmente, implica uma redução na disponibilidade de água, porque os reservatórios terão menor volume de armazenamento na estação chuvosa, levando a maiores vazões evaporativas e transbordos do vertedouro (ARAÚJO *et al.*, 2006).

Com o objetivo de se conhecer mais sobre o processo erosivo em bacias, modelos computacionais vêm buscando a compreensão e quantificação dos fenômenos relacionados à erosão e a formação de sedimentos que abrange inúmeras variáveis que atuam nos processos de forma dinâmica e complexa. A caracterização destes fenômenos, segundo Grandó (2011), está relacionada principalmente com os conhecimentos das principais propriedades que intervêm na dinâmica dos processos erosivos, tais como: tipos de solo, características mecânicas, físicas e hídricas do solo, cobertura vegetal, precipitação, prática de manejo etc. Essas variáveis de análises ainda não foram todas verificadas pelos estudos já realizados e necessitam de um trabalho metateórico que envolva várias áreas do conhecimento ligadas às questões ambientais que trabalham com a quantificação desses fenômenos por meio da utilização de diferentes técnicas de monitoramento, experimentação e modelagem (ARROIO JÚNIOR, 2013).

Dessa forma um estudo que caracterize os diversos impactos negativos causados pela erosão e pela deposição de sedimento no meio aquático é relevante como forma de mapear todas as variáveis envolvidas na alteração da qualidade da água, na redução da capacidade dos reservatórios, na diminuição dos sedimentos como portadores de poluentes, atenuação da fotossíntese devido ao aumento da turbidez da água e alterações na biota dos aquíferos fluviais (CARVALHO, 2008).

## 2 OBJETIVO

### Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a dinâmica de sedimentos não-uniforme, em um micro-reservatório, a montante do açude escola, localizado na Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC) – Pentecoste/CE.

### Objetivos Específicos

- Monitorar o processo de deposição e erosão de sedimentos não-uniforme em um micro-reservatório;
- Analisar os parâmetros físicos do solo matriz na área do micro-reservatório.
- Avaliar o padrão granulométrico do sedimento afluyente e efluente à área monitorada;
- Estimar o potencial de retenção de sedimentos em um micro-reservatório.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Semiárido brasileiro

O Brasil é um país privilegiado no que diz respeito aos recursos hídricos, pois possui cerca de 12% de toda a água doce disponível na superfície do mundo. Porém, aproximadamente 73% da água doce disponível no Brasil encontram-se na bacia Amazônica, que apresenta uma demografia abaixo de 5% da população brasileira. Assim, observa-se que somente 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 95% da população (SETTI *et al.* 2000; FIETZ, 2006).

A Região Nordeste detém 28% da população do Brasil e possui apenas 3% de água doce do nosso país. Desse percentual, dois terços dos recursos hídricos estão localizados na bacia do rio São Francisco. Isso mostra que estudos sobre como aumentar a disponibilidade de água e/ou diminuir o consumo em nossa região é um fator importante para o desenvolvimento da Região Semiárida.

Dessa forma, estudiosos da área bem como os órgãos públicos voltados aos recursos hídricos empregam grandes esforços com o objetivo de desenvolver e implantar infraestruturas suficientes para garantir não só o abastecimento humano e animal, mas também viabilizar projetos de irrigação, entretanto, essas medidas inovadoras, preventivas e estratégicas ainda não são suficientes para solucionar os problemas da escassez hídrica no semiárido, tornando assim populações extremamente vulneráveis aos efeitos das secas recorrentes no Nordeste (CIRILO *et al.*, 2010).

A vulnerabilidade ocorre porque, nas regiões semiáridas, o uso da água depende de sua disponibilidade que varia tanto no tempo quanto no espaço, como se verifica em pequenas bacias hidrográficas, onde os recursos hídricos podem não ser abundantes, dependendo dos usos em seu território (POKHAREL, 2007).

A situação espaço-temporal acontece porque a região semiárida brasileira apresenta uma distribuição pluviométrica em quadras chuvosa que ocorrem em um único período, de três a cinco meses no ano, com média anual de 775 mm de precipitação (ANDRADE *et al.*, 2010).

Assim, a disponibilidade hídrica reduzida apresenta uma causa natural e outra antrópica. A primeira causada pelas quadras chuvosas sazonais e pela redução nos níveis pluviométricos menores a cada ano e a segunda, devido ao crescimento demográfico, com necessidade de maior demanda de água, além de mudanças no ciclo hidrológico provocados

pelo uso e ocupação inadequados das bacias hidrográficas. Como consequências tem-se o aumento na competição por água entre a agricultura, indústrias e cidades (ALI & TALUKDER, 2008).

Dentro dessa análise das causas relacionadas ao clima e ao relevo da região, verifica-se que os rios são, predominantemente, intermitentes ou efêmeros, não garantindo a oferta hídrica; os aquíferos encontram-se nas falhas do embasamento cristalino, geralmente possuindo vazão limitada; o abastecimento hídrico é, então, em sua maioria, dependente dos açudes, existindo uma pequena fração da demanda hídrica suprida pelas reservas subterrâneas (ARAÚJO, 2003; ARAÚJO, 2006).

Assim, a existência de açudes na região é essencial para o desenvolvimento do semiárido brasileiro por ser esta uma região deficiente em volume de escoamento dos aquíferos pluviais e seus cursos hídricos parando de escoar um a dois meses após o término do período chuvoso (COSTA, 2010). Dessa forma esses reservatórios possuem uma função socioeconômica, pois são ecossistemas de grande valor econômico, social e cultural, sendo utilizados para múltiplos fins, como o abastecimento doméstico e industrial, irrigação, dessedentação animal, pesca, aquicultura e lazer.

Na próxima seção, apresenta-se a relação entre a erosão e a redução do volume de água nos reservatórios causado pelo processo de deposição de sedimentos ao longo das áreas de inundação.

### **3.2 Transporte de sedimentos e erosão hídrica em bacias hidrográficas**

A atuação antrópica no meio natural provoca, de forma positiva ou negativa diversos impactos ambientais, alterando significativamente o fluxo normal dos vários componentes presentes nos ecossistemas e, conseqüentemente a qualidade ambiental.

Quando se refere aos recursos hídricos, a agropecuária se apresenta como uma das principais atividades causadoras desses impactos, pois a expansão dessa atividade é, em grande parte, responsável por desmatamentos, queimadas em áreas de vegetação nativa, erosão e degradação de solos, contaminação das águas, dentre outros (FIRMINO; FONSECA, 2008).

As alterações verificadas no uso e na cobertura do solo fruto dessas atividades antrópicas resultam em mudanças significativas no balanço hídrico do solo, com efeitos nas camadas superficiais e subsuperficiais, resultando em erosão e transporte de sedimentos, causando diversas transformações nos ecossistemas terrestres e aquáticos (TOLEDO, 2001).

Assim, considera-se sedimento, conforme Carvalho (2008), “toda partícula derivada das rochas ou matéria orgânica pelo processo de intemperismo que pode ser transportada pela água ou pelo vento do local de origem, até os rios e locais de deposição, caracterizando-se por material sólido em suspensão na água ou depositado no leito”.

Os sedimentos podem ser carreados pelo leito (partículas que se movem ao longo do leito do rio), responsável por aproximadamente 10% do total de transporte sólido de um rio (MEADE; YUZYK; DAY, 1990); ou como sedimento suspenso (suportado pelo fluxo e mantido em suspensão pela turbulência do fluido). Lima Neto, Wiegand & Araújo (2011), após conduzirem uma investigação no semiárido do Brasil, constataram que o transporte de leito foi responsável em aproximadamente 30% da carga total de sedimentos registrada na seção de controle da Bacia do Alto Jaguaribe.

A carga de sedimento suspenso apresenta-se como fator fundamental na sua produção e é composta principalmente por partículas com diâmetro menor do que 0,062 mm, embora possa também incluir partículas maiores (fração areia) durante picos elevados de vazão (PINHEIRO, 2013).

Seu transporte ocorre em maiores quantidades nas quadras chuvosas. Entre 70 e 90% de todo o sedimento transportado ocorre nestes períodos, principalmente nos grandes eventos pluviométricos (CARVALHO, 2008).

Uma forma de evitar essa perda tão expressiva seria a preservação da cobertura vegetal, pois o material orgânico presente no solo reduz em até 90% as perdas de solo e até 62% a velocidade de uma enxurrada (SANTOS *et al.*, 2010). Reduzir essa velocidade significa conter mecanicamente o livre escoamento superficial da água e o carregamento dos sedimentos (SILVA *et al.*, 2005).

A remoção da vegetação aumenta o impacto da gota da chuva e, conseqüentemente, aumenta a erosão. A mesma é resultante do desprendimento das partículas de solo que são os principais fatores erosivos por ação pluviométrica, causando enchentes e grandes danos ao solo, que ocorrem frequentemente e com maior intensidade (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). Assim, inicia-se a erosão, um processo físico de desagregação, transporte e deposição de partículas de solo que se dá pela ação do escoamento superficial, que mesmo sendo um processo natural, é fortemente intensificado pela ação antrópica (CASSOL; LIMA, 2003).

Esse processo é um dos principais problemas ambientais que degrada grandes áreas cultiváveis e já reduziu ainda mais outras a uma situação de quase extinção. O solo destruído pela erosão hídrica é geralmente mais fértil, contendo os nutrientes das plantas, húmus e algum fertilizante (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). Durante o escoamento a erosão de

sedimentos resulta no assoreamento que se constituem em efeitos ambientais fora do local de origem (XIUBIN *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2011).

Além do assoreamento e da conseqüente redução da capacidade de armazenamento de água dos reservatórios, a erosão dos solos em bacias hidrográficas também provoca carreamento de outros nutrientes para os açudes, que somados às contribuições antropogênicas aceleram o processo de eutrofização dos reservatórios, comprometendo a qualidade da água, causando prejuízos econômicos e alterando a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas (PANOSSO *et al.*, 2007, COSTA *et al.*, 2009).

Esse processo erosivo dos solos do semiárido brasileiro é causado porque eles são rasos e a vegetação de pequeno porte (OYAMA & NOBRE, 2004). Assim, as chuvas intensas e sazonais causam maior erosão, que associadas às grandes áreas de drenagem das bacias, aumentam a carga de sedimentos e nutrientes enviadas aos reservatórios (ALVES & CAMPOS, 2009), e dessa forma provoca uma redução da capacidade acumulativa e da vida útil dos açudes.

Deste modo, entender a dinâmica dos processos de sedimentação em microbacias e a entrada destes sedimentos aos corpos hídricos tais como cursos de água e açudes, possibilitará compreender porque elevados fluxos desses grânulos nos reservatórios são prejudiciais na disponibilidade hídrica e na redução do volume útil deles (HARRIS, 2001; SUTTON *et al.*, 2011).

### **3.3 Assoreamento e deposição de sedimentos**

A construção de um reservatório propicia muitos benefícios, tais como: geração de energia, abastecimento de água, irrigação, entre outros, porém também gera uma série de modificações físicas, ambientais e sociais no local em que é construído. Sua instalação em um curso d'água provoca alterações no seu equilíbrio sedimentológico, pois o barramento propicia uma significativa perda da velocidade do fluxo da água que, por sua vez, propicia à deposição dos sedimentos transportados no reservatório, ou seja, ocasiona o processo de assoreamento (GLYMPH, 1973; CARVALHO *et al.*, 2000).

Dessa maneira, os reservatórios funcionam como bacias de retenção de sedimentos, visto que proporcionam condições favoráveis à deposição das partículas de solo carreadas pela rede de drenagem (MIRANDA *et al.*, 2013).

O assoreamento dos recursos hídricos e dos reservatórios é a última etapa do ciclo sedimentológico (MIRANDA *et al.*, 2013). O assoreamento é resultante do processo da

remoção de partículas do solo, ocasionada pela sensibilização e posterior desagregação das mesmas. Dessa forma, pode-se considerar que este processo é decorrente, assim, da erosão, transporte, deposição de sedimentos no reservatório.

A erosão do solo causada pela água é capaz de selecionar a distribuição do tamanho da partícula a ser transportada pelo fluxo de água, os quais são dependentes também das condições do tipo de solo, cobertura vegetal e das características da torrente.

O processo de assoreamento do reservatório apresenta considerável complexidade. As partículas de solo transportadas pela rede de drenagem são primeiramente depositadas devido à perda de velocidade do fluxo no reservatório. Há, assim, o acúmulo crescente de sedimentos no açude, e uma redução significativa do volume de água disponível para abastecimento e o atendimento de outros usos consultivos e não consultivos da água (NEGREIROS, 2014).

Durante o processo contínuo de deposição, há distribuição dos sedimentos nos reservatórios, sendo que esta é influenciada pela ocorrência de grandes cheias, responsáveis pelo transporte das partículas de sedimentos. Quando a vida útil do reservatório é afetada pelo assoreamento, tornam-se necessárias medidas intervencionistas para que este seja recuperado a capacidade útil do mesmo (ICOLD, 1989).

Segundo Carvalho (2000; 2008) para as estimativas de assoreamento há diversas variáveis envolvidas, dentre elas:

- a) Carga de sedimentos (quantidade de material sólido afluyente de uma dada seção num rio ou curso d'água);
- b) Eficiência de retenção de sedimentos (relação entre a carga sólida que se deposita no leito do reservatório e a carga sólida total afluyente) e;
- c) Peso específico dos depósitos de sedimentos (relação entre o peso seco do material e o volume ocupado pelo depósito). A estimativa deste parâmetro é necessária para a transformação da carga sólida retida em volume sedimentado.

Carvalho (2000b), afirma que todo curso de água apresenta uma constância no tocante ao transporte de sedimentos, seja por arrasto ou saltitação, seja por suspensão na corrente, havendo uma propensão natural para que a partícula de sedimento seja depositada quando o fluxo natural de sedimentos encontrarem água com menor velocidade, conforme a granulometria das partículas e a turbulência do escoamento.

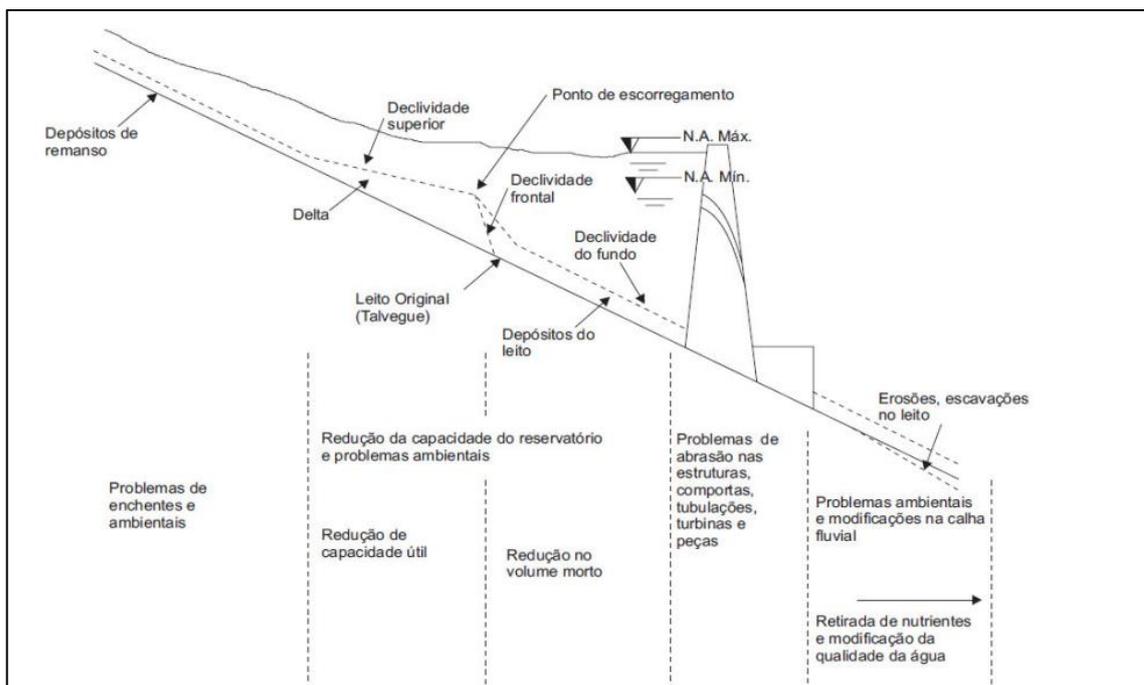
O fenômeno de deposição de sedimentos no reservatório, em escala temporal, influi negativamente na vida útil dessa estrutura hidráulica. Atribui-se a isso, fatores de contribuição

como descarga sólida afluente, característica do sedimento, distribuição espacial e eficiência do reservatório em reter esses sedimentos (CARVALHO, 2000).

Conforme afirma Cortez (2013), a deposição e a disseminação dos sedimentos dentro de um reservatório dependem de vários fatores tais como, declividade, geometria do reservatório, o modo como este é operado, as características minerais das partículas finas de solo e a característica físico-química das águas.

Na Figura 1 são detalhados os principais tipos de depósito de sedimentos nos reservatórios.

Figura 1 – Tipos de depósitos de sedimentos nos reservatórios



Fonte: modificado de Carvalho, (2008).

É perceptível ao analisar a Figura 1, que o processo de assoreamento influencia negativamente na acumulação de água do reservatório e outras atividades econômicas como a geração de energia elétrica, piscicultura. Dessa forma, é importante ter conhecimento prévio da estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, mananciais e rios que alimentam os reservatórios, pois estes dados podem auxiliar no controle do assoreamento e proporcionar a estimativa da redução do volume de armazenamento afetado pela carga de depósitos de sedimentos em diversas áreas da barragem.

De acordo com Negreiros (2014), ao se construir um reservatório as seções transversais do curso d'água são aumentadas, as velocidades da corrente diminuem criando

condições favoráveis para a retenção de sedimento, de forma que as partículas de maiores diâmetros, como pedregulho e areia grossa, são as primeiras a deixar de serem transportadas, enquanto que o sedimento mais fino, como silte, argila e até areia média, entram no reservatório (GUIMARÃES, 2009).

Os depósitos de sedimentos podem ocorrer em canais, reservatórios, deltas, estuários, basicamente de duas formas (NEGREIROS, 2014):

- Provisório: como nas praias ou barras de rios, onde o sedimento fica depositado até que uma cheia o carregue.
- Permanente: como no caso do assoreamento, onde o sedimento devido a ação do peso próprio e da água acaba permanecendo.

O material sólido depositado a montante da barragem é subdividido nos tipos a seguir (NEGREIROS, 2014):

- Depósito de remanso: depósito a montante se referindo ao fenômeno consequente da construção do reservatório.
- Depósito de margem, delta e depósito do leito: são formados por depósito de material sólido mais graúdo, de acordo com Carvalho (2000).
- Depósito de várzea: ocorrem ao longo do reservatório, são formados por meio de cheias e são compostos por materiais finos e grossos.

Dependendo do volume do material assoreado depositado, da sua qualidade e do local, podem ocorrer alguns danos (NEGREIROS, 2014):

- Reservatório assoreado: diminuição de seu volume e vida útil do lago.
- Assoreamento: de estruturas fluviais de modo geral, de calha de rios, dificultando a navegação e aumentando a probabilidade de ocorrer enchentes devido à diminuição de profundidade.
- Depósito de sedimento mais fino: reduz a atividade de pesca artesanal, áreas de recreação, entre outros, devido à aparência de lama, a falta de nutrientes afeta o bioma aquático (peixes e microorganismos).
- Terras agrícolas: a presença de sedimento depositado sem nutriente pode ocasionar a redução da fertilidade, o soterramento da região e ainda o desenvolvimento das plantas.
- Canais: ocorre o depósito de material mais fino propiciando o crescimento de vegetação, prejudicando o escoamento do rio.
- Riachos assoreados: prejudica o abastecimento de água para os animais.

