

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

KENDRA SCHRÖDER DE SOUZA

**MECANISMOS CONDICIONANTES À EROÇÃO NA BORDA DO RESERVATÓRIO
PIRAQUARA I NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

CURITIBA

2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

KENDRA SCHRÖDER DE SOUZA

**MECANISMOS CONDICIONANTES À EROÇÃO NA BORDA DO RESERVATÓRIO
PIRAQUARA I NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adriana Ahrendt Talamini

Co-orientadora: Geóloga Ana Carolina Pires Moreira

CURITIBA

2019

AGRADECIMENTOS

Todo o trabalho aqui descrito não seria possível, nem viável, sem o auxílio e o suporte de pessoas que dispuseram seus conhecimentos e tempo para tornar este projeto realidade.

Primeiramente gostaria de agradecer a Universidade Federal do Paraná (UFPR) por me conceder a oportunidade de cursar Geologia, um ramo do conhecimento tão vasto e cativante. Agradeço também a UFPR pelos técnicos, em especial Daniel Paredes, e a estrutura de laboratórios (Lame e Lab&Sed), sem os quais a pesquisa seria inviável. Sou grata à minha orientadora Adriana A. Talamini que depositou sua confiança na pesquisa e me encorajou sempre a desenvolver um trabalho de qualidade.

A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) foi fundamental para o desenvolvimento da pesquisa. Desde o início os funcionários: Heric, Paulo, Anderson e em especial minha coorientadora Ana Carolina P. Moreira, não mediram esforços para que a pesquisa fosse realizada da melhor maneira, independentemente da situação. Aos amigos que partilharam comigo a vida acadêmica, cada um teve um papel fundamental no meu desenvolvimento como profissional.

Não poderia deixar de mencionar meus familiares, Karin S. Souza, Ângelo Souza, Mark S. Souza e meu fiel escudeiro Filipe R. Filipaki, que sempre me apoiaram e encorajaram a seguir meu sonho de ser geóloga. Sem a base familiar nada é possível. Agradeço profundamente a vocês por todos os momentos de suporte e carinho durante a trajetória da graduação. Ao meu carpinteiro favorito, um agradecimento especial, sem você os ensaios não passariam de meras invenções. Mais uma vez embarcou em minhas loucuras e como sempre não me desapontou. Pai, você é e sempre será meu ídolo.

À vida, sou grata pela oportunidade de trilhar caminhos inesperados, desafiadores, porém imensamente gratificantes.

RESUMO

O reservatório Piraquara I, localizado no município de Piraquara no estado do Paraná, Brasil, região metropolitana de Curitiba e objeto de estudo deste trabalho, é gerenciado pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) e tem como principal função o abastecimento de água para a população local. Perante a importância deste reservatório para a sociedade, o presente trabalho teve como objetivo estudar as relações existentes entre os processos erosivos atuantes nas bordas do reservatório, as características físicas, texturais e geotécnicas dos solos ali presentes, bem como os fatores condicionantes para o desencadeamento da erosão na área de estudo. Para a caracterização geotécnica, foram coletadas tanto amostras deformadas quanto indeformadas nas bordas do reservatório. As primeiras passaram por análises granulométricas, ensaios de limite de *Atterberg* e peso específico dos grãos. Os dados resultantes, juntamente com gráficos confeccionados auxiliaram na determinação das características intrínsecas ao solo. As amostras indeformadas, foram submetidas a ensaios para a determinação do grau de erodibilidade do solo. Com base nos resultados obtidos, mapas foram gerados com a intenção de relacionar as principais condicionantes à erosão e as características geotécnicas dos materiais presentes nas bordas do reservatório. Após a correlação, foram sugeridas medidas mitigatórias e corretivas, com o objetivo de prevenir futuros desenvolvimentos de processos erosivos. As propostas foram baseadas nas características físicas do solo além do padrão de declividade existente nas margens. Por fim, ainda foram propostos estudos futuros que podem contribuir para um maior entendimento dos processos erosivos e assim poder beneficiar e ampliar a vida útil do reservatório Piraquara I.

Palavras-chave: Erosão; Mecanismos condicionantes; Reservatório Piraquara I.

ABSTRACT

The Piraquara I reservoir, located in Piraquara, state of Parana, Brazil, metropolitan region of Curitiba and the object of this study, is managed by the Paraná Sanitation Company (SANEPAR) and its main function is to supply water to the local population. Since the reservoir is important for society, this work aimed to study the relationships between the erosive processes acting on the reservoir edges, physical, textural and geotechnical characteristics from soil, as well as the conditioning factors for triggering erosion. For some deformed soil samples textural and granulometric analyses, as well as grain specific weight and *Atterberg* limit testing have been carried out. The results helped to determine the intrinsic characteristics of the soil. Some undeformed samples were analysed to determine the soil erodibility. Based on the results, maps were generated to correlate the erosion conditioners and the geotechnical characteristics of the materials present in the reservoir edges . After the study in Piraquara I, mitigating measures were proposed with the intention of preventing future developments of erosive processes. The suggestions were based on the physical characteristics of the soil besides the slope pattern existing in the reservoir margins. Finally, further studies have been proposed that may contribute to a better understanding of erosive processes and thus benefit and extend the useful life of the Piraquara I reservoir.

Keywords: Erosion; Conditioning factors; Piraquara I reservoir.

LISTA DE FIGURAS

iv

Figura 1: Localização do reservatório Piraquara I e pontos de afloramento na Região Metropolitana de Curitiba.....	2
Figura 2: Geologia e localização da área em estudo em azul. Modificado de MINEROPAR, 2001.....	6
Figura 3: Divisão em táxons do estado do Paraná e da região do reservatório Piraquara I. Adaptado de Santos et al.,2006.....	8
Figura 4: Modelo Digital de Elevação da região da APA dos reservatórios Piraquara I e II.....	8
Figura 5: Erosão hídrica ou por salpicamento (efeito <i>splash</i>). Fonte: IPT (1999).....	11
Figura 6: Mecanismos de processos erosivos segundo Vilar e Prandi (1993). Fonte: Adaptado de Camapum de carvalho <i>et al</i> , (2006a).....	13
Figura 7: Ilustração do processo de voçorocamento. Fonte: Suertegaray (2004, p.245).....	14
Figura 8: Mecanismos de formação da erosão interna (<i>piping</i>). Adaptado de Cadernizando, (2019).....	15
Figura 9: Processo de erosão por ondas. Adaptado de <i>Encyclopædia Britannica, Inc</i> , (2019).....	16
Figura 10: Fluxograma das etapas e atividades desenvolvidas durante o trabalho.....	21
Figura 11 a) Embarcação cedida pela SANEPAR para realização das campanhas de campo.....	23
Figura 12: Mapa com os pontos descritos no reservatório Piraquara I.....	24
Figura 13: a) Coleta de amostras deformadas. b) Amostra deformada retirada da margem do reservatório Piraquara I.....	24
Figura 14: Amostras de solo utilizadas para a determinação do peso específico dos grãos (γ_s).....	26

v

Figura 15: Parte dos utensílios utilizados no ensaio de determinação do peso específico dos grãos.....	26
Figura 16: Ensaio de determinação do peso específico dos grãos. a) fervura das três amostragens na chapa térmica. b) pesagem do picnômetro após a fervura completo com água destilada. c) amostras resfriando por 15 min em banho com temperatura controlada..	27
Figura 17: Etapa de sedimentação, a) provetas utilizadas para a realização da pipetagem, b) amostras coletadas de acordo com o tempo de sedimentação, c) amostras de fundo utilizadas no peneiramento fino.....	27
Figura 18: Processo de peneiramento fino, a) conjunto de peneiras com os diâmetros especificados, b) conjuntos de amostras após o peneiramento, c) amostras retidas nas peneiras.....	28
Figura 19: Placa porosa e gabarito utilizados para a realização do ensaio de Limite de Plasticidade.....	29
Figura 20: Ensaio de Limite de Liquidez. a) principais materiais utilizados no ensaio, equipamento de casa grande e cinzel. b) execução do ensaio e contagem dos golpes.....	29
Figura 21: Coleta de amostras indeformadas.....	30
Figura 22: Coleta de amostra de água para a análise de turbidez. a) Coleta de amostras na superfície da lâmina da água. b) armazenamento das amostras em recipientes próprios e resfriados.....	30
Figura 23: Amostras indeformadas utilizadas para a realização dos ensaios de erodibilidade.....	31
Figura 24: Equipamento utilizado no ensaio de absorção de água, confeccionado pela autora.....	32
Figura 25: Final do ensaio de absorção de água. Em vermelho é indicado o nível de água após a saturação da amostra indeformada.....	33

Figura 26: Realização do ensaio de Perda de Massa por Imersão. a) Amostras indeformadas utilizadas no ensaio de perda de massa por imersão. b) Amostras indeformadas após 24h imersas	34
Figura 27: Ponto com presença de variação textural. a) Disposição dos horizontes no ponto 2. b) Disposição dos horizontes no ponto 3. c) Disposição dos horizontes no ponto 4.....	36
Figura 28: Mapa de declividade existente na região da APA do Piraquara.....	38
Figura 29: Mapa de áreas propícias as erosões lineares e por onda no reservatório Piraquara I.....	40
Figura 30: Uso e Ocupação do Solo na APP do reservatório PI e PII.....	41
Figura 31: Gráficos dos resultados do ensaio granulométrico realizado com a técnica de pipetagem em cada amostra de solo.....	44
Figura 32: Gráficos dos resultados do ensaio de absorção de água realizado nas amostras indeformadas.....	47
Figura 33: Gráfico do resultado do parâmetro de erodibilidade em cada ponto amostrado no reservatório Piraquara I.....	49
Figura 34: Área desmatada para pastagem inserida na área de proteção permanente (APP).....	51
Figura 35: Processos erosivo atuantes em regiões com vegetação degradada.....	51
Figura 36: Locais com presença de processos erosivos nas bordas do reservatório Piraquara I, a) Erosão linear, com presença de sulcos e ravinas na superfície, b) Movimento gravitacional de massa associado a erosão por efeito de ondas, c) Processo erosivo na borda do reservatório e presença de <i>piping</i>	52
Figura 37: Processos erosivos atuantes nas porções inferiores das bordas do reservatório Piraquara I, a) erosão interna atuante na poção inferior na margem descrito no ponto 1, no nível da lâmina da água b) erosão interna atuante na poção inferior na margem descrito no ponto 4.....	53

Figura 38: Locais com presença de vegetação e diferentes respostas aos processos erosivos nas bordas do reservatório Piraquara I, a) presença de vegetação e processos erosivos, ponto 5 b) movimento gravitacional de massa associado a erosão na borda de reservatório, ponto 5 c) local com vegetação preservada e sem presença de processos erosivos, ponto cachoeira.	54
Figura 39: Extravasamento da água do reservatório Piraquara I pelo vertedouro identificada na segunda e terceira etapas de campo.....	55
Figura 40: Variação visual e textural de alguns pontos observados em campo a) Ponto 2 com solo marrom amarelado. b) Ponto 3 com solo marrom amarelado. c)Feições reliquiares, veios de quartzo e bandamentos preservados no Ponto 4.	56
Figura 41: Mapa de declividade existente na região da APP do reservatório Piraquara I.....	58
Figura 42: Borda do reservatório Piraquara I com possibilidade de aplicação de métodos de bioengenharia para contenção de processos erosivos.	60
Figura 43: Imagens de utilização de biomantas. a) Local antes da aplicação de biomantas. b) Local após a aplicação de biomantas. Fonte: LAN - Geotecnia e Fundação.....	60
Figura 44: Borda do reservatório Piraquara I com possibilidade de aplicação de paliçada como métodos de contenção aos processos erosivos. a) Ponto 1 com alta declividade na margem. b) Ponto 5 com deslizamento acarretado pela erosão por ondas. c) Ponto 3 com alta declividade da margem e erosão por ondas gerando solapamento.....	61
Figura 45: Utilização de paliçada para locais com alta declividade. Fonte: Vertical Green do Brasil.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Suscetibilidade à erosão pela textura dos solos (TRILLO, 1999).....	20
Tabela 2: Características e disposição das amostras em cada ponto.....	36
Tabela 3: Dados da caracterização dos pontos nas etapas de campo.....	37
Tabela 4: Dados descritivos dos processos erosivos atuantes no reservatório Piraquara I..	39
Tabela 5: Numeração de amostras deformadas e indeformadas coletadas em campo.....	42
Tabela 6: Dados resultantes da unidade gravimétrica e da análise granulométrica das amostras.....	42
Tabela 7: Resultados do ensaio de Limite de Atterberg e Peso específico dos Grãos.....	46
Tabela 8: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão.....	46
Tabela 9: Tabela com índices para a determinação do grau de erodibilidade das amostras indeformadas coletadas na margem do reservatório.....	49
Tabela 10: Variação do parâmetro de turbidez para diferentes pontos no reservatório Piraquara I.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ÁREA DE ESTUDO.....	2
1.2. OBJETIVO	3
1.2.1 Objetivos Específicos.....	3
2. CONTEXTUALIZAÇÃO	4
3. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO	5
3.1. GEOLOGIA	5
3.2. GEOMORFOLOGIA	7
4. REFERENCIAL TEÓRICO	9
4.1. EROÇÃO DOS SOLOS	9
4.1.1 Erosão Hídrica	11
4.1.3 Erosão Linear	12
4.1.4 Voçorocamento.....	14
4.1.5 Erosão Interna	15
4.1.6 Erosão por Ondas.....	15
4.2. FATORES CONDICIONANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS	16
4.2.1 Clima	17
4.2.2 Relevo	17
4.2.3 Litologia	18
4.2.4 Cobertura Vegetal.....	18
4.2.5 Pedologia.....	19
5. MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1. PRIMEIRA ETAPA	22
5.2. SEGUNDA ETAPA.....	23
5.3. TERCEIRA ETAPA	23
5.4. QUARTA ETAPA.....	29
5.5. QUINTA ETAPA	31
5.6. SEXTA ETAPA.....	35
6. RESULTADOS	35
7. DISCUSSÕES E RECOMENDAÇÕES	50
7.1. VEGETAÇÃO	50
7.2. NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO.....	54

7.3. VARIAÇÃO TEXTURAL	55
7.4. DECLIVIDADE	57
7.5. TAXA DE SEDIMENTAÇÃO COMO CONSEQUÊNCIA DA EROSÃO	58
7.6. MEDIDAS CORRETIVAS E MITIGATÓRIAS	59
7.7. ESTUDOS FUTUROS.....	62
8. CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

Os reservatórios de água possuem diferentes finalidades, sejam elas econômicas, como é o caso das hidroelétricas, captação de água para o consumo humano, de lazer ou para o controle de vazões em períodos chuvosos. Perante tantas finalidades, a relação entre os reservatórios e a sociedade é ampla. Assim, as questões ambientais devem fazer parte da gestão de reservatórios desde o planejamento até o fim de sua vida útil.

O Brasil enfrenta, há muito tempo, o problema de assoreamento em reservatórios. Muitos se encontram parcialmente ou totalmente assoreados (CARVALHO, N. DE O., FILIZOLA JUNIOR N. P., SANTOS P.M.C 2000), acarretando na redução de sua vida útil, diminuição da lâmina d'água e principalmente na redução da quantidade do recurso hídrico disponível à população.

A erosão é o principal desencadeador dos problemas acima citados. Além de contribuir para a produção de sedimentos que serão transportados e sedimentados em locais indesejáveis, causam prejuízos ao meio ambiente e obras de engenharia. Parte do volume de sedimentos, resultantes da erosão, que chega ao reservatório fica em suspensão, elevando a turbidez e diminuindo a qualidade da água. A outra parte deposita-se no fundo do reservatório causando o seu assoreamento e consequentemente diminuindo o seu volume útil.

A operação de um reservatório pode provocar desestruturação e perda de solo ao longo das margens devido à variação de umidade da encosta ocasionado pela variação do nível d'água, e ao efeito das ondas causadas por ventos. Além disso, nas bordas, processos erosivos ocorrem devido a escoamentos superficiais e pelo uso indevido das margens pela população local.

Dessa forma, estudos para avaliação de erosões marginais de reservatórios se tornam cada vez mais importantes, bem como a proposta de benfeitorias que possam ser construídas com o objetivo de ampararem ou mitigarem as consequências dos processos erosivos. Para isso, é necessária a execução de diferentes estudos que permitam quantificar ou qualificar a resposta do solo frente a essas condições.

1.1. ÁREA DE ESTUDO

A área objeto de estudo deste trabalho é o reservatório Piraquara I Figura 1. Faz parte dos Mananciais da Serra e está situado na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no município de Piraquara.

Desde o início do século XX as águas dos rios da Serra do Mar são utilizadas para o abastecimento da cidade de Curitiba. Em 1904 foi construída a represa do Carvalho, situada em Piraquara, e em 1908 o sistema de abastecimento chegava a Curitiba (SANEPAR, 2002).

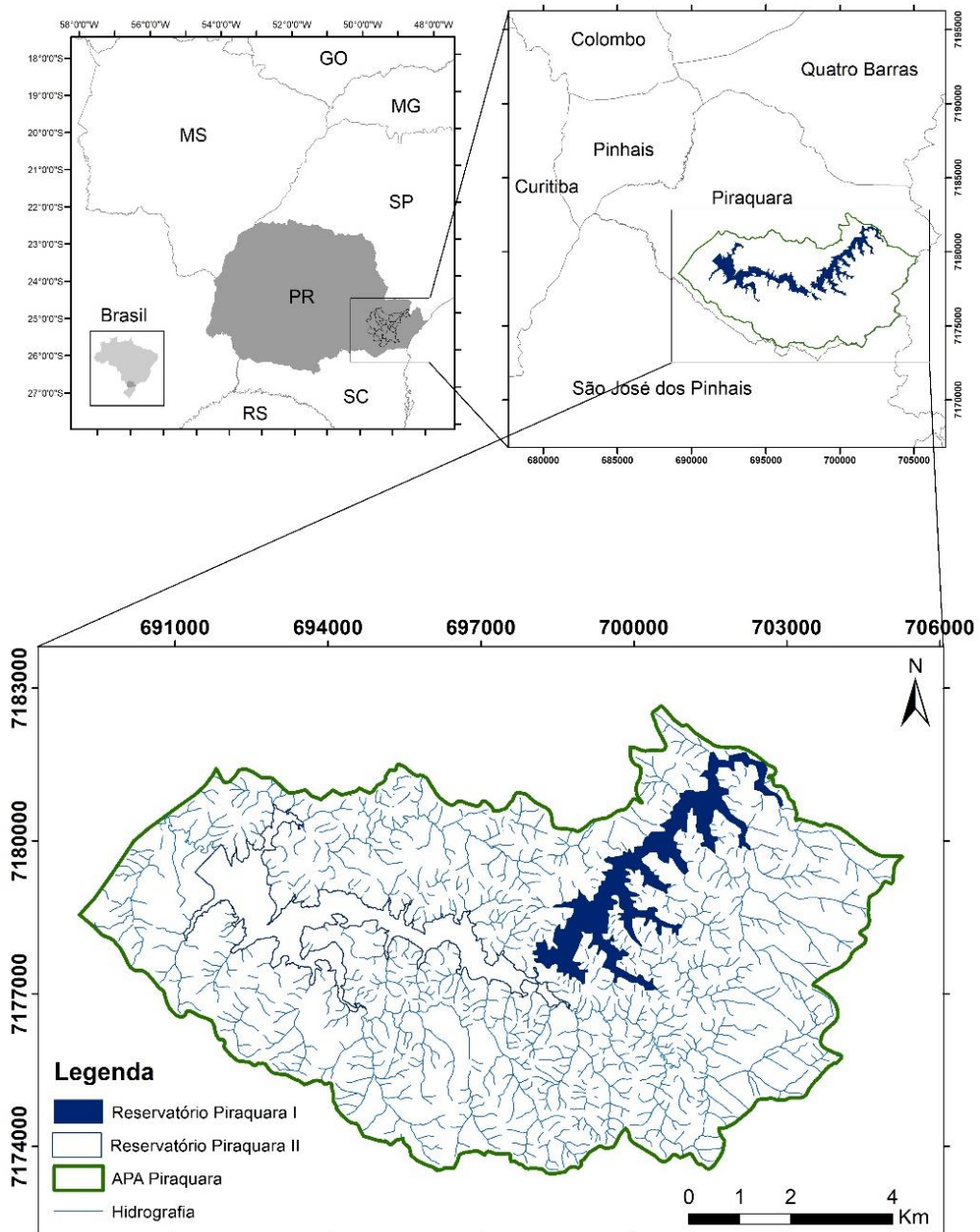


Figura 1: Localização do reservatório Piraquara I na Região Metropolitana de Curitiba.

A Barragem Piraquara I levou dois anos para ser construída, sendo finalizada em 1979. Segundo dados da prefeitura de Piraquara e da SANEPAR é composta por uma barragem de terra de 30 metros de altura, um reservatório com capacidade de 23×10^4 m³ e área inundada de 3,3 km² (SANEPAR, 2002). O rio principal que alimenta o reservatório é o rio Cayuguava. As principais bacias contribuintes do reservatório são: bacias do Cayuguava, do Córrego Jardim, do Rio da Divisa, do Rio Melanço, do Ribeirão do Zero, do Rio Oeste N e Oeste S.

Ao redor do reservatório existe uma Área de Preservação Permanente (APP), com extensão de aproximadamente 8.995 ha. Esta área foi instituída a partir da Lei 12651 de 2012. Já a Área de Proteção Ambiental (APA) foi instituída por meio do Decreto Estadual nº. 1754 de 02 de maio de 1996 e tem como principais funções proteger e conservar o meio ambiente no entorno direto do reservatório.

1.2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo a caracterização dos processos erosivos existentes na margem do reservatório Piraquara I e dos seus mecanismos de ocorrência, como forma de embasar a indicação de medidas corretivas e mitigadoras contra a erosão.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar geotecnicamente os materiais inconsolidados existentes nas bordas do reservatório;
- Identificar, descrever e classificar os processos erosivos existentes;
- Elaborar mapa de suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos da borda do reservatório;
- Analisar as condicionantes ambientais e as dinâmicas envolvidas nos processos erosivos da margem do reservatório;
- Avaliar o efeito da perda de solos na turbidez da água do reservatório.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Mesmo sendo um tema importante para questões ambientais e geotécnicas, e estar relacionado diretamente com a qualidade da água, somente nas últimas décadas o tema a respeito de erosão em borda de reservatório vem sendo estudado de forma mais efetiva. O assoreamento aparece, em sua maioria, como tema principal, da maioria dos trabalhos, deste modo os processos erosivos, que são os geradores da maior parte dos sedimentos que levam ao assoreamento, são muitas vezes negligenciados.

No reservatório Passaúna, situado na RMC, Saunitti (2003) apresentou um estudo comparativo da taxa de assoreamento do reservatório no período de 1990 a 2002. Como resultado, a autora expõe que a principal causa para o aumento na taxa de assoreamento da região no período estudado, foi a expansão da ocupação urbana indevida nas áreas próximas ao reservatório.

Ainda neste reservatório, um projeto que está em desenvolvimento é o Projeto de Novas Parcerias da SANEPAR (NOPA), o qual trata principalmente de sedimentos em reservatórios. Inseridos no projeto NOPA, estudos são feitos com a cooperação de pesquisadores internacionais, que fazem parte do Projeto de Aquisição multidisciplinar de dados no manejo dos recursos hídricos (MuDak – *Multidisciplinary data acquisition as the key for a globally applicable water resource management*). A maioria das pesquisas realizadas pela NOPA tem como objetivo a gestão e conservação da bacia do Rio Passaúna, na RMC.

