Ivo Gilberto Duarte David da Costa

ANÁLISE DO ASSOREAMENTO NO RESERVATÓRIO DE TRÊS IRMÃOS – SP,
UTILIZANDO DADOS TOPOBATIMÉTRICOS, HIDROLÓGICOS E TÉCNICAS DE
GEOPROCESSAMENTO.

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Mestre em
Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos - SP

Agosto/2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C837c Costa, Ivo Gilberto Duarte David da
Análise do assoreamento no Reservatório de Três
Irmãos - SP, utilizando dados topobatimétricos,
hidrológicos e técnicas de geoprocessamento. / Ivo
Gilberto Duarte David da Costa ; orientador Frederico
Fábio Mauad. -- São Carlos, 2009.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e
Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2009.

1. Assoreamento. 2. Sedimento. 3. Geoprocessamento.
4. Reservatório Três Irmãos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro IVO GILBERTO DUARTE DA COSTA.

Dissertação defendida e julgada em 17/08/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **FREDERICO FÁBIO MAUAD (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado.

Prof. Dr. **OSWALDO AUGUSTO FILHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **AUGUSTO NELSON CARVALHO VIANA**
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Aprovado

Prof. Dr. **VICTOR EDUARDO LIMA RANIERI**
Suplente do Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental, em exercício

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus pais Paulo Roberto David da Costa e Maria Raimunda Duarte da Costa, por sempre terem batalhado e acreditado na educação dos filhos e serem um referencial de perseverança. A minha irmã Rita de Cássia Duarte da Costa, por sempre ter me apoiado e também sendo um exemplo de bom caráter, responsabilidade e atitude. Dedico também aos meus avós (In memoriam), que guardo com carinho em minhas recordações da infância.

Agradecimentos

Aos meus pais, Paulo Roberto e Maria Raimunda.

A minha Irmã, Rita de Cássia, pelo auxílio na correção deste trabalho.

Ao Professor Frederico Fábio Mauad pela orientação, dedicação e suporte para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos de Itajubá, por todos esses anos de amizade e histórias.

Ao meu amigo Amarílio Pinto pelo auxílio para o término deste trabalho.

Aos companheiros e irmãos de convivência em São Carlos e Itajubá Francisco César Dalmo e Victor Pioltine.

Aos meus aos antigos professores da UNIFEI, em especial Augusto Nelson e Afonso Henriques.

Aos funcionários do CRHEA, em especial ao Nelson E. Tessarin, ela ajuda nos momentos de correria com as documentações da defesa.

Aos amigos que fiz no Núcleo de Hidrometria do CRHEA, em Especial Liliane Lazzari pelas dicas e ajuda na conclusão desta pesquisa.

A todos os moradores da república Pulêro, que tive o prazer de conviver no período de estadia em São Carlos.

As amizades que fiz durante o período de mestrado na cidade de São Carlos, que são muitas para serem citadas aqui, porém que vão ficar eternizadas em minha memória justamente por conta de terem protagonizado os bons momentos que vivi.

Ao CNPq pela bolsa concedida para realização desta pesquisa;

"Mais fácil me foi encontrar as leis com que se movem os corpos celestes, que estão a milhões de quilômetros, do que definir as leis do movimento da água que escoam frente aos meus olhos."

Galileu Galilei

(1564 - 1642)

RESUMO

COSTA, I.G.D.D. Análise do assoreamento no reservatório de Três Irmãos – SP, utilizando dados topobatimétricos, hidrológicos e técnicas de geoprocessamento. 2009. 147 f Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

O processo de sedimentação em reservatórios gera várias conseqüências, dentre elas, o impacto acumulativo da perda de capacidade de armazenamento destes. Este fato faz com que, dependendo dos usos, eles percam a sua funcionalidade tal como a capacidade de regularização de vazão. Tais efeitos não afetam somente uma única atividade econômica que venha a existir nesses reservatórios. Grande parte do modelo econômico que é sustentado pelos usos nestes é afetado. A sedimentação é um processo que não se consegue resolver totalmente, cabendo somente a utilização de técnicas adequadas de manejo da bacia de contribuição do reservatório, reduzindo assim o assoreamento. A presente pesquisa teve como base informações coletadas no reservatório da UHE de Três Irmãos – SP, sendo tais informações provenientes de cartas topográficas, estações de monitoramento de chuva, imagens de satélites e campanhas de batimetria no reservatório em estudo. Assim obteve-se que o reservatório está com aproximadamente 6,73% do seu volume assoreado, com uma taxa anual média de assoreamento de 0,4%, se mantendo abaixo da média brasileira e mundial, que é de respectivamente de 0,5% e 1%.

Palavras-chave: Assoreamento, Sedimento, Geoprocessamento, Reservatório Três Irmãos.

Abstract

COSTA, I.G.D.D. Analysis of siltation in the reservoir of Três Irmãos - SP, using Bathymetric data, hydrologic and GIS techniques. 2009. 147 f Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

The sedimentation process in reservoirs brings some consequences, among them, the cumulative impact on lacking of the storage capacity of those reservoirs. Depending on the uses of those reservoirs, they may lose their capability of flow regularization. Such effects not only affect one kind of economical activity that may exist upon these reservoirs. A considerable part of the economical model that is supported by those uses is also affected. The sedimentation is a process that can't be completely solved, unless the correct use of suitable techniques of management of the contribution basin of the reservoir can reduce the siltation. This research has its foundation on the collected information on the Três Irmãos hydroelectric power plant reservoir, consisting of topographic maps, rain monitoring checkpoints, satellite images and bathymetri campaigns on that reservoir. Thus, it was concluded that the reservoir has approximately 6,73% of its volume silted, and also has a annual average rate of siltation of 0,4%, below the Brazilian and world average, 0,5% and 1%, respectively.

Keywords: Siltation, Sediment, Geoprocessing, Reservoir Três Irmãos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Tipos de degradação dos solos - Mettervicht (1996)	10
Figura 2.	Arranjo das cartas topográficas que foram digitalizadas.....	25
Figura 3.	Configuração dos equipamentos para coleta de informações.....	27
Figura 4.	Ecobatímetro: Echo Sounder Bathy 500 - MF	28
Figura 5.	DGPS: Leica GS - 20.....	28
Figura 6.	Percurso da batimetria, três dias de pesquisa. – Fonte KBS (2007). ...	31
Figura 7.	Localização dos postos pluviométricos	38
Figura 8.	UGRHI – 19 no Estado de São Paulo – Fonte: SIGRH (2000).....	44
Figura 9.	UGRHI – 19 em detalhe – Fonte: SIGRH (2000).....	45
Figura 10.	Curvas de níveis da carta de Pereira Barreto - SF-22-C-IV-2	65
Figura 11.	Traçado do percurso no levantamento batimétrico.....	66
Figura 12.	Grade TIN gerado com os dados da batimetria.....	67
Figura 13.	Detalhe da interpolação com vetor TIN sobreposto matriz raster.....	68
Figura 14.	MDT com os dados da batimetria do reservatório.	69
Figura 15.	Modelo digital do terreno da área de estudo.....	70
Figura 16.	MDT – diferença da comparação batimétrica.....	72
Figura 17.	MDT das áreas assoreadas (Em detalhe).....	73
Figura 18.	MDT das áreas erodidas (Em detalhe)	74
Figura 19.	Curva cota x área x volume (1971)	78
Figura 20.	Curva cota x área x volume (2008)	80
Figura 21.	Comparação da curva das áreas para 1971 e 2008.....	82
Figura 22.	Linha de tendência para as curvas das áreas	83
Figura 23.	Comparação da curva dos volumes para 1971 e 2008.....	85
Figura 24.	Linha de tendência para as curvas dos volumes.....	86
Figura 25.	Limite da microbacia de estudo.....	88

Figura 26.	Localização da microbacia no reservatório	89
Figura 27.	Mapa de declividade	91
Figura 28.	Mapa da distribuição do fator LS	92
Figura 29.	Médias Anuais de chuva para cada posto.....	99
Figura 30.	Média mensal no período 1982 – 1998 (posto 2151002)	101
Figura 31.	Erosividade média mensal – Período 1982-1998 (Posto 2151002)	102
Figura 32.	Erosividade anual média no período 1982-1998	103
Figura 33.	Distribuição das chuvas pelo método TIN	104
Figura 34.	Mapa pedológico da área de estudo. Fonte:SIGRH 2000 (Adaptado)	105
Figura 35.	Distribuição dos valores de erosividade na área de estudo	107
Figura 36.	Imagem do LANDSAT 5 da área de estudo (Ano 1990). Fonte: INPE	108
Figura 37.	Imagem do LANDSAT 5 da área de estudo (Ano 2007). Fonte: INPE	109
Figura 38.	Área de estudo antes do enchimento do reservatório.....	111
Figura 39.	Área de estudo ano logo após enchimento do reservatório	112
Figura 40.	Área de estudo no ano de 2008.....	113
Figura 41.	Área de cada tema para cada data tratada	114
Figura 42.	Médias dos valores o fator CP (1991-2008)	117
Figura 43.	Distribuição da Perda de solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).	119
Figura 44.	Potencia natural de erosão ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de cartas digitalizadas	25
Tabela 2 – Dados de localização dos postos	38
Tabela 3 – Principais características registradas.....	54
Tabela 4 – Informações do empreendimento de Três Irmãos	63
Tabela 5 – Resultados obtidos	75
Tabela 6 – Dados de área e volume para cada cota	76
Tabela 7 – Matriz de correlação dos dados sem preenchimento de falhas.....	94
Tabela 8 – Matriz de correlação com as falhas preenchidas.....	95
Tabela 9 – Datas das falhas.....	98
Tabela 10 – Média anual da chuva para cada posto	99
Tabela 11 – Média de chuva de cada mês no período avaliado.....	100
Tabela 12 – Erosividade média de cada mês no período estudado	102
Tabela 13 – Erosividade da chuva para cada posto	103
Tabela 14 – Datas das imagens da área de estudo	110
Tabela 15 – Valores correspondentes de CP para a região de Brotas - SP.	116

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CESP – Companhia Energética de São Paulo

CITP – Consórcio Intermunicipal dos Rios Tietê-Paraná

DGPS – Differential Global Position System

EUPS – Equação Universal da Perda de Solo

FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICOLD – International Commission on Large Dams

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo

MDT – Modelo Digital do Terreno

MME – Ministério de Minas e Energia

P & D – Pesquisa e Desenvolvimento

PNE – Potencial Natural de Erosão

RGB – Red, Green and Blue

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIGRH – Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos

TIN – Triangular Irregular Net (Rede de triângulos irregulares)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UGRHI – Unidade de Gestão de Recursos Hídricos

UHE – Usina Hidrelétrica

UTM – Universal Transverse Mercator

WEPP – Water Erosion Prediction Project

WEQ – Wind Erosion Equation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	5
3. JUSTIFICATIVA	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4.1. Bacia Hidrográfica.....	6
4.2. Produção de sedimento	8
4.2.1. Erosão.....	8
4.2.2. Equação universal da perda de solos (EUPS)	10
4.2.3. Sedimentologia.....	12
4.3. Geoprocessamento.....	13
4.3.1. Sistema de Informação Geográfica (SIG)	14
4.3.2. Sensoriamento Remoto	15
4.4. Espacialização de chuvas	19
4.5. Reservatórios.....	21
5. METODOLOGIA	23
5.1. Cálculo do assoreamento.....	23
5.1.1. Geração do modelo digital do terreno pré-enchimento	23
5.1.2. Geração do modelo digital terreno atualizado.....	26
5.1.3. Determinação do volume assoreado	29
5.2. Análise da perda de solos – Equação universal da perda de solos (EUPS)	32
5.2.1. Potencial natural de erosão - PNE.....	33
5.2.2. Erosividade da chuva – Fator R	34
5.2.3. Erodibilidade do solo – Fator K.....	35
5.2.4. Fatores topográficos - Fator L e S	35

5.2.5. Fator de Uso e manejo - Fator C	36
5.2.6. Práticas conservacionistas - Fator P.....	37
5.3. Tratamento dos dados de chuvas.....	37
5.4. Tratamento das imagens de satélites.....	40
5.4.1. Georreferenciamento	40
5.4.2. Classificação supervisionada.	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1. Caracterização da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos nº 19.....	42
6.1.1. Geologia.....	46
6.1.2. Características gerais do relevo	52
6.1.3. Pedologia	56
6.1.4. Potencial Agrícola.....	59
6.1.5. Hidrometeorologia.....	61
6.2. Histórico e atividades na região.....	62
6.3. Descrição do empreendimento	62
6.4. Tratamento dos dados batimétricos e vetorizados.....	64
6.4.1. Vetorização das cartas.....	64
6.4.2. Dados provenientes do levantamento batimétrico.....	65
6.4.3. Geração do modelo digital do terreno.....	67
6.4.4. Comparação batimétrica	71
6.4.5. Análise da curva cota x área x volume.....	75
6.4.6. Delimitação da microbacia de estudo	87
6.5. Determinação do fator topográfico LS.....	90
6.6. Tratamento dos dados de chuva.....	93
6.7. Mapa pedológico da área de estudo	105
6.8. Tratamento das imagens de satélites.....	107

6.8.1. Classificação supervisionada	109
6.8.2. Fator CP da equação universal da perda de solos.....	115
6.9. Cálculo da perda de solo na microbacia de estudo	118
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	122
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	126

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores que viabilizam as atividades de produção agrícola, sem dúvida, é a presença de uma fonte de água que possa ser utilizada para agricultura. Isso faz com que os solos, por exemplo, às margens de um reservatório, seja utilizado para tais fins. O desenvolvimento de atividades agrícolas sem a mínima preocupação com a conservação e manejo adequado faz com que áreas produtivas se degradem a ponto de atingir estágios de deterioração irreversíveis, Afetando inclusive os corpos d'água próximos. Levando-se em consideração o caso dos processos erosivos, que são processos naturais, porém intensificados pela atividade antrópica, ocasiona grandes perdas de áreas agricultáveis, perda de capacidade de transporte de água em leitos de rios e, conseqüentemente, assoreamento em reservatórios.

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório modifica as condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens geram uma redução das velocidades do fluxo de água, provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados, ocasionando o assoreamento e podendo vir a inviabilizar a operação de um aproveitamento.

O contínuo desenvolvimento, crescimento populacional e acréscimo na produtividade, tem resultado em um aumento da demanda por eletricidade. E por essa razão o governo brasileiro e as fornecedoras de energia estão promovendo a construção de novos reservatórios (GUNKEL, 2003).

No Brasil, pode-se citar os reservatórios de Itaipu, Itá, Sobradinho e Tucuruí, nos quais o tempo de assoreamento total avaliado para cada reservatório pode

ultrapassar 1000 anos. No entanto, em tempo muito menor, 20 a 30 anos, os depósitos na região do remanso, área do delta, já poderão estar prejudicando atividades como a de navegação. Além disso, depósitos finos nas margens podem criar condições de crescimento de plantas macrófitas que irão, certamente, se deslocar para perto da barragem até atingir a tomada d'água, prejudicando a geração de energia (CARVALHO, 2000a).

Na maioria dos casos o assoreamento tem se multiplicado com o aumento da erosão nas bacias hidrográficas. Qualquer que seja o caso, a avaliação feita na fase de planejamento do aproveitamento deve ser verificada com um monitoramento, o que inclui operação de postos de medição e levantamentos batimétricos. Estes estudos devem ser acompanhados paralelamente aos estudos ambientais.

Segundo ICOLD (1989 apud CARVALHO, 2000a)¹ os processos da sedimentação podem ser complexos. Os sedimentos transportados pelo sistema fluvial são primeiramente depositados devido à redução de velocidade da água no reservatório. À medida que os sedimentos se acumulam no lago, a capacidade de armazenamento de água vai diminuindo. Enquanto uma contínua deposição ocorre, há uma distribuição de sedimentos nos reservatório cuja forma é influenciada pela operação e também pela ocorrência de grandes enchentes responsáveis pelo carreamento de uma grande quantidade sedimento. Quando a vida útil do aproveitamento é afetada pelos depósitos, são necessárias mudanças na operação ou outras medidas que procurem remediar o problema. Alguns efeitos podem ser

¹ ICOLD, International Commission on Large Dams (1989). **Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues. Committee on Sedimentation of Reservoirs.** Paris.

citados como, por exemplo, aqueles a montante da área de remanso que ficam sujeitos a enchentes mais constantes.

Segundo Almeida e Carvalho (1993 apud CARVALHO, 2000a)² o estudo sedimentológico é particularmente importante para o Brasil em razão dos sistemas elétricos do país serem, predominantemente, hidráulicos.

Atualmente, mais de 77,3% da energia elétrica que é gerada no país e consumida é proveniente de fontes hidráulicas. Mesmo assim, nota-se que estudos sedimentológicos não são realizados da mesma maneira que os estudos hidrológicos, não alcançando uma representatividade de dados que possam ser utilizados em pesquisas. Os estudos hidrológicos são bem mais completos e difundidos pelo país, tendo como base uma grande quantidade de dados provenientes de postos de coleta e monitoramento. Atribui-se isso ao fato de que a maior parte da geração de energia do país é feita por grandes reservatórios, cujos problemas de assoreamento são considerados de pequena importância, a curto e médio prazo, para a geração (MME, 2007).

Um estudo do Banco Mundial, Mahmood (1987 apud CARVALHO, 2000a)³ mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no mundo decresceu de 100 para 22 anos, tendo sido avaliado em 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes que vão sendo assoreados. Ficou demonstrado também que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável de um país para outro, bem como de uma região para outra.

² ALMEIDA, S. B., CARVALHO, N. O. **Efeitos do assoreamento de reservatórios na geração de energia elétrica: análise da UHE Mascarenhas, ES.** X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado, RS, 1993.

³ MAHMOOD, K. . **Reservoir sedimentation – impact, extent and mitigation.** World Bank Tech. Paper No.71. Washington, DC, 1987.

Segundo Carvalho (1994 Apud CARVALHO, 2000a)⁴ a partir de estudo realizado pela Eletrobrás/IPH (1994) pode-se concluir que a perda anual de capacidade de armazenamento dos reservatórios do Brasil é de aproximadamente 0,5 %. Essa taxa pode corresponder a perdas de capacidade de armazenamento de $2.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ por ano, o que corresponde a um volume maior do que muitos médios reservatórios existentes (Jaguari (SP), Moxotó (AL), Salto Osório (PR), Porto Colômbia (SP/MG), etc.).