- Diques Naturais: inicia-se um processo de impermeabilização do solo devido ao acúmulo de material mais fino na base do reservatório e favorecendo a formação de área encharcada na zona de várzea.

### 3.4 Modelos de assoreamento de reservatórios

Os modelos utilizados para simular a dinâmica dos sedimentos em reservatórios podem ser classificados em empíricos, baseados em informações preexistentes, e matemáticos, baseados em equações matemáticas, os quais podem ainda ser subdividido em unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) (LAQUINI, 2009).

De acordo com Mamede (2008), muitos modelos empíricos foram desenvolvidos para estimar os padrões de deposição de sedimentos. O primeiro método a ser usado é o método clássico, que assume simplesmente que os sedimentos presos se instalam em camadas paralelas à horizontal linha que fornece resultados pouco realista do processo.

O modelo empírico mais utilizado na predição da distribuição de sedimentos em reservatórios foi desenvolvido por Borland & Miller (1958) e revisado por Lara (1962), sendo chamado de método empírico de redução de área (MAMEDE, 2008).

Borland & Miller (1958) utilizaram levantamentos de 30 reservatórios localizados nos Estados Unidos das Américas (EUA) para desenvolver o método, o qual é baseado na classificação dos reservatórios em quatro tipos, de acordo com um parâmetro de declividade ( $m$ ). Este fator  $m$  é o inverso da inclinação da reta obtida em um gráfico log-log entre os dados de profundidades do reservatório, no eixo das ordenadas, e os dados de capacidade do mesmo, no eixo das abscissas. Para cada forma ou tipo de reservatório uma equação,  $a$ , foi derivada relacionando-se a porcentagem da profundidade do reservatório em relação à porcentagem de sedimento depositado no mesmo.

Esta classificação pode ser visualizada na Tabela 1, em que  $p$  é a profundidade relativa, ou seja, a relação entre a elevação máxima de água e qualquer elevação genérica do reservatório (CAMPOS, 2001 *apud* MAMEDE, 2008).

Tabela 1 – Classificação e equações do método da redução de área de Borland &amp; Miller

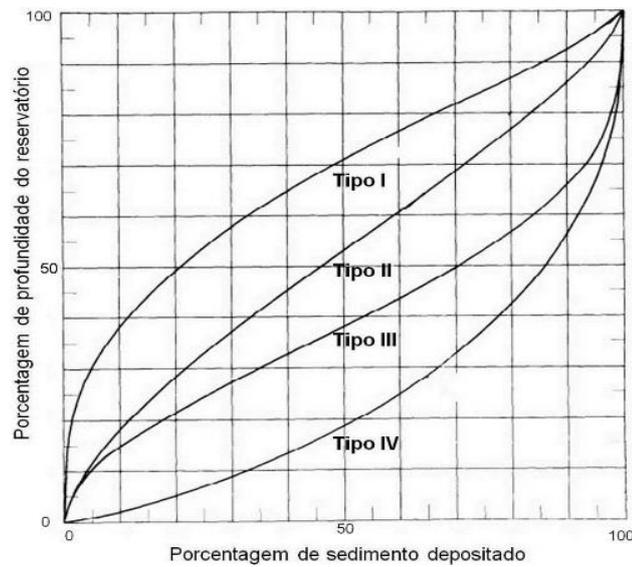
Forma do Reservatório	Parâmetro de declividade (m)	Tipo	Área relativa do sedimento (a)
Zonas planas	3,5 – 4,5	I	$a = 5,047 \cdot p^{1,85} \cdot (1 - p)^{0,36}$
Zonas de inundação ou colinas	2,5 – 3,5	II	$a = 2,487 \cdot p^{0,57} \cdot (1 - p)^{0,41}$
Região montanhosa	1,5 – 2,5	III	$a = 16,967 \cdot p^{1,15} \cdot (1 - p)^{2,32}$
Região de garganta profunda	1,0 – 1,5	IV	$a = 1,486 \cdot p^{-0,25} \cdot (1 - p)^{1,34}$

Fonte: adaptado por Minhoni (2013).

Conforme Minhoni (2013), a distribuição dos sedimentos em um reservatório depende de quatro fatores: da forma como o reservatório é operado, a textura e tamanho das partículas de sedimento depositadas, a forma do reservatório e o volume de sedimento depositado. Contudo, a forma do reservatório foi tomada como o principal critério para o desenvolvimento de curvas para o uso na distribuição de sedimento, de acordo com a classificação da forma do reservatório (STRAND, 1987).

Os estudos dos pesquisadores Borland & Miller (1958) indicaram uma relação entre a forma do reservatório e a porcentagem de sedimentos depositados. A partir de então, os dados de sedimentos depositados foram ajustados à profundidade relativa, de acordo com as curvas mostradas na Figura 2 (MINHONI, 2013). A partir da integração das equações  $A_p$ , para cada tipo de reservatório, estas curvas foram convertidas em curvas de área em relação à profundidade relativa (Figura 3) (LOPES, 1993).

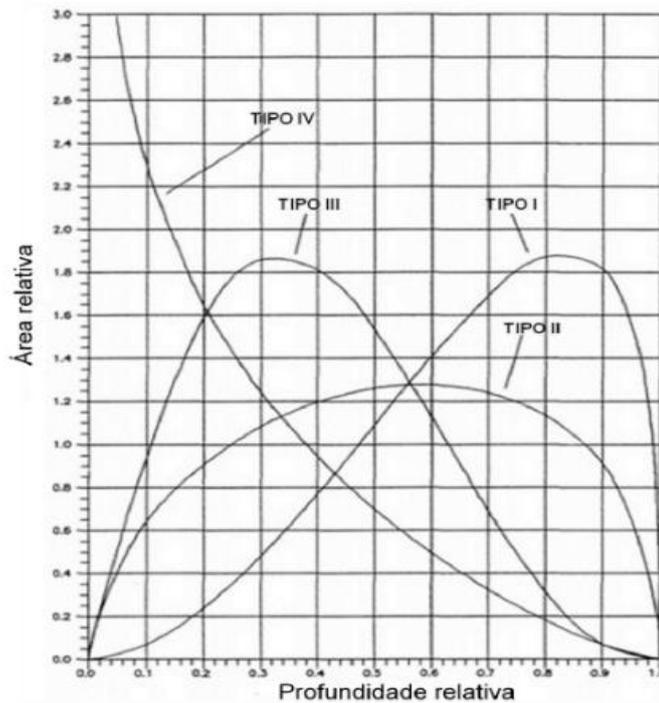
Figura 2 – Curvas de sedimento depositado em relação à profundidade para cada tipo de reservatório



Fonte: Adaptado de Morris e Fan (2010).

Segundo Minhoni (2013), os argumentos dos pesquisadores deste método relacionam a forma do reservatório com a taxa de sedimento depositado, indica que os reservatórios estabelecidos em áreas mais planas, os depósitos tendem a se formar principalmente em pontos mais altos. Os reservatórios localizados em áreas de grande declive estão propensos a concentrar sedimentos particularmente nas zonas mais baixas, próximas à barragem. Já os reservatórios com declividades médias, os depósitos de sedimentos tendem a se distribuir de maneira relativamente uniforme ao longo do reservatório (LOPES, 1993).

Figura 3 – Curvas de profundidade relativa em relação à área relativa para cada tipo de reservatório



Fonte: Lopes (1993 *apud* MINHONI, 2013).

Conforme Rice (1981), citado por Minhoni (2013), no método da redução de área, a deposição de sedimentos ocorre apenas em função de uma variável: a forma do reservatório, sem levar em consideração o efeito de outros fatores envolvidos no processo de deposição.

Há outros métodos empíricos para estimativa do padrão de deposição de sedimentos em reservatórios, como o método clássico, que assume que os sedimentos retidos se depositam em camadas paralelas, e o método de incremento de área, baseado no pressuposto de que a área de depósito de sedimento permanece constante em todas as profundidades do reservatório (MINHONI, 2013).

Diante do que foi exposto acima, pode-se observar que o uso dos métodos empíricos é bem simples e rápido, porém para a sua utilização devem-se admitir algumas hipóteses simplificadoras. Como afirma Mamede (2008), os métodos empíricos são normalmente mais simples do que os modelos matemáticos, e também necessitam de menos dados de entrada para o seu cálculo. Mas estes métodos não são capazes de identificar locais específicos em um reservatório que seja ponto de acúmulo de sedimentos. Além do mais, afirma o pesquisador, que os modelos empíricos não são adequados para simular mudanças nos padrões de deposição de sedimentos causada pela mudança do regime operacional.

A partir do processo desenvolvimento tecnológico nas áreas da ciência da computação, os modelos empíricos foram progressivamente trocados por modelos matemáticos, que representam os fenômenos físicos que ocorrem durante o assoreamento de um reservatório, por meio de método numérico.

De acordo com Mamede (2008), o modelo numérico mais indicado de ser utilizado é o unidimensional, pois requer menos dados de entrada e esforço computacional. No entanto, o modelo unidimensional impossibilita a simulação de fluxos em curvas e zonas de recirculação ou fluxos secundários (MINHONI, 2013).

Vários modelos numéricos 1D foram desenvolvidos nos últimos tempos para simulação do comportamento das partículas de sedimentos em rios e reservatórios de água, tais como a HEC-6, FLUVIAL-12, série GSTARS, EFDC1D, CCHE1D (MAMEDE, 2008). Dentre os modelos citados acima, o mais conhecido é o HEC-6, desenvolvido pelo Exército Americano no começo da década de 70 (CAMPOS, 2001 *apud* MAMEDE, 2008).

De acordo com Morris e Fan (2010), o modelo HEC-6 é provavelmente o mais utilizado nos Estados Unidos na simulação do transporte de sedimentos em rios e reservatórios. Este modelo tem sido modificado e melhorado através de novos lançamentos, e a versão atual simula processos de assoreamento de sedimentos não-uniformes, variando de argila a pedregulho (MINHONI, 2013).

Modelos numéricos bidimensionais para transporte de fluxos e sedimentos estão se tornando amplamente utilizados devido ao advento de super computadores e à existência de um número significativo de modelos disponíveis comercialmente (MAMEDE, 2008). Mamede (2008) cita em sua pesquisa os diversos modelos bidimensionais encontrados na literatura: o modelo proposto por Merrill (1974), Mcannaly (1989), Evans *et al.* (1990), Choi e Garcia (2000), Shojaeefard *et al.* (2007).

O modelo tridimensional é o que melhor representa o fenômeno do transporte de sedimento, no entanto, devido à elevada exigência computacional, frequentemente esses modelos são derivados de simplificações das equações de fluxo para uma ou duas dimensões (CANCINO; NEVES, 1999). Nos modelos 2D e 3D, a geometria é representada por uma superfície tridimensional discretizada no espaço. Os modelos 3D realizam a discretização horizontal e vertical do escoamento de acordo com o tamanho da malha da representação da geometria usada, sendo assim o mais próximo ao escoamento observado (ESTIGONI, 2017). De acordo com Estigoni (2017) existem vários modelos tridimensionais, como: Telemac-2D+Sisyphe, TufLOW-FV3D, Mike 3 MF FM, SSIIMM, Delft3D, CH3D-SED, Fluent, entre outros.

## 4 METODOLOGIA

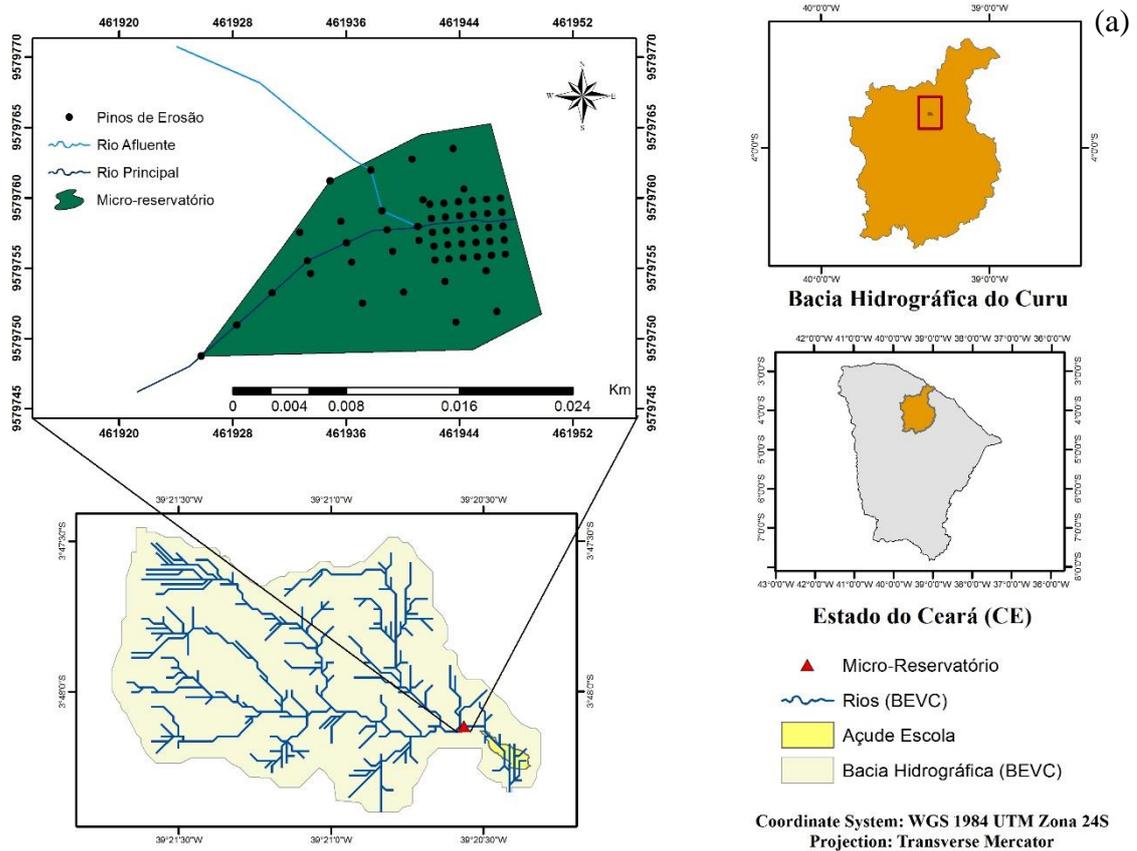
### 4.1 Descrição da área de estudo

#### 4.1.1 *Bacia experimental Vale do Curu – BEVC*

O estudo será realizado em uma pequena bacia localizada na região semiárida do Brasil, mais especificamente na Fazenda Experimental Vale do Curu (FEVC), pertencente à Universidade Federal do Ceará, na zona rural do município de Pentecoste – CE. A pesquisa foi realizada na Bacia Experimental Vale do Curu (BEVC) (Figura 4), com área de contribuição de 284,5 ha.

O estudo da dinâmica de transporte de sedimentos não-uniforme foi realizado em um micro-reservatório com tendência a inundações frequentes, com área de 123,300 m<sup>2</sup>, a montante do vertedouro triangular situado na entrada do Açude Escola localizado na Bacia Experimental Vale do Curu – (BEVC) (Figura 4a). A micro-bacia experimental monitorada possui dois cursos d'água, um rio principal e um afluente (Figura 4b), que confluem até chegar ao vertedouro triangular, ou seja, ao exutório da micro-bacia. A vazão efluente ao micro-reservatório é responsável pelo aporte de água do Açude Escola.

Figura 4 – (a) Localização do micro-reservatório monitorado; (b) foto do rio principal do micro-reservatório; e (c) rio afluente.



Fonte: elaborada pela autora.

O município de Pentecoste está localizado geograficamente na Microrregião do Médio Curu, no Estado do Ceará, com coordenadas de  $3^{\circ}47'34''$  de latitude Sul e a  $39^{\circ}16'13''$  de longitude Oeste do Meridiano de Greenwich (IPECE, 2016), a aproximadamente 90 km da cidade de Fortaleza.

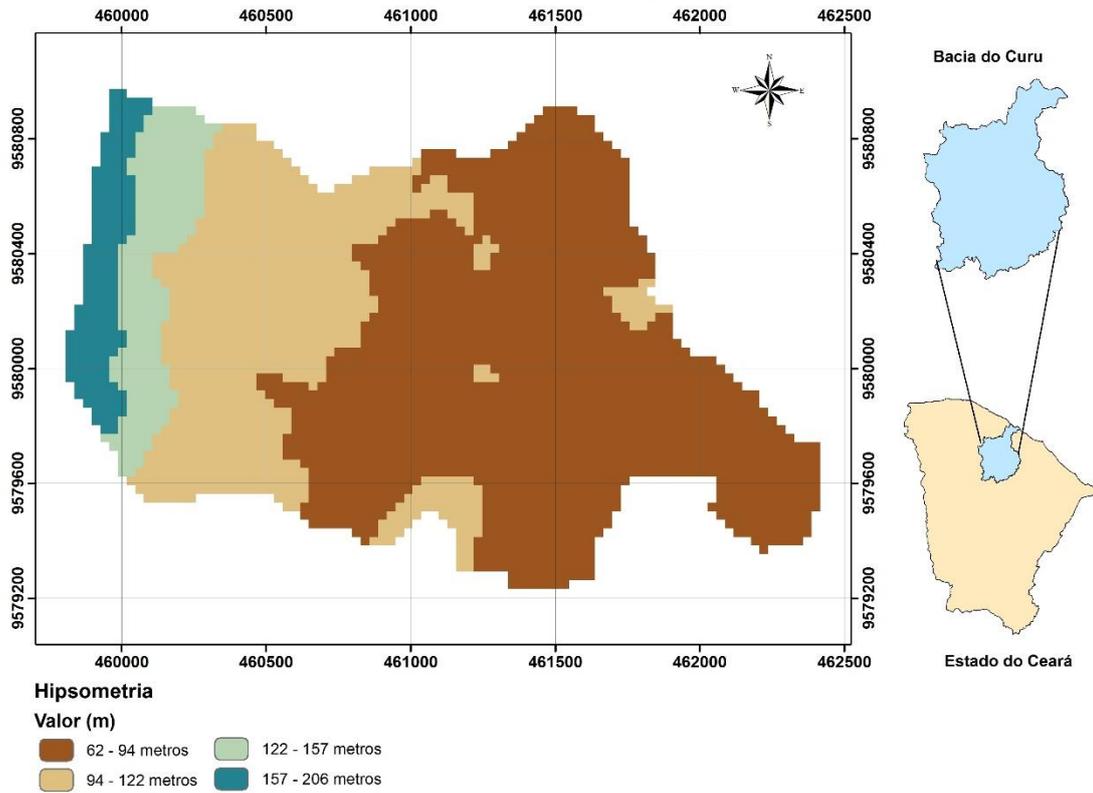
A classificação climática da região segundo Köppen, é BSw'h', semiárido com chuvas irregulares, com duas estações climáticas bem definidas (FREITAS *et al.*, 2011), chuvosa (verão e outono) e seca (inverno e primavera). A precipitação anual média é de 800 mm, com alta variabilidade espacial e temporal, temperatura média de 27° C, umidade relativa do ar média de 74% (IPECE, 2016) e evapotranspiração potencial de 1847 mm/ano (EMBRAPA, 2004).