Guimarães et al., (2008) tratam sobre as áreas potenciais para o assoreamento do reservatório Piraquara I. Em seu trabalho os autores retratam as diferenças de declividade dos rios que abastecem o reservatório, porém o manejo e ocupação do solo equivocados na região é um dos maiores fatores para o assoreamento. Outro estudo relacionado aos reservatórios na RMC, é o trabalho de Godoy (2017) sobre a qualidade de água no reservatório Passaúna. Além dos efluentes indevidos diagnosticados pelo autor, que diminuem a qualidade de água do local, o aumento da carga sólida, devido a erosão das margens, também é maléfico para a qualidade da água.

Não só no Brasil estes estudos vêm sendo feitos, a Austrália possui inúmeros casos com problemas relacionados a erosão. Chanson (1998) compila dados de vários reservatórios australianos que apresentam taxas de assoreamento

preocupantes. Para o autor, problemas como a má caracterização textural do solo e a falta de práticas para conter a erosão nas margens são os principais fatores que levaram os reservatórios a chegarem na situação atual.

Corroborando com Chanson (1998), é de extrema importância entender os conceitos de erosão, suscetibilidade, processos que desencadeiam este evento e seus produtos. Estas concepções são importantes como embasamento científico para análises de dados provenientes de ensaios específicos. Para isso os trabalhos como os de Rubio (2014); Carvalho N. de O., (1991) e Carvalho et al., (2000) são relevantes para o entendimento do comportamento das erosões de borda em reservatórios. Nestes trabalhos os autores abordam sobre a importância de diagnosticar as áreas mais suscetíveis a erosão, do controle dos locais onde os sedimentos se depositam, além de pesquisas relacionadas ao assoreamento de reservatórios.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

Os aspectos geológicos e geomorfológicos de uma região estão intimamente relacionados com as características físicas dos relevos. Visto isso, a busca pelo detalhamento a respeito destes fatores pode contribuir para um melhor entendimento de como estão associados aos processos erosivos e aos seus mecanismos de desencadeamento.

3.1. GEOLOGIA

O reservatório Piraquara I está em contato direto com três porções litológicas distintas. A de maior extensão é composta pelo Domínio Curitiba, seguido pelo corpo granítico Anhangava, e finalizados por sedimentos de depósitos fluviais (MINEROPAR, 2001). Esta região faz parte do Escudo Paranaense, cuja longa evolução geológica se inicia no Arqueano e no Proterozoico, envolvendo diversos eventos tectônicos e magmáticos. Durante este período foram formadas bacias preenchidas por rochas vulcânicas e sedimentares Figura 2.

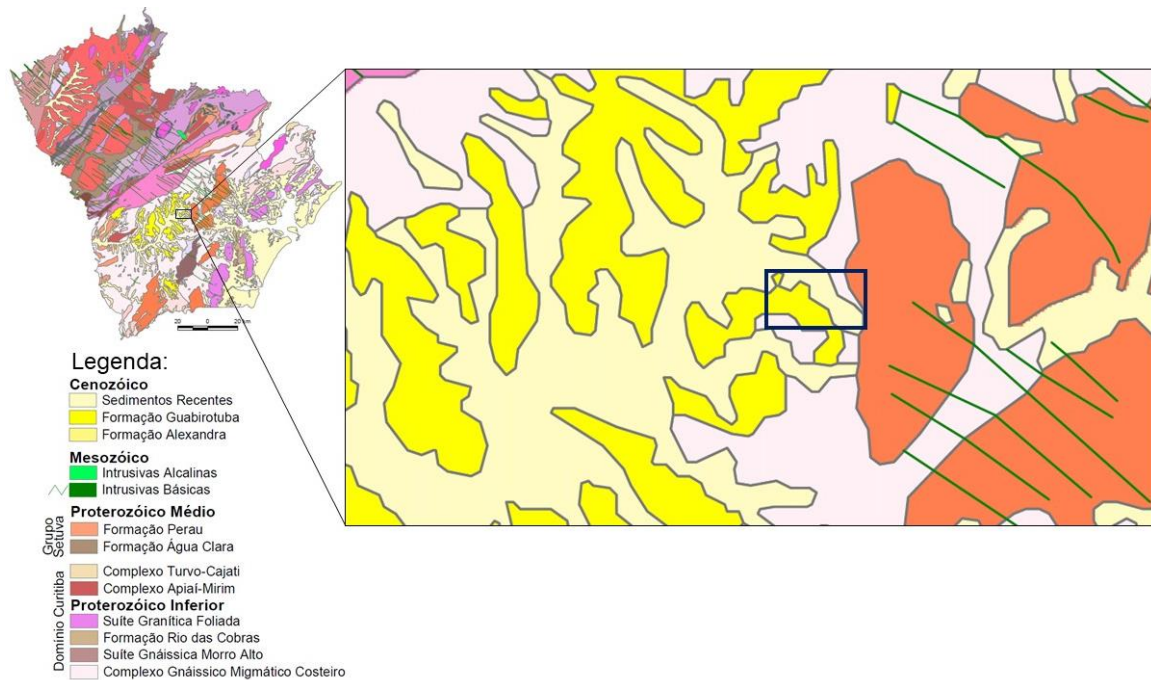


Figura 2: Geologia e localização da área em estudo em azul. Modificado de MINEROPAR, 2001.

O Domínio Curitiba foi formado durante o Proterozoico, entre 2,1 bilhões e 580 milhões de anos. É composto pelas rochas gnáissicas e migmatíticas, associadas a anfibolitos, gnaisses graníticos, núcleos de gnaisses granulíticos e rochas máfica-ultramáfica toleíticas (MINEROPAR, 2001). O principal padrão estrutural presente na área é a foliação NE-SW, a qual é marcada pelo achatamento e estiramento dos minerais.

No final do Proterozoico e início do Paleozoico, ocorreu um intenso evento magmático que permeou a área do escudo paranaense como um todo. Este evento gerou 42 corpos graníticos com dimensões variadas e a grande maioria apresenta um forte controle tectônico de direção NE. Além das intrusões graníticas, ocorreram intrusões de rochas básicas e alcalinas, relacionadas com os processos tectônicos associados aos eventos magmáticos mesozoicos da Bacia do Paraná (MINEROPAR, 2001).

A história das intrusões graníticas no escudo paranaense pode ser subdividida em três grupos, pré-colisional, tardi a pós-colisional e a fase pós-colisional. Fazem parte deste último episódio os granitos Graciosa, Marumbi, Morro Redondo, Francisco Simas, Joaquim Murtinho, Carambeí e Anhangava, este último faz contato com a área de estudo. Diques de diabásio mesozoicos são descritos na área, estes

corpos possuem direção preferencial NW-SE e são associados à estrutura do Arco de Ponta Grossa.

O último grupo em contato com o reservatório Piraquara I é constituído pela formação Guabirota e os sedimentos inconsolidados de depósito fluvial. A Formação Guabirota ocorre nas regiões de Curitiba e Tijucas do Sul, depositada após sucessivas fases erosivas que desenvolveram a superfície do Alto Iguaçu. Já os sedimentos inconsolidados são originados por processos hidráulico-deposicionais, fluvial no interior do continente, condicionado às calhas de drenagem dos rios e planícies de inundação (MINEROPAR, 2001).

3.2. GEOMORFOLOGIA

A cartografia geomorfológica é um importante instrumento na representação do relevo da superfície terrestre, além de ser um dos principais métodos para o estudo e pesquisa em geomorfologia, bem como para o planejamento ambiental (ROSS, 1990).

Segundo o mapeamento geomorfológico do estado do Paraná realizado por Santos et al., (2006) na escala de 1:250.000, o estado foi subdividido em três grandes grupos denominados Táxon. De forma hierárquica, a área em estudo faz parte do Cinturão Orogênico do Atlântico (1º táxon), seguindo pelo Primeiro Planalto Paranaense (2º táxon) e por fim, o Planalto do Alto Iguaçu e o Planalto de Curitiba (3º táxon), Figura 3. De acordo com os autores, a região onde o reservatório está situado apresenta variações nas classes de vulnerabilidade geoambiental. Segundo a pesquisa, o Planalto Alto Iguaçu possui baixa vulnerabilidade, em contrapartida, o Planalto de Curitiba é descrito como média vulnerabilidade. Já as planícies fluviais, que estão em contato com o reservatório Piraquara I apresentam alta vulnerabilidade geoambiental.

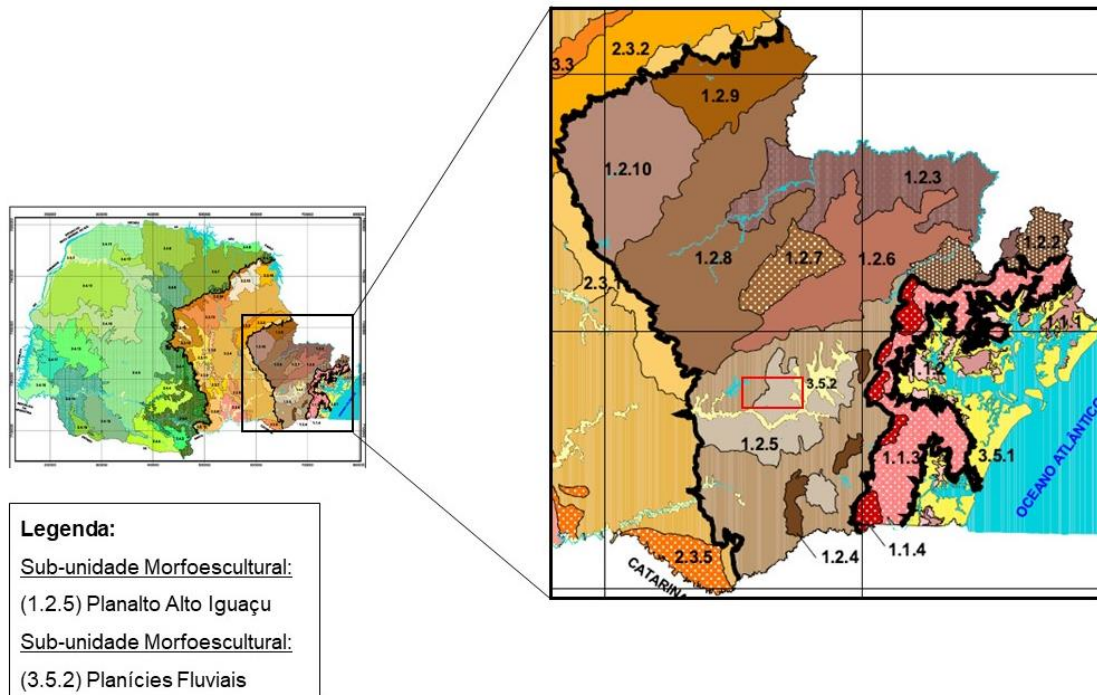


Figura 3: Divisão em táxons do estado do Paraná e da região do reservatório Piraquara I. (Adaptado de Santos et al., 2006).

Estas características formam uma paisagem suavemente ondulada com planícies e várzeas intercaladas, constituídas por sedimentos coluvionares recentes. A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) feito para a APA dos reservatórios Piraquara I e Piraquara II, é possível identificar as características geomorfológicas descritas por Santos et al., (2006) Figura 4.

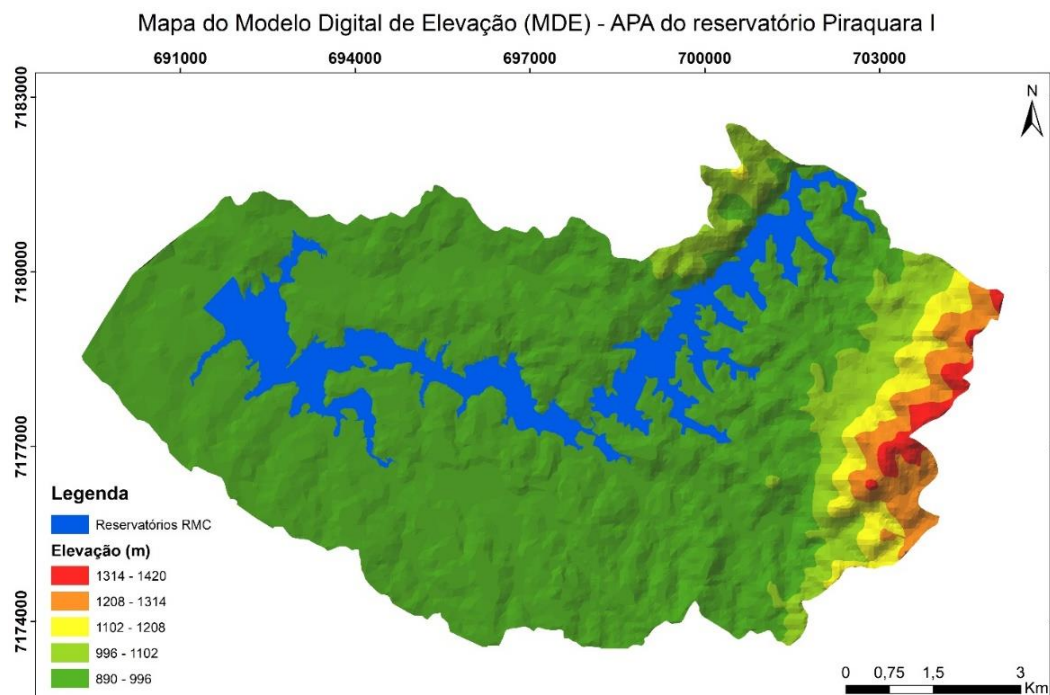


Figura 4: Modelo Digital de Elevação da região da APA dos reservatórios Piraquara I e II.

Na porção leste a sudeste destaca-se a região mais elevada, tendo sua maior altitude variando entre 1314m a 1420m. Em contrapartida, a maior parte da APA apresenta um relevo com elevações baixas, alcançando uma altitude de até 996m. As características morfológicas encontradas na região, sugerem que a porção mais baixa, a qual o reservatório se encontra seja constituído principalmente por colúvios e materiais graníticos oriundos das localidades mais elevadas.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Os agentes erosivos, os fatores condicionantes e os produtos resultantes dos processos, estão englobados em uma esfera maior que permeia o âmbito da erosão. O estudo detalhado destes fatores se faz essencial para um aprofundamento na compreensão de como eles estão atrelados ao sistema em que pertencem.

4.1. EROSÃO DOS SOLOS

O termo erosão possui origem no latim 'erodere'. Na literatura são apresentadas diversas definições, entre elas o significado de corroer ou escavar. De maneira geral, a erosão é caracterizada como sendo o resultado de um grupo de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados ou desgastados e transportados pelos agentes erosivos, como por exemplo, geleiras, ventos, chuvas, rios ou os mares (BASTOS, 1999). Segundo Bertoni & Lombardi Neto, (2010) a erosão é o processo de desprendimento e arraste das partículas do solo causado pela ação da água e do vento.

Apesar de a erosão ser um fenômeno geológico e/ou geomorfológico, que ocorre na superfície da Terra modificando as paisagens, e ser considerado um processo natural, pode estar sujeita a interferências por atividades antrópicas. Estas, muitas vezes causam a aceleração e o agravamento destes mecanismos. Quando se leva em conta a escala de tempo e a natureza em que os processos erosivos ocorrem, é possível caracterizá-los a partir de duas formas:

- Erosão natural ou geológica: é aquela processada normalmente, havendo um equilíbrio entre o material desgastado e o material produzido. Ocorre por meio da ação da água, gelo, vento e microorganismos, acarretando no arranque das partículas e o seu transporte sem intervenção humana, atuando intermitentemente em todos os meios (CAMAPUM de CARVALHO *et al.*, 2006);

- Erosão antrópica ou acelerada: É decorrente da ação humana. Geralmente a ação antrópica altera o mecanismo do processo, causado principalmente pelo aumento de sua intensidade. Os fatores que contribuem para potencializar a erosão acelerada são, dentre outros: urbanização em áreas restritas, impermeabilização do solo, queimadas, desmatamento e agricultura.

Segundo Mendes (2006), é importante destacar que o homem não é um agente direto quando ocorre uma ação antrópica. Sua participação no processo ocorre propiciando as condições favoráveis para que outros agentes, como é o caso da água, atue de modo direto.

Pode-se subdividir o processo erosivo em três eventos contínuos, caracterizados pelo desprendimento das partículas dos agregados do solo, o transporte e a deposição das partículas carregadas para as porções com níveis de base inferiores. Inicialmente, o destacamento e transporte são causados pela ação das gotas de chuvas e pelo escoamento superficial, caracterizando a fase inicial e mais importante da erosão hídrica. Existem também outros processos pelos quais os mecanismos erosivos podem ocorrer, sendo eles o transporte de partículas por fluxos subsuperficiais ou, ainda, por movimentos de massa mais complexos (BASTOS et al., 2001; MENDES, 2006).

No âmbito geotécnico a erosão hídrica apresenta grande ênfase nos estudos. Esta é causada pela ação da água e pode ocorrer de diferentes formas:

- Erosão superficial: neste exemplo destacam-se a erosão hídrica, decorrente da ação da chuva (efeito *splash*), bem como a erosão laminar. Estas estão atreladas a cronologia e intensificação do escoamento e fluxo superficial, gerando sulcos e posteriormente ravinas.
- Erosão linear: desencadeada a partir da intensificação dos demais processos erosivos. Caracterizada por apresentar fenômenos como: solapamentos, escorregamentos, rápida evolução e grande poder destrutivo.
- Erosão interna: comumente definida como um processo de erosão subterrânea (*piping*), relacionada a remoção das partículas na zona não saturada.

Além do tipo do processo deve-se dar enfoque às condições relativas ao meio geológico e ao impacto da chuva ressaltando-se dois aspectos importantes: a erodibilidade do solo e a erosividade da chuva. De acordo com Sales et al., (2017) a erodibilidade pode ser definida como a resistência do solo ao processo erosivo. Isto

inclui suas características primárias, além de fatores secundários, como os ciclos de umedecimento e secagem, bem como a composição da água que interage com o solo. Já a erosividade é definida como a capacidade de ação do agente erosivo (das gotas de chuva, do escoamento superficial e de fluidos agressivos) em causar o destacamento e o transporte do solo.

4.1.1 Erosão Hídrica

A erosão hídrica, também chamada de erosão por salpicamento, ocorre pela ação da chuva e constitui o estágio inicial do processo erosivo Figura 5. Esta desagrega as partículas que compõem o solo para serem transportadas pelo escoamento superficial, e segundo Cooke e Doornkamp (1990), é responsável por até 90% da erosão de solos em circunstâncias de excessiva exposição. O mecanismo inicia-se pelo impacto direto das gotas na superfície do solo. A energia gerada pelas gotas em um solo desprovido de vegetação causa o destacando das partículas, movimentando-as em pequenas distâncias.

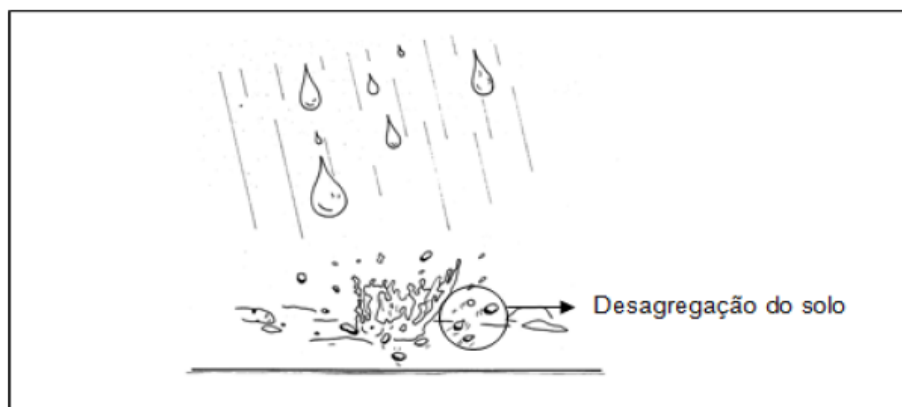


Figura 5: Erosão hídrica ou por salpicamento (efeito *splash*). Fonte: IPT (1999).

No local onde se tem o gotejamento, geram-se poças, as quais irão represar certa quantidade de água. Quando estas estruturas se rompem, tem início o processo de escoamento superficial, inicialmente difuso, mediante a concentração de fluxos em canais (GUERRA & MENDONÇA, 2004; *apud* FERNANDES, 2011). Em ambiente tropicais e subtropicais as chuvas de granizo são recorrentes, o que causa muitas vezes a compactação do solo pelo impacto do granizo.

4.1.2 Erosão Laminar

A erosão laminar inicia a partir do escoamento superficial de forma difusa, geralmente semelhante a uma lâmina. Quando o escoamento é formado por enxurradas com elevada capacidade de arrancar novas partículas, de transportar grandes volumes de material solto e a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração do solo, a erosão é caracterizada como laminar (BASTOS, 1999). Ou seja, é como se uma lâmina de água contínua lavasse por inteiro a superfície do terreno. Segundo Frenrich et al. (1991) pode ser considerada como um dos tipos mais perigosos de erosão, visto que muitas vezes é difícil de ser observada.

Esta erosão ocorre mediante fortes precipitações, quando o solo superficial já está saturado. Assim, ocorrendo um desgaste suave e uniforme da camada superficial em toda a sua extensão, sendo típica de encostas que apresentam poucos obstáculos ao fluxo geral (CARVALHO 2008).

Por vários autores, a erosão laminar é considerada como sendo o primeiro estágio do processo erosivo (entre sulcos), compreendendo um fluxo de certa maneira regular, que é mobilizado ao longo de uma superfície exposta. A concentração de sedimentos e a velocidade das partículas vão aumentando à medida que o fluxo vai percorrendo a encosta, ao mesmo tempo em que o processo erosivo vai se estabelecendo. A partir do momento em que esses fluxos tendem a se concentrar, são formadas linhas de escoamento preferencial, caracterizando a chamada erosão linear.

4.1.3 Erosão Linear

A partir do que se tem na literatura, não existe um ponto definido entre o estágio final da erosão laminar e o início da erosão linear, visto que ambas podem atuar em um mesmo momento, dependendo das características intrínsecas do solo. Em um certo momento, os fluxos tendem a se concentrar, induzindo a erosão linear. A evolução do escoamento superficial acarreta na concentração de sedimentos no interior do fluxo linear, isto faz com que as forças abrasivas entre as partículas sejam elevadas no fundo dos pequenos canais, causando um maior incremento erosivo (GUERRA *et. al*, 2005). De acordo com o desenvolvimento dos sulcos formados pela erosão e seu aprofundamento, as feições chamadas ravinas são formadas Figura 6.

É importante ressaltar que durante a erosão linear, o desprendimento de partículas ocorre principalmente pela energia do fluxo superficial e não pelo impacto das gotas de chuva, como na erosão laminar, em que o gotejamento é relevante. Aparentemente, a erosão linear e ravinas são muito impactantes, porém, em termos de volume de solo erodido, não raramente o volume erodido nas erosões laminares é muito maior, tendo em vista o tamanho da área afetada.

No meio geotécnico, é comum utilizar os termos 'sulco' e 'ravina' como sinônimos, no entanto existe uma distinção básica entre eles. Os sulcos são caracterizados como sendo canais superficiais, de até 10 cm de profundidade, gerados pela concentração do escoamento superficial. Já as ravinas são feições mais profundas, com profundidades superiores a 10 cm e inferiores a 50 cm ou àquela para a qual começa a ocorrer instabilidade dos taludes por deficiência de coesão real e de cimentação (CARVALHO *et al.*, 2001). Porém, ravinas são feições que não chegam a atingir o nível freático, característica esta que as distingue da feição denominada voçoroca.

