



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

**ELIAKIM MARTINS ARAÚJO**

**ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DE UM PEQUENO RESERVATÓRIO DO  
SEMIÁRIDO RURAL ATRAVÉS DO ESTUDO DOS SOLOS E DE FONTES DE  
SEDIMENTO**

**FORTALEZA**

**2012**

ELIAKIM MARTINS ARAÚJO

ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DE UM PEQUENO RESERVATÓRIO DO  
SEMIÁRIDO RURAL ATRAVÉS DO ESTUDO DOS SOLOS E DE FONTES DE  
SEDIMENTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- A688e Araújo, Eliakim Martins.  
Estimativa do assoreamento de um pequeno reservatório do semiárido rural através do estudo dos solos e de fontes de sedimento / Eliakim Martins Araújo. – 2012.  
72 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.
- Área de Concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
Orientação: Prof. Dr. George Leite Mamede.  
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Nildo da Silva.
1. Solos-erosão. 2. Solos-classificação. 3. Transporte de sedimentos. I. Título.

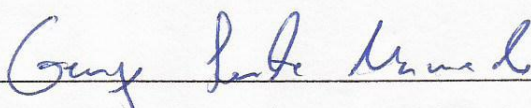
ELIAKIM MARTINS ARAÚJO

ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DE UM PEQUENO RESERVATÓRIO DO  
SEMIÁRIDO RURAL ATRAVÉS DO ESTUDO DOS SOLOS E DE FONTES DE  
SEDIMENTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia,  
Agrícola da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para obtenção do Título  
de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de  
concentração: Manejo e Conservação de  
Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

Aprovada em: 23 / 11 / 2012

BANCA EXAMINADORA



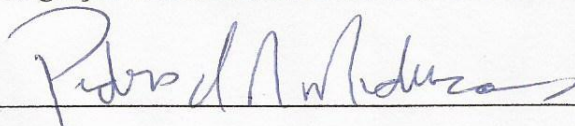
Prof. Dr. George Leite Mamede (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Francisco Nildo da Silva (Coorientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Deus, familiares e amigos.

Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, todo poderoso, fonte de toda inspiração e conhecimento, por ter me dado a oportunidade e capacidade de chegar até aqui, guiando meus passos e não me deixando ser fraco ao ponto de desistir.

A toda minha família, por todo amor, apoio, carinho que foram incondicionais e por quem luto para me tornar cada vez mais uma pessoa melhor.

A duas pessoas que foram essenciais ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho, cito-os em ordem alfabética, pois em ordem de importância não saberia dizer quem mais a teve, Efraim, meu irmão, grande amigo e parceiro que me ajudou, apoiou e incentivou de uma maneira que jamais poderia imaginar, participando de várias etapas desta pesquisa, desde o campo ao laboratório até as discussões desenvolvidas e agradeço também ao Professor Doutor George Mamede, meu brilhante orientador, por me acolher como orientado no momento em que necessitei e por toda paciência, apoio, por partilhar comigo muito de seu vasto conhecimento e por, em muitos instantes, me incentivar de uma maneira que jamais esquecerei, não me deixando nem pensar em fraquejar, além de tudo por abrir as portas de seu ambiente de trabalho e até mesmo de sua casa, para que pudéssemos finalizar este estudo, obrigado George por dividir seu tamanho brilhantismo comigo, nunca esquecerei sua humildade, caráter e amizade!

Ao Professor Doutor Francisco Nildo por ter aceitado cooperar nesta empreitada de maneira havida, participando de uma das etapas mais importantes da pesquisa, por mostrar toda sua humildade em atender sempre nossos pedidos de ajuda e por compartilhar muito de seus conhecimentos no estudo de solos em viagens de campo primorosas. As fervorosas discussões desenvolvidas ali mesmo, em campo, num sol de rachar, comigo, George e Efraim, nunca sairão da minha memória.

A toda a população de Aiuaba, em particular a Dona Socorro, Cícero e Osana, pessoas sem as quais teria sido muito mais duro o desenvolvimento deste trabalho, por demonstrarem tamanho amor ao próximo, nos recebendo sempre com sorrisos e abraços, mesmo sem esperarem nada em troca. Sua felicidade, mesmo vivendo em situação tão precária, será sempre para mim motivo de inspiração.

Aos meus grandes amigos Jorge Israel e Romenigh de Araújo, pela amizade contínua durante todos esses anos, o sucesso e inteligência de vocês é, em muitos instantes, fonte de motivação para alcança-los. Obrigado Jorge Israel por ter me recebido para morar com você por mais de um ano e meio, sem tamanho apoio, talvez tudo tivesse sido diferente.

Aos amigos que me aproximei após a vinda para Fortaleza, Alexandre Viana e João Paulo, por terem tornado a estadia nesta cidade mais agradável.

Ao amigo que Fortaleza me proporcionou, Iderlan Alves, por todo apoio e ajuda que me prestou.

Aos Professores ligados ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, em especial aos Professores José Carlos e Pedro Medeiros, por terem influenciado no desenvolvimento do estudo, através de sugestões fantásticas e por participarem das bancas de Qualificação e Defesa.

Aos laboratórios, instituições e profissionais que de alguma forma contribuíram ao desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudos e pelo financiamento do projeto de pesquisa que viabilizou diversas etapas desta pesquisa.

Aos colegas do DENA, pela amizade e companheirismo durante todo esse tempo, durante as disciplinas e nos momentos passados na 'salinha de estudos'.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

“Quanto maior for o nosso conhecimento,  
mais evidente ficará nossa ignorância.”  
(John F. Kennedy)



## RESUMO

Este estudo tem como objetivo estimar o assoreamento do açude Boqueirão, situado na Bacia Experimental de Aiuaba – BEA de 12 km<sup>2</sup>, através do levantamento detalhado das classes de solo da bacia, modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica, estudo da deposição e distribuição do material no leito do reservatório através de análises mineralógicas e técnicas de geoprocessamento. O levantamento das classes de solos é realizado a partir de visitas e observações realizadas em campo e da coleta de amostras de diferentes regiões da bacia, de forma representativa, com identificação de quatro classes distintas de solos na BEA: ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos, LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos típicos, LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálico planossolicos e NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários. O assoreamento do reservatório é estimado para o período de 2000 e 2008 utilizando-se a curva-chave de sedimentos do reservatório em questão e através de séries de vazões afluentes geradas pelo modelo WASASED. Comparando-se os valores de erosão estimados pela USLE e a produção de sedimentos gerada pela curva chave, obtém-se uma razão de aporte de sedimento de 3,4%, a ser usada na simulação para todo o período desde a construção do reservatório. Dado que a bacia em questão está inserida em uma Estação Ecológica de Conservação do IBAMA, sendo preservada desde o ano de 1977, a estimativa da produção de sedimentos considera para o período inicial (1932-1976) dois diferentes cenários de uso do solo na bacia, quanto ao percentual de uso agropecuário na bacia, e outra caracterização para o período mais recente (1977-2011), com base no levantamento atual de uso do solo. A identificação das fontes de sedimentos é realizada utilizando o modelo USLE e técnicas de geoprocessamento, com superposição dos mapas de cada um dos parâmetros. Para relacionar os sedimentos depositados no reservatório com as áreas de contribuição, amostras no leito do mesmo e em áreas representativas em cada uma das classes de solos são coletadas e analisadas utilizando a técnica de Difração por Raios X. Para a estimativa do padrão de deposição de sedimentos no reservatório, admite-se que a espessura do depósito de sedimento é proporcional à coluna de água obtida do levantamento topográfico detalhado da atual situação do açude realizado neste estudo.. A simulação dos processos hidrossedimentológicos na bacia utilizando a modelagem da USLE indica valores de produção de sedimentos na bacia variando de 11,8 a 24,0 ton·km<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup>, o que resulta em taxas de assoreamento variando entre 1,5 e 2,7 %·decada<sup>-1</sup>, dependendo do cenário de uso do solo considerado. O assoreamento do açude Boqueirão, desde sua construção (1932), resulta em uma diminuição de sua capacidade de armazenamento da ordem de 11,6% e 16,3% para os dois cenários de uso do solo considerados, com 10 e 30% de uso agrícola, respectivamente. Os resultados também mostram que a espessura do sedimento depositado é bem inferior à observada em campo, através da abertura de trincheiras, indicando que o processo de deposição de sedimentos já ocorria bem antes da construção da barragem, em virtude das características topográficas locais.

**Palavras-chave:** erosão, classificação de solos, hidrossedimentologia.

## ABSTRACT

This study aims to estimate the sedimentation of the Boqueirão, located in the 12-km<sup>2</sup> Aiuaba Experimental Basin - BEA, through detailed survey of its soil classes, hydrosedimentological modelling in the watershed, analysis of the deposition and distribution of the bed material in the reservoir through mineralogical analysis and geoprocessing tools. The soil classes survey is performed through sampling and analysis of soil from different areas of the basin, where changes on soil and landscape characteristics may be visually noted. From the soil survey four distinct classes of soils are identified in the BEA: ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos, LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos típicos, LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálico planossolicos and NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários. The reservoir silting is estimated for the period 2000 to 2008 using the rating curve of sediment fluxes immediately upstream of the Boqueirao reservoir and daily water discharges generated using the model WASASED. Comparing the erosion values estimated by USLE with the sediment yield calculated by the sediment rating curve, a sediment delivery ratio of 3.4% is found and applied to the whole period since the dam was built. Since the Aiuaba catchment is located inside of an Ecological Protection Area of IBAMA, preserved since the year of 1977, the estimate of sediment yield for the initial period (1932-1976) takes into account two different scenarios of land use in the watershed concerning the percentage of agricultural use, and another characterization for the most recent period (1977-2011), based on the current survey of land use. The identification of sediment sources is performed using the erosion model and GIS techniques, with overlapping maps of each USLE parameters. To relate the deposited material in the reservoir bed to the sediment sources, samples of the reservoir deposit and the soil classes of the catchment are collected and analyzed techniques of X-Ray Diffraction To estimate the sediment deposition pattern at the reservoir, the sediment deposit thickness is assumed to be proportional to the water column at that point derived from a detailed topographical survey of the lake performed in this study.. The simulation of hydrosedimentological processes using the USLE modelling indicates that sediment yield at the catchment may vary from 11,8 to 24,0 ton·km<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup>, which results in siltation rates ranging from 1.5 to 2.7% decade<sup>-1</sup>, depending on the soil use scenario considered. The silting of the Boqueirão reservoir, since its construction (1932), results in a storage capacity decrease of about 11.6% and 16,3% for the two soil use scenarios with 10% and 30% of agricultural use, respectively.. The results also show that the thickness of the deposited sediment is much less than that observed in the field, by opening of trenches, which indicates that the sediment deposition processes had already occurred previously, before the dam construction, due to local topographical features.

**Keywords:** erosion, soil classification, hydrosedimentology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da BEA em relação à ESEC, Aiuaba e ao Ceará. ....	30
Figura 2 - Classes de solo da BEA. ....	32
Figura 3 - Classes de relevo da BEA. ....	33
Figura 4 - Geologia da BEA. ....	34
Figura 5 - Vegetação de Caatinga na Estação Ecológica de Aiuaba no período seco à esquerda e no período chuvoso à direita. Fonte: (Medeiros, 2009). ....	35
Figura 6 - Visão aérea e geral (Costa, 2007) do açude Boqueirão. ....	35
Figura 7 - Exemplo de abertura de trincheira e análise textural no local. ....	36
Figura 8 - Esquemática dos locais de amostragem de solos. ....	37
Figura 9 - Localização e exemplo de abertura de trincheiras no leito do açude Boqueirão ....	46
Figura 10 - Esquema do assoreamento em uma seção do leito do açude Boqueirão ....	48
Figura 11 - Classes de solos da Bacia Experimental de Aiuaba. ....	51
Figura 12 - Erosividade e pluviometria da BEA para o período estudado. ....	53
Figura 13 - Comparação entre as diferentes capacidades de armazenamento do açude Boqueirão ....	58
Figura 14 - Relação cota-volume para o período atual e para o inicial em dois cenários. ....	59
Figura 15 - Perfil de deposição em uma seção transversal ao leito do açude Boqueirão ....	60
Figura 16 - Espacialização da perda de solo na BEA utilizando sobreposição de imagens ....	61
Figura 17 - Difrátogramas de Raios-X para as amostras nas diferentes classes de solos da BEA. ....	62
Figura 18 - Difrátogramas das amostras coletadas no leito do açude Boqueirão. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de uso e ocupação do solo (C) para BEA .....	42
Tabela 2 - Características das trincheiras amostradas ao longo da BEA .....	49
Tabela 3 – Resultado das análises físicas das amostras de solos coletadas .....	49
Tabela 4 - Resultado das análises químicas das amostras de solos coletadas .....	50
Tabela 5 - Resultado das análises de fertilidade das amostras de solos coletadas .....	50
Tabela 6 - Representatividade das classes de solos da BEA .....	52
Tabela 7 - Erosividade ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) para a BEA durante o período estudado .....	53
Tabela 8 - Características e valores de K para os diferentes solos da BEA .....	54
Tabela 9 – Valores de C nas três configurações de uso de solo na bacia .....	55
Tabela 10 - Valores de produção de sedimentos a partir da BEA .....	56
Tabela 11 - Valores de assoreamento em diferentes cenários de simulação na BEA .....	57

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Considerações Gerais</b> .....	13
<b>1.2 Objetivos e Hipóteses</b> .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>2.1 Pedologia</b> .....	15
<b>2.2 Processos Hidrosedimentológicos</b> .....	16
<i>2.2.1 Método Empírico da USLE</i> .....	17
<i>2.2.2 Razão de Aporte de Sedimentos</i> .....	18
<i>2.2.3 Problemas relacionados com a erosão</i> .....	18
<b>2.3 Assoreamento de Reservatório</b> .....	20
<i>2.3.1 Métodos para estimativa da capacidade de armazenamento</i> .....	20
<i>2.3.1.1 Método dos Contornos</i> .....	20
<i>2.3.1.2 Método das seções</i> .....	21
<i>2.3.1.3 Levantamento batimétrico</i> .....	22
<i>2.3.2 Propriedades do sedimento</i> .....	22
<i>2.3.3 Métodos para estimativa da deposição de sedimento</i> .....	22
<i>2.3.3.1 Balanço de Massa</i> .....	23
<i>2.3.3.2 Uso do Césio-137 como Traçador</i> .....	23
<i>2.3.3.3 Perfil de Sub-superfície</i> .....	23
<i>2.3.3.4 Método do Spud</i> .....	24
<i>2.3.3.5 Placas de sedimentação</i> .....	24
<i>2.3.4 Eficiência de retenção</i> .....	24
<i>2.3.4.1 Curva de Brune</i> .....	25
<i>2.3.4.2 Método de Churchill</i> .....	26
<i>2.3.5 Padrão de deposição de sedimentos</i> .....	26
<b>2.4 Identificação da origem de sedimentos</b> .....	27
<i>2.4.1 Métodos empíricos</i> .....	28
<i>2.4.2 Análise da mineralogia</i> .....	28
<b>3 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	30
<b>3.1 Caracterização do meio físico</b> .....	31
<i>3.1.1 Solos</i> .....	31
<i>3.1.2 Relevô</i> .....	32
<i>3.1.3 Geologia</i> .....	33
<i>3.1.4 Vegetação</i> .....	34
<i>3.1.5 Açude Boqueirão</i> .....	35

<b>4 MATERIAL E METÓDOS</b> .....	36
<b>4.1 Levantamento e Classificação de Solos</b> .....	36
<i>4.1.1 Métodos de análise de solos</i> .....	37
<i>4.1.1.1 Análises físicas</i> .....	37
<i>4.1.1.2 Análises químicas</i> .....	38
<b>4.2 Modelagem hidrossedimentológica</b> .....	40
<i>4.2.1 Perda de Solo</i> .....	40
<i>4.2.1.1 Fator R</i> .....	40
<i>4.2.1.2 Fator K</i> .....	41
<i>4.2.1.3 Fatores L e S</i> .....	42
<i>4.2.1.4 Fatores C e P</i> .....	42
<i>4.2.1.5 Produção de Sedimentos</i> .....	43
<i>4.2.2 Razão de aporte de sedimentos</i> .....	43
<i>4.2.3 Descarga sólida afluyente</i> .....	44
<b>4.3 Identificação das Fontes de Produção de Sedimentos</b> .....	44
<i>4.3.1 Modelagem Empírica (SIG)</i> .....	44
<i>4.3.2 Análises Mineralógicas</i> .....	45
<b>4.4 Estimativa do padrão de Assoreamento do Açude Boqueirão</b> .....	46
<i>4.4.1 Levantamentos Topográficos</i> .....	47
<i>4.4.2 Modelagem da distribuição de sedimentos</i> .....	47
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	48
<b>5.1 Classificação dos solos</b> .....	48
<b>5.2 Estimativa da erosão na bacia</b> .....	52
<b>5.3 Estimativa do assoreamento no açude Boqueirão</b> .....	56
<i>5.3.1 Vazão afluyente estimada pelo modelo WASA-SED</i> .....	56
<i>5.3.2 Calibração do SDR</i> .....	56
<i>5.3.3 Assoreamento do Boqueirão para os diferentes cenários</i> .....	57
<b>5.4 Padrão de Deposição</b> .....	57
<b>5.5 Identificação de áreas potenciais para produção de sedimentos</b> .....	60
<i>5.5.1 USLE</i> .....	60
<i>5.5.2 Método da Mineralogia</i> .....	61
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	67

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais

A elevada variabilidade climática das regiões semiáridas, com prolongados períodos de estiagem, impulsionou o desenvolvimento de uma política de superação e convivência com tais períodos. A alternativa mais viável e de maior abrangência nestas regiões foi a de armazenamento hídrico, sendo que a construção de reservatórios tornou-se prática comum em grande parte destes locais.

Considerando-se que brevemente toda a capacidade estratégica de acumulação de água nos reservatórios esteja construída (isto é, não será mais possível aumentar a oferta de água eficientemente pela construção de novos reservatórios), é fundamental para o desenvolvimento sustentável da região a conservação da qualidade e quantidade de água acumulada (ARAÚJO, 2003).

Diversos estudos apontam a erosão (FARIAS *et al.*, 2007; GUIMARÃES e SANTOS, 2007; LIMA, 2010) como um dos principais agentes degradantes do solo e responsável pelo assoreamento de reservatórios. Dias *et al.* (2005) afirmam que a erosão e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas é um fenômeno dinâmico sujeito a alterações diversas, das quais a ação antrópica exerce grande influência.

A tentativa de identificação das áreas propícias à ação dos processos erosivos e até mesmo a estimativa da quantificação do total erodido pode ser realizada de diferentes formas. Lima (2010) destaca que, geralmente, a produção de sedimentos é estimada através de modelagem computacional e calculada a partir de programas de monitoramento da descarga sólida ou através da medição do volume de sedimentos acumulados em reservatórios.

As características físicas, químicas e mineralógicas dos diferentes tipos de solos são fatores que também influem nos processos erosivos e de transporte de sedimentos. Minella (2003) destaca a possibilidade da determinação das áreas potenciais a produção de sedimentos, por meio de métodos diretos de comparação das características dos sedimentos depositados no leito de rios e reservatórios e dos sedimentos produzidos nas fontes.

O levantamento dos aspectos pedológicos, ao longo de uma bacia, pode ser uma alternativa confiável para determinação do comportamento dos processos erosivos. Para Silva (2000), as diferentes classes ou associações de solo possuem características diferenciadas com relação ao escoamento superficial e erosão.

Neste sentido, a identificação das áreas potenciais aos processos erosivos e fontes de sedimentos utilizando, como indicadores, as características inerentes a cada tipo de solo e a análise hidrossedimentológica do exutório da bacia, demonstra a importância e viabilidade da realização deste estudo.