O processo de erosão e sedimentação é relacionado ao desprendimento, transporte e deposição de partículas sólidas. Estes processos têm contribuído para a modificação das formas de relevo no mundo atual e estão cada vez mais intensos e rápidos, quando analisados dentro de uma escala geológica de tempo, sendo que tal escala é relacionada ao tempo que leva o processo natural de erosão.

Os efeitos da atividade humana sobre o meio ambiente é bem profunda, a tal ponto onde o agente modificador antrópico se torna um dos principais causadores de mudanças no ambiente. Sob determinadas situações, essas atividades são extremamente impactantes ao solo, aumentando de forma discrepante a taxa de erosão do solo quando comparado com a taxa natural de erosão. E o destino final, deste material desprendido são os corpos d'água, os quais têm a sua característica hidráulica alterada pela deposição de materiais no leito, reduzindo assim a capacidade de transporte de água.

⁴ CARVALHO, N. O. **Erosão crescente na bacia do rio Doradas (Estado de Tachira, Venezuela).** FURNAS/ELETROBRÁS/CADAFE. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

2. OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo uma análise do processo de assoreamento do reservatório de Três Irmãos, utilizando técnicas de geoprocessamento, envolvendo a utilização de imagens de satélites, mapas pedológicos, mapas topográficos e coletas de dados em campo. Para assim obter um valor estimado do volume assoreado dentro do reservatório, bem como o levantamento da curva cota x área x volume e compará-la com o início de operação do reservatório. Bem como a análise do comportamento da produção de sedimento em uma micro-bacia contribuinte do reservatório.

3. JUSTIFICATIVA

A vida útil dos reservatórios formados por barragens pode variar desde alguns poucos anos até centenas de anos. Além disso, os sedimentos ocupam parte do volume de um reservatório diminuindo a garantia do atendimento à demanda de água que dele se espera.

Um estudo e monitoramento batimétrico do reservatório a ser estudado, permite uma avaliação do atual estado de sedimentação no reservatório, assim fornecendo informações sobre as reais condições do assoreamento. Um monitoramento é nitidamente necessário e este poderia ser realizado com uma determinada frequência, utilizando-se dados batimétricos levantados e tendo como referência a topografia original do terreno com dados pré-enchimento.

Em estudos de alguns outros reservatórios da AES Tietê; realizados pelo Núcleo de Hidrometria (NH) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), localizado no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), sob

coordenação do Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad; não foi possível estabelecer uma correlação entre a topografia original do terreno e os dados atualizados de levantamento batimétrico. Isso porque não era possível obter as informações relativas às condições originais do da área que seria posteriormente alagada, uma vez que os demais reservatórios do rio Tietê foram construídos em um período onde não se tem informações relativas ao terreno que foi alagado, inexistindo assim dados de pré-enchimento. Esse fato difere da atual pesquisa, pois existem agora condições de comparação das condições atuais do terreno que foi inundado, com o período pré-enchimento, utilizando cartas topográficas do levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE) no ano de 1971. Com as análises dos dados, haverá uma atualização das informações referentes ao reservatório, tais como a curva cota x área x volume, e assim analisar a evolução do processo de assoreamento relativo ao período de funcionamento do reservatório bem como as modificações que ocorreram no interior do mesmo.

Esta pesquisa vai gerar informações relativas ao comportamento do processo de assoreamento, e que complementar, futuros estudos que venham a ser realizados envolvendo o reservatório de Três Irmãos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Bacia Hidrográfica

Eagleson (1970 apud CIRILO; MENDES, 2001)⁵, define a bacia hidrográfica como um sistema físico aberto onde existe um trânsito (importação e exportação) de matéria e energia. Para o escoamento superficial, por exemplo, toda a precipitação

⁵ Eagleson, P.S. (1970), **Dynamic Hydrology**. McGraw-Hill Book Company. 462 pp

(importação) e movimentação de água, sedimentos e contaminantes (exportação) acontece pela superfície de terra (Limite).

Depois de várias discussões a respeito do conceito de bacia hidrográfica Carrera-Fernandez e Garrido (2002) chegaram à seguinte conclusão

[...] A bacia hidrográfica assim resultou como a unidade de planejamento, desde que não afastasse as múltiplas influências recebidas, ou seja, todos os efeitos ou impactos que lhe causassem o comportamento dos aquíferos, bem como os problemas existentes em bacias adjacentes, além, evidentemente, da repercussão, à flor da terra, dos problemas antrópicos de regiões vizinhas. Adicionalmente, é a bacia, apesar de seu relevo ser sempre uma superfície reversa, o lugar geométrico sobre o qual se pode colocar o ponto de visada de todos os problemas a serem evitados, de preferência, ou resolvidos, quando já instalados.

O completo entendimento do funcionamento de uma bacia hidrográfica exige o conhecimento de todos os seus componentes aquáticos e terrestres. Assim, quando uma bacia sofre uma modificação considerável, principalmente no solo, diversas alterações podem ocorrer afetando diretamente os cursos d'água.

A política Nacional dos Recursos Hídricos, Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, apresenta a bacia hidrográfica como uma unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (CASA CIVIL, D.O. DE 09/01/1997, P. 470).

A bacia hidrográfica é dada como uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 1997).

Também a bacia hidrográfica pode ser considerada como um ente sistêmico. É onde se realizam todos os balanços de entrada proveniente da chuva e saída de águas através do exutório, permitindo que sejam delineadas bacias e sub-bacias, cuja interconexão se dá pelos sistemas hídricos. É sobre este território que se desenvolvem as atividades humanas. Todas as áreas urbanas industriais, agrícolas ou de preservação fazem parte de alguma bacia hidrográfica. Pode -se dizer que, no seu exutório, estarão representados todos os processos que fazem parte do seu sistema. O que ocorre nesta área é consequência das formas de ocupação do solo e da utilização das águas que para ali convergem (PORTO; PORTO, 2008).

4.2. Produção de sedimento

O uso e a ocupação do meio físico, sem um planejamento fundamentado em aspectos técnicos acarretam desequilíbrios que podem ser expressos por enchentes, movimentos gravitacionais de terra e erosão. Os processos erosivos são observados com mais frequência em regiões de clima tropical, onde as chuvas são mais intensas e regulares do que em regiões de clima temperado. Isso colabora para uma maior taxa de pluviosidade e conseqüentemente maior taxa de escoamento superficial e quantidade de material transportado pela água. Tal que este material terá um destino final depositando-se em leitos e fundo dos cursos d'água.

4.2.1. Erosão

A erosão é um processo de desagregação e transporte de materiais do solo, pela ação dos diversos agentes erosivos, e que pode ser dividida em dois eventos seqüenciais. O primeiro é a desagregação das partículas e o segundo o transporte

destas. Quanto ao tipo, a erosão podem ser dividida em geológica e acelerada (ELLISON, 1947).

O elevado grau de urbanização e a diversidade de uso e ocupação do solo têm favorecido substancialmente o surgimento de vários problemas ambientais e, principalmente, aqueles decorrentes da erosão acelerada dos solos (RODRIGUES, 1998).

Existem várias conseqüências geradas pela intensificação dos processos erosivos, tais como aumento enchentes e redução drástica da capacidade de armazenamento e regularização de vazão de reservatórios, podendo gerar cortes no fornecimento e água e energia.

A resistência de um solo frente à erosão é influenciada pelas suas propriedades físicas, hidrológicas, químicas, mineralógicas, biológicas e bioquímicas, assim como as características do perfil (NISHIYAMA, 1998).

O solo é um recurso natural que pode ser considerado como não renovável e uma vez degradado, torna-se de difícil recuperação á curto prazo. Sendo assim, os processos erosivos tornam-se um problema que requer atenção.

Os processos responsáveis pela deterioração dos solos podem ser agrupados em três tipos: físicos, químicos e biológicos (METTERVICH, 1996). Como se pode observar na Figura 1.

Figura 1. Tipos de degradação dos solos - Mettervicht (1996)

A erodibilidade é um fator intrínseco ao solo e variável com o tempo. Esta representa o efeito integrado de processos que regulamentam a infiltração de água e a resistência aos agentes desagregadores (LAL, 1988; MORGAN, 1995).

Das diversas propriedades que interferem no fator erodibilidade, dentre as mais importantes, pode-se citar a textura, a mineralogia, o teor de argilas, a presença de agregados, a resistência ao cisalhamento, o pH, a condutividade elétrica e os cátions trocáveis.

4.2.2. Equação universal da perda de solos (EUPS)

A modelação da erosão hídrica tem sido habitualmente avaliada a partir de modelos empíricos. Dentre eles tem-se a mais conhecida, a Equação Universal da Perda de solo (EUPS) proposta por Wischmeier. Esta equação agrupa as variáveis que influenciam a perda de solo em seis fatores genéricos: erosividade da chuva, erodibilidade do solo, fator topográfico de comprimento da encosta, fator topográfico de declividade, fator relativo à cobertura vegetal e o de práticas agrícolas ou medidas de controle de erosão (ALVARES; PIMENTA, 1998)

A aplicação deste modelo permitiu estimar e espacializar as taxas médias da perda de solo que estavam, basicamente, associadas à erosão entressulcos e em sulcos pequenos. O objetivo deste modelo é de estimar a perda anual de solo em um terreno homogêneo e com uma declividade uniforme com ângulo de orientação constante. Porém, quando aplicada a uma área onde a declividade não é uniforme e as vertentes não são necessariamente retas, decorrem limitações, uma vez que o modelo não estima depósitos, nem a produção de sedimentos. O modelo é simples e dispõe de ajustes dos seus fatores de acordo com as condições locais de estudo, as taxas que são estimadas indicam a variação do processo localmente, o que se torna uma informação de grande valia para os diagnósticos da erosão e no planejamento dos usos da terra (WEILL; SPAROVEK, 2008).

Por mais de cinco décadas equações que tem como finalidade estimar a erosão do solo, têm sido útil no planejamento para controlar os processos de erosão e sedimentação. A equação universal da perda de solos é a mais extensamente conhecida e usada equação para este tipo de estudo. A EUPS é representada por técnicas simples e de fácil entendimento que visa facilitar a gestão e o manejo do solo (LANE et al, 1992).

Existem outros modelos para determinação de processos erosivos. Alguns destes não têm o foco na erosão hídrica, tais como o WEQ (Wind Erosion Equation) que tem como foco a erosão eólica (YANG et al, 2005).

WEPP (Water Erosion Prediction Project) faz parte de uma nova geração de modelos para estimativa de processos erosivos. A predição deste modelo é baseada em princípios da teoria da infiltração, hidrologia, física do solo, botânica e a mecânica da erosão. É um modelo de simulação contínua que permite prever,

especialmente e temporalmente, as perdas de solo e a sedimentação (YANG et al, 2005).

4.2.3. Sedimentologia

Os sedimentos em suspensão fazem parte de um processo que é impossível de ser acompanhado em sua plenitude à escala de uma vida humana (CARVALHO et al, 2000b).

Em estudos sedimentológicos, a atenção é focada sobre uma bacia de drenagem individual, em seu estado natural, pequena ou grande. A investigação é feita com base na taxa de erosão e uma resposta quantitativa não é facilmente obtida. O erro associado a qualquer cálculo de taxa de produção de sedimento de qualquer bacia de drenagem dada é complexa (LEOPOLD, 1956).

O sedimento presente no curso d'água é originado da erosão na bacia e da erosão no próprio leito e das margens. Em ocasiões de chuvas, as enxurradas transportam grandes quantidades de partículas para o rio, essas se movem em suspensão ou no leito, rolando, deslizando ou em saltos. O termo carga sólida se refere ao fenômeno qualitativo do movimento podendo ser em suspensão, de arrasto, em contato e saltante. Enquanto o termo descarga sólida se refere à quantidade e movimento (CARVALHO et al, 2000b).

Os três maiores modelos de transporte de sedimentos no sistema aquático são: suspensão, saltação e rolamento / escorregamento. A suspensão do grão de sedimento (ou agregado) ocorre quando a magnitude da componente vertical da velocidade turbulenta é maior que a velocidade de decantação do grão. O grão que sofre saltação pode momentaneamente sair do fundo e subir a uma altura não muito maior do que o diâmetro de alguns poucos grãos. As partículas que sofrem o

processo de rolamento e escorregamento movem ao longo da superfície do fundo, sob a força excessiva do fluxo da água (ROBERTS et al, 2003).

É relevante se questionar sobre a origem de uma carga de sedimento, pois essa pode ser de origem das atividades humanas ou de ocorrência natural. Um simples deslocamento gravitacional de terra pode ocasionar a entrada de carga de sedimento muito maior do que a ocasionada por uma área onde há uma atividade agrícola (NAGLE; FAHEY; LASSOIE, 1999).

4.3. Geoprocessamento

Conforme há o aumento da população mundial, também há o crescimento da demanda por recursos hídricos. Em alguns casos estes já se encontram em regime de escassez. Esses são exemplos que fazem com que este recurso tenha se tornado o foco de várias pesquisas no meio científico, dado a sua importância para a sustentabilidade e manutenção da vida humana. As técnicas de geoprocessamento surgem como ferramentas de auxílio e suporte nas tomadas de decisões na gestão deste recurso. Basicamente neste trabalho serão utilizados três recursos que fazem parte destas técnicas. São estes: Sistema de posicionamento global (GPS), Sistema de informação geográfica (SIG) e Sensoriamento remoto.

O conceito de geoprocessamento é muito amplo e gera controvérsias, pois ainda há muita discussão teórica sobre o assunto. Assim, Cirilo e Mendes (2001) chegam à seguinte conclusão

[...] Os paradigmas podem ser considerados como padrões da atividade científica e em certo sentido são considerados “supermodelos”, ou modelo de grande escala. O geoprocessamento, atualmente, é considerado o “modelo dos modelos”, muito mais pela capacidade de comunicação fácil com as pessoas (os mapas coloridos), do que pela forma com que explica a aparente complexidade do mundo que nos cerca. As várias características do “Mundo Real” (realidade, ambiente, sistema) precisam ser conhecidas como aspectos de um todo, bem como as conexões destas características.

As simplificações dessas interdependências entre características do “Mundo Real” são chamadas de modelos. Desta forma, pode-se definir conceitualmente o geoprocessamento como uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características e relações importantes, através de dados espacializados.

Pode-se dizer que a característica do geoprocessamento está relacionada ao referenciamento da informação em uma representação do espaço geográfico, bem como podemos associar essa referência com informações que possam caracterizar esse ponto e armazená-los em um banco de dados.

4.3.1. Sistema de Informação Geográfica (SIG)

O uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) no apoio à tomada de decisões tem possibilitado uma maior flexibilidade nas análises das informações que são geradas com o uso desse ferramental. Dependendo do objetivo do trabalho, deve ser feita uma escolha adequada da técnica a ser adotada (OLIVEIRA et al, 2005).

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Devido às várias áreas onde pode ser aplicado, existem pelo menos três maneiras de se utilizar o SIG: como ferramenta para a produção de mapas; suporte na análise espacial de fenômenos e como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informações espaciais. Um SIG é composto por vários componentes, tais como: interface com o usuário, entrada e integração de dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, armazenamento e recuperação de dados (CÂMARA, 1995).

Um SIG tem como função propiciar uma estrutura espacial para auxiliar as tomadas de decisões, visando o uso racional dos recursos naturais disponíveis no

planeta, bem como a gestão das atividades antrópicas sobre este recurso. Este faz isso disponibilizando as informações que caracterizam uma determinada entidade, tais como: o que elas são, a sua localização, como chegar até elas, quais outras entidades que se localizam próximas a ela. Os mapas disponibilizados em um SIG, por si só não poderiam armazenar tais informações com tal nível, assim utilizando então como complemento, bancos de dados (ZIELER, 1999).

Pode-se dizer que é totalmente adequado e pertinente o uso de SIGs como instrumento auxiliar e de apoio a desenvolvimento de programas de manejo de bacia hidrográficas. O monitoramento de processos dinâmicos, especificadamente daqueles relacionados à perda de solos, representa uma demanda passível de ser atendida, visto as características e as potencialidades apresentadas por este sistema (CASTRO, 1992).

Coletas de amostras de solos que são enviadas ao laboratório para análise, ou informações de sensores, permitem obter um mapa relacionado às variáveis focadas por esses meios. Para isso utilizam-se técnicas de geoestatística associadas a programas computacionais denominados de sistemas de informações geográficas. Esses programas permitem organizar e fazer as análises destes dados, bem como gerar mapas e análise espacial dos fatos evidenciados. Estes fazem isto associando atributos com uma posição física no campo, sendo que para cada ponto no campo, pode haver vários atributos associados simultaneamente a este (MOLIN, 2001).

4.3.2. Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto pode ser definido, de uma maneira ampla, como sendo a forma de se obter informações de um objeto ou um alvo sem que haja

contato físico com ele. As informações são obtidas utilizando-se a radiação eletromagnética gerada por fontes naturais como o sol e a terra, ou por fontes artificiais como por exemplo, o radar (ROSA, 1990).

Sensoriamento remoto é a ciência e arte de se obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno pela análise de dados adquiridos por um dispositivo que não está em contato com o objeto, área ou fenômeno sobre investigação (LILLESAND, 1979).

O fluxo de radiação eletromagnética ao se propagar pelo espaço pode interagir com superfícies ou objetos, sendo este refletido, absorvido e/ou reemitido. Este fluxo depende fortemente das propriedades físico – químicas dos elementos irradiados. O fluxo resultante constitui uma valiosa fonte de informações a respeito daquelas superfícies ou objetos. Dentro deste contexto, pode-se conceituar sensoriamento remoto como um conjunto de atividades cujo objetivo consiste na caracterização das propriedades físico-químicos de alvos naturais através da detecção, registro e análise do fluxo de energia radiante por eles refletidos e/ou emitidos (ROSA, 1990).

Ainda segundo Novo (1992), “o sensoriamento remoto pode ser visto como um sistema de aquisição de informações, e este pode ser subdividido em dois subsistemas: subsistema de coleta de dados e subsistema de análise de dados”.