A vegetação predominante na região é a Caatinga, de caráter hiperxerófilo, termo que, segundo Lemos (2006), é utilizado no Nordeste brasileiro para designar qualquer comunidade vegetal padronizada pelo seu aspecto fisionômico, resultante da caducifolia de suas espécies no período seco, assumindo caráter tropofítico e refletindo a semiaridez no chamado “Polígono das Secas”.

A bacia experimental está inserida em áreas de rochas do embasamento cristalino e aluviões, representativos de duas unidades litológicas, referentes aos Períodos Pré-Cambriano e Quaternário (CPRM, 2003). O solo (Neossolo litólico) da área de estudo é raso, com camada de impedimento a 0,1 m (FREITAS *et al.*, 2011), e possui três manchas de solo predominantes que são classificadas conforme Jacomine (2008) em: Neossolos (4,9%), Luvisolos (65,8 %) e Argissolos (29,3%)

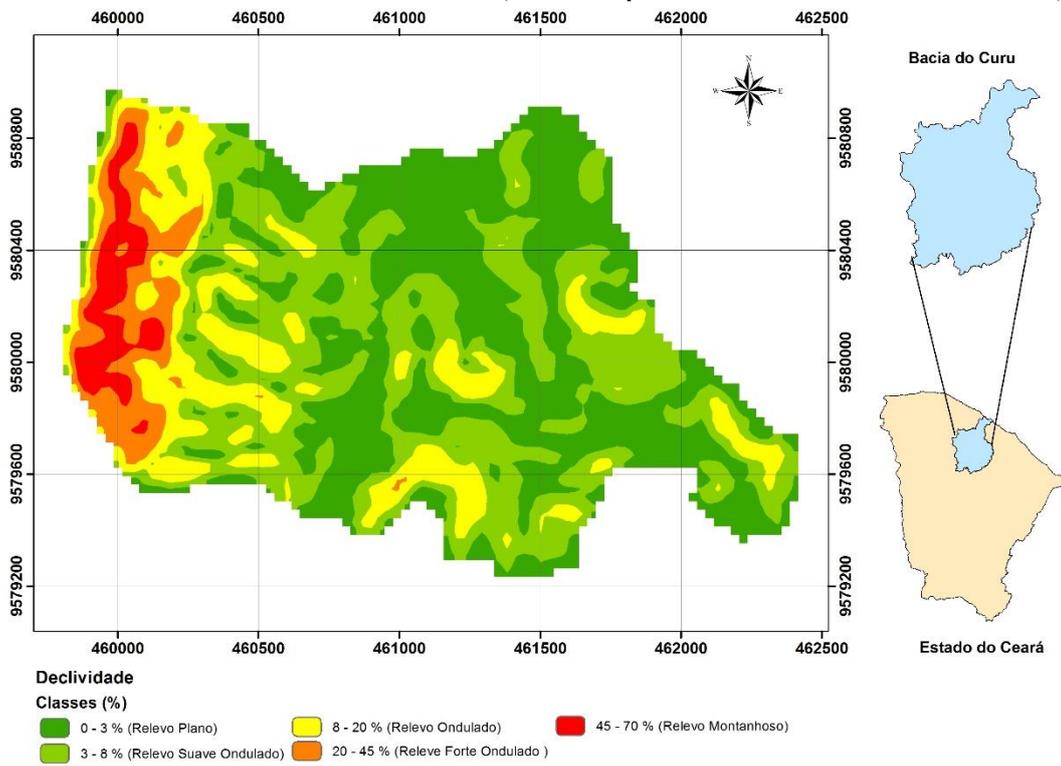
Na bacia, a elevação varia de 64 a 201 metros acima do nível do mar, sendo as maiores altitudes verificadas nos planaltos situados nas bordas a oeste da bacia (Figura 5). Nessas áreas, predominam declividades de 70%. Em grande parte da bacia, as declividades variam entre 20 e 30% (Figura 6).

Figura 5 – Hipsometria da bacia de estudo (Bacia Experimental Vale do Curu - BEVC).



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 6 – Declividade da bacia de estudo (Bacia Experimental Vale do Curu - BEVC)



Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.1.2 Monitoramento da área

A bacia dispõe de uma densa instrumentação para o monitoramento das variáveis hidrológicas e sedimentológicas em diferentes escalas de estudo. As quais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos instrumentos utilizados para o monitoramento das variáveis.

Tipo de dado	Local	Equipamento	Frequência	Ano de instalação
Precipitação	MEVC	Pluviômetro Ville de Paris	Diária	2015
	BEVC	Pluviômetro Ville de Paris	Diária	2015
	BEVC	Pluviômetro Báscula	A cada 5 minutos	
Vazão	MEVC	Vertedouro misto	5 minutos	2015
	BEVEC	Vertedor retangular	5 minutos	2015
Nível D'Água	MEVC	Sensor HOBO	5 minutos	2015
	BEVC	Sensor HOBO	5 minutos	2015
	Açude Escola	Réguas Linimétricas	Diária	2015
Concentração de sedimento	MEVC	Amostrador DH - 48	Evento	2015
	BEVC	Amostrador DH - 48	Evento	2015
	Parcelas de erosão		Evento	2015

Fonte: Gomes, 2016.

#### 4.1.2.1 Precipitação

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos através de pluviômetros (Figura 7a) instalados na BEVC, próximos aos vertedouros, além de um pluviógrafo instalado em uma pequena estação climatológica (Figura 7b) localizada próxima ao açude no exutório da bacia, visando mais veracidade das informações.

Figura 7 – Instrumentos de medida de dados pluviométricos.



Fonte: Gomes, 2016.

A Tabela 3 mostra os valores médios de precipitação mensal na BEVC estimadas através dos dados de monitoramento coletados nas estações da fazenda experimental.

Tabela 3 – Precipitação média mensal da BEVC

<b>Precipitação média mensal (mm)</b>											
<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
81,3	113,9	204,0	198,0	116,8	63,2	31,8	9,2	4,3	4,4	5,5	20,7

Fonte: Silveira, 2019.

#### 4.1.2.2 Escoamento superficial

O escoamento superficial na área monitorada foi realizado por meio da estação hidrossedimentológica instalada no exutório da BEVC (Figura 8). O escoamento superficial foi quantificado por meio do vertedouro triangular de parede espessa existente na área, construído em alvenaria.

Figura 8 – Vertedouro triangular de parede espessa existente na BEVC e localizado na entrada do açude Escola.



Fonte: Gomes, 2016.

A vazão gerada através do escoamento superficial foi calculada por meio da curva chave definida para a seção do vertedouro instalado. O monitoramento do nível de água escoado na seção foi realizado com a utilização de sensores de nível da marca HOB0 (*Water Level Logger*), programados para fazerem leituras em intervalos de 5 minutos e instalados em um poço tranquilizador, ligado ao vertedouro por um vaso comunicante.

Com posse dos dados obtidos da leitura do sensor, foi possível estimar a vazão de entrada no açude através da Equação 1:

$$Q = \frac{8}{15} \cdot Cd \sqrt{2g} \cdot \tan \tan \frac{\alpha}{2} \cdot H^{5/2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Q – Vazão (m<sup>3</sup>. s<sup>-1</sup>);

CD – Coeficiente de descarga;

h – Nível da água medido pelo sensor HOBO (m).

g – Gravidade ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );

$\alpha$  – ângulo de abertura do vertedouro.

A obtenção dos dados de vazões históricas foi feita com o método CN-SCS, desenvolvido pelo o Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (SCS-USDA). Os dados de precipitações, no período de 1970 até os dias atuais, aplicado no método foram obtidos da estação pluviométrica do Município de Pentecoste, monitorada pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2019).

#### **4.2 Monitoramento da erosão e deposição na bacia hidráulica do vertedor grande**

O monitoramento da erosão do solo no micro-reservatório, assim como, o de deposição do sedimento foi feito com o uso de pinos de erosão. Este presente processo metodológico foi escolhido por ser uma técnica barata, simples e de fácil monitoramento, relacionado, nesse caso, ao escoamento superficial difuso, que causa erosão em lençol (GUERRA, 2005).

A técnica dos pinos de erosão, conforme afirma Kearney *et al.* (2018), é utilizada para mensuração das perdas de solo e monitoramento de voçorocas, para tal, são levantadas as seguintes hipóteses: em caso de haver perda de sedimento no ponto será considerado processo erosivo atuante, e a graduação do pino estará abaixo da linha de referência; o segundo panorama seria a de sedimentação visualizado pela graduação acima da linha de referência; e o último cenário seria a taxa de perda e deposição de sedimentos serem a mesma, tal caso considerou-se sem alterações aparente.

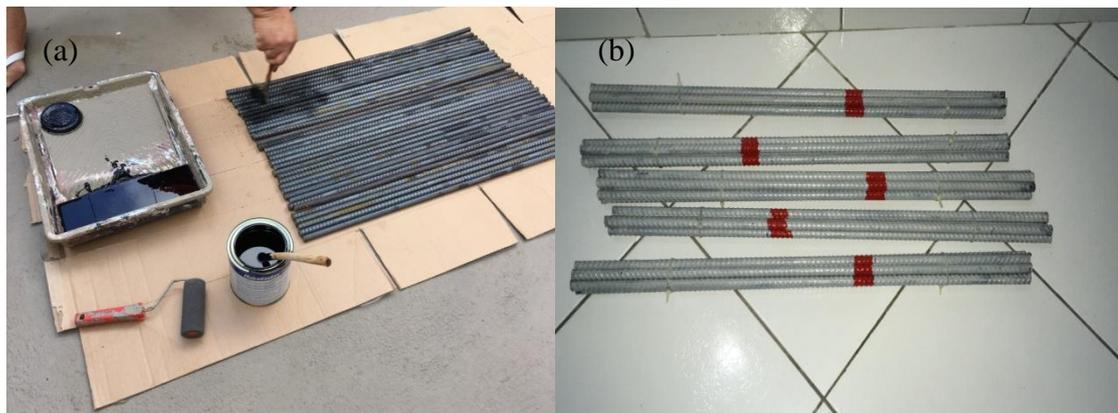
Foram utilizados 32 pinos, e estes foram fabricados a partir de vergalhões de ferro de meia polegada, com comprimento de 70 cm cada (Figura 9). Antes da instalação destes foi realizada uma pintura com tinta do tipo Zarcão (Figura 10a), para retardar e prevenir o processo de oxidação do ferro pela ação da água. Após esse processo foi feita uma demarcação de dois centímetros com tinta verniz, na cor vermelha (Figura 10b), para o posterior monitoramento do processo erosivo e de sedimentação.

Figura 9 – Pinos de erosão



Fonte: elaborada pela autora.

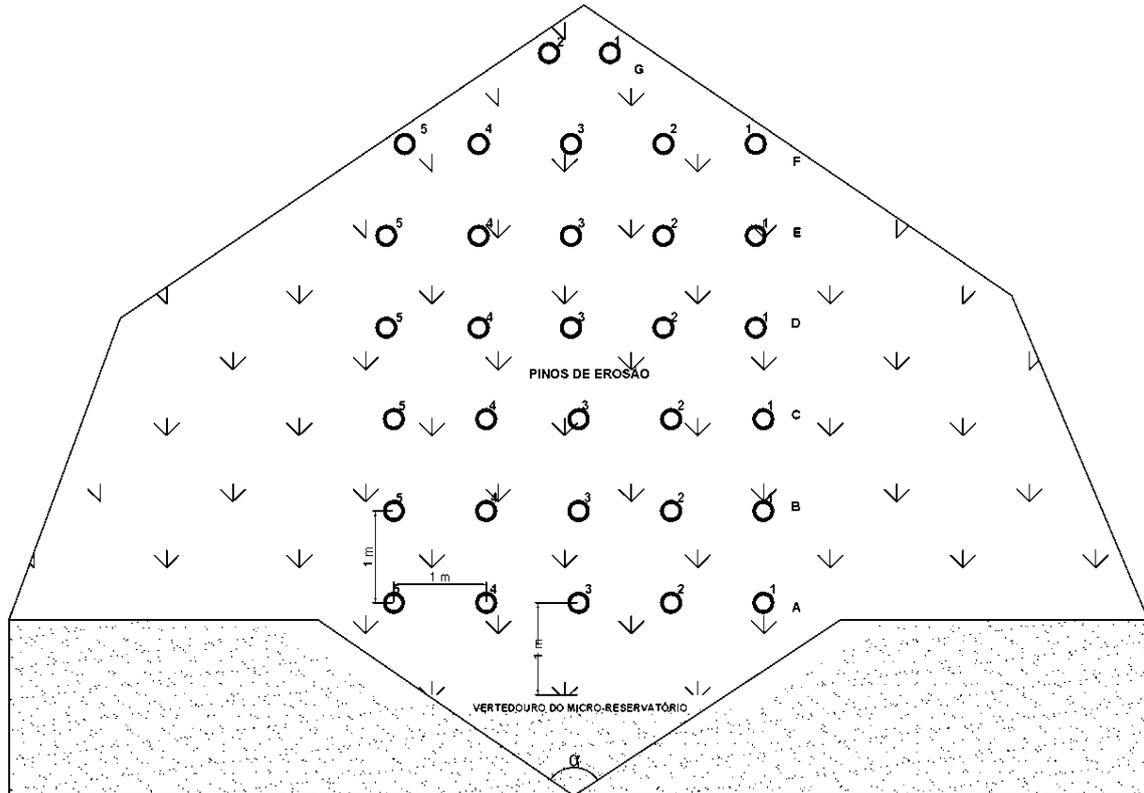
Figura 10 – Pinos de erosão recebendo base de tinta para posterior instalação



Fonte: elaborada pela autora.

A alocação dos pinos foi feita de maneira a cobrir toda a área de inundação do vertedouro grande, como mostra a Figura 11 e 12. Estes pinos foram dispostos a 1 metro de distância um do outro, tanto no sentido do comprimento como no de largura.

Figura 11 – Distribuição dos pinos no micro-reservatório.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 12 – Instalação dos pinos a montante do vertedouro triangular.



Fonte: elaborada pela autora.

As coletas de dados e monitoramento foram variáveis ao longo do tempo devido ao regime pluviométrico da região ser caracterizado por grande variabilidade no espaço e no tempo. Em situações onde essa variabilidade não ocorra, indica-se realizar o monitoramento semanalmente, quinzenalmente ou até mesmo após cada evento erosivo a depender da dinâmica de sedimento do local. Após a instalação dos pinos de erosão foi realizado um levantamento topográfico utilizando o nível topográfico.

Depois do levantamento topográfico no micro-reservatório, foram instalados mais 24 pinos de monitoramento, a fim de caracterizar, com mais veracidade, a dinâmica do processo erosivo dentro de toda a área de influência do monitoramento.

A coleta de dados foi feita com um auxílio de uma régua de aço de trinta centímetros de comprimento (Figura 13). Com posse dos dados obtidos em campo, nas quadras chuvosas dos anos de 2018 e 2019 foram calculadas as variações de cota, área e volume provocadas pelo sedimento depositado e/ou erodido na área de influência de cada pino monitorado. Para o cálculo efetivo de cota, área e do volume foram utilizadas *ferramentas* de geoprocessamento (*Functional Surface – Sufarce Volume*).

Figura 13 – Instrumento utilizado para o monitoramento dos pinos



Fonte: elaborada pela autora.

### 4.3 Caracterização do solo

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa. Antes da análise laboratorial realizaram-se campanhas, no dia 25 de outubro de 2018 e no dia 08 de junho de 2019, para coletar 36 amostras de solo deformadas e indeformadas para realizar a caracterização física do solo no micro-reservatório. As análises feitas para caracterizar o solo foram: peso específico aparente seco do solo ( $\rho_s$ ), densidade das partículas ( $\rho_p$ ) e análise granulométrica.

#### 4.3.1 Peso específico seco aparente do solo ( $\rho_s$ )

Para avaliar a densidade das amostras de solo utilizou-se o método do anel volumétrico. Este método tem por princípio a coleta de amostra de solo indeformada através de um instrumento que contém em seu interior um anel volumétrico com dimensões conhecidas (amostrador tipo Uhland) (Figura 14) (AMARO FILHO *et al.*,2008).

Figura 14 – Amostrador Uhland e amostras indeformadas coletadas.



Fonte: elaborada pela autora.

As amostras foram coletadas com auxílio do amostrador Uhland, e secas na estufa a 105 °C até massa constante (BLAKE e HARTGE, 1986b). Para o cálculo do peso específico seco aparente do solo utilizou-se a seguinte equação (AMARO FILHO *et al.*,2008):

$$\text{Peso específico seco aparente } (\rho_s) = \frac{\text{massa do solo seco entre } 105\text{ }^\circ\text{C e } 110\text{ }^\circ\text{C}}{\text{volume total}} \text{ (g. cm}^{-3}\text{)} \quad \text{Equação (2)}$$

### 4.3.2 Densidade das partículas ( $\rho_p$ )

A densidade das partículas do solo, segundo Blake (1965), é definida como a relação entre a massa total das partículas sólidas de uma determinada amostra de solo e o volume ocupado exclusivamente por essas partículas. Para conhecer o volume da amostra, determina-se a quantidade de líquido necessária para completar um recipiente de volume conhecido, que contenha em seu interior uma amostra de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) de massa previamente estabelecida.

Após coletadas, as amostras foram dispostas em uma superfície, na casa de vegetação (Figura 15), pelo um período de três dias, para passar pelo o processo de secagem ao ar livre (Terra fina seca ao ar). Após esse período as amostras foram destoradas e levadas ao laboratório para ser feito a determinação da densidade das partículas.

Figura 15 – Amostras deformadas passando pelo processo de secagem ao ar livre (TFSA).



Fonte: elaborada pela autora.

O método utilizado para a determinação da densidade das partículas foi o do balão volumétrico. Neste método o princípio é determinar o volume de álcool, líquido apolar, utilizado para completar um balão volumétrico de 50 ml que contenha 20 g de terra fina seca em estufa (AMARO FILHO *et al.*,2008). O cálculo da densidade das partículas foi realizado de acordo com a Equação 3 (AMARO FILHO *et al.*,2008):

$$\text{Densidade das partículas } (\rho_p) = \frac{\text{massa do solo seco entre } 105^\circ\text{C e } 110^\circ\text{C}}{(50 - \text{volume de álcool gasto})} (g.cm^{-3}) \text{ Equação (3)}$$

### 4.3.3 Análise granulométrica

Esta análise tem como objetivo determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência de forma a se obter o traçado da curva granulométrica de um determinado solo. A curva granulométrica apresenta intervalos de variação do tamanho das partículas de cada um dos solos, sendo utilizada na classificação textural dos solos.

As análises de laboratório compreenderam a avaliação de granulometria do solo, determinação da concentração de sedimentos em suspensão e determinação de granulometrias do material em suspensão.

A estimativa das frações granulométricas das amostras de solo foi feita seguindo os seguintes métodos: a argila foi determinada pelo método da pipeta, a areia fina foi quantificada pelo o método do peneiramento, e o silte foi quantificado por diferença, considerando a amostra inicial de solo menos o somatório de areia e argila (AMARO FILHO *et al.*,2008). Já a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, bem como a sua granulometria foi realizada pelo método do granulômetro a laser.