## 1.2 Objetivos e Hipóteses

Este estudo teve como objetivo principal a estimativa da produção de sedimentos, identificação das áreas potenciais à ação erosiva e fontes de sedimentos na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), através da classificação e mapeamento dos diferentes tipos de solo, da análise dos diferentes atributos físicos, químicos e mineralógicos e da comparação entre os solos e os sedimentos depositados no açude Boqueirão (exutório da bacia).

Como objetivos específicos propõem-se:

- Realizar uma nova classificação dos tipos de solos encontrados na Bacia Experimental de Aiuaba e atualizar as informações existentes sobre as características físicas que contribuam para o estudo do processo erosivo na bacia. Exemplo: vegetação, relevo, rede de drenagem, processos hidrológicos;
- Identificar as áreas mais susceptíveis à erosão na BEA e quais os fatores que mais influem para esta susceptibilidade;
- Usar uma metodologia capaz de traçar a ligação espaço-temporal, entre os sedimentos depositados no leito do açude Boqueirão e as fontes de produção de sedimentos;
- Quantificar o volume atual e estimar o volume original do açude Boqueirão com base no assoreamento simulado para o período de 1934 a 2011
- Estimar a topografia original do açude Boqueirão considerando uma modelagem simplificada do padrão de deposição de sedimentos

Para realização deste estudo, as seguintes hipóteses são consideradas:

- É possível através de um levantamento detalhado das classes de solo da Bacia Experimental de Aiuaba traçar as áreas mais vulneráveis à erosão.
- É possível fazer uma ligação entre as classes de solo levantadas e os sedimentos depositados no açude Boqueirão.
- É possível, ainda, a estimativa de assoreamento do açude Boqueirão através da análise do perfil de sedimentos do leito do açude Boqueirão.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Pedologia

O solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupa a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e pode ser vegetado na natureza onde ocorre e, eventualmente, ter sido modificado por interferências antrópicas (EMBRAPA, 2005).

Dijkerman (1974) afirma que o solo é um sistema aberto porque os processos de perdas e recebimentos de matéria e energia ocorrem em seus limites. Assim, o sistema natural do solo é muito complexo.

Junge e Skowronek (2007) defendem que o solo é um recurso indispensável que vem sendo utilizado por milhares de anos. Mas a sua exploração para múltiplos usos tem várias consequências num longo prazo de tempo e desta forma, o solo pode ser degradado por diferentes maneiras.

O nível de degradação dos solos de bacia pode ser facilmente utilizado como parâmetro para avaliação do impacto das atividades desenvolvidas pelo homem naquele local. Wiegand *et al.* (2009) utilizaram o relevo, as classes e uso do solo para determinação, através do uso de Sistemas de Informações Geográficas, da fragilidade potencial de uma Bacia Experimental Semiárida.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007) define levantamento de solos como um prognóstico da distribuição geográfica dos solos como corpos naturais, determinados por um conjunto de relações e propriedades observáveis na natureza.

O principal objetivo e utilização dos levantamentos de solos tem sido a interpretação para uso agrícola, pois eles fornecem importantes subsídios que permitem a melhor decisão sobre a utilização do solo de maneira racional e eficiente (COELHO *et al.*, 2005). Ainda segundo os autores, um pré-requisito decisivo para a seleção e implantação de áreas de pesquisa é o conhecimento preciso da distribuição dos solos na paisagem e de suas propriedades.

A classificação de solos pode ser definida como sendo a subdivisão de áreas heterogêneas em parcelas mais homogêneas, que apresentem a menor variabilidade possível,

em função dos parâmetros de classificação, e das características utilizadas para distinção dos solos.

O elo entre a classificação de solos e o levantamento fica estabelecido no momento em que solos semelhantes quanto às propriedades consideradas são reunidos em classes. As classes de solos combinadas com informações e relações do meio ambiente constituem a base fundamental para composição de unidades de mapeamento. Assim, a unidade de mapeamento é o grupamento de área de solos, estabelecido para possibilitar a representação em bases cartográficas e mostrar a distribuição espacial, extensão e limites dos solos (IBGE, 2007).

Diversos estudos (LEPSCH e VALADARES, 1976; COELHO *et al.*, 2003; SANTANA *et al.*, 2006) têm utilizado o levantamento e classificação dos solos como base para o desenvolvimento de suas pesquisas.

Silva e Silva (2006), utilizando o levantamento pedológico como forma de indicador das áreas potenciais ao desenvolvimento da irrigação no semiárido Sergipano, mostraram que o conhecimento das classes de solo é importante para o planejamento de atividades como a agricultura.

Outros estudos (SANTOS, 2001; LAGACHERIE e MCBRATNEY, 2006; LOSS *et al.*, 2011) tem utilizado novas tecnologias como Cartografia Digital ou Sistemas de Informação Geográfica para o aprimoramento das técnicas de levantamentos pedológicos e suporte à classificação dos solos.

Segundo a EMBRAPA (2005), a unidade básica de estudo do Sistema Brasileiro de Classificação é o perfil de solo que constitui a menor porção da superfície da terra, apresentando três dimensões e perfazendo um volume mínimo que possibilite estudar a variabilidade dos atributos, propriedades e características dos horizontes ou camadas do solo. Assim, os levantamentos pedológicos necessitam de observações *in situ* para caracterização das diferentes classes de solos.

## **2.2 Processos Hidrosedimentológicos**

O conceito de erosão descende do latim *Erodere* e está ligado aos processos de desgaste da superfície do terreno com a retirada e o transporte de materiais, que podem ser de origem mineral (areia, silte e argila) ou orgânica. Portanto, é o processo de remoção de uma massa de solo e sua deposição em áreas mais rebaixadas topograficamente, sendo este resultado das forças exógenas (MIGUEL, 2010).

Os processos erosivos são agentes da modelagem natural do relevo e atuam conjuntamente com processos de desmembramento de rochas e formação dos solos. De maneira geral, sob condições naturais, estes dois processos atuam equilibradamente, havendo certa equivalência entre a quantidade produzida de solo e a quantidade erodida. Comumente, denomina-se este fenômeno de erosão natural ou geológica. Quando se dá o rompimento devido à interferência do homem, não possibilitando recuperação natural, inicia-se a erosão acelerada ou erosão antrópica.

Para Guimarães e Santos (2007), quando os processos erosivos são identificados ainda no início, a recuperação das áreas ainda pode ser facilmente alcançada ao evitar que o depósito de sedimentos (assoreamento) ocorra a partir do fluxo de transporte destas partículas pelos cursos fluviais, preservando e mantendo, desta maneira, a quantidade e qualidade do abastecimento de água.

### ***2.2.1 Método Empírico da USLE***

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) é um modelo concebido para calcular a perda de solo proveniente de erosão laminar e por sulcos, não observando deposição, nem computando produção de sedimento por ravinamento ou erosão das margens e fundo de canais. Apesar destas limitações, a USLE é uma equação empírica de grande aceitação e utilização, considerando que esta foi obtida a partir de 10000 medições em lotes padronizados, para as mais diversas condições de chuva e solos (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

A equação se baseia em procedimentos matemáticos que caracterizam os processos dentro do sistema, levando em consideração as leis de conservação da massa e de energia (MIGUEL, 2010). Portanto é um modelo, no qual a sua precisão depende de cada local de trabalho, pela grande diversidade de solos, climas e topografia, estes considerados os componentes dinâmicos principais, por isso a importância de estudos regionais para se adaptar as características de cada local.

Sendo assim, a equação é capaz de dar suporte ao planejamento conservacionista de terras agrícolas, realizar uma predição da perda total de solo com dados representativos das condições locais (WISCHMEIER e SMITH, 1978), ser um valioso instrumento para trabalhos de conservação (Bertoni e Lombardi Neto, 1990) e predizer com relativa confiabilidade as perdas anuais e médias de solos em condições específicas de declive, solo, sistemas de manejo e cultivo e outros fatores.

Os dois primeiros fatores da equação (R e K) representam, respectivamente, a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo. A erosividade expressa a quantidade de solo erodido por unidade do índice de erosão da chuva (erosividade) para um solo específico, que é mantido numa condição padrão (sem cobertura qualquer, embora, submetido a práticas culturais normais em um declive de 9% e comprimento de rampa de 22,25 m).

O simples produto entre R e K expressa a perda de solo por unidade de área mantida na condição padrão. Os demais fatores entram na equação apenas para corrigir o valor de perda de solo para uma condição diferente daquela considerada como padrão.

Os fatores C e P, por serem fatores de origem antrópica, influenciam a interceptação das chuvas, a resistência ao escoamento superficial, a infiltração da água no solo, o armazenamento superficial, o comprimento e o direcionamento do escoamento superficial.

Portanto o valor associado a estes dois fatores é menor ou igual a um, uma vez que a falta de cobertura do solo e a não utilização de práticas conservacionistas refletem, na maioria das vezes, uma condição de uso do solo que causa as maiores perdas possíveis.

Entretanto o fator C pode atingir valores maiores de até 1,5 em solos muito desagregados e que produzam muito escoamento superficial, bem como os valores dos fatores L e S podem também ser maiores que a unidade, desde que o terreno tenha declividade e/ou comprimento de rampa maior que a condição padrão.

### **2.2.2 Razão de Aporte de Sedimentos**

A Razão de Aporte de Sedimentos (SDR, *Sediment Delivery Ratio*) é definida como a fração de erosão bruta que é transportada em uma bacia num dado intervalo de tempo (LU *et al.*, 2004). Em essência, o SDR é um fator de escala usado para acomodar as diferenças em uma produção real média de sedimentos entre as escalas de medição. É responsável por a quantidade de sedimentos que é realmente transportado a partir das fontes de erosão para o exutório em comparação com a quantidade total de solo que é desagregada sobre a mesma área acima desse ponto.

### **2.2.3 Problemas relacionados com a erosão**

De acordo com Araújo (2003), os sedimentos carregados e depositados nos açudes do Semiárido apresentam um potencial de deterioração quantitativo e qualitativo da água

ofertada superficialmente. Além disso, com o assoreamento a tendência geral é de aumento das perdas por evaporação (uma vez que as relações cota – área – volume sofrem alterações) e das perdas por extravasamento (uma vez que há redução da capacidade acumulativa do reservatório).

As consequências da sedimentação de um reservatório podem acarretar sérios impactos na situação econômica local e regional relacionados à disponibilidade hídrica para o abastecimento humano, irrigação e geração de energia, sendo que a redução da disponibilidade hídrica é o maior impacto da sedimentação de reservatórios nas regiões semiáridas (ARAÚJO *et al.*, 2006).

Segundo Mamede (2008), o processo de sedimentação também pode ocasionar a obstrução das entradas de água, deposição de sedimentos na região do delta e assoreamento no leito de rios. Além disso, como resultado das atividades humanas a montante do reservatório, os sedimentos finos em suspensão podem carrear poluentes adsorvidos durante sua chegada e deposição no reservatório. Esta deposição pode trazer consequências ambientais negativas, tal como a poluição física, química e biológica do corpo hídrico, turbidez da água, crescimento da vegetação submersa e flutuante causando depleção de oxigênio e aumento da mortalidade de peixes.

Em bacias hidrográficas do semiárido, o abastecimento hídrico depende fortemente da água armazenada em reservatórios superficiais, o que impulsiona a construção destas infraestruturas hídricas. A elevada densidade de pequenos reservatórios (MALVEIRA *et al.*, 2012) provoca alguns impactos na propagação do escoamento e no transporte de sedimentos.

Os pequenos reservatórios retêm uma parcela significativa da água que chegaria aos reservatórios estratégicos localizados nos exutórios das grandes bacias e responsáveis pelo abastecimento hídrico de centros urbanos e projetos de irrigação. Por outro lado, essa alta densidade de reservatórios permite uma melhor distribuição espacial deste recurso (MAMEDE *et al.*, 2012) e eleva o centro de gravidade do sistema, reduzindo custos de bombeamento.

No que diz respeito ao transporte de sedimentos (LIMA NETO *et al.*, 2011), os pequenos reservatórios atuam positivamente retendo parte do sedimento que chegaria aos reservatórios estratégicos, prolongando a vida útil destes últimos. Por outro lado, essa retenção de sedimento provoca alterações na quantidade e qualidade da água nestes pequenos sistemas, com redução da capacidade de armazenamento e aumento das perdas por vertimento.

## **2.3 Assoreamento de Reservatório**

### ***2.3.1 Métodos para estimativa da capacidade de armazenamento***

Segundo Morris e Fan (1998), a capacidade de armazenamento dos reservatórios pode ser medida por vários meios. Podem ser usadas as técnicas convencionais de levantamentos utilizando níveis convencionais, automáticos, a laser, estações totais e os Sistemas de Posicionamento Global (GPS), juntamente com o mapeamento fotogramétrico ou levantamentos aéreos que fornecem um meio mais automatizado para coleta dessas informações.

A tecnologia de levantamento mudou significativamente ao longo das últimas décadas, com o aumento dramático na velocidade de aquisição de dados e de processamento do sistema computador. O GPS reduziu significativamente o tempo e o custo para a coleta de dados, alterando as técnicas de coleta. Procedimentos de análise também melhoraram com o desenvolvimento contínuo de computadores e software de coleta de dados. Estas tendências de rápidos avanços tecnológicos provavelmente continuarão no futuro.

Para Morris e Fan (1998), repetidos levantamentos da capacidade dos reservatórios são usados para determinar o volume total ocupado por sedimentos, o padrão de deposição de sedimentos, as alterações de área ocupada e capacidade de armazenamento.

A principal causa da alteração da capacidade de armazenamento é a deposição de sedimentos ou erosão. Os resultados típicos de reservatório de recolha de dados e análise de pesquisa incluem a medida deposição de sedimentos desde o fechamento da barragem e em levantamentos anteriores, produção de sedimentos da bacia do contribuinte, e os futuros de armazenamento de esgotamento de tendências. Os resultados da pesquisa também pode incluir a localização do sedimento depositado (distribuição lateral e longitudinal), a densidade do sedimento, eficiência de retenção do reservatório, e avaliação da operação do projeto (USDI, 2006).

#### ***2.3.1.1 Método dos Contornos***

Com o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos de coleta e análise de informações, o Método dos Contornos se tornou o método preferido para a aquisição e coleta de dados. Ele requer grandes quantidades de coleta e armazenamento de dados, algo que os

sistemas atuais podem facilmente manipular. O Método dos Contornos resulta em uma topografia do reservatório mais precisa e melhor cálculo do volume de armazenamento do que o Método das Seções, mas, geralmente, necessita de mais tempo para a coleta de dados de campo. Este método gira em torno de computadores e pacotes de software que fornecem um meio de organizar e interpretar grandes conjuntos de dados. Os dados da pesquisa hidrográfica geralmente são coletados em formato de coordenadas x, y, z em conformidade com um Sistema de Coordenadas conhecido, como o Universal Transversa de Mercator (UTM), latitude/longitude, ou outros sistemas que representam a Terra tridimensional numa superfície plana.

O método envolve a determinação do contorno volumes de água corrente e deposição de sedimentos a partir de contornos topográficos recentemente desenvolvidos de reservatório, permitindo uma visão tridimensional em um meio bidimensional. Os resultados finais dos mapas de contorno do reservatório são gerados contornos de superfície de elevação em intervalos selecionados, que são utilizados para calcular os volumes de atualização. Existem vários programas de computador de contorno e rotinas para sistemas de estações de trabalho ou computadores pessoais que podem ser usados para esta finalidade (USDI, 2006).

#### *2.3.1.2 Método das seções*

Este método utiliza série de seções transversais no reservatório as quais são levantadas em intervalos e usadas para calcular a variação do volume em cada intervalo por fórmulas geométricas. Técnicas de levantamento hidrográfico são usadas para áreas submersas, e os levantamentos de topográficos padrão ou técnicas fotogramétricas são usados acima do nível da água. O Método das Seções é mais rápido e mais econômico de realizar do que o Método do Contorno porque os requisitos de dados de campo são muito reduzidos em comparação com este último.

Esta tem sido, historicamente, a técnica mais comumente empregada para monitorar a sedimentação, mas está sendo cada vez mais substituída pelo Método dos Contornos de forma automatizada. Os levantamentos das seções são bem adequados para o controle de alterações no armazenamento, como resultado da sedimentação, com um mínimo de tempo de campo. Os melhores resultados são obtidos se os Levantamentos pelo Método dos Contornos forem utilizados para determinar com precisão o volume delimitado por linhas de alcance adjacentes, e as zonas de extremidade de intervalo são então correlacionadas com

este volume. O Método das Seções é posteriormente utilizado para acompanhar as mudanças no armazenamento com base nas mudanças na geometria das seções (Morris e Fan, 1998).

### *2.3.1.3 Levantamento batimétrico*

Segundo Morris e Fan (1998), um levantamento batimétrico é realizado com sonar operacional na gama de 200 KHz a partir de um barco em movimento. Os sistemas atuais incluem tipicamente sistemas em tempo real, o posicionamento, o registo de dados para um computador portátil, e software de processamento posterior para a preparação de mapas digitais.

### *2.3.2 Propriedades do sedimento*

Mamede (2008) destaca que as propriedades dos sedimentos definem como cada partícula, individual ou agregada, se comporta durante o escoamento superficial. Tamanho, forma e densidade afetam a velocidade de sedimentação, a qual por sua vez afeta as taxas de transporte de sedimentos e em quais locais as partículas se depositam. Estas características são importantes para a sedimentação do reservatório assim como as taxas de arraste, transporte, deposição e compactação são funções das propriedades das partículas de sedimento.

Segundo Morris e Fan (1998), o tamanho do grão de sedimento é o mais importante parâmetro para descrever o arraste de sedimentos na água e que uma variedade de termos pode ser usada para descrever o tamanho característico dos grãos individuais e amostras compostas. Ainda segundo ele, o tamanho das partículas de sedimento transportadas pela água atinge sete ordens de magnitude desde placas de argilas até pedras.

### *2.3.3 Métodos para estimativa da deposição de sedimento*

Morris e Fan (1998) destacam que, normalmente, a taxa de sedimentação é medida através da comparação entre levantamentos periódicos de diversas formas ou através do método dos contornos. Contudo, em algumas circunstâncias, métodos alternativos de estimativa da alteração de volume ou taxa de deposição de sedimentos podem ser utilizados. Os principais métodos alternativos que podem ser citados são:



### *2.3.3.1 Balanço de Massa*

A quantidade de sedimentos depositados em um reservatório pode ser estimada através da diferença entre as entradas e saídas de sedimentos fluviais em um pequeno (evento simples) ou longo espaço de tempo. Esta técnica é essencial para obtenção de informações detalhadas do processo de chegada e retenção de sedimentos no reservatório, além de poder ser usada para avaliar e monitorar a eficiência de diferentes técnicas de estimativa de sedimentação. Porém, resultados confiáveis em longo prazo são difíceis de serem obtidos e deve-se sempre tentar utilizar algum método de levantamento do reservatório para confirmação dos dados estimados pelo Balanço de Massa (MORRIS e FAN, 1998).