O sensoriamento remoto auxiliou no entendimento dos fatores determinantes do desmatamento que acontece em áreas de colonização ao longo da rodovia Transamazônica, utilizando imagens de satélites juntamente com outros dados onde se avançou no desenvolvimento de uma metodologia capaz integrar estas informações, em um software chamado SpaceStat. Foi possível chegar a várias

conclusões, tais como o avanço de pastagens e o surgimento de pequenos povoados (CALDAS et al,2003).

Técnicas de sensoriamento remoto foram utilizadas em pesquisa para uma área metropolitana de São Paulo (SP) relacionada, até então, com a construção do primeiro trecho do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, tendo como objetivo a localização de áreas com maiores aptidões para obras de engenharia civil. Este estudo foi feito com base em imagens de satélite LANDSAT, mapas de geomorfologia e declividade, obtendo assim um mapa com cinco classes de aptidão, sendo estas: excelente, boa, razoável, ruim e péssima. Foi possível concluir que as técnicas utilizadas na referida pesquisa, foram adequadas aos procedimentos a serem realizados na fase de reconhecimento de projetos rodoviários, pelo fato de fornecer informações que agilizam o processo de tomada de decisões no momento da escolha do futuro trajeto (PENIDO et al;1998).

Vários acontecimentos que envolvem derramamento de óleo na região costeira do litoral norte do Estado de São Paulo foram observados desde a década de 70. A grande maioria dessas atividades tem origem na lavagem clandestina de tanques e operações rotineiras de petroleiros e elas têm levado grande risco aos ecossistemas costeiros. Nestes estudos o sensoriamento remoto se apresentou como uma ferramenta de grande importância para a localização e o mapeamento dos principais lugares sensíveis á impactos. Neste estudo foram utilizados imagens do sensor ETM+ LANDSAT 7, onde se obteve um mapa com as localizações dos principais ecossistemas e feições geomorfológicas que são mais frágeis a uma possível contaminação por óleo (CARMONA, 2003).

Uma metodologia usada para obter um banco de dados para modelar as atividades biogeoquímicas na floresta nacional de Tapajós, no Estado do Pará, foi utilizada o produto do sensoriamento remoto para classificar treze áreas que foram amostradas em campo com características específicas. Estas características implicam em diferenças quanto à biomassa, composição florística, variabilidade na percentagem de carbono e nitrogênio das folhas ou na composição dos solos. Nesse estudo foram utilizadas imagens dos satélites LANDSAT 5 e 7 e as localidades amostradas durante o trabalho de campo, foram posicionadas nas imagens a partir das coordenadas obtidas em campo com um GPS (LACRUZ et al, 2001).

Sensoriamento remoto e geoprocessamento foram empregados para a avaliação das fontes de poluição difusas no reservatório de Barra Bonita, localizado no Estado de São Paulo. Essas fontes difusas atualmente estão essencialmente associadas às atividades humanas, além disso, apresenta um elevado nível de degradação (PRADO et al, 2003)

Estudos que utilizam o sensoriamento remoto e sistemas de informação geográficos tornam-se cada vez mais presentes em trabalhos desenvolvidos na área de saúde animal. Isso se deve ao fato de que algumas enfermidades que acometem os animais estão muito relacionadas com o ambiente em que estes vivem, sugerindo assim a existência de um fator espacial que favorece a ocorrência de uma determinada doença (GOMES, 2005).

Estudos teóricos e experimentais mostram que as técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas com sucesso nos estudos da atmosfera. Em uma pesquisa foi empregado como ferramenta o pulso de “laser” ultracurto e de grande intensidade. Este é lançado em terra na direção da atmosfera, permitiu

analisar, através de sensores, o nível de absorção deste pulso pelos gases presentes na atmosfera, tornando possível monitorar variáveis tais como a quantidade de vapor de água e contaminantes gasosos (RAIROUX et al, 2000).

Desta forma observa-se que as técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas com as mais diversas finalidades, trabalhando com diferentes alvos e sempre obtendo informações dos alvos de forma indireta, monitorando variáveis que são associadas às características do alvo, que se deseja avaliar de forma remota.

4.4. Espacialização de chuvas

Estudos com a espacialização dos dados de chuvas é tanto o ponto de partida como o foco de várias pesquisas relacionadas a ciências do solo. Esta é de grande importância devido ao fato de ser um agente modificador natural do ambiente, provocando mudanças ao longo do tempo alterando várias características tais como relevo, regime de rios, clima local e paisagem.

No Estado de São Paulo foram realizadas diversas pesquisas envolvendo informações de espacialização de dados de chuvas, em sua total maioria sempre contando com dados de postos pluviométricos que possuem suas informações liberadas para consulta. Estudos desta natureza têm apresentado resultados satisfatórios em busca da compreensão de fenômenos atmosféricos. As alterações climáticas tem-se agravado a cada ano, onde se observa o aumento da ocorrência de eventos extremos de temperatura e longos períodos de estiagem e chuvas fortes, ocasionando grandes catástrofes. Isso tem desafiado diversos pesquisadores e profissionais ligados a área ambiental a mitigar tais problemas (SOARES, 2004).

O estudo prévio da variação dos elementos meteorológicos ao longo do ano possibilita um planejamento melhor das mais diversas atividades. A precipitação das

chuvas é um dos elementos meteorológicos de grande importância, pois está diretamente relacionados aos mais diversos setores da sociedade, de forma que o regime pluviométrico afeta a economia, o meio ambiente e a sociedade como um todo (SILVA et AL, 2006).

Segundo Barger & Thom (1949 Apud SILVA et al, 2006)⁶, a distribuição gama como modelo teórico para aproximar as probabilidades de precipitação para períodos mensais, ou menores ou maiores, em regiões onde é comum a ocorrência de baixos valores de precipitação.

No estado do Rio de Janeiro foi realizado um estudo que teve como objetivo aprimorar os conhecimentos sobre a erosividade das chuvas dentro dos limites estaduais. Neste trabalho foram calculados os índices de erosividade da chuva com base em dados de quatorze estações localizadas dentro do referido estado (GONÇALVES, 2005).

Em um estudo realizado na China teve como objetivo principal a utilização de dados pluviométricos para estabelecer um modelo simples, com o intuito de estimar a erosividade e para facilitar a análise espacial das chuvas utilizando diversos métodos para interpolar a distribuição destes dados (MEN; YU; XU, 2008).

Com base em informações de precipitação e temperatura de vários locais dentro do Estado de São Paulo, foi desenvolvido um estudo de espacialização dessas variáveis. Houve o imprevisto da ausência de dados em alguns postos, falhas nos históricos de dados que chegavam a décadas inteiras. Foram considerados satisfatórios, os locais onde a falta de dados foi o menor possível. Com base nessas informações foram levantados climogramas, que são gráficos

⁶ BARGER, G. L.; THOM, H. C. S. Evaluation of drought hazard. **Agronomy Journal**, Madison, v.41, n.11, p.519-526, 1949.

muito úteis em estudos climáticos, fornecendo informações sobre a distribuição mensal de chuvas bem como as temperaturas médias para cada mês de acordo com a escala temporal utilizada (BARBOSA , 2006).

4.5. Reservatórios

Qualquer barreira construída ao longo de um rio e por um período de tempo consideravelmente longo (da ordem de várias décadas), com o objetivo de armazenar água para usos futuros e diversos é chamada de barragem. Desde antigamente as barragens são construídas para que seu reservatório possa fornecer água para usos específicos e abastecimento de comunidades urbanas e rurais. Também servem como ferramenta de gerenciamento da água e fornecem um nível seguro desta para prover o abastecimento das áreas com maior prioridade. Inicialmente os projetos eram relativamente pequenos. As represas de armazenamento de água eram modestas e o efeito local era relativamente pequeno. Porém atualmente tem-se barragens com características bem diferentes das barragens que eram construídas antigamente, isso devido ao aumento do seu porte motivado pelo avanço da tecnologia, com aplicação de materiais mais resistentes e técnicas de projetos bem mais apuradas (STERNBERG, 2004).

A construção de uma barragem introduz uma quebra no regime natural de sedimento do rio. Este gera alterações geomorfológicas tanto a montante quando a jusante do reservatório formado. As alterações mais evidentes estão à montante, onde o processo de sedimentação vai ser mais intenso, o que caracteriza o assoreamento, que é a intensificação do processo de sedimentação. Todos os tributários do reservatório que estiverem próximos do mesmo tendem a desenvolver a formação de deltas em resposta a quebra da velocidade do fluxo da água,

alterando também o ecossistema e afetando a fauna e flora aquática. Outro fator que pode ser observado é a formação de pequenas baías e ilhas. Essas baías podem ficar em total isolamento pelo acúmulo de sedimento ao seu redor (STERNBERG, 2004).

Na dinâmica dos sedimentos, as partículas com maior granulometria movem-se como carga de fundo em rios, enquanto que os sedimentos finos são transportados em suspensão na coluna d'água. Os reservatórios normalmente são construídos com uma provisão do seu volume reservado para esses sedimentos que viram a se depositar. Esse material mais fino se deposita com o decréscimo da velocidade, ocupando um volume do reservatório, assim a vida econômica e funcional do mesmo é determinada pelo volume de sedimento que é depositado dentro desses limites de projeto. Portanto, quando a carga de sedimento transportado por rios afluentes do reservatório aumenta, a vida útil dele tende a diminuir, com o aumento da taxa de deposição de sedimento dentro dos limites conhecido como volume morto (NAGLE; FAHEY; LASSOIE, 1999).

A estimativa da vida útil da capacidade de armazenamento de qualquer reservatório, em qualquer rio, depende dos seguintes parâmetros: tipo de barragem e vazão vertida; concentração carga total de sólidos suspensos duração das vazões máximas; movimento da carga sólida de fundo; forma e a capacidade do reservatório (SHALASH, 1982).

No reservatório de Promissão, localizado no interior do Estado São Paulo, foi realizado um estudo na estimativa da redução do volume do reservatório, revelando que do ano de 1975 até o ano de 2005 a redução neste reservatório foi de 3,75 % (MAIA, 2006).

5. METODOLOGIA

O uso das técnicas de geoprocessamento, permite uma gama de estudos nas mais diversas áreas. Esta metodologia irá aplicar técnicas de trabalhos com mapas, imagens e dados georeferenciados. Essas ferramentas assumem um papel importante como instrumento estratégico do planejamento ordenado do espaço, onde são analisados relevo, características locais (solo e vegetação) e clima.

5.1. Cálculo do assoreamento

O cálculo do volume assoreado será feito com base na diferenciação entre os dados trabalhados de cartas topográficas do IBGE e o levantamento batimétrico realizado no ano de 2008. A partir dessas informações também será possível a comparação entre as curvas cota x área x volume do reservatório entre as datas de 1971 e 2008.

5.1.1. Geração do modelo digital do terreno pré-enchimento

O modelo digital do terreno (MDT) é uma matriz (raster) de números que representam a distribuição geográfica de elevações. O modelo digital do terreno é derivado de mapas topográficos (MENDES; CIRILO, 2001).

O processo de “rasterização” de documentos cartográficos é realizado com o suporte da tecnologia que envolve o uso de “scanners”. Um “scanner” varre o mapa e armazena a informação contida em cada quadrícula micrométrica deste, de forma compatível com as linguagens dos computadores.

Têm-se, usualmente, dois tipos de informações que são expressas nos mapas: uma complexa, com informações sobrepostas (Carta topográfica IBGE), onde a hidrografia, altimetria, malha viária, etc. são apresentadas em conjunto em

um único mapa; e outra é a simplificada, onde se encontram informações seletivas (mapas cadastrais, basicamente informações de quadras e lotes, por exemplo) (MENDES; CIRILO, 2001).

A atribuição de coordenadas às imagens provenientes de “scanners” é feita de forma aleatória pelo computador no processo de “rasterização”. Em função de muitos propósitos, essas coordenadas necessitam ser convertidas para uma referência espacial mais significativa. Isto é feito através do georreferenciamento das imagens proveniente do “scanner”, ou seja, proveniente do processo de “rasterização”.

O método de digitalização (ou vetorização) consiste em individualizar as entidades que sofreram um processo de “rasterização”. Nesta digitalização manual, tem-se uma imagem “raster” georreferenciada colocada como fundo de tela no monitor, onde um operador persegue cada feição “raster” com o cursor, escolhendo as primitivas geométricas do programa CAD que modelem a estrutura vetorial da melhor forma possível.

O uso de estruturas matriciais (“raster”) para análise hidrológica é recomendado por serem computacionalmente eficientes e simples. Também são compatíveis com dados de sensoriamento remoto e muitos sistemas de informações geográficas (MENDES; CIRILO, 2001).

A base cartográfica do IBGE utilizada para o trabalho constituiu-se de 10 cartas topográficas em escala 1:50.000 em 10 folhas articuladas. A Tabela 1 apresenta a identificação das 10 cartas e na Figura 2 há a representação do arranjo destas.

Tabela 1 – Lista de cartas digitalizadas

Nome	Identificação
Aracanguá	SF-22-D-III-4
Araçatuba	SF-22-J-II-1
Bacuri	SF-22-D-III-3
Bela Floresta	SF-22-C-IV-1
Buritama	SF-22-J-II-2
Major Prado	SF-22-D-V-3
Pereira Barreto	SF-22-C-IV-2
Ribeiro do Vale	SF-22-J-I-2
Sud Menuci	SF-22-D-III-1
Três Alianças	SF-22-C-IV-4

Figura 2. Arranjo das cartas topográficas que foram digitalizadas

O esquema de interpolação estima o valor da superfície onde não há dados originais, baseado em dados conhecidos (observacionais) (AWULACHEW, 2006).

O método de interpolação utilizado para a obtenção dos modelos foi o TIN (“Triangular Irregular Net”), pois este é utilizado em todas as pesquisas do Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, além disso, apresentou melhor resultado e um grau menor de geração de ruídos na imagem.

Este também é utilizado por Awulachew em sua pesquisa realizada nos lagos Abaya e Chamo, na Etiópia (AWULACHEW; 2006).

5.1.2. Geração do modelo digital terreno atualizado

O ecobatímetro é um equipamento utilizado na medição de profundidade. O funcionamento deste se baseia na medida do tempo decorrido entre a emissão de ondas através da água, com determinada frequência sônica ou ultra-sônica, e o retorno deste sinal após ser refletido em alguma superfície no fundo do corpo d'água. Com base na medida desse tempo e com o conhecimento da velocidade do som na água, o aparelho calcula a profundidade em que se encontra o fundo.

Os parâmetros utilizados na pesquisa foram; profundidade e suas respectivas coordenadas geográficas. O DGPS coleta as coordenadas das profundidades registradas pelo ecobatímetro e com base nestas, o software (HYPACK) indica a orientação do barco de acordo com uma rota traçada previamente. Este Software é de propriedade do Núcleo de Hidrometria e se apresenta como uma poderosa ferramenta no levantamento batimétrico de grandes reservatórios.

Ao final da batimetria do reservatório, obteve-se informações que permitem uma comparação com as informações obtidas com a vetorização das cartas topográficas do IBGE, podendo assim estimar o volume de depósitos de sedimento, no reservatório de Três Irmãos. O balanço de sedimentos entre os reservatórios de Três Irmãos e Ilha Solteira, através do canal Pereira Barreto, não foi abordado nessa pesquisa.

O levantamento batimétrico do reservatório de Três Irmãos foi realizado pelo Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos, através de um projeto de P & D em parceria com a Companhia Energética de São Paulo (CESP) e Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI), sob coordenação do Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad.

A Figura 3 ilustra a configuração dos equipamentos utilizados para a coleta das informações em campo.

Figura 3. Configuração dos equipamentos para coleta de informações

Na Figura 4, é mostrado o ecobatímetro utilizado na batimetria. É um instrumento eletrônico usado para gerar, com precisão, dados sobre as cotas das secções batimétricas levantadas. O equipamento pode utilizar diferentes frequências para emitir o som, tais como: 33, 40, 50, e 200 kHz e mede profundidades de até 340 m. Os dados coletados são enviados em tempo real para um computador

portátil acoplado ao ecobatímetro, utilizando o software HYPACK para armazenamento e posterior processamento.

Figura 4. Ecobatímetro: Echo Sounder Bathy 500 - MF

O DGPS é mostrado na Figura 5 onde é o mesmo modelo em posse do Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos e utilizado nas campanhas de batimetria juntamente com o ecobatímetro da Figura 4.

Figura 5. DGPS: Leica GS - 20

As pesquisas com informações provenientes de ecobatímetros podem ser feitas através da importação dos dados para dentro de um software SIG, para prover uma visualização e análise mais detalhada das profundidades atuais, distribuição, espessura e estimativa de sedimentos em lagos e, com base nessas informações é possível estimar valores tais como a taxa média de acumulação de sedimentos (ODHIAMBO; BOSS, 2004).

5.1.3. Determinação do volume assoreado

A determinação do assoreamento do reservatório foi feita aplicando uma metodologia amplamente utilizada da diferenciação entre MDT's de períodos diferentes. O resultado obtido é um mapa com a localização dos locais onde houve tanto deposição como erosão da superfície submersa no reservatório. Assim, com os valores dessa diferença e as áreas que as mesmas ocupam, é possível determinar o volume assoreado e erodido, através da média ponderada pelas áreas de cada elevação. Várias pesquisas são conduzidas utilizando esses métodos.

Odhiambo e Boss utilizaram uma metodologia pra determinar a espessura da camada de material sedimentado em reservatórios. Este usou um ecobatímetro, onde a pesquisa foi conduzida utilizando dois canais de frequência do mesmo, simultaneamente (28/200 kHz), em dois reservatórios (Lee Creek e Lake Shepherd Springs) em Ozark Plateau ao nordeste do Arkansas-EUA. Os valores de alta frequência do ecobatímetro permitem obter a profundidade relativa ao atual processo de deposição, este reflete na superfície sedimentada no reservatório, já a baixa frequência de operação é utilizada para determinar a superfície dos sedimentos compactados e coeso, que se encontram sob a camada superficial de

sedimento. Assim obtém-se a espessura da camada de sedimento recente através da diferença dessas duas superfícies geradas (ODHIAMBO; BOSS, 2004).