A erosão linear é considerada um processo complexo e a intensidade com que ela atua na superfície depende principalmente de fatores como: as características da chuva, do solo e da própria superfície (COUTO, 2015).

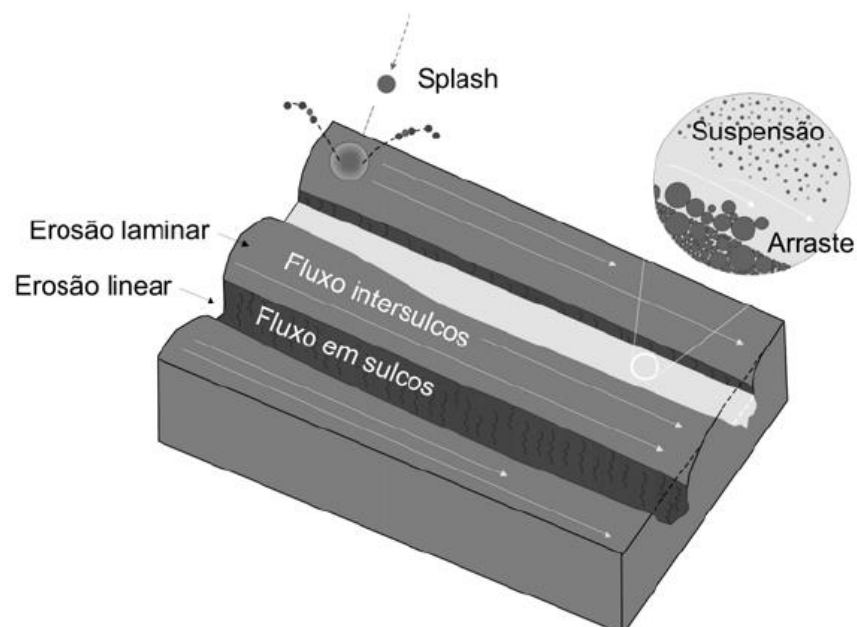


Figura 6: Mecanismos de processos erosivos segundo Vilar e Prandi (1993). Fonte: Adaptado de Camapum de carvalho *et al.*, (2006a).

4.1.4 Voçorocamento

As voçorocas podem ser definidas como ravinas de grande porte, sendo originadas pela grande concentração do fluxo superficial. A ação antrópica, combinada com a ação do fluxo superficial e subterrâneo, podem muitas vezes agravar sua evolução. Em estruturas como a voçoroca, diversos fenômenos podem ocorrer, como é o caso de: erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamento, que se conjugam e conferem a este tipo de erosão rápida evolução e elevado poder destrutivo (BASTOS, 1999).

De acordo com Carvalho et al., (2006), há na literatura algumas controvérsias entre o momento em que uma ravina se torna uma voçoroca. Porém, existe o consenso de que as voçorocas constituem feições que se estendem até o nível freático.

Segundo Bacellar (2000), as voçorocas constituem um fenômeno natural de gênese e evolução complexa, uma vez que tanto os fluxos superficiais e subsuperficiais, entre outros tipos de movimento de massa, podem atuar isolada ou conjuntamente Figura 7. Já Futai et al., (2005) apresentaram um outro modelo para descrever a evolução das voçorocas. Neste, a infiltração de água reduz a sucção do solo e, dependendo da duração e intensidade da precipitação, pode ocorrer um movimento de massa (escorregamento). Deste modo, o material resultante do escorregamento é transportado pela água que surge no pé da voçoroca e também pelo próprio escoamento superficial das chuvas que causaram o escorregamento.

No caso de reservatórios, as voçorocas geralmente ocorrem nas bordas, podendo estar associadas aos fenômenos do *piping*, devido a variações no nível d'água do reservatório (SALES ET AL., 2017).



Figura 7: Ilustração do processo de voçorocamento. Fonte: Suertegaray, D. M. A.; Fujimoto, N. S. V. M. (2004, p.245).

4.1.5 Erosão Interna

A erosão interna ou *piping* é um fenômeno de erosão subterrânea, o arraste de partículas por fluxos concentrados em túneis e dutos se desenvolve geralmente em descontinuidades no interior do solo, de origem biológica, geológica ou pedológica (COELHO NETTO et al.,1999), Figura 8. Este fenômeno gera cavidades que avançam de forma linear e progressiva. Uma característica favorável a esta erosão são os terrenos estratificados, visto que o fluxo se concentra em uma camada específica.

A erosão interna está atrelada a remoção de grandes massas de material ou de pequenos grãos ou agregados, o que provoca solapamentos. Isto tende a aumentar o gradiente hidráulico local e, conseqüentemente, a erosão, gerando depressões topográficas superficiais (DUNNE, 1980; HARGERTY, 1991). Em locais como os reservatórios de água, o *piping* tende a ser condicionado, muitas vezes, pela variação no nível de água seja por causa da sazonalidade ou pelo controle de vazão, o que geralmente ocorre em períodos mais secos.

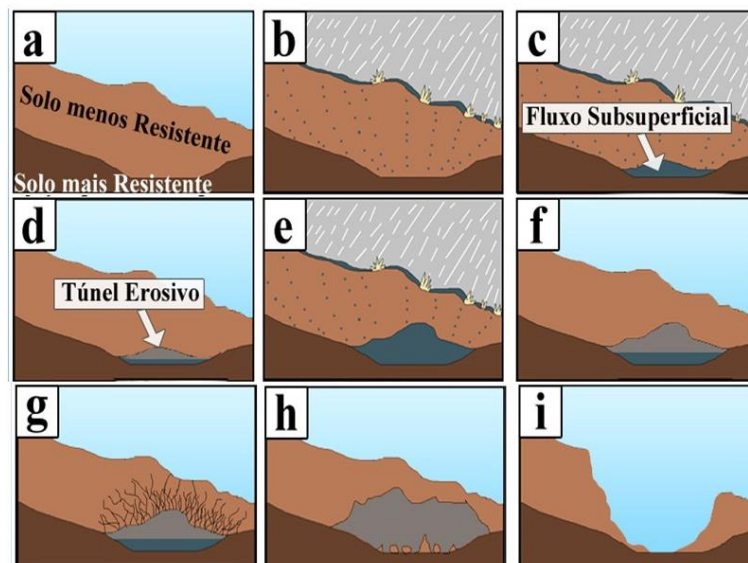


Figura 8: Mecanismos de formação da erosão interna (*piping*). Adaptado de Cadernizando, (2019).

4.1.6 Erosão por Ondas

Uma onda é formada a partir do momento em que o sistema é deslocado de sua posição de equilíbrio e depende das condições como o tipo de perturbação gerada no meio de propagação, material ou vácuo (YOUNG e FREEDMAN 2008).

Para que ocorra a geração de ondas em locais como os reservatórios de água, é necessária uma fonte de energia para geração de movimentos oscilatórios. O vento é considerado um fator condicionante importante, o qual forma uma espécie de pista no sentido da onda, chamada de *fetch*. Assim, inicia-se um movimento oscilatório de forma desorganizada, que ao longo da ação contínua do vento, acarreta em uma forma regular e simétrica, gerando as ondas que arrebentarão nas margens do reservatório, Figura 9.

Além do vento, perturbação na superfície da água como a variações de vazões do leito e tráfego de embarcações surgem também como fatores condicionantes para a quebra do equilíbrio hidráulico, influenciando assim, na erosão das margens (MENEZES, 2016).

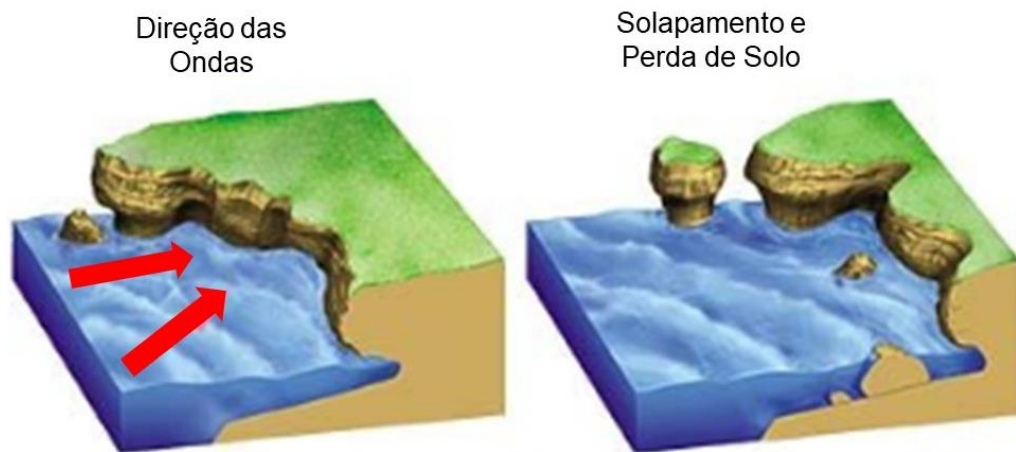


Figura 9: Processo de erosão por ondas. Adaptado de *Encyclopædia Britannica, Inc.*, (2019).

4.2. FATORES CONDICIONANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS

Os processos erosivos são considerados por diversos autores um assunto complexo. Isto porque, em seus mecanismos, existem diversos fatores condicionantes que tornam o sistema erosivo muitas vezes imprevisível. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), Guerra e Mendonça (2004), os fatores que mais influenciam e condicionam os processos erosivos são: clima, relevo, litologia, cobertura vegetal, pedologia e ação antrópica.

4.2.1 Clima

A característica climática de uma região é descrita como variável e irregular, tanto no espaço quanto no tempo (SORRE, 1951). Essa variabilidade e irregularidade acarretam em diferentes produtos expressos na natureza, a partir dos processos físicos e químicos comandados pela dinâmica da atmosfera.

O fator climático possui influência direta nos processos erosivos. Atua desde a desagregação da rocha, seja por intemperismo físico ou químico, até nos mecanismos para a formação dos solos. Os aspectos climáticos influentes no desenvolvimento dos solos, são: a temperatura e a precipitação.

Em climas quentes e úmidos o intemperismo químico é intensificado, o que gera a formação de perfis de intemperismo bem desenvolvidos. Um exemplo de produto encontrado geralmente em ambientes quentes são as voçorocas.

A precipitação é o fator principal do clima, envolvido no desenvolvimento dos processos erosivos. A partir dela, ocorre a remoção de partículas desde o impacto das gotas de chuva na superfície, até a formação do escoamento superficial. Segundo Guerra e Mendonça (2004), o que influencia diretamente na erosão, são fatores como: a intensidade, duração, frequência, particularidades das gotas de chuva e energia cinética da chuva natural. A intensidade é o fator pluviométrico mais importante na erosão. Quanto maior a intensidade, maior as perdas por erosão devido ao destacamento de partículas do solo.

4.2.2 Relevo

A geomorfologia de uma localidade possui correlação direta com os processos erosivos existentes nela, visto que o relevo é considerado fundamental no condicionamento destes processos e interferem na velocidade de escoamento superficial das águas pluviais.

O relevo apresenta duas variáveis de grande relevância: a declividade e o comprimento da encosta. A declividade está atrelada a velocidade do escoamento na superfície e na taxa de infiltração de água no solo. Em locais com presença de encostas mais íngremes, o escoamento tende a ser mais contundente do que a infiltração. Além disso, em locais com declividades acentuadas, o poder erosivo se intensifica, visto que a velocidade do escoamento superficial é maior.

Embora os locais onde se encontram encostas com baixa declividade e terrenos mais planos tendam a apresentar um menor potencial e capacidade

erosiva, dependendo do comprimento de rampa existente na região, é possível que se tenha uma alta intensidade erosiva, desde que o local esteja sujeito à uma grande vazão do escoamento das águas (INFANTI JUNIOR e FORNASARI FILHO, 1998).

4.2.3 Litologia

As características litológicas, relacionadas intimamente com os aspectos geológicos da região, associadas às condições climáticas, condicionam o material a ser mais suscetível aos processos erosivos. Segundo Jesus (2013), em solos residuais, a erosividade está relacionada diretamente com o tipo e as características da rocha pretérita. A ocorrência de voçorocas e ravinas está associada aos solos resultantes da alteração de rochas xistosas, gnáissicas e graníticas. Além disso, quando possuem textura arenosa e micácea, apresentam porosidade e permeabilidade alta, sendo também muito friáveis, favorecendo o desenvolvimento de intenso processo erosivo (INFANTI JUNIOR e FORNASARI FILHO, 1998; JESUS, 2013).

Além disso, a xistosidade e a foliação também favorecem o desencadeamento de erosões. Outros fatores que influenciam no desenvolvimento de processos erosivos são: o grau de fraturamento das rochas, a intensidade do intemperismo e a natureza do material alterado, especialmente no que se refere à textura.

O processo erosivo tende a ser mais expressivo em solos não coesivos, como os compostos principalmente por siltes, areias finas ou argilas dispersivas (LAL, 1990). Outra característica litológica que aumenta a suscetibilidade à erosão é a segregação mineralógica em bandas de composição diferente, como ocorre nos gnaisses e migmatitos, nos quais as bandas com minerais ferromagnesianos são mais alteráveis do que as bandas mais ricas em quartzo.

4.2.4 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal é fator de muita relevância para o estudo de erosões. Pode ser considerada como a defesa natural do solo contra erosão, sendo responsável pelo aumento da macroporosidade da camada superficial, além de proteger os agregados do impacto direto das gotas de água (PELLEGRINI, 2006).

Relacionada a esta correlação de proteção, d'Armada (2012) destaca a importância da mata ciliar em margens de reservatórios.

A cobertura vegetal pode conter os processos erosivos de diferentes formas, sendo os mais importantes:

- Redução do impacto direto das gotas da chuva com o substrato (diminuição do efeito *splash*);
- Dispersão da água por meio da intercessão da vegetação, assim a água evapora antes de atingir o solo;
- Presença de raízes aumenta a capacidade de infiltração de água no solo, por meio dos canais formados a partir do enraizamento;
- Presença de matéria orgânica melhora a estrutura do solo, assim a capacidade de retenção de água aumenta;
- A vegetação em abundância diminui o atrito da água com a superfície, diminuindo assim a velocidade e o poder erosivo do escoamento superficial.

4.2.5 Pedologia

O solo de uma região é considerado um fator crítico às condicionantes dos processos erosivos, visto que correlaciona diversas propriedades intrínsecas que irão determinar a velocidade de infiltração, a resistência aos efeitos da erosão hídrica seja por meio do impacto das gotas de chuva, escoamento superficial (laminar ou linear), ou pela erosão interna (*piping*).

Estudos apontam que a textura (tamanho dos grãos) é um dos fatores mais relevantes na magnitude dos efeitos erosivos sobre um solo. Sendo assim, Llopis Trillo (1999) propôs uma tabela com um sistema hierárquico destes efeitos em função da textura dos solos Tabela 1, baseado no Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Tabela 1: Suscetibilidade à erosão pela textura dos solos (LLOPIS TRILLO, 1999).

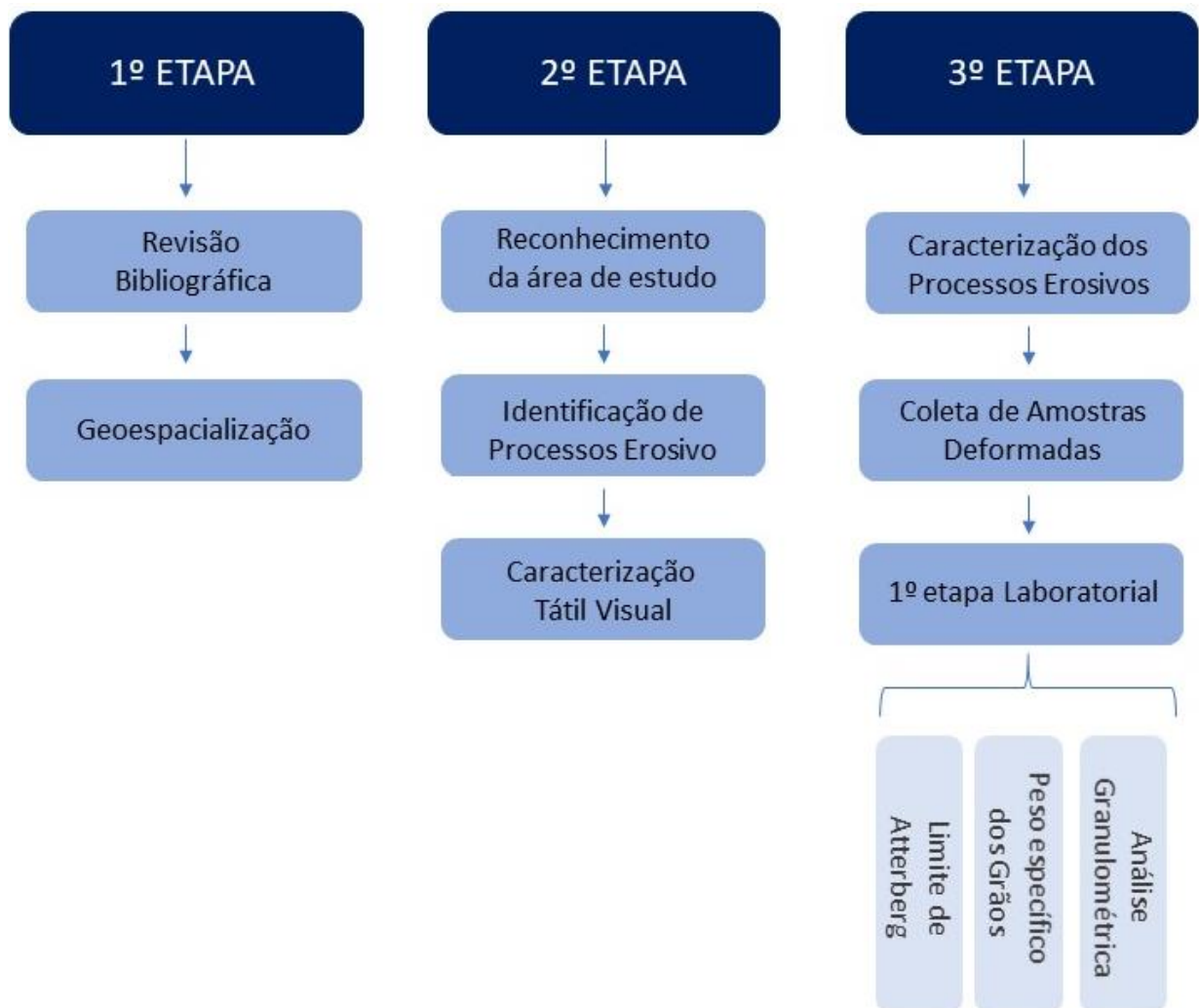
Símbolo	Descrição do Solo - Classificação Unificada	Erodibilidade
GW	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia bem graduados, com poucos ou sem finos.	Menos Erodível  Mais Erodível
GP	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia mal graduados, com poucos ou sem finos.	
SW	Areias e areis pedregulhosas bem graduadas, com pouco ou sem finos.	
GM	Cascalho siltoso, mistura de cascalho e areia, areia e silte.	
CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada, argilas gordas.	
CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa ou média, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.	
OL	Siltes orgânicos, siltes e argilas orgânicos de plasticidade baixa.	
MH	Siltes inorgânicos, solos arenosos finos ou siltosos micáceos e diatomáceos, solos elásticos.	
SC	Areias argilosas.	
SM	Areias siltosas	
ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, pó-de-pedra, areias finas siltosas ou argilosas e siltes argilosos pouco plásticos.	

4.2.6 Ação Antrópica

As atividades antrópicas tendem a potencializar os processos erosivos. O aumento da erosividade da água e a exposição do solo são apenas alguns dos efeitos causados pela ação do homem que auxilia no aumento da erosão, conseqüentemente a vulnerabilidade e a erodibilidade de um local aumenta progressivamente. Atividades como o desmatamento, queimadas, impermeabilização com a pavimentação de vias, ocupação do solo sem implantação de infraestrutura adequada, lançamento de resíduos sem planejamento prévio, causam modificações na topografia, alterações hidrológicas, destruição de ecossistemas e outros inúmeros efeitos que contribuem para a intensificação dos processos erosivos (COUTO, 2015).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os processos erosivos estão intrinsecamente relacionados às características físicas e químicas das rochas presentes no substrato e dos solos que recobrem uma região. Além disso, as relações entre os fatores condicionantes e à erosão são de extrema importância para o entendimento da dinâmica erosiva. Visto isso, propôs-se nesse trabalho uma metodologia de estudo focada na caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados existentes nas margens do reservatório Piraquara I, utilizando-se para isso as seis etapas apresentadas no fluxograma da Figura 10.



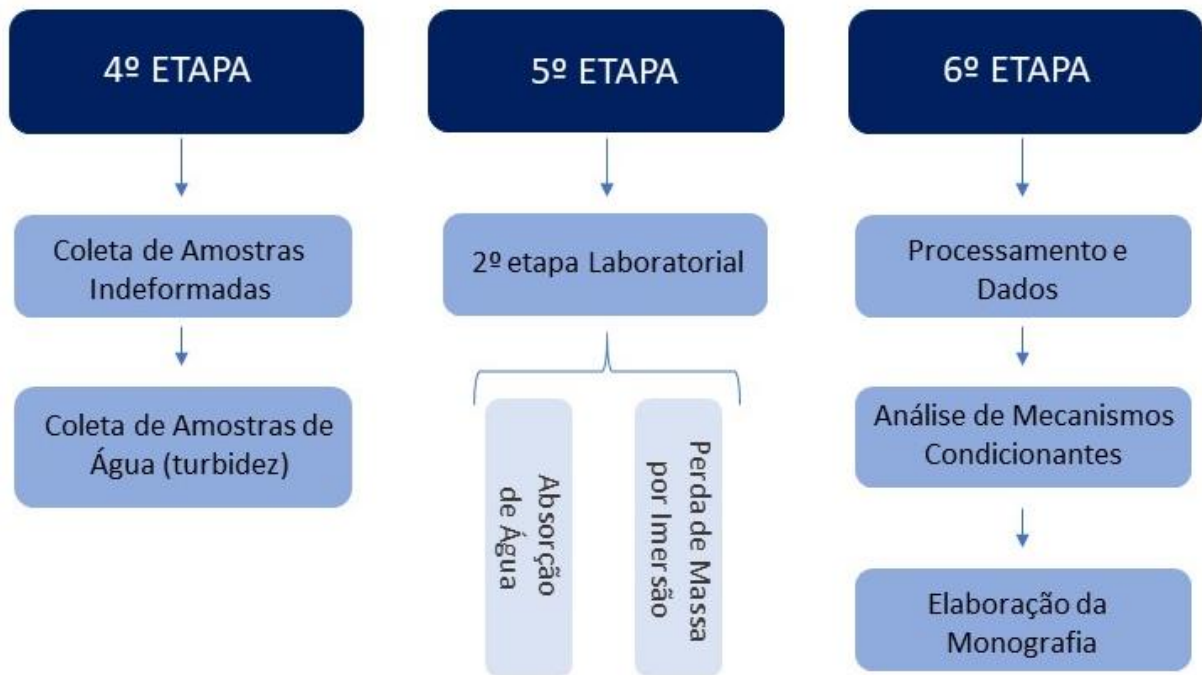


Figura 10: Fluxograma das etapas e atividades desenvolvidas durante o trabalho.

