



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 7, n° 2 (2021)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID19109>



## AVALIAÇÕES DIRETAS E INDIRETAS DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ

Lucas Manoel da Silva<sup>1</sup>; Gabriel Oberon Bertoldi Oliveira<sup>2</sup>; Rafael Silva do Nascimento<sup>3</sup>; Ana Elza Dalla Roza<sup>4</sup>; Flavio Alessandro Crispim<sup>5</sup>; Fernanda Pereira Gouveia<sup>6</sup>; Júlio Augusto de Alencar Junior<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Mestrado em Engenharia de Barragens e Meio Ambiente, Departamento de Engenharia Civil, UEMASUL, Açailândia/MA, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6119-0114>

Email: lucas.silva@uemasul.edu.br

<sup>2</sup>Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, UNEMAT, Sinop/MT, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-7306>

Email: gabrielloberon@gmail.com

<sup>3</sup>Mestrado em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, UFPA, Tucuruí/PA, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9309-9614>

Email: rafaacs@gmail.com

<sup>4</sup>Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, UNEMAT, Sinop/MT, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6687-6791>

Email: ana.roza@unemat.br

<sup>5</sup>Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, UNEMAT, Sinop/MT, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4604-9876>

Email: flavio.crispim@unemat.br

<sup>6</sup>Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, UFPA, Tucuruí/PA, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0517-0960>

Email: fefegouveia@yahoo.com.br

<sup>7</sup>Doutorado em Engenharia Civil, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, UFPA, Tucuruí/PA, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4828-5039>

Email: jalenca@ufpa.br

### Resumo

A UHE Tucuruí, além de ser a 5ª maior hidrelétrica do mundo em capacidade de geração, promove energia a vários estados brasileiros, e, tendo um reservatório de 2.917 km<sup>2</sup>, está fortemente sujeita à manifestação de processos erosivos. Diversos trabalhos relatam a ocorrência de feições erosivas nas proximidades de seu lago, além de estar constantemente sujeita a ações erosivas laminares em suas áreas de drenagem. Neste trabalho foram realizados análises diretas e indiretas da erodibilidade de amostras dos principais solos do reservatório da UHE Tucuruí. As análises indiretas empregaram formulações baseadas em características físicas dos solos e as diretas testaram amostras indeformadas sob escoamento superficial, processos de imersão gradual e total em água, e sob intensos níveis de amolgamento, para avaliações na metodologia Miniatura Compactada Tropical – M.C.T. Verificou-se que as amostras classificadas pedologicamente como Argissolo e Latossolo Amarelo apresentaram médias taxas de erodibilidade e baixos níveis de desagregação, enquanto o Latossolo Vermelho apresentou baixa erodibilidade, médios a altos níveis de desagregação, e expansões na metodologia M.C.T.. Tais conclusões indicam que a atividade agrícola da área deve privilegiar culturas que mantenham a cobertura superficial das áreas dos primeiros solos e a prevenção de usos que possam desestruturar e amolgar o último solo..

**Palavras-chave:** Erodibilidade; UHE-Tucuruí; Inderbitzen.

### DIRECT AND INDIRECT ASSESSMENTS OF SOIL ERODIBILITY IN THE TUCURUÍ HYDROELECTRIC POWER PLANT RESERVOIR

#### Abstract

The Tucuruí Hydroelectric Power Plant (HPP), is the 5th largest hydroelectric dam in the world in generating capacity and it transfers electric power to several Brazilian states. Because of its reservoir of 2,917 km<sup>2</sup>, it is strongly subject to the manifestation of erosive processes. Several studies report the occurrence of erosive features near its lake, besides being constantly subject to

laminar erosive actions in its drainage areas. In this work, direct and indirect assessments of samples of erodibility from the main soils in the Tucuruí HPP reservoir were performed. The indirect ones employed formulations based on physical characteristics of the soil and the direct ones tested undisturbed samples under runoff, gradual and total water immersion processes, and under intense levels of compaction, for evaluations in the Miniature, Compacted, Tropical (MCT) methodology. It was verified that the samples classified as Argisol and Yellow Oxisol presented medium erodibility rates and low levels of disaggregation, while the Red Oxisol presented low erodibility level, medium to high levels of disaggregation, and expansions in the MCT. These conclusions indicate that the agricultural activity in the area must favor crops that maintain the surface coverage on the first two soils mentioned and avoid uses that may disrupt and cause compaction on the last one.

**Keywords:** Erodibility; Tucuruí HPP; Inderbitzen.

## EVALUACIONES DIRECTAS E INDIRECTAS DE ERODIBILIDAD DE SUELOS DEL DEPÓSITO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE TUCURUÍ

### Resumen

La UHE Tucuruí, además de ser la quinta central hidroeléctrica más grande del mundo en términos de capacidad de generación, abastece de energía a varios estados brasileños y, con un embalse de 2.917 km<sup>2</sup>, está fuertemente sujeta a la manifestación de procesos erosivos. Varias obras reportan la ocurrencia de rasgos erosivos en las cercanías de su lago, además de estar constantemente sometidas a acciones erosivas laminares en sus áreas de drenaje. En este trabajo se realizaron análisis directos e indirectos de la erosionabilidad de muestras de los principales suelos del embalse UHE Tucuruí. Los análisis indirectos utilizaron formulaciones basadas en características físicas de los suelos y los directos probaron muestras no perturbadas bajo escorrentía superficial, procesos de inmersión gradual y total en agua y bajo niveles intensos de abolladuras, para evaluaciones en el Tropical Compactado Miniatura - M.C.T. Se encontró que las muestras clasificadas pedológicamente como Ultisol y Latosol Amarillo presentaron índices de erosionabilidad medios y niveles bajos de desagregación, mientras que Latosol Rojo presentó niveles de erosionabilidad bajos, niveles de desagregación medios a altos y expansiones en la metodología MCT. Actividad agrícola en el área debe favorecer cultivos que mantengan la cobertura superficial de las áreas de los primeros suelos y la prevención de usos que puedan desestructurar y abollar el último suelo.

**Palabras-clave:** Erodibilidad; UHE-Tucuruí; Inderbitzen

## 1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí estando instalada no município de Tucuruí, interior do estado do Pará, na região norte do Brasil e possuindo capacidade de geração de 8.375 MW, é atualmente a quinta maior hidrelétrica do mundo, promovendo energia para nove estados brasileiros, tendo mais de 30 anos, e implantada no bioma Amazônico, é tida conforme Comissão Mundial de Barragens – CMB (2000), como um marco para o Brasil e o mundo, contudo, possui em sua cota máxima um dos maiores reservatórios de água já construídos, com extensão de 175 km, volume de 50,3 bilhões de m<sup>3</sup> e área de 2.917 km<sup>2</sup>.

De acordo com CMB (2000), a bacia hidrográfica do Tocantins localiza-se por completo na província geológica da Amazônia Oriental, e é caracterizada por ambientes geológicos distintos, em função da época em que se originaram e pelos dois eventos tectônicos a que estiveram submetidas. Em especial, a área de influência do reservatório de Tucuruí é caracterizada por dois domínios geológicos, sendo um, o embasamento cristalino, constituído por rochas ígneas e metassedimentares, e outro, por cobertura sedimentar, constituída por sedimentos que se depositaram durante os períodos mesozóico e cenozóico (terciário e quaternário). Dessa maneira, o reservatório está situado na zona de contato entre as rochas cristalinas do Complexo Xingú na margem esquerda e rochas metamórficas de baixo grau, do grupo Tocantins, em ambas as margens e no leito do rio (CMB, 1999).

Ainda conforme CMB (1999), o local de implementação da barragem de Tucuruí se situa no fim de um longo trecho encachoeirado, que pode ser dividido em três unidades de relevo, como o Planalto Setentrional Pará-Maranhão, Planalto Rebaixado do Amazonas, e a Depressão Periférica do Sul do Pará, que abrange quase por completo a área do reservatório, tendo sua origem relacionada à atuação de processos erosivos iniciados no final do período terciário, apresentando inclusive várias formas de relevo na região, como áreas com superfícies pediplanadas, áreas dissecadas em colinas de topo aplainado e planícies fluviais.

Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2002), citado pelo Ministério de Desenvolvimento Regional – MDR (2018), os solos que perfazem o reservatório da hidrelétrica são predominantemente Argissolos Vermelho Amarelo – PVA, Latossolos Amarelos – LA, Latossolos Vermelhos Amarelos – LVA, e em seu leito, depósitos de materiais sedimentares, conforme a Figura 1, com as respectivas cores cinza, marrom claro, marrom escuro e branco, sendo, conforme a Comissão Mundial de Barragens – CMB (2000), tidos normalmente como ácidos, de baixa fertilidade natural e quantificados em 60% Argissolos, 25% Latossolos Vermelhos-Amarelos e Amarelos, e 15% de outros tipos.

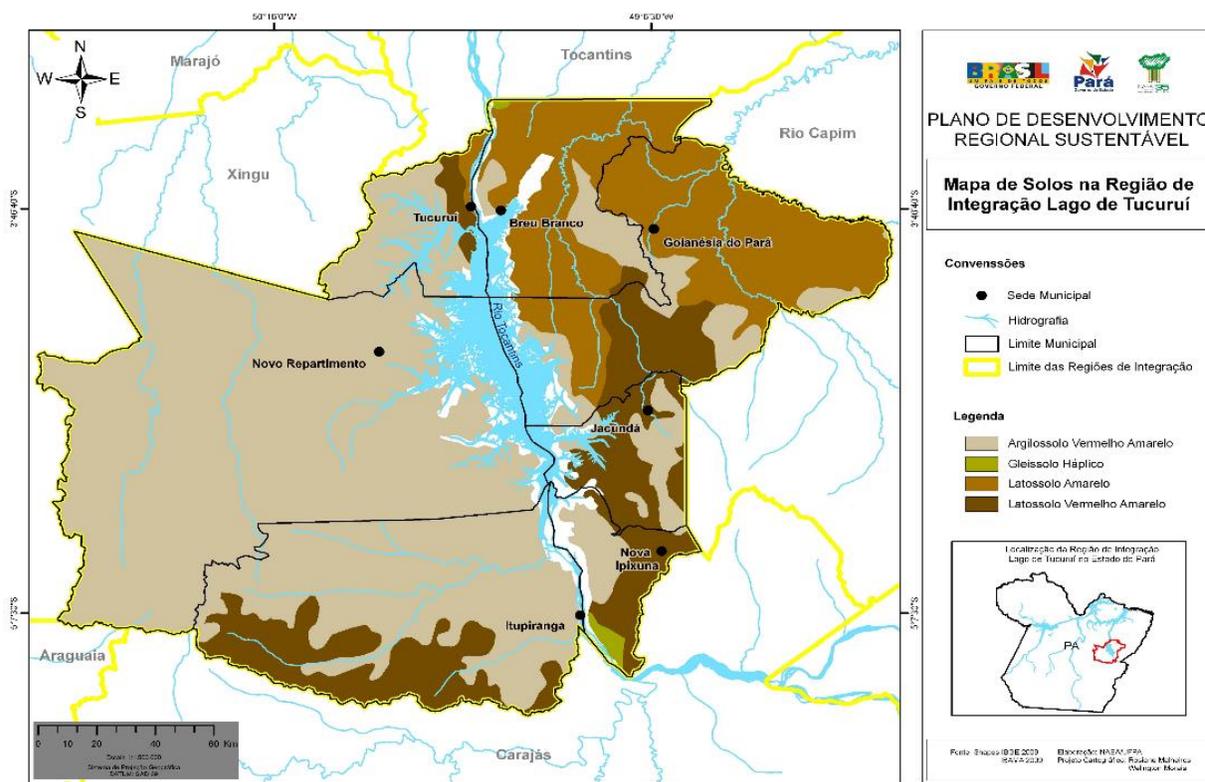


Figura 1 - Mapa pedológico de solos da área de Integração do lago de Tucuruí-PA. Fonte: Ministério de Desenvolvimento Regional – MDR (2018).

Ademais, nos projetos de aproveitamento hidrelétricos deve-se considerar o risco de assoreamento aos reservatórios independentemente de seu porte. Assim, conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2000), levando-se em consideração os efeitos do assoreamento, a UHE Tucuruí tem vida útil de 1000 anos. Entretanto, campanhas de estudos hidrossedimentológicos do afluente do Rio Tocantins e Araguaia de 1975 a 1982, apontaram apenas 400 anos de vida útil com garantia da segurança dos equipamentos de geração (ELETRONORTE, 1988), sendo, ainda, que o cenário atual distingue-se muito dos anteriores, pois não consideraram o avanço das áreas desmatadas (FEARNDDISE *et al.*, 2015).

A transformação da área do reservatório foi avaliada em diferentes escalas espaciais e temporais, como dos anos de 1996 a 2001, constatando-se uma leve redução das áreas de florestas do reservatório (VASCONCELOS e NOVO, 2004); em uma escala

temporal maior, como dos anos de 1988 a 1999, observando-se taxas de desmatamento de 70,673 ha/ano (MONTTOYA *et al.*, 2018), e analisando apenas a área do Município de Novo Repartimento que detém 38,5% da área do reservatório (MDR, 2018), nos anos de 2000 a 2013, verificou-se um incremento de áreas desmatadas de 141,67%. (FARIAS *et al.*, 2018), notando-se, dessa maneira, as modificações territoriais previstas por Fearndise *et al.* (2015).

Estudos e visitas de campo como os de Macêdo *et al.* (2007) e Barrata (2011) apontam a instauração de processos erosivos em regiões do reservatório da UHE Tucuruí, conforme apresentado na Figura 2. Neste contexto, buscou-se realizar avaliações diretas e indiretas da erodibilidade baseadas em formulações empíricas e em simulações de processos erosivos em laboratório de amostras de solos das três formações pedológicas da área do reservatório.

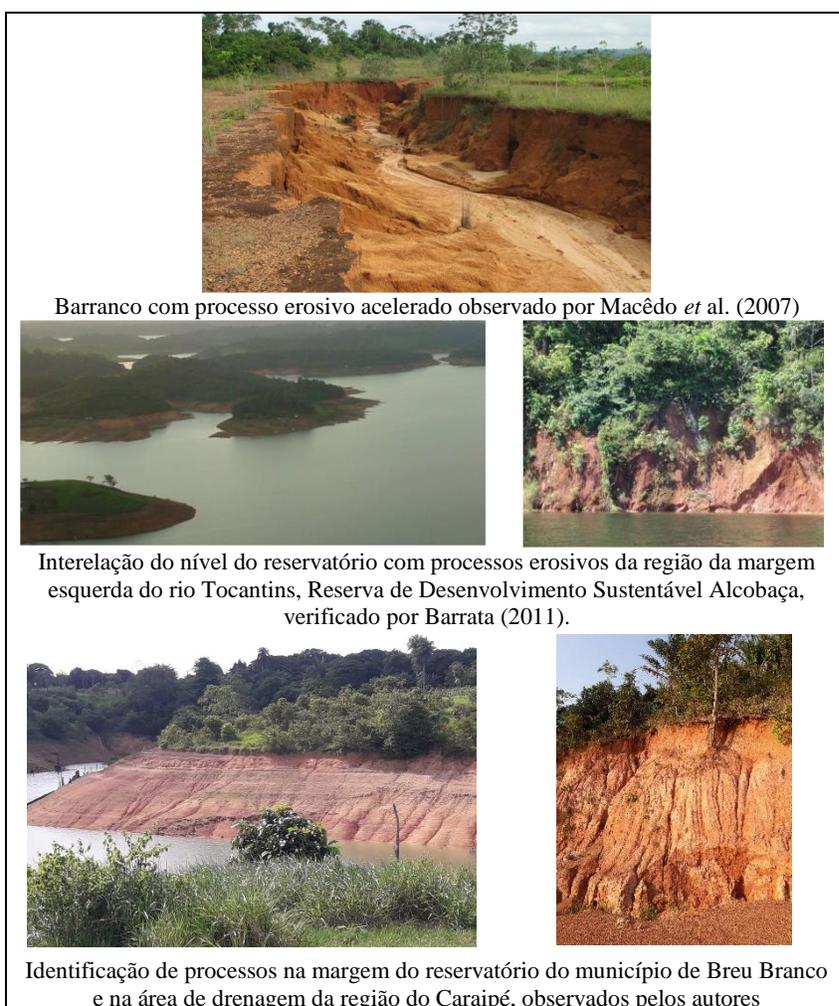


Figura 2 - Manifestação de processos erosivos acelerados observados. Fonte: Adaptado de Macêdo *et al.* (2007), Barrata (2011).