Num estudo conduzido Brow (2000 Apud Odhiambo; Boss, 2004)⁷, foi realizada uma batimetria detalhada e uma pesquisa sobre o processo de sedimentação do lago Fort Smith. Os dados da pesquisa promovem uma estimativa á longo prazo, de uma acumulação média de 0,33 cm/ano. A sedimentação observada no lago Fort Smith foi bastante baixa apesar dos relevos íngremes desenvolvidos dentro da bacia de drenagem. É mais provável que esse reflexo seja causado pelo fato de que 90% da cobertura ao redor do lago sejam de floresta conservada.

Em março e abril de 2007, foi realizado um estudo batimétrico no reservatório de John Redmond em Coffey Country, Kansas-EUA. A pesquisa foi desenvolvida utilizando um ecobatímetro acoplado com um GPS, obtendo valores de profundidade do ano de 2007. A metodologia utiliza o ecobatímetro em dois canais de frequência, alta e baixa, com dois transdutores (200 kHz e 38 kHz) operando simultaneamente. Na revisão da literatura relevante, a metodologia que utiliza a diferença do retorno acústico entre as frequências altas e baixas, tem se mostrado promissora no mapeamento da espessura da camada de sedimento depositado em reservatórios e lagos. Nesta pesquisa, os autores tiveram acesso a um mapa topográfico de pré-enchimento da região, com intervalos entre curvas de níveis de cinco Pés (aproximadamente 1,52 m), o que permite estimar, com uma razoável precisão, a quantidade de material depositado no reservatório quando comparado com o levantamento batimétrico realizado. Obteve-se, portanto, um modelo digital

⁷ Brown, B.J., 2000. **Bathymetry and Sedimentation Patterns of Lake Fort Smith, Arkansas Utilizing Dual Frequency Sonar**. M.S. Thesis, University of Arkansas, Department of Geosciences, 68pp.

batimétrico para o ano de 1957 (pré-enchimento) e 2007 (levantamento batimétrico atual), e a comparação destes resultou em um modelo com valores negativos (com perdas de solo dentro do reservatório) e valores positivos (com acúmulo de material sedimentado) para um período de 50 anos (KBS, 2007).

A Figura 6 permite observar o percurso realizado pela embarcação dentro do lago nos dias de campanha de batimetria realizado por KBS (2007).

Figura 6. Percurso da batimetria, três dias de pesquisa. – Fonte KBS (2007).

Na pesquisa realizada nos lagos Abaya e Chamo, na Etiópia, aplicou-se a mesma metodologia para a realização da batimetria. Esta foi desenvolvida com o propósito de investigar os parâmetros físicos dos lagos, que até então não haviam sido estudados. Este foi conduzido utilizando-se a combinação do GPS com um ecobatímetro (AWULACHEW, 2006).

Em um estudo realizado sobre barragens, fontes de sedimento e assoreamento em reservatórios da Romênia (utilizando várias fontes de informações, tais como dados obtidos de medidas hidrométricas, estimativas indiretas da carga de sedimentos em alguns reservatórios e medidas realizadas em pequenas bacias). Foram utilizados dois fatores para determinar as fontes de sedimentos: a composição litológica das rochas geradoras e o tamanho das bacias de drenagem que promovem a seleção da quantidade de sedimentos transportado da área de origem até a área de descarga. Tais fatores foram escolhidos com base em argumentos adquiridos da análise de uma literatura específica e também de experiência pessoal de diversos autores de artigos na área (RĂDOANE; RĂDOANE, 2002).

5.2. Análise da perda de solos – Equação universal da perda de solos (EUPS)

A Equação Universal da Perda de Solo (EUPS), apresentada na equação 1, foi proposta por Wischmeier e Smith (1978) e tem como finalidade auxiliar na estimativa da perda anual de solo que é ocasionada pela erosão.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Em que:

A = Perda de solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$)

R = Fator de erosividade da chuva ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$)

K = Fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)

L = Fator de comprimento da rampa (adimensional)

S = Fator do grau de declividade (adimensional)

C = Fator de uso e manejo (adimensional)

P = Fator prática conservacionista (adimensional)

5.2.1. Potencial natural de erosão - PNE

Com base nos fatores físicos da EUPS, foi definido o PNE, este está relacionado aos parâmetros físicos do meio. Essa é a estimativa da perda de solo para um meio no qual ainda não houve intervenção humana e onde não há qualquer tipo de cobertura protetora do solo.

A relação que descreve o PNE é apresentada na equação 2:

$$PNE = R \cdot K \cdot L \cdot S \quad (2)$$

PNE = Potencial natural de erosão ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$)

R = Fator de erosividade da chuva ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$)

K = Fator de erodibilidade do solo ($\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$)

L = Fator de comprimento da rampa (adimensional)

S = Fator do grau de declividade (adimensional)

5.2.2. Erosividade da chuva – Fator R

Este fator representa um índice numérico que relaciona a capacidade da chuva esperada, para uma determinada localidade, causar erosão em uma área desprotegida.

A erosividade da chuva pode ser calculada pela equação 3:

$$EI = 89,823 \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,759} \quad (3)$$

Onde temos que:

EI = Erosividade média mensal do mês x ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$)

r = Precipitação média mensal do mês x (mm)

P = Precipitação média anual (mm).

Onde o fator de erosividade da chuva no período é dado pela equação 4:

$$R = \sum EI = \sum \left\{ 89,823 \cdot \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \right\} \quad (4)$$

Em que:

R = erosividade anual da área ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$)

EI = índice médio de erosividade mensal no mês x (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹)

r = precipitação total média no mês x (mm)

P = precipitação total média anual (mm)

5.2.3. Erodibilidade do solo – Fator K

A erodibilidade do solo está diretamente relacionada às suas características que contribuem para a suscetibilidade à erosão. A erodibilidade de um solo pela água é determinada pelas suas propriedades intrínsecas que afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e a capacidade de absorção de água e as que conferem resistência à dispersão, à abrasão e às forças de transporte das chuvas e enxurrada (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

O mapa de solo foi obtido a partir de SIGRH (2007), onde com base em cada tipo de solo, foi pesquisado o respectivo valor do fator.

5.2.4. Fatores topográficos - Fator L e S

Após o processo de digitalização, foi gerado o MDT (modelo digital do terreno) para obter informações relativas ao perfil topográfico do fundo do reservatório no início da operação (cartas do IBGE) e atualmente (batimetria). Também foram extraídas as variáveis da equação universal da perda de solos (EUPS), relativas ao relevo da região, ou seja, os fatores L e S.

O fator topográfico está diretamente relacionado às características do relevo do terreno, sendo que este é obtido através da relação entre comprimento da rampa e a declividade.

O fator L está diretamente relacionado ao comprimento e o fator S ao declive do terreno. Esses valores são estudados separadamente, no entanto, para o emprego deste na EUPS, os dois fatores foram unidos em um único fator chamado LS. Este representa a relação das perdas de solo esperadas por unidade de área em um local com um declive qualquer, comparada às perdas de solo correspondentes em uma parcela unitária padrão de 25 metros com 9% de declividade (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

A equação 5 apresentada pode ser utilizada para a determinação do fator LS (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Onde:

$$LS = 0,00984 \cdot C_{LS}^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (5)$$

Situação em que:

LS = Fator topográfico (adimensional)

C_{LS} = Comprimento da rampa (m)

D = Grau de declividade (%)

5.2.5. Fator de Uso e manejo - Fator C

As perdas de solo em uma área desprovida de qualquer tipo de cobertura podem ser determinadas pela PNE. Porém, se houver algum tipo de cultivo sobre esta, as perdas de solo serão reduzidas devido à proteção que a cobertura oferece ao solo.

O fator uso e manejo C é a relação esperada entre as perdas de solo em um terreno cultivado em dadas condições e as perdas de um terreno mantido continuamente descoberto e cultivado. O fator C mede o efeito combinado de todas as relações das variáveis de cobertura e manejo utilizadas, desde o plantio até a colheita, e influenciado pela época em que cada operação é realizada. Diferentes combinações dessas variáveis provavelmente apresentam diferentes efeitos sobre a perda de solo. (FUJIHARA, 2002).

5.2.6. Práticas conservacionistas - Fator P

O fator P é a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro abaixo. Em alguns casos, pode se mesclar os fatores C e P para a formação de outro fator que os substitua na equação, visto que são variáveis relacionadas à cobertura do solo

As práticas conservacionistas de caráter vegetativo são aquelas em que se utiliza a vegetação para defender o solo contra a erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

A densidade da cobertura vegetal é o princípio fundamental de toda proteção que se oferece ao solo, preservando-lhe a integridade contra os efeitos danosos da erosão. Realmente a erosão do solo é tanto menos quanto mais densa é a vegetação que o recobre e protege.

5.3. Tratamento dos dados de chuvas

A estimativa da distribuição da chuva foi feita com base nos valores registrados nos postos de pluviométricos listados na Tabela 2. Estes foram obtidos através do site da HIDROWEB, sob controle da ANA:

Tabela 2 – Dados de localização dos postos

Código do posto	Coordenadas (UTM – Datum Córrego Alegre – Fuso 22)	
	E	N
2050016	508730	7712905
2051004	475740	7720267
2051007	486170	7707368
2051012	461923	7687040
2051032	487921	7685235
2051033	498318	7687084
2051035	465343	7709182
2150006	517308	7664901
2151002	479135	7784826
2151003	465428	7668602
2151048	468918	7653852
2151053	489592	7786680

Fonte: HIDROWEB (2008)

A Figura 7, mostra a localização dos postos na área da microbacia de estudo inserida dentro da área de contribuição do reservatório de Três Irmãos.

Figura 7. Localização dos postos pluviométricos

Alguns postos apresentaram falhas na série de valores mensais das chuvas. Devido a isto, foi necessário empregar uma metodologia de preenchimento de falhas com base nas medidas dos postos mais próximos, que possuíam a informação referente ao mês da falha. O referido método é o da Ponderação Regional (TUCCI, 2002). O método é modelado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$Y = \frac{1}{3} \times \left(\frac{X_1}{\bar{X}_1} + \frac{X_2}{\bar{X}_2} + \frac{X_3}{\bar{X}_3} \right) \times \bar{Y} \quad (6)$$

Onde:

Y : precipitação do posto a ser estimado;

X_1 , X_2 e X_3 : precipitações correspondentes ao mês que se deseja preencher, observadas em três estações vizinhas;

$\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$ e $\bar{X}_3$: precipitações médias nas três estações vizinhas;

$\bar{Y}$: precipitação média do ponto a ser estimado.

Para a escolha dos postos foi aplicado um estudo da correlação dos valores de cada posto com os demais. Assim, utilizando os dados com maior valor de correlação, o erro tende a ser reduzido na estimativa do valor da falha de um posto.

A correlação refere ao grau de associação entre uma variável e outra ou entre uma variável e várias outras. O coeficiente de correlação igual a 1 indica um perfeito grau de associação entre as variáveis. Um coeficiente de correlação igual a 0 (zero), indica uma completa relação aleatória. A correlação nada informa sobre a dependência ou a independência de uma variável e não informa também nada sobre

a natureza da relação entre as variáveis. A correlação é a medida de premeditabilidade da variação em duas variáveis diferentes (VOLK, 1958).

Tendo como base os valores de chuva com as falhas preenchidas, é possível obter um mapa da distribuição desta através da interpolação da informação de cada posto, obtendo valores estimados para área que não se possui dados. O método utilizado foi o TIN (mesmo utilizado na geração do MDT).

5.4. Tratamento das imagens de satélites.

As imagens foram adquiridas através do site do INPE, que disponibilizou imagens do LANDSAT 5, para a região, desde que ele entrou em operação. Foi necessária a realização de alguns procedimentos para que as imagens pudessem ser utilizadas na presente pesquisa.

5.4.1. Georreferenciamento

Algumas imagens de satélites sofrem certas variações que podem gerar distorções. Essas variações são causadas pelo ângulo de visada do satélite com a superfície do planeta. Desta forma, a imagem não possui uma boa precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados. São fontes de erros:

- Rotação da terra;
- Curvatura da terra;
- Movimentação do espelho de imageamento;
- Variações da altitude, posição e velocidade da plataforma;
- Distorção de panorama;

- Distorção topográfica;

Através de pontos de controle (pontos que possam ser visualizados em mapas ou coletados em campo, que também sejam identificáveis na imagem de satélite) associa-se um ponto na imagem a uma coordenada real (obtida em um mapa ou com visitas de campo munidos de um GPS). Assim aplicam-se as alterações necessárias para reduzir estas distorções, tornando a imagem geometricamente corrigida e com as coordenadas que representam a realidade do local de estudo.

5.4.2. Classificação supervisionada.

A classificação de objetos ou fenômenos é feita pela escolha das características que os descrevem para diferenciá-los entre si. Na definição matemática usa-se o espaço de atributos, que é essencial para se entender como funciona a classificação de imagens multiespectrais. No processamento digital, a cada eixo desse espaço são atribuídos os níveis de cinza de uma determinada banda espectral.

Os métodos de classificação se dividem basicamente em duas categorias: a classificação supervisionada e a não-supervisionada. Nesta segunda não há qualquer conhecimento prévio do classificador sobre os atributos das classes referentes à cena, enquanto na classificação supervisionada, o classificador orienta sua busca de classes a partir de amostras de treinamento feitas anteriormente com as classes de interesse da cena.

O princípio de classificação supervisionada é baseado no uso de algoritmos para se determinar os pixels, que representam valores de reflexão característicos

para uma determinada classe. A classificação supervisionada é a mais utilizada na análise quantitativa dos dados de sensoriamento remoto.

No processo de classificação da imagem é necessário ter um conhecimento prévio em relação à realidade de campo. Isto pode ser feito através de um memorial fotográfico, desde que se conheçam as coordenadas dos locais onde foi tirada cada foto, ou também pode ser feito com visitas a campo pelo responsável pela classificação, onde este irá coletar informações tanto visuais quanto de posicionamento geográfico.

Com base nessas informações, o classificador pode localizar nas imagens multiespectrais, cada objeto alvo de estudo, e com isso determinar as regiões de treinamento para que o software de tratamento classifique as imagens de acordo com a região característica indicada na área.

Existem alguns tipos de métodos estatísticos que são utilizados no processo de classificação supervisionada de imagens, tais como o método do paralelepípedo e distância mínima. Porém, a mais utilizada é o método da máxima verossimilhança.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Caracterização da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos nº 19

A área de contribuição do reservatório de Três Irmãos encontra-se inserido dentro da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos número 19 (UGRHI-19), que corresponde à bacia hidrográfica do Baixo Tietê. Esta se encontra localizada no noroeste do Estado de São Paulo. A UGRHI 19 está compreendida desde a barragem da usina Mário L. Leão (Reservatório de Promissão) até o Rio Paraná na fronteira com o Estado do Mato Grosso do Sul. Tem uma extensão de

aproximadamente 200 km, sendo que somente o reservatório de Três Irmãos tem aproximadamente 130 km de comprimento.

A área total de drenagem da UGRHI-19 é de 15.471,81 km², contendo os reservatórios de Três Irmãos e Nova Avanhandava. São seus cursos d'água principais: Rio Paraná e seu afluente Ribeirão do Abrigo ou Moinho, Rio Tietê e seus afluentes Ribeirão Lajeado, Ribeirão Azul ou Aracanguá, Ribeirão Macaúbas e Ribeirão Santa Bárbara.

As principais cidades localizadas na UGRHI são: Araçatuba, Birigüi, Andradina e Penápolis. Na Figura 8 e Figura 9 temos respectivamente a localização da UGRHI-19 no Estado de São Paulo e o detalhe com as principais cidades localizadas na mesma.

Figura 8. UGRHI – 19 no Estado de São Paulo – Fonte: SIGRH (2000).

A seguir, todas as informações contidas nos itens 6.6.1 até 6.6.5, foram baseadas no relatório zero da bacia (SIGRH, 2000).

6.1.1. Geologia

O substrato geológico da região é composto por rochas sedimentares e vulcânicas de idade mesozóica, pertencentes a Bacia do Paraná juntamente com formações cenozóicas representadas por depósitos coluvionares e aluvionares antigos e recentes.

As características geológicas da Bacia do Baixo Tietê refletem, fundamentalmente, a evolução histórica da bacia sedimentar do Paraná. As rochas basálticas formaram-se devido a um intenso vulcanismo que ocorreu no início do período Cretáceo, quando ainda prevaleciam condições desérticas na Bacia do Paraná, acompanhado de perturbações tectônicas que geraram arqueamentos e soerguimento nas suas bordas, associados à grande número de falhamentos, responsáveis pela estrutura atual da bacia.

Posteriormente, durante o Cretáceo Superior, já em clima semi-árido, depositaram-se sobre a seqüência dos derrames basálticos, em ambiente flúvio-lacustre, as seqüências areníticas do Grupo Bauru.

- **Formação Serra Geral**

A formação Serra Geral é composta por um conjunto de rochas basálticas toleíticas, dispostas em camadas sub-horizontais, contendo intercalações de arenitos eólicos entre os derrames (arenitos intertrapianos).

Também podem ocorrer intrusões associadas às mesmas atividades vulcânicas, principalmente na forma de diques verticais de composição diabásica, cortando, portanto, os próprios derrames.

Na área da Bacia do Baixo Tietê a formação Serra Geral aflora ao longo de vales Rio Tietê e na confluência dos seus principais afluentes, além da várzea e entorno do Rio Paraná a partir de Jupiá, no sentido montante, até a divisa da bacia. Nestas áreas, relativamente planas, os basaltos podem ser identificados pela presença de solos diretamente relacionados à rocha (solos de alteração e residuais) vermelho-escuros e argilosos.

- Grupo Bauru

O pacote de sedimentos do Grupo Bauru, no âmbito da Bacia do Baixo Tietê, é subdividido em duas formações geológicas: Santo Anastácio e Adamantina, ambas dispostas sobre os basaltos da formação Serra Geral.

As rochas deste grupo foram originadas em um ambiente de sedimentação reconhecidamente continental flúvio-lacustre, o que lhe confere grande descontinuidade nas suas duas unidades geológicas.

A formação Santo Anastácio assenta-se diretamente sobre o embasamento basáltico, formando-se entre estas duas unidades um contato erosivo ou discordante.