### *2.3.3.2 Uso do Césio-137 como Traçador*

O Césio-137 é um radionuclídeo artificial produzido pela fissão nuclear do urânio e plutônio que foi introduzido no globo terrestre principalmente pelos testes termonucleares de superfície, com intensificação a partir de 1952, quando da explosão da primeira bomba, e produção máxima em 1963 (MEDEIROS, 2009). Para Morris e Fan (1998), por permanecer firmemente adsorvido na estrutura cristalina da argila em ambientes de água doce, o Césio<sup>-137</sup> permanece na camada superior do solo e pode ser usado como traçador de sedimentos superficiais, uma vez que ele é erodido e redepositado. Medeiros (2009) afirma que a técnica do Césio-137 consiste em comparar o inventário do isótopo em pontos de amostragem com o inventário de referência no local do estudo, ou seja, o inventário esperado caso a área não tivesse sido perturbada. Como pressupostos para aplicação do método, admite-se que a deposição de Césio-137 a partir da atmosfera tenha ocorrido de maneira uniforme sobre a área de estudo e que o mesmo tenha sido adsorvido ao solo. Assim, é possível inferir que a perda relativa do isótopo indica a predominância de processos erosivos, enquanto que o ganho de Césio-137 em relação ao inventário de referência indica a ocorrência de deposição de sedimentos rotulados com o isótopo.

### *2.3.3.3 Perfil de Sub-superfície*

Morris e Fan (1998) apresentam esta técnica como sendo um sistema de medidas sônicas de profundidade que combina um sinal de alta frequência (200 kHz) que irá refletir ao

atingir um fundo macio e continuará com um sinal de baixa frequência (5 a 24 kHz) que irá penetrar mais profundamente e refletir quando atingir um horizonte mais denso que representará o solo original. Sobre condições favoráveis, camadas de sedimentos de até 10 metros de profundidade podem ser medidas. Quando as condições permitem seu uso, esta técnica pode mapear rapidamente camadas de sedimentos sem que haja conhecimento algum da topografia original do local.

#### *2.3.3.4 Método do Spud*

É uma técnica manual simples para medida da profundidade total de acumulação de sedimentos (Morris e Fan, 1998). Esta técnica pode ser utilizada para determinar a localização do fundo original e a estimativa do depósito de sedimentos, sem conhecimento prévio das curvas de nível originais de fundo. O método é recomendado em casos onde a utilização de técnicas sônicas não funcione, mas este método possui a limitação de trabalhar apenas com sedimentos leves, geralmente constituídos por sedimentos finos não expostos ao ar e com profundidade máxima de cerca de 4 metros. Segundo Morris e Fan (1998), o Spud é uma haste de aço endurecido de cerca de 2 a 3 metros de comprimento e cerca de 3 a 4 cm de diâmetro no qual são afunilados sulcos em intervalos regulares.

#### *2.3.3.5 Placas de sedimentação*

Placas planas podem ser colocadas em pontos distintos no fundo do reservatório e a profundidade de depósito nas placas pode ser subsequentemente medida em intervalos. As placas planas tem a vantagem sobre as armadilhas de sedimentos já que não constituem qualquer tipo de obstrução ao fluxo de água ou concentração de lama próxima ao leito. Nas áreas em que a taxa de acumulação de sedimentos é baixa, da ordem de centímetros por ano ou menos, pode ser difícil estimar as taxas de sedimentação através de pequenas diferenças na topografia levantada através de um leito ondulante (MORRIS e FAN, 1998).

#### *2.3.4 Eficiência de retenção*

Segundo USDI (2006), a quantidade de sedimento depositado no interior de um reservatório depende da eficiência de retenção. A eficiência de retenção do reservatório é a razão entre o sedimento depositado e o influxo de sedimentos total e depende, primariamente,

da velocidade de queda das partículas do sedimento, taxa de fluxo e velocidade através do reservatório, bem como o tamanho, a profundidade, a forma e as regras de operação do reservatório. A velocidade de queda das partículas é uma função do seu tamanho, forma e densidade; viscosidade da água, e a composição química da água e do sedimento. A taxa de fluxo através do reservatório pode ser calculada como a razão entre a capacidade de armazenamento do reservatório para a taxa de fluxo. O potencial para a sedimentação do reservatório e os problemas associados pode ser estimado a partir dos seguintes seis indicadores:

- A capacidade de armazenamento do reservatório em relação ao volume médio anual afluyente.
- A largura média e máxima do reservatório em relação à largura média e máxima do trecho de rio a montante.
- A profundidade média e máxima do reservatório em relação à profundidade média e máxima do trecho de rio a montante.
- Os fins para os quais o reservatório está sendo construído e como o mesmo será operado (por exemplo, normalmente cheio, nível frequentemente rebaixado ou normalmente vazio).
- A capacidade de armazenamento do reservatório em relação à carga de sedimentos média anual dos rios afluentes.
- A concentração de contaminantes de metais pesados que são provenientes da bacia a montante.

A razão entre a capacidade do reservatório e o volume de médio anual pode ser utilizado como um índice para avaliar a eficiência de retenção de sedimentos no reservatório. Reservatórios maiores tendem a apresentar maior eficiência de retenção de sedimentos e consequente maior tendência ao assoreamento (USDI, 2006).

#### *2.3.4.1 Curva de Brune*

É provavelmente o método mais utilizado para estimar a retenção de sedimentos nos reservatórios, e dá resultados razoáveis a partir de dados muito limitados: volume de armazenamento e volume médio anual. Como uma limitação, o método é aplicável apenas em longo prazo a condições médias. Brune notou que desvios significativos podem ocorrer como resultado de alterações nas regras de operação. Normalmente reservatórios secos tendem a ser

menos eficientes na retenção de sedimentos que o proposta no método, enquanto que reservatórios pouco profundos usados especificamente para retenção de sedimentos podem operar com muito mais eficiência do que o indicado pela curva (MORRIS e FAN, 1998).

#### *2.3.4.2 Método de Churchill*

Este método é baseado na relação entre a eficiência de liberação de sedimentos e o índice de deposição do reservatório, definido como a razão do período de retenção e a velocidade média de fluxo através do reservatório. Os dados mínimos necessários para usar este método são o volume de armazenamento, a entrada anual, e comprimento do reservatório. Na aplicação do método Churchill, as seguintes definições são usadas:

- **Capacidade** - Capacidade de reservatório ao nível operacional médio para o período de análise ( $m^3$ ).
- **Vazão afluyente** - Vazão afluyente média diária durante o período de estudo ( $m^3/s$ ).
- **Período de retenção** - Capacidade dividida pela afluência (s).
- **Comprimento** - Comprimento médio do reservatório ao nível operacional do reservatório (m).
- **Velocidade** - Velocidade média calculada dividindo-se a vazão afluyente pela área transversal média. A área transversal média pode ser determinada dividindo-se a capacidade do reservatório pelo comprimento (m/s).
- **Índice de sedimentação** - Período de retenção dividido pela velocidade.

#### *2.3.5 Padrão de deposição de sedimentos*

Os sedimentos são depositados nos reservatórios em todas as elevações, causando alteração na curva cota-volume. Métodos empíricos têm sido desenvolvidos para distribuir o depósito de sedimentos dentro de um reservatório como uma função da profundidade, projetando assim o deslocamento da curva cota-volume.

Estes métodos são muito mais rápidos e mais fáceis de usar do que a modelagem matemática e também necessitam de menos dados. Quando dados de levantamento de sedimentos estão disponíveis para um reservatório existente, o padrão de deposição observado

pode ser utilizado para selecionar a relação apropriada empírica para calcular o deslocamento futuro nas relações cota-área e cota-volume.

Como uma limitação, métodos empíricos não identificam os locais específicos que serão afetados por sedimentos em um reservatório; eles preveem apenas a mudança nas curvas cota-área e cota-volume. Uma mudança significativa no regime de operação tais como a implementação de gestão de sedimentos, vai afetar o padrão de deposição. Métodos empíricos não podem ser usados para simular estes efeitos e a avaliação de alternativas de gestão requer modelagem numérica (MORRIS e FAN, 1998).

Os métodos empíricos para distribuir sedimentos num reservatório foram desenvolvidos pela Agência Americana de Recuperação (U.S. Bureau of Reclamation) e têm sido amplamente empregados em diversos estudos e pesquisas.

Morris e Fan (1998) destacam que o primeiro método empírico desenvolvido foi o método de Incremento de Área, o qual utiliza o princípio de que um volume igual de sedimentos será depositado dentro de cada incremento de profundidade no reservatório, ou seja, o percentual de deposição de sedimentos é uma função linear do percentual de incremento da profundidade do reservatório.

Já o método da Redução de Área surgiu através da realização de novos levantamentos de diversos reservatórios. A Agência Americana de Recuperação percebeu que o padrão de deposição variou de um local para outro de forma um tanto quanto previsível. A geometria do reservatório, operação e tamanho dos grãos de sedimentos afetam a distribuição de sedimentos durante o represamento e quatro diferentes curvas empíricas foram desenvolvidas para representar tais características. O uso apropriado de cada curva pode produzir uma distribuição de sedimentos mais realista do que o método de incremento de área.

## **2.4 Identificação da origem de sedimentos**

Coleman e Scatena (1986) afirmam que a identificação de áreas específicas que contribuem ativamente com sedimentos para a rede de drenagem é um pré-requisito necessário para a compreensão do processo de produção de sedimentos. Para isso, existe uma variedade de técnicas para medição e predição da erosão *in situ* ou do aporte de sedimentos na rede de drenagem.

Em se tratando do uso das características do material erodido como indicadores de áreas produtoras de sedimentos, Minella (2003) afirma que os estudos de Walling *et al.* (1979) encontraram incertezas relacionadas com possíveis taxas de enriquecimento (tamanho

das partículas, propriedades magnéticas e teor de matéria orgânica) que os sedimentos sofrem no percurso entre a vertente e o exutório da bacia.

#### ***2.4.1 Métodos empíricos***

Segundo Miguel (2010), o uso de modelos (USLE, MUSLE, WASA, etc.), Sistemas de Informações Geográficas e técnicas de Geoprocessamento (Sobreposição de Imagens, Álgebra de Mapas, etc.) permitem uma análise rápida, econômica e eficiente dos dados que estão sendo estudados.

Os trabalhos de cunho geográfico podem contribuir de forma positiva para a organização espacial resultante das interações dos elementos físicos da natureza (clima, topografia, geologia, águas, vegetação) considerando, também, a atuação do homem como agente modelador das paisagens. Utilizando as ferramentas dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), associados aos produtos de sensoriamento remoto e tomando a bacia hidrográfica como unidade ideal de estudos ambientais, a Geografia apresenta potenciais para o desenvolvimento de modelos qualitativos para identificar e caracterizar os fluxos de matéria e energia de determinada paisagem (PEREIRA, 2007).

Souto e Crestana (2000) determinaram as áreas potenciais à produção de sedimentos, em condições reais de produção agrícola no Paraná, a partir da avaliação de práticas conservacionistas de solo e com o auxílio de modelagem matemática e Sistema de Informação Geográfica.

Pereira (2007) identificou as áreas com potencial para a produção de sedimentos nas bacias do rio Atibainha, no estado de São Paulo, utilizando a análise e cruzamento de três planos de informação – meio físico, procedimento e uso da terra e adequação do uso das terras em relação à aptidão agrícola - espacializados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica.

#### ***2.4.2 Análise da mineralogia***

Bunte e Macdonald (1999) comentam que o desenvolvimento de técnicas que utilizam as características próprias a cada tipo de solo tem melhorado a habilidade para identificar as fontes de sedimentos finos e distinguir a relativa contribuição das diferentes fontes e sua produção total. Além disso, esses trabalhos procuram determinar, através de propriedades indicadoras presentes nos sedimentos (cor, magnetismo, petrologia, geoquímica,

etc.), uma relação entre as fontes em potencial de sedimentos com os sedimentos monitorados em trechos do leito de um rio e no exutório da bacia.

Hillel (2003) cita que análise mineralógica é o estudo de materiais para determinar a composição mineral e estrutura mineral. Esta análise pode ser utilizada para identificar espécies de minerais e compreender suas características e propriedades.

Navratil *et al.* (2012) identificaram a origem de sedimentos em áreas de elevadas taxas de erosão na França, utilizando técnicas de geoquímica e mineralogia dos solos além do uso de medidas de radionuclídeos combinadas com séries temporais hidrossedimentológicas para reconstruir a origem dos sedimentos depositados na região ao longo dos últimos 50 anos.

A identificação, a caracterização e o entendimento das propriedades dos diferentes minerais do solo ajudam na avaliação da sua gênese e nas suas propriedades relacionadas com a classificação e práticas agronômicas. A fração argila do solo é comumente composta de uma mistura de um ou mais minerais aluminossilicatados secundários e minerais primários herdados diretamente do material de origem (CAMARGO *et al.*, 2009). A identificação e a estimativa quantitativa das proporções das várias espécies minerais, num sistema policomposto como o solo, exigem a aplicação de diversas análises complementares qualitativas e quantitativas. Um dos métodos mais comumente utilizados é a análise de difração de raios X.

Já Minella (2003), além das técnicas já mencionadas, utilizou a aproximação *fingerprintig* e técnicas de estatística multivariada, para identificar as fontes de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural localizada em uma região montanhosa no sul do Brasil.

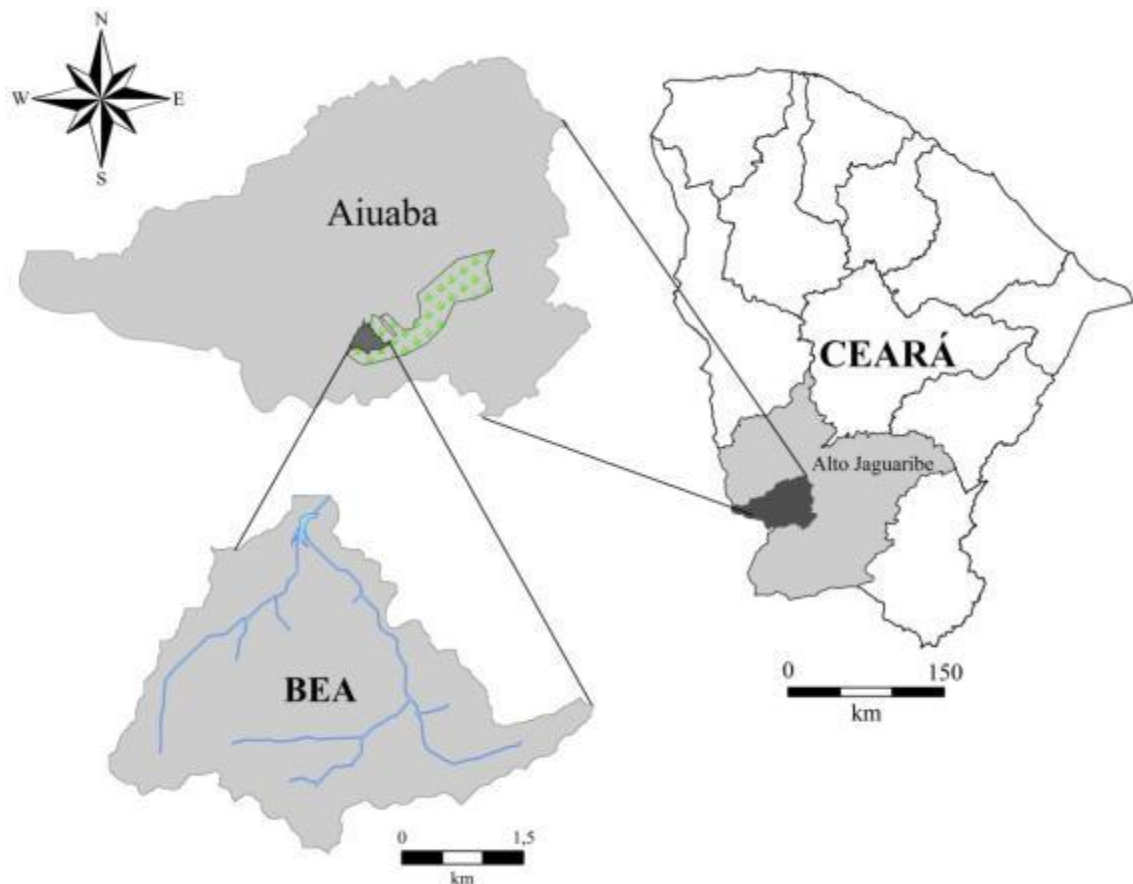
Após a descoberta de que as argilas do solo continham material cristalino mineral que produzia padrões de difração de raios X, a investigação da ocorrência de minerais de argila por métodos de difração de raios X tornou-se um instrumento valioso no estudo dos solos. O melhoramento contínuo da instrumentação de raios X, das técnicas de preparo de amostras e definição de critérios para identificação e caracterização das fases cristalinas, recentemente, propiciaram grande avanço nesse campo, fornecendo um material muito rico em informações de propriedades e gênese do solo (CAMARGO *et al.*, 2009).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), inserida na Estação Ecológica de Aiuaba (ESEC de Aiuaba), unidade de conservação permanente do Bioma da Caatinga, sob a administração do Instituto Chico Mendes, ligado ao Ministério do Meio Ambiente, “declarada de utilidade pública em 1978 (Decreto N° 81.218, de 16 de janeiro de 1978)”.

O município de Aiuaba (Figura 1) localiza-se na região dos Inhamuns, a sudoeste do Estado do Ceará, aproximadamente entre as coordenadas UTM (Zona 24S, datum SAD-69), 9245185 N a 9297750 N e 307500 E a 389182 E, a uma altitude de 466 m, compreendendo uma área de 2.471,6 km<sup>2</sup>. A área da ESEC de Aiuaba localiza-se entre as coordenadas UTM (Zona 24S, Datum SAD-69), 9262898 N a 9272171 N e 352616 E e 376549 E, com área de 11,525 ha.

Figura 1 - Localização da BEA em relação à ESEC, Aiuaba e ao Ceará.





Segundo Farias *et al.* (2007), a vegetação predominante na BEA é do tipo caatinga arbórea a subarbórea densa. Com exceção de algumas roças, quase não foi alterada pela ação humana. Situada em uma das áreas mais secas do estado, Aiuaba apresenta uma média de precipitação pluviométrica em torno de 560 mm anuais.

A bacia tem área de 11,78 km<sup>2</sup>, um reservatório localizado no seu exutório com capacidade de acumulação de 59.700 m<sup>3</sup>, tempo de concentração de 1,1 h, coeficiente de escoamento superficial médio de 3%, evaporação média no lago 1930,60 mm·ano<sup>-1</sup> e interceptação vegetal média de 15% (LIMA, 2010).

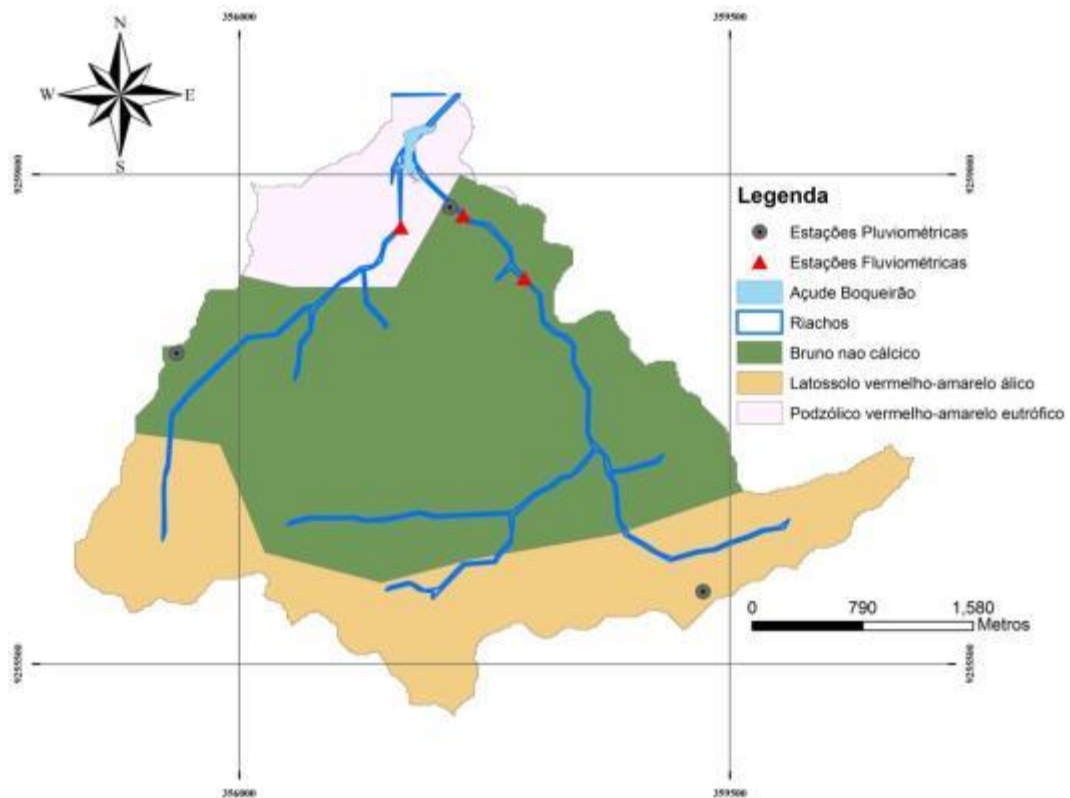
### **3.1 Caracterização do meio físico**

Esta pesquisa usou como base, diversos outros estudos já desenvolvidos na BEA e as informações disponibilizadas por tais trabalhos foram utilizadas como base referencial para a elaboração das ações que foram desenvolvidas na pesquisa. Além disso, as informações cedidas por essa base de dados foram atualizadas e incrementadas pelos resultados obtidos ao final deste estudo.