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente foram realizadas visitas de campo nas áreas do reservatório das três formações pedológicas por meio de vias terrestres, posteriormente executaram-se sondagens de prospecção a trado e a cavadeira manual até a profundidade de 2 metros, e comparando as características descritivas do perfil de campo com as previstas para cada tipologia de solo, conforme o Manual Técnico de Pedologia e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, respectivamente disponibilizados pelo IBGE (2007) e pela EMBRAPA (2018), pôde-se constatar a compatibilização da classificação pedológica do local de prospecção com a estimada pelo mapa pedológico do Plano diretor dos municípios de Tucuruí e Breu Branco, e sendo, paralelamente, observados os principais processos erosivos existentes nas proximidades.

De maneira concomitante ao da avaliação de compatibilização pedológica citada anteriormente, foram também observadas as características morfológicas expostas pela CMB (1999), como sua localização entre suas respectivas zonas

de material litológico cristalino na margem esquerda (mais distante da borda do reservatório da barragem) e metamórfico em ambas as margens e no leito do rio, além de constatar respectivamente suas formas de relevo, como áreas com superfícies pediplanadas, áreas dissecadas em colinas de topo aplainado e planícies fluviais.

Tais características morfológicas promoveram na margem esquerda do reservatório um relevo de menor altitude e declividade, enquanto da margem direita o cenário é o oposto, como pôde ser constatado em campo e também através de análises altimétricas de mapas disponibilizados em bases de acesso virtual livre como o da OpenStreetMap®.

Atrelado destas verificações foi também constado bibliograficamente que conforme Macêdo (2007), ao analisar computacionalmente os declives de áreas tidas como prioritárias do reservatório, para implementação de medidas intervencionistas, que promovessem a redução de sua erodibilidade e aumento da fertilidade, que variavam de 0% à 30%, e buscando simular os fenômenos de escoamento superficial de campo com mais fidedignidade, estabeleceram-se os solos de

loais de amostragem no relevo onde suas condições pedológicas eram resguardadas e que estivessem localizadas na parte intermediária ou inferior das vertentes.

### 2.1. Amostragem

A definição dos locais de coleta e amostragem foi realizada considerando a premissa da similaridade pedológica do solo, de suas feições erosivas, acessibilidade dos locais e a não presença de pedregulho, definindo-se os locais e o método de amostragem,

utilizando o Cilindro Biselado estabelecido pela ABNT NBR 9813 (2016), com o emprego de um sistema de cravação hidráulico contínuo e lento em trincheiras. A coleta, o armazenamento, o transporte e a imersão sob pedra porosa por 3 dias, são mostrados na Figura 3.

Foram executadas duas trincheiras de 8,0 m de comprimento, 0,7 m de largura e 0,5 m de profundidade, onde coletou-se 24 amostras com o cilindro biselado e uma amostra de cada extremidade para os estudos de caracterização.

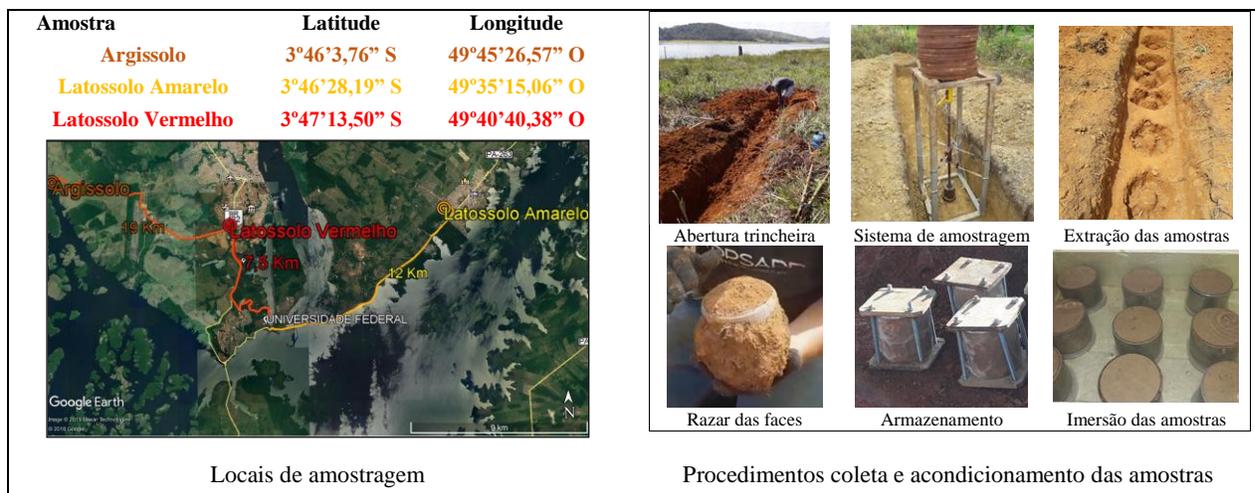


Figura 3 - Locais e procedimentos de amostragem. Fonte: Os autores.

### 2.2. Ensaios de caracterização e avaliações complementares

Para a caracterização dos solos, foram feitas as determinações de cada amostra coletada nas extremidades das trincheiras,

totalizando 4 verificações por solo, sendo executados os ensaios conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.

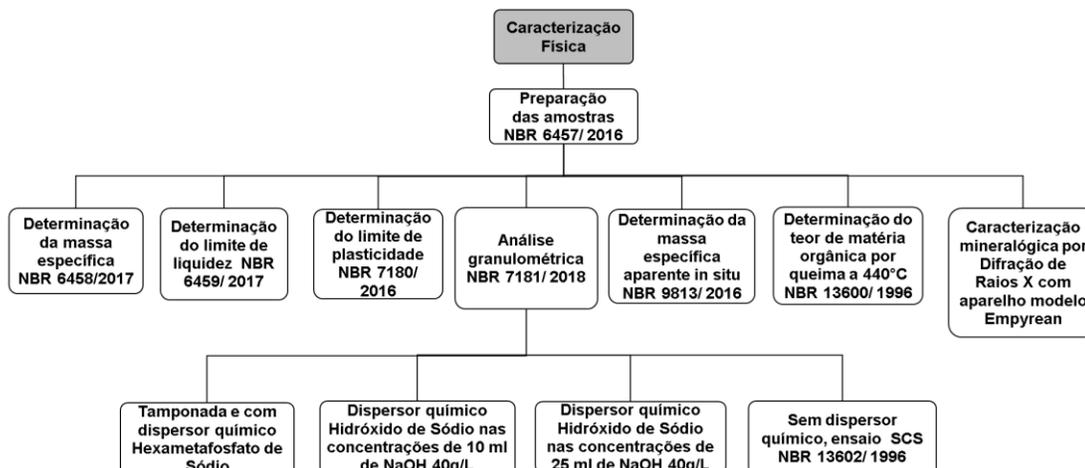


Figura 4 - Fluxograma dos ensaios de caracterização das amostras. Fonte: Os autores

Para verificações adicionais quanto ao comportamento mecânico hidráulico das amostras, foram realizados 4 vezes os ensaios, de acordo com as suas respectivas metodologias:

- Para a avaliação das amostras na metodologia **Miniatura Compactada Tropical** foi empregado o **Método Expedito das Pastilhas** de Nogami e Villibor (1994), sendo realizados 5 partilhas e 4 aferições de leituras de penetração por pastilha.

- **Ensaio de Desagregação** Slaking Test para a análise da presença de elementos solúveis, a disposição de fase gasosa e a possível ocorrência de argilo minerais expansivos, sendo moldadas amostras em formato cúbico com arestas de 60 mm de solo indeformado e em umidade próxima a natural de acordo com

a metodologia descrita por Santos (1997), sendo submetidas à imersão total e imersão parcial, e ambas com constância de seus níveis de água.