A formação Adamantina, sobreposta à anterior, é encontrada predominantemente nas superfícies elevadas dos interflúvios. O contato superior da formação Santo Anastácio com a base da formação Adamantina se dá predominantemente de forma transicional e entrelaçada.

As rochas destas duas formações geológicas, constituídas predominantemente por arenitos são em geral brandas, apresentando baixas resistências mecânicas; porém, quando cimentadas esta condição é alterada, passando a ter maiores coerências e resistências.

- Formação Santo Anastácio

Esta formação é constituída por arenitos médios a finos, sendo freqüentemente recobertos por película limonítica, responsável pela cor avermelhada, rosada ou amarela da rocha. Os arenitos são geralmente bem selecionados e homogêneos, exibindo localmente cimentação carbonática, responsável pela presença de nódulos e concreções.

As estruturas sedimentares são incipientes, constatando-se freqüentemente a ocorrência de bancos maciços com 2 a 3 m de espessura e localmente, lentes de lamito marron-avermelhado, com passagem gradual para os arenitos. As espessuras desta unidade geológica tendem a diminuir no sentido leste, a partir do Rio Paraná, tendo sido constatados valores inferiores a 40 m no vale do Rio Tietê, podendo atingir 80 m no vale do rio Santo Anastácio, fora da área estudada.

São encontrados nas cotas mais baixas, ao longo do Rio Paraná, Tietê e seus afluentes, apresentando maior área de exposição no extremo oeste, próximo ao Rio Paraná.

- Formação Adamantina

Os sedimentos da formação Adamantina compreendem arenitos finos a muito finos que podem conter cimentação e nódulos carbonáticos, além de lentes de siltitos arenosos e argilitos, na forma de bancos maciços. Exibem grande variedade

de estruturas sedimentares, caracterizada pela presença de estratificações plano-paralela e cruzada de pequeno porte. A existência de variações regionais significativas fizeram com que muitos estudiosos dividissem a formação Adamantina em subunidades de mapeamento, baseadas em diferenças petrográficas e estruturais.

A formação é a de mais ampla distribuição entre as unidades geológicas encontradas na Bacia do Baixo Tietê, sendo encontrada nos níveis mais elevados do relevo, uma vez que foi totalmente removida pela erosão nos baixos vales dos principais rios.

Suas rochas são em geral pouco alteradas, destacando-se pela coloração bege ou creme, às vezes amarronzada clara, sendo por isto de fácil distinção das demais unidades do Grupo Bauru.

As maiores espessuras são encontradas nos espigões onde chegam a alcançar dezenas de metros, adelgaçando-se nas porções mais erodidas e em direção as regiões leste e nordeste da bacia.

- Depósitos Cenozóicos

Compreendem essencialmente os depósitos aluvionares e coluvionares com distribuição governada pelos grandes cursos d'água e, os materiais de cobertura "in situ" (solos residuais), resultantes da desintegração das rochas encontradas na região.

- Depósitos em várzeas e terraços (aluvionares)

Os depósitos aluvionares constituem os aluviões antigos e recentes encontrados na forma de faixas estreitas e alongadas com altitudes baixas (planícies

aluviais e terraços aluviais), encontrados ao longo das calhas dos principais rios. Atualmente as maiores partes dessas planícies encontram-se submersas pelos reservatórios das barragens Três Irmãos e Promissão, no Rio Tietê; bem como, no Rio Paraná, pela represa de Jupia e futuramente, parcialmente recobertas pelo reservatório de Porto Primavera.

Os aluviões antigos situados ao longo dos afluentes do Rio Tietê são constituídos, predominantemente, por cascalheiras, enquanto que os aluviões recentes por areias finas, siltes e camadas de argila, podendo ou não conter camadas de cascalho na base e superficialmente argilas com ou sem matéria orgânica.

Os depósitos de planície antigos do Rio Paraná alcançam espessuras de dezenas de metros, distribuídos em vários níveis de terraços. Os Terraços Superiores são constituídos essencialmente de cascalhos e camadas intercaladas de areias com espessuras que chegam a alcançar 40 m. Os Terraços Intermediários tem composição semelhante à dos superiores, enquanto que o Baixo Terraço - forma deposicional mais característica da planície fluvial do Paraná - é formado predominantemente por areia fina com cascalhos esparsos, apresentando espessuras que chegam a atingir até 10 m.

Na Planície de Inundação predominam camadas de areia fina e areia argilosa, passando a argila arenosa, cobertas por camadas superficiais de argila pura. Os depósitos recentes são constituídos, essencialmente por areias finas e médias, localmente grossas, contendo bancos de cascalho encontrados junto às calhas dos Rios Tietê e Paraná, apresentando espessuras de mais de uma dezena de metros.

- Depósitos Coluvionares e solos residuais

Correspondem aos extensos depósitos de materiais de cobertura inconsolidados, encontrados nas vertentes de rochas tanto sedimentares (Grupo Bauru) como basálticas (formação Serra Geral). Podem ser encontrados também, no sopé das vertentes cobrindo porções de terraços aluvionares. Sua granulometria e composição mineralógica refletem a constituição mineralógica dos solos de alteração das respectivas rochas sotopostas. Quando dispostos sobre os arenitos do Grupo Bauru, os depósitos coluvionares tendem a ser fracamente arenosos (areias finas e médias) e sob litologias basálticas predominantemente argilosas. Suas espessuras médias oscilam em torno de 8 metros, alcançando maiores valores no sopé das vertentes, onde podem alcançar mais de uma dezena metros, além de possuírem uma linha de seixos, às vezes limonitizadas e/ou constituídas por fragmento de canga que separam tais depósitos dos solos subjacentes.

De um modo geral os solos residuais são encontrados nos topos mais elevados e nas formas de relevo mais arrasadas, enquanto que os colúvios predominam sobre as encostas e rampas vizinhas às principais linhas de drenagem.

Na calha dos Rios Tietê e Paraná, os depósitos coluvionares avançam sobre os Terraços Superiores chegando a ocupar porções de calha dos rios, acumulando espessuras que chegam a atingir mais de uma dezena de metros.

6.1.2. Características gerais do relevo

Os principais tipos de relevo da região constam do Mapa Geomorfológico, apresentado em escala 1:250.000, elaborado a partir do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo) de 1981 (escala 1:1.000.000).

A caracterização do relevo permite fornecer elementos para planejamento regional, avaliação de facilidades/dificuldades de urbanização, reconhecimento pedológico, tipo de manejo agrícola, bem como a distribuição e a intensidade dos processos erosivos atuantes nos diferentes padrões morfológicos.

O mapa contém as principais formas de relevo da região individualizadas em unidades homogêneas, definidas, principalmente, em função da amplitude topográfica, declividade das encostas e densidade das linhas de drenagem. A bacia está inserida na Província Geomorfológica denominada de Planalto Ocidental.

- **Características gerais do relevo**

A Província do Planalto Ocidental é caracterizada pela presença de formas de relevo levemente onduladas com longas encostas e baixas declividades, representadas fundamentalmente, por Colinas Amplas e Colinas Médias. Os dois tipos de relevos estão sujeitos ao controle estrutural das camadas sub-horizontais dos arenitos do Grupo Bauru e das rochas efusivas básicas da formação Serra Geral. O sub-nivelamento do relevo mostra um caimento para oeste, em direção à calha do Rio Paraná, formando uma extensa plataforma estrutural suavizada, com cotas topográficas que oscilam próximo a 500 m. No âmbito da Bacia do Alto Tietê, os pontos mais altos da bacia, situados nos seus divisores limites, chegam a

alcançar mais de 560 m e na foz do Ribeirão do Moinho, próximo a Ilha Comprida, 264 m de altitude.

A região apresenta relação entre número de rios ou cursos d'água e a área ocupada pela bacia hidrográfica ou densidade de drenagem baixa, embora possam ser encontradas variações locais, de acordo com os tipos de sistemas de relevo presentes na província ou mesmo, dentro de cada um dos sistemas de relevo. É o caso das áreas de cabeceiras de drenagem que tendem a apresentar densidade de drenagem maior, podendo atingir padrões médios e altos, assim como as colinas amplas em áreas sedimentares registram densidades de drenagem maiores do que as desenvolvidas sobre as rochas basálticas.

Caracterizam a Província também, a baixa intensidade de dissecação ou denudação das formas de relevo, pelo efeito dos processos erosivos e a presença de vales pouco entalhados.

- Formas de Relevo

Tabela 3 – Principais características registradas

Formas de Relevo	Unidades Homogêneas	Principais características
1. Superfícies Aplainadas por Agradção	111 – Planícies Aluviais	Terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios, sujeitos a inundações periódicas. Ocorrem ao longo das calhas dos rios Tietê e Paraná. Pequenas porções não inundadas pelos reservatórios são encontradas a jusante de Jupia no Rio Paraná e em pequenos trechos do Rio Tietê.
	112 – Terraços Fluviais	Terrenos horizontais ou levemente inclinados, junto às margens dos rios, alçados de poucos metros em relação às várzeas, não inundáveis. Sua ocorrência está restrita à confluência do Rib. do Moinho no Rio Paraná.
2 – Relevo de Degradação ou de desgaste por erosão em Planaltos Dissecados. (Relevo colinoso com predomínio de baixas declividades, até 15% e amplitudes locais inferiores a 100 m)	212 – Colinas Amplas	Predominam interflúvios com área superior a 4 Km ² , topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixas densidades, padrão subdendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
	213 - Colinas Médias	Predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 Km ² , topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais inferiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

Fonte: Adaptado SIGRH (2000)

De acordo com a Tabela 3, tem-se que as formas de relevo suavizadas da Bacia do Baixo Tietê são representadas Planaltos Dissecados compostos por

Colinas Amplas (212) e Colinas Médias (213) e formas de agradação constituídas por Planícies Aluviais (111) e Terraços Fluviais (112).

As Colinas Amplas constituem formas de relevo sub-niveladas de grandes dimensões (predominam interflúvios com áreas acima de 4 km²), perfil de vertente retilíneo à convexo e topos aplainados. Destacam-se ainda pela presença de drenagem com padrão subdendrítico, densidade muito baixa, vales erosivos abertos e planícies aluviais interiores estreitas.

As Colinas Médias constituem formas de relevo também subniveladas, com topos aplainados e perfil de vertente retilíneo a convexo, porém, com interflúvios menores (áreas entre 1 e 4 km²) e densidade de drenagem relativamente maior (média à baixa).

As Colinas Médias ocupam uma porção de área um pouco menor, comparada com a distribuição das colinas amplas, sendo encontradas preferencialmente nos divisores de água limites do Baixo Tietê com as bacias vizinhas.

As Planícies Aluviais constituem os terrenos baixos sujeitos periodicamente à inundações e os Terraços Fluviais (112) compreendem os terrenos horizontais ou levemente inclinados, não inundáveis, alçados em relação às várzeas. Os dois sistemas de relevo são encontrados junto aos principais cursos d'água, destacando-se especialmente a Planície Fluvial do Rio Paraná pela sua dimensão e pela presença de feições deposicionais típicas de uma dinâmica fluvial intensa.

No Rio Paraná a Planície Aluvial inclui a planície de inundação e os baixos terraços elevados a poucos metros acima do nível do rio. A planície caracteriza-se pela ocorrência de extensos baixios, alagadiços, lagoas, canais abandonados,

diques marginais, barras e ilhas arenosas gerados num padrão típico de canais entrelaçados. A planície possui maior exposição à jusante da Usina de Jupia, especialmente na confluência do Ribeirão do Moinho (Iha comprida), onde chega a alcançar cerca mais de 1,5 km.

Os Terraços Fluviais do Paraná compreendem 3 patamares planos ou levemente inclinados, elevados acima do nível do rio (um Terraço Superior e dois níveis de Terraços Intermediários), mais desenvolvidos também na foz dos seus maiores afluentes.

6.1.3. Pedologia

As principais classes de solos existentes na região foram obtidas da Carta de Solos do Estado de São Paulo, em escala 1:500.000 elaborada pelo Ministério da Agricultura (1960). Dados complementares foram obtidos do Projeto Calha Tietê – Paraná do Consórcio Intermunicipal dos Rios Tietê – Paraná – CITP (Secretaria da Ciência Tecnologia e Desenvolvimento Econômico e Fundação Prefeito Faria Lima – CEPAM de 1994).

Solos com B Textural

Solos podzolizados de Lins e Marília – variedade Lins

Solos podzolizados de Lins e Marília – variedade Marília

Solos com B Latossólico

Latosol vermelho – escuro – fase arenosa

Latosol roxo

Tratam-se de solos que apresentam horizontes diagnósticos com as seguintes características:

Solos com Horizonte B Textural - horizonte mineral subsuperficial que possui incremento de argila, desde que não exclusivamente por descontinuidade litológica; ou seja, o conteúdo de argila do horizonte B textural é sempre superior ao do horizonte A e, pode ou não, ser maior do que o horizonte C. Os solos com horizonte B textural são bem drenados, sem influência de salinização. São solos que geralmente são subdivididos em sub-horizontes e as características morfológicas que mais contribuem para a diferenciação desses sub-horizontes são a estrutura, textura e cerosidade. A transição entre os sub-horizontes é gradual com presença de feições claras ou difusas.

Solos com Horizonte B Latossólico - horizonte mineral sub-superficial, que apresenta um estágio avançado de intemperismo, caracterizado pela quase total ausência de minerais facilmente intemperizáveis e/ou de minerais de argila 2:1 e pela concentração residual de sesquióxidos, argila do tipo 1:1, bem como minerais primários resistentes ao intemperismo. A textura deve ficar mais fina que areia franca e a razão silte/argila inferior a 0,7. Os solos com Horizonte B Latossólico possuem perfil A, B e C e a transição é normalmente difusa ou gradual, podendo ser clara ou abrupta na presença de um sub-horizonte.

A diferenciação entre o A e o B normalmente não é muito nítida, devido a presença de sub-horizontes A3 e B1. A transição entre o B e o C pode ser difusa, gradual ou clara.

- Solos podzolizados de Lins e Marília - variedade Lins

Esta unidade é constituída por solos com profundidades variáveis entre 2 e 3 metros, além de bem drenados, arenosos com transições graduais e claras, entre o horizonte A e B. São encontrados em relevos, em geral, ondulados a suavemente ondulados.

- Solos podzolizados de Lins e Marília – variedade Marília

Unidade formada por solos pouco mais rasos do que a variedade Lins e, de um modo geral, com a mesma seqüência de horizontes. A transição do A para o B é clara ou abrupta, ou seja, a passagem entre os horizontes (A e B) é mais acentuada do que o tipo Lins. Apresentam ainda forte tendência de formação de horizontes com partículas mais finas do solo.

- Latosol vermelho – escuro

Compreendem solos minerais não hidromórficos com horizonte B latossólico, diferenciando-se dos solos da classe Latossolo Vermelho-Amarelo por apresentarem teores mais elevados de Fe_2O_3 e conseqüentemente cores mais avermelhadas. São solos profundos, acentuadamente drenados, com pouca diferenciação entre os horizontes e textura predominantemente argilosa. Por apresentarem boas características físicas para o desenvolvimento de raízes e relevo satisfatório à mecanização, são limitados quase que exclusivamente pela baixa fertilidade natural e o seu aproveitamento racional requer adubações e calagens. São considerados de boa resistência à erosão do tipo superficial (laminar), em razão de suas propriedades intrínsecas.

- Latossolo roxo

Constituem os solos minerais acentuadamente drenados, profundos a muito profundos, com seqüência de horizontes A, B e C e presença de horizonte A geralmente moderado sobre um horizonte B do tipo latossólico. Apresenta ainda textura argilosa, cores vermelho-escuras e teores de óxido de ferro superiores a 18%.

Está relacionado à pequenas ocorrências de basaltos da formação Serra Geral que afloram nos vales dos principais cursos d'água (trecho do Rio Paraná e seus afluentes, além do Tietê, próximo à desembocadura).

6.1.4. Potencial Agrícola

Os solos na Bacia do Baixo Tietê constituem um recurso natural de importância estratégica, tanto do ponto de vista econômico como social e ambiental, além de serem responsáveis como suportes básicos para o processo de ocupação. A região constituiu uma das últimas fronteiras de expansão agropecuária do Estado de São Paulo tendo, atualmente como atividades mais significativas a pecuária de corte e a cana-de-açúcar, uma vez que a cafeicultura e o algodão perderam importância nos últimos anos. Estas duas últimas culturas exerceram grande influência nos processos de degradação dos solos em vastas áreas da região. Mesmo a pecuária, quando realizada com manejo inadequado de pastagens e dos animais, contribuiu para a formação de processos erosivos e assoreamento dos cursos d'água, embora a pecuária de corte, predominante na região, passou a ser considerada como uma alternativa para recuperação progressiva dos solos.

Em termos de potencialidade agrícola, as melhores terras são encontradas nos terraços intermediários que margeiam a planície do Rio Paraná e do Rio Tietê,

constituídas por solos Podzolizados de Lins e Marília, não representados na Planta Pedológica, tendo em vista a pequena área. Cabe destacar que, independente do tipo de solo, os terraços dos principais cursos d'água possuem características morfológicas favoráveis ao aproveitamento agrícola.

Seguem em importância os Latossolo Roxo, relacionados a pequenas ocorrências de basaltos da formação Serra Geral, também encontrados próximo a calha de cursos d'água. Constituem solos bastante férteis, com fraca propensão aos processos erosivos, além de serem encontrados em áreas de relevo levemente ondulado, apresentando, portanto, também, as melhores condições para o uso agrícola.

Os solos Podzólicos de Lins e Marília encontrados nas áreas de encostas de colinas possuem fertilidade natural média e boa potencialidade agro-pastoril. A sua maior limitação é a elevada suscetibilidade à erosão.

Os solos do tipo Latossolo vermelho-escuro, com maior área de ocorrência na bacia, apresentam baixa fertilidade natural e boa resistência à erosão laminar, além de baixa capacidade de retenção de umidade, sendo utilizados principalmente como pastagens e em culturas de cana-de-açúcar, café, citrus e milho.

Conclui-se, portanto, que na Bacia do Baixo Tietê são encontradas pequenas extensões de terra férteis favoráveis ao cultivo de lavouras de ciclo curto. A maior parte das terras possui limitações em relação à fertilidade e média suscetibilidade à erosão e os solos encontram-se atualmente em estágio avançado de degradação.