Um dos métodos mais aceitos e utilizados para a estimativa do percentual de argila em uma amostra de solo é o da pipeta. Este método baseia-se em calcular a densidade da suspensão a uma determinada profundidade em função do tempo. Segundo Amaro Filho *et al.* (2008), é um método bastante preciso, embora demande um tempo elevado para a sua realização.

Para realizar a análise granulométrica utilizou-se uma amostra de 20 g de TSFA em um Becker de 250 ml, e adicionou-se 10 ml de um dispersante químico (solução de hidróxido de sódio normal – NaOH 1N) (Figura 16).

Figura 16 – Amostras sendo preparadas para a análise granulométrica (Método da pipeta).



Fonte: elaborada pela autora.

Agitou-se a amostra e a mesma ficou em repouso por um período de 12 a 16 horas. Após este período o conteúdo foi transferido para copo metálico do agitador elétrico, e foi agitado por 10 minutos (Figura 17). Logo depois o conteúdo foi passado em uma peneira de 20 cm de diâmetro e malha de 0,053 mm. O material que ficou retido na peneira, fração de areia, foi colocado em uma capsula e levado para estufa durante 24 horas, após esse período o material foi levado para balança para ser determinado à porcentagem de areia presente no solo.

Figura 17 – Agitador mecânico e procedimento de sedimentação do solo.



Fonte: elaborada pela autora.

O material passante foi coletado em uma proveta de 1.000 ml. Este conteúdo foi agitado por um período de 20 segundos. Após essa agitação mediu-se a temperatura do líquido e determinou-se o tempo de sedimentação conforme tabela abaixo:

Tabela 04 – Tempo de sedimentação de partículas de diâmetro  $\leq 0,05$  mm a  $\geq 0,02$  mm em suspensão aquosa, para uma profundidade de 5 cm, em diferentes temperaturas da suspensão ( $\rho_p = 2,65$  g.cm<sup>-3</sup>).

Temperatura °C	Tempo	Temperatura °C	Tempo
15	4h33min	28	3h19min
16	4h26min	29	3h15min
17	4h20min	30	3h10min
18	4h12min	31	3h07min
19	4h06min	32	3h03min
20	4h00min	33	2h58min
21	3h54min	34	2h55min
22	3h48min	35	2h52min

Fonte: AMARO FILHO *et al.*, 2008.

A porcentagem de cada material presente no solo foi calculada conforme as equações a seguir (AMARO FILHO *et al.*, 2008):

$$\text{Porcentagem de argila} = [(\text{peso da argila} + \text{dispersante}) - \text{dispersante}] \cdot 200 \cdot \text{fator } f \quad \text{Equação (4)}$$

$$\text{Porcentagem de areia} = \text{peso da areia} \cdot 5 \cdot \text{fator } f \quad \text{Equação (5)}$$

$$\text{Porcentagem de silte} = 100 - (\text{porcentagem de argila} + \text{porcentagem de areia}) \quad \text{Equação (6)}$$

O fator  $f$  corresponde à correção para solo seco em estufa com temperatura entre 105 °C e 110 °C. Este fator foi calculado pela diferença entre a massa do solo, em temperatura ambiente, e massa do solo seca em estufa.

A fração de areia seca foi passada em um conjunto de peneiras (1,0 – 0,50 – 0,250 – 0,106 – 0,053 e 0,02 mm de diâmetro) (Figura 18), e agitada durante cerca de 1 minuto e 30 segundos. Após o peneiramento pesaram-se as proporções retidas em cada peneira, e obteve-se a fração de areia muito grossa, grossa, média, fina e muito fina.

Figura 18 – Conjunto de peneiras utilizadas no processo de fracionamento da areia.



Fonte: elaborada pela autora.

Com posse dos dados obtidos e após análise laboratorial, nos dias 25 de outubro de 2018, quadra seca, e 08 de junho de 2019, quadra invernos, foram calculados os valores acumulados das frações granulométricas, bem como o  $D_{50}$  para cada ponto amostral para melhor caracterizar a dinâmica do processo erosivo na área da pesquisa.

#### 4.3.4 Granulometria do sedimento em suspensão

A determinação granulométrica de sedimentos em suspensão, no vertedouro à jusante do micro-reservatório, transportado, em suspensão, foi feito através do método do Granulômetro a Laser. O método do granulômetro a laser é uma técnica de análise do tamanho da partícula de solo por difração a laser, onde as partículas são dispersas em um fluido, água, em movimento causando descontinuidade no fluxo do fluido, que são detectadas por um feixe de luz incidente na amostra, e correlacionados com o tamanho da partícula. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação ao feixe de laser e partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. Os dados sobre a intensidade da dispersão angular são analisados para calcular o tamanho das partículas responsáveis por criar o padrão de dispersão, com base na Teoria de difusão da luz de Mie (CHRISTOFOLETTI; MORENO, 2017). O tamanho das partículas é indicado como o diâmetro de uma esfera de volume equivalente.

Para a avaliação da curva granulométrica dos sedimentos em suspensão, foram coletadas amostras de água, no momento do vertimento (Figura 19a). Ao todo foram coletadas seis amostras em eventos diferentes, as datas das coletas foram: 16, 19, 20, 26 de março de 2019 e nos dias 02 e 03 de abril de 2019. A coleta foi realizada em um recipiente de dois litros para posterior análise em laboratório (Figura 19b).

Figura 19 – Vertimento no micro-reservatório (a) e amostras coletadas para análise laboratorial (b)



Fonte: elaborada pela autora.

Utilizou-se a amostra coletada para realizar a análise granulométrica do sedimento em suspensão em cada evento na área. A análise para determinação do tamanho das partículas em suspensão foi realizada pela técnica da difração a laser no equipamento *Mastersizer 2000* da *Malvern*. A análise do método do Granulômetro a Laser foi realizada no Laboratório de Análises Minerais (LAMIN – Belo Horizonte), pertencente à Companhia de Recursos Minerais – CPRM.

Com posse dos dados obtidos e após análise laboratorial, foram determinadas as frações granulométricas das amostras para cada evento para melhor caracterizar o processo de enriquecimento de finos na área de estudo.

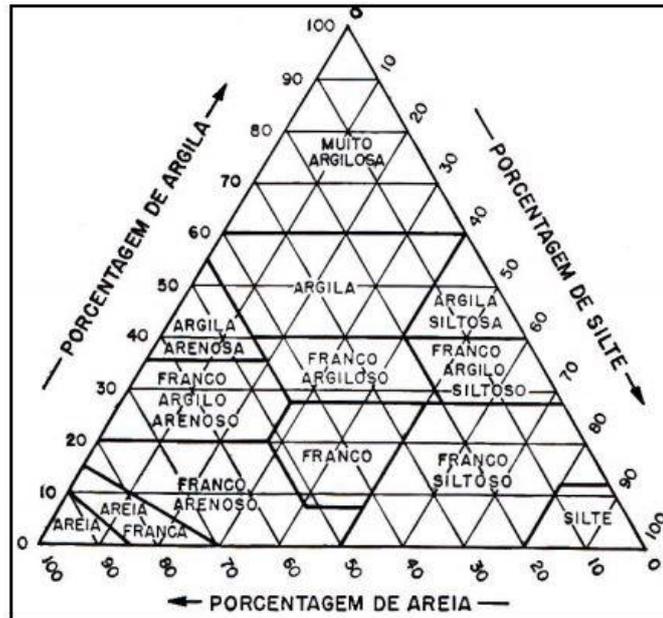
#### ***4.3.5 Classificação da textura do solo***

A classificação textural do solo é um dos principais parâmetros de qualidade e produtividade dos solos (WANG *et al.*, 2005). Com a determinação da classe textural do solo é possível obter uma estimativa indireta de diversos fatores dentre eles: a dinâmica da água, resistência do solo a tração, grau de compactação do solo, capacidade de troca de cátions, dosagem de nutrientes, corretivos e de herbicidas (CENTENO *et al.*, 2017).

Dentro da classificação textural existem três grupos principais de classes conhecidas: solos arenosos, francos e argilosos; sendo que em cada grupo coexistem as classes texturais específicas, que totalizam 13 classes texturais. Estas classes fornecem uma ideia da distribuição do tamanho de partículas e indicam o comportamento das propriedades físicas do solo (BRADY; WEIL, 2013).

Com posse das porcentagens granulométricas de areia, silte e argila de cada pino monitorado, utilizou-se a metodologia de classificação da *Soil Survey Staff*, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte, modificado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, ilustrado pela Figura 20.

Figura 20 – Triângulo da classificação textural.



Fonte: Embrapa, 1999.

A classificação granulométrica da partícula de solo é definida com base no tamanho do diâmetro, conforme ilustra Figura 21.

Figura 21 – Composição granulométrica do solo (U.S.D.A)

Atterberg		2,0 mm			0,2		0,02		0,002 mm	
Esqueleto do solo		Areia grossa			Areia fina		Silte		Argila	
		Areia muito grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia muito fina	Silte		Argila	
U.S.D.A.		2,0 mm	1,0	0,5	0,25	0,10	0,05			0,002 mm

Fonte: Kitamura, 2004.

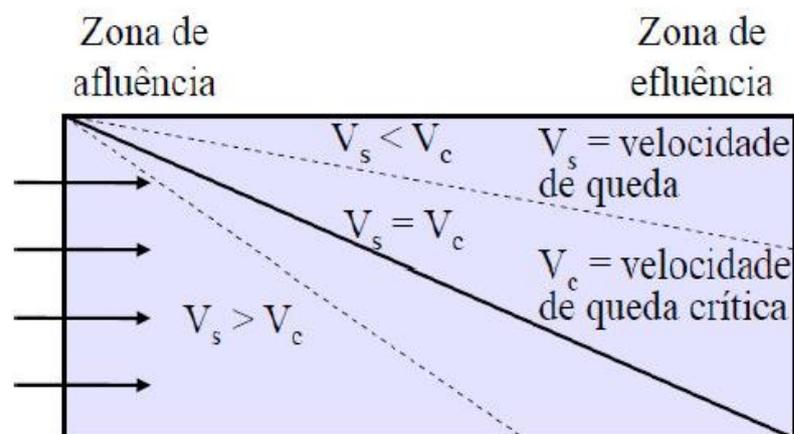
De acordo com Viera (1975), as classes e subclasses da textura do solo são definidas com base na granulometria do solo (Figura 21) em: areia, areia franca, franco arenoso, franco, franco siltoso, silte, franco argilo arenoso, franco argiloso, franco argilo siltoso, argilo arenoso, argiloso siltoso, argila, argila pesada.

#### 4.4 Modelagem do transporte de sedimento não-uniforme

A dinâmica dos sedimentos na área de acumulação do vertedor triangular grande foi simulada utilizando o modelo proposto por Haan *et al.* (1994). O método consiste em utilizar o conceito de razão de vertimento em um reservatório retangular equivalente.

De acordo com o modelo a taxa de vertimento, equivalente à velocidade crítica de queda de uma partícula, a qual é definida como a razão entre a vazão vertida e a área da bacia hidráulica. Conforme o método, partículas com velocidade de queda superior à crítica serão depositadas e, conseqüentemente ficarão retidas no reservatório. A Figura 22 ilustra o conceito de taxa de vertimento aplicado no cálculo da retenção de sedimentos em pequenos reservatórios.

Figura 22 – Trajetória da partícula de sedimento em um reservatório retangular hipotético.



Fonte: Adaptado de Negreiros, 2014.

A velocidade de sedimentação crítica é dada pela razão entre a profundidade do reservatório e o fluxo através do tempo. Para um reservatório de forma retangular, a velocidade de sedimentação crítica pode ser calculada pela razão entre a vazão efluente e a área superficial do reservatório (MAMEDE, 2008).

Conforme o mesmo autor, o método permite a estimativa da eficiência de retenção desde que se conheça a granulometria do sedimento afluente e a vazão efluente do reservatório. A granulometria do sedimento efluente liberado durante vertimentos também pode ser estimada pelo método.

A eficiência de retenção dos sedimentos no reservatório pode ser calculada utilizando o conceito razão de vertimento, o qual leva em consideração a granulometria dos sedimentos afluente ao reservatório, conforme apresentado a seguir (Equação 7):

$$TE = (1 - X_c) + \int_0^{X_c} \frac{V_s}{V_c} dx \quad \text{Equação (7)}$$

Integrando-se a Equação 7 tem-se (Equação 8):

$$TE \cong (1 - X_c) + \sum_{i=1}^n \frac{V_{s,i}}{V_c} \Delta X_i \quad \text{Equação (8)}$$

Em que  $X_c$  – é a fração de partículas com velocidade de sedimentação inferior a  $V_c$ ;  $n$  – é o número de intervalos  $\Delta X$  usados para calcular a integral da equação anterior.

A granulometria dos sedimentos pode também ser estimada com o conceito taxa de vertimento expressa pela seguinte equação (Equação 9):

$$F_i = \sum_{i=1}^j \Delta F_i \quad \text{Equação (9)}$$

Em que  $F_i$  – é a fração do sedimento efluente com diâmetro inferior à classe granulométrica  $i$ ;  $J$  – é o número de classes granulométricas inferiores à classe  $i$ ;  $\Delta F_i$  – é a fração de sedimento efluente para cada classe granulométrica  $i$ , que pode ser calculado como segue (Equação 10):

$$\Delta F_i = \frac{\frac{1 - V_{s,i}}{V_c} \cdot \Delta X_i}{\sum \frac{1 - V_{s,i}}{V_c} \cdot \Delta X_i} \quad \text{Equação (10)}$$

O modelo de Hann *et al.* (1994) permite uma estimativa da quantidade de sedimentos retidos em um reservatório, bem como a granulometria efluente do mesmo, tendo como base os parâmetros de entrada a granulometria do material afluente, a vazão e a concentração de sólidos em suspensão contida no material escoado (SILVEIRA, 2019).

Para a estimativa da dinâmica de distribuição dos sedimentos não-uniformes no micro-reservatório utilizou-se a metodologia proposta Fifield *et al.* (2009), desenvolvida em programa computacional com a linguagem Fortran, conforme metodologia aplicada na Tese de doutorado de Silveira (2019). De acordo com este autor, o modelo proposto por Hann *et al.* (1994) não consegue prevê a dinâmica da distribuição de sedimentos não-uniforme dentro do reservatório, o modelo só prevê o balanço de sedimento que entra, deposita e sai do reservatório.

A metodologia utilizada neste trabalho foi aplicada para duas condições: reservatório com capacidade máxima atingida e com a presença de vertimento e para condições de reservatórios com volumes inferiores e sem retirada de água. Na primeira condição aplicou-se o modelo proposto por Fifield *et al.* (2011). O autor descreve que o movimento de deposição das partículas de solo pode ser representado por atributos físicos “Newtonianos”. De acordo com Silveira (2019), o método é aplicado para as seguintes condições:

1. Existência de fluxo laminar através do reservatório;
2. Velocidade constante do fluxo;
3. Temperatura da água constante.

Para o cálculo da distância que uma partícula de solo de determinado diâmetro percorre em uma dada distância longitudinal utilizou-se a equação abaixo:

$$L = \left[\left(\frac{l}{w}\right) \cdot SA_m\right]^2 \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

$l/w$ : é a relação comprimento-largura do reservatório;

$SA_m$ : área superficial de cada partícula ( $m^2$ );

$L$ : distância mínima percorrida por uma partícula de diâmetro “ $d$ ” dentro do reservatório (m).

A área superficial mínima foi determinada pela equação abaixo:

$$SA_m = Q_{in} \div V_s \quad \text{Equação (12)}$$

Sendo:

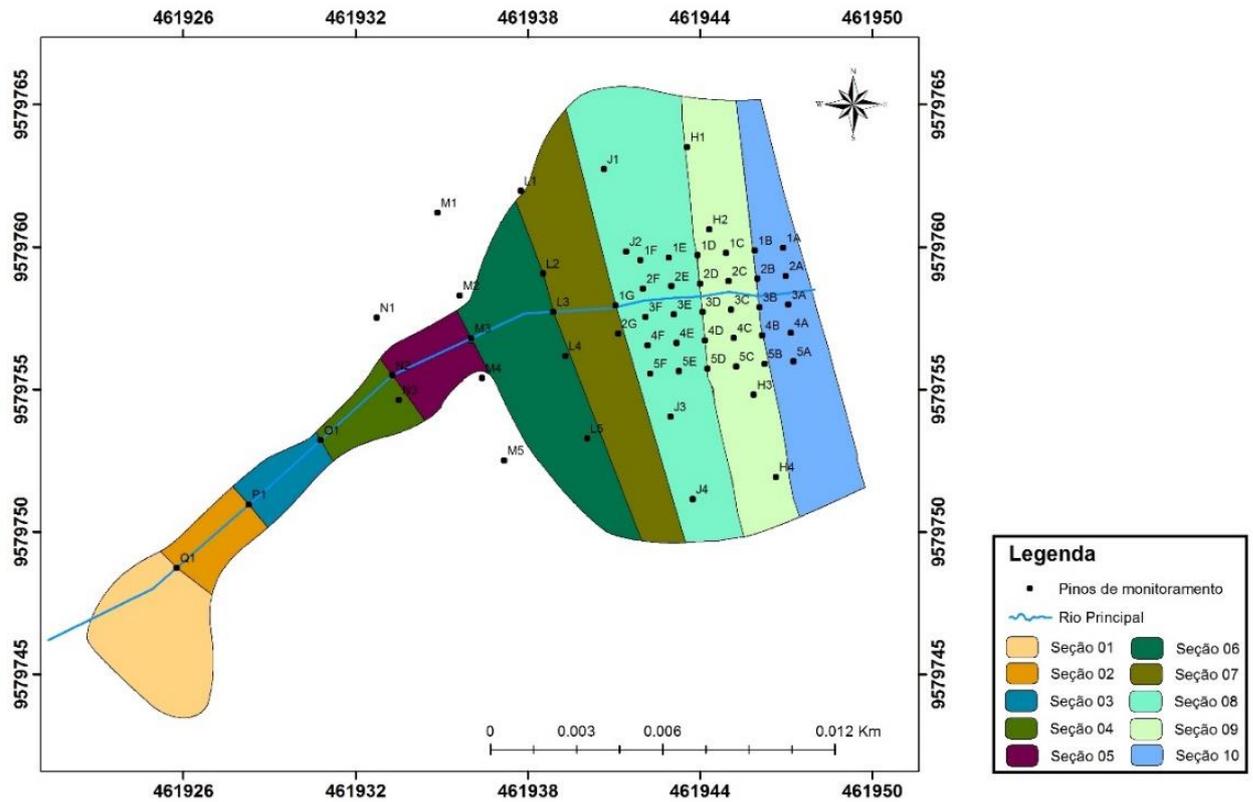
$Q_{in}$ : vazão afluyente ( $m^3/s$ );

$V_s$ : velocidade de queda da partícula de diâmetro “ $d$ ” (m/s).

A velocidade de queda da partícula foi determinada pela Equação de Stokes. Para a estimativa da deposição de determinada massa de sedimento de diâmetro “ $d$ ” ao longo de um dado percurso “ $L$ ” utilizou-se uma relação empírica desenvolvida por Michalec (2015), onde nesta os principais fatores para determinar o padrão de sedimento depositado no reservatório são: profundidade e volume. Dessa forma, o padrão de deposição foi estimado tomando por base o volume de água em cada seção do micro-reservatório.

A área foi dividida em dez seções (Figura 23), cada qual com 1/10 do comprimento total do rio principal, sendo a seção 01 mais próxima à entrada da área monitorada e a seção 10 mais próxima do vertedouro, exutório.