### 2.3. Determinações indiretas da erodibilidade

De acordo com Araújo *et al.* (2011) e Correchel (2003), ao longo dos anos, com importantes avanços no estudo da erodibilidade em diversos campos, foi possível desenvolver vários métodos de determinação da erodibilidade dos solos de modo indireto, baseados em diversas características, dentre elas, as que utilizam propriedades físicas, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Feições erosivas identificadas na área do reservatório. Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2011) e Correchel (2003).

Autores	Utilização de propriedades	Métodos indiretos para a determinação do fator K
Wischmeier, <i>et al.</i> (1971) método 1	Físicas	$K = (\% \text{ areia} + \% \text{ silte}) / ((\% \text{ argila}) \times 100)$ , onde o Fator K é dado em $(\text{Mg ha h}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1})$ e % areia, % silte e % argila representaram as porcentagens das respectivas frações granulométricas para o horizonte A.
Lombardi Neto & Bertoni (1975)	Físicas	$K = ((\% \text{ argila dispersa em água}) / (\% \text{ argila total})) / ((\% \text{ argila total}) / (\% \text{ umidade equivalente}))$
Lombardi Neto & Bertoni (1975) modificada por Lima <i>et al.</i> (1990)	Físicas	$K = (\% \text{ silte} + \text{ argila dispersos em água}) / (\% \text{ silte} + \text{ argila totais}) / ((\% \text{ argila total}) / (\% \text{ umidade equivalente}))$
Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2	Físicas	$K = \{ [ 2,1 (10^{-4}) (12\text{-MO}) M^{1,14} + 3,25 (\text{EST-2}) + 2,5 (\text{PER-3}) ] / 100 \} 0,1317$ onde: K é o valor estimado para o fator K, em $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ; M é a soma dos teores de silte (%) e areia muito fina (%) multiplicada por 100 menos o teor de argila (%), sendo a análise granulométrica feita com uso de NaOH 1 mol L <sup>-1</sup> como dispersante; MO é o teor de matéria orgânica (%); EST e PER são códigos, adimensionais, correspondentes à estrutura e permeabilidade do solo, respectivamente, conforme descrição em Wischmeier <i>et al.</i> (1971). O fator 0,1317 na equação refere-se à conversão da unidade original do fator K para o sistema métrico internacional, de acordo com Foster <i>et al.</i> (1981).
Lima <i>et al.</i> (1990)	Físicas	$K = \{ [ 2,1 (10^{-4}) (12\text{-MO}) Ma^{1,14} + 3,25 (\text{EST-2}) + 2,5 (\text{PER-3}) ] / 100 \} 0,1317$ onde: Ma é a soma dos teores de silte (%) e areia muito fina (%) multiplicada por 100 menos o teor de argila (%), sendo a análise granulométrica feita somente com água como dispersante. Os demais parâmetros desta equação são os mesmos descritos para equação original de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) método 2.
Denardin (1990) método 2	Físicas	$K = 0,0000748(\text{M}) + 0,00448059(\text{PER}) - 0,06311750(\text{DMP}) + 0,010396(\text{REL})$ onde: DMP = diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2 mm; REL = produto do teor de matéria orgânica (%) pela percentagem de partículas de diâmetro entre 0,1 e 2 mm. Em todos os casos a análise granulométrica foi feita usando-se NaOH 1 mol L <sup>-1</sup> .
Roloff & Denardin (1994) método 1	Físicas	$K = 0,0049 \text{ PER} + 0,0331 \text{ Mm}^{0,5}$ onde: Mm é teor de silte ( $\text{g g}^{-1}$ ) multiplicado pela soma de silte e areia fina ( $\text{g g}^{-1}$ ), sendo a análise granulométrica feita com NaOH 1 mol L <sup>-1</sup> .

Bastos (1999), após avaliar extensivamente a erodibilidade da região metropolitana de Porto Alegre – RS e os seus parâmetros fundamentais, definiu que a erodibilidade de um solo sujeito a escoamento pluvial é função das tensões cisalhantes de sua

superfície. Assim, segundo o mesmo, a erodibilidade expressa pelo K ( $\text{g.cm}^{-2} \cdot \text{min.} / \text{Pa}$ ), pode ser classificada como Alta quando o solo estiver  $K > 0,1$ , Mediana quando o K estiver entre 0,1 e 0,001 e baixa quando estiver com  $K < 0,001$ . Posteriormente,

Mannigel *et al.* (2002), com o intuito de melhor avaliar a variação da erodibilidade dos solos, estabeleceu a classificação da erodibilidade com seis níveis, conforme a Quadro 2.

Quadro 2 - Classes de erodibilidade do solo. Fonte: Adaptado de Mannigel *et al.* (2002).

Classificação	Critério de Erodibilidade g.cm <sup>2</sup> .min. / Pa
Extremamente alto	>0,100
Muito alto	0,075 a 0,100
Alto	0,050 a 0,075
Médio	0,025 a 0,050
Baixo	0,015 a 0,025
Muito baixo	<0,015

### 2.4. Ensaio de erosão simulada com equipamento de Inderbitzen

O equipamento de Inderbitzen (1961) consiste em um canal hidráulico, onde é acoplada uma amostra indeformada, expondo-a rente à base do canal, sendo, posteriormente, submetida a um fluxo de água controlado é registrada, periodicamente, a quantidade de material que é erodido e carregado por unidade de tempo.

O canal de hidráulico utilizado neste trabalho é constituído de material acrílico, apoiado sobre uma estrutura metálica rígida, revestido com tinta tensoativa de quadras poliesportivas, da cor cinza e marca Vertex, possui 150 cm de comprimento, 23,6 cm de largura e 10 cm de altura. O amostrador cilíndrico biselado de 10,4 cm de diâmetro é posicionado a de 20 cm de distância da extremidade do canal hidráulico, de modo que a superfície da amostra de solo fique rente à base do canal, e dessa maneira, possibilite a simulação das condições de escoamento superficial. Na Figura 5 é mostrado o equipamento de Inderbitzen, a verificação das características do escoamento, a representação gráfica do ensaio de erosão e a determinação do parâmetro K de erodibilidade pelo acréscimo de tensão cisalhante hidráulica.