6.1.5. Hidrometeorologia

Pela sua posição geográfica, a UGRHI do Baixo Tietê encontra-se sob a influência das massas de ar Tropical Continental e Polar Antártica. A massa de ar Tropical Continental participa da circulação regional, principalmente no verão. É seca e quente, originária das planícies interiores do continente.

A massa de ar Polar Antártica, proveniente das altas latitudes, é fria e úmida. Embora ativa durante o ano todo, é no inverno que predomina, causando grandes quedas de temperatura.

O regime pluviométrico é tropical típico, com um período chuvoso, iniciando em outubro e findando em abril, e um período de estiagem, de maio a setembro, cujos totais anuais variam entre 1.000 mm e 1.300 mm.

O regime térmico apresenta características tropicais. O inverno, quando a atividade da massa de ar Polar é mais intensa, é geralmente úmido, com quedas de temperatura. Julho é o mês mais frio na UGRHI com temperaturas entre 14°C e 22°C nos períodos em que a atuação da massa Tropical Atlântica é mais intensa, o inverno é ameno com chuvas raras.

O verão, geralmente sob influência da massa Tropical Atlântica, é quente e úmido, com chuvas fortes. Os valores de temperatura média oscilam entre 24°C e 30°C, observando-se valores menores nas áreas mais elevadas.

6.2. Histórico e atividades na região

A década de 70 testemunhou a implantação de duas grandes Usinas Hidroelétricas na região, a saber, UHE Jupia e UHE Ilha solteira, ambas no Rio Paraná. Por ocasião do enchimento dos reservatórios, ocorreu uma perda de significativa parcela de terras agricultáveis e aí se deu o início da mudança da fisionomia agropecuária que até então caracterizava a região (VILLELA, 1992).

As décadas de 1970 e 1980 apresentaram uma grande capitalização no campo em virtude da política de incentivos agrícolas, aumentando a produtividade, principalmente, nas grandes fazendas de gado. Deste fato resultou, porém, um representativo êxodo rural que se reflete no decréscimo da população rural. Quanto à infra-estrutura de transportes, a região conta com Rodovias como a Washington Luís (SP – 310), que serve os municípios a partir das margens direita e esquerda do rio Tietê, respectivamente, e os integra às capitais dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do sul.

6.3. Descrição do empreendimento

A UHE de Três Irmãos localiza-se a oeste do Estado de São Paulo aproximadamente, a 28 km da foz do Rio Tietê no Rio Paraná, a 25 km da cidade de Pereira Barreto, que por sua vez fica a 630 km da Cidade de São Paulo. Na Tabela 4 tem-se algumas informações referentes ao empreendimento.

Tabela 4 – Informações do empreendimento de Três Irmãos

Condições de montante	
Área da bacia hidrográfica	69.900 km ²
Área do espelho d'água (N.A. 328,40 m)	785 km ²
Volume morto	10.000 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	3.450 x 10 ⁶ m ³
Volume reservado para cheia de projeto	350 x 10 ⁶ m ³
Barragem de concreto e de terra	
Tipo	Gravidade
Comprimento no coroamento	3.640,00 m
Níveis característicos de montante	
Vazão média a longo termo (MLT período 1931 - 1998)	757 m ³ /s
Vazão máxima média diária observada (05/06/83)	6.575 m ³ /s
Condições de jusante	
Vazão máxima dos descarregadores (N.A. 328,00 m)	9.500 m ³ /s
Vazão turbinada nominal total (5 máquinas)	2.040 m ³ /s
Unidades geradoras - turbinas	
Tipo	Francis
Turbinas	5
Potência nominal unitária	165.400 kW
Queda de referência	42,00 m
Engolimento máximo	449 m ³ /s
Unidades geradoras - geradores	
Tipo	ABB/Siemens/Alstom
Potência nominal	161.500 kW
Potência nominal total instalada	807.500 kW

Fonte: CESP (2008)

A UHE de Três Irmãos, construída pela construtora Andrade Gutierrez, tem capacidade para operar com oito turbinas, totalizando uma potência instalada de 1292 MW, o suficiente para atender à demanda energética de uma cidade de 1,5 milhões de habitantes. Porém, atualmente possui cinco conjuntos geradores em operação, gerando assim 807,50 MW.

A usina tem um sistema de duas eclusas, cada uma com 142 m de comprimento, 12,10 m de largura e 24 m de altura. Com a sua conclusão permitiu o início da operação do tramo norte da hidrovia Tietê-Paraná.

O reservatório de Três Irmãos apresenta ainda uma característica: seu reservatório é interligado ao reservatório de Ilha Solteira, através de um canal artificial denominado “canal de Pereira Barreto”. Este, juntamente com a eclusa, expandiu o transporte fluvial de 345 km para 1300 km na região.

6.4. Tratamento dos dados batimétricos e vetorizados

6.4.1. Vetorização das cartas

Para determinar as variáveis L e S da EUPS, que estão relacionadas à topografia do terreno, é necessária a utilização de mapas de curva de nível da região de estudo. Porém, para a utilização destes converteu-se as curvas da imagem, obtida via scanner, em curvas que podem ser trabalhadas e manipuladas independente uma das outras.

Para a comparação com o levantamento batimétrico, as cartas do IBGE foram digitalizadas e colocadas em escala adequada, uma vez que esse material se encontrava em papel impresso. Na Figura 10, temos a ilustração das curvas de nível digitalizadas no AutoCAD e importadas para dentro do Idrisi. Carta Pereira Barreto.

Figura 10. Curvas de níveis da carta de Pereira Barreto - SF-22-C-IV-2

6.4.2. Dados provenientes do levantamento batimétrico

Os dados obtidos em campo possuem coordenadas X, Y e Z. Assim, foi possível gerar um arquivo com informações pontuais, que possui os valores de coordenadas geográficas e altitude, onde Z é o valor altitude da superfície do fundo do reservatório em relação ao nível do mar, obtido através da medida de profundidade realizada com o ecobatímetro. A distribuição dos pontos levantados na batimetria é apresentada na Figura 11.

Transectos da batimetria

Figura 11. Traçado do percurso no levantamento batimétrico

Na imagem é possível observar o percurso realizado pelo barco (linhas em branco) no processo de coleta de dados no reservatório.

6.4.3. Geração do modelo digital do terreno

Tanto para as curvas de nível das cartas topográficas, quanto para os dados dos pontos obtidos na batimetria, foi gerado um vetor de grade triangular. A partir dessa grade foi criada outra, também de grade retangular, através de interpolação. Esta nova grade é o modelo digital do terreno, na forma matricial, pois possui em cada pixel o valor de altitude que foi interpolado através dos vetores da grade triangular. Deste modo, as informações provenientes de um vetor de grade triangular, que também é um MDT na forma vetorial, podem ser computadas juntamente com outras informações do tipo matricial. São apresentados nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente a grade triangular isolada e o modelo gerado em detalhe com a grade sobreposta (trecho próximo à barragem).

Figura 12. Grade TIN gerado com os dados da batimetria

Interpolação da batimetria e o vetor TIN - Em detalhe

Figura 13. Detalhe da interpolação com vetor TIN sobreposto matriz raster

O modelo digital do terreno obtido a partir dos dados da batimetria é apresentado na Figura 14. Para o caso das cartas topográficas, aplicou-se também o método de interpolação utilizado para a batimetria, porém tendo como base um arquivo vetorial do tipo linha. O resultado pode ser visualizado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 14. MDT com os dados da batimetria do reservatório.

Figura 15. Modelo digital do terreno da área de estudo

6.4.4. Comparação batimétrica

De posse dos modelos digitais obtidos através das cartas topográficas e dados da batimetria do reservatório, realizada no ano de 2008, foram realizadas determinadas operações, como a diferença entre os MDTs. Esta última permitiu identificar as áreas que sofreram alteração, bem como a intensidade dessa alteração. A imagem obtida pode ser observada na Figura 16:

Figura 16. MDT – diferença da comparação batimétrica

Separando as áreas assoreadas das áreas erodidas, obteve-se os mapas apresentados nas Figura 17 e Figura 18 (Em detalhe):

Figura 17. MDT das áreas assoreadas (Em detalhe)

O mapa da Figura 17 representa somente a altura dos depósitos de assoreamento. Nele podemos visualizar os pontos nas proximidades dos deltas dos afluentes do reservatório, onde o processo de deposição de partículas maiores de sedimento é mais intenso.

Figura 18. MDT das áreas erodidas (Em detalhe)

No mapa da Figura 18, tem-se a profundidade da erosão dentro do reservatório. Observa-se que os pontos mais críticos se localizam próximo às margens, devido à ação das ondas que se formam dentro do reservatório, que desagregam materiais das margens, que praticamente se encontra intensamente ocupada por áreas cultivadas em toda a sua extensão.

Com base nos locais com acúmulo e perda de material, foi possível estimar o volume de sedimento acumulado e de solo erodido dentro do reservatório, isso considerando que cada pixel com informação representa uma área de 30 x 30 metros na realidade do terreno. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos

	Volume (em Milhões de m³)	Área (Km²)
	Cota - 326 m	
Assoreamento	1.508,69	276,37
Erosão	438,57	126,50
Área sem alteração significativa	*****	33,94
Material acumulado no reservatório	1.070,12	*****
Reservatório	15.885,12 (cartas do IBGE)	436,81

Utilizou-se a cota 326 por esta ser a cota da qual garantidamente, o reservatório se encontrava nas datas em que foram realizados os trabalhos de coleta de dados em campo.

A área sem alteração corresponde aos trechos onde não foi possível detectar os efeitos dos processos em estudo, devido ao baixo nível de detalhamento das cartas do IBGE. Desta forma na diferença entre os MDTs, algumas áreas, apresentaram um valor próximo de zero. O volume do reservatório foi estimado através do MDT gerado com as cartas topográficas do IBGE.

6.4.5. Análise da curva cota x área x volume

O processo de acúmulo de sedimentos dentro do reservatório pode ser observado também através da curva cota x área x volume. Obtiveram-se as informações para o levantamento da curva com os dados provenientes dos modelos digitais, através da batimetria e das cartas topográficas do IBGE. Estes se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de área e volume para cada cota

Cota (m)	Levantamento IBGE 1971		Batimetria 2008	
	Área (km ²)	Volume (x 10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (x 10 ⁶ m ³)
270,1	0,0873	4,8888	0	0
271,1	0,1467	8,18154	0	0
272,1	0,2115	11,71179	0	0
273,1	0,2889	15,84918	0	0
274,1	0,3744	20,33208	0	0
275,1	0,4581	24,6384	0	0
276,1	0,5634	29,95002	0	0
277,1	0,675	35,46171	0,0009	0,04419
278,1	0,7803	40,55751	0,0315	1,52415
279,1	0,8919	45,85113	0,0882	4,21353
280,1	5,2047	244,28241	0,1611	7,59933
281,1	7,7067	357,99399	0,2376	11,07504
282,1	10,3293	474,55749	0,3285	15,11019
283,1	12,9735	589,43241	0,5877	26,37369
284,1	15,7212	706,06944	0,8577	37,83555
285,1	18,5571	823,60998	1,3356	57,66093
286,1	21,4749	941,63427	1,9314	81,73395
287,1	24,4755	1060,00758	3,0177	124,53129
288,1	27,5751	1179,1737	4,6098	185,66712
289,1	30,7341	1297,46097	7,3665	288,78651
290,1	73,2051	2827,85931	10,755	412,23105
291,1	79,4898	3050,64783	14,9814	561,99384
292,1	85,7736	3267,13734	22,1814	809,595
293,1	92,0448	3476,89755	33,4269	1185,54174
294,1	98,3223	3680,59608	48,492	1673,93943
295,1	104,5197	3875,48865	67,6323	2275,44867
296,1	110,7504	4065,21099	86,2353	2842,27731
297,1	116,9388	4247,44317	99,2025	3224,70027
298,1	123,0984	4422,67155	108,9315	3501,60543
299,1	129,2517	4591,57671	118,1331	3754,22193
300,1	181,4742	5952,12552	127,5813	4004,18586
301,1	193,4685	6257,4003	138,1275	4272,32916
302,1	205,3665	6548,30055	157,0761	4735,23903
303,1	217,1457	6824,53782	177,7455	5219,18082
304,1	228,7287	7084,57446	198,8271	5693,40801
305,1	240,2802	7332,38928	213,9336	6017,66784
306,1	251,6544	7564,99347	226,5183	6275,07747
307,1	262,9692	7785,07677	239,1192	6520,13289
308,1	274,1094	7990,59303	252,8064	6772,56318
309,1	285,0948	8182,29231	266,58	7012,89459
310,1	336,3336	9007,04133	280,962	7249,40001
311,1	348,8733	9200,7954	296,2647	7485,73488

312,1	361,4139	9381,98376	312,5376	7720,73658
313,1	373,7781	9548,2719	330,7896	7966,14885
314,1	386,0235	9700,71921	350,1045	8206,57449
315,1	398,2743	9841,02129	370,7253	8442,6039
316,1	410,3109	9966,78117	391,5639	8660,39382
317,1	422,3538	10080,58617	414,567	8877,40983
318,1	434,2626	10181,22426	439,5897	9088,52634
319,1	446,0256	10268,85006	467,8407	9298,76922
320,1	519,9039	10717,40439	499,6989	9504,60597
321,1	539,4096	10823,74947	532,9746	9685,21698
322,1	558,8091	10910,10006	559,1682	9802,70325
323,1	577,8612	10975,84695	580,1265	9875,1951
324,1	596,7486	11022,15078	598,6971	9921,16188
325,1	615,3273	11049,1398	612,864	9941,93793
325,9	630,0918	11057,31207	622,6668	9947,39067

A coluna das áreas e volumes revela valores acumulados para cada valor de cota. Assim, a cota próxima de 326 m representa os valores de área alagada e o volume de armazenamento.

Os valores de volume e área observados para as primeiras cotas na batimetria de 2008, são iguais a 0 (zero), isso se deve a fato de que o reservatório já se encontra totalmente assoreado na altura dessas cotas. Estes locais se encontram totalmente ocupados por sedimentos, que foram acumulados durante o período de operação do reservatório.

Assim obteve-se as seguintes curvas cota x área x volume para a Figura 19 e Figura 25.

Curva cota x área x volume - 1971

Figura 19. Curva cota x área x volume (1971)

A Figura 19 ilustra as curvas cota x área x volume para o ano de 1971. Para as cotas 280, 290, 300, 310 e 320, ocorre um efeito “degrau”, isso se deve aos dados serem provenientes da digitalização das cartas topográficas do IBGE e exatamente nestas é que se têm os valores das curvas altimétricas representadas no mapa. Assim há o favorecimento da contabilização pixels para esses valores, devido ao fato dos dados de entradas serem isolinhas representando uma única altitude, assim no processo de geração do MDT, os pixels que possuíam coordenadas geográficas por onde estas passam, assumiram o exato valor da altitude representada pela cota da curva, assim não havendo interpolação para estes pontos, fazendo surgir uma grande quantidade de pixel nas faixas próximas a estas cotas.

Figura 20. Curva cota x área x volume (2008)

Na Figura 20 temos as curvas cota x área x volume para o ano de 2008. Nota-se que o comportamento destas é bem diferente das curvas para o ano de 1971. Isso ocorre por que a forma de coleta de dados da batimetria permite uma melhor amostragem no espaço, aumentando assim o nível de detalhamento da área estudada. E estes dados obtidos são pontuais e indicam, através de sua seqüência, a trajetória do barco. Os valores obtidos no decorrer deste caminho apresenta diferenças entre si, devido às diferentes profundidades, reduzindo assim áreas homogêneas, como ocorreu nas curvas para o ano de 1971.

A Figura 21 e Figura 22 ilustra a comparação entre o comportamento das áreas em relação às cotas, para ambas as datas analisadas.

Figura 21. Comparação da curva das áreas para 1971 e 2008

Figura 22. Linha de tendência para as curvas das áreas

A Figura 23 e Figura 24 ilustra a comparação entre as curvas cota x volume para as duas datas estudadas. É possível observar claramente nesses gráficos comparativos que a curva que representa o ano de 1971, possui maiores valores de volume ocupado pela água para uma mesma cota quando comparada com o ano de 2008. Isso se deve ao fato de que nessas cotas o processo de assoreamento tornou notável essa diferença, pois a área no fundo do reservatório, que antes podia ser ocupada por água, agora está ocupada por sedimentos.

Figura 23. Comparação da curva dos volumes para 1971 e 2008.

Figura 24. Linha de tendência para as curvas dos volumes.

Observa-se também na Figura 23, que os valores menores que 285 metros apresentam volumes bem pequenos, próximos de zero. Isso se deve ao fato de que para as cotas abaixo desses valores, se encontra praticamente depósitos de sedimentos. O mesmo ocorre para Figura 23, onde a área alagada tende a zero, devido ao assoreamento.

6.4.6. Delimitação da microbacia de estudo

No estudo da perda de solo optou-se por escolher uma microbacia contribuinte do reservatório. Esta foi delimitada com base nas curvas de nível das cartas topográficas que foram digitalizadas. O critério adotado para a escolha levou em consideração o comprimento da linha de drenagem principal, bem como o potencial natural de ocorrência de processos erosivos, presente no mapa do relatório zero da Bacia do Baixo Tietê.

Esta sub-bacia tem o código nº 132 no mapa e corresponde à sub-bacia do Ribeirão Travessa Grande. De acordo com o mapa, essa sub-bacia se encontra praticamente em sua totalidade em uma área classificada como uma área extremamente suscetível ao desenvolvimento de erosão laminar, sulcos, ravinas e voçorocas (de drenagem e de encosta), delimitando aproximadamente 206 km² de área de drenagem. Esta pode ser observada na Figura 25 e localizada na área do reservatório de Três Irmãos na Figura 26.

Figura 25. Limite da microbacia de estudo

Localização da microbacia no reservatório

Figura 26. Localização da microbacia no reservatório

6.5. Determinação do fator topográfico LS

Com base na carta topográfica e na delimitação da área de estudo, aplicou-se a equação do fator topográfico LS. Este foi levantando obtendo-se primeiramente o mapa da declividade, e com base neste e com a resolução espacial trabalhada (30 metros), foi possível determinar o comprimento da rampa para cada pixel.