Figura 23 – Seções divididas do micro-reservatório



Fonte: elaborada pela autora.

Após a divisão da área em subseções determinou-se um Fator de Volume (FV) para cada seção criada (Tabela 05). Este fator é a relação do volume de cada seção e o volume total do micro-reservatório.

Tabela 05 – Volume e Fator de Volume (FV) de cada seção

Seção	Volume (m <sup>3</sup> )	FV (%)
1	0,859	1,90
2	0,176	0,40
3	0,142	0,30
4	0,133	0,30
5	0,288	0,60
6	2,538	0,560
7	6,678	14,70
8	15,179	33,50
9	10,389	22,90
10	8,991	19,80
Total	45,373	100

Com posse dos dados do comprimento máximo alcançado por cada classe de partícula, e dos valores mínimos e máximos dos comprimentos de cada seção, foi estabelecido em quais seções estaria ocorrendo deposição de partículas de diâmetro “d”, admitindo-se que a quantidade depositada é proporcional ao volume da seção. Dessa forma, a quantidade de sedimento de diâmetro “d” depositado em uma seção (S) do micro-reservatório pôde ser estimada conforme equação abaixo (Silveira, 2019):

$$M_i = M_T \cdot \frac{f_i}{\sum f_i^n} \quad \text{Equação (13)}$$

Sendo:

M<sub>i</sub>: massa de sedimento depositada na seção i;

M<sub>T</sub>: massa total de sedimentos de classe “d” que aporta no micro-reservatório;

f<sub>i</sub>: fator correspondente a seção i.

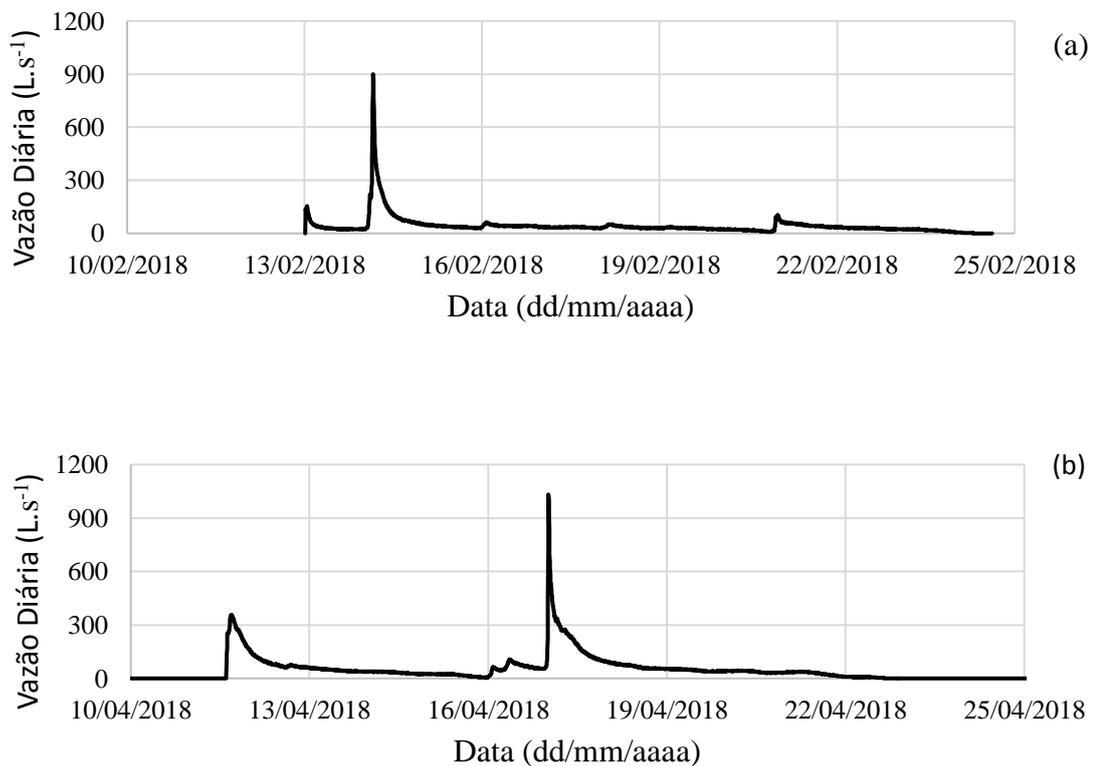
Dessa forma, as seções com maiores volumes tendem a ter maior deposição de sedimento de uma dada classe de partículas de solo de diâmetro “d”.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Dinâmica do processo erosivo na seção monitorada

Durante o período de monitoramento de vazões na seção de controle (vertedor triangular a montante do açude Escola) foram observados alguns eventos mais expressivos em 2018, com hidrógrafas apresentadas na Figura 24. Infelizmente, em virtude de problemas técnicos, os dados contínuos de vazões na seção, referentes ao ano de 2019, não puderam ser utilizados nesta pesquisa.

Figura 24 – Hidrógrafas dos eventos monitorados



Fonte: elaborada pela autora.

Na Figura 24a observa-se o evento anterior ao primeiro levantamento dos pinos de medida de erosão. Esse evento teve duração de 12 dias com vazão média diária de 30 L s<sup>-1</sup> e máxima instantânea de 900 L s<sup>-1</sup>. A Figura 24b representa o evento anterior ao segundo levantamento dos pinos, com duração de 11 dias, vazão média diária de 47 L s<sup>-1</sup> e máxima instantânea de 1032 L s<sup>-1</sup>, indicando que este evento apresentou potencial erosivo maior do que o primeiro evento. O evento de abril/2018 resultou em um aporte hídrico de quase 65.000 m<sup>3</sup>

gerando conseqüentemente vertimento no açude Escola, enquanto no evento de fevereiro/2018 apenas 41.000 m<sup>3</sup> aportaram ao reservatório.

As variações dos dados de cota, área e volume podem ser observadas na Tabela 6. É perceptível que houve uma variação entre os valores obtidos nos dois monitoramentos realizados em relação à cota, área e volume original (primeiro levantamento). Percebe-se que as medidas do dia 22 de março de 2018 apresentaram uma redução na sua área e no volume em relação ao levantamento original. Isso indica que o processo atuante neste evento foi o processo de deposição de sedimentos. O evento de 10 de maio de 2018 apresentou um aumento na sua área e no seu volume, ou seja, uma redução dos sedimentos presentes em cada pino, em comparação ao monitoramento anterior, indicando que o processo atuante neste evento foi o carreamento de sedimento.

Tabela 6 – Dinâmica do processo de erosão e deposição de sedimentos com base na cota topográfica, área, volume da seção monitorada.

Original (primeiro levantamento)			22/03/2018		10/05/2018	
Cota	Área m <sup>2</sup>	Volume m <sup>3</sup>	Área m <sup>2</sup>	Volume m <sup>3</sup>	Área m <sup>2</sup>	Volume m <sup>3</sup>
<b>99,4</b>	5,06	0,08	4,26	0,07	5,35	0,1
<b>99,5</b>	19,44	1,28	18,8	1,19	19,04	1,27
<b>99,6</b>	36,39	4,03	35,77	3,87	36	3,97
<b>99,7</b>	50,18	8,39	50,07	8,2	50,1	8,32
<b>99,8</b>	67,33	14,22	67,26	14,02	67,26	14,14
<b>99,9</b>	91,41	22,1	91,39	21,9	91,37	22,02
<b>100</b>	124,33	32,77	124,32	32,56	124,32	32,68

Fonte: autora, 2019.

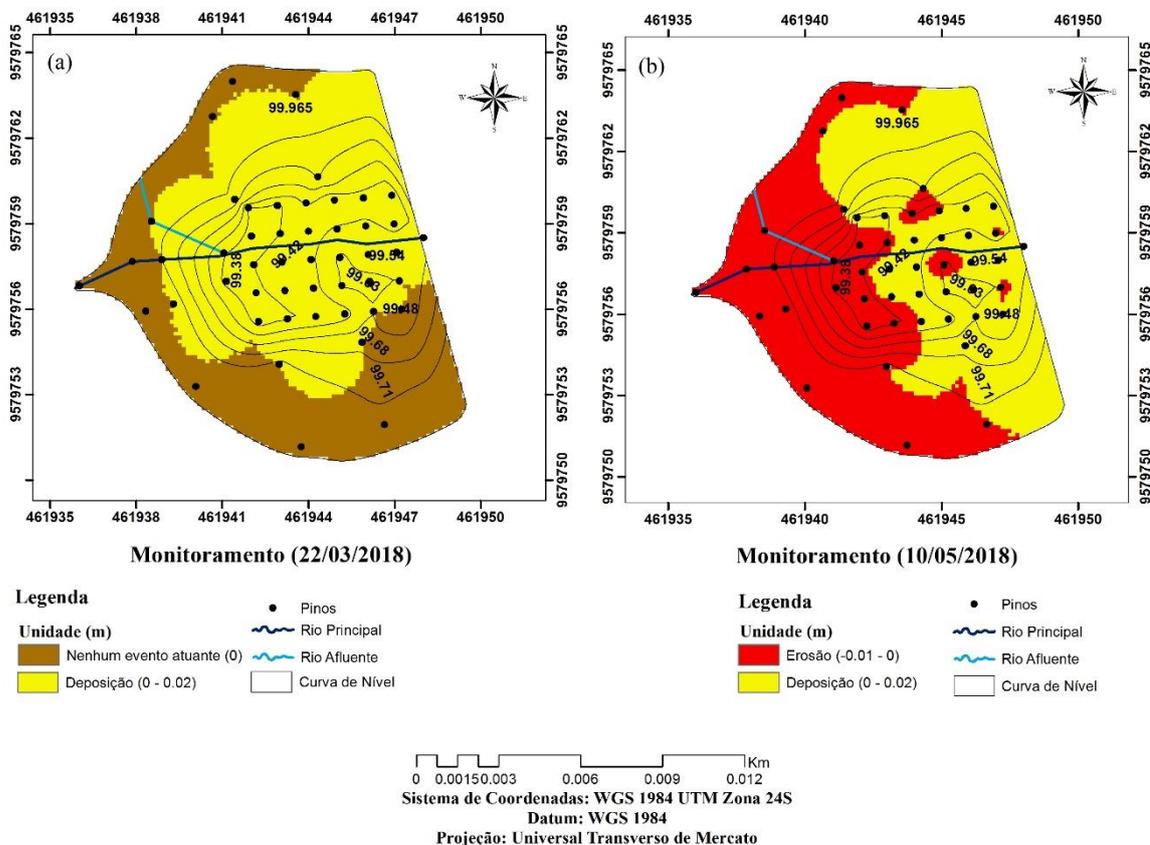
A espacialização da dinâmica do processo erosivo pode ser observada na Figura 25. Ao analisar-se a Figura 25a, percebe-se que o processo predominante na seção monitorada foi o de deposição, como também teve áreas que não apresentaram nenhuma modificação. A variação de cota neste monitoramento em comparação com o original variou de 0,0 a 0,02. Dessa forma valores iguais a zero, indicam que não houve nenhum processo atuante, e valores maiores do que zero indicam deposição de sedimentos.

Na Figura 25b, a dinâmica do processo erosivo foi completamente diferente do que o processo ocorrido na Figura 25a. Pode-se observar na Figura 25b que na seção monitorada houve o processo de deposição de sedimentos em algumas áreas, mas o que predominou foi o processo erosivo. Neste monitoramento a variação de cota, em relação ao original, foi na faixa

de -0,01 a 0,02. Assim, valores negativos indicam processo erosivo atuante e valores positivos especificam processo de deposição.

Dessa forma, pode-se considerar que a dinâmica do processo erosivo nos dois monitoramentos está intrinsecamente relacionada com as hidrógrafas apresentadas na Figura 29, bem como com a intensidade da precipitação. No evento que gerou maior vazão, dia 10 de maio de 2018, obteve-se um possível aumento da mobilização das partículas do solo e carreamento dos sedimentos, caracterizando processo erosivo (Figura 25b), fato este corroborado pela Tabela 6 e pela Figura 25b. O monitoramento realizado no dia 22 de março de 2018, apresentou um evento de vazão menor do que o dia 10 de maio de 2018, indicando processo de deposição atuante na área, como mostra a (Figura 25a).

Figura 25 – Espacialização da dinâmica dos processos erosivos na seção de controle: medição de 22 de março de 2018 (a) e medição de 10 de maio de 2018 (b)



Fonte: elaborada pela autora.

Outras pesquisas mostraram que dados obtidos com o monitoramento dos pinos, individualmente, sofrem mudanças frequentes de erosão e deposição de sedimentos. A dinâmica do processo erosivo está diretamente relacionada com os eventos de precipitação e

escoamento superficial, ou seja, dependendo da intensidade de um evento o sedimento em um dado pino pode ser depositado e em outro evento ser erodido (Luffman *et al.* (2015); Kearney *et al.* 2018). Essa dinâmica relatada nas pesquisas dos autores supracitados foi observada no micro-reservatório monitorado nesse estudo conforme os dados apresentados.

## 5.2 Espacialização dos parâmetros físicos do solo

O conhecimento dos tipos de solo, de suas propriedades e características hidrológicas permite fazer inferências sobre sua suscetibilidade natural à erosão. O processo erosivo pode ser controlado por diversos fatores, com destaque para a declividade do terreno natural, as características das precipitações, a cobertura e o tipo de manejo do solo e as práticas conservacionistas utilizadas. No entanto, alguns solos erodem mais facilmente que outros quando as demais condições são mantidas inalteradas. Esta diferença, inerente às propriedades do solo, é denominada erodibilidade do solo (DISSMEYER; FOSTER, 1980).

Para a caracterização, bem como espacialização da dinâmica de sedimento foram realizadas análises em laboratório dos parâmetros físicos do solo. A Tabela 7 mostra os valores da massa específica aparente seca do solo ( $D_s$ ), o diâmetro de referência  $D_{50}$  e a classificação textural do solo da área de monitoramento no período de 2018 a 2019.

Tabela 7 – Massa específica aparente seca do solo ( $D_s$ ); Diâmetro de Referência ( $D_{50}$ ); Classificação textural

Pinos	Ano 2018			Ano 2019		
	$D_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{50}$ (mm)	Classificação textural	$D_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{50}$ (mm)	Classificação textural
H1	1,29	0,017	Areia Franca	1,48	0,017	Areia Franca
H2	1,43	0,019	Areia Franca	1,39	0,015	Areia Franca
H3	1,41	0,013	Franco Arenosa	1,52	0,021	Franco Arenosa
H4	1,33	0,024	Areia Franca	1,51	0,019	Areia Franca
J1	1,42	0,028	Areia Franca	1,01	0,032	Areia Franca
J2	1,37	0,023	Areia Franca	1,55	0,018	Areia Franca
J3	1,18	0,02	Franco Arenosa	1,41	0,025	Franco Arenosa

J4	1,29	0,008	Franco Arenosa	1,34	0,007	Franco Arenosa
L1	1,51	0,041	Areia	1,33	0,02	Areia
L2	1,49	0,034	Areia Franca	1,45	0,02	Areia Franca
L3	1,24	0,029	Areia	1,53	0,018	Areia
L4	1,61	0,027	Areia	1,50	0,034	Areia
L5	1,39	0,023	Areia	1,44	0,013	Areia
M1	1,19	0,023	Areia Franca	1,24	0,026	Areia Franca
M2	1,26	0,023	Areia Franca	1,40	0,037	Areia Franca
M3	1,33	0,024	Areia Franca	1,21	0,017	Areia Franca
M4	1,36	0,024	Franco Arenosa	1,16	0,052	Franco Arenosa
M5	1,14	0,015	Franco Arenosa	1,13	0,015	Franco Arenosa
N1	1,12	0,033	Areia Franca	1,21	0,031	Areia Franca
N2	1,26	0,045	Areia Franca	1,09	0,037	Areia Franca
N3	1,24	0,024	Areia Franca	1,24	0,023	Areia Franca
O1	1,03	0,02	Franco Arenosa	1,31	0,019	Franco Arenosa
P1	1,49	0,028	Areia Franca	1,48	0,029	Areia Franca
Q1	1,12	0,024	Franco Arenosa	1,23	0,023	Franco Arenosa
F3	1,50	0,017	Franco Arenosa	1,26	0,025	Franco Arenosa
C3	1,14	0,006	Franco Arenosa	1,56	0,013	Franco Arenosa
P12	1,56	0,023	Areia Franca	1,68	0,021	Areia Franca
P13	1,57	0,019	Franco Arenosa	1,40	0,015	Franco Arenosa
P23	1,49	0,002	Franco Arenosa	1,24	0,01	Franco Arenosa
P24	1,50	0,021	Areia Franca	1,56	0,013	Areia Franca
P49	1,68	0,023	Areia Franca	1,44	0,042	Areia Franca
A2	1,42	0,016	Franco Arenosa	1,41	0,025	Franco Arenosa
A4	1,32	0,018	Franco Arenosa	1,49	0,028	Franco Arenosa

B1	1,43	0,012	Areia Franca	1,32	0,02	Areia Franca
B3	1,49	0,0001	Franco Arenosa	1,34	0,0118	Franco Arenosa
B5	1,22	0,006	Franco Arenosa	0,99	0,006	Franco Arenosa

Fonte: elaborada pela autora.

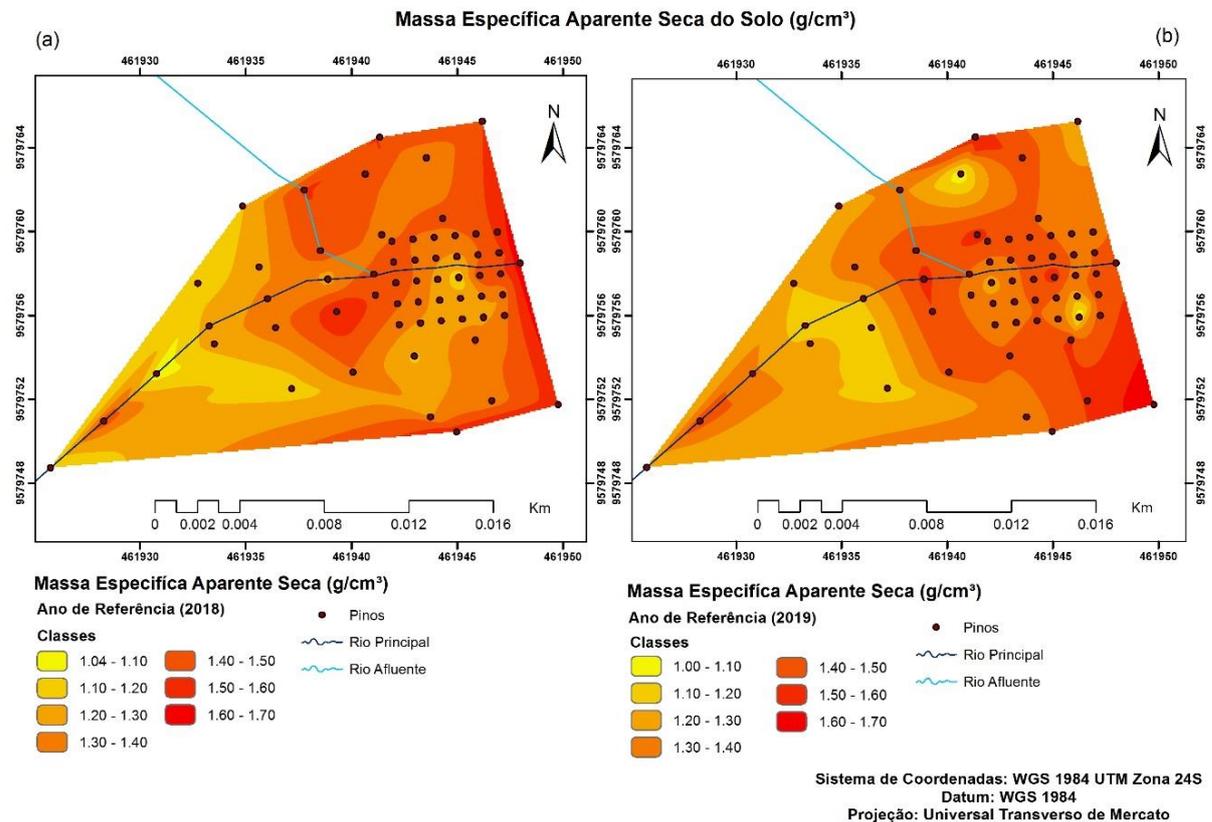
Os valores da massa específica aparente seca do solo obtido em análise de laboratório estão inseridos dentro da faixa de 1,03 a 1,67 g/cm<sup>3</sup>, para o ano de 2018, e na faixa 0,98 a 1,68 g/cm<sup>3</sup> para o ano de 2019.