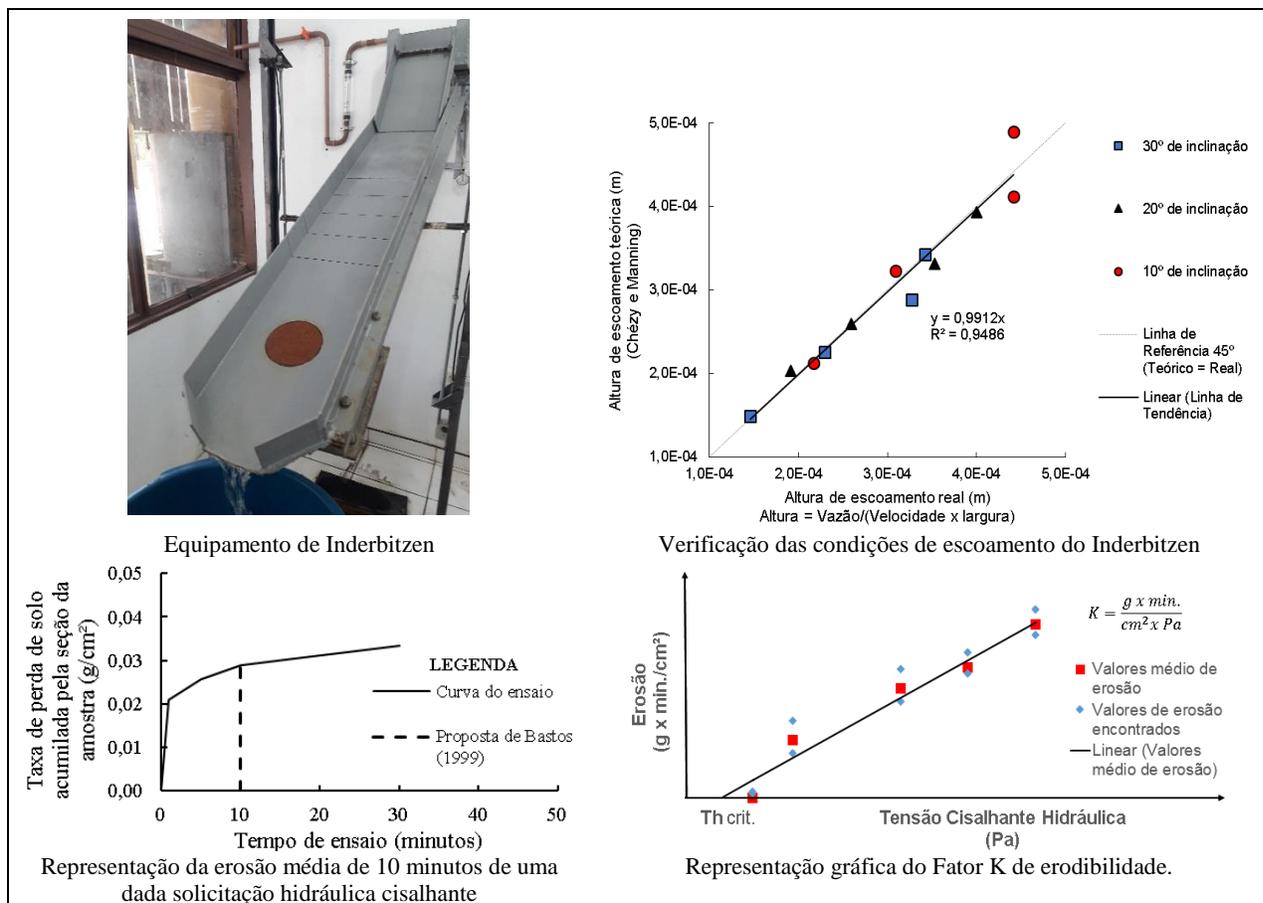


Figura 5 - Feições erosivas identificadas na área do reservatório. Fonte: Os Autores.

O estudo foi realizado seguindo a Metodologia de Bastos (1999), com amostras de solos de locais que apresentam processos erosivos em evolução, nas bordas do lago da UHE Tucuruí, nas principais tipologias de solos existentes, como o Argissolo, o Latossolo Amarelo e o Latossolo Vermelho-Amarelo, extraídas na profundidade de 0,5 m, avaliadas nas condições de inundação com imersão sob pedra porosa por mínimo 3 dias, sendo submetidas à vazão de 3,0 l/min com inclinações de 10°, 20° e 30°; vazões de 1,5 l/min e 4,5 l/min com inclinação de 20°; e vazão de 3,0 l/min com inclinações de 10° e 20°.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apreciação dos resultados dos ensaios e métodos empregados nesta pesquisa é apresentada nos tópicos de

resultados dos Ensaios de Caracterização e Análise da Erodibilidade.

#### 3.1. Resultado dos ensaios de caracterização

A determinação granulométrica de cada solo foi realizada com amostras das extremidades das trincheiras de amostragem, definida com base em 4 determinações. Além do exposto, empregaram-se distintas condições de ensaio, sendo elas, % com dispersante químico (defloculante) Hexametáfosfato de Sódio, % Hidróxido de Sódio nas concentrações de 10 e 25 ml de solução de 0,04 g/l e % Sem Defloculante, resultando nos valores médios apresentados na Quadro 3.

Quadro 3 - Distribuições granulométricas médias das amostras de cada solo. Fonte: Os autores.

Solo	Condição do defloculante de ensaio	Argila Ø<0,002 mm (%)	Silte 0,002 - 0,06 mm (%)	Areia Fina 0,06-0,20 mm (%)	Areia média 0,2 - 0,6 mm (%)	Areia Grossa 0,6 - 2,0 mm (%)
Argissolo	Hexametáfosfato de Sódio	68	11	12	7	2
	Hidróxido de Sódio em 10 ml	67	10	14	7	2
	Hidróxido de Sódio em 25 ml	66	8	18	6	2
	Sem Defloculante	9	36	27	25	2
Latossolo Amarelo	Hexametáfosfato de Sódio	64	6	11	17	3
	Hidróxido de Sódio em 10 ml	63	7	10	17	2
	Hidróxido de Sódio em 25 ml	60	6	17	16	2
	Sem Defloculante	3	30	32	33	3
Latossolo Vermelho	Hexametáfosfato de Sódio	63	33	4	1	1
	Hidróxido de Sódio em 10 ml	61	35	3	1	0
	Hidróxido de Sódio em 25 ml	43	51	5	1	0
	Sem Defloculante	0	42	31	25	2

A média das determinações granulométricas das amostras dos solos apresentaram pequena variação de efetividade de dispersão quando observados os teores de argila, e quando verificados na condição de sem defloculante, constatou-se uma diferença muito alta, indicando que tais materiais possuem em sua constituição elementos cimentantes que promovem a formação de agregações que contribuem para a estabilidade natural dos solos. Cabe destacar, que o Latossolo Vermelho demonstrou um significativo teor de silte, o qual, no ensaio das pastilhas, apresentou comportamentos indesejáveis, como expansão volumétrica.

Os Limites de Liquidez – LL e Plasticidade – LP apontam para uma semelhança de comportamento mecânico hidráulico dos dois primeiros solo, distinguindo-se o Latossolo Vermelho, mas, ao verificar o Índice de Plasticidade – IP, observa-se que são semelhantes; a Massa Específica aponta para materiais tipicamente intemperizados, com incrementos de materiais de maior peso como óxidos, o índice de vazios e a porosidade evidenciam estruturas com alta quantidade de vazios, e o Teor de Matéria orgânica, elementos sem altas quantidades orgânicas, conforme a Quadro 4.

Quadro 4 - Valores dos limites de consistência, dos índices físicos e do teor de matéria orgânica. Fonte: Os autores.

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Massa Específica dos Sólidos Médio (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Seca Natural (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios Médio - e (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Porosidade Total - n (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Teor de Matéria Orgânica Médio (%)
Argissolo - PVA	52,7	29,3	23,4	2,75	1,22	1,25	0,55	9,71
Latossolo Amarelo - LA	51,4	26,5	24,8	2,68	1,10	1,43	0,58	9,12
Latossolo Vermelho - LV	66,5	39,2	27,3	2,95	1,34	1,17	0,54	10,63

A análise mineralógica através da Difração de Raios X indicou a presença apenas de argilominerais não solúveis em água e de baixa atividade como Quartzo, Anatásio, Hematita, Goethita aluminosa e Caulinita, portanto, não apresentando

comportamentos indesejáveis do ponto de vista engenharia, como expansões, caso ocorressem desde Micáceos a Muscovitas segundo Gomes e Toujaguez (2016), conforme a Figura 6.

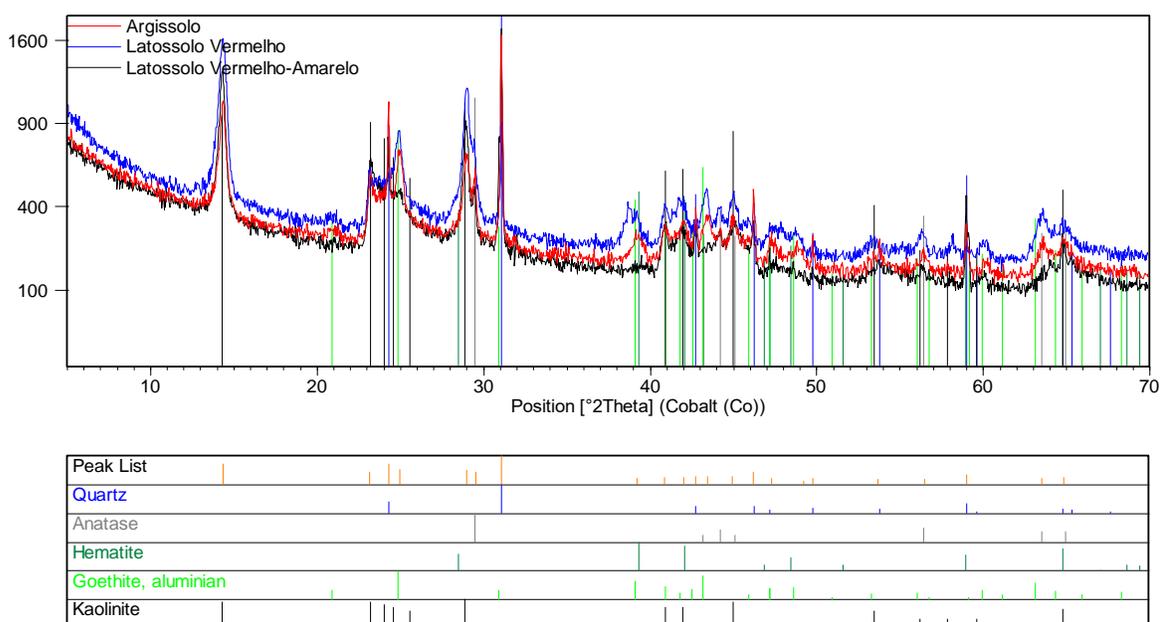


Figura 6 - Identificação mineralógica por Difração de Raios X. Fonte: Os autores

Cabe destacar que os minerais evidenciados nesse trabalho se assemelham aos constatados por Theodoro (2009), quando este

analisou os sedimentos do reservatório com o intuito de avaliar a sua reutilização como fertilizante natural, conforme a Figura 7.