5.1. PRIMEIRA ETAPA

Esta etapa realizada no trabalho foi constituída pela revisão bibliográfica e fundamentação dos conceitos utilizados ao longo da pesquisa. Esta parte teve como objetivo o entendimento teórico para a aplicação correta dos fatores condicionantes às erosões existentes no local de estudo. Além do referencial teórico, foi realizada neste estágio a geoespacialização do reservatório, cujo objetivo foi a confecção de mapas a partir do sensoriamento remoto para a localização da área de estudo. Para isso, foi utilizada a folha topográfica (SG-22-X-D), obtida no *site* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para a realização de mapas topográficos. Além disso, foram utilizadas imagens de satélites a partir do Pro (GOOGLE 2019) e o aplicativo *Avenza Maps* no mapeamento do reservatório. O software ArcMap® 10.6.1 (ESRI 2019) foi utilizado para a confecção dos mapas do trabalho. Todos os *shapes* utilizados neste software foram disponibilizados pela SANEPAR.

5.2. SEGUNDA ETAPA

A segunda etapa consistiu na primeira campanha de campo, ocorrida no primeiro semestre de 2019 e teve como principais atividades:

1. Reconhecimento da área do reservatório;
2. Definição dos pontos com processos erosivos mais expressivos;
3. Caracterização preliminar dos processos erosivos existentes.

Feito o reconhecimento e a definição da variação dos processos erosivos, foram definidos os pontos que seriam estudados durante a pesquisa. Em todas as etapas de campo foi utilizada a embarcação cedida pela SANEPAR Figura 11.



Figura 11: Embarcação cedida pela SANEPAR para realização das campanhas de campo.

5.3. TERCEIRA ETAPA

A terceira etapa compreendeu a segunda campanha de campo ocorrida no segundo semestre de 2019 e pelos primeiros ensaios laboratoriais. Esta etapa teve como principais atividades:

1. Descrição tátil visual dos solos nos pontos de estudo;
2. Caracterização dos processos erosivos atuantes nas margens;
3. Identificação de possíveis condicionantes aos processos erosivos;
4. Coleta de amostras deformadas;
5. Primeira etapa laboratorial;

Os pontos analisados neste trabalho foram espacializados no reservatório da forma mais abrangente possível, com o intuito de coletar dados de vários pontos diferentes, Figura 12.

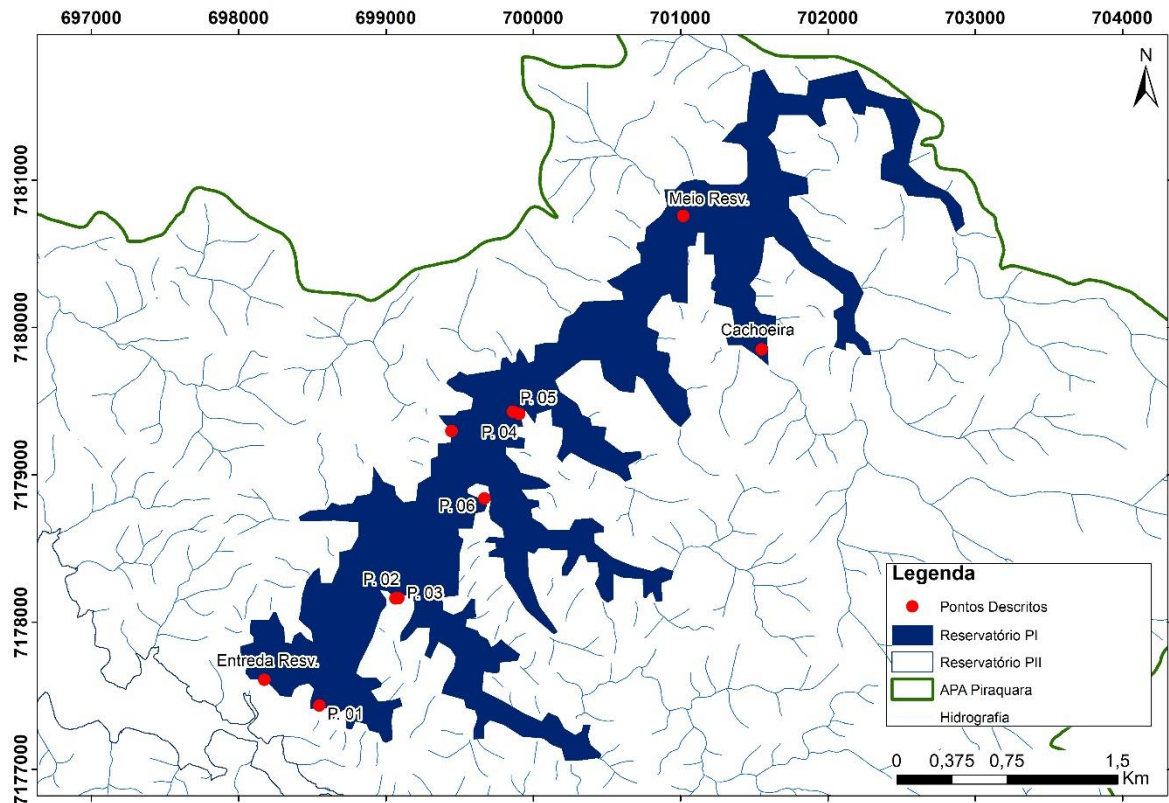


Figura 12: Mapa com os pontos descritos no reservatório Piraquara I.

Para a coleta de amostras deformadas foi seguida a norma ABNT-NBR 9604/86, a qual orienta o manejo das amostras, bem como critérios exigíveis para a retirada do material, para que estas não prejudicassem os ensaios e o processamento dos dados posteriores Figura 13 a e b.



Figura 13: a) Coleta de amostras deformadas. b) Amostra deformada retirada da margem do reservatório Piraquara I.

Segundo a NBR 9604/2016, a amostra é retirada por meio de escavação, implicando assim na destruição de sua estrutura e na alteração de suas condições naturais de compactidade e consistência. Em cada ponto foi coletado cerca de dois quilos de amostra, os quais foram devidamente identificados e armazenados para serem utilizados nos ensaios laboratoriais.

A partir da coleta das amostras deformadas, foram realizados cinco ensaios laboratoriais no Laboratório de Materiais e Estruturas (Lame) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Os ensaios realizados foram:

- Determinação da Umidade Gravimétrica do Material (NBR 6.457/2016)
- Determinação do Peso Específico Real dos Grãos (DNER-ME 093/94);
- Análise Granulométrica (NBR 7181/2018);
- Limite de Plasticidade (NBR 7180/2016), e;
- Limite de Liquidez (NBR 6459/2017).

Estas análises tiveram como objetivo a caracterização geotécnica básica das amostras. Para realizar a preparação do material para os ensaios, foi seguida a norma (NBR 6.457/2016), a qual regulamenta as etapas de secagem e homogeneização das amostras. Os ensaios de caracterização seguiram estritamente as normas citadas acima, portanto neste trabalho não será apresentado o detalhamento de sua execução.

Determinação da Umidade Gravimétrica

Este ensaio tem como objetivo obter a umidade da amostra do solo em seu ambiente original. A umidade gravimétrica não possui uma aplicabilidade direta na caracterização geotécnica, porém é utilizada como base para outros ensaios.

Determinação do Peso Específico Real dos Grãos

Este ensaio tem como objetivo determinar o peso específico real dos grãos constituintes da amostra. Para a obtenção de um resultado confiável, foram realizadas três amostragens para cada solo coletado, como mostra a Figura 14. Para a realização do ensaio utiliza-se: picnômetro, termômetro, chama térmica, balança de precisão, recipiente para banho e funil Figura 15 e 16a, b e c.



Figura 14: Amostras de solo utilizadas para a determinação do peso específico dos grãos (γ_s).



Figura 15: Parte dos utensílios utilizados no ensaio de determinação do peso específico dos grãos.



Figura 16: Ensaio de determinação do peso específico dos grãos. a) fervura das três amostragens na chapa térmica. b) pesagem do picnômetro após a fervura completo com água destilada. c) amostras resfriando por 15 min em banho com temperatura controlada.

Análise Granulométrica

Esta análise tem como função determinar as características granulométricas das amostras previamente coletadas. Este ensaio é subdividido em etapas de peneiramento grosso, sedimentação, Figura 17 a, b e c, e peneiramento fino, Figura 18 a, b e c. A partir destas etapas foram confeccionados gráficos, chamados de curva cumulativa, os quais retratam a porcentagem de cada faixa granulométrica existente no material estudado.

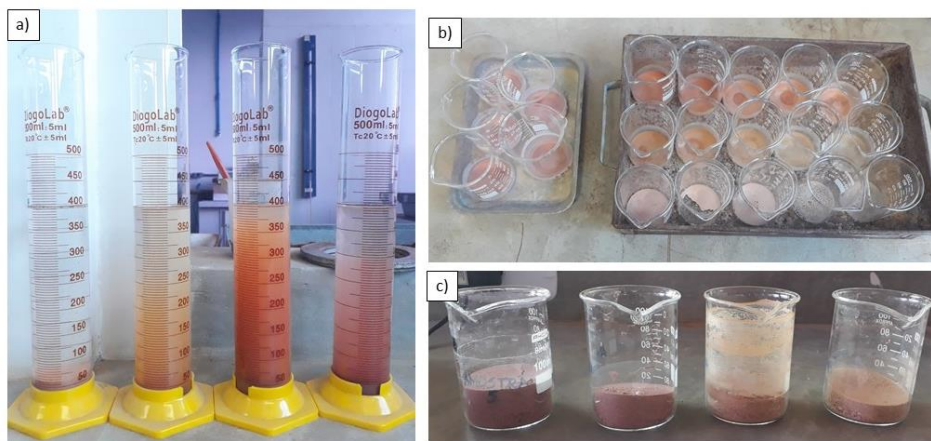


Figura 17: Etapa de sedimentação, a) provetas utilizadas para a realização da pipetagem, b) amostras coletadas de acordo com o tempo de sedimentação, c) amostras de fundo utilizadas no peneiramento fino.



Figura 18: Processo de peneiramento fino, a) conjunto de peneiras com os diâmetros especificados, b) conjuntos de amostras após o peneiramento, c) amostras retidas nas peneiras.

Ensaios de Limite de Atterberg

A partir dos limites de *Atterberg*, foram realizados dois ensaios que auxiliaram na caracterização das amostras em estudo. Foram eles: Limite de Plasticidade (LP), no qual foi seguida a norma NBR 7180 e o Limite de Liquidez (LL), baseado na norma de execução NBR 6459. Ambos os ensaios possuem a finalidade de determinar os limites de consistência do solo, frente a um crescente teor de umidade. Para a realização do ensaio de LP, utilizou-se uma placa porosa e gabarito, Figura 19 e o aparelho de Casagrande, juntamente com o cinzel para a realização do ensaio de LL, Figura 20 a e b. Os resultados desta caracterização são plotados em um gráfico, o qual relaciona o teor de umidade da amostra com o número de golpes efetuados no ensaio.



Figura 19: Placa porosa e gabarito utilizados para a realização do ensaio de Limite de Plasticidade.

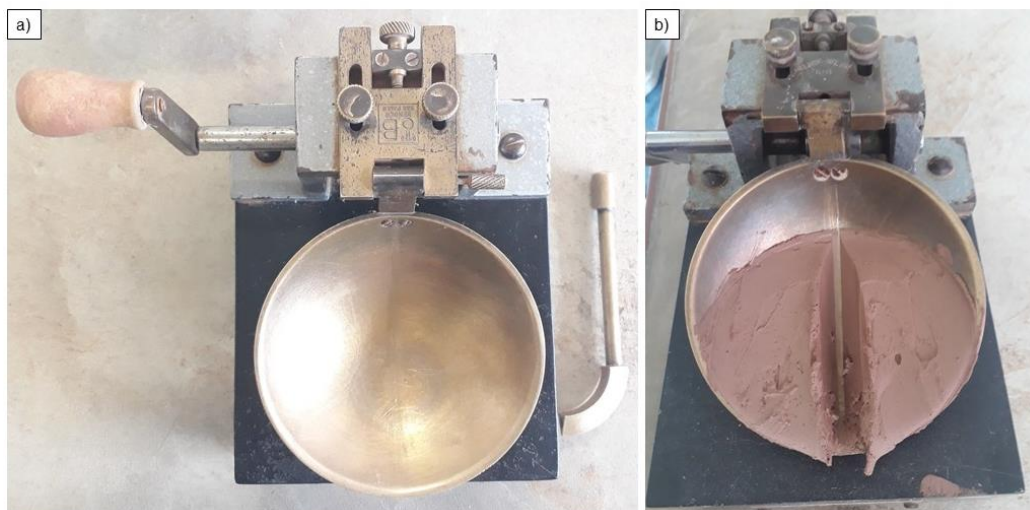


Figura 20: Ensaio de Limite de Liquidez. a) principais materiais utilizados no ensaio, equipamento de casa grande e cinzel. b) execução do ensaio e contagem dos golpes.

5.4. QUARTA ETAPA

Após o término da caracterização geotécnica básica das amostras, iniciou-se a quarta etapa do trabalho, na qual foi realizada a terceira campanha de campo, ocorrida no segundo semestre de 2019 e teve como principais atividades:

1. Coletar amostras indeformadas das margens do reservatório;
2. Determinação de parâmetros que influenciam na qualidade da água.

Para a coleta de amostras também foi obedecida a norma NBR 9604/86 da ABNT. Entretanto, diferentemente da coleta anterior, foram utilizados recipientes padronizados e identificados próprios para a coleta. As amostras indeformadas

possibilitam o estudo quanto à estrutura, teor de umidade do solo, textura e composição mineral, além de permitirem determinar as características físicas do solo *in situ* Figura 21.



Figura 21: Coleta de amostras indeformadas.

O parâmetro a respeito da qualidade da água quantificado neste trabalho foi a turbidez. Para a obtenção deste parâmetro foi utilizada a técnica de coleta de amostra de água na superfície da lâmina de água Figura 22a, sendo utilizados frascos próprios e armazenagem em local resfriado, Figura 22b.

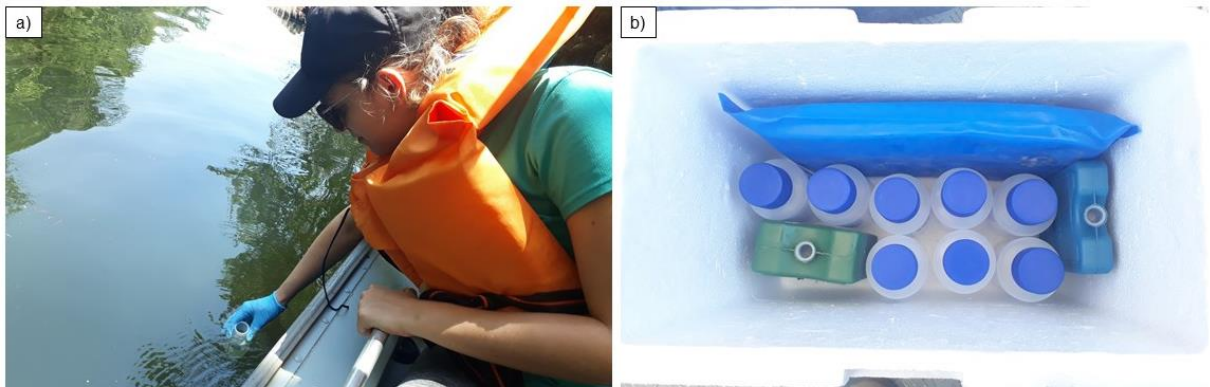


Figura 22: Coleta de amostra de água para a análise de turbidez. a) Coleta de amostras na superfície da lâmina da água. b) armazenamento das amostras em recipientes próprios e resfriados.

Foram coletadas sete amostras de água para o ensaio, sendo cinco amostras próximas à locais com atuação de processos erosivo, uma amostra em local sem presença de erosão e uma no meio do reservatório. As amostras foram devidamente identificadas e levadas para o laboratório da SANEPAR para a análise de turbidez. Para a determinação da qualidade da água, foram utilizadas como base a Resolução CONAMA 357 (2005) e a Resolução N°4 – COALIAR (2013).

5.5. QUINTA ETAPA

Na quinta etapa do trabalho foram realizados os ensaios de caracterização da erodibilidade. Os ensaios realizados foram:

1. Ensaio de Absorção de Água;
2. Ensaio de Perda de Massa por Imersão;

Ambos os ensaios foram realizados conforme a proposta de Nogami e Villibor (1979) e as normas ME 194/88 (DNER, 1988) e ME 256 (DNER, 1994) respetivamente. O ensaio de erodibilidade foi proposto por Nogami e Villibor, (1979). Os autores se basearam nas propriedades dos solos tropicais quando submetidos a erosão. Assim, este ensaio visa determinar a suscetibilidade dos diferentes tipos de solo aos processos erosivos. A suscetibilidade foi determinada por meio do potencial de absorção de água e sua perda de massa quando submersa em água. Segundo Nogami e Villibor (1979), a metodologia proposta é considerada fácil e de rápida execução, visto que não necessita de materiais ou equipamentos sofisticados. De acordo com a norma, utilizaram-se amostras indeformadas com dimensões de 45 mm de diâmetro e 50 mm de altura, constituídas por um cilindro de PVC rígido Figura 23.



Figura 23: Amostras indeformadas utilizadas para a realização dos ensaios de erodibilidade.

Neste trabalho, as amostras foram dispostas em local apropriado para a secagem ao ar, durante 4 dias. Para cada ponto amostrado, foram coletadas três amostras, sendo que uma passaria pelo ensaio de absorção de água, a outra pelo ensaio de perda de massa e a terceira seria sobressalente.

Absorção de água:

Visto que o laboratório Lame não possuía o equipamento necessário para a realização deste ensaio, este foi construído de forma autoral, seguindo os padrões desejados pela norma de execução, Figura 24.



Figura 24: Equipamento utilizado no ensaio de absorção de água, confeccionado pela autora.

Foram utilizados no ensaio: recipiente cilíndrico como base, acima do cilindro foi acoplado a pedra porosa com as mesmas dimensões da base, um tubo transparente graduado disposto de maneira horizontal acoplado a uma estrutura um pouco mais alta do que a base cilíndrica. O conjunto é preenchido com água destilada até que a pedra porosa se encontre saturada.

Antes de ser iniciado o ensaio, a amostra deve ser pesada, e logo depois colocada sobre a pedra porosa saturada. A partir do momento que a amostra entra em contato com a pedra porosa inicia-se a contagem de tempo e são feitas as leituras de volume de água absorvida pelo corpo de prova por intervalo de tempo, até que a água atinja o topo da amostra Figura 25.



Figura 25: Final do ensaio de absorção de água. Em vermelho é indicado o nível de água após a saturação da amostra indeformada.

O ensaio termina quando se percebe que a água chegou ao topo da amostra, formando uma mancha (menisco). Em seguida a amostra é pesada. Ao passo em que se tem o volume e o tempo de absorção, é confeccionado um gráfico entre q versus $t^{0,5}$, cujo coeficiente angular da reta representa o índice de absorção de água (I_{abs}) e é dado pela equação 1, na qual q (cm^3/cm^2) representa o volume de água absorvido e t (s) o tempo.

$$I_{abs} = \frac{q}{\sqrt{t}} \quad (\text{eq.01})$$

Perda de massa por imersão:

Para que fossem entendidas as relações de erodibilidade entre os materiais presentes nas bordas do reservatório, o ensaio de perda de massa foi realizado concomitantemente ao ensaio de absorção. Nele são classificados os solos como: erodíveis e não erodíveis. Após serem presas e sustentadas de maneira vertical por um suporte específico, também confeccionados pela autora, as amostras foram submersas em um recipiente de água, Figura 26a. Passado um período de 24h, o material desprendido da amostra é cuidadosamente coletado e secado em estufa a 105°C para se obter o peso da massa seca perdida Figura 26b.

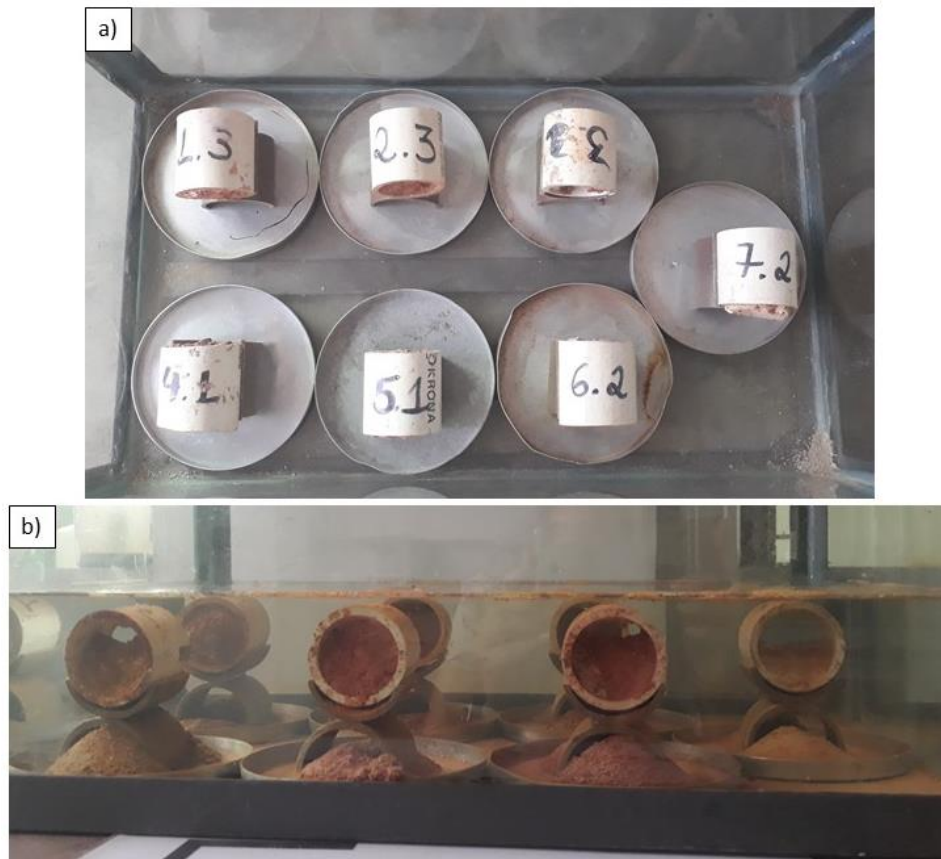


Figura 26: Realização do ensaio de Perda de Massa por Imersão. a) Amostras indeformadas utilizadas no ensaio de perda de massa por imersão. b) Amostras indeformadas após 24h imersas.

A relação entre a massa inicial seca e a massa seca perdida é tida como a perda de massa por imersão (P), dada em (%). Após o término dos dois ensaios, têm-se os parâmetros I_{abs} e P . A partir deles é possível determinar o índice de erodibilidade (E) segundo as equações a seguir. Um solo é considerado erodível se $E < 1$ e não erodível se $E > 1$.

$$E_{52} = 52 \cdot \frac{I_{abs}}{P} \quad (\text{eq. 02})$$

$$E_{40} = 40 \cdot \frac{I_{abs}}{P} \quad (\text{eq. 03})$$

Apesar de existirem outros ensaios geotécnicos para a caracterização de solos, estes ensaios foram escolhidos pois são considerados adequados para estimar o comportamento do solo quando submetido ao escoamento superficial, ao fluxo interno de água e ao processo de enchimento do reservatório. Além disso foram os mais adequados considerando o tempo disponível para a realização do presente trabalho.