Após o cálculo da massa específica aparente seca do solo realizou-se, com auxílio de ferramentas de geoprocessamento, a interpolação do Ds na área de influência dos pinos de monitoramento (Figura 26).

Pode-se observar que no ano de 2018 (Figura 26a) os valores de densidade inseridos na faixa de 1,04 a 1,34 g/cm<sup>3</sup> foram observados na porção sul e sudoeste da área de monitoramento. Esta faixa representa as partículas de solo de granulometria mais fina. Este comportamento pode ser explicado pela redução da velocidade de escoamento da água devido ser uma área de baixio. Já os valores inseridos na faixa de 1,34 a 1,40 g/cm<sup>3</sup>, granulometria mais grosseira, foram situados mais ao norte, que são áreas que apresentam maiores valores de declividades, portanto maior velocidade do fluxo de escoamento e ao longo da calha dos canais d'água.

Para o ano de 2019, pode-se observar que não houve uma variação considerável nos valores de densidade na área monitorada, porém houve uma mudança significativa na distribuição espacial deste parâmetro. Conforme Figura 26b, pode-se perceber um aumento nos valores da massa específica aparente seca do solo nas porções sul e sudoeste da área monitorada, caracterizando um material de maior diâmetro, diferentemente da dinâmica apresentada no ano de 2018. A partir desses dados pôde-se perceber a influência que a dinâmica do processo de erosão e deposição de sedimentos tem com a velocidade do escoamento e a intensidade dos diferentes eventos de precipitação.

Figura 26 – Massa específica aparente seca do solo: (a) Ano referência 2018 e (b) Ano referência 2019.



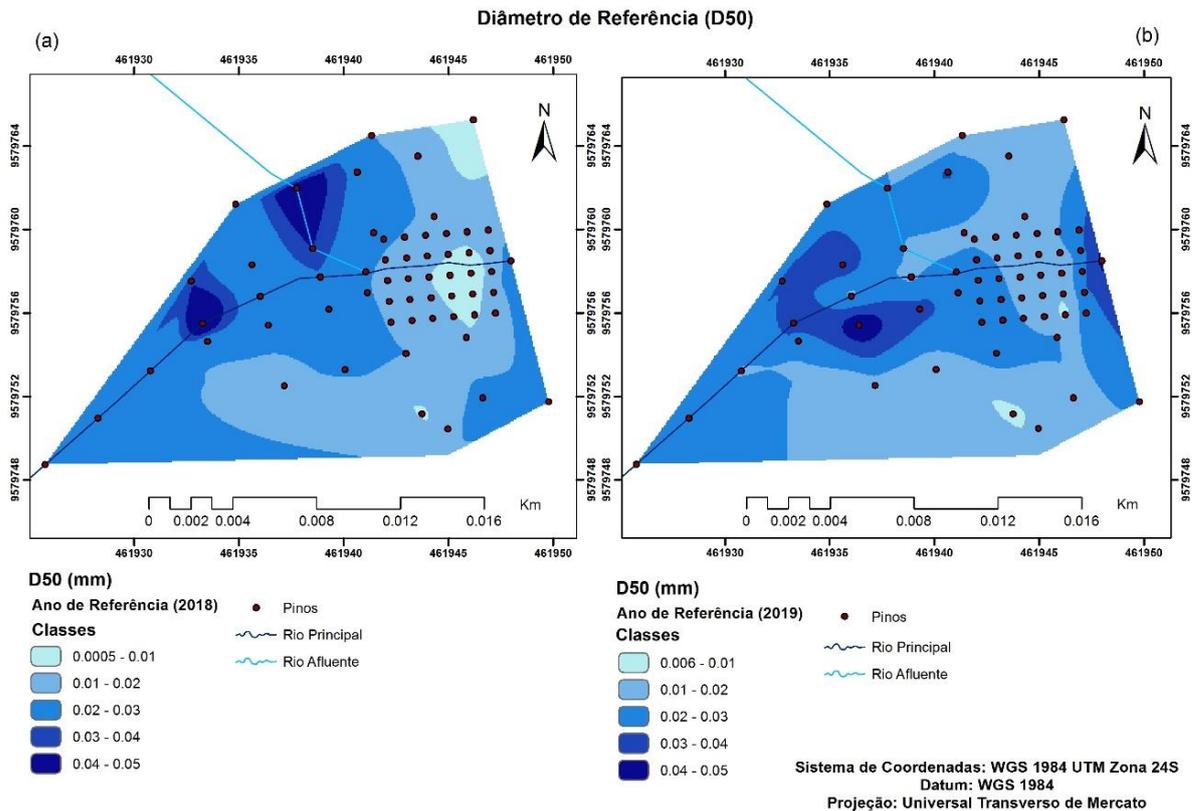
Fonte: elaborada pela autora.

Outro parâmetro analisado foi o diâmetro de referência ( $D_{50}$ ) que corresponde ao diâmetro mediano, ou seja, metade das partículas das amostras coletadas em cada pino tem diâmetro igual ou inferior a este valor (Tabela 05). O valor do  $D_{50}$  dos pinos ficou dentro da faixa de 0,00056 a 0,044 mm no ano de 2018 (Figura 27a) e na faixa de 0,006 a 0,052 mm no ano de 2019 (Figura 27b).

O parâmetro  $D_{50}$  no ano de 2018 teve uma dinâmica diferente da que ocorreu no ano de 2019. No ano de 2018 houve uma tendência de deposição de partículas de solo com granulometria média mais fina (faixas de 0,0005 a 0,02 mm), caracterizando materiais como silte fino e argila, nas porções sudoeste e sul da área monitorada. Esta tendência de deposição se deu devido ao fato de que as porções sudoeste e sul da área de monitoramento ter baixas declividades e menor velocidade do escoamento superficial de água. Já o  $D_{50}$  dentro da faixa de 0,02 a 0,05 mm, se concentrou nas porções norte, que são as áreas com maiores declives e maiores velocidade de escoamento.

No ano de 2019 a dinâmica foi alterada. Observou-se que  $D_{50}$  das partículas de solo concentraram-se na faixa de 0,02 a 0,04 mm. Caracteriza-se, assim, a forte interação entre a dinâmica de deposição e erosão com a intensidade dos eventos de precipitação e escoamento. Pôde-se perceber que no Ano de 2019 houve uma redistribuição das partículas de solo na área monitorada, conforme ilustra a Figura 27b. Partículas de solo com granulometria mais grosseira, ao longo do rio principal, foram carregadas e/ou arrastadas através do fluxo superficial e da declividade do leito rio principal para as zonas de baixio, ou seja, deposição. Esse dado pode ser relacionado com eventos de precipitação e escoamento de maiores magnitudes que ocorreram no ano de 2019, em relação aos eventos de 2018. Conforme Carvalho (2008), em períodos de eventos de precipitação, as forças que atuam sobre as partículas de solo de granulometria maior, proporcionam o transporte destas pelo curso d'água. Rodrigues (2011), em sua pesquisa, observou que isso decorrer do fato de que o transporte das partículas de solo está intrinsecamente relacionado com a velocidade do escoamento, granulometria do material, da declividade do leito e da força do atrito entre as partículas e da profundidade do curso de água.

Figura 27 – Diâmetro de referência D<sub>50</sub>: (a) Ano referência 2018 e (b) Ano de referência 2019



Fonte: elaborada pela autora.

A partir do exposto acima pode-se entender que a modificação na dinâmica do processo de erosão e deposição das partículas do solo em uma área inundada rasa está intrinsecamente relacionada com a velocidade de escoamento do fluxo, declividade do terreno, tipo de solo, intensidade de precipitação.

Com base nos materiais de solo coletados e posterior análise granulométrica, classificou-se o solo da área inundada monitorada com base nos valores percentuais de areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina, silte e argila apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Granulometria do solo no micro-reservatório (25 de outubro de 2018)

Pinos	AMG. (%)	AG. (%)	AM. (%)	AF. (%)	AMF. (%)	Silte (%)	Argila (%)
H1	6,64	18,87	24,66	29,60	20,23	15,18	6,91
H2	4,26	22,27	25,41	28,42	19,64	12,48	6,70

H3	2,88	20,95	31,74	27,65	16,78	17,40	10,86
H4	1,67	10,64	27,37	42,84	17,48	16,49	7,07
J1	3,54	21,79	35,04	32,54	7,10	11,63	7,15
J2	2,93	14,07	28,41	35,10	19,73	12,23	6,27
J3	0,94	6,23	17,53	39,50	35,80	30,34	13,26
J4	0,39	15,03	32,49	30,23	21,87	23,33	13,45
L1	5,59	20,55	28,81	41,36	3,60	7,30	3,18
L2	3,10	13,98	25,73	48,62	8,57	12,98	5,93
L3	6,83	32,66	30,26	25,59	4,66	9,07	4,43
L4	3,67	23,12	39,43	24,29	9,49	9,39	3,76
L5	3,65	24,20	35,55	22,76	13,84	9,13	3,70
M1	2,23	13,83	24,56	36,59	22,79	10,38	6,92
M2	4,20	14,07	29,81	33,87	18,06	11,92	6,76
M3	4,97	16,00	28,42	32,55	18,06	10,15	6,09
M4	1,43	9,35	28,41	41,38	19,44	14,66	8,02
M5	4,07	17,36	31,07	30,78	16,72	20,72	7,56
N1	0,93	6,59	30,82	47,67	14,09	9,72	6,34
N2	11,81	15,07	46,82	18,98	7,33	12,46	4,34
N3	3,10	13,07	30,69	37,16	15,98	14,22	7,13
O1	4,35	12,66	21,04	39,93	22,01	15,45	10,15
P1	2,84	25,89	36,82	24,27	10,17	11,09	7,19
Q1	1,56	3,23	22,14	51,35	21,72	18,14	8,75
F3	7,75	24,80	30,21	23,33	13,90	23,80	13,89
C3	6,75	19,64	25,88	31,30	16,42	16,69	9,30
P12	4,21	14,45	26,28	37,91	17,15	14,65	7,62
P13	3,64	15,04	22,53	35,85	22,93	16,75	6,85
P23	4,61	16,68	17,41	32,54	28,76	27,91	14,75
P24	10,45	28,50	26,69	23,44	10,93	9,20	5,13
P49	10,38	31,07	31,33	20,20	7,02	16,91	5,12
A2	8,64	19,33	26,09	34,57	11,37	19,58	13,16
A4	12,67	31,18	31,62	18,35	6,18	17,15	11,91
B1	13,79	33,15	22,88	20,48	9,70	13,19	8,25
B3	7,07	21,45	26,96	29,31	15,21	25,54	18,12

B5	8,12	23,50	27,87	24,84	15,68	24,51	14,81
----	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

AMG.: areia muito grossa (acima de 1,0 mm); AG.: areia grossa (1,0>AG>0,5); AM.: areia média (0,5>AM>0,250); AF.: areia fina (0,25>AF>0,10); AMF.: areia muito fina (0,10>AMF>0,05); Silte (0,05<Silte>0,002); Argila (abaixo de 0,002mm).

Tabela 9 – Granulometria do solo no micro-reservatório (08 de junho de 2019)

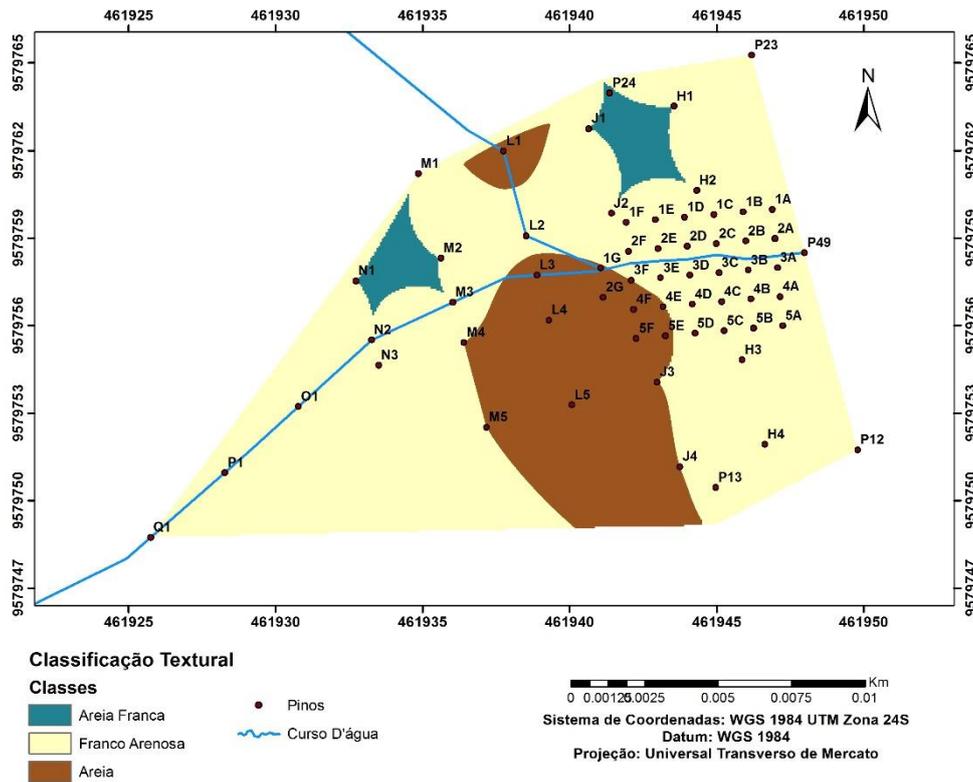
Pinos	AMG. (%)	AG. (%)	AM. (%)	AF. (%)	AMF. (%)	Silte (%)	Argila (%)
H1	4,19	7,69	12,04	28,34	14,04	21,60	11,43
H2	8,28	16,48	17,28	19,98	14,78	14,10	8,25
H3	6,17	17,72	25,82	20,17	9,67	12,36	7,61
H4	2,74	9,49	20,29	26,34	15,54	15,55	8,91
J1	7,47	21,02	29,27	20,22	7,07	8,10	5,77
J2	3,76	13,41	20,16	23,41	15,41	13,56	8,30
J3	1,77	5,92	22,97	32,62	10,67	15,03	9,78
J4	0,95	3,70	5,50	11,00	25,95	31,49	19,68
L1	4,42	11,97	17,47	27,17	19,72	12,88	5,76
L2	7,61	15,21	18,66	23,71	14,06	13,29	6,70
L3	9,53	21,58	21,58	15,53	6,73	11,87	10,90
L4	7,97	23,62	28,72	11,72	5,67	13,00	7,96
L5	2,04	9,34	15,49	23,39	24,84	15,57	8,49
M1	3,24	11,04	20,09	31,89	7,24	16,10	9,73
M2	4,25	12,55	24,60	37,45	4,50	9,88	6,01
M3	8,66	20,51	22,16	18,26	6,56	12,75	10,22
M4	10,51	30,36	31,56	11,76	2,51	7,49	5,16
M5	1,88	6,88	15,43	26,43	18,33	16,85	12,43,
N1	0,68	2,18	22,68	41,73	13,53	10,15	8,28
N2	7,78	22,73	30,48	16,88	6,33	9,38	5,78
N3	3,80	12,55	23,00	26,70	14,90	10,07	8,00
O1	3,74	14,64	22,59	23,19	13,34	12,44	9,27
P1	6,70	24,85	26,85	18,75	4,55	12,12	5,73
Q1	1,40	4,75	15,80	34,15	17,60	13,22	10,09
F3	5,35	14,50	24,35	26,40	9,80	10,29	8,41

C3	5,53	15,38	21,88	18,33	8,88	16,48	12,81
P12	3,17	9,67	21,92	27,17	16,37	14,60	6,47
P13	3,28	9,43	17,98	24,33	16,73	16,49	10,45
P23	5,11	12,76	17,51	18,41	17,36	16,94	10,79
P24	6,50	14,25	22,40	27,85	13,70	8,79	5,96
P49	17,33	29,33	24,93	11,83	2,53	7,57	5,65
A2	3,90	9,00	21,20	30,55	10,15	13,22	10,61
A4	9,03	22,03	26,53	12,48	3,48	16,05	9,69
B1	6,43	12,73	18,18	24,98	8,93	16,04	11,14
B3	7,76	17,51	20,46	16,71	8,31	17,06	11,44
B5	3,46	9,56	12,31	12,01	11,51	30,47	19,63

AMG.: areia muito grossa (acima de 1,0 mm); AG.: areia grossa ( $1,0 > AG > 0,5$ ); AM.: areia média ( $0,5 > AM > 0,250$ ); AF.: areia fina ( $0,25 > AF > 0,10$ ); AMF.: areia muito fina ( $0,10 > AMF > 0,05$ ); Silte ( $0,05 < \text{Silte} < 0,002$ ); Argila (abaixo de 0,002mm).

A textura do solo é um fator importante que pode influenciar a erodibilidade do solo, pois ela está intrinsecamente relacionada com os processos de desagregação e transporte de sedimentos (LAL, 1998). Este parâmetro refere-se à proporção relativa das frações granulométricas que compõem a massa do solo. É considerada uma característica básica do solo porque não está sujeita a mudança, podendo servir como critério para sua classificação (FRANCISCO, 2010). Com base nos dados percentuais acima, classificou-se a textura do solo coletado (Figura 28). A textura do solo nos dois anos monitorados permaneceu inalterada. A classe textural que predominou na área monitorada foi a Areia Franca, seguida da Franco Arenosa e Areia, sucessivamente. A partir desses dados pôde-se classificar o solo do micro-reservatório como arenoso. Esse dado foi ratificado com a pesquisa de Silveira (2019), o autor classificou o solo da Bacia Experimental Vale do Curu (BEVC) como arenoso. Este tipo de solo possui baixo índice de agregado, sendo mais susceptível ao processo de erosão. Durante o monitoramento dos parâmetros físicos do solo, durante os anos de 2018 e 2019, o único parâmetro que não se observou alteração foi a classe textural do solo.

Figura 28 – Classificação textural do solo na área monitorada nos anos de 2018 e 2019



Fonte: elaborada pela autora.