Com base neste valor, calculou-se para cada pixel o valor do fator LS com base na equação 5. Assim, tem-se respectivamente o mapa de declividade e o mapa de fator L.S., apresentados nas Figura 27 e Figura 28.

Figura 27. Mapa de declividade

Figura 28. Mapa da distribuição do fator LS

6.6. Tratamento dos dados de chuva

Nem sempre os postos mais próximos possuíam uma boa correspondência com o posto que se esperava preencher falhas. Assim, foi gerada uma matriz de correlação que permitisse escolher os postos que possuíam um maior valor de correlação com o posto que possuíam falhas. Utilizando os valores destes postos, pode-se chegar a um valor mais confiável da estimativa do dado falho.

Obteve-se as seguintes tabelas que representam a matriz de correlação entre os postos para antes e depois do processo de preenchimento de falhas, Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7 – Matriz de correlação dos dados sem preenchimento de falhas

Postos com falhas	Postos utilizados											
	2050016	2051004	2051007	2051012	2051032	2051033	2051035	2150006	2151002	2151003	2151048	2151053
2050016	1,00	0,85	0,88	0,82	0,84	0,85	0,81	0,83	0,79	0,81	0,74	0,82
2051004	0,85	1,00	0,88	0,85	0,83	0,81	0,83	0,80	0,82	0,81	0,76	0,84
2051007	0,88	0,88	1,00	0,84	0,87	0,85	0,83	0,81	0,82	0,82	0,77	0,86
2051012	0,82	0,85	0,84	1,00	0,86	0,82	0,84	0,81	0,87	0,85	0,77	0,89
2051032	0,84	0,83	0,87	0,86	1,00	0,89	0,85	0,85	0,88	0,85	0,80	0,91
2051033	0,85	0,81	0,85	0,82	0,89	1,00	0,79	0,82	0,82	0,83	0,76	0,85
2051035	0,81	0,83	0,83	0,84	0,85	0,79	1,00	0,80	0,84	0,85	0,78	0,85
2150006	0,83	0,80	0,81	0,81	0,85	0,82	0,80	1,00	0,85	0,81	0,75	0,86
2151002	0,79	0,82	0,82	0,87	0,88	0,82	0,84	0,85	1,00	0,84	0,78	0,92
2151003	0,81	0,81	0,82	0,85	0,85	0,83	0,85	0,81	0,84	1,00	0,85	0,86
2151048	0,74	0,76	0,77	0,77	0,80	0,76	0,78	0,75	0,78	0,85	1,00	0,77
2151053	0,82	0,84	0,86	0,89	0,91	0,85	0,85	0,86	0,92	0,86	0,77	1,00

Tabela 8 – Matriz de correlação com as falhas preenchidas

Postos com falhas	Postos utilizados											
	2050016	2051004	2051007	2051012	2051032	2051033	2051035	2150006	2151002	2151003	2151048	2151053
2050016	1,00	0,87	0,88	0,83	0,85	0,86	0,82	0,86	0,82	0,83	0,78	0,85
2051004	0,87	1,00	0,89	0,87	0,85	0,83	0,84	0,84	0,85	0,84	0,77	0,87
2051007	0,88	0,89	1,00	0,84	0,86	0,87	0,83	0,83	0,85	0,84	0,78	0,87
2051012	0,83	0,87	0,84	1,00	0,86	0,83	0,85	0,84	0,88	0,87	0,77	0,89
2051032	0,85	0,85	0,86	0,86	1,00	0,91	0,85	0,87	0,88	0,84	0,80	0,93
2051033	0,86	0,83	0,87	0,83	0,91	1,00	0,81	0,84	0,85	0,84	0,78	0,88
2051035	0,82	0,84	0,83	0,85	0,85	0,81	1,00	0,82	0,84	0,87	0,77	0,85
2150006	0,86	0,84	0,83	0,84	0,87	0,84	0,82	1,00	0,87	0,84	0,78	0,89
2151002	0,82	0,85	0,85	0,88	0,88	0,85	0,84	0,87	1,00	0,85	0,81	0,93
2151003	0,83	0,84	0,84	0,87	0,84	0,84	0,87	0,84	0,85	1,00	0,83	0,87
2151048	0,78	0,77	0,78	0,77	0,80	0,78	0,77	0,78	0,81	0,83	1,00	0,79
2151053	0,85	0,87	0,87	0,89	0,93	0,88	0,85	0,89	0,93	0,87	0,79	1,00

Pode se observar o aumento na maioria dos valores de correspondência, isso ocorre pelo fato da inserção dos valores corrigidos com base em outros postos, pois estes são componentes de outros valores, o que logicamente ocasiona uma maior correspondência entre os dados preenchidos e os dados dos postos utilizados no cálculo. Este processo foi aplicado em postos que não possuíam alguns dados de chuva mensal, em determinados anos, isso no período de 1982 até 1998.

Os postos com o código escrito em vermelho indicam os que possuem falhas, e as células preenchidas de amarelo indicam a correspondência do posto que foi utilizado no cálculo para o preenchimento das falhas. Para cada linha de um posto com falha há três células preenchidas de amarelo com os três maiores valores de correspondência.

As informações desses postos foram obtidas junto ao site da HIDROWEB (2008), que pertence à ANA. Estas foram suficiente para a análise das chuvas, visto que abrange toda microbacia de estudo e possuem dados referentes à 17 anos de chuva (1982-1998).

Para exemplificar o processo no preenchimento de falha, tem-se os dados do posto 2151002 para o mês de fevereiro do ano de 1988, sabendo que o valor média da chuva no mês de fevereiro, no período de 1982 à 1998 foi de 163,23 mm.

Os seguintes postos são próximos do posto com a falha:

2150006

$X_1 =$ Chuva no mês de fevereiro de 1988: 278,7 mm

$\overline{X_1} =$ Média dos meses de fevereiro no período 1982-1998: 169,35 mm

Distâncias até o posto 02151002: 22,7 km

Localização: 7712904 N, 489637 E

2151053

X_2 = Chuva no mês de fevereiro de 1988: 234,8 mm

$\overline{X_2}$ = Média dos meses de fevereiro no período 1982-1998: 190,97 mm

Distâncias até o posto 02151002: 10,6 km

Localização: 7786680 N, 489592 E

2051012

X_3 = Chuva no mês de fevereiro de 1988: 288,7 mm

$\overline{X_3}$ = Média dos meses de fevereiro no período 1982-1998: 157,18 mm

Distâncias até o posto 02151002: 14,8 km

Localização: 7687040 N, 461923 E

Assim aplicando a Equação 6 tem-se:

$$Y = \frac{1}{3} \times \left(\frac{278,7}{169,35} + \frac{234,8}{190,97} + \frac{288,7}{157,18} \right) \times 163,23$$

$$Y = 256,48 \text{ mm}$$

Na Tabela 9 têm-se os meses de cada ano dos postos que apresentaram falhar e o respectivo valor preenchido.

Tabela 9 – Datas das falhas

Estações	Falhas preenchidas (Mês/Ano – Chuva em mm)	
2050016	8/91 – 14,3244	
2051004	1/89 – 350,7658 2/89 – 255,1663	3/89 – 103,9780
2051012	2/82 – 104,6499 3/82 – 352,3584 11/82 – 154,3639 6/83 – 27,0878 4/84 – 107,9646	5/84 – 38,5928 6/84 – 0,1960 7/84 – 19,2568 8/84 – 47,8787 9/84 – 54,37306
2051032	5/89 – 61,2878	8/91 – 0,2201
2051033	9/91 – 28,1849	
2150006	4/98 – 185,972 5/98 – 45,4236	6/98 – 2,6294 7/98 – 1,2223
2151002	8/91 – 0,2158 2/88 – 265,8606	3/98 – 141,765
2151048	4/82 – 29,5318 5/85 – 33,4042 12/85 – 51,6719 3/94 – 119,2779 5/94 – 37,1608 6/94 – 24,47039 9/94 – 16,7053 10/94 – 96,5922 11/94 – 112,1068 2/95 – 352,747	5/96 – 31,6012 6/96 – 33,1059 7/96 – 4,7145 8/96 – 26,1880 9/96 – 93,23105 7/98 – 0,9687 8/98 – 68,1542 9/98 – 127,7493 10/98 – 215,2167 11/98 – 43,8706 12/98 – 223,1184

Após o preenchimento das falhas obteve-se o valor de altura média de chuva para cada posto no período considerado, que é apresentado na Tabela 10 e ilustrado no gráfico da Figura 29.

Foi utilizado o intervalo de 1982 até 1998, devido ao fato de que este foi o intervalo em comum que os postos analisados estiveram ativos. Existem postos que não estavam em operação antes de 1982, e outros que deixaram de funcionar após o ano de 1998. Assim temos:

Tabela 10 – Média anual da chuva para cada posto

Código do posto	Altura média anual (mm) Período 1982-1998
2050016	1321,754
2051004	1250,089
2051007	1229,241
2051012	1257,784
2051032	1186,918
2051033	1254,493
2051035	1234,624
2150006	1267,285
2151002	1258,473
2151003	1246,688
2151048	1281,650
2151053	1358,024

Médias anuais de chuva em cada posto

Figura 29. Médias Anuais de chuva para cada posto

Assim, como citado anteriormente, o fator erosividade quantifica a capacidade da chuva em provocar erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990), e aplicando a equação da erosividade para o posto 2151002:

Dados do posto na Tabela 11 se referem a valores médios, para cada mês, no período estudado e é ilustrado no gráfico da Figura 30.

Tabela 11 – Média de chuva de cada mês no período avaliado

Mês	Média do mês (mm) Período 1982-1998
Jan	220,200
Fev	169,268
Mar	145,610
Abr	88,224
Mai	62,876
Jun	32,182
Jul	18,318
Ago	26,777
Set	69,035
Out	114,712
Nov	121,565
Dez	189,706
Média total anual	1258,473

Figura 30. Média mensal no período 1982 – 1998 (posto 2151002)

Aplicando a Equação 3 da erosividade anual:

$$R = \sum EI = \sum \left\{ 89,823 \cdot \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \right\}$$

Em que:

R = erosividade anual da área ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$)

EI = índice médio de erosividade mensal no mês x ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$)

r = precipitação total média no mês x (mm)

P = precipitação total média anual (mm)

Na tabela 12 estão relacionados os resultados da aplicação da Equação 3 e estes estão ilustrados no gráfico da Figura 31, com os valores de erosividade média mensal para o posto 2151002, e a erosividade anual média:

Tabela 12 – Erosividade média de cada mês no período estudado

Mês	Erosividade média mensal Período 1982-1998 (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹)
Jan	23,922
Fev	19,593
Mar	17,477
Abr	11,948
Mai	9,240
Jun	5,558
Jul	3,623
Ago	4,834
Set	9,919
Out	14,583
Nov	15,240
Dez	21,363
Erosividade Total média anual	157,300

Figura 31. Erosividade média mensal – Período 1982-1998 (Posto 2151002)

Aplicando o mesmo procedimento para os demais postos obteve-se a

Tabela 13 e o gráfico da Figura 32:

Tabela 13 – Erosividade da chuva para cada posto

Código do posto	Erosividade Total média anual (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹)
2050016	157,0372
2051004	157,2419
2051007	158,0396
2051012	157,6514
2051032	157,4841
2051033	158,0504
2051035	157,1479
2150006	157,1893
2151002	157,2998
2151003	157,2211
2151048	158,2128
2151053	157,4901

Figura 32. Erosividade anual média no período 1982-1998

Com base nestes valores de erosividade e com a posição de casa posto, interpolou-se o valor de erosividade para o restante da área de estudo. Desta forma, obteve-se o mapa da espacialização das informações: interpolação através do método TIN (Figura 33).

Interpolação da erosividade na área de estudo

Figura 33. Distribuição das chuvas pelo método TIN

Nos processos com o TIN, a medida de cada posto é interpolada com outro posto para a estimativa da distribuição espacial da chuva. Assim, a distribuição desta informação, no espaço estudado, é totalmente influenciada pela leitura de

cada posto, visto isso para uma análise temporal, na qual os valores que foram medidos em cada posto se alteram no tempo.

6.7. Mapa pedológico da área de estudo

O mapa da UGRHI – 19 foi obtido através de SIGRH (2000). Encontrou-se foi encontrado no local de estudo, basicamente, dois tipos de solos: Latossolo Vermelho Escuro (Lea) e solos Podolizados de Lins e Marília, variedade Lins (Pln).

Com base no mapa pedológico e isolando a área de estudo, obteve-se o mapa ilustrado na Figura 34:

Figura 34. Mapa pedológico da área de estudo. Fonte: SIGRH 2000 (Adaptado)

O tema referente à água, na Figura 34, é o reservatório de Três Irmãos, formado pelas águas do rio Tietê.

Com base nos tipos de solos, foi pesquisado na literatura valores para o fator K da equação universal da perda de solos, para cada solo do mapa. Segundo Baptista (1997 Apud PEDRO; LORANDI, 2004), tem-se que o valor do fator de erosividade, para o Latossolo vermelho escuro fase arenosa, é de $0,013 \text{ (t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}\text{)}$.

Os solos podlizados de Lins e Marília, horizonte B, foram determinados com base em valores médios (BERTONI; LOMBARD, 1990). O valor médio para o fator K, no Estado de São Paulo, $0,0235 \text{ (t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}\text{)}$.

O valor para a área do reservatório é igual a zero. Portanto, se obteve o mapa da Figura 35 com os valores de K (Erodibilidade do solo) para a área de estudo.

Figura 35. Distribuição dos valores de erosividade na área de estudo

6.8. Tratamento das imagens de satélites

Para este trabalho utilizou-se os mapas como referência no processo de georreferenciamento das imagens de satélite. Nas cartas topográficas do IBGE possuem o sistema de projeção UTM e o Datum é o Córrego Alegre para Fuso 22 sul.

As Figura 36 e Figura 37 ilustram a composição colorida RGB (Red, Green and Blue), respectivamente com as bandas 5,4 e 3 do LANDSAT 5, para os anos de

1990 e de 2007. Com base nessas bandas é que foi levantando as variáveis relacionadas ao uso e ocupação do solo. Através dessa análise visual, pode-se ter uma idéia da dinâmica da evolução do uso e ocupação do solo na região.

Na Figura 36, tem-se a área do reservatório antes do enchimento e funcionamento da usina.

Figura 36. Imagem do LANDSAT 5 da área de estudo (Ano 1990). Fonte: INPE

Na Figura 37, tem-se o reservatório já preenchido, após 17 anos de funcionamento.

Figura 37. Imagem do LANDSAT 5 da área de estudo (Ano 2007). Fonte: INPE

Estas imagens são referentes à junção de imagens de duas órbitas-ponto do satélite LANDSAT 5, sendo essas orbitas - ponto: 159-122 e 159-123.

6.8.1. Classificação supervisionada

Com a área de estudo previamente delimitada, restringiu-se o estudo para essa região. Desta forma procedeu-se com a classificação da superfície para a obtenção das áreas de uso e ocupação do solo. Assim, foram classificadas as imagens para as seguintes datas na Tabela 14:

Tabela 14 – Datas das imagens da área de estudo

Nº da imagem	Data
1	06/08/1990
2	27/04/1991
3	24/06/1992
4	10/05/1993
5	27/04/1994
6	14/04/1995
7	21/07/1996
8	09/08/1997
9	06/09/1998
10	14/07/1999
11	14/06/2000
12	01/06/2001
13	14/07/2003
14	27/07/2004
15	14/07/2005
16	17/07/2006
17	21/08/2007
18	23/08/2008

Com as imagens classificadas foi possível separar a ocupação do solo em quatro temas bem distintos, sendo estes:

- Mata conservada
- Área cultivada
- Vegetação rasteira e solo exposto
- Corpos d'água

Desta forma, para cada data da tabela 14 obteve-se uma classificação.

Na Figura 38, Figura 39 e Figura 40, tem-se os resultados obtidos com a classificação supervisionada das áreas.

Uso e Ocupação do solo - 1990

Figura 38. Área de estudo antes do enchimento do reservatório

Uso e Ocupação do solo - 1991

Figura 39. Área de estudo ano logo após enchimento do reservatório

Uso e Ocupação do solo - 2008

Figura 40. Área de estudo no ano de 2008

Com os valores das áreas de cada tema obteve-se o gráfico da Figura 41.

Figura 41. Área de cada tema para cada data tratada

Na Figura 41 é possível observar o comportamento de cada tema na escala de tempo. O tema corpos d'água permanece com a área sofrendo praticamente nenhuma variação, exceto pelo ano de 1990.

A variação do comportamento espectral da mata conservada se deve a influência do teor de umidade próximo às margens do reservatório dentro do trecho estudado, bem como das variações do processo estatístico de classificação.

Já as variações que ocorrem nos temas 'área cultivada' e 'vegetação rasteira e solo exposto', se deve ao fato ao uso agrícola do solo no decorrer do ano, também influenciado pelos anos que tem mais disponibilidade hídrica no solo.

A distinção entre vegetação rasteira e solo exposto foi dificultada em praticamente todos os tratamentos, ambos apresentaram um comportamento espectral semelhante.

6.8.2. Fator CP da equação universal da perda de solos.

Para o cálculo da perda de solo para esta área, foi adotado o critério da união dos fatores C e P, sendo que ambos estão relacionados de forma única com as características da cobertura do solo.

Assim de acordo com a Tabela 15, tem-se a categoria de ocupação das terras utilizadas na área de estudo e valores correspondentes de CP para a região de Brotas, Estado de São Paulo, dados usados como uma aproximação do CP, para uso e ocupação semelhante do solo:

Tabela 15 – Valores correspondentes de CP para a região de Brotas - SP.

	Porte da vegetação	CP Atual
1	Mata conservada	0,0158
2	Área cultivada	0,05
3	Vegetação rasteira e solo exposto	1
4	Água	0,0000

Fonte: Adaptado STEIN (1997).

O valor para solo exposto e vegetação rasteira, foi adotado para a pior situação, tendo um CP com valor 1.

Assim com base na Tabela 15 foram aplicados estes para a área de estudos. Assim obteve-se o mapa das médias do fator CP do período de 1991 até o ano de 2008, que está ilustrado na Figura 42.