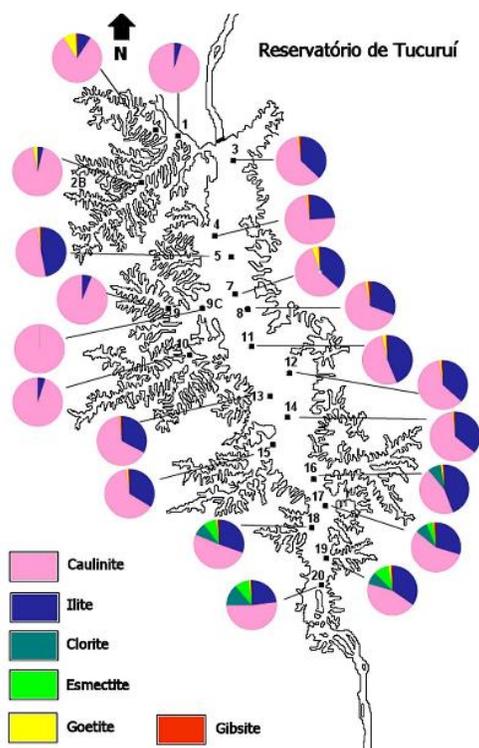


Figura 7 - Distribuição dos diferentes tipos de argila dos sedimentos extraídos no reservatório. Fonte: Theodoro *et al.* (2009).

Os dados de contração e penetração encontrados pelo método expedito das pastilhas, indicam, através da classificação M.C.T., que as amostras dos solos do Argissolo e do Latossolo Amarelo possuem comportamento mecânico hidráulico de um solo Laterítico, conferindo-lhe uma baixa erodibilidade, contudo, para o último solo, verificou-se, que, embora a amostra seja classificada pedologicamente como solo Laterítico Vermelho, seu comportamento mecânico hidráulico, quando intensamente amolgado, demonstrou ser a de um material com comportamento Não Laterítico, sendo ainda evidenciado comportamentos indesejados, como expansão, como mostra Figura 8, tida pela classificação M.C.T. como de Média a Elevada erodibilidade, conforme a Quadro 5.



Figura 8 - Procedimento de reabsorção de água das pastilhas utilizadas. Fonte: Os autores.

Quadro 5 - Determinação do gipso da metodologia M.C.T. das amostras. Fonte: Os autores.

Solos	Argissolo - PVA	Latossolo Amarelo - LA	Latossolo Vermelho -LV
Contração (mm)	2,05	1,88	2,01
Penetração (mm)	0,40	0,72	2,58
Grupo M.C.T.	LG'	LG'	NG'
Erodibilidade	Baixa	Baixa	Média a Elevada
Formas de erosão	Desagregações	Desagregações	Sulcos e Desagregações
Nível das erosões	Baixas	Baixas	Elevadas

Os testes de Desagregação por imersão parcial e total indicaram para as amostras de solo Argissolo, Latossolo Amarelo uma boa estabilidade, com pouquíssimos abatimentos, contudo, o

Latossolo Vermelho apresentou uma grande variabilidade de comportamento dentre as amostras ensaiadas, e que, em sua

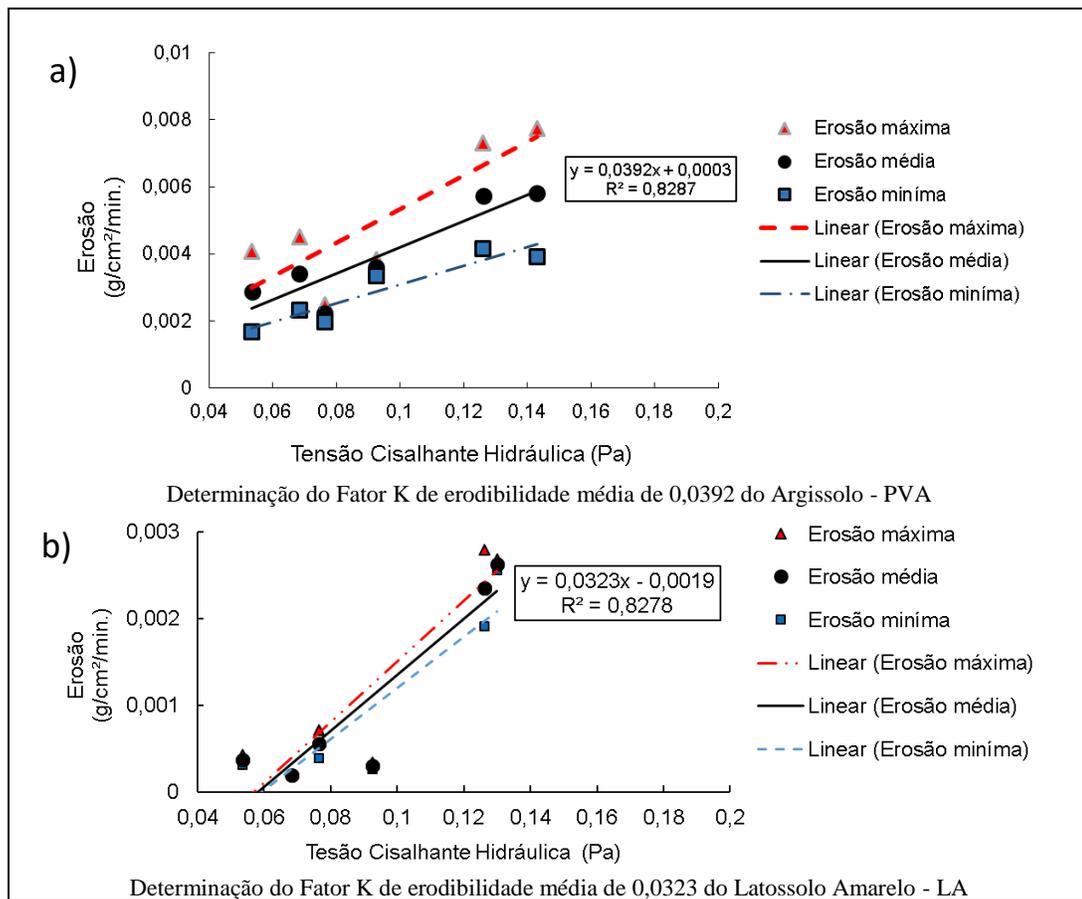
maioria, apresentou abatimentos medianos a altos e com ocorrência de fraturas, como mostram a Figura 9.



Figura 9 - Ensaio de Desagregação das amostras com imersão parcial. Fonte: Os autores.

As análises dos resultados dos sucessivos testes de erosão indicaram que a determinação da razão de inclinação da Erosão pelo acréscimo da Tensão Cisalhante Hidráulica, encontrado para amostras de solo do Argissolo, Latossolo Amarelo e Latossolo

Vermelho, foram, respectivamente, de 0,0392, 0,0323 e 0,002 g./cm<sup>2</sup>/min./Pa, como apresentado nas Figura 10a, Figura 10b, e Figura 10c.