5.6. SEXTA ETAPA

A sexta e última etapa da pesquisa foi compreendida pelo processamento e interpretação dos dados gerados a partir da análise dos resultados obtidos nas etapas anteriores, além da estruturação e elaboração da monografia. Com base nos dados e o auxílio de softwares como ArcGis 10.6, foram gerados diversos mapas, dentre eles: determinação de locais mais suscetíveis à erosão, declividade da região de estudo e o mapa de uso e ocupação do solo ao redor do reservatório

Como forma de agregar conhecimentos, ao final do trabalho e baseando-se nos resultados obtidos durante a pesquisa, nos locais em que foram diagnosticados processos erosivos, foram estudadas algumas possibilidades de medidas corretivas e mitigatórias as quais poderão nortear estudos futuros mais detalhados de cada local diagnosticado neste trabalho.

6.RESULTADOS

Na primeira e segunda etapas de campo, foram descritos os pontos nos quais existiam processos erosivos ativos. Foram descritos oito pontos no total, sendo que em cinco deles foram coletadas amostras para a caracterização geotécnica. As descrições englobaram as características táteis visuais dos solos, os tipos de processos erosivos atuantes, os horizontes com características texturais distintas, bem como as possíveis condicionantes ao desenvolvimento das erosões. A partir desta fase do trabalho, foram confeccionadas tabelas que compilam todos os dados de campo.

Na etapa de caracterizações esquemáticas dos pontos estudados, realizada na primeira e segunda etapas de campo, foi observado que alguns pontos descritos apresentavam diferenças texturais evidentes. Baseando-se nesta variação tátil visual, nos pontos 2,3,4 e 5 foram determinados horizontes, Figura 27a, b e c.

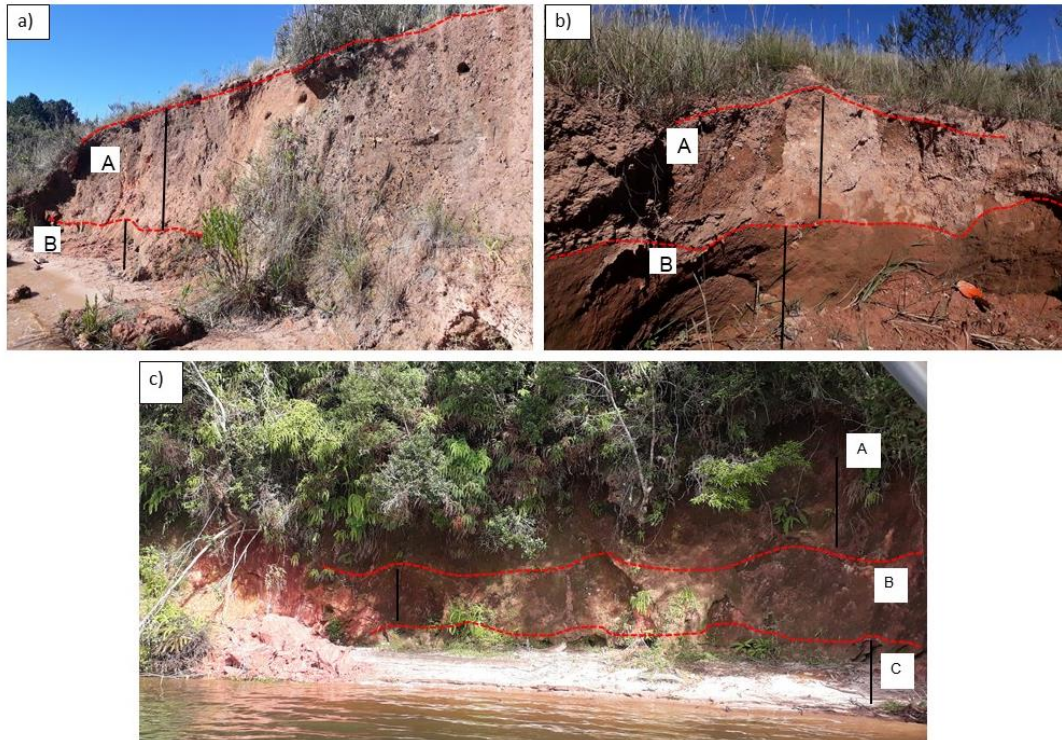


Figura 27: Ponto com presença de variação textural. a) Disposição dos horizontes no ponto 2. b) Disposição dos horizontes no ponto 3. c) Disposição dos horizontes no ponto 4.

A partir das variâncias diagnosticadas nestes pontos, foram coletadas amostras para que estas pudessem ser analisadas geotecnicamente, Tabela 2. Nos pontos 2 e 3, foi definido que os horizontes pertenciam a mesma sequência, sendo assim coletada uma amostra em cada ponto. No ponto 4 foram coletadas três amostras e no ponto 5, duas amostras.

Tabela 2: Características e disposição das amostras em cada ponto.

Pontos	Amostras	Horizontes	Altura de Coleta da Amostra
2	2	Superficial	87cm da superfície
3	3	Inferior	1,40m da superfície
4	4	Superficial	1m da superfície
4	5	Intermediário	2,10m da superfície
4	6	Inferior	3m da superfície
5	7	Superficial	1,10m da superfície
5	8	Inferior	3,20m da superfície

A Tabela 3 apresenta todos os pontos analisados no trabalho, juntamente com as características a respeito da vegetação, declividade das margens, bem como a extensão e altura dos taludes.

Tabela 3: Dados da caracterização dos pontos nas etapas de campo.

Pontos	Altura Talude	Extensão Talude	Amostras	Vegetação	Horizontes	Declividade da Margem
1	3,3 m	21 m	1 amostra	Vegetação rasteira. Árvores a uns 5-10m da margem.	1 horizonte	Alta
2	1,25 m	3 m	1 amostra (nível superficial)	Vegetação rasteira. Árvores de grande porte caídas próximas a margem.	2 horizontes	Alta
3	2,3 m	4 m	1 amostra (nível inferior)	Vegetação rasteira. Árvores de grande porte caídas próximas a margem.	2 horizontes	Alta/Média
4	3,62 m	12 m	3 amostras (nível superficial, intermediário e inferior)	Vegetação de médio a grande porte presentes próximos a borda da margem.	3 horizontes	Alta
5	7,7 m	3 m	2 amostras (nível superficial e inferior)	Vegetação de médio a grande porte presentes próximos a borda da margem.	2 horizontes	Alta
6	superfície	20m		Vegetação de rasteira presentes próximos a borda do talude e algumas árvores de médio porte.	1 horizonte	Baixa
Cachoeira				Vegetação densa, de médio a grande porte.		Média
Entrada no Reservatório	0,5m	5m		Vegetação rasteira		Média

Baseando-se nas normas estipuladas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (SOLOS E., 2013), a partir das características descritas nas margens, um mapa foi confeccionado a respeito da declividade existente na região de estudo. Este mapa representa a APA do Piraquara e apresenta a variabilidade do terreno em seis níveis de porcentagem, entre 0 a <75% de declividade, Figura 28.

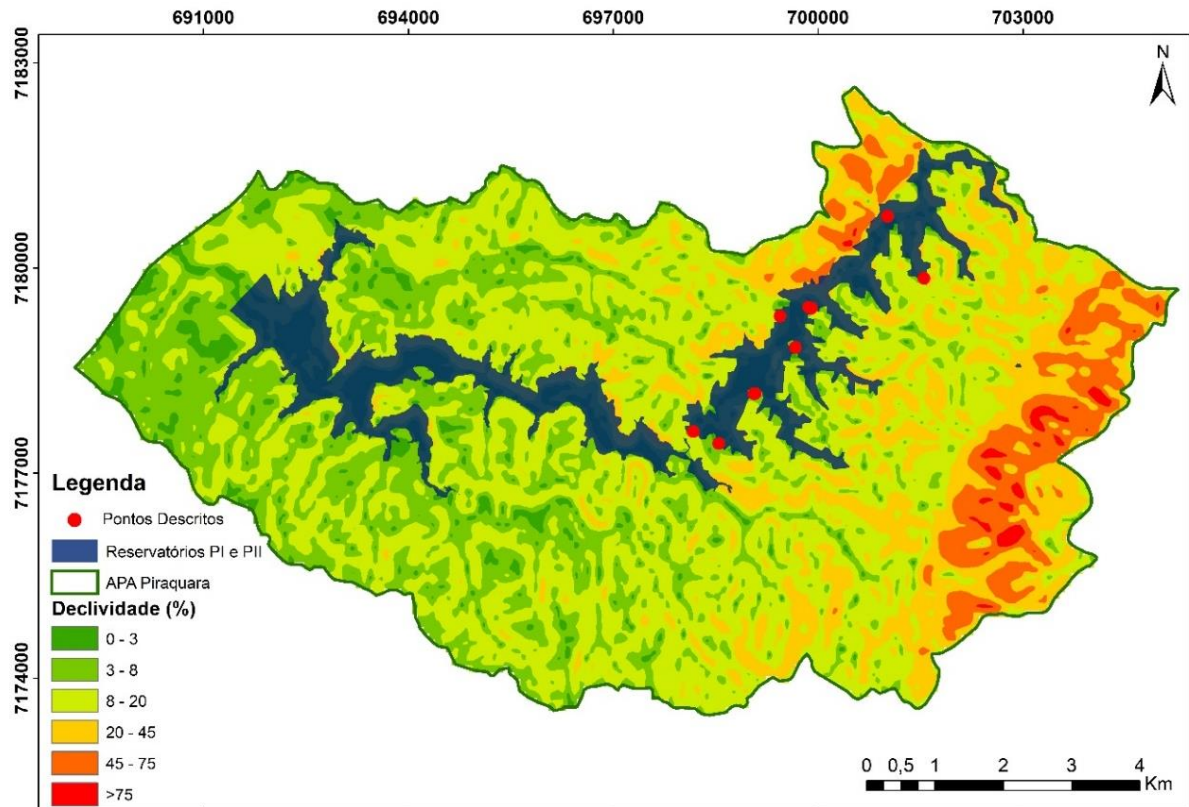


Figura 28: Mapa de declividade existente na região da APA do Piraquara.

A Tabela 4 apresenta todos os pontos analisados e retrata se existia ou não processos erosivos ativos e quais eram eles. Além disso, a tabela também expõe as descrições das características táteis visuais de cada ponto. Estas informações se fizeram importantes para a posterior determinação das condicionantes aos processos erosivos.

Tabela 4: Dados descritivos dos processos erosivos atuantes no reservatório Piraquara I.

Pontos	Descrição Táctil Visual	Processos Erosivos
1	Talude, altamente intemperizado. Cor castanho avermelhada, com granulação variando de muito fina a fina, composta por grãos de quartzo e argilominerais em uma matriz argilosa. Na metragem 18m de extensão existe um dique de diabásio intrudindo a litologia.	Solapamento e escorregamento das bordas gerado pela ação das ondas. Presença de <i>piping</i> na porção inferior na borda.
2	Talude, altamente intemperizado. Cor castanho, com granulação variando de fina a média, composta por grãos de quartzo e argilominerais em uma matriz argilosiltosa.	Movimentos de massa como o escorregamento, presença de planos curvos e solapamento, gerados pela ação das ondas. Erosão linear evidenciada pelos sulcos na superfície do talude.
3	Afloramento a 5 m ao lado do ponto 2. Afloramento tipo talude, altamente intemperizado. Cor castanho, com granulação variando de fina a média, composta por grãos de quartzo e argilominerais em uma matriz argilosiltosa.	Movimentos de massa como escorregamento, gerando planos curvos. Erosão causada pela ação das ondas. Início de formação de <i>piping</i> .
4	Talude, altamente intemperizado. Cor castanho avermelhada, com granulação variando de muito fina a média, composta por grãos de quartzo e argilominerais em uma matriz argilosa. Presença de níveis quartzosos intercalados com níveis mais argilosiltosos.	Perda de solo ocasionado pela ação das ondas. Pontos de solapamentos e processos erosivos do tipo <i>piping</i> .
5	Talude, altamente intemperizado. Cor amarelo avermelhado, com granulação variando de muito fina a média, composta por grãos de quartzo e argilominerais em uma matriz argilosa. Presença de níveis quartzosos intercalados com níveis mais argilosiltosos. na porção superior do afloramento, a porcentagem de areia tende a aumentar.	Presença de solapamento e Movimento de massa planares.
6	Ponto com solo castanho avermelhado, altamente intemperizado. Granulometria fina, presença de quartzo e argilominerais.	Processo erosivo linear, com presença de sulcos de tamanhos variados na superfície
Cachoeira	Ponto sem a possibilidade da descrição visual, sem o solo descudo.	Sem presença aparente de processos erosivos atuantes.
Entrada no reservatório	Solo castanho amarronzado, altamente intemperizado, presença de quartzo e argilominerais.	Erosão causado por ondas, pontos de solapamento.

A partir das observações e descrições realizadas na segunda etapa de campo, juntamente com as características obtidas de cada ponto estudado, um mapa a respeito dos locais mais propícios a apresentarem erosão foi confeccionado, Figura 29. Visto que é um mapa baseado em dados visuais, não pode ser classificado como um mapa de suscetibilidade. Para este fim, outras áreas do reservatório teriam que ser descritas e analisadas mais detalhadamente.

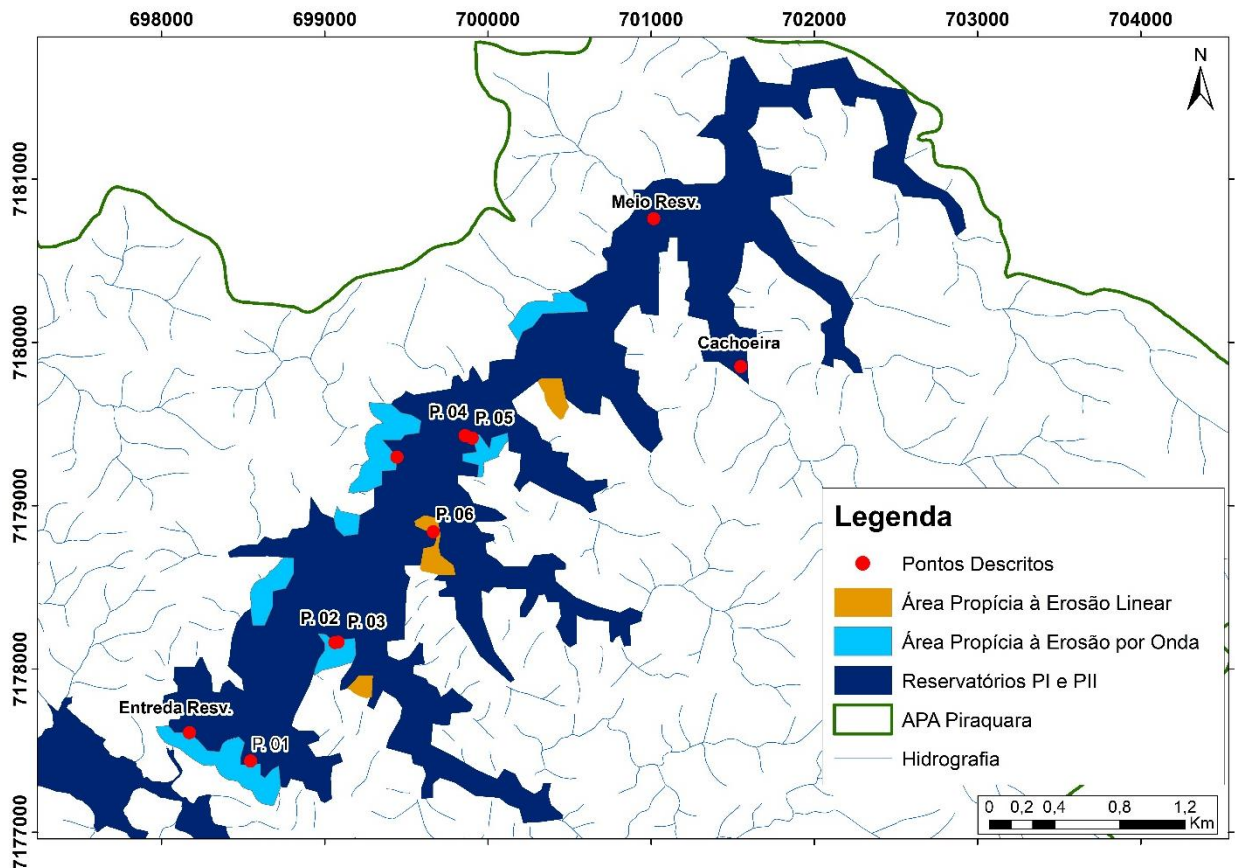


Figura 29: Mapa de áreas propícias às erosões lineares e por onda no reservatório Piraquara I.

No ano de 2000, foi decretada a Lei N° 9.800, (CURITIBA, 2000) que determina o Uso e Ocupação do Solo em áreas de preservação permanente. Um mapa foi confeccionado correlacionando a área de APP do reservatório Piraquara I e o uso e ocupação do solo. Neste mapa é possível perceber que certas regiões não são devidamente preservadas, Figura 30. Quando este mapa é correlacionado com o mapa de áreas propícias à erosão, é possível identificar que a maioria das regiões que não são preservadas, possuem algum tipo de processo erosivo ativo.

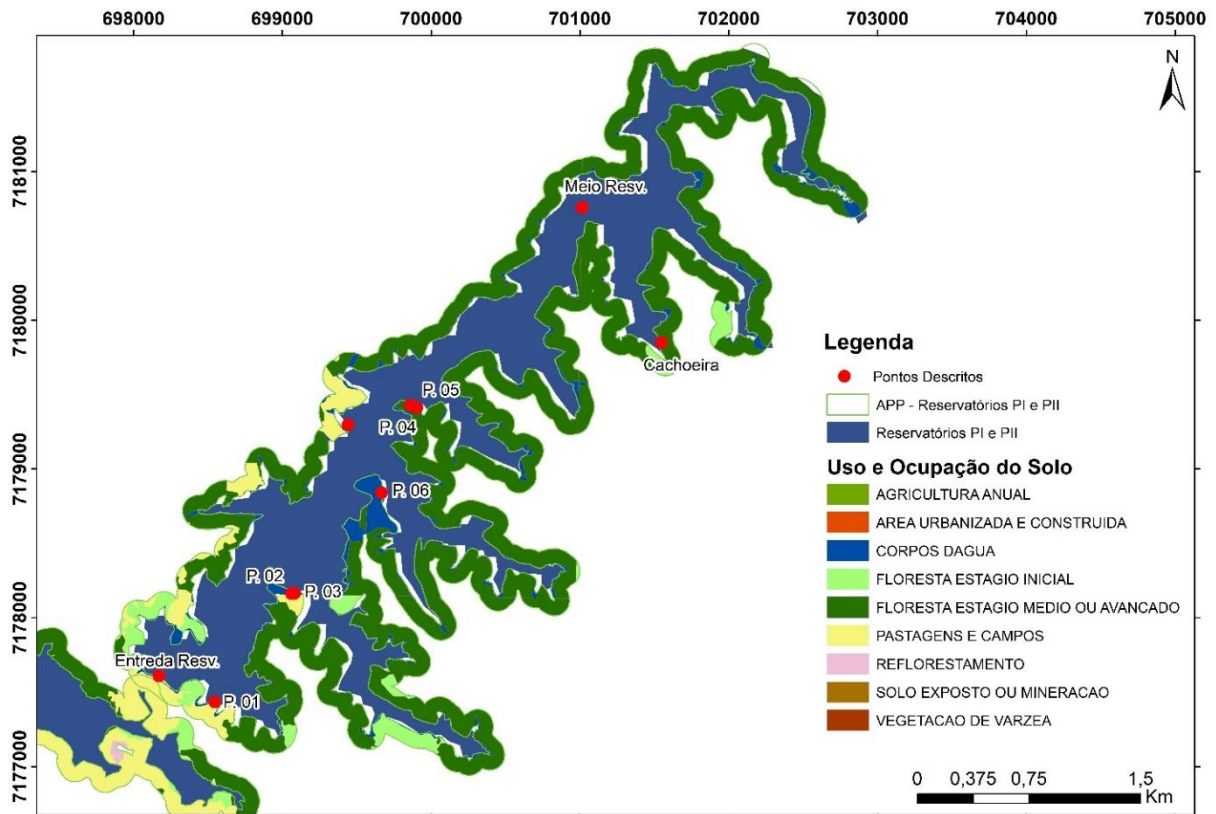


Figura 30: Uso e Ocupação do Solo na APP do reservatório PI e PII.

A caracterização granulométrica dos solos é considerada fundamental para qualquer ensaio geotécnico, visto que a partir dela é possível correlacionar as características intrínsecas de um solo com os processos atuantes na superfície. No presente trabalho, os resultados dos ensaios direcionam o entendimento da relação entre os processos erosivos e as características físicas dos solos presentes nas margens do reservatório, mesmo que não sejam relacionados diretamente. Assim como os ensaios geotécnicos básicos, os de erodibilidade também são considerados importantes. A Tabela 5 apresenta a numeração dos pontos descritos, correlacionados com as amostras deformadas e indeformadas retiradas de cada ponto. Para que se tivesse uma amostragem de segurança, foram retirados três exemplares de amostras indeformadas.

Tabela 5: Numeração de amostras deformadas e indeformadas coletadas em campo.

Pontos	Amostras Deformadas	Amostras Indeformada
1	1	1.1 / 1.2 / 1.3
2	2	2.1 / 2.2 / 2.3
3	3	3.1 / 3.2 / 3.3
4	4/5/6	4.1 / 4.2 / 4.3 5.1 / 5.2 / 5.3 6.1 / 6.2 / 6.3
5	7/8	7.1 / 7.2 / 7.3 8.1 / 8.2 / 8.3
6		
Cachoeira		
Entrada no Reservatório		

Resultados das amostras deformadas:

O primeiro resultado gerado é a umidade gravimétrica. Os dados resultantes deste ensaio são utilizados como base para as demais caracterizações. De acordo com a Tabela 5, a umidade presente no solo varia de quase 7% a 13%. A partir da análise granulométrica, foram determinadas as porcentagens de areia, silte e argila em cada amostra retirada dos cinco pontos, estes também são descritos na Tabela 6.

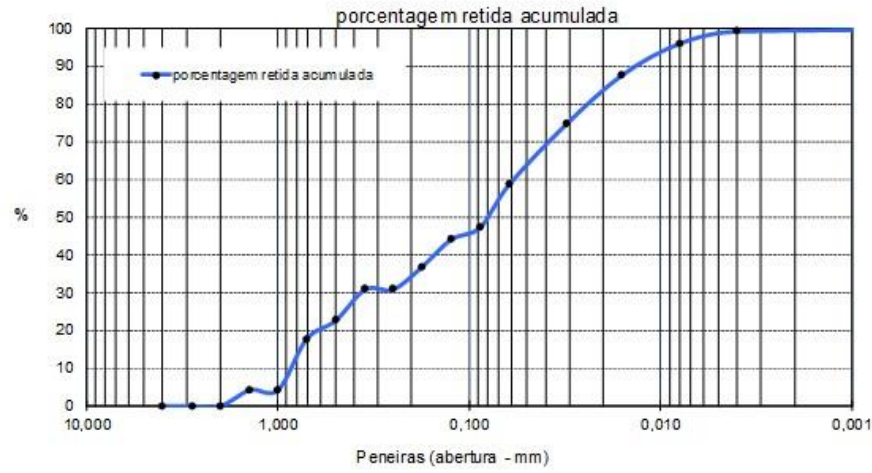
Tabela 6: Dados resultantes da unidade gravimétrica e da análise granulométrica das amostras.