#### **3.1.1 Solos**

Costa (2007), utilizando informações de estudos realizados em escala regional, no caso a bacia do Benguê, assumiu que as principais classes de solos encontradas na BEA (Figura 2) são: Podzólico vermelho-amarelo eutrófico, Latossolo vermelho-amarelo álico e Bruno não cálcico.

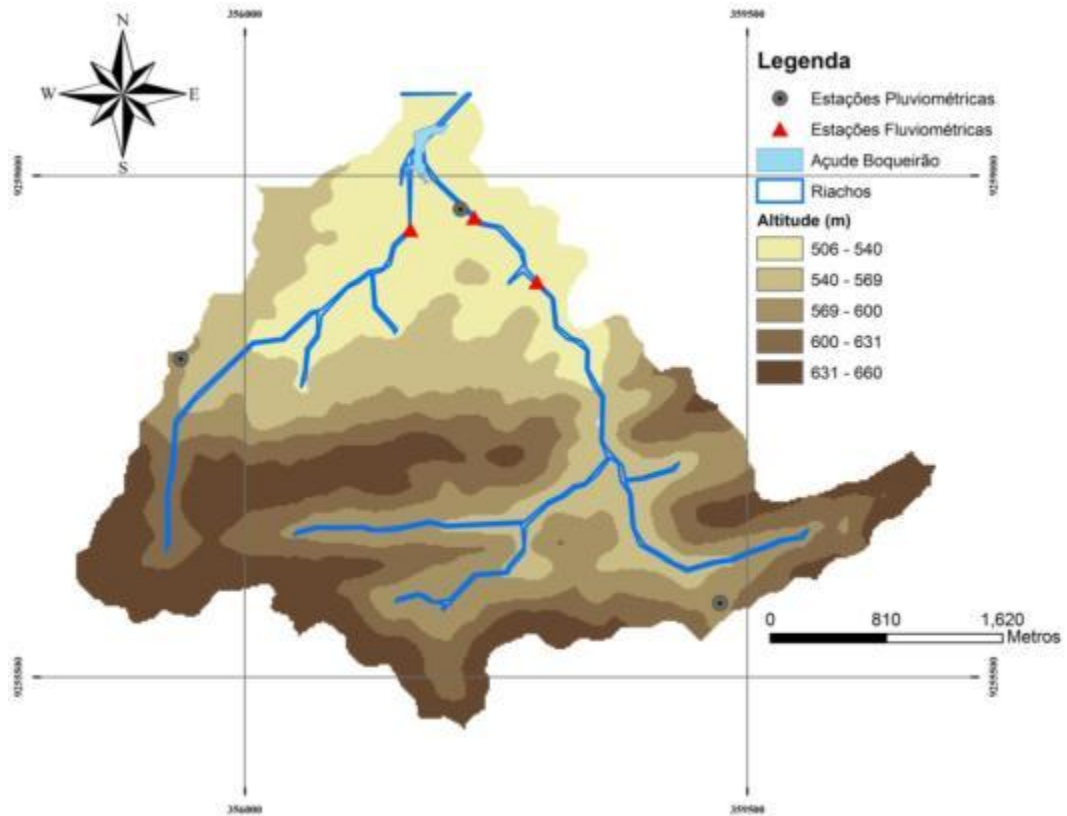
Figura 2 - Classes de solo da BEA.



### 3.1.2 Relevo

Na BEA a elevação varia de 530 a 670 metros acima do nível do mar, com as maiores altitudes verificadas ao sul e sudoeste da bacia (Figura 3). Nessas áreas predominam o relevo plano com declividades inferiores a 3%. Nas proximidades do exutório também se verificam relevo plano a suave ondulado, enquanto que na metade sul da bacia há a predominância de relevo ondulado a forte ondulado com declividade que varia de 8 a 45% (PINHEIRO, 2011).

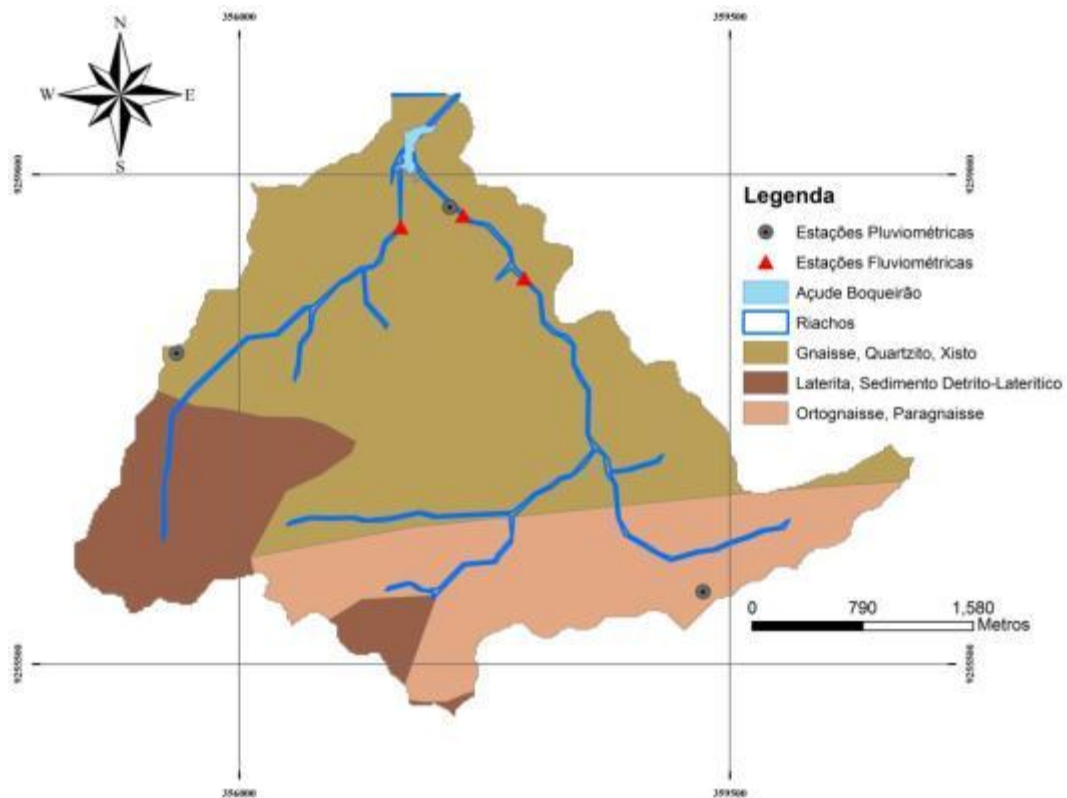
Figura 3 - Classes de relevo da BEA.



### 3.1.3 Geologia

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) disponibiliza informações acerca da geologia de todo o Nordeste. Em se tratando da BEA (Figura 4), são encontradas três classes de materiais geológicos.

Figura 4 - Geologia da BEA.



### 3.1.4 Vegetação

Pinheiro (2011) aponta que a vegetação presente na BEA é predominantemente a Caatinga, termo que é utilizado no Nordeste brasileiro para designar qualquer comunidade vegetal padronizada pelo seu aspecto fisionômico, resultante da caducifolia de suas espécies no período seco, refletindo a semiaridez no chamado Polígono das Secas. Apresentam exuberância arbórea no período em que as plantas apresentam o ápice vegetativo (período chuvoso) e perda total das folhas da maioria das plantas (Figura 5) como forma adaptativa ao período de estiagem, característico da região semiárida.

Figura 5 - Vegetação de Caatinga na Estação Ecológica de Aiuaba no período seco à esquerda e no período chuvoso à direita. Fonte: (Medeiros, 2009).



### 3.1.5 Açude Boqueirão

O exutório da BEA é caracterizado pela presença do açude Boqueirão que possui a capacidade máxima de acumulação atual de 59.700 m<sup>3</sup>, drenando dois riachos intermitentes, sendo o uso d'água basicamente para dessedentação de animais com o valor estimado de 1,0 m<sup>3</sup> por dia (LIMA, 2010).

Figura 6 - Visão aérea e geral (COSTA, 2007) do açude Boqueirão.



## 4 MATERIAL E METÓDOS

### 4.1 Levantamento e Classificação de Solos

A metodologia empregada no levantamento e classificação de solos da BEA foi baseada em observações *in situ* através da abertura de trincheiras e análise textural (Figura 7) visando à caracterização dos horizontes diagnósticos de cada classe de solo.

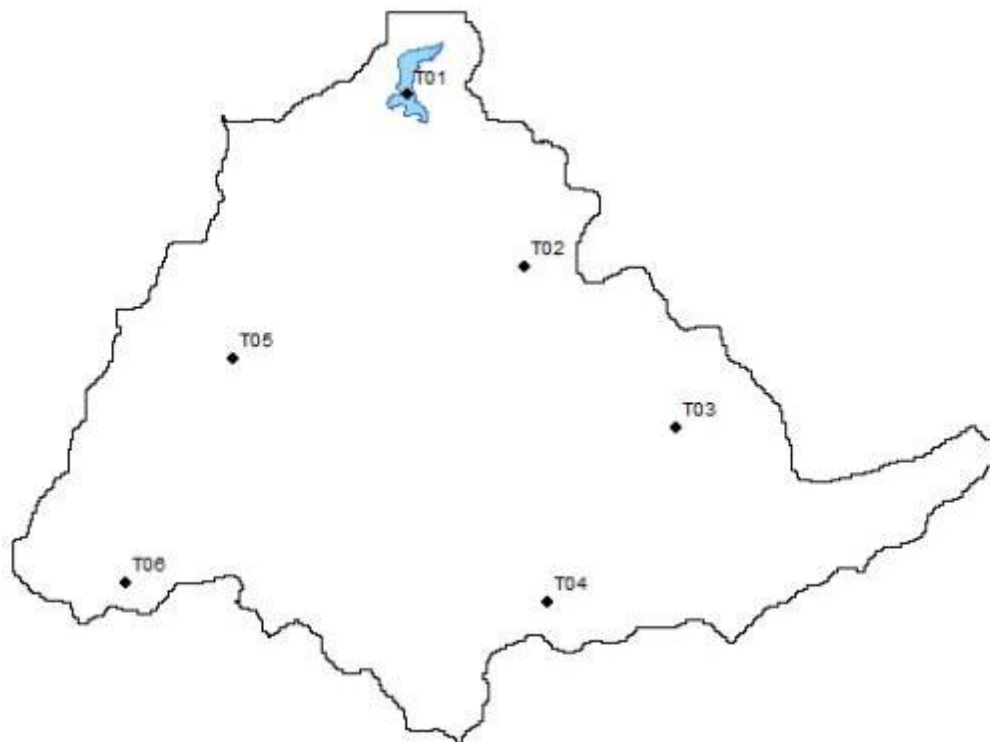
Figura 7 - Exemplo de abertura de trincheira e análise textural no local.



Além disso, foram realizadas coletas de amostras deformadas de diferentes camadas do solo, deformadas, para posterior análise em laboratório dos atributos físicos, químicos e mineralógicos.

A definição dos locais de amostragem seguiu o mapa de solos até então existente para a BEA (COSTA, 2007). Além disso, determinaram-se previamente os locais considerados representativos à classificação e, durante as campanhas, outros locais foram selecionados por terem sido considerados da mesma maneira, representativos. Todos os procedimentos *in situ* seguiram as indicações propostas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2005).

Figura 8 - Esquemática dos locais de amostragem de solos.



#### ***4.1.1 Métodos de análise de solos***

As análises físicas, químicas e de fertilidade foram realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Solos da UFC e no Laboratório de Solos do IFCE – Campus Limoeiro.

##### ***4.1.1.1 Análises físicas***

Para realização das análises físicas adotam-se os seguintes procedimentos:

- Calhaus e cascalhos - separados por tamisação, empregando-se peneiras de malha de 20 mm e 2 mm, respectivamente, para retenção dos calhaus e dos cascalhos nesse fracionamento inicial da amostra total, previamente preparada mediante secagem ao ar e destorroamento.
- Terra fina - separada por tamisação, no mesmo fracionamento comum à determinação anterior, recolhendo-se o material mais fino, passado em peneira de malha de 2 mm.
- Composição granulométrica - determinada por tamisação e sedimentação, utilizando-se solução de hexametáfosfato de sódio ou hidróxido de sódio

como dispersante e agitação em “stirrer” de alta rotação. A argila foi determinada pelo método da pipeta e a fração areia por peneiramento utilizando-se a peneira de 0,05 mm com posterior separação da areia grossa na peneira de 0,20 mm. O silte é calculado por diferença.

- Argila dispersa em água - determinada pelo método da pipeta como na determinação anterior sem o uso do dispersante.
- Grau de flocculação - calculado segundo a fórmula:

$$GF(\%) = 100 \times \frac{(\text{argila total} - \text{argila dispersa em água})}{\text{argila total}} \quad (1)$$

#### 4.1.1.2 Análises químicas

Para realização das análises químicas adotam-se os seguintes procedimentos:

- pH em água e em KCl N - determinados potenciométricamente na suspensão solo-líquido de 1:2,5 com tempo de contato não inferior à uma hora e agitação da suspensão imediatamente antes da leitura.
- Carbono orgânico - determinado através da oxidação da matéria orgânica pelo bicromato de potássio 0,4 N em meio sulfúrico e titulação pelo sulfato ferroso 0,1 N.
- Nitrogênio total - determinado por digestão da amostra com mistura ácida sulfúrica na presença de sulfatos de cobre e de sódio, dosagem do N por volumetria com HCl 0,01 N após a retenção do NH<sub>3</sub> em ácido bórico, em câmara de difusão.
- Fósforo assimilável - extraído com solução de HCl 0,05 N e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N e determinado colorimetricamente em presença do ácido ascórbico.
- Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis - extraídos com solução de KCl N na proporção 1:10. São determinados em 3 alíquotas de 25 ml da seguinte maneira: Ca<sup>++</sup> e Mg<sup>++</sup> são determinados conjuntamente por titulação complexométrica com solução de EDTA 0,025 N; Ca<sup>++</sup> é determinado isoladamente também por titulação complexométrica com solução de EDTA. O Al<sup>+++</sup> foi determinado volumetricamente com solução diluída de NaOH.
- Potássio e sódio trocáveis - extraídos com solução de HCl 0,05 N e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N, na proporção 1:10 e determinados por fotometria de chama.



- Valor S (soma de cátions trocáveis) – calculado pela fórmula:

$$S = Ca^{++} + Mg^{++} + K^+ + Na^+ \quad (2)$$

- Acidez extraível (H + Al) - extraída com solução de acetato de cálcio N ajustada a pH 7 na proporção 1:15, determinada por titulação com solução de NaOH 0,025 N.
- Valor T (capacidade de troca de cátions – CTC) - calculado pela fórmula:

$$T = \text{valor S} + H^+ + Al^{+++} \quad (3)$$

- Valor V (percentagem de saturação por bases) - calculado pela fórmula:

$$V = \frac{100 \cdot \text{valor S}}{\text{Valor T}} \quad (4)$$

- Percentagem de saturação por alumínio – calculada pela fórmula:

$$\frac{100 \times Al^{+++}}{\text{Valor S} + Al^{+++}} \quad (5)$$

- Percentagem de saturação por sódio - calculada pela fórmula:

$$\frac{100 \times Na^+}{\text{Valor T}} \quad (6)$$

- Percentagem da água na pasta saturada - determinada por mistura de terra fina seca ao ar com adição gradual de água.
- Condutividade elétrica do extrato de saturação - determinada por condutivimetria no extrato de saturação, proveniente da filtração a vácuo da pasta saturada.
- Sais solúveis - a determinação foi feita pela medição dos cátions e ânions no extrato aquoso: proveniente da filtração a vácuo da pasta saturada.

- Cálcio, magnésio, potássio e sódio dos sais solúveis – determinados no extrato de saturação, segundo métodos similares aos adotados para as determinações desses elementos na forma trocável.

## 4.2 Modelagem hidrossedimentológica

### 4.2.1 Perda de Solo

A erosão na bacia ( $\epsilon$ ) foi determinada através da equação apresentada por Wischmeier e Smith (1978):

$$\epsilon = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (10)$$

Em que: R = fator de erosividade da chuva ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ); K = fator de erodibilidade do solo ( $\text{ton} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ); L = fator que representa o comprimento da encosta (adimensional); S = fator que representa o grau de declividade (adimensional); C = fator que representa a cobertura de solo e seu uso (adimensional) e P = fator referente às práticas conservacionistas (adimensional).

#### 4.2.1.1 Fator R

O fator Erosividade da chuva (R) expressa a capacidade de a chuva esperada, em dada localidade, causar erosão numa área sem proteção. Ocorre na primeira fase do processo, causando a desagregação da estrutura do solo. O impacto direto das gotas de chuva na superfície descoberta do solo promove a anulação das forças que mantinham os agregados estáveis, provocando a dispersão de partículas de pequena massa que são passíveis de carreamento.

O fator de erosividade de chuva de acordo com a USLE é obtido através da equação (WISCHMEIER e SMITH, 1978):

$$R = \sum (E_c \cdot I_{30}) \quad (11)$$

Em que:  $E_c$  = energia cinética da chuva ( $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e  $I_{30}$  = máxima intensidade da chuva em um intervalo de 30 minutos ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

No entanto, devido à ausência de dados contínuos de precipitação para cálculo destas componentes supracitadas, esta pesquisa utilizou a equação empírica desenvolvida por Bertoni e Lombardi Neto (1990) para a região de Campinas – SP:

$$R_m = 67,355 \cdot \left( \frac{P_m^2}{P_a} \right)^{0.85}; R = \sum_{m=1}^{12} R_m \quad (12)$$

Em que:  $P_m$  = precipitação mensal (mm);  $P_a$  = precipitação média anual (mm); e  $R_m$  = erosividade mensal da chuva ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

No cálculo da erosividade das chuvas foram usados dados de precipitação do posto situado no município de Aiuaba para o período compreendido entre 1934 e 2011. Os mesmos foram retirados do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011), tendo suas falhas preenchidas através da média aritmética dos postos dos municípios de Saboeiro, Tauá e Farias Brito. Cabe salientar que se detectou apenas 3% de falhas na série histórica.