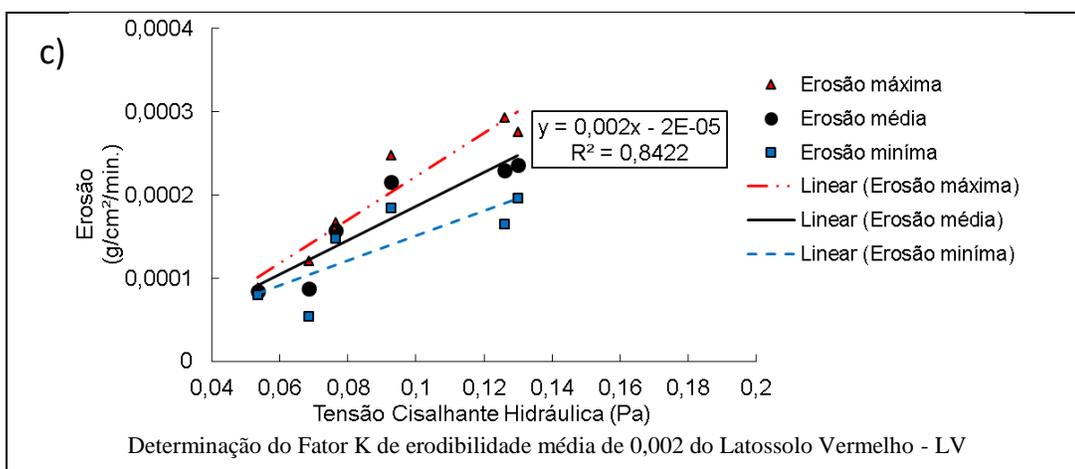


Figura 10 - Determinação do Fator K de erodibilidade média das amostras. Fonte: Os autores.

### 3.2. Análise da erodibilidade

Os resultados da caracterização das amostras forneceram os meios para a realização da determinação do fator K de erodibilidade com as formulações indiretas. Tais formulações são baseadas em características físicas das amostras, tendo sua

unidade expressa em Mg ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> e convertida para g/cm<sup>2</sup>/min./pa com o fator 5/3, e permitiram a comparação com os resultados experimentais obtidos pelo equipamento de Inderbitzen, e classificados quanto aos níveis de erodibilidade conforme Mannigel *et al.* (2002), na Figura 11.

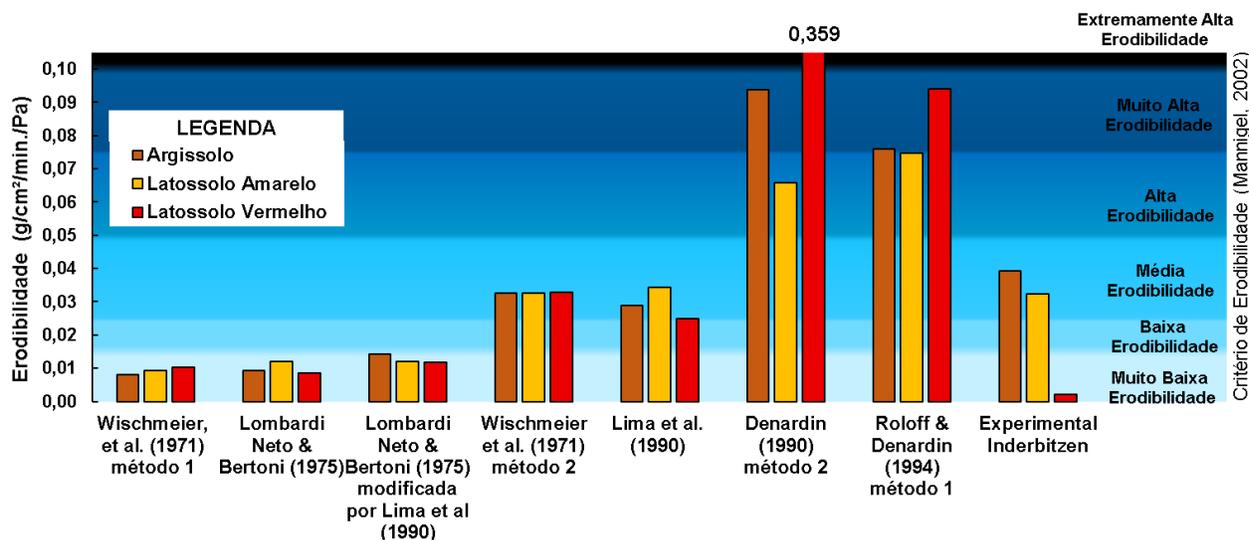


Figura 11 - Classificação do Fator K de erodibilidade determinados por formulações indiretas e o encontrado experimentalmente pelo equipamento de Inderbitzen. Fonte: Os autores.

A utilização de formulações semi empíricas, baseadas em propriedades de caracterização, pode conduzir a erros gravíssimos, desde subestimar até superestimar a erodibilidade dos solos. As formulações que mais se aproximaram dos dados experimentais foram das de Wischmeier *et al.* (1971), método 2, e Lima *et al.* (1990), sendo recomendado a realização de mais testes com um número maior de amostras de outros solos de

classificação pedológica diferente, para afirmações mais abrangentes.

A aferição da erodibilidade com o equipamento de Inderbitzen demonstra, conforme a classificação Mannigel *et al.* (2002), uma baixa erodibilidade para o Latossolo Vermelho e uma média erodibilidade para o Argissolo e para o Latossolo Amarelo, que se assemelham a alguns solos de Minas Gerais estudados por Stephan (2010), e do Rio Grande do Sul, por Bastos

(1999), contudo, para conclusões mais profundas, recomenda-se avaliações com outros sistemas de ensaios, como os apresentados por Briaud et al. (2019), e as estações experimentais descritas por Xavier et al. (2016).

O ensaio de Desagregação apontou para altos níveis de estabilidade para o Argissolo e o Latossolo Amarelo, demonstrando a efetividade da agregação das partículas evidenciada nas aferições granulométricas, com e sem o uso de defloculante como dispersor químico, entretanto, embora o Latossolo Vermelho também apresente tal agregação, ocorre que, a significativa quantia de partículas de dimensões de silte conferem-lhe uma sensibilidade, tornando-o suscetível a desagregações, fraturamentos e expansões, como constatado no método expedido das pastilhas.

O método Expedito das Pastilhas apontou que, em condições extremas de amolgamento, todas as amostras apresentaram altos níveis de contração, devido aos altos teores de argila, porém, quando sujeitas à reabsorção de água, apenas a amostra do Latossolo Vermelho sofreu expansões, devido aos teores significativos de silte, e deste modo, indicando a possibilidade da ocorrência de comportamentos adversos em campo.

Dessa maneira, pode-se concluir, em função das técnicas executadas, que os solos analisados, e que compõem a área do reservatório da UHE Tucuruí, são de baixa a média erodibilidade, sendo recomendado atenção para o tipo de uso e ocupação destes solos, sugerindo-se a manutenção da cobertura superficial. No caso dos solos de média erodibilidade, e para o Latossolo Vermelho, evitar usos que possam desestabilizar e amolgar sua estrutura.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desta pesquisa, foi constatado, que as amostras dos solos analisados, embora, possuíssem partículas finas e de menor peso próprio, em relação a solos granulares, possuíam elevadas taxas de plasticidade, conferindo-lhes agregações e taxas baixas a médias de erodibilidade, e, que apesar de, em sua condição natural serem tidas como pouco erodíveis, quando altamente amoldadas podem se tornar expansíveis e favorecem o aumento de sua erodibilidade. Com isto, indica-se que as atividades agrícolas destas áreas privilegiem culturas que mantenham a cobertura superficial das áreas dos solos Argissolo e Latossolo Amarelo, e a prevenção de usos que possam desestruturar e amolgar o Latossolo Vermelho.

Em relação as características fisiográficas do reservatório, constatou-se que, o fator de maior dificuldade, tanto para sua gestão, como para o provimento de pesquisas acadêmicas e profissionais, é a extensão territorial do reservatório, contudo, estudos como os de Barrata (2011) e análises de campo feitas nesta pesquisa, apontam para a grande influência da variação do nível do reservatório nas regiões da borda do reservatório. Tal influência possibilita, em determinadas localidades, a instauração de processos erosivos que causam significativos prejuízos ambientais, podendo direcionar os pontos de monitoramento e trabalhos futuros.