Amostras	Umidade Gravimétrica	Porcentagem de Areia (%)	Porcentagem de Silte (%)	Porcentagem de Argila (%)
1	9,50%	58,72%	40,51%	0,64%
2	10%	77,52%	19,08%	2,52%
3	8,20%	51,18%	41,08%	0%
4	9,70%	71%	27,57%	1,25%
5	12,70%	79,83%	18,58%	1,60%
6	13,10%	58,30%	38,13%	3,40%
7	6,80%	65,43%	24,38%	2,83%
8	11,10%	67,35%	30,00%	2,80%

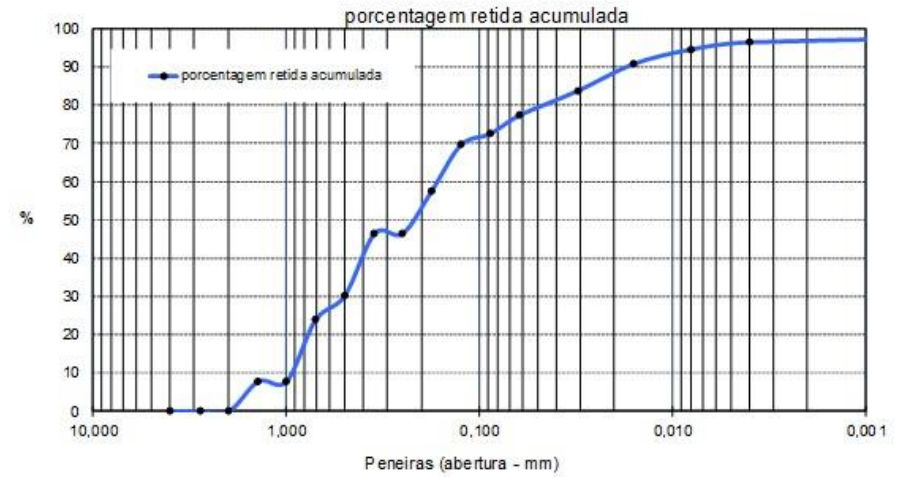
Além das porcentagens de cada fração, a análise granulométrica possibilita a geração de gráficos que demonstram a dispersão de cada granulometria na amostra, chamada de porcentagem retida acumulada, Figura 31. Nesta etapa da caracterização granulométrica, foi utilizada a técnica de pipetagem, já citada anteriormente. Apesar de geralmente apresentar resultados satisfatórios, nesta pesquisa os resultados obtidos geraram certos pontos de incertezas. As amostras 3, 7 e 8, mesmo apresentando uma tendência de dispersão granulométrica, possuem curvas muito distintas das demais.

Após a análise granulométrica, foram realizados os ensaios de Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez, bem como o ensaio de Peso Específico dos Grãos. Estes ensaios geraram dados que corroboram com as características dos ensaios anteriores e demonstram a baixa coesão dos materiais coletados. Na Tabela 7 estão dispostos os resultados de cada amostra. Nota-se que a maioria dos (γ_s) estão em torno de 2,5 e 2,8, porém as amostras 3 e 4 apresentaram valores mais dispersos.

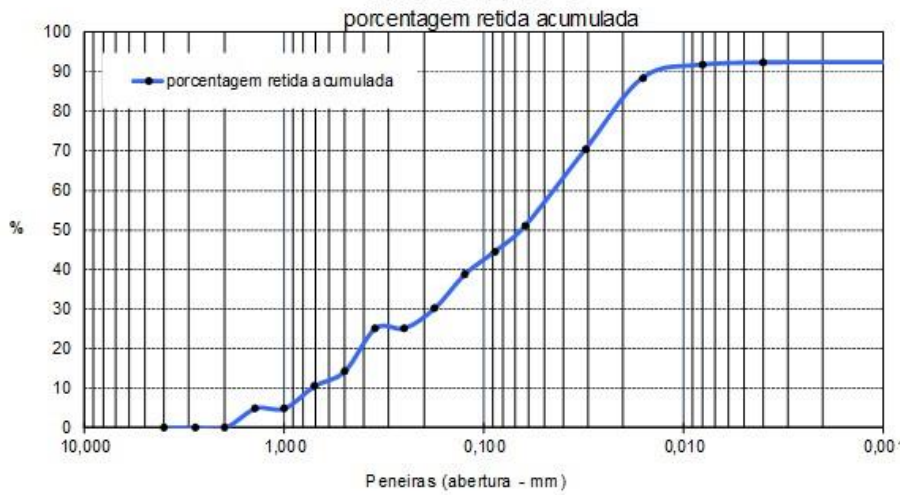
AMOSTRA 1



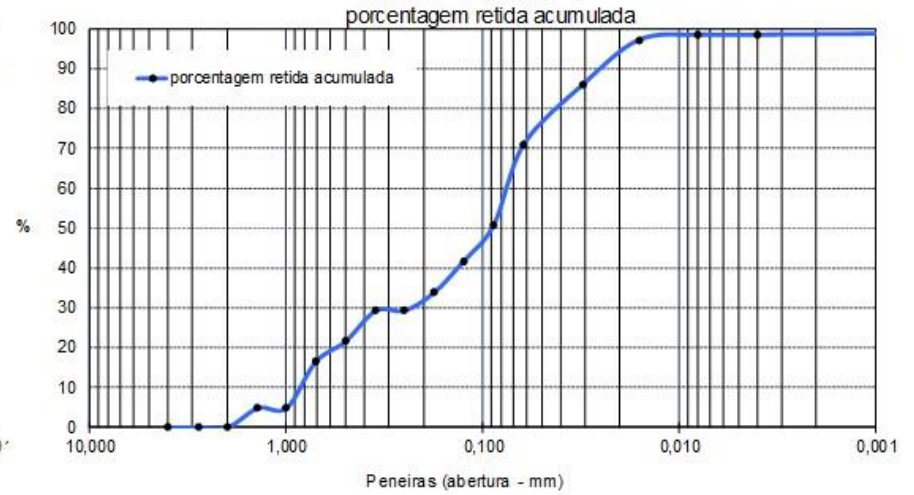
AMOSTRA 2



AMOSTRA 3



AMOSTRA 4



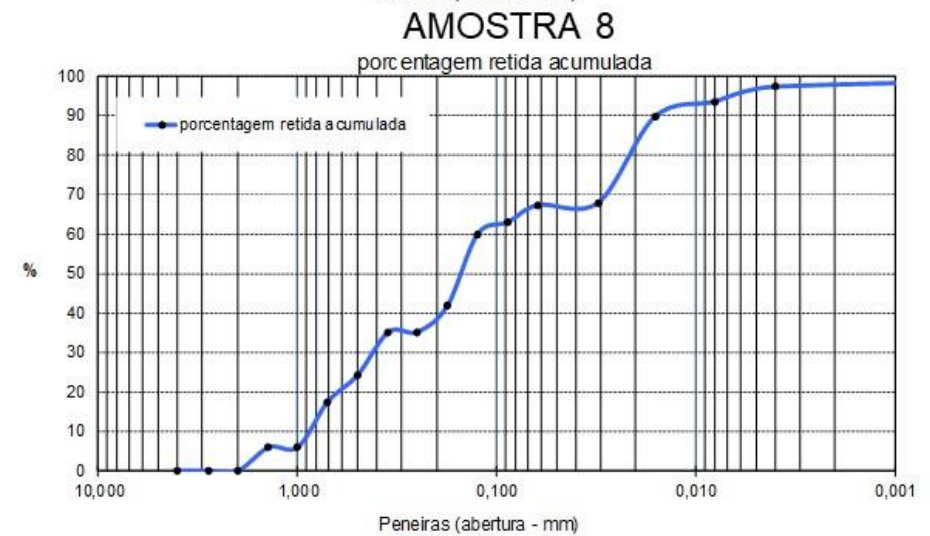
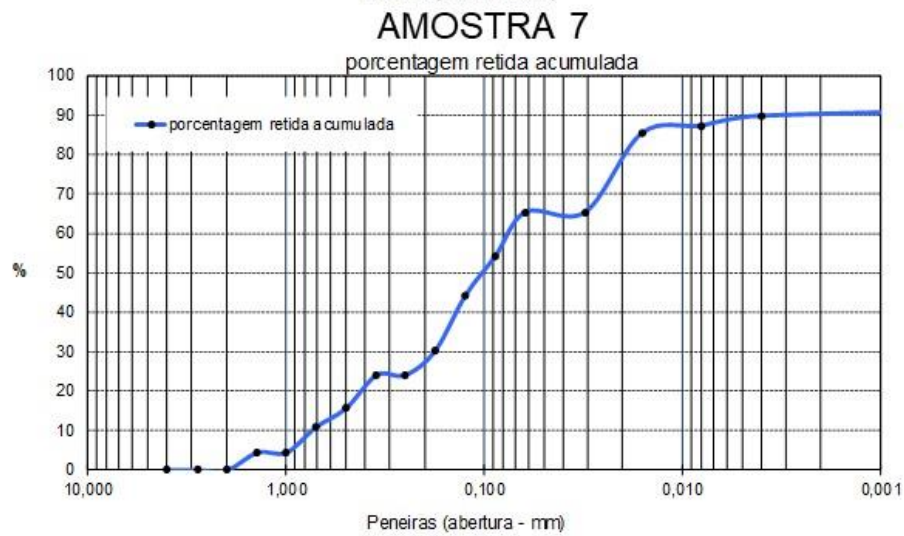
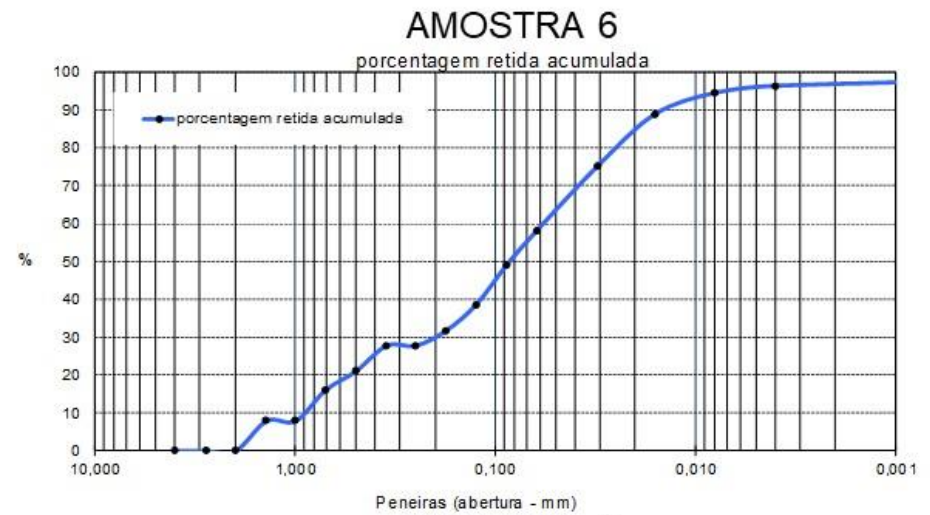
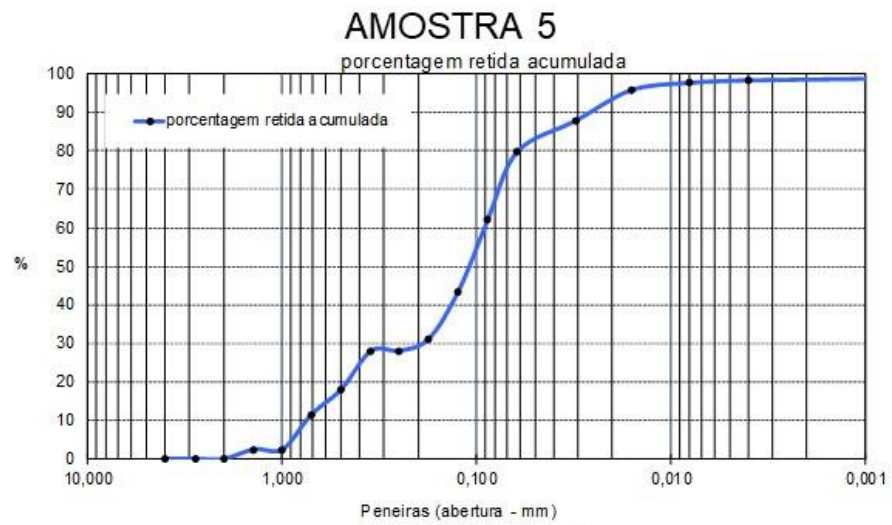


Figura 31: Gráficos dos resultados do ensaio granulométrico realizado com a técnica de pipetagem em cada amostra de solo.

Tabela 7: Resultados do ensaio de Limite de Atterberg e Peso específico dos Grãos.

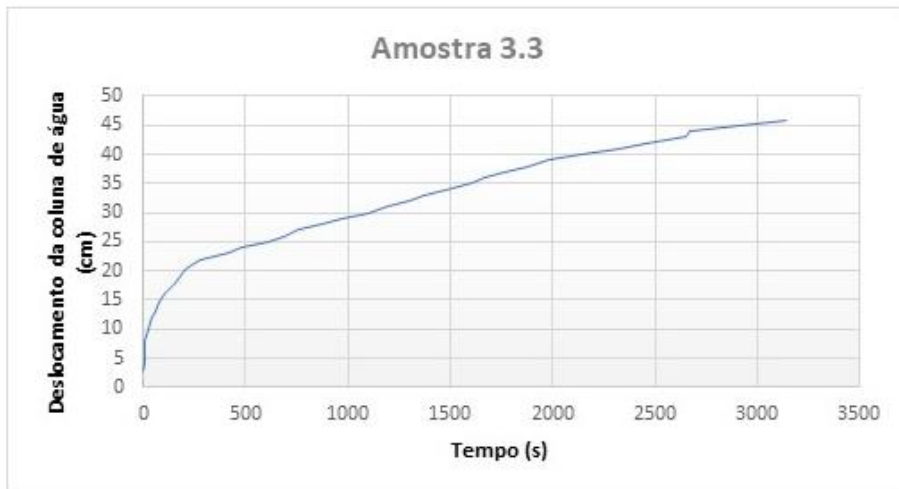
Amostras	Limite de Atterberg		Peso específico dos Grãos
	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	(γ_s)
1	50,38%	38,02%	2,691
2	42,55%		2,82
3	42,91%		2,1005
4	50,18%		2,9779
5	48,90%		2,6009
6	46,51%		2,5859
7	41,63%		2,5556
8	42,64%		2,5361

Resultados das amostras indeformadas:

Os ensaios de erodibilidade geraram dados que auxiliaram na compreensão dos processos erosivos. A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão, que resultaram nos parâmetros P (%) para cada amostra analisada. O ensaio de absorção de água resultou em gráficos que relacionam o volume de água infiltrada na amostra pelo tempo em segundos, Figura 32. A partir deles, foram determinados os parâmetros (labs) para cada amostra, vide equação 01.

Tabela 8: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão.

Perda de Massa por Imersão			
Amostras	Amostra Seca (g)	Amostra Seca Desagregada (g)	P (%)
1.3	76,8929	22,9236	30,00
2.3	93,9198	27,8039	29,6
3.2	69,4515	45,2723	65,18
4.1	92,1418	65,7589	71,36
5.1	84,3378	33,4247	39,63
6.2	86,137	55,1442	64,01
7.2	59,1247	25,2342	42,67
8.3	80,5235	61,2423	76,05



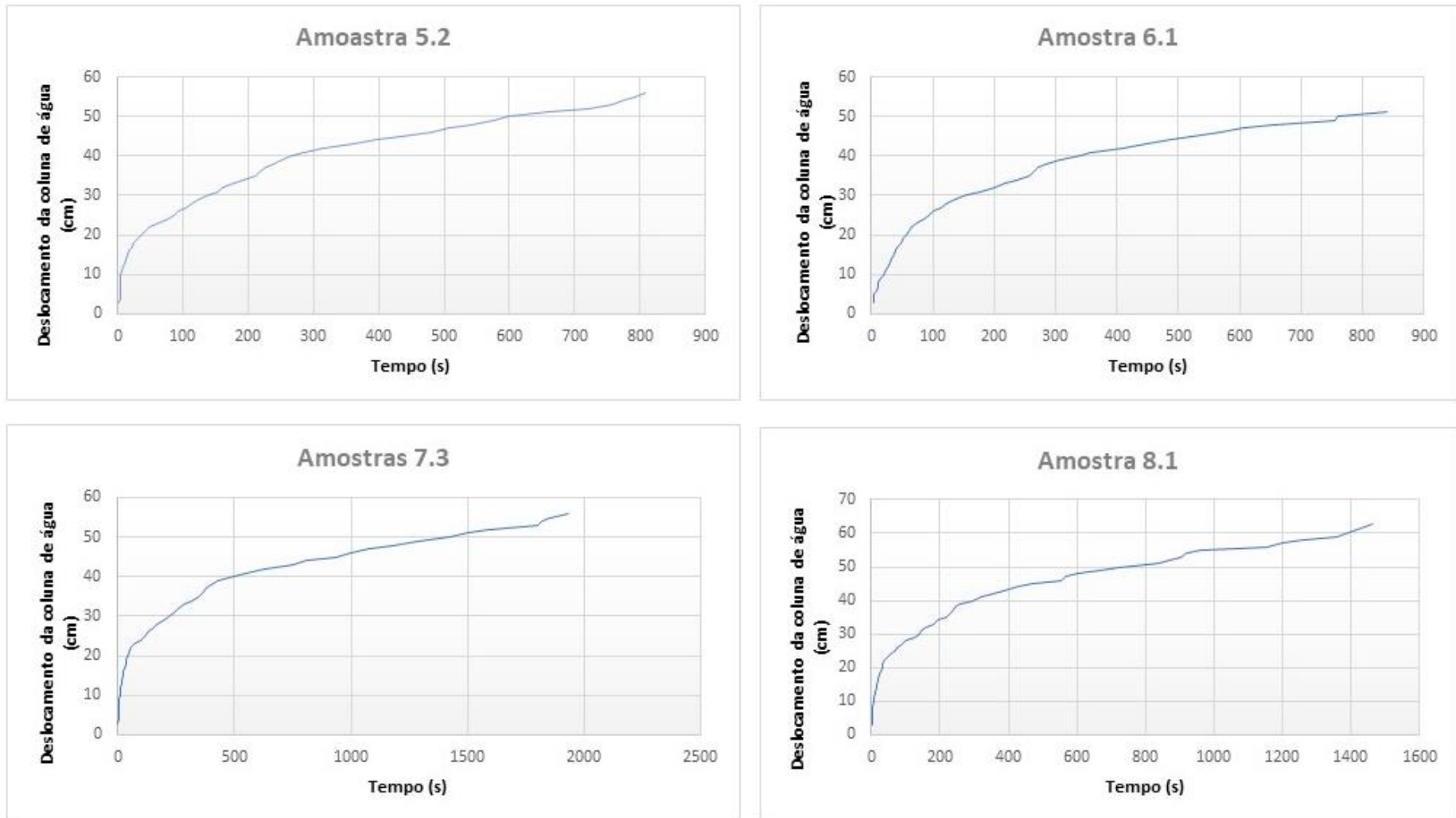


Figura 32: Gráficos dos resultados do ensaio de absorção de água realizado nas amostras indeformadas.

Por fim, com os parâmetros (P) e (labs), foi possível determinar o índice de erodibilidade (E) para cada amostra a partir da razão entre os dois índices. Os resultados encontram-se na Tabela 9. O índice (E52) foi determinado por Nogami & Villibor (1979), já o índice (E40) foi utilizado por Pejon (1992). Este último foi o parâmetro escolhido para a determinação da erodibilidade das amostras do presente trabalho, visto que possui uma determinação e abordagem mais conservadora em relação ao índice (E52), Figura 33.

Tabela 9: Tabela com índices para a determinação do grau de erodibilidade das amostras indeformadas coletadas na margem do reservatório.

Erodibilidade				
Amostras	labs	p	E52	E40
1	0,9264	30	1,60576	1,2352
2	0,6548	29,6	1,1503243	0,8848649
3	0,6021	65,18	0,4803498	0,3694998
4	1,5797	71,36	1,1511267	0,8854821
5	1,4636	39,63	1,9204441	1,4772647
6	1,3	64,01	1,056085	0,8123731
7	0,946	42,67	1,1528474	0,8868057
8	1,2314	76,05	0,8419829	0,6476791

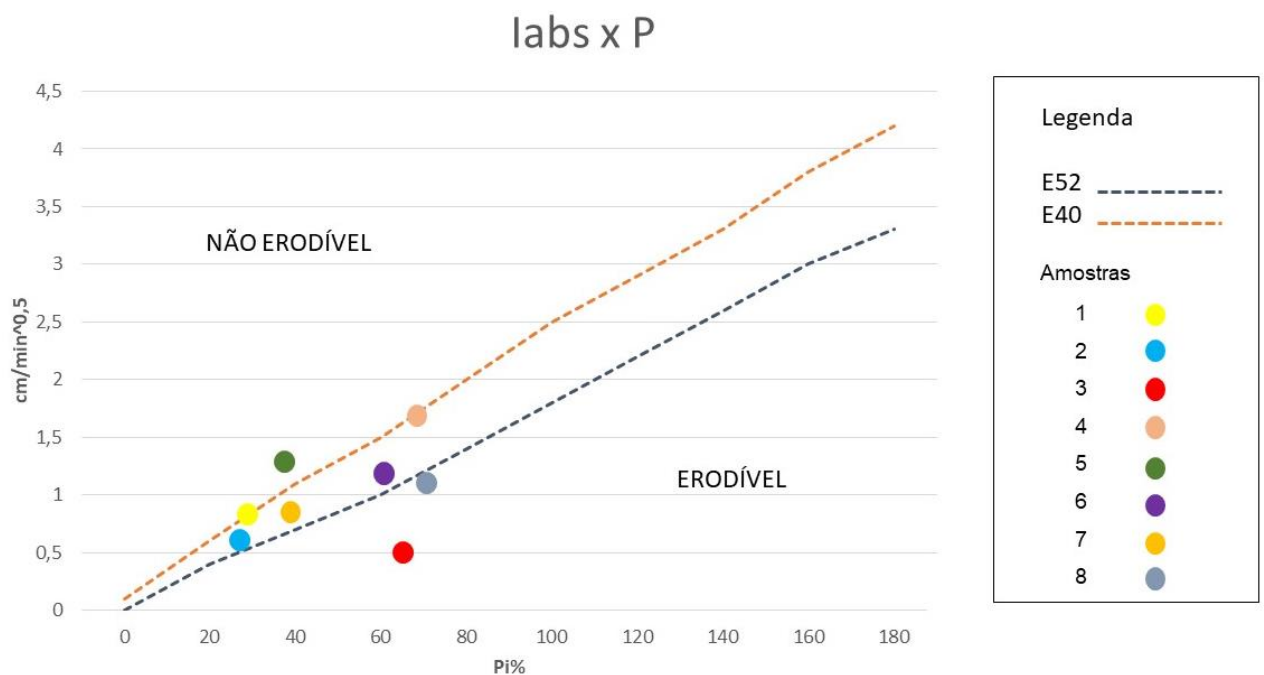


Figura 33: Gráfico do resultado do parâmetro de erodibilidade em cada ponto amostrado no reservatório Piraquara I.

Os resultados obtidos através dos ensaios de turbidez estão dispostos na Tabela 10. O teor de turbidez em cada ponto foi comparado com as resoluções vigentes para a classe 1, a qual o rio Piraquara pertence.