### 5.3 Modelagem da dinâmica de sedimento na área monitorada

A modelagem da dinâmica de sedimentos no micro-reservatório foi realizada com base nos dados coletados, nas campanhas (realizadas nos anos de 2018 e 2019) e, posteriormente, processados em laboratório. Os parâmetros utilizados como dados de entrada do modelo foram: vazão, concentração de sólidos dissolvidos, granulometria do solo do micro-reservatório e granulometria do sedimento em suspensão.

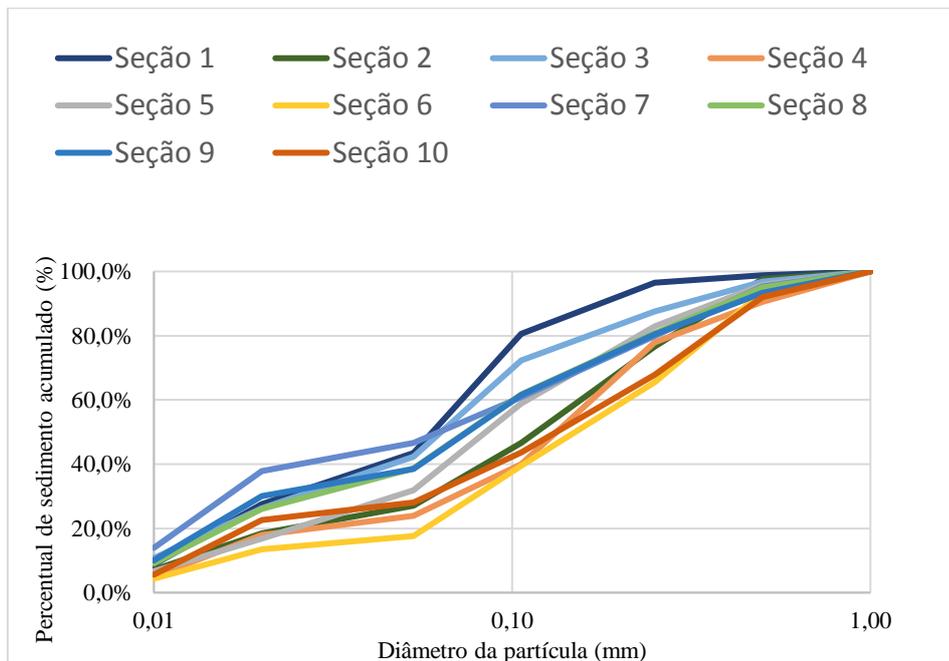
As vazões afluentes ao micro-reservatório foram estimadas usando o método CN-SCS para uma série histórica de 47 anos de chuva (1970-2017). Já a concentração dos sólidos dissolvidos foi estimada com base nas seis amostras de água coletadas na área monitorada. A partir dados de concentração de sólidos dissolvidos tirou-se uma média dos valores para ser utilizada como dado de entrada do modelo (Tabela 10). A granulometria do sedimento em suspensão foi determinada através da metodologia da difração a laser.

Tabela 10 – Vazões escoadas nos diferentes eventos monitorados no ano de 2019

Evento	Nível (m)	Vazão efluente (m <sup>3</sup> /s)	Amostra	Concentração de sólidos dissolvidos (mg/L)
16/03/2019	0,15	0,851	1	200
19/03/2019	0,15	0,851	2	600
20/03/2019	0,07	0,328	3	200
26/03/2019	0,11	0,577	4	200
01/04/2019	0,20	1,219	5	200
02/04/2019	0,11	0,577	6	400

No Gráfico 1 pode-se observar as curvas granulométricas do solo matriz nas dez seções de controle, sendo a seção 01 mais próxima à entrada do micro-reservatório e a seção 10 mais próxima do vertedouro triangular. Com base nas curvas granulométricas das dez seções de controle, apresentadas no gráfico acima, o solo matriz foi classificado como um solo arenoso.

Gráfico 1 – Granulometria do solo matriz em cada seção

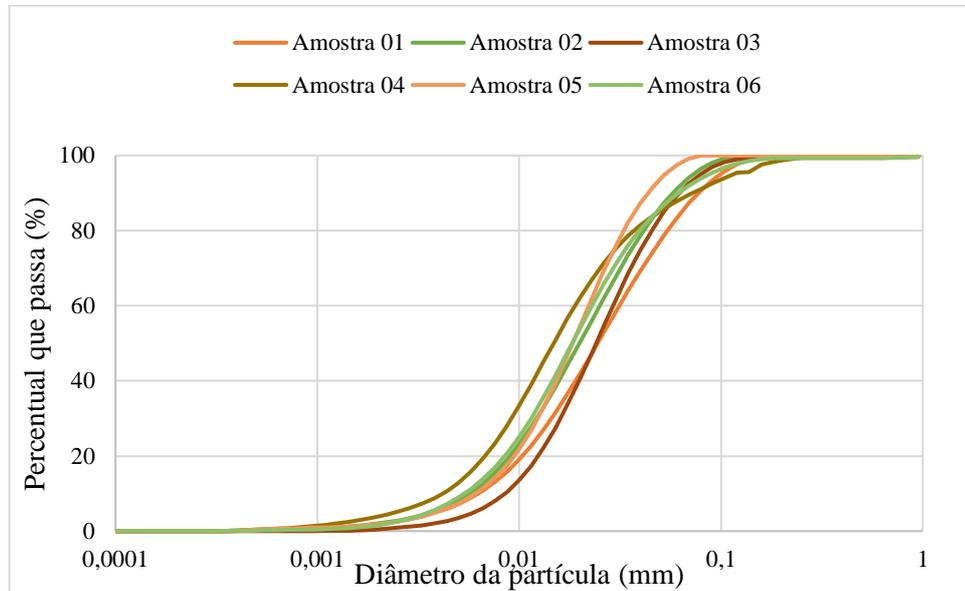


Fonte: elaborada pela autora.

No Gráfico 2 observaram-se as curvas granulométrica do sedimento em suspensão, geradas usando a técnica da difração a laser no equipamento *Mastersizer 2000* da *Malvern* e

processada no Laboratório de Análises Mineraias – LAMIN da CPRM/BH, em cada um dos seis eventos monitorados.

Gráfico 2 – Granulometria do sedimento em suspensão

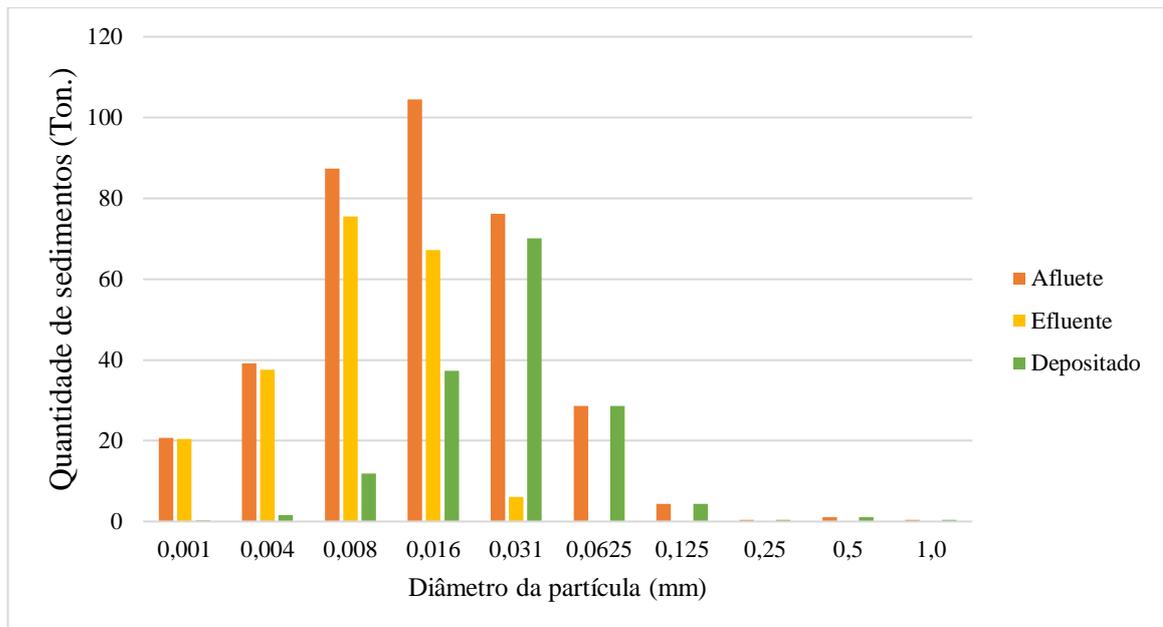


Fonte: elaborada pela autora.

A partir dos dados apresentados acima pôde-se constatar que a granulometria do sedimento em suspensão nos diversos eventos ficou próxima ao intervalo das faixas de 0,001 a 0,1 mm (Gráfico 2), faixa que caracteriza os sedimentos mais finos, como o silte. Este dado foi validado com a pesquisa de Silveira (2019), que encontrou valores similares para granulometria do material em suspensão na área. Observou-se que as faixas granulométricas do sedimento em suspensão, nos seis eventos monitorados, se mantiveram muito próximas, mesmo com vazões diferentes, variando em uma faixa de 0,2 a 1,2 m<sup>3</sup>/s (Tabela 10).

Com posse dos dados de vazão, concentração de sedimento e admitindo que os percentuais granulométricos dos sedimentos em suspensão foram constantes ao longo do tempo estimou-se a quantidade de sedimentos que aportou na área monitorada para cada faixa granulométrica, em toneladas. Utilizando-se a modelagem proposta por Haan *et al.* (1994), baseada no conceito de razão de vertimento (*overflow rate concept*), realizou-se o balanço de sedimentos no micro-reservatório, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Modelagem da quantidade total de sedimentos afluentes, efluentes e depositados, em toneladas, no micro-reservatório no período de 1970-2017.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Em conformidade com as porcentagens granulométricas verificadas nas amostras escoadas através do exutório da área monitorada (Gráfico 2), 74 % das partículas de sedimento presentes no escoamento superficial eram compostas de silte. De acordo com a estimativa do modelo durante a série histórica, a área monitorada teve um aporte de sedimento de 363 toneladas, destas 297 toneladas foram de material classificado como silte; enquanto que menores valores foram encontrados para argila, em torno de 60 toneladas, seguida da areia com 6 toneladas, conforme Gráfico 3.

A carga de sedimento efluente a área monitorada foi também estimada pelo modelo proposto por Haan *et al.* (1994). Este modelo considera a velocidade do fluxo hidráulico dentro do reservatório e as velocidades de queda das partículas de solo.

Conforme os resultados apresentados no Gráfico 3, pôde-se verificar que as partículas de solo que conseguiram sair da área monitorada, por vertimento, foram as de granulometria fina, silte e argila. Ou seja, do material que aporta na área monitorada, 363 toneladas, 207 toneladas saem do micro reservatório por vertimento. As curvas granulométricas das amostras coletadas em diferentes eventos de vertimento, apresentadas no Gráfico 2, corroboram com os resultados do método, por apresentar curvas granulométricas com predominância de partículas mais finas.

A área monitorada, conforme análise do Gráfico 3, foi capaz de reter 100% das partículas de sedimentos com diâmetro nas faixas de 0,031 a 1,0 mm, totalizando 105 toneladas de sedimentos retidos. O modelo estimou que a eficiência de retenção no micro-reservatório em estudo foi de 43,00 %. Silveira (2019) em sua pesquisa encontrou uma eficiência de retenção de 93 % para o Açude escola, reservatório que fica a jusante da área monitorada, com capacidade de armazenamento de 51.600 m<sup>3</sup>. Essa diferença pode ser explicada devido ao fato da área monitorada ser um micro-reservatório raso, onde o exutório, vertedouro triangular, recebe toda a água que passa no rio principal e que aporta ao açude Escola. Ou seja, aporta a este micro-reservatório a mesma vazão afluente de um açude de 1500 vezes maior.

Conforme Mamede *et al.* (2012), pequenos reservatórios tendem a receber um maior aporte de água através do escoamento superficial com maiores frequências quando comparados com grandes reservatórios, dessa forma, há um maior aporte de água e descarga de sedimento a montante, o que foi verificado no micro-reservatório monitorado.

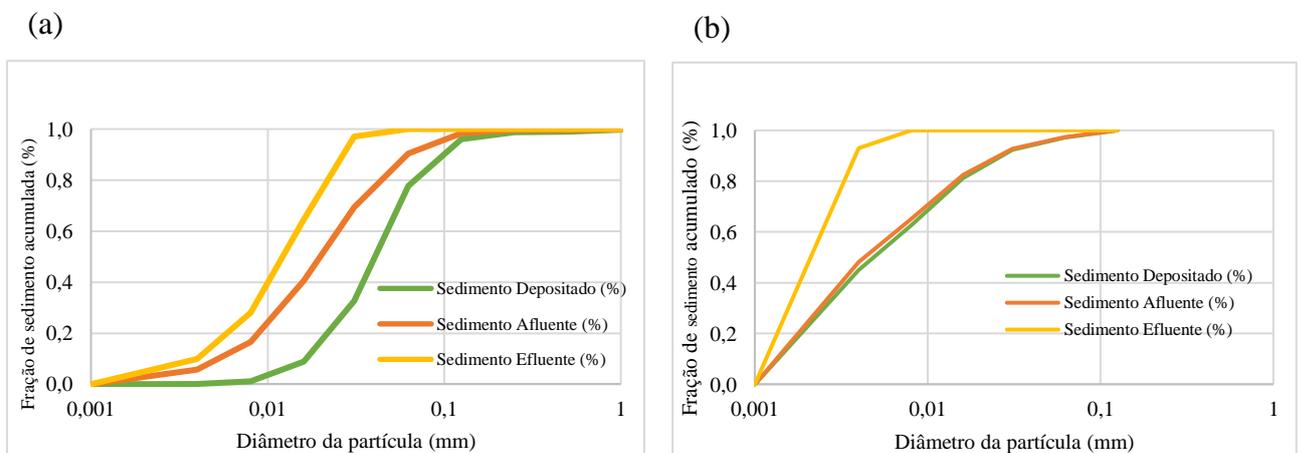
De acordo com Ghomeshi (1995); e Silveira (2019), os fatores que afetam a deposição de sedimentos em reservatórios são: quantidade de sedimento carregado, o qual depende da quantidade do escoamento superficial, cobertura vegetal, geometria e pedologia do solo da bacia de contribuição; eficiência de retenção, a qual depende da capacidade, geometria, forma e tipo de operação do reservatório, quantidade e características granulométricas dos sedimentos afluentes; densidade das partículas depositadas; e correntes de turbidez.

A partir da aplicação do modelo de Haan *et al.* (1994) foi possível estimar a curva de distribuição dos sedimentos depositados e efluentes na área monitorada como mostra o Gráfico 4. Verificou-se que a curva granulométrica dos sedimentos afluentes (medida) se aproxima mais da curva de sedimentos efluentes (obtidas do modelo de assoreamento), indicando uma baixa eficiência de retenção do micro reservatório (43 %) (Gráfico 4a). Comparando as curvas geradas através da aplicação do modelo de Haan *et al.* (1994) na pesquisa de Silveira (2019), conforme Gráfico 4b, pôde-se perceber que as curvas de sedimento depositados e afluentes no Açude Escola foram muito parecidas e próximas uma da outra, o que se deve ao fato da maior parte dos sedimentos afluentes fica retida (93%). Desta forma, o material depositado apresenta composição granulométrica muito parecida dos sedimentos que aportam ao açude, com discreta redução de finos, uma vez que as menores partículas permanecem em suspensão por mais tempo e possuem maior probabilidade de deixar o reservatório por vertimento ou regularização de vazões. Observa-se, ainda, a ocorrência de enriquecimento de finos no trajeto da carga de sedimentos pelo reservatório, como resultado da

deposição de partículas de maiores diâmetros, evidente nas duas aplicações (SILVEIRA, 2019; e neste estudo).

Analisando o sedimento depositado, em comparação ao afluente, verificou-se que a granulometria apresentou frações acumuladas de sedimentos mais grosseiros do que o sedimento afluente, o que já era esperado. Já a curva do sedimento efluente apresentou granulometria mais fina do que a curva do sedimento aportado ao reservatório. Dessa forma, pode-se concluir que a distribuição granulométrica dos sedimentos modelada pelo modelo de Haan *et al.* (1994), no micro-reservatório, mostrou-se coerente na representação da dinâmica da distribuição dos sedimentos em uma área pequena.

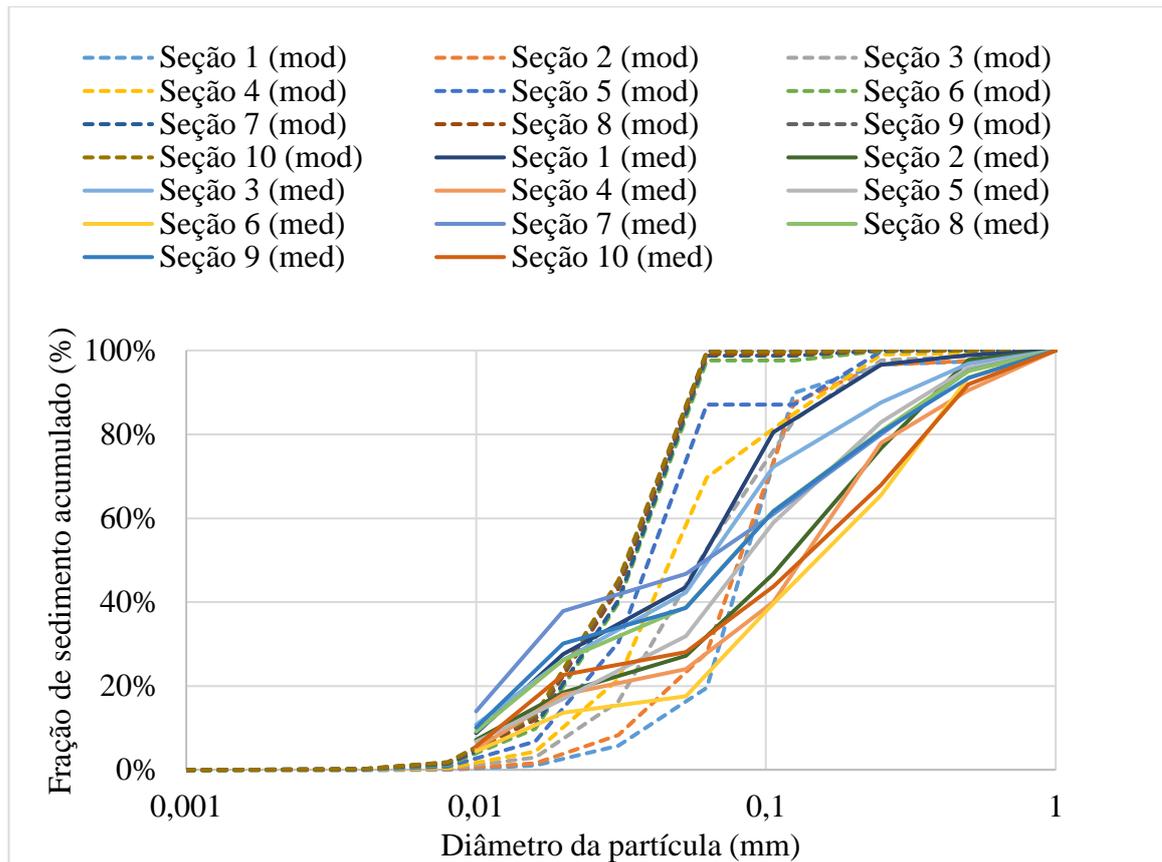
Gráfico 4 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados, afluente e efluentes no micro-reservatório, pelo modelo proposto por Haan *et al.* (1994) (a) e distribuição granulométrica dos sedimentos depositados, afluente e efluentes no Açude Escola, pelo modelo proposto por Haan *et al.* (1994) (b)



Fonte: Silveira (2019).