Foi considerado somente o intervalo a partir do ano de 1991, devido ao fato de que em 1990 ainda não havia formado o reservatório de Três Irmãos. Assim para as áreas com tendência a tons mais avermelhados, houve uma utilização mais degradativa do solo, considerado no período de análise.

Média dos valores do fator CP (1991 - 2008)

Figura 42. Médias dos valores o fator CP (1991-2008)

6.9. Cálculo da perda de solo na microbacia de estudo

Cada mapa gerado representa a distribuição de um fator da EUPS no espaço. Assim é possível estimar a perda distribuída dentro da bacia de estudo. Aplicando a equação nos mapas obtidos, tem-se o mapa das perdas ilustradas na Figura 43.

A Figura 43 ilustra a distribuição das taxas de perda de solo dentro da área de estudo. Esta é medida de forma pontual em cada pixel. Para a determinação da taxa média total dentro da área de estudo, foi necessário determinar a perda total na bacia e assim dividir este valor pela área da microbacia, para obter a taxa média total de perda de solo para a área representada da bacia.

Figura 43. Distribuição da Perda de solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

A informação representada em cada pixel, informa a massa de solo perdida em toneladas no período de um ano em uma área padrão de 1 Hectare (10000 m²). Porém tem-se que cada pixel representa uma área de 900 m². Assim calculou-se o valor da perda de solo em t. ano⁻¹ em cada pixel com base no valor da área representada por pixel. Desta forma somando todas as perdas de cada pixel obteve-se o valor da perda de solo dentro da bacia de estudo em toneladas por ano. Esse valor dividido pela área da bacia (em hectares), fornece a taxa que representa a perda média de solo para toda a micro-bacia estudada. Assim tem-se o seguinte valor:

Área total não inundada: 19440,5 Hectares

Perda de solo total na microbacia (t. h⁻¹): 3772,19 ton.

Desta forma o valor da taxa média de perda de solo para toda a micro-bacia é de 0,194 (t .ha⁻¹. ano⁻¹).

Essa mesma metodologia foi utilizada para estimar o valor da perda de solo no município de Santa Rita do Sapucaí – MG. A micro bacia de estudo era relativamente menor, porém com grandes declives dentro da área de drenagem (COSTA; DUPAS; MAUAD, 2007).

Aplicando a equação 2 do potencial natural de erosão, obtém-se o mapa da Figura 44.

Figura 44. Potencia natural de erosão ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

O potencial natural de erosão estima as perdas de solo adotando que a superfície deste se mantivesse continuamente desprotegida. Esta equação utiliza as variáveis da EUPS que possuem pouca variabilidade em relação às ações humanas (à curto prazo), isso quando comparada com as variáveis relacionadas ao manejo e cobertura do solo, que pode ser alterada de forma mais rápida pela ação humana.

Determinando a perda total de solo sem o uso de nenhuma prática de conservação e manejo e sem qualquer tipo de cobertura, tem-se uma perda de 174423,2 Toneladas por ano, dentro da microbacia. Assim é notável a importância da existência de uma cobertura de proteção do solo, visto que as perdas estimadas com cobertura é da ordem de 3772,19 toneladas por ano.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base na bibliografia consultada, foi possível buscar informações relevantes para a utilização das técnicas que foram empregadas no presente trabalho. Foi possível também chegar ao consenso de que o problema relacionado à perda de solo e assoreamento em reservatórios tem despertado cada vez mais a atenção dos pesquisadores.

Na determinação do cálculo do assoreamento foi possível observar que os dados trabalhados foram extremamente importantes para associar o caráter inédito de análise de assoreamento em um reservatório de grande porte no rio Tietê.

As cartas topográficas que foram utilizadas para caracterização das elevações antes do enchimento do reservatório forneceram informações com o detalhamento requerido para a realização deste estudo. Com base nestas foi

possível determinar de forma satisfatória o volume total do reservatório e o sedimento acumulado dentro deste.

Somente para o empreendimento do reservatório de Três Irmãos é que foi possível recuperar informação relativa à caracterização do terreno antes do enchimento do reservatório. Em outros estudos realizados nos demais reservatório do Rio Tietê não foram encontradas informações de tal natureza, o que prejudica a real análise na estimativa dos depósitos de sedimento dentro desses reservatórios.

O levantamento batimétrico atual disponibilizou informações de natureza muito precisa, o que permitiu o registro das formas do fundo com um elevado grau de detalhamento. Com base nessas feições e comparando com as condições do reservatório antes do enchimento, foi possível determinar a localização dos depósitos bem como o volume assoreado desde o início da operação do reservatório.

Levantamento desta natureza se faz necessário para uma determinação mais representativa do processo de assoreamento, situação na qual somente com a utilização de informações localizadas em uma escala temporal é que se torna possível o acompanhamento da evolução desses processos, permitindo também estudos envolvendo projeções juntamente com outras variáveis que afetam diretamente a produção de sedimento dentro da bacia hidrográfica.

Com base nos dados observou-se que os processos de assoreamento e erosão ocorrem de forma mais intensa nos trechos finais dos afluentes e nas margens do reservatório, respectivamente. Os processos de deposição e erosão, dentro do reservatório, estão em locais previsíveis de acordo com o que se conhece

do comportamento da deposição e desagregação de partículas em locais onde houve alteração do regime de escoamento da água.

A aplicação das técnicas de geoprocessamento foi de extrema importância para o desenvolvimento do trabalho, pois nesta plataforma que foi possível concentrar e manipular os dados de forma a obter os resultados que se desejava analisar.

Os processos erosivos que ocorrem dentro da área de drenagem devido o escoamento superficial podem ser estimados utilizando-seo método da EUPS com base em imagens de satélites, dados hidrometereológicos e topográficos. Porém, deve-se ressaltar que esses valores obtidos estão restritos à erosão laminar. As ravinas não podem ser identificadas em imagens com resolução espacial de 30 m, isso se deve ao fato de que essas ravinas possuem alguns metros de largura, não podendo ser observadas por imagens de satélite com resolução espacial de 30 metros. Somente com o trabalho de campo é possível tal identificação. Esta pesquisa focou somente a estimativa laminar para determinar a perda de solo na sub-bacia.

A quantidade de sedimento acumulado no reservatório, não proveniente da área alagada, foi determinada utilizando-se os volumes de assoreamento e erosão (deslocamento de massa no interior do reservatório), na qual se descontou o valor do volume erodido do assoreado, obtendo assim uma quantidade de sedimento que não pertence à área alagada pelo reservatório. Com base nesse valor calculado obteve-se que a perda da capacidade de armazenamento do reservatório está em torno de 6,73 %, o que dá aproximada mente uma taxa de 0,40% de perda da capacidade por ano. Desde o início da operação do reservatório em 1990, este valor

está abaixo do valor médio mundial, que é de 1% por ano, e da média brasileira que é de 0,5% por ano, aproximadamente. Na análise da produção de sedimento dentro da micro-bacia, temos que para a produção média de sedimento é da ordem de 3772,19 toneladas por ano em um local com uma área de 19440,5 hectares, sendo que esse sedimento é proveniente da erosão laminar.

A importância de estudos desse porte está associada às informações relativas à quantificação dos recursos hídricos em lagos e reservatórios, facilitando os cálculos de balanço hídrico em suas respectivas áreas de drenagem, bem como avaliação de projetos e atividades a serem desenvolvidas nestes locais

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVARES, M. T. P.; PIMENTA, M. T. Erosão Hídrica e Transporte Sólido em pequenas Bacias Hidrográficas. In: 4º CONGRESSO DA ÁGUA MARÇO 1998 DATA, 1998, Lisboa – Portugal, **Anais...** Lisboa: SNIRH, 1998, p9.
- ANA (2007) – Agência Nacional das Águas Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. Disponível em: <www.ana.gov.br/>. Acesso em: 12/2007.
- AWULACHEW, S. B. Investigation of physical and bathymetric characteristics of lakes Abaya and Chamo, Ethiopia, and their management implications. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**. v. 111, p. 133-140,, Set. 2006.
- BARBOSA, J. P. M. Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos: o sig como ferramenta. **Caminhos de geografia - revista on line**. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Campinas, v. 9, p. 85 – 96, Fev. 2006.
- BERTONI, J. ; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: ícone, 1990. 355p.
- BRASIL. Lei nº 9433/97, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário oficial da união**, Brasília, DF Jan. 1997.

CALDAS, M. M. et al . Ciclo de vida da família e desmatamento na Amazônia: combinando informações de sensoriamento remoto com dados primários.

Revista Brasileira de Economia [on line], nº. 4, p. 683-711, Dez. 2003.

CÂMARA, G., **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos**. 1995. 263f. Tese (Doutorado em computação aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1995.

CARMONA, S. L.; GHERARDI, D. F. M.; TESSLER, M. G. Dados de sensoriamento remoto e de geoprocessamento para apoio aos planos de contingência durante eventos de derramamentos de óleo em regiões costeiras: o caso do litoral norte do estado de São Paulo. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p.431-438.

CARRERA-FERNANDEZ, J.; GARRIDO, R.J. **Economia dos Recursos Hídricos**, Bahia: Editora da Universidade Federal da Bahia, 2002. 457p.

CARVALHO, N.O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília – DF: ANEEL (Agência nacional de energia elétrica) – Superintendência de estudos e informações hidrológicas – Ed. Dupligráfica, 2000a. 132p.

CARVALHO, N.O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília – DF: ANEEL (Agência nacional de energia elétrica) – Superintendência de estudos e informações hidrológicas – Ed. Dupligráfica, 2000b. 154 p.

- CASTRO, A. G., **Técnicas de sensoriamento remoto e sistemas geográficos de informações no estudo integrado de bacias hidrográficas**. 1992. Dissertação (Mestrado e, Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1992
- CESP – Companhia Energética de São Paulo. Pedreira – SP, 2008. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br/>>. Acesso em: 01/2008
- COSTA, I. G. D. D.; DUPAS, F. A.; MAUAD, F. F.. Análise da perda de solo através de SIG e SR: caso município de Santa Rita do Sapucaí. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo. **Anais....** Porto Alegre : ABRH, 2007. v. 1. p. 180-184.
- ELLISON, W.D. **Soil Erosion Studies - Part. 1**. Agricultural Engineering, St. Joseph, 1947.
- FUJIHARA, A. K., **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.
- GOMES, M. N. et al. O uso do Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informação Geográfica na análise de áreas de risco ao ataque de morcegos hematófagos em bovinos de quatro municípios da região de São João da Boa Vista, Estado de São Paulo. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2733-2740.

- GONÇALVES, F.A. et al. Índices e espacialização da erosividade das chuvas para o Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande – PB, v.10, nº.2, p.269–276, Nov.2005.
- GUNKEL, G. et al. **The environmental and operational impacts of curuá-Una, a reservoir in the amazon region of Pará, Brazil**. Lakes e reservoirs research and management. Shiga, v.8, p. 201-216, 2003.
- HIDROWEB . Brasília – DF: Agência Nacional das Águas, 2007. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 12/2007
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília – DF: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 12/2007.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos – SP: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 01/2008.
- KBS – Kansas Biological Survey. Kansas – EUA. Bathymetric Survey of John Redmond Reservoir, Coffey Country, Kansas”. Disponível em:<<http://www.kars.ku.edu/astra/publications/>> . Acesso em: 12/ 2007
- LACRUZ, M. S. P. et al. Utilização do sensoriamento remoto e dados de campo para a modelagem das atividades biogeoquímicas na Floresta Nacional de Tapajós. In: X SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2001,Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1699-1701.

- LAL, R. (1988), **Soil erosion research methods**. Wageningen, Netherlands: Soil and Water Conservation Society/International Soil Science Society. p.140-160. ISBN 0-935- 73418-X.
- LANE, L.J. et al. Development and application of modern soil erosion prediction technology - The USDA experience. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, p. 893–912. 1992.
- LEOPOLD, L.B. Land use and sediment yield, In **Man's Role in Changing the Face of the Earth**, Chicago, ed. W. L. Thomas, 1956.
- LILLESAND, T. M., **Remote sensing and image interpretation**. 3º Edição (1994). Madison- Wisconsin: Editora John wiley & sons, inc, 1979. 746p.
- LOPES, A. V., **Aplicação de métodos de previsão de assoreamento de reservatórios**. 1993. 142 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Estadual de Campinas/ Faculdade de Engenharia Civil /Departamento de hidráulica e saneamento, Campinas, 1993.
- MAIA, A.G., **As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens**. 2006. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, 2006.
- MEN, M.; YU, Z.; XU, H. Study on the spatial pattern of rainfall erosivity based on geostatistics in Hebei Province, China. **E Higher Education Press and Springer-Verlag**, 2008.

- MENDES,C.A.B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos:** princípios, integração e aplicação. 1º Edição. São Paulo: Editora ABRH, 2001. 536p.
- METTERVICHT, O. I. , **Detecting and monitoring land degradation features and processes in Cochabamba Valleys, Bolivia.** Netherlands: ITC, 1996, p.13-30.
- MME – Ministério de Minas e Energia. Brasília – DF, 2007. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 01/2008.
- MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão:** o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba: o autor, 2001 83p
- MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation.** 3 º Edição(1995).London: Longman, 1986. 198p.
- NAGLE, G.N.; FAHEY, T.J.; LASSOIE, P.J. Management of sedimentation in tropical watersheds. **Environmental Management** , Nova York, v. 23,nº 4, p. 441–452, 1999.
- NISHIYAMA, L., **Procedimento de mapeamento geotécnico como base para análises ambientais do meio físico, em escala 1:100.000.** Aplicação no município de Uberlândia – MG. 1998. 372f. Tese (Doutorado em geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, 1998.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações.** 2º Edição (1994). São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1992. 308p.

ODHIAMBO, B. K.; BOSS, S. K., **Integrated echo sounder, GPS, and GIS for reservoir sedimentations studies**: Examples from two Arkansas lakes. **Journal of the American water resources association**, agosto de 2004, paper No. 02061

OLIVEIRA, O. O. et al. Uso de técnicas de geoprocessamento para identificar áreas susceptíveis o escorregamento na região de Campos de Goytacazes – RJ. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p 3191-3198.

PEDRO, F. G.; LORANDI, R. Potencial natural de erosão na área de São Carlos – SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente (SP), v. 56, n.1, p. 28-33, 2004.

PENIDO, L. R.; KUX, H. J. H.; MATTOS, J. T. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e GIS como subsídio ao planejamento rodoviário. Estudo de Caso: Trecho Oeste do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, Brasil. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 661-673.

PORTO, M F. A.; PORTO, R L L. **Gestão de bacias hidrográficas**. Estudo avançados, São Paulo, v. 22, n. 63 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 02/2009.

PRADO, H. **Os solos do estado de São Paulo** : mapas pedológicos. 1997. Piracicaba: Editora Piracicaba, 1997. p. 205.

- PRADO, R. B.;NOVO, E. M. L. M.; PEREIRA, M. N. SIG E Sensoriamento Remoto aplicados à avaliação da contribuição de sub-bacias para a poluição difusa do reservatório de Barra Bonita – SP. In XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte . **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2565-2567
- RAIROUX, P. et al. Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses. **Journal Applied Physics B: Lasers and Optics** [Online]. Berlin/Heidelberg, v. 71, n.4, p. 573-580, Oct. 2000.
- ROBERTS, J.D. et al. Measuring bedload fraction with the asset flume, **Journal of Hydraulic Engineering**, Albuquerque. 2003.
- RĂDOANE, M.; RĂDOANE, N. Dams, sediment sources and reservoir silting in Romania. **John Wiley & Sons, elsevier, disponscience direct**, Departamento de geografia, universidade “Stefan cel maré”, v. 71, 112 – 125,Dez. 2002.
- RODRIGUES, B. B., **Inventário e análise de susceptibilidade aos Movimentos de massa gravitacionais e Erosões na região de Águas de Lindóia/SP — Escala 1:10.000**. 1998. 142f. Dissertação (Mestrado em geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, 1998.
- ROSA, R. **Introdução a sensoriamento remoto**. 3º Edição (1995). Uberlândia: Editora da universidade federal de Uberlândia, 1990. 117p.
- SIGRH – Relatório de situação dos recursos hídricos do estado de São Paulo, 06/2000. São Paulo: Governo de São Paulo. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>. Acesso em: 09/2007.

SHALASH, S. Effects of sedimentation on the storage capacity of the High Aswan Dam reservoir. **Hydrobiologia**. V. 91-91, p. 623 – 639, Nov. 1982.

SILVA, J.C. et al. Análise de distribuição de chuva para Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v.11, n.1, p.67–72, Ago. 2006.

SOARES, A. F. Espacialização de dados de clima do Estado de São Paulo utilizando o SPRING e o SURFER 8. In: 1º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA AGROPECUÁRIA, 2004, Santarem - Portugal. **Anais...** APDTICA - Associação Portuguesa para o Desenvolvimento das Tecnologias de Informação e Comunicação na Agricultura e SBI-AGRO - Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e Agroindústria, 2004. p. 9.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3º edição. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

STERNBERG, R. Damming the river: a changing perspective on altering nature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Montclair, p. 165-197, 2006.

STEIN, D.P.; et al. Potencial de erosão laminar natural e antrópica na bacia do Peixe- Paranapanema. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 4, 1987, Marília. **Anais...**, Marília: ABGE,1997. p. 105-135

VILLELA, S. H., **Avaliação sócio-econômica de impactos ambientais devidos à implantação e operação da usina hidroelétrica Três Irmãos, no rio Tietê: aplicação do modelo interpretativo da inserção regional de UHE's elaborado pela Eletrobrás**. 1992. 124f. Dissertação (Mestrado ciências da

engenharia ambiental) – Escola de engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, 1992.

VOLK, W. **Applied Statistics for engineers**, New York, Toronto, London: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1985, 354 p.

YANG, S. et al. A review of soil erodibility in water and wind erosion research. **Journal of Geographical Sciences**, V.15, n 2, p.167-176. Abr. 2005.

WEILL, Mara de Andrade Marinho; SPAROVEK, Gerd. **Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I** - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 32, n. 2, abr. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000200034&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 01/2009.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. (1978), **Predicting Rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (USDA. Agriculture Handbook, 537).

ZIELER. M., Modeling our real world - The Ersi guide to geodatabase design, Published by Environmental System Research Institute. Califónia, 1999.