Tabela 10: Variação do parâmetro de turbidez para diferentes pontos no reservatório Piraquara I.

Amostras	Turbidez (UNT)
Ponto 1	6,17
Ponto 2	5,15
Ponto 4	22,2
Ponto 5	2,2
Ponto 6	47,5
Centro do Reservatório	1,53
Sem Erosão	1,33

7.DISSCUSSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante o reconhecimento do reservatório e após a descrição detalhada dos pontos de estudo, ficou evidente que existe no reservatório uma variação nos processos erosivos presentes nas margens. A partir das análises e ensaios geotécnicos pode-se perceber que existem certas condicionantes que estão mais intimamente atreladas aos processos erosivos do que outras. Cada uma delas será abordada a seguir.

7.1 VEGETAÇÃO

O primeiro ponto condicionante determinado na pesquisa, e mais facilmente perceptível é a ocupação das margens do reservatório. É importante ressaltar que em 2012 foi determinada pela Lei 12651, a faixa de 100m denominada Área de Preservação Permanente (APP). Porém, diferente do Piraquara II, no Piraquara I esta faixa não pertence a SANEPAR, mas sim aos proprietários de lotes dispostos ao longo do reservatório. Deste modo, é visível que nem todas as propriedades seguem a exigência de preservar esta faixa, como é possível identificar na Figura 34. É recorrente a utilização da APP para pastagem, lavoura e outras finalidades. Além da APP, existe também a Lei N° 9.800 de 2000 (CURITIBA, 2000), correspondente ao Uso e Ocupação do Solo. Esta Lei prevê que a faixa de 100m seja preservada de forma efetiva. Embora o reservatório seja mais antigo que as leis

anteriormente citadas, os proprietários deveriam aderir aos cuidados com a região de preservação permanente, porém não é o que realmente acontece.

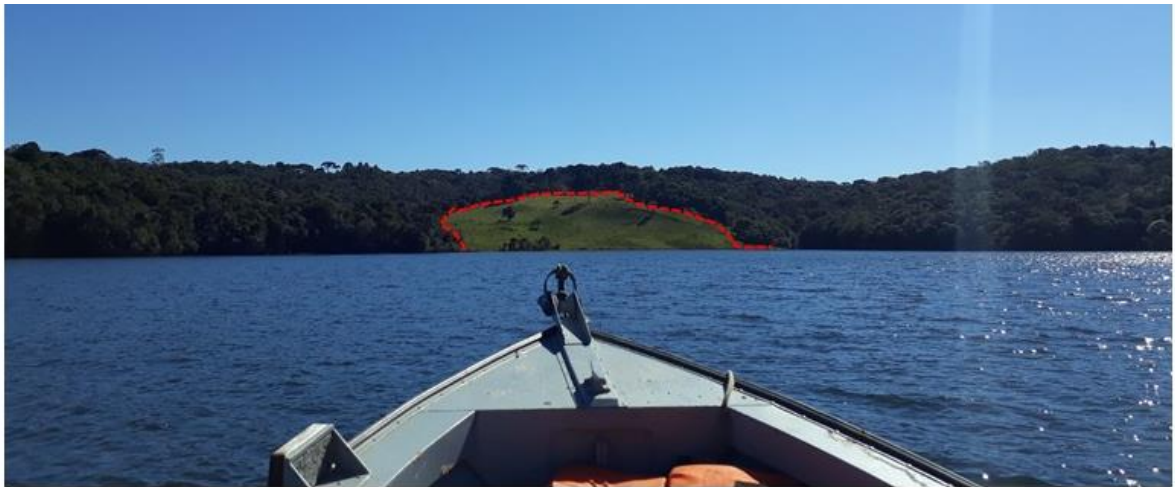


Figura 34: Área desmatada para pastagem inserida na área de proteção permanente (APP).

Nas regiões em que a vegetação se encontrava suprimida e o solo tendia a estar desnudo, foram observados que os principais processos erosivos atuantes eram o *piping* Figura 35a, erosão linear Figura 35b e a erosão por ondas Figura 35c.

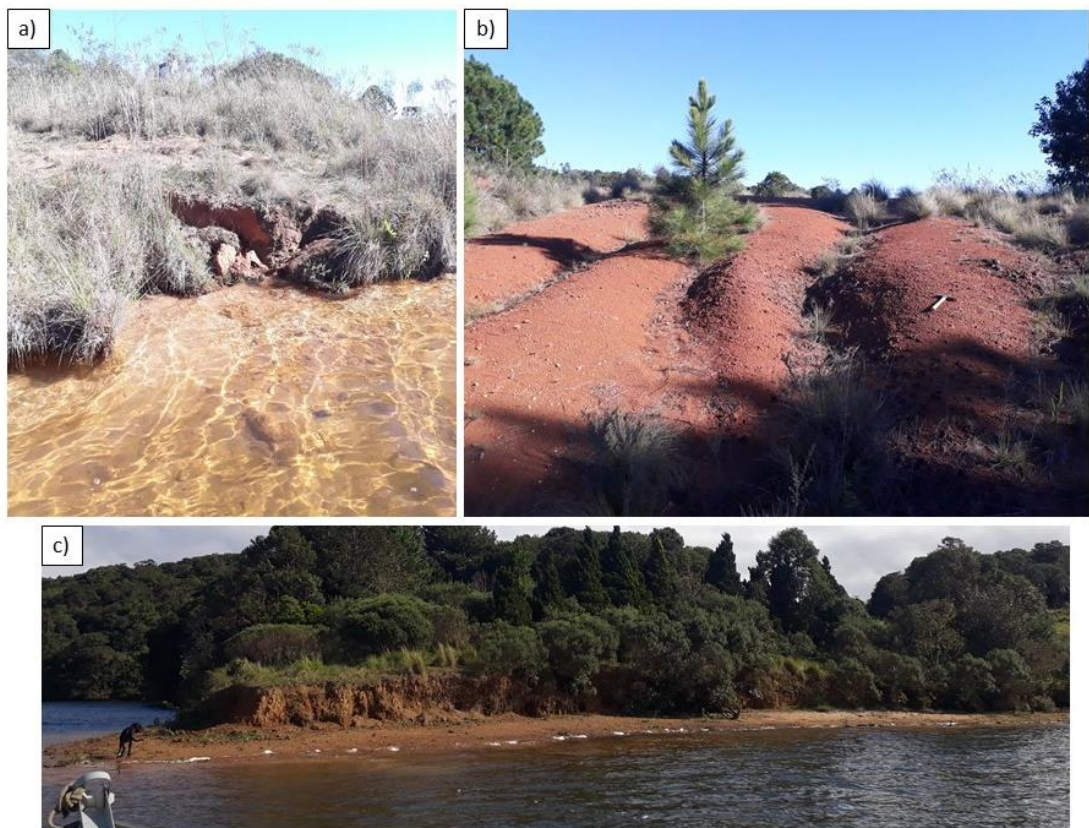


Figura 35: Processos erosivos atuantes em regiões com vegetação degradada. a) Piping nas bordas do PI. b) Erosão linear existente no ponto 6. c) Erosão por ondas nas bordas do PI.

Estes três tipos de erosões estavam, em sua maioria, atrelados ao solapamento dos taludes e a perda de solo, Figura 36a e b. Outra característica identificada foi que a erosão pela ação das ondas, e o *piping*, foram identificados nas porções inferiores das margens Figura 36c. O desenvolvimento da erosão interna apresenta uma tendência de ocorrer em locais onde encontram-se intercalações de níveis pelíticos e níveis quartzosos, locais com presença de diques de diabásio, além de estarem atrelados à variação da superfície freática, Figura 37a e b.

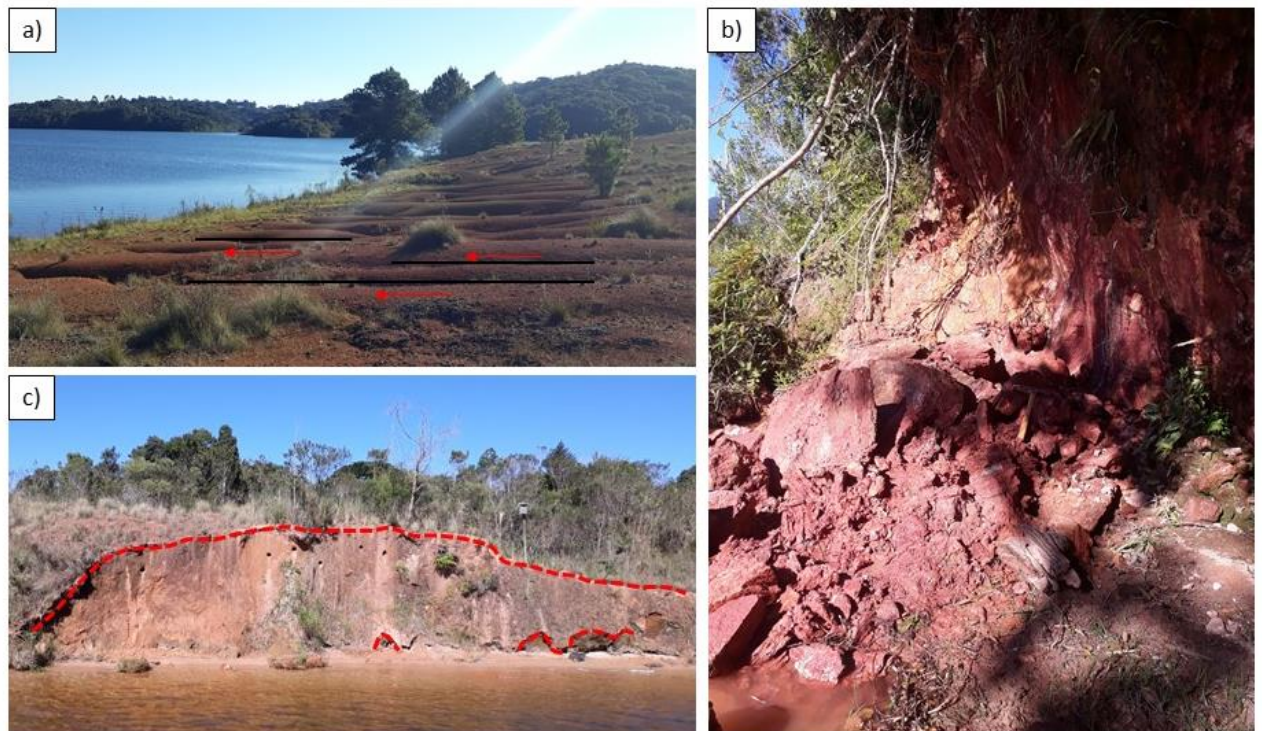


Figura 36: Locais com presença de processos erosivos nas bordas do reservatório Piraquara I, a) Erosão linear, com presença de sulcos e ravinas na superfície, b) Movimento gravitacional de massa associado a erosão por efeito de ondas, c) Processo erosivo na borda do reservatório e presença de *piping*.

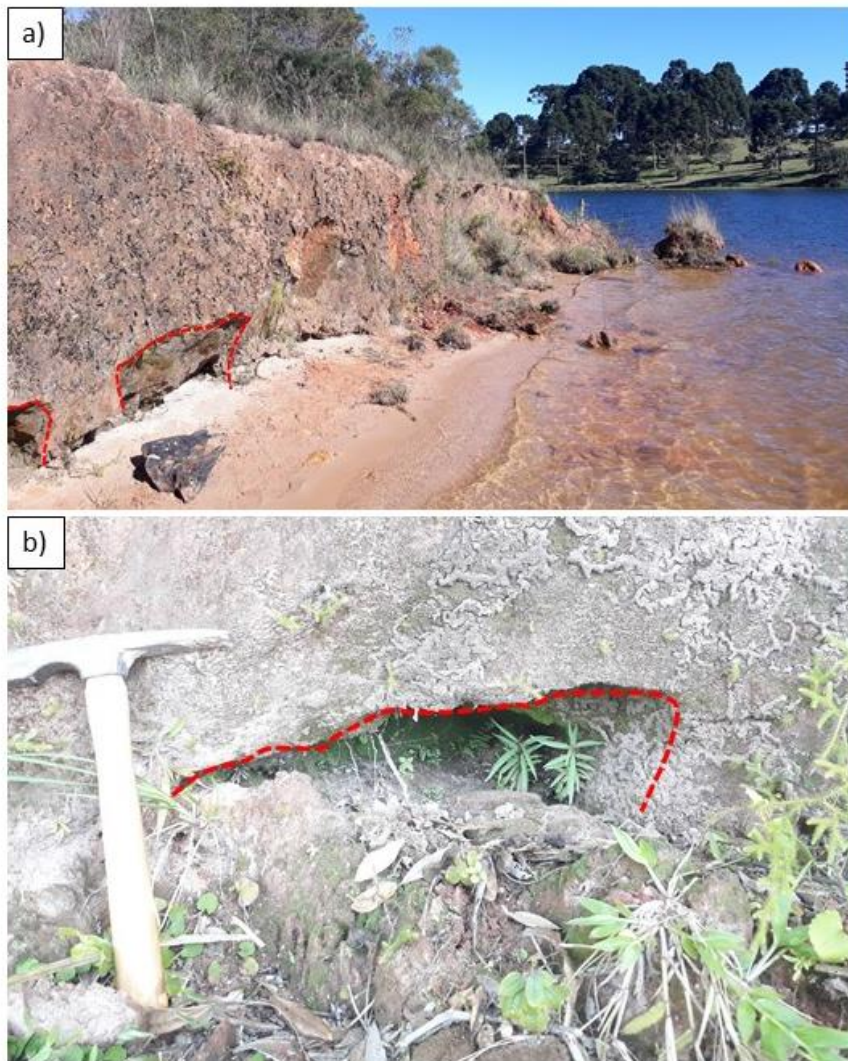


Figura 37: Processos erosivos atuantes nas porções inferiores das bordas do reservatório Piraguara I, a) erosão interna atuante na poção inferior na margem descrito no ponto 1, no nível da lâmina da água b) erosão interna atuante na poção inferior na margem descrito no ponto 4.

Apesar do mau uso do entorno do reservatório, atrelado ao desmatamento ser uma condicionante importante, foram observados locais nos quais processos erosivos estavam ativos, mesmo com a vegetação preservada, Figura 38a e b. Entretanto, como mostra a Figura 38c, também existem locais sem a presença de processos erosivos ativos e com a vegetação intacta. Este fato indicava que além da vegetação, a característica composicional dos solos podia ser uma condicionante importante para o desencadeamento da erosão, assim como a declividade.



Figura 38: Locais com presença de vegetação e diferentes respostas aos processos erosivos nas bordas do reservatório Piraquara I, a) presença de vegetação e processos erosivos, ponto 5 b) movimento gravitacional de massa associado a erosão na borda de reservatório, ponto 5 c) local com vegetação preservada e sem presença de processos erosivos, ponto cachoeira.

7.2. NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO

Um fator importante, e intrinsecamente ligado a erosão é a variabilidade do nível da água no reservatório. Na primeira etapa de campo o nível encontrava-se abaixo do nível de extravasamento do reservatório. Em contrapartida, na segunda e terceira etapas foi observado que o nível da água se encontrava na conta máxima do reservatório, a 907m de altitude, havendo o extravasamento pelo vertedouro, Figura 39. Esta oscilação no nível da lâmina de água, além de deixar as margens expostas e suscetíveis à erosão, também afeta o nível da superfície freática. Conforme esta superfície rebaixa, a probabilidade de ocorrer o desencadeamento da erosão interna ou *piping* aumenta consideravelmente, visto que dutos internos aos taludes vão sendo escavados. Com o desenvolvimento dos dutos, os taludes perdem a estabilidade e tendem a solapar, deixando o nível freático mais próximo a superfície e assim propiciando o início de uma voçoroca.



Figura 39: Extravasamento da água do reservatório Piraquara I pelo vertedouro identificado na segunda e terceira etapas de campo.

7.3. VARIAÇÃO TEXTURAL

Visto que o reservatório está situado em uma região na qual existem rochas do Complexo Migmático Gnássico Costeiro, da Formação Guabirotuba, Suíte granítica Anhangava e sedimentos recentes (vide Figura 2), constatou-se que a variabilidade textural encontrada nos pontos descritos, associada a variação geológica, poderia ser uma forte condicionante aos processos erosivos.

Baseando-se nas caracterizações táteis visuais, os pontos 2,3 e 5 apresentavam cores semelhantes, bem como a variação granulométrica, Figura 40 a e b. Já no ponto 4 foram descritos solos mais avermelhados, com presença de estruturas reliquiares, como veios de quartzo e bandamentos preservados, Figura 40c. Apesar das diferenças visuais, todos os solos foram caracterizados como residuais, já que a textura e a estrutura da rocha fonte, ainda se encontram preservadas e com intemperismo moderado a alto. Segundo Dias (1995), no Brasil, a grande maioria dos materiais descritos em superfície podem ser classificados como materiais inconsolidados. Estes materiais podem ser transportados, quando não são oriundos do substrato rochoso presente em subsuperfície, ou residuais, que é o caso dos solos descritos neste trabalho.

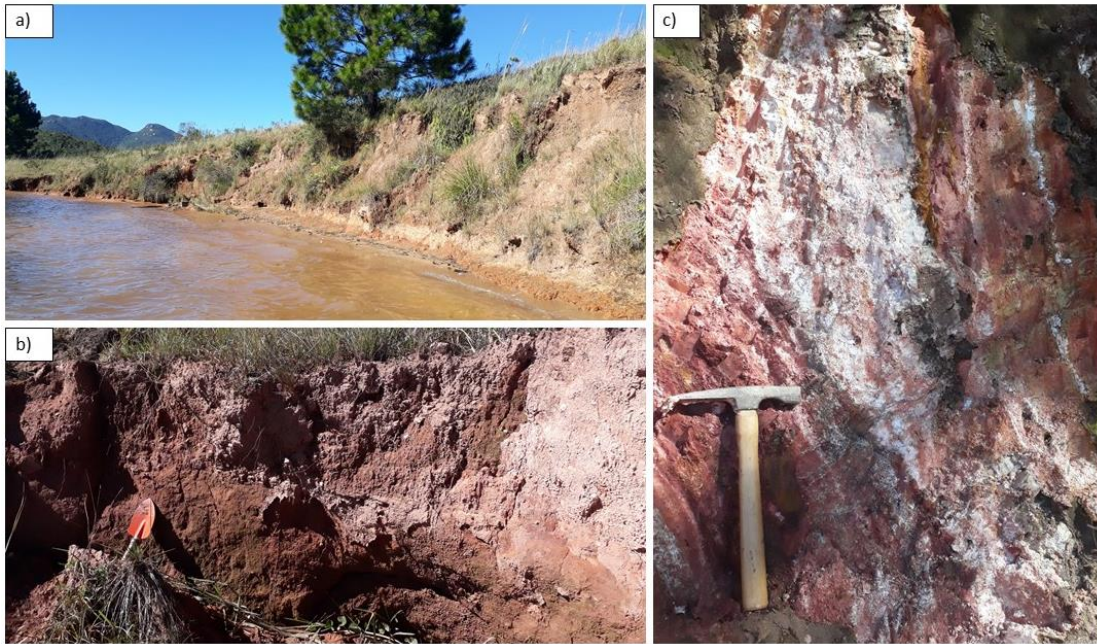


Figura 40: Variação visual e textural de alguns pontos observados em campo a) Ponto 2 com solo marrom amarelado. b) Ponto 3 com solo marrom amarelado. c) Feições reliquiárias, veios de quartzo e bandamentos preservados no Ponto 4.

Partindo para a caracterização geotécnica, diferentemente da hipótese levantada anteriormente, a variação textural e geológica da região não resultou em diferenças contundentes nas respostas dos ensaios. As características dos solos, segundo as análises realizadas se mostraram muito semelhantes umas com as outras, não caracterizando uma condicionante tão importante como se achava no início.

Com base no ensaio granulométrico, todas as amostras apresentaram textura muito arenosa, variando as porcentagens de areia em torno de 50% a quase 80% do total. O principal fator condicionado ao alto teor de areia nos solos é a coesão dos materiais. De acordo com (JACINTHO et al., 2005 e BASTOS, 1999), quanto menor for o Limite de Plasticidade de uma amostra e a porcentagem de finos, mais suscetível o solo será a erosão. O ensaio de Limite de Plasticidade apresentou resultados importantes para a determinação de condicionantes à erosão. Frente a grande parcela de areias na composição, somente na amostra 1 foi possível de se definir o LP, possivelmente por apresentar material argiloso mais expansivo dos que os demais pontos.

Este dado mostra que os materiais presentes nas bordas do reservatório possuem baixa coesão, o que leva a uma maior suscetibilidade ao

desencadeamento dos processos erosivos. Além disso, a baixa coesão afeta na infiltração e percolação da água e, conseqüentemente, afeta a condutividade hidráulica do solo ali presente (SALES et al., (2017). Já com relação ao Limite de Liquidez (LL), as amostras apresentaram altos valores, com certas variações nas porcentagens. Mesmo não sendo considerado um ensaio determinante na caracterização da suscetibilidade erosiva, o LL pode estar atrelado as características residuais de cada ponto analisado.

De acordo com o resultado do ensaio de peso específico dos grãos, dispostos na Tabela 5, as amostras de maneira geral estão entorno do peso específico do quartzo, que é de 2.67, apenas as amostras 3 e 4 possuem valores diferentes. O material coletado no ponto 4 apresenta o maior peso específico (2,9), este valor pode ter correlação com a composição e a rocha fonte deste material. Além disso, este ponto apresentou muitas estruturas reliquias, o que pode sugerir que este solo seja mais jovem e mais preservado em comparação aos demais. De acordo com Serra Junior e Ojima, (1998), os processos erosivos atuantes em solos inconsolidados residuais podem estar atrelados a estruturas como xistosidade e foliação.

Partindo para a análise de erodibilidade, os dois ensaios realizados permitiram classificar os solos em erodíveis e não erodíveis. Para Pejon e Silveira (2007), a correlação dos resultados dos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão são excelentes para a determinação da erodibilidade de um solo. De acordo com o parâmetro (E40) utilizado no trabalho como base, somente a amostra 5 foi classificada como não erodível (vide Figura 33). As amostras 1 e 4 apresentam-se sobre a linha de base, sendo assim já consideradas como erodíveis.

Correlacionando estes resultados de erodibilidade com os horizontes descritos, é possível definir uma certa tendência de que os horizontes mais inferiores apresentem maior erodibilidade. Esta característica pode ser identificada nos horizontes dos pontos 3 e 4. O horizonte inferior descrito no ponto 5, apresenta uma erodibilidade levemente maior do que o horizonte superior.

7.4. DECLIVIDADE

A região do reservatório Piraquara I está inserida a leste de corpos graníticos que influenciam nas características geomorfológicas do relevo. De acordo com o mapa de declividade confeccionada para a região de APA do Piraquara (vide Figura

28), é possível observar que a região leste é a mais íngreme e possui as maiores declividades, chegando a maiores do que 74%. Já nas demais regiões, próximas ao reservatório Piraquara II, a declividade de maneira geral é moderada a baixa.

Porém, a declividade ao redor do reservatório possui maior importância no desencadeamento de processos erosivos. Assim, foi gerado o mapa de declividade focado na APP do reservatório Piraquara I, Figura 41. Este mapa destaca que a porção norte do reservatório possui as maiores declividades, já as demais regiões apresentam declividades entre 3% e 45%. É importante salientar que quanto maior a declividade, mais fino tenderá a ser o solo e menor a capacidade de infiltração. Deste modo o solo tende a ser mais suscetível aos processos erosivos.