#### 4.2.1.2 Fator K

O fator de erodibilidade do solo  $K$  ( $\text{ton}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) representa a suscetibilidade ou a predisposição do solo a processos erosivos e pode ser determinado através da equação (Wischmeier e Smith, 1978):

$$K = \frac{0,1317}{100} \left\{ 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - MO) \cdot [(sil + af) \cdot (100 - arg)]^{1,14} + 3,25 \cdot (S_1 - 2) + 2,5 \cdot (P_1 - 3) \right\} \quad (13)$$

Em que:  $MO$  = percentual de matéria orgânica;  $sil$  = percentual de silte;  $af$  = percentual de areia fina;  $arg$  = percentual de argila;  $S_1$  = parâmetro que retrata a estrutura do solo e  $P_1$  = parâmetro que retrata a permeabilidade do solo.

#### 4.2.1.3 Fatores L e S

O fator comprimento de rampa (L) representa a relação de perdas entre um declive de comprimento qualquer e um declive de 22 m de comprimento do mesmo solo, mesmas características de chuva, mesmo grau de inclinação e mesmas condições de manejo. O fator do grau de declividade S descreve o efeito do gradiente de declividade sobre o solo, e é definido como sendo a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9%, para as mesmas condições (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Considerando-se um comprimento de rampa  $L_r > 3\text{m}$  e uma declividade média superior a 9%. O fator LS poder ser obtido através da seguinte expressão:

$$LS = 1,6 \cdot \left[ \frac{FAC \cdot Res}{22,1} \right]^{0,6} \cdot \text{sen} \left( \frac{decliv \cdot 0,01745}{0,09} \right)^{1,3} \quad (14)$$

Sendo FAC = acumulação de fluxo, obtido através de técnicas de geoprocessamento; Res = resolução do SRTM, 92 m; Decliv = declividade das células, obtido através de softwares de geoprocessamento.

#### 4.2.1.4 Fatores C e P

O fator relacionado à cobertura do solo C pode ser definido como a condição de cobertura do solo em determinada época do ano, dependendo do tipo de vegetação ou estágio de desenvolvimento de uma cultura. Valores de C foram calculados para a bacia do Benguê por Creutzfeldt (2006) e adaptados para a BEA, como mostra a tabela a seguir.

Tabela 1 - Valores de uso e ocupação do solo (C) para BEA

Classe de Cobertura	Fator C
Agropecuária	0,1
Caatinga arbórea arbustiva conservada	0,02
Caatinga arbórea arbustiva perturbada	0,06
Floresta seca em superfície dissecada	0,009
Vegetação de tabuleiro conservada	0,004
Estradas	1

Adaptado de (Creutzfeldt, 2006).

O valor referente ao item de práticas conservacionistas do solo P também é um condicionante de redução da erosão, bem como, o fator de cobertura de solo C. Seu valor é expresso pela relação entre perdas de solos esperadas usando uma determinada prática conservacionista e as perdas quando a cultura é conduzida morro abaixo em solo nu. Como não existe prática conservacionista na região de estudo e já que a mesma não sofre intervenções antrópicas, adotou-se o valor máximo de referência (1,0) para o fator (P).

#### 4.2.1.5 Produção de Sedimentos

A produção de sedimentos  $M_E$  em uma bacia hidrográfica pode ser quantificada empiricamente de acordo com a equação:

$$M_E = \varepsilon \cdot A \cdot SDR \quad (19)$$

Em que:  $\varepsilon$  = massa erodida por unidade de área (ton/ha); A = área da bacia (ha) e SDR = fração de sedimento erodido que consegue atingir a rede de drenagem.

#### 4.2.2 Razão de aporte de sedimentos

Araújo (2003) afirma que a razão entre a massa de sedimentos que deixa uma bacia ( $M_E$ ) e a massa de sedimentos localmente erodida ( $M_L = \varepsilon \cdot A$ ) denomina-se razão de aporte de sedimentos (SDR). Após estudos realizados para diferentes bacias hidrográficas do Estado do Ceará (ARAÚJO, 2003), a equação que apresentou melhores resultados na estimativa do SDR:

$$\text{Log}_{10}(\text{SDR}) = 2,943 - 0,824 \cdot \text{Log}_{10}(\text{Lm}/\text{Fr}) \quad (20)$$

Em que: Lm é o comprimento máximo da bacia, em linha reta, medido paralelamente ao rio principal em metros; e Fr a diferença entre a cota média do divisor de água e a cota do exutório em metros.

### 4.2.3 Descarga sólida afluyente

A estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório Boqueirão foi realizada através de uma curva-chave de sedimentos. Medeiros (2009) apresentou esta curva-chave para a seção imediatamente a montante do açude, com  $R^2=0,931$  e que é representada pela seguinte equação:

$$y = 1,0E-05x^{1,403} \quad (21)$$

Os dados de vazões afluentes diárias usados para o cálculo da descarga sólida de sedimentos, através da curva-chave, foram obtidos de simulações com o Modelo WASA-SED (MEDEIROS, 2009) para o período compreendido entre 2000 e 2008.

As descargas sólidas afluentes diárias, modeladas pelo WASA-SED, foram somadas para todo o período, obtendo-se, assim, a massa de sedimentos total que aporta ao reservatório ( $M_E$ ). A partir desta informação e com a massa de sedimentos localmente erodida ( $M_L$ ), obtida através da USLE para o mesmo período, foi possível, então, realizar uma calibração do parâmetro SDR para a bacia em questão.

## 4.3 Identificação das Fontes de Produção de Sedimentos

Dadas às características do açude Boqueirão, localizado no exutório da BEA, com baixa frequência de vertimentos, mesmo em anos de elevada pluviosidade, uma parcela significativa de sedimentos erodidos na bacia fica depositada no reservatório.

Para identificação das áreas que contribuem com sedimentos que depositam no reservatório Boqueirão, utilizaram-se duas abordagens distintas. A primeira consistiu na aplicação de superposição de mapas com características da bacia, com o apoio de ferramentas de SIG. A segunda abordagem foi à abertura de trincheiras e coleta de amostras do perfil do solo realizadas dentro do reservatório e em pontos representativos da bacia hidrográfica do açude.

### 4.3.1 Modelagem Empírica (SIG)

A identificação de áreas mais susceptíveis a processos erosivos foi obtida pela superposição de mapas com a espacialização dos parâmetros da USLE, como segue:

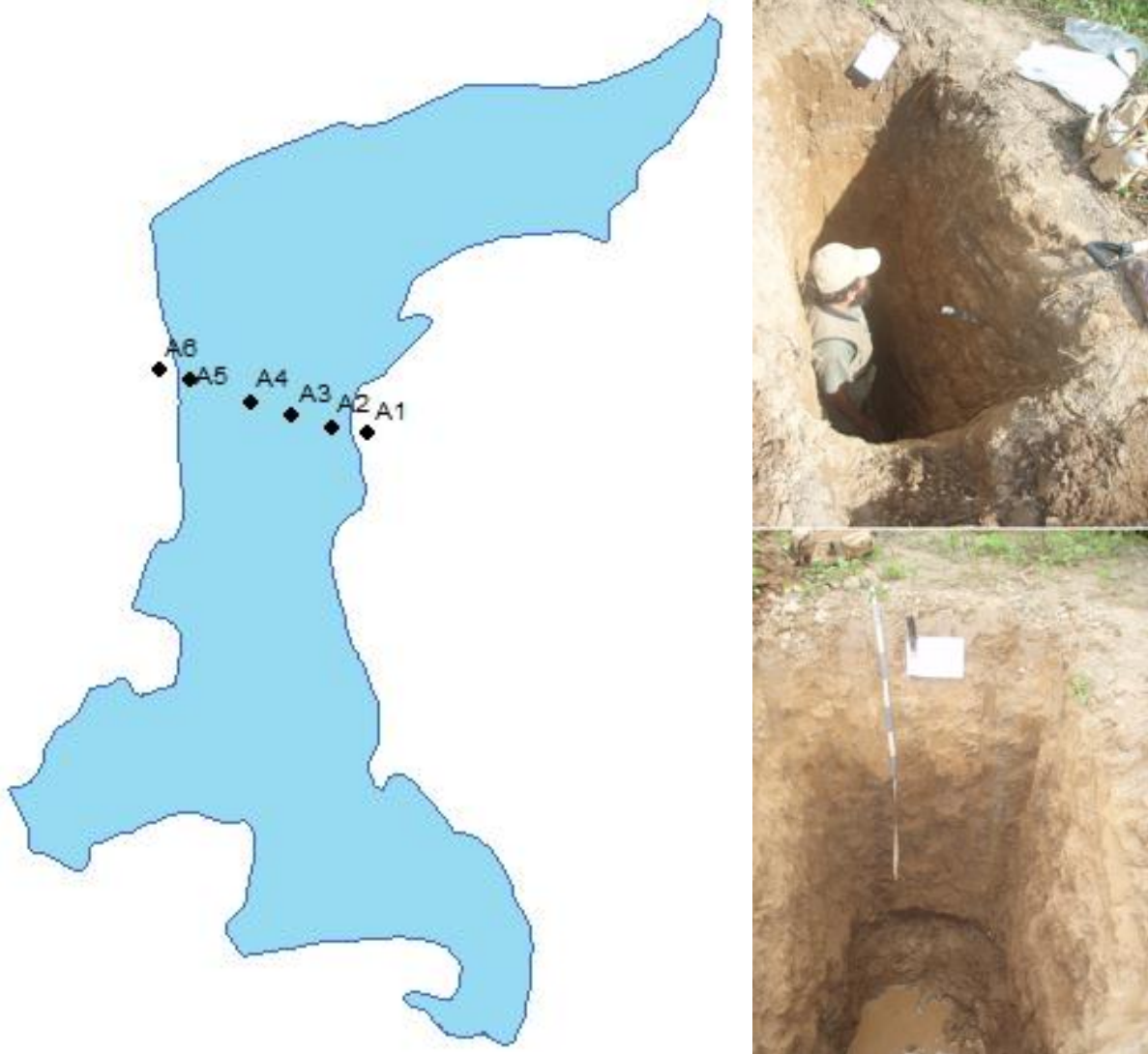
- O mapa de erosividade foi gerado usando valores médios anuais estimados para o posto pluviométrico localizado na cidade de Aiuaba;
- O mapa de erodibilidade foi gerado a partir do novo mapa de solos desenvolvido neste estudo e utilizando valores de K médios para cada uma das classes de solos encontradas na bacia;
- O mapa do fator topográfico foi gerado a partir do modelo digital de elevação SRTM;
- O mapa do fator de uso e ocupação do solo utilizado foi o mesmo desenvolvido por Creutzfeldt (2006).

#### ***4.3.2 Análises Mineralógicas***

As trincheiras foram abertas em uma seção transversal do reservatório e escavadas até o limite do lençol freático (Figura 9). Foram realizadas coletas das diferentes camadas encontradas em cada trincheira (Figura 9).

As amostras coletadas foram enviadas ao Laboratório de Raios-X da Universidade Federal Rural do Pernambuco para que fossem analisadas juntamente com análises representativas do diferentes tipos de solo da bacia utilizando o Método de Difração por Raios-X.

Figura 9 - Localização e exemplo de abertura de trincheiras no leito do açude Boqueirão



#### 4.4 Estimativa do padrão de Assoreamento do Açude Boqueirão

O padrão de assoreamento do reservatório foi realizado através de duas etapas. A primeira consistiu na realização de um levantamento topográfico planialtimétrico, a fim de determinar a atual capacidade do reservatório e obter informações confiáveis e detalhadas do terreno. A segunda etapa consistiu na espacialização dos sedimentos no leito do reservatório através de modelagem do padrão de deposição visando à determinação da topografia inicial do reservatório.



#### 4.4.1 Levantamentos Topográficos

Os levantamentos planialtimétricos do reservatório foram realizados em épocas do ano distintas, aproveitando os percentuais de área disponíveis a serem levantado, ou seja, aproveitando as áreas que não estavam inundadas.

O primeiro levantamento foi realizado no mês de novembro de 2011 e consistiu na utilização de Receptores GPS (Sistema de Posicionamento Global) para implantação de Marcos de Apoio e coleta de dados planialtimétricos (N, E, Z), georreferenciados ao datum WGS 1984, com precisão centimétrica.

O segundo levantamento foi realizado no mês de Agosto de 2012 e aproveitou-se de um momento de esvaziamento quase que completo do reservatório. Para este levantamento, optou-se pelo uso de uma Estação Total, pela rapidez e precisão milimétrica que pode se obter.

#### 4.4.2 Modelagem da distribuição de sedimentos

A metodologia para estimativa da distribuição de sedimentos no reservatório foi semelhante à utilizada por Mamede (2008) em seu estudo. O autor sugere que o processo de deposição de sedimentos no reservatório é proporcional à coluna d'água ao longo da seção transversal analisada. Neste estudo, entretanto, optou-se por aplicar o modelo a cada um dos pontos adquiridos através do levantamento topográfico.

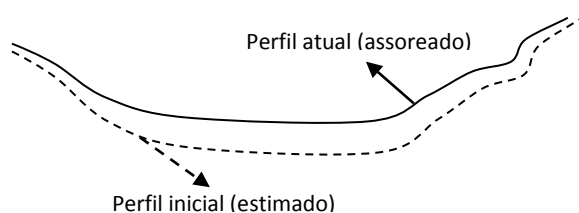
A determinação dos incrementos de altura  $\Delta h_i$  seguiu a seguinte equação:

$$\Delta h_i \approx H_i \cdot \frac{V_{\text{ass},i}}{V_{\text{máx}}} \cdot f \quad (22)$$

Em que:  $H_i$  é a altura acumulada do incremento de sedimentos (metros),  $V_{\text{ass},i}$  é o volume de sedimentos que entrou no reservatório em cada passo de tempo,  $V_{\text{máx}}$  é a capacidade máxima do reservatório e  $f$  é fator de correção para o reservatório.

O fator  $f$  é calibrado para o reservatório através da relação entre o volume modelado pela USLE e o medido pela topografia. O resultado esperado para esta simulação é esquematizado a seguir.

Figura 10 - Esquema do assoreamento em uma seção do leito do açude Boqueirão



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Classificação dos solos

Seguindo as observações *in situ* das trincheiras amostradas foi possível realizar a caracterização das classes de solos em 1º nível (ordem):

- T01 e T05: Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, representando assim a classe dos ARGISSOLOS.
- T02: Solos constituídos por material mineral, com argila de atividade alta, alta saturação por bases e horizonte B textural imediatamente abaixo de horizonte A fraco ou moderado ou proeminente ou horizonte E, representando assim a classe dos LUVISSOLOS.
- T03 e T04: Solos pouco evoluídos e sem qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Horizontes glei, plúntico e vértico, quando presentes, não ocorrem em condição diagnóstica, representando assim a classe dos NEOSSOLOS.
- T06: Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200cm da superfície do solo ou dentro de 300cm, se o horizonte A apresenta mais que 150cm de espessura, representando assim a classe dos LATOSSOLOS.

Além dos aspectos técnicos acima citados, foi realizada a marcação de outras observações com relação às trincheiras e amostras coletadas que ajudaram na elaboração do levantamento das classes de solos sendo elas apresentadas a seguir.

Tabela 2 - Características das trincheiras amostradas ao longo da BEA

Trincheira	Amostra	Profundidade	Características
T01		0 - 30 cm	Trincheira cavada no leito do açude, com vegetação rasteira: salsa.
	P1	0 - 15 cm	
T02	P2	15 - 50 cm	Trincheira próxima à uma das Estações Pluviométricas do grupo Hidrosed (EP1), com vegetação arbórea: marmeleiro, baraúna, pereiro, catingueira.
	P3	> 50 cm	
T03		0 - 30 cm	Local de lajedo e afloramentos rochosos, com vegetação nativa: xique-xique, angico.
T04		0 - 30 cm	Vegetação semi-arbustiva: xique-xique, mandacará, jurema. Topo da serra com afloramentos rochosos.
	P1	0 - 20 cm	
T05	P2	20 - 40 cm	Trincheira próxima a outra Estação Pluviométrica do grupo Hidrosed (EP2), com vegetação caatinga hiperxerófila densa: cipaúba, canção, fauna e flora abundante.
	P3	> 40 cm	
T06	P1	0 - 30 cm	Trincheira aberta no divisor Sudoeste da bacia. Caatinga hiperxerófila densa preservada. Relevo suave a plano
	P2	> 30 cm	

Complementarmente, análises físicas e químicas do solo foram realizadas para possibilitar uma classificação detalhada do tipo de solo, conforme sumarizado nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Resultado das análises físicas das amostras de solos coletadas

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Granulometria (g/kg)						Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	
			Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Argila natural	Grau de flocculação	Solo	Partícula
T01	-	0 - 30	221	233	388	158	133	16	1,56	2,70
T02	A	0 - 15	23	361	508	108	57	47	1,60	2,61
	B	15 - 50	24	222	528	226	153	32	1,55	2,64
	C	+50	25	248	467	260	238	8	1,53	2,67
T03	-	0 - 30	26	342	507	125	38	70	1,43	2,55
T04	-	0 - 30	27	356	543	74	17	77	1,49	2,52
T05	A	0 - 20	28	211	471	290	143	51	1,33	2,62
	B	20 - 40	29	160	466	345	132	62	1,30	2,65
	C	+40	30	153	470	347	102	71	1,39	2,61
T06	A	0 - 30	31	184	278	507	16	97	1,23	2,63
	B	+30	32	185	331	452	73	84	1,21	2,59

Tabela 4 - Resultado das análises químicas das amostras de solos coletadas

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	g/kg		Relação C/N	M. O. g/kg	pH	P mg/dm <sup>3</sup>	%		
			C	N					V	PST	m
T01	-	0 – 30	2,94	0,32	9,00	5,07	5,40	7,00	66,0	1,0	7,0
T02	A	0 – 15	7,14	0,70	10,00	12,31	5,60	3,00	45,0	1,0	14,0
	B	15 – 50	3,66	0,30	12,00	6,31	4,70	1,00	43,0	6,0	39,0
	C	+50	0,90	0,08	11,00	1,55	7,70	8,00	100,0	69,0	-
T03	-	0 – 30	19,50	2,15	9,00	33,62	5,50	9,00	54,0	1,0	8,0
T04	-	0 – 30	18,18	1,87	10,00	31,34	5,10	6,00	43,0	1,0	11,0
T05	A	0 – 20	12,78	1,38	9,00	22,03	4,40	3,00	13,0	1,0	80,0
	B	20 – 40	7,74	0,63	12,00	13,34	4,50	1,00	17,0	1,0	72,0
	C	+40	5,82	0,54	11,00	10,03	4,30	1,00	16,0	1,0	76,0
T06	A	0 – 30	6,54	0,62	11,00	11,27	4,00	1,00	19,0	3,0	71,0
	B	+30	5,22	0,58	9,00	9,00	4,30	1,00	13,0	1,0	76,0

Tabela 5- Resultado das análises de fertilidade das amostras de solos coletadas

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Cmolc/kg							CE dS/m	
			K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	SB		CTC
T01	-	0 – 30	0,04	1,20	1,20	0,02	0,20	1,32	2,50	3,20	0,17
T02	A	0 – 15	0,05	1,00	1,30	0,01	0,40	2,97	2,40	5,30	0,12
	B	15 – 50	0,03	0,70	1,20	0,34	1,50	3,14	2,30	5,40	0,44
	C	+50	0,08	1,30	2,30	8,13	0,00	0,00	11,80	11,80	5,71
T03	-	0 – 30	0,04	2,60	2,30	0,02	0,45	0,45	5,00	9,20	0,24
T04	-	0 – 30	0,06	2,20	1,90	0,02	0,50	5,61	4,20	9,80	0,4
T05	A	0 – 20	0,03	0,40	0,40	0,03	3,45	6,27	0,90	7,10	0,19
	B	20 – 40	0,03	0,50	0,50	0,02	2,55	4,79	1,00	5,80	0,12
	C	+40	0,02	0,50	0,40	0,01	2,85	4,62	0,90	5,60	0,13
T06	A	0 – 30	0,02	0,40	0,40	0,14	2,40	4,46	1,00	5,40	0,4
	B	+30	0,01	0,30	0,30	0,03	1,85	3,96	0,60	4,60	0,13

Seguindo os procedimentos propostos pela EMBRAPA (2005), utilizando os resultados das análises físicas e químicas, foi possível a determinação da classificação detalhada dos solos encontrados na bacia.