Conforme o Gráfico 5, pôde-se perceber que existe uma tendência de acúmulo dos sedimentos de granulometria mais fina nas seções próximas ao vertedouro, visto que essas partículas possuem baixa velocidade de sedimentação que favorece o processo de transporte ao longo da área monitorada. O gráfico também apresenta as curvas granulométricas do solo coletado nas dez seções da área, sendo a seção 01 localizada à montante da área e a seção 10 localizada à jusante (vertedouro).

Gráfico 5 – Curvas granulométricas modeladas nas dez seções na área monitorada



Fonte: elaborada pela autora.

O modelo mostrou que os sedimentos mais finos possuem uma tendência de acúmulo nas porções próximas ao vertedouro, já a curva medida mostrou a presença de materiais de solo de granulometria mais grosseira nesta zona. Uma explicação para esta dinâmica pode estar no fato de micro-reservatório apresentar comportamento similar a um trecho de rio durante eventos de vazão de maiores magnitudes. Neste caso, as partículas mais grossas tendem a ser transportadas para jusante, por arraste, ficando retidas no local do barramento. Já as partículas mais finas tendem a ser mobilizadas e transportadas pelo fluxo, por suspensão, deixando o reservatório. Silveira (2019), por outro lado, observou que a granulometria do sedimento (modelada e medida) diminui no sentido do barramento, onde predominam processos de deposição. Neste caso, o volume armazenado no reservatório provoca redução da velocidade de fluxo ao longo do perfil longitudinal, à medida que se eleva a profundidade e largura da seção, favorecendo o processo de deposição de partículas de maiores diâmetros, com maiores velocidades de queda, no trecho de montante do reservatório, na região conhecida como delta. As partículas de diâmetros inferiores tendem a atingir maiores alcances no sentido do barramento.

Aplicações do modelo de assoreamento proposto por Haan tem apresentado resultados encorajadores, como reportado por Mamede (2008) e Silveira (2019). Contudo, em micro-reservatórios onde predominam processos de mobilização de sedimentos de leito, seja por arraste de partículas de maiores diâmetros ou ressuspensão de finos, como observado neste estudo, o modelo de Haan não apresenta desempenho satisfatório. Observa-se, ainda, na simulação do balanço de sedimento do micro-reservatório desta pesquisa, para o período de 47 anos (1970-2017), um assoreamento de 156 toneladas ( $120 \text{ m}^3$ , para uma massa específica aparente média medida de  $1,30 \text{ ton/m}^3$ ). Este volume de sedimento seria suficiente para assorear completamente o reservatório quatro vezes. Estes resultados sugerem que o assoreamento estimado esteja superestimado, possivelmente pelo fato do modelo não considerar processos de ressuspensão de sedimentos.

A ressuspensão de sedimento se deve basicamente ao processo de erosão do material de fundo da área monitorada. Assim, o efeito desse processo seria aumentar progressivamente as concentrações de sólidos mais grosseiros na água e tornar mais homogêneo o perfil de concentração de sedimento em suspensão em toda a coluna d'água. Ou seja, dependendo da magnitude do evento de precipitação e geração da velocidade do fluxo da água, a partícula de solo de granulometria mais grosseira pode ter sido mobilizada e transportada, através do escoamento, para zonas de menores declividades e baixas velocidades e posteriormente depositadas. Essa dinâmica foi observada na espacialização do parâmetro  $D_{50}$  em comparação aos dois anos de monitoramento de dados na área (Figura 27). O processo de ressuspensão de sedimentos está intrinsecamente relacionado com a velocidade do vento, tensões cisalhantes aplicadas à partícula do solo e nas características físicas destes sedimentos como densidade e granulometria (GARCIA; PARCKER, 1991; BRITO JÚNIOR, 2015).

De acordo com Silveira (2019), o processo de deposição ocorre assim que o fluxo carregado com sedimentos entra no reservatório. Cargas de fundo ou arraste e partículas maiores tendem a se depositar primeiramente, formando os chamados deltas, enquanto as partículas menores, por terem baixa velocidade de queda, tendem a serem transportadas. Esse padrão de aumento da concentração de finos em locais mais próximos à barragem, como proposto pelo modelo, foi verificado por Bak e Dabkowski (2013) e Silveira (2019), estudando o padrão deposicional de sedimentos. Contudo, para o micro-reservatório deste estudo, observa-se que a dinâmica de transporte de sedimentos é diretamente influenciada pela ocorrência de eventos de escoamento que favorece o transporte de partículas maiores em direção à barragem, enquanto que o sedimento mais fino é mobilizado e transportado por suspensão para fora do reservatório. Conforme Chaudhuri (2017), o padrão de deposição de sedimentos em reservatórios está inter-

relacionado com a topografia, geometria, geologia e características granulométricas dos sedimentos. Esses são os principais parâmetros que orientam a deposição e distribuição de sedimentos em reservatórios. Como esses parâmetros são mutáveis conforme as características da área estudada, a variabilidade deposicional de sedimentos é muito grande.

Conforme Silveira (2019), o padrão granulométrico dos sedimentos depositados nos reservatórios localizados em ambientes semiárido é distinto quando comparado a reservatórios que recebem aporte hídrico durante todo o ano. O autor ressalta que um reservatório seco ao receber os primeiros aportes hídricos através do escoamento superficial, as partículas grosseiras tenderão a ser carreadas e se depositar próximas à parede da barragem, como observado na área da bacia hidráulica do micro-reservatório. Em reservatórios maiores, no entanto, com maior eficiência de retenção, como no caso do açude Escola, observou-se um padrão de deposição de sedimentos com redução gradual do tamanho das partículas no sentido do barramento.

## 6 CONCLUSÃO

O procedimento de monitoramento com pinos de erosão associado às ferramentas de geoprocessamento permitiu a espacialização da dinâmica do processo erosivo medido a partir da cota, área e volume do micro-reservatório. Conforme os resultados obtidos na pesquisa houve variação na topografia do leito da área observada nos dois monitoramentos realizados, indicando a aplicabilidade do método para o monitoramento dos processos de erosão e deposição em áreas propícias à inundação. A observação comparativa dos eventos de escoamento monitorados com as alterações observadas no leito da área inundada mostrou que processos de deposição são dominantes para vazões menores.

A espacialização dos parâmetros de massa específica aparente seca do solo, diâmetro de referência (D50) e classe textural do solo mostraram o quão dinâmico é o processo de erosão e deposição do solo. A partir das análises dos dados obtidos na pesquisa e com base em outros estudos (Luffman *et al.* (2015); Kearney *et al.* 2018), pôde-se constatar que a dinâmica do processo erosivo está intrinsecamente relacionada com a declividade do terreno, intensidade de precipitação, magnitude dos eventos de vazão e tipo de solo.

O modelo proposto por Haan *et al.* (1994) mostrou-se eficaz na modelagem da quantidade e distribuição de sedimentos afluentes, efluentes e depositados em reservatórios com maior eficiência de retenção. Em micro-reservatório como o estudado nesta pesquisa, a dinâmica de sedimentos foi diretamente influenciada pelos eventos de vazão registrados na área.

A análise granulométrica do solo matriz do micro-reservatório em comparação com as curvas granulométricas modeladas pelo Método de Haan permitiu concluir que a dinâmica deposicional das partículas de solo no micro-reservatório não segue o padrão dos reservatórios maiores, com maior eficiência de retenção, onde predominam processos de deposição de sedimentos.

### 6.1 Recomendações

Recomenda-se que novos estudos sejam elaborados para aprimorar os modelos matemáticos e computacionais de balanço de sedimentos em bacias hidrográficas, sugere-se ainda, que os modelos devam incorporar o processo de ressuspensão de sedimentos em sua formulação.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production a synthesis. **Agricultural water management**, [s.l.], v. 95, n. 11, p. 1201-1213, 2008.
- ALVES, F. G.; CAMPOS, R. Propensão ao assoreamento de reservatórios do semi-árido brasileiro. *In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Fortaleza, CE, Brasil, 2009.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo**: conceitos e aplicações. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008, p. 290.
- ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; PALÁCIO, H. A. Q. O Semiárido cearense e suas águas. *In: ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. (Org.). Semiárido e manejo dos recursos naturais*: uma proposta de uso adequado do capital natural. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2010. p. 56-80.
- ARAÚJO, J. C. de. Assoreamento em reservatórios do semiárido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 39-56, 2003.
- ARAÚJO, J. C. GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.
- BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação do Solo**. 9ª edição. São Paulo: Ícone, 2014. 355 p.
- BIGARELLA, J. J. Processos erosivos, aspectos erosivos e denudacionais, erosão superficial, erosão em canais, ravinas e voçorocas. *In: BIGARELLA, J. J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. 2ª ed. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, v. 3, 2007. Cap. 15, p. 884-939.
- BLAKE, G. R. (1965). **Bulk Density in Methods of Soil Analysis**. *Agronomy*, n. 9, Part 1, C. A. Black, p. 374-390.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. *In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 377-382, 1986b. (Agronomy Monography, 9).
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 790.
- BRITO JÚNIOR, Almir Nunes de. **Modelagem dos fluxos de ressuspensão de sedimentos em um lago raso subtropical**. 2015. 28 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2015.
- BROWN, C. B. Discussion of “Sedimentation in reservoirs” by B. J. Witzig, proc., **Amer. Soc. Civ. Eng.**, [s.l.], v. 69, n. 6, p. 793-815, 1943.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL**, Brasília, p. 132, 2000. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia\\_ava\\_port.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_ava_port.pdf). Acesso em: 10 de mar. de 2015.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 599.

CARVALHO, N.O., FILIZOLA, N.P.J., SANTOS, P.M.C., LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação do assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000. p. 140.

CASSOL, Elemar Antonino; LIMA, VS de. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 117-124, 2003.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da bacia do Curu / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador)**. – Fortaleza: INESP, 2009.

CENTENO, Luana Nunes *et al.* Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 4, n. 1, p.31-37, jul. 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBES/article/view/11576/7912>. Acesso em: 24 fev. 2019.

CHRISTOFOLETTI, S. R.; MORENO, M. M. T. **Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP**. Cerâmica, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 303-310, set. 2017. Disponível em [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132017000300303&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132017000300303&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 27 de jul. 2019.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S.M.G. L.; CAMPOS, J. N. B. **A questão da água noremiárido brasileiro**. In: Bicudo, C.E. de M; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M. C. B. (Org.). *Águas do Brasil análises estratégicas*. 1 ed. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010, v. 1, p. 81-91.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declividade e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, [s.l.], v. 27, p. 743-753, 2003.

COSTA, I. A. S. *et al.* Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semiárido do Rio Grande do Norte. **Oecologia Brasiliensis**, [s.l.], v. 13, n. 2, p. 382-401, 2009.

COSTA, M. R.; LIMA, E. B.; DAMASCENO, S. B. Variação temporal da salinidade das águas em barragens subterrâneas no Semiárido do Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 16. 2010, São Luiz - MA, **Anais**. São Luiz do Maranhão, 2010.

CPRM – COMPANHIA DE PRODUÇÃO DE RECURSOS MINERAIS. (2003) **Atlas de Geologia e Recursos Minerais do Ceará: Sistema de Informações Geográficas SIG e mapa na escala 1:500.000**. In: Cavalcante, J. C.; Vasconcelos, A. M.; Gomes F. E. M. Serviço Geológico do Brasil/ Secretária dos Recursos Hídricos do Ceará. Fortaleza: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 1 CD ROM.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p. 337-379.

DISSMEYER, G. E.; FOSTER, G. R. **A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land**. Atlanta: USDA Forest Service, 1980. p. 40.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical. **Dados climatológicos: Estação de Pentecoste**, 2000. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical/UFC, 2001. p. 14.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical. **Dados climatológicos: Estação de Pentecoste**, 2000. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical/UFC, 2004. p. 16.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1999, p. 412.

ESTIGONI, M. V. **Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios: estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu - SP**. 2016 239 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-10022017-085647/>. Acesso em: 03 de dez. de 2018.

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e Mapeamento de mecanização das terras do estado da Paraíba utilizando sistema de informações geográficas**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solos e Água) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

FIETZ, Carlos Ricardo. **Água: o recurso natural do terceiro milênio. A lavoura**, 2006.

FIRMINO, R. G.; FONSECA, M. B. Uma discussão sobre os impactos ambientais causados pela expansão da agricultura: A produção de biocombustíveis no Brasil. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 2008, Fortaleza. **Anais**, 2008.

FREITAS, C. A. S. de *et al.* Produção de matéria seca e trocas gasosas em cultivares de mamoneira sob níveis de irrigação. **Rev. bras. Eng. Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 11, set. p. 1168-1174, 2011.

GARCÍA, M.H., PARKER, G. Entrainment of bed sediment into suspension. **J. Hydraul. Eng. – ASCE**, [s.l.], v. 117, p. 414–435, 1991.

GLYMPH, L.M. - Sedimentation of Reservoirs. *In: ACKERMANN, W.C. et al., Man-made lakes: their problems and environmental*, 342-346. Washington DC. American Geophysical Union. ISSN: 0065-8448, 1973.

GOMES, F.E. F. **Processos hidrossedimentológicos em uma bacia experimental do semiárido brasileiro**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola: Manejo e conservação de bacias hidrográficas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 32-37, apr. 2011. ISSN: 2236-2878. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47282>. Acesso em: 05 mar. 2018.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. Design hydrology and sedimentology for small catchments. **Academic Press**. ISBN 0-12-312340-2, 1994.

HARRIS, Graham P. Biogeochemistry of nitrogen and phosphorus in Australian catchments, rivers and estuaries: effects of land use and flow regulation and comparisons with global patterns. **Marine and Freshwater Research**, [s.l.], v. 52, n. 1, p. 139-149, 2001.

JACOMINE, P, K, T. A nova classificação brasileira de solos. Universidade Federal Rural de Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônoma**, Recife, vol. 5 e 6, p. 161-179, 2008-2009.

JUNIOR, P. P. A. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas – SP**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

KITAMURA, A. E. **Inter-relações da variabilidade espacial da granulometria do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto**, Ilha Solteira, 2004, 109 f. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

LAL, R. Erodibility and erosivity. *In: LAL, R. et al. Soil erosion research methods*. Washington: Soil and Water Conservation Society, 1988. p. 141-160.

LAQUINI, J.P. **Modelagem determinístico-estocástica da dinâmica de sedimentos em reservatórios de água e de rejeitos de mineração**. 2009. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

LIMA NETO, Iran Eduardo; WIEGAND, Mário Cesar; ARAÚJO, José Carlos de. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques**, [s.l.], v. 56, n. 2, p. 319-333, 2011.

- LIRA, Daniely Lidiany Costa. **Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem Pereira de Miranda, Ce.** 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- MALAGNOUX, M.; SÈNE, E. H.; ATZMON, N. Forests, trees and water in arid lands: a delicate balance. **UNASYLVA-FAO**, v. 229, 2008. p. 24.
- MAMEDE, G. L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management.** 2008. Tese (Doutorado em Hidrologia) – Instituto de Geoecologia, Universidade de Potsdam, Alemanha, 2008.
- 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, v. 1, p. 393-410, 2009.
- MEADE, Robert H.; YUZYK, Ted R.; DAY, Terry J. Movement and storage of sediment in rivers of the United States and Canada. *In*: SURFACE WATER HYDROLOGY. **Geological Society of America**, Boulder, Colorado. 1990. p. 255-280, 21 fig, 3 tab, 185 ref., 1990.
- MINHONI, R. T. DE A. **Estimativa do assoreamento do reservatório PCH Pipoca.** Minas Gerais. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- MIRANDA, Renato Billia de; SCARPINELLA, Gustavo D’Almeida; MAUAD, Frederico Fábio. Influência do assoreamento na capacidade de armazenamento do Reservatório da usina hidrelétrica de Três Irmãos (SP/BRASIL). **Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 34, p. 69-79, 2013.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable Use.** Eletronic Ver. 1.04. McGraw-Hill. New York, 2010.
- NEGREIROS, J. R. Q. **Relações simplificadas para a estimativa do assoreamento de reservatórios.** 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- OYAMA, M.D. & NOBRE, C.A. Climatic consequences of a largue-scale desertification in Northeastern Brazil: a GCM Simulation study. **Journal of Climate**, v. 50, p. 1718-1730, 2004.
- PANOSSO, R.; COSTA, I.A.S.; SOUZA, N.R. de; ATTAYDE, J. L.; CUNHA, S.R. de S.; GOMES, F.C.F. Cianobactérias e cianotoxinas em reservatórios do Estado do Rio Grande do Norte e o potencial controle das florações pela Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). **Oecologia Brasiliensis**, [s.l.], v. 11, p. 433-449, 2007.
- PINHEIRO, E. A. R. **Produção de sedimentos em diferentes escalas espaciais: o caso da bacia do rio Jaguaribe-CE.** 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

- POKHAREL, Shaligram. Water use opportunities and conflicts in a small watershed: a case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 11, n. 6, p. 1288-1299, 2007.
- RODRIGUES, M. F. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no sul do Brasil**. 2011. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Silvicultura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.
- S.P. KEARNEY, S.J. FONTE, E. GARCÍA, S.M. SMUKLER. Improving the utility of erosion pins: absolute value of pin height change as an indicator of relative erosion. **Catena**, [s.l.], v. 163, p. 427– 432, 2018.
- SANTOS, Glenio G.; GRIEBELER, Nori P.; OLIVEIRA, LFC de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Agência Nacional da Água**. 2 ed. Brasília, 2000.
- SILVA, D. D. da *et al.* Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 409-419, 2005.
- SILVEIRA, Paulo Roberto de Souza. **Dinâmica de sedimentos e granulometria em ambiente semiárido**. 2019. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- SUTTON, Mark A. *et al.* Too much of a good thing. **Nature**, v. 472, n. 7342, p. 159-161, 2011.
- TOLEDO, A. M. A. **Evolução espaço-temporal da estrutura da paisagem e sua influência na composição química das águas superficiais dos ribeirões Piracicimir e Cabras (SP)**. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.
- VIEIRA, L. S. **Manual de Ciência do Solo**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1975. p. 46.
- WANG, Q.; OTSUBO, K.; ICHINOSE, T. **Digital map sets for evaluation of land productivity**. Disponível em: <http://www.iscgm.org/html4/pdf/forum2000/DrQinxueWang.pdf>. Acesso em: 12 de mar. de 2019.
- WENTWORTH, C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **Journal of Geology**, [s.l.], v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.
- XIUBIN, He *et al.* Down-scale analysis for water scarcity in response to soil–water conservation on Loess Plateau of China. **Agriculture, ecosystems & environment**, [s.l.], v. 94, n. 3, p. 355-361, 2003.

ZANIN, P. R. **Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica com reservatórios**. 2015. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

ZHANG, G.-H. *et al.* Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-associated nitrogen and phosphorus losses and particle size composition on the Loess Plateau. **Journal of Soil and Water Conservation**, [s.l.], v. 66, n. 3, p. 192-200, 2011.