De modo geral, apesar da pequena extensão territorial visitada, nota-se que o reservatório possui um baixo número de feições erosivas em desenvolvimento fora da região de sua borda, contudo, muito dos usos e ocupações ainda são recentes,

destacando-se a importância do seu contínuo cuidado e monitoramento.

De modo a expandir e complementar a pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros a realização de Modelagens e avaliações computacionais da Susceptibilidade a erosão laminar; Realizar o levantamento das condições de todos os contribuintes da área de drenagem do reservatório da UHE Tucuruí; Promover estudos e soluções para o controle ou mitigação dos impactos das variações do nível do reservatório nas áreas de borda da UHE Tucuruí; Utilizar a metodologia e os equipamentos desta pesquisa para a avaliação dos índices de erodibilidade dos solos de outras características pedológicas dos municípios que compõem o reservatório e a proposição de planos de gestão e monitoramento específicos para cada tipologia de solo e região da área de influência Usina Hidrelétrica de Tucuruí.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização*. Rio de Janeiro, RJ, 2016a. 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6458: Solo - Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro, RJ, 2017a. 10p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459: Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, RJ, 2017b.5p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, RJ, 2016b. 3p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, RJ, 2018a. 12p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9813: Solo - Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação*. Rio de Janeiro, RJ, 2016c. 5p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ, 1996a.2p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13602: Solo - Avaliação da dispersividade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ, 1996b. 5p.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília, 2000, 106p.

- ARAÚJO, F. S., SALVIANO, A. A. C., NETO, M. R. H. *Estimativa da Erodibilidade de Latossolos do Piauí*. SCIENTIA PLENA Vol. 7, N10, 2011 6p.
- BARRATA, A. S. N. *AMBIENTE E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO: A Questão Ambiental dos Desmatamentos em Áreas Protegidas na Amazônia. Estudo de caso na RDS (Reserva de Desenvolvimento Sustentável) ALCOBAÇA, TUCURUÍ – Pará-Brasil*. Universidade de Coimbra, Faculdade de Letras (FLUC), Instituto de Estudos Geográficos. Coimbra, 2011. 112p.
- BASTOS, C. A. B. *Estudo Geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não Saturados*. Tese de doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1999, 303 p.
- Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE. *UHE Tucuruí: Plano de utilização do reservatório: caracterização e diagnóstico do reservatório e de sua área de influência. TUC-10-26346-RE*. Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – ELETRONORTE, Brasília, DF. 3 Vols. 1988.
- BRIAUD, J. L., I. SHAFII, H.C. CHEN, e MEDINA, C. Z., 2019. *Relationship Between Erodibility and Properties of Soils*. Pre-publication draft of NCHRP Research Report 915. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Comissão Mundial de Barragens – CMB. *Estudo de Caso Brasileiro, UHE Tucuruí, Relatório de Escopo*. Programa de Planejamento Energético e Ambiental Instituto de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999, 47p.
- Comissão Mundial de Barragens – CMB. *Relatório: Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil)*. 5° Floor, Hycastle House, Vlaeberg, Cape Town, SOUTH AFRICA, 2000.
- CORRECHEL, V. *Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do <sup>137</sup>Cs*. Doutorado em Ciências: Área de concentração Energial Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003, 79p.
- Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária – EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 5 ed. Brasília-DF, 2018, 356p.
- FARIAS, M. H. C. S., BELTRÃO, N. E. S., SANTOS, C. A., CORDEIRO, Y. E. M., *Impacto dos Assentamentos Rurais no desmatamento da Amazônia*. Mercator, Fortaleza, v. 17, 2018.
- FEARNSIDE, P. M. *Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia –INPA. Vol. 1, Editora INPA, 2015.
- GOMES, A. A. S., TOUJAGUEZ, R. *Caracterização física e mineralógica do talude de corte no bairro do Mutange, em Maceió-AL*. Revista de Geociências do Nordeste, v. 2, 2016, p. 152-160.
- INDERBITZEN, A. L. An erosion test for soils. Materials Research & Standarts, v.1, n.7, Technical Note, 1961, p. 553-554.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Mapa de Solos do Brasil*. Departamento de Recursos Naturais e Divisões de Geociências. Rio de Janeiro, 2002.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Manual Técnico de Pedologia. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais*. Rio de Janeiro, 2007, 312p.
- LIMA, J. M., CURI, N.; RESENDE, M., SANTANA, D. P. *Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de Latossolo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v.14, n.1, 1990, p. 85-90.
- MACÊDO, I. L.; THEODORO, S. H.; HERNANDEZ, H. M. O. e CAMPAGNOLI, F. Assessment of soil loss via laminar and linear erosion in the influence area of Tucuruí hydroelectric power station reservoir, Brazil. In: *Off-Site Impacts of Soil Erosion and Sediment Transport*. Prague. Czech Republic. 2007.
- MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. *Fator de Erodibilidade e Tolerância de Perda dos Solos do Estado de São Paulo*. Acta Scientiarum, Maringá, v. 24, n. 5, 2002, p.1335-1340.
- Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR. *Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do lago de Tucuruí*. Plano Pluri Anual – PPA Governo Federal do Brasil. Brasília, Distrito Federal, 2018, 153p.
- MONTOYA, A. D. V; LIMAS, A. M. M; ADAMI, M. *Mapeamento e Análise Temporal da Paisagem no Entorno do Reservatório de Tucuruí-PA*. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro. 2018.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Identificação Expedida dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEF*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, Anais 10, Foz do Iguaçu, 1994.
- OpenStreetMap®. *Topographic-map base de dados, mapas e informações cartográficas*. Fundação OpenStreetMap. América do Sul. 2020.
- SANTOS, R.M.M. *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, GDM-044A/97, 1997, 120p.

STEPHAN, A. M. *Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaio de Inderbitzen*. Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa-MG, 2010, 165 p.

THEODORO, S. H. et al. *Estudos e Estratégias para a Utilização de Sedimentos Acumulados nos Reservatórios de Hidrelétricas de Forma a Resolver Conflitos socioambientais*. Projeto nº 145 - Eletronorte, Instituto Centro de Gestão de Tecnologias e Inovação – CGTI, In: CITENEL, V Citenel, Belém, 2009, 13p.

VASCONCELOS, C.H.; NOVO, E. M. L. M. *Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA*. Acta Amazonica, VOL. 3 2004, p. 487 – 493.

WISCHMEIER, W. H., JOHSON, C. B., CROSS, B. W. *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. Journal of Soil Water Conservation. V.26, n. 5, 1971, p. 189-193.

XAVIER, R. A. *Processos erosivos superficiais no município de Juazeirinho, Região Semiárida da Paraíba*. Revista de Geociências do Nordeste, v. 2, 2016, p. 113-122. *Capítulo de livro*:

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F de A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 26-42.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são dados ao Sr. Manoel Messias da Silva e a Sra. Jeselda Maria Schaedler da Silva, que por através de trabalho árduo, promoveram os meios para a realização deste trabalho.

Ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico, em especial ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, por proporcionarem a possibilidade do desenvolvimento desta pesquisa em suas dependências.

Aos professores da Universidade Estadual do Mato Grosso Dr. Flávio Alessandro Crispim, Dr. Roberto Vasconcelos Pinheiro e ao saudoso Dr. Rogério Dias Dalla Riva que sempre fizeram e fazem do ambiente acadêmico um espaço de importantes pesquisas científicas, de ensino de excelência e trabalhos de extensão de grande relevância, dessa maneira fizeram e ainda continuam a fazer a diferença no arcabouço teórico e na formação de profissionais e cidadãos.

A todos os professores da Universidade Federal do Pará do campus de Tucuruí que de modo ininterrupto sempre auxiliaram e estiveram dispostos a contribuir para a conclusão deste trabalho.

A Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão e todo o corpo técnico de professores e técnicos do campus de Açailândia, por sempre contribuírem de maneira técnica nas críticas deste trabalho e por apoiarem a sua conclusão.

Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará campus de Belém, de modo especial ao professor Dr. Rômulo Simões Angélica e ao doutorando Alan Albuquerque por colaborarem nesta pesquisa com seus conhecimentos geológicos e mineralógicos e com a realização da Difração de Raios X das amostras.

---

Recebido em: 25/10/2019

Aceito para publicação em: 30/08/2021