As amostras T01 e T05 anteriormente descritas como sendo da classe dos ARGISSOLOS, seguiram o processo de classificação, e através do método proposto pela EMBRAPA, com base nas características amostradas foram classificadas como sendo ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos.

As amostras T02 e T03 que foram previamente colocadas na classe dos LUVISSOLOS, apresentaram caráter plânico no horizonte B e C dentro de 150 cm da

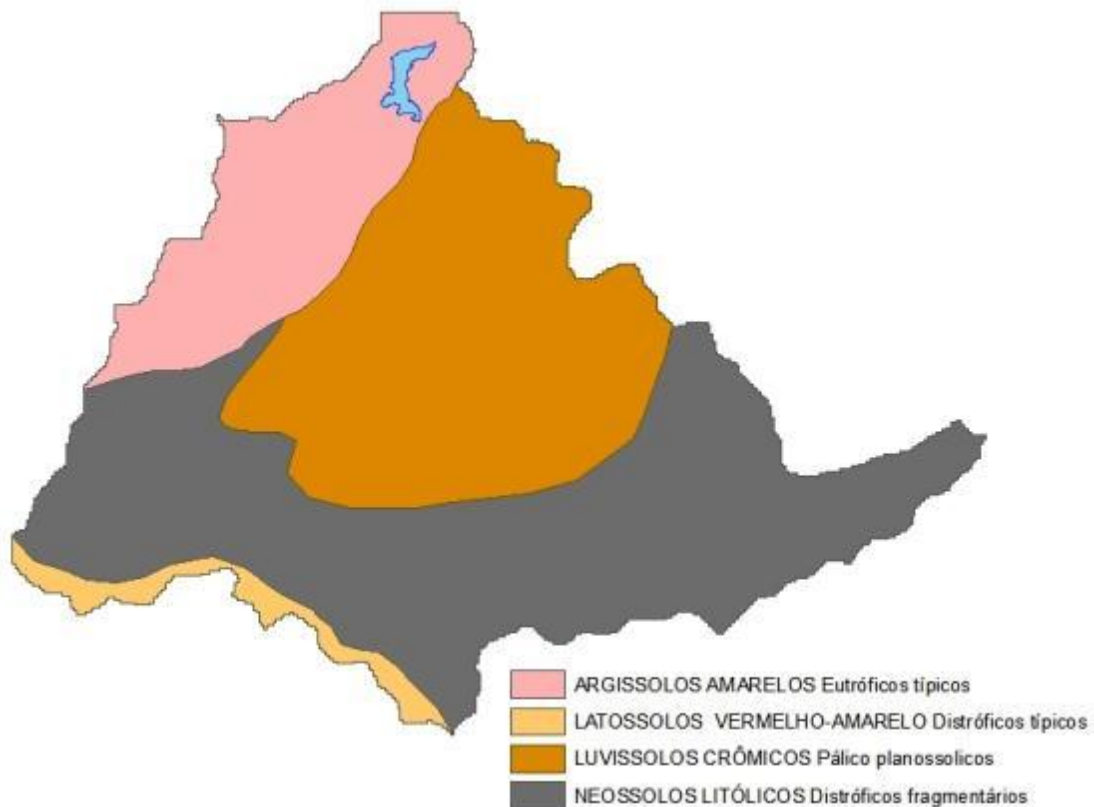
superfície do solo, por isso, se enquadraram como sendo da classe dos LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálicos planossólicos.

Já a amostra T04 que foi previamente enquadrada na classe dos NEOSSOLOS, apresentou além de saturação por bases baixa, uma característica de contato lítico fragmentado, sendo dessa forma classificado como NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários.

Por último, a amostra T06 que havia sido anteriormente enquadrada na classe dos LATOSSOLOS, apresentou saturação por bases baixa na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B e cores vermelho-amareladas e amarelo-vermelhadas que não se enquadram em nenhuma das outras classes existentes, sendo encaixada na classe dos LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos típicos.

O uso de técnicas de geoprocessamento com informações de geologia, declividade, vegetação, entre outras características físicas, possibilitou o cruzamento das informações laboratoriais para gerar o mapa de solos atualizado para a BEA, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Classes de solos da Bacia Experimental de Aiuaba



A classe de solos que se mostrou mais predominante foi a dos NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários, ocupando quase metade da extensão da bacia. Esta classe de solos foi mais evidenciada nas áreas com maiores elevações altimétricas.

Em contrapartida a classe de solos em menor presença foi a dos LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos típicos, ocupando apenas uma pequena faixa situada no divisor sudoeste da bacia. A identificação da área de ocupação desta mancha de solo foi de alta complexidade devido o fato da vegetação presente na mesma se encontrar num estado de elevada preservação.

Tabela 6 - Representatividade das classes de solos da BEA

Classe de solos	Área (ha)	Área (%)
ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos	210	17
LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos típicos	40	3
LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálico planossolicos	421	34
NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários	571	46

A classificação dos solos da bacia realizada neste estudo difere significativamente do mapa de reconhecimento dos solos no Estado do Ceará na escala de 1:600.000, produzido pelo projeto RADAM Brasil na década de 80, o que pode ser explicado pela escala de trabalhos em ambos os estudos.

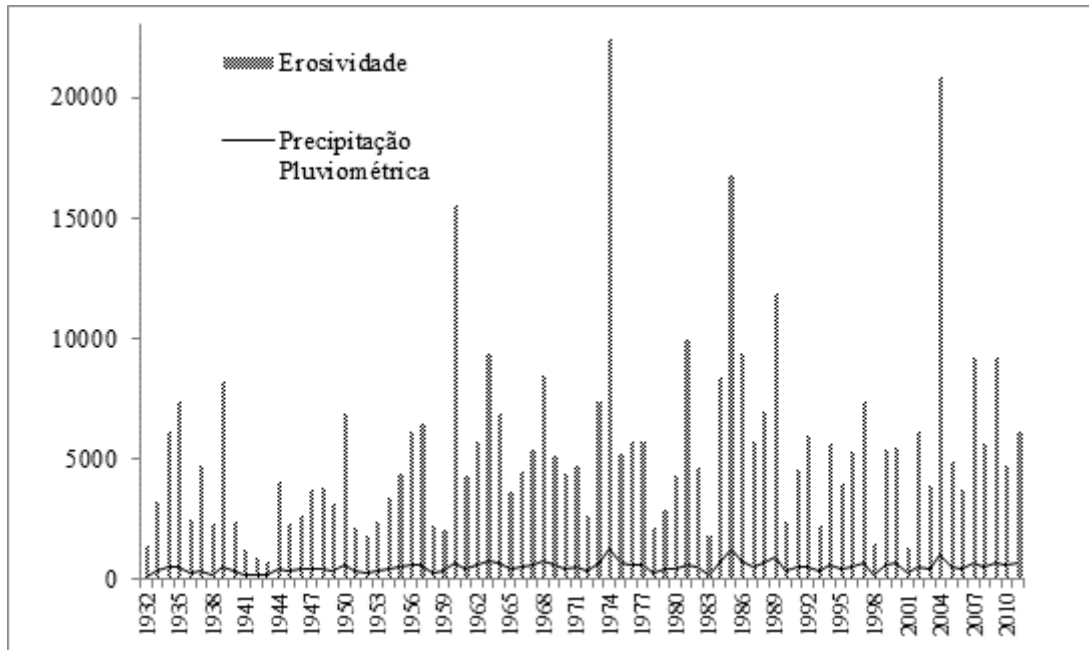
## 5.2 Estimativa da erosão na bacia

A erosividade (Tabela 7) total para a bacia no período de 1932 a 2011, utilizando-se o posto localizado na cidade de Aiuaba, foi de 437.641,4 MJ·mm·ha<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>, já a média anual foi de 5470,5 MJ·mm·ha<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> e a precipitação pluviométrica média para o período foi de 529,3 mm. Valores bem próximos foram encontrados por (Lima, 2010) para a mesma bacia e períodos semelhantes.

Tabela 7 - Erosividade ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) para a BEA durante o período estudado

Ano	Erosividade	Ano	Erosividade	Ano	Erosividade	Ano	Erosividade
1932	1417,5	1952	1854,1	1972	2644,7	1992	5965,9
1933	3234,1	1953	2401,7	1973	7419,3	1993	2223,6
1934	6125,7	1954	3392,5	1974	22420,2	1994	5694,7
1935	7365,2	1955	4425,8	1975	5248,6	1995	3974,6
1936	2515,4	1956	6123,4	1976	5755,5	1996	5296,7
1937	4760,3	1957	6454,9	1977	5710,9	1997	7367,7
1938	2367,7	1958	2273,5	1978	2168,8	1998	1528,8
1939	8199,8	1959	2125,0	1979	2953,5	1999	5420,7
1940	2402,9	1960	15509,1	1980	4341,1	2000	5526,9
1941	1217,1	1961	4358,2	1981	9958,1	2001	1357,9
1942	899,4	1962	5740,5	1982	4636,0	2002	6173,0
1943	758,8	1963	9385,0	1983	1824,2	2003	3895,3
1944	4046,1	1964	6921,0	1984	8430,0	2004	20839,7
1945	2341,5	1965	3696,1	1985	16791,8	2005	4905,0
1946	2673,4	1966	4489,3	1986	9363,0	2006	3718,7
1947	3765,1	1967	5400,1	1987	5749,1	2007	9203,8
1948	3831,5	1968	8452,6	1988	6966,2	2008	5688,4
1949	3166,1	1969	5173,4	1989	11907,7	2009	9198,2
1950	6936,6	1970	4405,0	1990	2402,8	2010	4776,4
1951	2142,6	1971	4700,7	1991	4607,2	2011	6137,9

Figura 12 - Erosividade e pluviometria da BEA para o período estudado



O fator de erodibilidade dos solos foi calculado para as quatro classes de solos encontradas na bacia neste estudo. Os valores de erodibilidade foram ponderados pela área

ocupada por cada mancha de solo e o valor final obtido foi de  $0,072 \text{ ton.h}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , o que representa uma erodibilidade muito alta, de acordo com a classificação proposta por Freire e Pessotti (1978). Este valor foi significativamente diferente dos encontrados por Lima (2010),  $0,025 \text{ ton.h}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , e Costa (2007),  $0,030 \text{ ton.h}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , em estudos na BEA utilizando a classificação de solos anterior e situou-se dentro da faixa de 0,015 e 0,033 encontrada por Medeiros (2009) para a bacia do Benguê.

Tabela 8 - Características e valores de K para os diferentes solos da BEA

<i>Classe de solo</i>	<i>Classe textural</i>	<i>Estrutura</i>	<i>K</i>	<i>Área (%)</i>
LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálicos planossólicos	Franco siltosa	Média	0,079	33,9
NEOSSOLOS LITOLICOS Distróficos fragmentários	Franco siltosa	Média	0,080	46,0
ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos	Franco argilosa	Fina	0,048	16,9
LATOSSOLOS VERMELHO- AMARELO Distróficos típicos	Franco argilo- siltosa	Muito fina	0,029	3,3

O valor encontrado para o fator topográfico (LS) foi de 0,5. Este valor divergiu do encontrado por Wiegand *et al.* (2009) e utilizado por Lima (2010) que foi de 6,96. Isto pode ser atribuído ao fato de que o modelo digital de elevação utilizado neste estudo passou por uma correção de falhas e obteve uma resolução espacial um pouco mais aprimorada do que os modelos anteriores. Em compensação, o valor situou-se dentro da faixa de variação esperada para este fator para a bacia do Benguê proposta por Medeiros (2009) que foi de 0,277 a 1,483.

O fator de uso e ocupação do solo C para cada uso na bacia foi adaptado de Creutzfeldt (2006), conforme sumarizado na Tabela 1. Para cálculo do fator C médio realizou-se uma ponderação com a área de abrangência de cada uso.

Os valores de C obtidos foram admitidos constantes para o período entre 1977 a 2011, após a instalação da Estação Ecológica de Aiuaba. Para o período anterior, entre 1932 e 1976, admitiram-se dois cenários de uso do solo, com base em informações obtidas de antigos moradores da localidade, que relataram a existência de significativa atividade agropecuária nesta época. Para incorporar tais aspectos, dois cenários de uso do solo para o período anterior à implantação da Estação Ecológica foram propostos neste estudo, quais sejam: aumento de 10% na área correspondente à agropecuária e redução da área de floresta seca; e aumento de 30% na área correspondente à agropecuária e redução da área de floresta seca. Os valores de



C e percentuais de área para cada classe de uso do solo e cenários considerados podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de C nas três configurações de uso de solo na bacia

Classe de Cobertura	Fator C	Área ocupada (%)		
		1977 – 2011 (atual)	1932 – 1976 (C10%)	1932 – 1976 (C30%)
Agropecuária	0,1	3,1	10,0	30,0
Caatinga arbórea arbustiva conservada	0,02	3,5	3,5	3,5
Caatinga arbórea arbustiva perturbada	0,06	0,1	0,1	0,1
Floresta seca em superfície dissecada	0,009	91,7	84,8	64,7
Vegetação de tabuleiro conservada	0,004	0,9	0,9	0,9
Estradas	1	0,4	0,4	0,4

Os valores médios do fator C encontrados para as três configurações de uso propostas foram de 0,016, 0,022 e 0,040 para o período de 1977 a 2011 e para o período de 1932 a 1976 nos cenários de 10% e 30% de agropecuária, respectivamente.

Os valores de uso e ocupação do solo foram de fundamental importância no cálculo da estimativa de produção de sedimentos na bacia, pois além de influenciarem nas taxas de assoreamento encontradas, permitiram esse aprofundamento na previsão de cenários de ocupação da bacia, para o período anterior ao isolamento preservativo implantado pelo IBAMA. Além da falta de dados e informações no período supracitado, o período de tempo por ele ocupado é bastante representativo, já que foi de 46 anos, ou seja, mais da metade do período de existência do reservatório.

O valor de uso e ocupação de solo adotado por Lima (2010) divergiu bastante do encontrado neste estudo pelo fato de que o autor preferiu a simplificação de apenas usar um valor único (0,0001) indicado na literatura para área com forte cobertura do solo. A simplificação adotada pelo autor desconsiderou qualquer tipo de cenário anterior ao período de preservação da bacia. Sendo que Medeiros (2009) encontrou valores entre 0,004 e 0,297 para a bacia do Benguê que engloba a BEA.

O fator de práticas conservacionistas P foi admitido como sendo igual a um, já que não há registros, seja em campo, de testemunhos dos envolvidos na bacia ou do IBAMA, da aplicação de qualquer técnica de manejo para reduzir a produção de sedimentos na bacia.

Tabela 10 - Valores de produção de sedimentos a partir da BEA

Grandeza *	1932 - 1976 (10%)	1932 - 1976 (30%)	1977 - 2011
Fator R médio	4909,7	4909,7	6191,5
Fator C médio	0,022	0,040	0,016
Taxa de erosão ( $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	3,88	7,12	3,49

\* Os valores dos fatores K e LS não apresentam variabilidade temporal neste estudo, por isso foram omitidos da tabela.

### 5.3 Estimativa do assoreamento no açude Boqueirão

Para estimativa da produção de sedimentos na bacia, ou seja, os sedimentos que efetivamente chegam ao exutório da bacia ou aportam ao reservatório localizado no exutório é preciso determinar a razão de aporte de sedimento (SDR). Embora existam várias formulações para determinação deste parâmetro, optou-se, neste estudo, pela calibração do SDR usando dados modelados de erosão pelo método da USLE ( $M_E$ ) e de produção de sedimentos derivados da curva-chave de sedimento e vazões obtidas de simulação com o modelo WASA-SED ( $M_L$ ).

#### 5.3.1 Vazão afluyente estimada pelo modelo WASA-SED

A descarga sólida afluyente diária foi gerada a partir de uma serie de dados de vazão modelados, a partir do modelo WASA-SED, e aplicados a uma equação curva-chave de sedimentos trazida por Medeiros (2009) em seu estudo. A série foi composta por dados diários de vazão no período de 2000 a 2008, totalizando um aporte de sedimento de 1448,1 ton.

#### 5.3.2 Calibração do SDR

Utilizando-se vazões diárias modeladas pelo WASA-SED para o período de 2000 a 2008 e a curva-chave de sedimentos na entrada do reservatório foi possível estimar a produção de sedimentos, que quando comparada com a erosão total neste intervalo, computada pela USLE, chegou-se a um SDR de 3,37%.

### 5.3.3 Assoreamento do Boqueirão para os diferentes cenários

De posse das informações anteriormente calculadas foi possível estimar o assoreamento do reservatório, para os dois diferentes cenários de uso e ocupação da bacia, anteriores a criação da ESEC e também para o período posterior a criação da ESEC.

Tabela 11 - Valores de assoreamento em diferentes cenários de simulação na BEA

	Cenários		
	1932 - 1976 (10%)	1932 - 1976 (30%)	1977 - 2011
Produção de sedimentos (ton)	7327	13428	5119
Tempo (anos)	45	45	35
Produção de sedimentos anual (ton·ano <sup>-1</sup> )	162,8	298,4	146,2
Assoreamento (m <sup>3</sup> )	5175,9	8885,1	3819,2
Taxa de assoreamento (m <sup>3</sup> ·ano <sup>-1</sup> )	121	223	109
Taxa de assoreamento (%·década <sup>-1</sup> )	1,52	2,66	1,54

Diante dos resultados percebe-se que o cenário de 10% de uso e ocupação da bacia por agropecuária foi o que obteve a menor taxa de assoreamento por década. Isto se deve ao fato de que no período de 1977 a 2011 ocorreram diversos anos de elevada pluviosidade, que resultaram em maior produção de sedimentos na bacia. Conforme observado na Figura 12 e Tabela 10, pode-se observar que nas últimas décadas houve uma tendência à ocorrência de anos de elevadas taxas de erosividade que impulsionaram os processos erosivos e de transporte de sedimento na bacia.

Ainda de acordo com a Tabela 10, observa-se que o cenário 30% de agropecuária obteve uma taxa de assoreamento 53,5% maior do que para o período de 1977 a 2011.