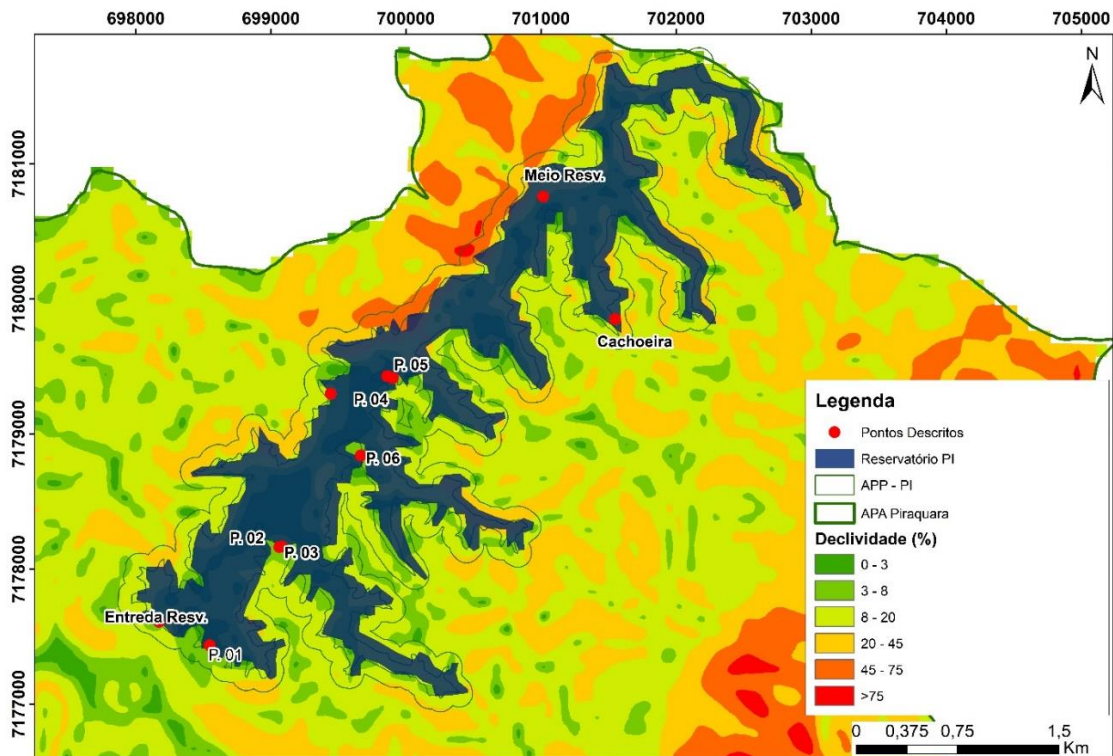


Figura 41: Mapa de declividade existente na região da APP do reservatório Piraquara I.

7.5. TAXA DE SEDIMENTAÇÃO COMO CONSEQUÊNCIA DA EROSIÃO

Conforme descrito na Resolução Nº4 – COALIAR de 2013, o rio Piraquara, situado no município de Piraquara e enquadrado na sub-bacia PI, pertence a classe 1. Esta classe é caracterizada na resolução CONAMA 357 de 2005. Segundo a resolução, estas águas podem ser destinadas ao abastecimento urbano mediante tratamento simples, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas; de frutas que se

desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas. Perante esta definição, as condições de qualidade de água para este reservatório são especificadas no Art. 14, o qual detalha que o parâmetro de turbidez, neste caso, não pode passar de 40 unidades nefelométricas (UNT).

Conforme a classificação, apesar de serem descritos vários pontos com processos erosivos atuantes nas bordas do reservatório, apenas o ponto 6, está fora dos padrões desejados. Isto provavelmente, se deve ao fato de que ficou evidenciado tanto em campo quanto nos ensaios laboratoriais que os solos presentes no entorno do reservatório possuem alta taxa e velocidade de sedimentação, visto a grande porcentagem de areias e pouca de finos.

Assim, embora os pontos em que foram coletadas as amostras de água estivessem próximos aos processos erosivos, a turbidez encontrava-se semelhante quando comparado aos pontos sem presença de erosão. Com base nas características físicas dos materiais, um método mais eficaz para a determinação da turbidez seria a coleta de água na superfície e no fundo do reservatório. Entretanto, mesmo havendo um ponto fora das especificações do CONAMA, o índice ainda sim é considerado baixo quando comparado com as demais classes de água.

7.6. MEDIDAS CORRETIVAS E MITIGATÓRIAS

Após a análise das condicionantes, juntamente com o estudo detalhado da textura e estrutura dos materiais presentes na área de estudo, foram sugeridas algumas medidas corretivas e mitigatórias para a prevenção de futuros desencadeamentos de processos erosivos. É possível dividir as corretivas de acordo com as características morfológicas das bordas do reservatório, principalmente atreladas a declividade.

Para a correção de processos erosivos em locais com baixas declividades, como é o caso do ponto 6, Figura 42, é sugerido a aplicação de bioengenharia ou engenharia natural. Este método vem sendo muito aplicado, visto que podem agir tanto na prevenção quanto na contenção de processos erosivos. O uso de biomantas ou geotêxtil tem como objetivo a retenção de sedimentos, a consequente estabilização do talude e a formação de um ambiente propício para o desenvolvimento da vegetação rasteira, Figura 43 a e b. Apesar do crescente

interesse na engenharia natural, a utilização das biomantas é aconselhada em locais onde a declividade das margens não sejam muito altas (HOLANDA et al., 2009).



Figura 42: Borda do reservatório Piraquara I com possibilidade de aplicação de métodos de bioengenharia para contenção de processos erosivos.

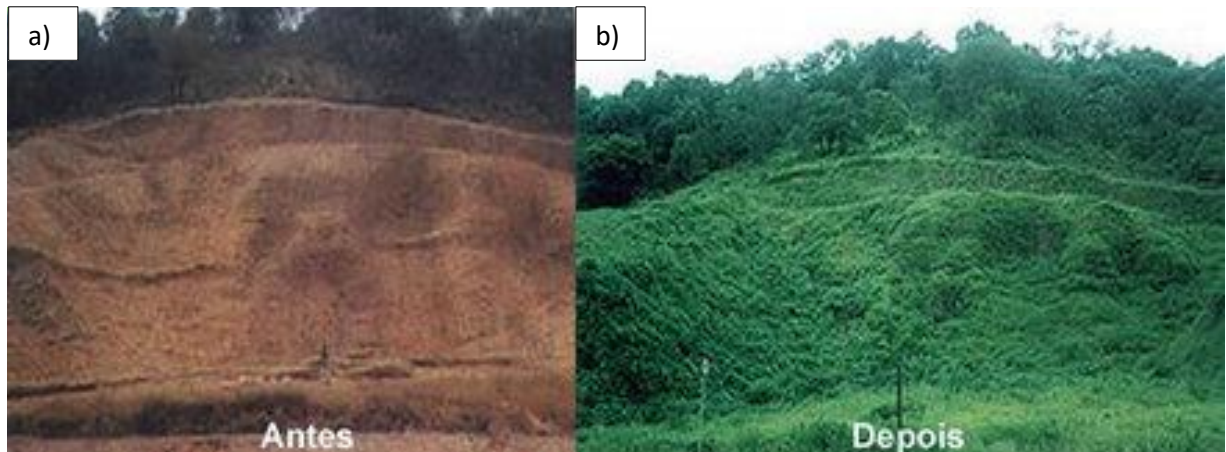


Figura 43: Imagens de utilização de biomantas. a) Local antes da aplicação de biomantas. b) Local após a aplicação de biomantas. Fonte: LAN - Geotecnia e Fundação.

Em locais onde a declividade do terreno é alta, com taludes muito inclinados ou mesmo com composição granulométrica de baixa coesão Figura 44a, b e c, propõem-se a utilização de métodos como a utilização de paliçadas. Este método utiliza-se principalmente hastes de bambu, e tem como objetivo reduzir o escoamento de água e reter pelo menos parte dos sedimentos transportados, acarretando na estabilização do talude e propiciando o desenvolvimento da vegetação. A Figura 45a e b representa o método de construção das paliçadas neste tipo de relevo.



Figura 44: Borda do reservatório Piraquara I com possibilidade de aplicação de paliçada como métodos de contenção aos processos erosivos. a) Ponto 1 com alta declividade na margem. b) Ponto 5 com deslizamento acarretado pela erosão por ondas. c) Ponto 3 com alta declividade da margem e erosão por ondas gerando solapamento.



Figura 45: Utilização de paliçada para locais com alta declividade. Fonte: Vertical Green do Brasil.

Diferentemente das medidas corretivas, as mitigatórias têm como principal objetivo prevenir que novos processos erosivos se desenvolvam. Para que isso aconteça, a gestão do reservatório necessita seguir certas orientações. A primeira

proposta é a realização de estudos geotécnicos e geomorfológicos mais detalhados durante a fase de planejamento do reservatório. Estes estudos auxiliariam na determinação de locais mais suscetíveis aos processos erosivos. Outra sugestão é a implementação de projetos para a conscientização de moradores a respeito do uso consciente das propriedades próximas ao reservatório, com lavouras e pastagens preferencialmente afastadas de regiões contribuintes. A última medida mitigatória é o desenvolvimento de projetos com pátios experimentais que estimulem o plantio de vegetações nativas que reduzam o escoamento superficial de água e auxiliem na estabilização das margens.

7.7. ESTUDOS FUTUROS

Por fim, como forma de ampliar ainda mais o entendimento dos processos erosivos atuantes no reservatório, sugere-se que sejam realizados outros estudos de médio a longo prazo. São importantes primeiramente estudos relacionados a taxa de erosão existentes nas bordas do reservatório, sendo necessário a implantação de estacas graduadas perpendiculares ao talude de forma que seja possível o monitoramento da erosão durante um intervalo de tempo. Outro estudo sugerido seria a realização de batimetria associado a coleta de sedimentos e testemunhos do fundo do reservatório. Este estudo teria como objetivo a caracterização dos locais onde ocorrem maior deposição dos sedimentos erodidos e conseqüentemente maior taxa de assoreamento no reservatório, o que acarreta na diminuição de sua vida útil. Por fim, visto a maciça presença de erosões causadas por ondas, sugere-se que estudos relacionados a avaliação do efeito *Fetch* (direção das ondas) nas bordas do reservatório, uma vez que foram identificados locais onde o impacto das ondas é forte agente causador dos processos erosivos.

8. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização de processos erosivos atuantes nas margens do reservatório Piraquara I e as principais condicionantes para o desencadeamento destes processos. Para isso, foram realizados ensaios geotécnicos, descrição esquemática dos tipos de erosão atuantes nas bordas e a confecção de mapas geológicos e geomorfológicos.

Com base nos resultados da pesquisa, conclui-se que existem condicionantes mais e menos atreladas ao desenvolvimento de erosão. No caso do reservatório em

estudo, o uso e ocupação do solo, juntamente com a declividade e a variação no nível de água do reservatório são as condicionantes mais eficazes. Associado as erosões por ondas, lineares e interna, as quais são as mais recorrentes no reservatório, estas condicionantes aumentam a suscetibilidade das bordas à erosão. Apesar de parecer, a priori, uma condicionante importante, a variação geológica existente na região não se apresentou muito relevante, uma vez que a maior parte dos materiais inconsolidados estudados apresentaram características geotécnicas bastante semelhantes e, portanto, indiferenciadas para uma avaliação de predisposição a ocorrência de erosão.

Durante os estudos de campo puderam ser diferenciadas três mecanismos condicionantes para a ocorrência de processos erosivos. O primeiro deles está associado a locais afetados por variações rápidas de nível d'água, as quais podem gerar a ocorrência do *piping*, que foi observado em diferentes pontos independente das características de declividade do talude marginal. O segundo mecanismo está associado ao embate das ondas, gerando erosão da porção inferior das margens de regiões de alta declividade e consequente solapamento da porção superior do talude, gerando elevados volumes de perdas de solos. O terceiro mecanismo está relacionado a erosão superficial de solo, nas regiões de baixa a média declividade, gerando sulcos e ravinas. Este processo é menos agressivo, porém não menos importante uma vez que pode evoluir para processos mais complexos como as voçorocas.

Embora seja inevitável a existência de processos erosivos nas margens de qualquer reservatório de água, as medidas corretivas e mitigatórias, bem como a ampliação nos estudos mais aprofundados deste assunto são fundamentais para que sua vida útil seja prolongada. A avaliação e conhecimento dos mecanismos envolvidos no Piraquara I auxiliará a nortear a proposição das medidas corretivas mais adequadas para cada caso, bem como auxiliar na proposição das medidas mitigadoras.

REFERÊNCIAS

- ABNT. 1986. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostra deformada e indeformada. Rio de Janeiro, 9 p.
- ABNT. 1984. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 170 p.
- ABNT. 1984d. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6459: Solo- Determinação do Limite de Liquidez.
- ABNT. 1986. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6457: Amostras de Solo- Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.
- Avenza. 2000. Mapublisher version 4.00 (Software). Avenza Systems Inc. Canada. 1 CD-ROM.
- Bacellar L. A. P. 2000 Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá. Ouro Preto, MG, 2000. COPPE/UFRJ, (Eng. Civil) Tese de doutoramento
- Bastos, C. A. B. 1999. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Poro Alegre, 1999.303 p.
- Bastos, C. A. B.; Milititsky, J. Gehling, W. Y. Y. 2001. *Proposta metodológica para avaliação geotécnica de erodibilidade de solos residuais não saturados*. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, GO. 9 p.
- Bertoni J. & Lombardi Neto F., 1985. *Conservação do solo*. Piracicaba, Livroceres.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. 2010. *Conservação do solo*. 7ª ed. São Paulo. Editora Ícone. 355p.
- Britannica, E. 2019. Encyclopædia Britannica, Inc., 23 Jan. 2019.
- Camapum de Carvalho, J.; Lima, M. C. & Mortari, D. 2001. *Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas*. 7º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Goiânia - GO
- Camapum de Carvalho, J., Sales, M.M., Souza, N.M. & Melo, M.T. da S. 2006. *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília.
- Carvalho, N.O. 2000. Assoreamento de reservatórios – conseqüências e mitigação dos efeitos. In: Encontro Nacional de engenharia de Sedimentos, 4, 2000. Santa Maria. Cd rom. 1.
- Carvalho, N. de O. 1991. Curso de transporte e dispersão de sedimentos e cálculo da vida útil de reservatórios. Programa de impactos ambientais de barragens, Convênio de cooperação técnica SUREHMA/GTZ, 227 p.
- Carvalho, N. DE O., Filizola Junior N. P., Santos P.M.C. 2000. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas.
- Carvalho, N. O 2008. *Hidrossedimentologia prática*. 2º Edição – revisada e ampliada. Editora Interciência. Rio de Janeiro.
- Chanson, Hubert. 1998. Extreme reservoir sedimentation in Australia: a review. **International Journal of Sediment Research**, v. 13, n. 3, p. 55-63.
- COALIAR - Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira 1989. Resolução nº 04, de 11 de julho de 2013. Aprova proposição de atualização do enquadramento dos corpos de águas superficiais de domínio de Estado do Paraná, na área de abrangência do Comitê das Bacias do Alto

Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, em classes, de acordo com os usos preponderantes. Constituição do Estado do Paraná, Curitiba, PR. 1989.

Coelho Netto A L., Fernandes N.F., Dantas, M.E., Montgomery, D., Davis, J.C., Proctor, I., Voggel, J., Southon, J. 1999. 14 C AMS evidences of two Holocene erosion-sedimentation cycles in SE Brazil: stratigraphy and stratigraphic inversions. In: 14 th Int. Sedim. Congress, pp. 29-30. Recife.

Companhia DE Saneamento do Paraná (SANEPAR). 2013. Plano Diretor SAIC: Sistema de abastecimento de água integrado de Curitiba e região metropolitana. 142p. Curitiba.

CONAMA, Resolução. 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**, v. 357. 2005.

Couto, Bruno de Oliveira Costa. 2015. Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos.

Cooke, R. V. 1990. **Geomorphology in environmental management: a new introduction**. Oxford University Press (OUP).

D'armada, J.C.R. 2012. Como as Ondas Geradas pelo Vento e as Características da Vegetação Ciliar Influenciam Erosões em Margens de Reservatórios: UHE Porto Colômbia, um Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado, Departamento de Energia, Sociedade e Meio Ambiente, Universidade Federal de Itajubá, MG, 77 p.

Dias, L.N. 1997. Estudo integrado da bacia hidrográfica do reservatório Passaúna (Araucária – Paraná – Brasil), considerando a interrelação da ocupação dos solos com a qualidade das águas. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Hidráulica e Saneamento. USP. São Carlos.

DNER: **Departamento Nacional de Estradas de Rodagem**. ME 256-94. Solos compactados com equipamento miniatura determinação da perda de massa por imersão. 6p. 1994,

Dunne T. 1980. Field Studies of Hillslope Flow Process. In: Kirkby M.J.(Eds.) *Hillslope Hydrology* 3ed. John Wiley & sons, pp.:227-293.

ESRI®. 2019. ArcMap. Version 10.6.1. Disponível em:<https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>.

Fendrich, R. 1997 Drenagem e Controle da Erosão Urbana. 4º Ed. Curitiba: Champagnat. p. 32.

Futai, M. M.; Almeida, M. S. S.; Lacerda, W. A. 2005. Evolução de uma voçoroca por escorregamento retrogressivos em solos não saturados. In: Conferencia Brasileira de Estabilidade de Encostas, 4., Salvador. Anais...Salvador, 2005. 443-452 p.

Guerra, A. J. T. (Org.); Silva, A. S. (Org.); Botelho, R. G. M. (Org.). 2005. *Erosão e Conservação dos solos*. 2º edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 340 p.

Guerra, A. J. T.; Mendonça, J. K. S. 2004. *Erosão dos solos e a questão ambiental*. In: Vitte, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.). Reflexões sobre a geografia física do Brasil. São Paulo: Bertrand Brasil.

Godoy R. F. B. 2017. Dinâmica da qualidade da água em reservatório de abastecimento público: estudo de caso do Passaúna – PR. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 230 pp.

Google Earth Pro. Version 7.3.2.5491 (64-bit). 2019. Image Landsat: Nova Trento - SC. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 4 abril 2019.

Guimarães, Leandro José Ribeiro. 2008. Levantamento das áreas potenciais ao assoreamento da barragem Piraquara I.

Jacinto, E. C.; Guimarães, R. C.; Camapum de Carvalho, J.; Farias, M. M. 2005. *Influência das propriedades químicas e mineralógicas no comportamento mecânico, hidráulico e na erodibilidade de*

solos. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiânia, GO. 169 – 181 p.

Hargerty, D. J. 1991. *Piping/sapping erosion. I: basic considerations*. Journal of Hydraulic Engineering, 117 (8). 991-1008 p.

Holanda, Francisco Sandro Rodrigues et al. 2009. Controle da erosão em margens de cursos d'água: das soluções empíricas à técnica da bioengenharia de solos. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 17.

Infanti, J.N.; Fornasari, F.N. 1998. Processos de dinâmica superficial. In: Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE.

Jesus, A. S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares**: estudo de caso da cidade de Anapolis (GO). 2013. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

Lal, R. 1990. *Soil erosion in the tropics*. New York, McGraw Hill.

LAS Geotecnia e Fundação. 2019. Disponível em:<<https://sites.google.com/site/langeotecniaefundacao/contato/46-biomantas>>.

Mendes, C. A. R. 2006. *Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ*. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro. 236 p.

Menezes, A. V. D. 2016. Proposta metodológica para estudo de perda de massa de solos situados em bordas de reservatório devido ao efeito de ondas por meio de um canal hidráulico.

MINEROPAR–Minerais, do Paraná SA. 2001. Atlas geológico do Estado do Paraná. **Curitiba: Mineropar**, v.1.

MINEROPAR–MINERAIS, D. P. S., & do Paraná, C. G. D. E. 2005. Escala 1: 250.000. Folha Curitiba (SG-22-XD). *Curitiba: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Zoneamento Ecológico-Econômico do Paraná*.

Nogami, J. S.; Villibor, D. F. 1979. *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area*. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, v. 19, n. 1, p. 196.

Nogami, Job Shuji, e Douglas Fadul Villibor. 1981. "Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias." *Anais Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. p 30-41.

Pejon, O. J. 1992. *Mapeamento geotécnico, regional da falha de Piracicaba: Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). EESC-USP. São Carlos.

Pejon, O. J.; Silveira, L. L. L. 2007. Index properties to predict erodibility of tropical soil **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. Vol. 66, n 2. p. 225-236.

Pellegrini, A. 2006. *Sistemas de cultivo da cultura de fumo com ênfase às práticas de manejo e conservação de solo*. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

Rubio M. F. 2014. Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios. Pesquisa desenvolvimento no estudo de caso nas UHEs Chavantes e Rosana (rio Paranapanema, SP/PR). Diss. Universidade de São Paulo.

Ross, Jurandir Luciano Sanches. 1990. Geomorfologia: Ambiente e Planejamento. Sao Paulo: Contexto. 85p.

Vertical Green Tecnologias. 2019. Disponível em : <<http://verticalgreen.com.br/tecnologias/tecnicas-de-engenharia-naturalistica/palitada-simples/>> .

Vilar, O. M.; Prandi, E. C. 1993. *Erosão dos solos*. IN: Cintra, J. C. A.; Albiero, J. H. (Org.). *Solos do Interior de São Paulo*. São Carlos. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; USP, v. 1. P. 177-206.

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná & CONSILIU – Projetos e Consultoria Ltda. 2002. *Planos de uso e ocupação das águas e do entorno dos reservatórios dos rios Iraí, Piraquara I e Passaúna na Região Metropolitana de Curitiba*. Curitiba, Paraná.

Sales, M. M. et al. 2017. *Erosão em bordas de reservatório*. 1 ed. 3 vol. Goiânia: Gráfica UFG.

Santos dos R. M. M. 1997. Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia. p. 138 Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília.

Santos, Leonardo J. C.; OKA-Fiori, Chisato; CANALI, Nady E.; FIORI, Alberto P.; SILVEIRA, Claudinei T.; SILVA, Julio M. F. & ROSS, Jurandir L. S. 2006. **Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná**. In: Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 7, no 2. Uberlândia: UGB, pp. 3-12.

Saunitti, R. M. 2003. Estudos sobre a erosão na bacia e assoreamento do reservatório do rio Passaúna Curitiba. *Boletim Paranaense de Geociências* 53.

Serra Junior, E.; Ojima, L. M. 1998. Caracterização e classificação de maciços rochosos. **OLIVEIRA, AM; BRITO, SNA Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE**, p. 211-226.

Sorre, Max. 1951. Os problemas geográficos atuais das migrações. **Boletim Geográfico**, n. 122.

Souza C. A. 1991. *Metodologia da entrevista: uma abordagem fenomenológica*. Agir.

Solos, E. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro.

Suertegaray, Dirce Maria Antunes; Fujimoto, N. S. V. M. 2004. Morfogênese do relevo do Estado do Rio Grande do Sul. **Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação. Porto Alegre: Editora da UFRGS**, p. 11-26.

Tatto, J. 2007. Análise dos Parâmetros Geológicos-Geotécnicos que Condicionam Erosão por Voçoroca no Município de São Francisco de Assis. **Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria**.

LLopis Trillo, G. 1999. Control de la erosión y obras de deságüe. *Manual de la estabilización y revegetación de taludes*, 287-390.

Young, H. D.; Freedman, R. A. 2008. Física II: Termodinâmica e ondas. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley. 329p.