### 5.4 Padrão de Deposição

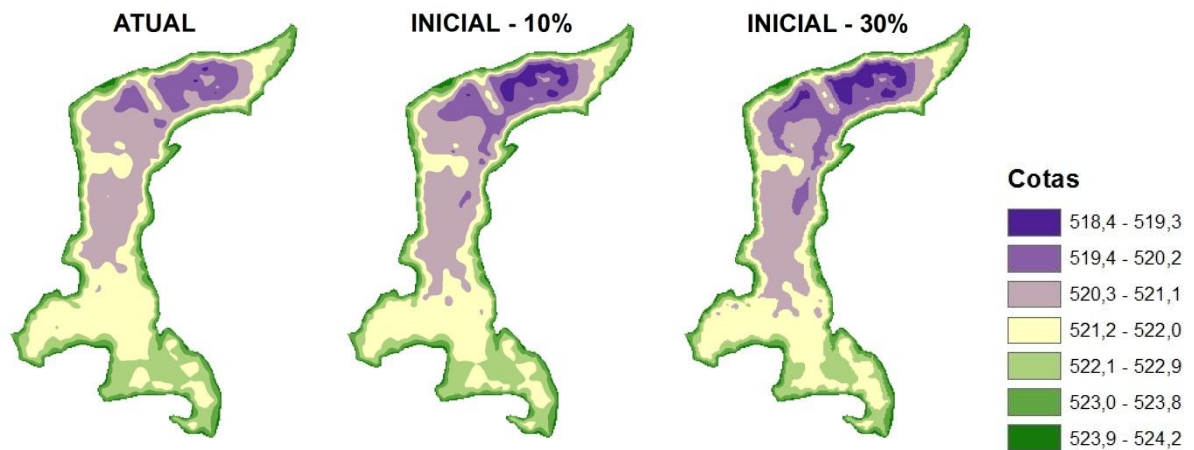
A partir dos levantamentos realizados no leito do açude Boqueirão foi possível gerar o mapa topográfico da atual situação do reservatório e também calcular o volume do mesmo no corrente ano. Atualmente, o açude Boqueirão possui capacidade máxima de armazenamento (cota do sangradouro) de aproximadamente 67.970 m<sup>3</sup>.

As simulações apontaram volumes de armazenamento iniciais, no ano de construção do açude (1932), de 80.327 m<sup>3</sup> e 84.879 m<sup>3</sup> para os cenários de 10% e 30% de ocupação da bacia por agropecuária, respectivamente. Isto indica uma perda de 11,6% e

16,30% do volume de armazenamento do mesmo, respectivamente. Tais valores podem ser considerados dentro da média para reservatórios no semiárido, se comparados aos resultados encontrados por Araújo (2003), para diferentes reservatórios do semiárido brasileiro.

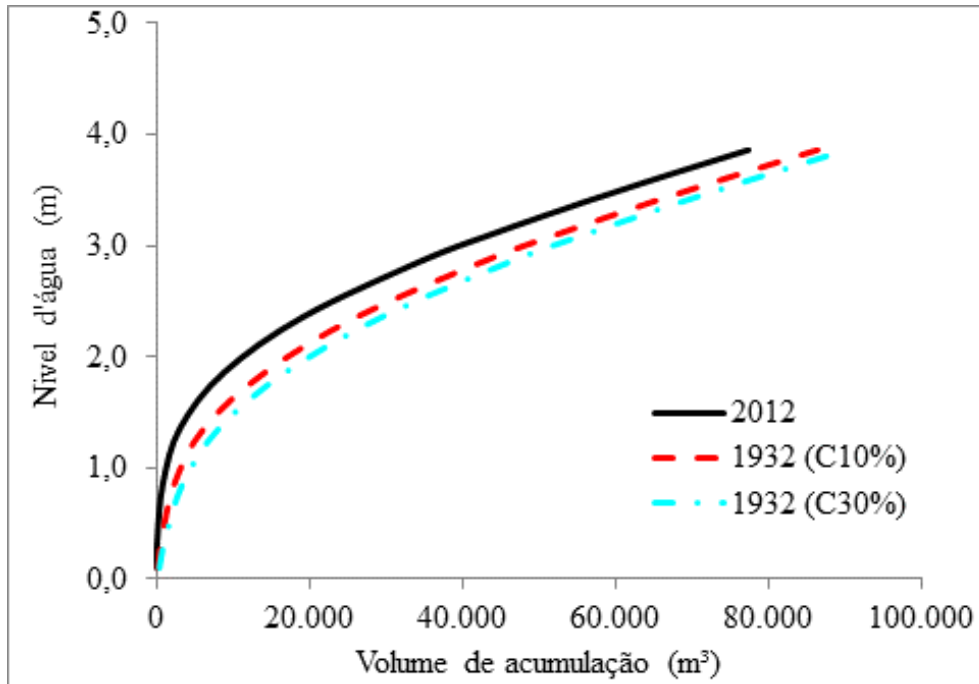
Comparando-se, visualmente (Figura 13), o armazenamento do reservatório com os dois cenários em estudo, percebe-se uma significativa redução das áreas com maiores profundidades, sendo notável perda de quase 1 metro de lâmina em diversas áreas do reservatório (regiões em azul escuro).

Figura 13 - Comparação entre as diferentes capacidades de armazenamento do açude Boqueirão



Utilizando-se os dados topográficos atuais e os derivados dos dois cenários, foi possível, com o apoio de técnicas de geoprocessamento, gerar os modelos digitais de terreno das três configurações propostas, o que permitiu estimar a área ocupada e volume de armazenamento para cada uma das cotas do terreno, ou seja, a cota - área - volume do reservatório (Figura 14) para os três cenários.

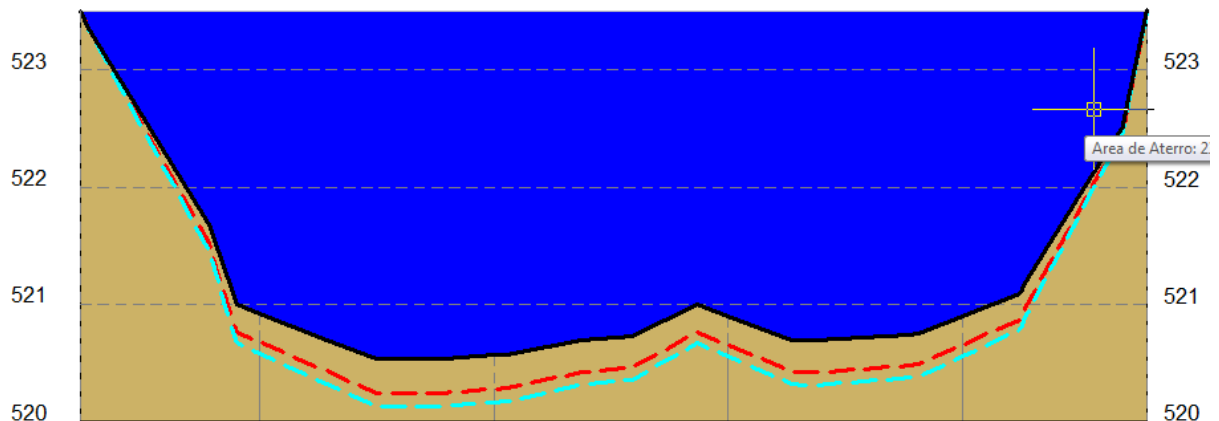
Figura 14 - Relação cota-volume para o período atual e para o inicial em dois cenários



Como se pode observar na Figura 14, a relação cota-volume original (em 1932) nos dois cenários (10% e 30%) apresenta uma discreta diferença, sendo a diferença bem mais significativa quando comparadas com a situação anual, em virtude da expressiva redução de volume nesses 80 anos de existência de 11,6% e 15,8%, considerando os cenários 10% e 30%, respectivamente.

A análise das trincheiras abertas no leito do reservatório não permitiram a determinação da camada de assoreamento no mesmo, optando-se por aplicar uma modelagem simplificada do padrão de deposição de sedimentos. Na Figura 14, demonstra-se o perfil de deposição no leito do reservatório, para a topografia atual (preto) e para os cenários considerados, de 10% (vermelho) e 30% (ciano) de uso da bacia por agropecuária.

Figura 15 - Perfil de deposição em uma seção transversal ao leito do açude Boqueirão



Analisando-se a figura percebe-se que a altura máxima de sedimentos atinge no máximo, valores próximos a 50 cm de altura, sendo que este perfil de sedimentos encontra-se visualmente distribuído em camadas uniformes, ou seja, não é possível se distinguir em campo a camada assoreada a partir da construção do reservatório.

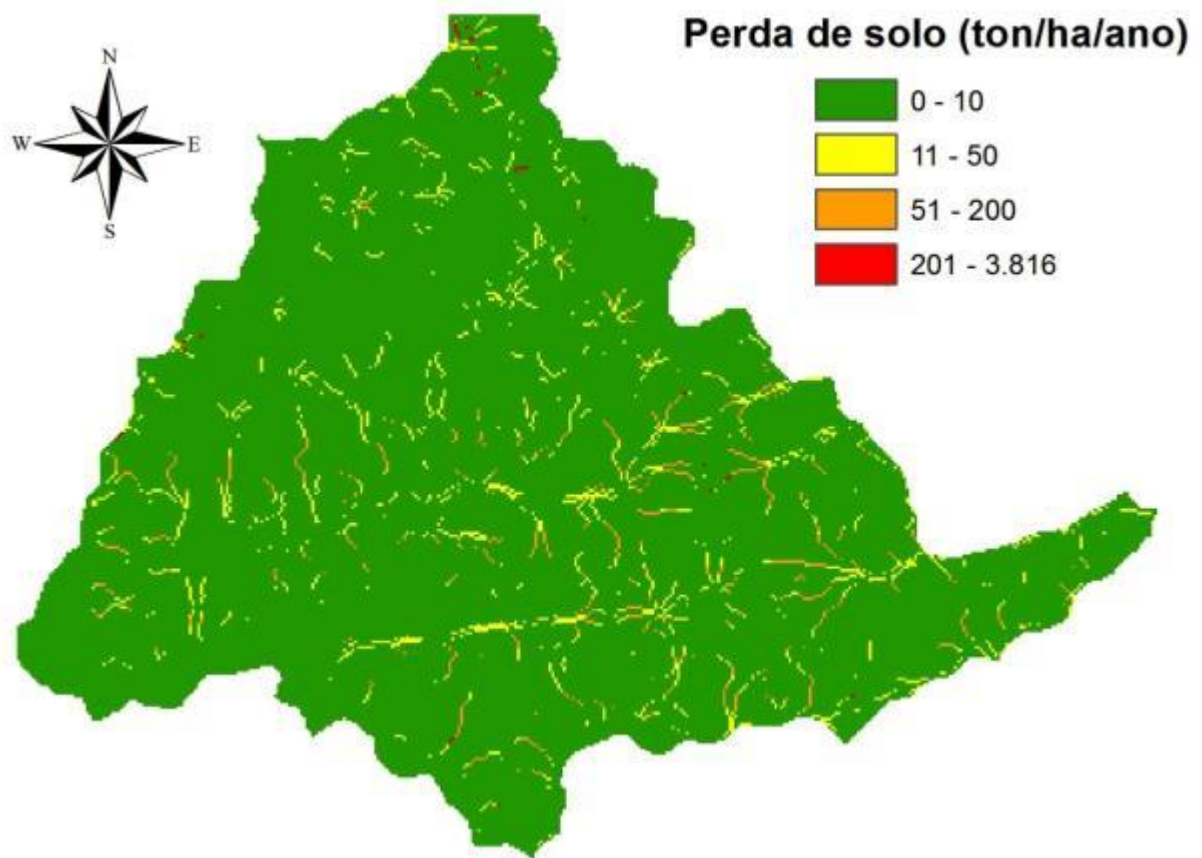
Outro fato observado em campo foi que a camada de sedimento total presente no leito do reservatório ultrapassa a faixa de 2 metros de profundidade, o que indica que a região onde está inserido o açude já era uma área de deposição natural, mesmo antes da construção do reservatório.

## 5.5 Identificação de áreas potenciais para produção de sedimentos

### 5.5.1 USLE

Analisando-se a espacialização da perda de solos na bacia, pode se perceber que o processo ocorre de forma bem distribuída ao longo da bacia, sendo que a maior parte da bacia está inserida na faixa de produção de sedimentos de 0 a 10  $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ . Farias *et al.* (2007) sugere que o processo de produção de sedimentos na BEA está bastante associado ao processo de deflúvio, uma vez que os baixos valores de produção de sedimentos e de SDR podem ser associados aos pequenos valores de *runoff*, encontrados pelos autores em seu estudo, bem como, estes podem estar associados também à influência da vegetação.

Figura 16 - Espacialização da perda de solo na BEA utilizando sobreposição de imagens



É possível perceber, ainda, que as classes que apresentam perdas superiores a  $11 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  se concentram basicamente em áreas mais declivosas da bacia e em solos mais rasos. Miguel (2010) afirma que esses solos são mais erodíveis e suportam menores remoções, demandando, portanto, maior atenção. Na faixa de LATOSSOLOS, localizada no limite divisor da região sudoeste da bacia, embora a declividade é considerada de moderada a alta, a produção de sedimentos manteve-se baixa.

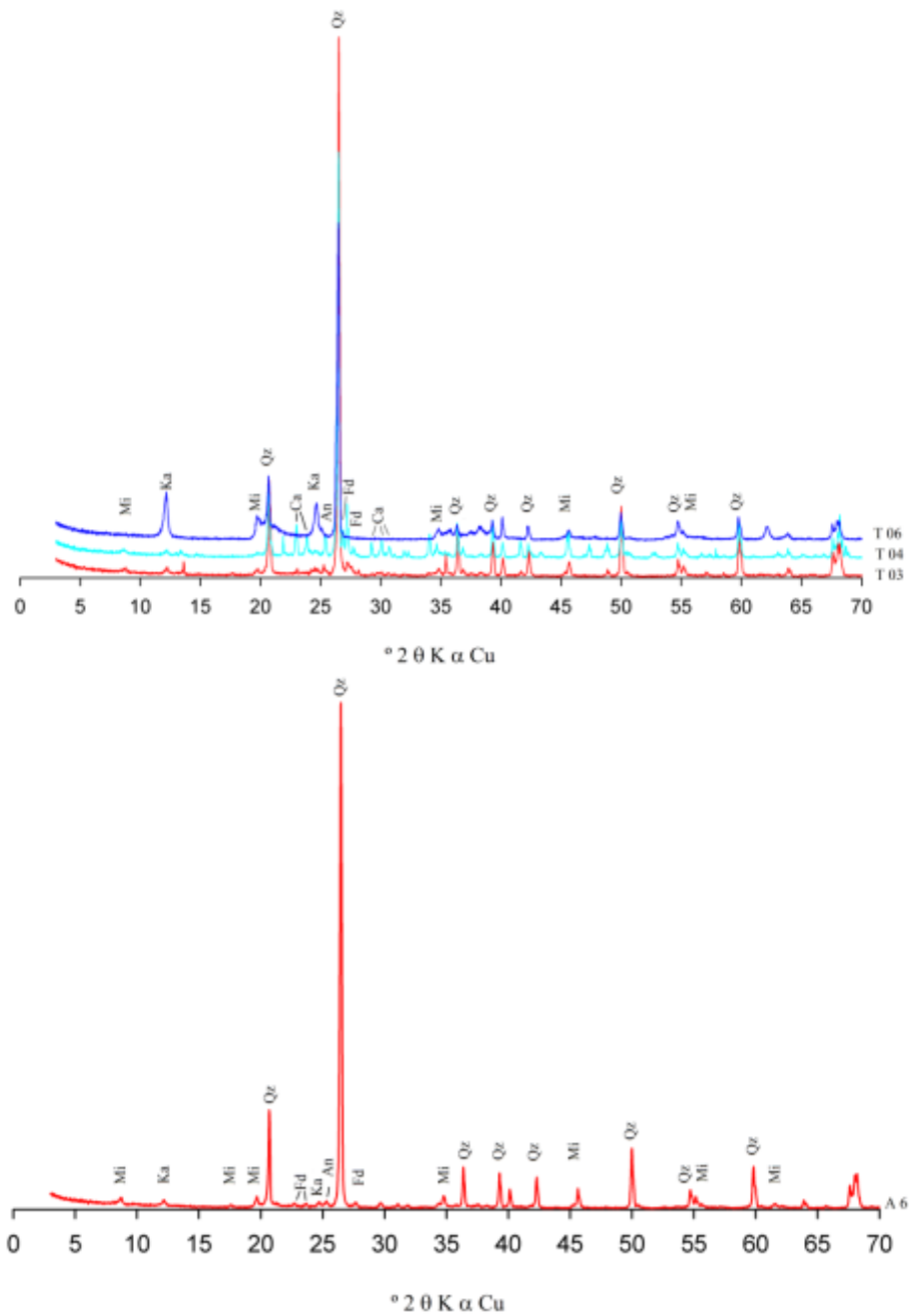
### 5.5.2 Método da Mineralogia

Para a análise mineralógica foram utilizadas as amostras A2, A3, A4 e A5 das trincheiras abertas no leito do reservatório e as amostras T03, T04, T06 e A6 representativas das diferentes classes de solos da bacia, LUVISSOLOS, NEOSSOLOSSOS, LATOSSOLOS e ARGISSOLOS, respectivamente.

Os resultados indicaram a presença dos seguintes minerais na bacia: Mica (Mi), Caulinita (Ka), Feldspato (Fd), Anatósio (An), Ilmenita (Im), Quartzo (Qz) e Carbonato (Ca) e

analisando-se os difratogramas de Raios-X das classes de solos pode-se fazer uma separação dos minerais que estão e dos que não estão presentes, dos que ocorrem em maiores ou menores quantidades e dessa forma traçar as fontes de origem de sedimentos.

Figura 17 - Difratogramas de Raios-X para as amostras nas diferentes classes de solos da BEA



Observando-se o difratograma acima, percebe-se, primeiramente, que a Caulinita (Ka) ocorreu apenas na amostra T06 que representa a classe dos LATOSSOLOS, fato este que

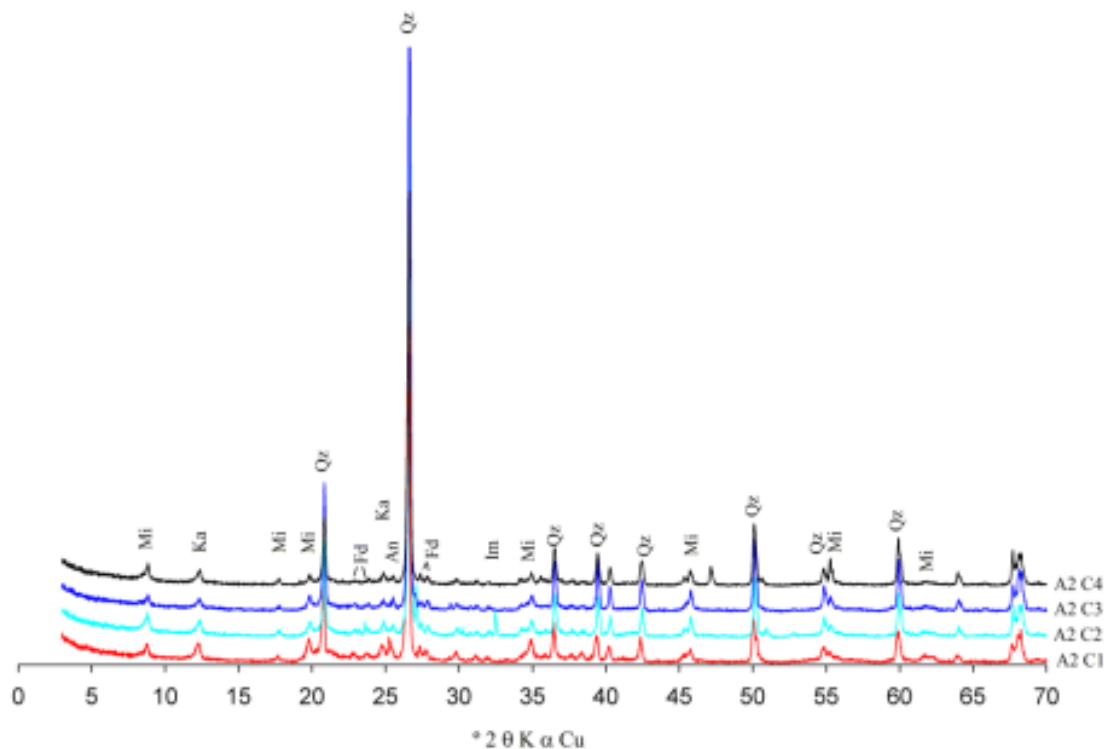


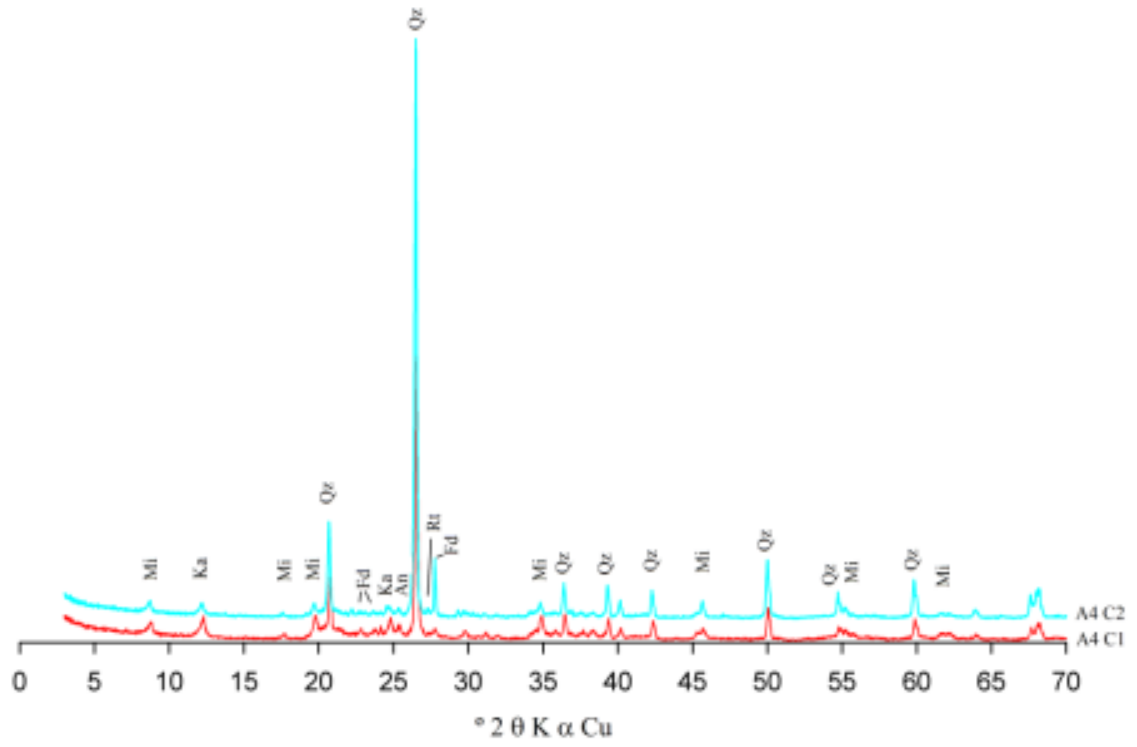
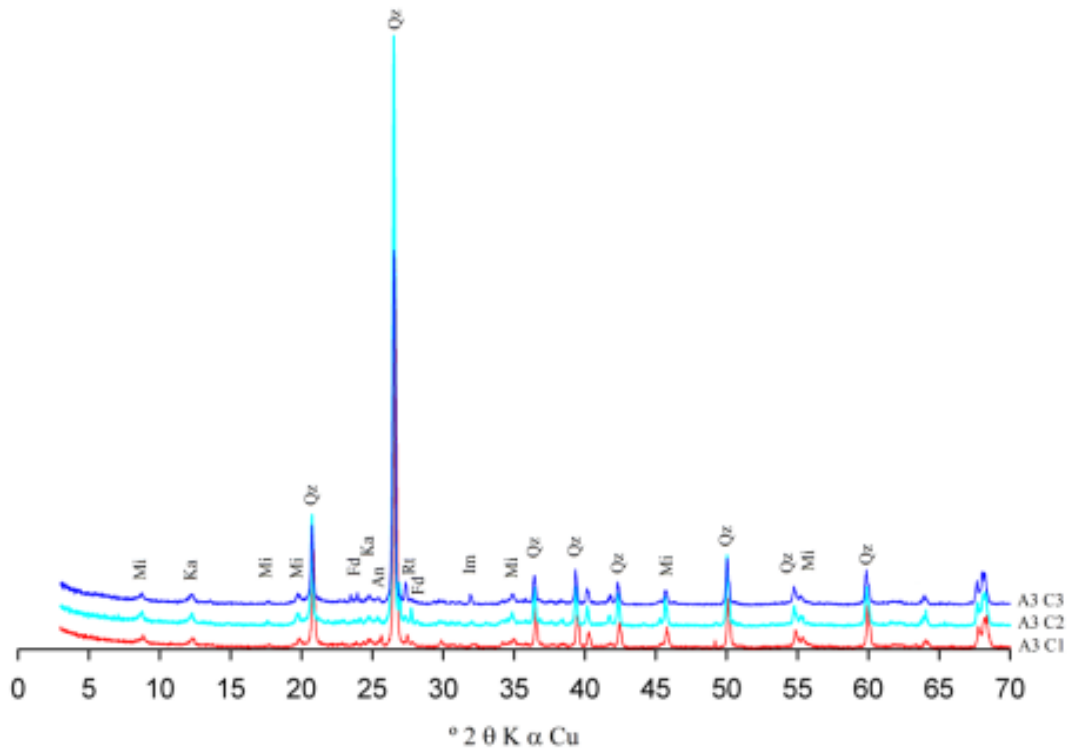
evidência que a classificação realizada para a área obteve bom resultado, já que a presença deste material é evidenciada em solos bem formados, como é o caso dos LATOSSOLOS. Ainda com relação a esta classe de solos, observa-se que o difratograma T06 apresentou os menores picos de Quartzo (Qz), comprovando assim a boa formação do solo, já que este mineral é evidência clara de solos pouco intemperizados.

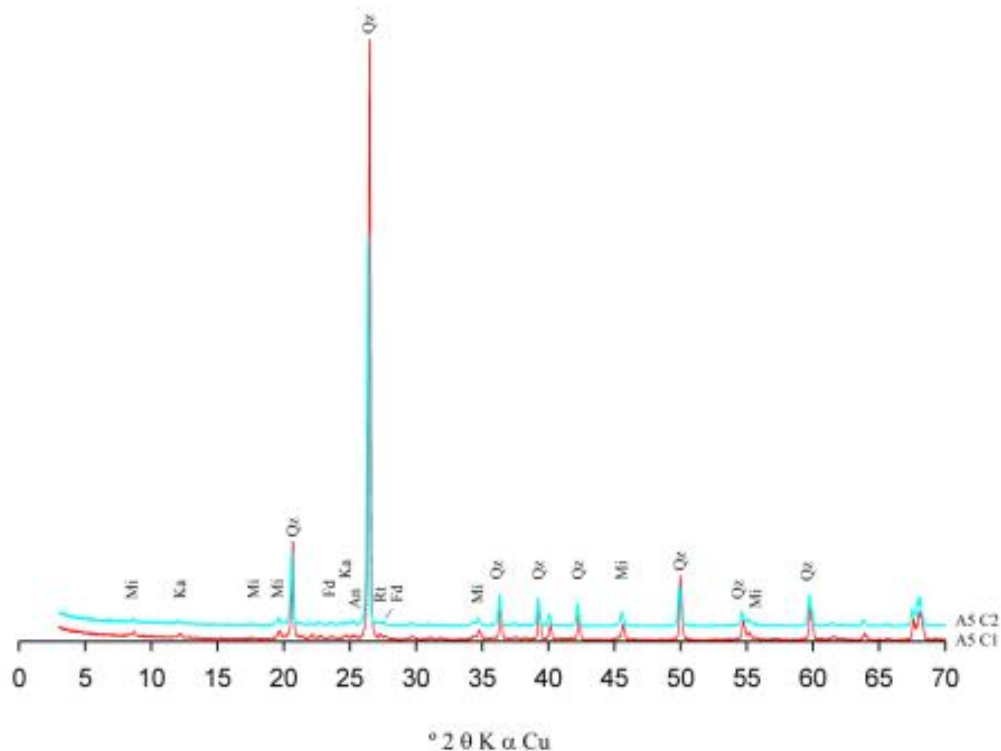
Outra observação que pode ser feita é com relação ao Carbonato (Ca) que foi encontrado apenas no difratograma T04, que representa os NEOSSOLOS, fato este que comprova a classe selecionada, já que este mineral é encontrado apenas em solos com presença de pedregosidade. Ainda com relação a esta classe de solo, observou-se a presença de outros minerais que não foram encontrados nas demais classes de solo como o Feldspato (Fd) e o Anatásio (An).

De posse das informações acima os difratogramas das amostras coletadas no leito do açude Boqueirão, apresentados a seguir, foram analisados.

Figura 18 - Difratogramas das amostras coletadas no leito do açude Boqueirão







O mineral Carbonato (Ca), advindo dos NEOSSOLOS, não foi encontrado em nenhuma das amostras coletadas no leito do açude, em contrapartida, foi encontrada a presença do mineral Feldspato (Fd) e do Anatásio (An) em quase todas as amostras, comprovando a grande contribuição dessas áreas para o assoreamento do reservatório.

A presença de Caulinita (Ka) também foi identificada em todas as amostras do leito do reservatório, mas como este tipo de mineral é considerado instável na presença de umidade (Mata, 2007), sendo facilmente transportado, a presença deste mineral não pode ser considerado um indicador de que os LATOSSOLOS contribuíram significativamente para o assoreamento no reservatório, sendo este o único solo da bacia em que se detectou este mineral.. Analisando-se os difratogramas das amostras coletadas em diferentes camadas do sedimento depositado, pode-se perceber que em os picos de detecção dos minerais são menores na camada superficial do que na 2ª camada, o que pode ser um indicador de que os processos de erosão na bacia e deposição de sedimento no açude Boqueirão foram mais intensos em período anterior, possivelmente antes da instalação da Estação Ecológica de Aiuaba. Tal informação pode ser confirmada por moradores locais que relatam um intensivo uso agropecuário anterior à década de 70.

Observa-se, ainda, que os difratogramas de amostras da 3ª camada, presente apenas em algumas tricheiras, mostram picos de detecção de minerais inferiores aos encontrados para a 2ª camada, o que pode ser um indicador de uso agrícola ainda pouco expressivo.

Comparando-se os resultados da análise mineralógica e da modelagem usando a USLE e SIG, pode-se perceber que há uma convergência na indicação dos LATOSSOLOS como solo de pouca importância da geração de sedimentos, enquanto os NEOSSOLOS apresentaram maior susceptibilidade aos processos erosivos constatada nas duas abordagens (ver Figuras 16 a 18).

## 6 CONCLUSÃO

Foram encontradas quatro classes distintas de solos na BEA, sendo elas a dos ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos, dos LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos típicos, dos LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálico planossolicos e dos NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários.

A integração entre topografia e modelagem utilizando a USLE indicou valores de produção de sedimentos na bacia variando de 11,8 a 24,0 ton·km<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup>, o que resultou em taxas de assoreamento variando entre 1,5 e 2,6 %·decada<sup>-1</sup>, dependendo do período e do cenário considerado.

O assoreamento do açude Boqueirão, desde sua construção (1932), resultou numa diminuição de sua capacidade de armazenamento da ordem de 11,6% e 16,30% para os cenários onde a bacia era ocupada por 10% e 30% de uso agropecuário, respectivamente, anteriormente à instalação da atual Estação de Conservação do IBAMA.

Pode-se, ainda, concluir, a partir da convergência observada nos resultados dos métodos propostos para identificação de áreas mais susceptíveis aos processos erosivos (análise mineralógica e modelagem usando a USLE), que os solos LATOSSOLOS contribuem muito pouco para o assoreamento do açude Boqueirão, enquanto que os solos NEOSSOLOS foram apontados como maiores produtores de sedimento na bacia. ...

Por fim, em virtude da elevada espessura do depósito de sedimento no açude boqueirão (com valores superiores a 2m nos locais sondados), muito superior aos valores estimados pelo modelo de distribuição dos sedimentos adotado neste estudo, pode-se concluir que a região onde está inserido o açude Boqueirão é uma zona de deposição preferencial de sedimentos, mesmo antes da construção do reservatório.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 31 maio 2011.

ARAÚJO, J. C. D. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 17, 2003.

ARAÚJO, J. C. D.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques**, v. 51, n. 1, p. 14, 2006.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355.

BUNTE, K.; MACDONALD, L. H. **Scale Considerations and the Detectability of Sedimentary Cumulative Watershed Effects**. North Carolina: Research Triangle Park, 1999. 327.

CAMARGO, O. A. D. et al. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Instituto Agrônomo. Campinas, p.77. 2009

COELHO, M. R. et al. Levantamento Pedológico de uma Área-Piloto Relacionada ao Projeto BiosBrasil (Conservation and Sustainable Management of Below-Ground Biodiversity: Phase I), Município de Benjamin Constant (AM): Janela 6. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (Embrapa Solos)**, v. 68, p. 94, 2005. ISSN 1678-0876.

COELHO, M. R. et al. Levantamento Pedológico Detalhado (1:5.000) da Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento de Tatuí (APTA Sudoeste Paulista - SAA – SP). **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (Embrapa Solos)**, v. 21, p. 168, 2003. ISSN 1678-0884.

COLEMAN, D. J.; SCATENA, F. N. Identification and evaluation of sediment sources. In: HADLEY, R. F., Drainage Basin Sediment Delivery, 1986, Albuquerque. IAHS.

COSTA, A. C. **Hidrologia de uma Bacia Experimental em Caatinga Conservada no Semiárido Brasileiro**. 2007. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CREUTZFELDT, B. N. A. **Remote sensing based characterisation of land cover and terrain properties for hydrological modelling in the semi-arid Northeast of Brazil**. 2006. 104 Dissertation (Master). Institute of Geocology, University of Potsdam, Potsdam.

DIAS, N. W. et al. **Análise da carga de sedimentos da represa de Paraibuna com base em dados multiespectrais**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa: SBRH: 17 p. 2005.

DIJKERMAN, J. C. Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems. **Geoderma**, v. 11, n. 2, p. 73-93, 1974. ISSN 0016-7061. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016706174900093> >.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. ISBN 85-85864-19-2.

FARIAS, T. R. L.; COSTA, A. C.; ARAÚJO, J. C. D. **Produção de sedimentos em uma Bacia Experimental do Semiárido: medida e modelagem**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo: SBRH: 14 p. 2007.

FREIRE, O.; PESSOTTI, J. E. S. **Erodibilidade de alguns solos de Piracicaba - SP**. Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo. CNPT, E.-. Passo Fundo: 481 p. 1978.

GUIMARÃES, L. J. R.; SANTOS, L. J. C. Levantamento das áreas potenciais à erosão laminar como suporte à detecção das áreas-fonte ao assoreamento na barragem Piraquara I. **Revista Eletrônica Geografar**, v. 2, n. 2, p. 16, 2007. ISSN 1981-089X.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. ELSEVIER, 2003. 473.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª. Rio de Janeiro: 2007. 315 ISBN 85-240-3723-7.

JUNGE, B.; SKOWRONEK, A. Genesis, properties, classification and assessment of soils in Central Benin, West Africa. **Geoderma**, v. 139, n. 3-4, p. 357-370, 2007. ISSN 00167061.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. . In: (Ed.). **Developments in Soil Science**, v.31, 2006. cap. 1, p.3-22. ISBN 01662481.

LEPSCH, I. F.; VALADARES, J. M. A. S. Levantamento pedológico detalhado da Estação Experimental de Pindorama, SP. **Bragantia**, v. 35, n. 2, p. 28, 1976.

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. D. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 2, p. 15, 2011.

LIMA, Y. C. P. **Análise do assoreamento de um pequeno reservatório: Estudo de caso Açude Boqueirão, Aiuaba, Ceará.** 2010. 84 (Dissertação). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LOSS, A. et al. Aplicação de Modelo Digital de Elevação para o levantamento de solos da microbacia do Rio Bengala, Cachoeiras de Macau, RJ, Brasil. **Interciência**, v. 36, n. 2, p. 7, 11/02/2011 2011. ISSN 0378-1844.

LU, H. et al. **Modelling Sediment Delivery Ratio Based on Physical Principles.** IEMSS 2004 International Congress: "Complexity and Integrated Resources Management". PAHL-WOSTL, C.;SCHMIDT, S., *et al.* Osnabrueck (Germany): International Environmental Modelling and Software Society: 600 p. 2004.

MALVEIRA, V. T. C.; ARAUJO, J. C. D.; GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 1, p. 9, 2012.

MAMEDE, G. L. **Reservoir Sedimentation in Dryland Catchments: Modelling and Management.** 2008. 98 Dissertation (Doctorate). Department of Hydrology and Climatology, University of Potsdam, Potsdam.

MAMEDE, G. L. et al. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **PNAS**, v. 109, n. 19, p. 5, 2012.

MATA, J. D. D. V. D. **Apostila de classificação de solos.** Maringá: Universidade Estadual de Maringá 2007.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos Hidrossedimentológicos e Conectividade em Bacia Semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas.** 2009. 164 Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MIGUEL, P. **Caracterização pedológica, uso da terra e modelagem da perda de solo em áreas de encosta do rebordo do planalto do RS.** 2010. 111 Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MINELLA, J. P. G. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural.** 2003. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook.** New York: McGraw-Hill Book Co., 1998. 804.



NAVRATIL, O. et al. Core-derived historical records of suspended sediment origin in a mesoscale mountainous catchment: the River Bléone, French Alps. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, n. 9, p. 1463-1478, 2012. ISSN 1439-0108

1614-7480.

PEREIRA, V. R. **Identificação de Áreas com Potencial para a Produção de Sedimentos a montante dos reservatórios do Sistema de Abastecimento Cantareira: os reservatórios de Cachoeira e Atibainha**. 2007. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PINHEIRO, E. A. R. **Determinação *in situ* da profundidade efetiva das raízes da caatinga preservada para fins de balanço de água no solo**. 2011. Monografia (Graduação). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SANTANA, S. O. D.; MENDONÇA, J. R.; SANTOS, M. A. M. Levantamento detalhado dos solos da estação de zootecnia de Itaju do Colônia. **Boletim Técnico - Centro de Pesquisa do Cacau**, v. 188, p. 24, 2006. ISSN 0100-0845.

SANTOS, M. D. L. M. Cartografia tridimensional dos solos - aspectos metodológicos e aplicação ao estudo da variabilidade espacial de solos aluviais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (Embrapa Solos)**, v. 24, p. 25, 2001. ISSN 1517-5219.

SILVA, F. H. B. B. D. Método de determinação do Escoamento Superficial de Bacias Hidrográficas a partir de Levantamentos Pedológicos. **Documentos - Embrapa Solos**, v. 21, 2000. ISSN 1517-2627.

SILVA, F. H. B. B. D.; SILVA, A. B. D. Levantamento de reconhecimento de solos e avaliação do potencial de terras para irrigação do município de Simão Dias, Sergipe. **Comunicado Técnico**, v. 39, p. 10, 2006. ISSN 1517-5685.

SOUTO, A. R.; CRESTANA, S. Identificação das áreas potenciais de produção de sedimentos com o modelo AGNPS e técnicas de SIG em uma microbacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 7, 2000.

USDI. **Erosion and Sedimentation Manual**. Denver: 2006.

WALLING, D. E. et al. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. **Nature**, v. 281, n. 5727, p. 110-113, 1979. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/281110a0>>.

WIEGAND, M. C. et al. Utilização do SIG na avaliação da Fragilidade potencial da Bacia Experimental de Aiuaba - BEA/CE. **Revista de Geologia**, v. 22, n. 2, p. 11, 2009.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning**. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1978.