

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7509-TDI/723

**GEOPROCESSAMENTO APLICADO À DETERMINAÇÃO DE
VOLUME E ÁREA DO RESERVATÓRIO HIDRELÉTRICO DE
SERRA DA MESA COM IMAGENS JERS-1/SAR**

Wilson Cabral de Sousa Júnior

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pela Dra. Evlyn Márcia
Leão de Moraes Novo, aprovada em 05 de março de 1999.

INPE
São José dos Campos
2000

528.711.7

SOUSA JR., W. C.

Geoprocessamento aplicado à determinação de volume e área do reservatório hidrelétrico de Serra da Mesa com imagens JERS-1/SAR / W. C. Sousa Jr. – São José dos Campos: INPE, 1999.

93p. – (INPE-7509-TDI/723).

1.Usina hidrelétrica. 2.Serra da Mesa (GO). 3.Alagamentos. 4.Geoprocessamento. 5.JERS-1. 6.Radar de Abertura Sintética (SAR). I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre** em **Sensoriamento Remoto**.

Dr^a Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo



Presidente/Orientadora

Dr^a Corina da Costa Freitas



Membro da Banca

Dr. Gilberto Câmara Neto



Membro da Banca

Dr^a Íria Fernandes Vendrame



Membro da Banca
Convidada

Candidato (a) : Wilson Cabral de Sousa Júnior

São José dos Campos, 05 de março de 1999.

“Técnicos e especialistas, ainda que bem preparados, não têm poder para, isoladamente, transformar a estrutura da sociedade, mas têm força para exigir seriedade e melhorias na organização dos espaços para os quais se endereçam projetos ditos desenvolvimentistas.”

Aziz Nacib Ab'Sáber, 1994.

À Daniela, Djory e Mateus,

**pela cessão de tempos preciosos
de nossa convivência, em
favor deste projeto**

AGRADECIMENTOS

À Dra. Evlyn Novo pela orientação atenta e preciosa, não apenas em relação ao trabalho do mestrado, mas também no aconselhamento pessoal e profissional.

A todos os amigos da Turma 97, fiéis que foram em momentos de dificuldades e confraternizações.

Aos amigos de sempre, presentes em todos os momentos importantes. Por sorte são muitos, não tenho conta, o que me impossibilita de citar nomes sem esquecer um ou outro. Eles sabem quem são.

Aos Doutores Júlio d'Alge, Ricardo Cartaxo e Sérgio Rosim, pelo apoio incansável no suporte ao SPRING.

Ao Dr. Gilberto Câmara, pelo dinamismo que emprega à Divisão de Processamento de Imagens, dinamismo este que muito nos favorece enquanto alunos.

À Dra. Corina da Costa Freitas, pelo ótimo relacionamento e pelas conversas sobre o curso e as coisas. Sobretudo pela oportunidade de lhe mostrar o mar.

À Dra. Íria Vendrame, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

À Ethel, Cristina, Terezinha e Rosa, benditas mulheres que resolvem tudo (ou quase tudo), e as quais insistimos em chamar de secretárias. Elas são as verdadeiras chefes.

À equipe da biblioteca do INPE, especialmente à Suelena e à Sílvia, pela atenção sempre especial e pelo auxílio na correção dos padrões de publicação.

À equipe do meio ambiente e da engenharia civil de Furnas, em especial ao biólogo Rodrigo Di Fillipo e ao engenheiro Ademar Filho, pelas informações prestadas e pelo acompanhamento do trabalho.

A todos aqueles idealistas que investem em C&T, a despeito de um governo que não percebe, ou não quer perceber, a importância da pesquisa e da educação para o desenvolvimento da nação.

RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento metodológico para determinação de parâmetros de alagamento de reservatórios hidrelétricos. O método se baseia na geração de um Modelo Numérico de Terreno a partir de dados topográficos da região e na determinação dos limites do reservatório, informação extraída de imagens JERS-1/SAR. De posse destes dados, são determinados os parâmetros área e volume da represa em diferentes cotas de enchimento, através do uso de um sistema de informações geográficas, no caso, o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING). Os resultados obtidos são referentes ao reservatório da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, que se encontra em operação desde abril de 1998. Os valores encontrados apontam um erro sistemático de projeto da ordem de 30% à menor em volume e área. Estes valores, se confirmados, indicam uma geração de energia aquém do valor projetado, bem como uma área de alagamento inferior ao inicialmente divulgado.

**GEOPROCESSING APPLIED TO VOLUME AND AREA DETERMINATION
OF SERRA DA MESA HYDROELECTRICAL RESERVOIR
USING JERS-1/SAR IMAGES**

ABSTRACT

This paper presents a method for the determination of flooding parameters in hydroelectrical reservoirs. The method is based on the integration of Digital Terrain Model (DTM) and Remote Sensing data derived from JERS-1/SAR. The area and volume of the reservoir, considering different water levels, were determined using SPRING, a Geographical Information System software developed by the National Institute for Space Research (INPE). The method was applied to the Serra da Mesa reservoir - which has been in operation since April 1998. The results showed a systematic error in reservoir project. The volume and area values are 30% smaller than those projected. The results, if validated, shows that the generation of energy is below the previously predicted, and that the flooding area is smaller than that announced.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	19
1.1 – Energia e desenvolvimento	19
1.2 – A hidreletricidade no Brasil	20
1.3 – A hidreletricidade e a questão ambiental	21
1.4 – Objetivos e metas	23
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 – Conceitos básicos	25
2.2 – Reservatórios: contextualização	26
2.3 – Reservatórios: importância e relações ambientais	27
2.4 – Hidrologia e parâmetros fisiográficos de bacia	29
2.5 – Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento	30
2.5.1 – O uso do sensoriamento remoto nos estudos de reservatórios	30
2.5.2 – Dados JERS-1/SAR	36
2.5.3 – Processamento de imagens	37
2.5.3.1 – Filtragem	37
2.5.3.2 – Segmentação	39
2.5.3.3 – Classificação	40
2.5.4 – Modelo numérico do terreno (MNT)	43
CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 – Área de estudo	47
3.2 – Material	50
3.3 – Metodologia	52
3.3.1 – Entrada de dados	53
3.3.2 – Geração de MNT e levantamento de área e volume	53
3.3.3 – Processamento de imagens	55
3.3.3.1 – Registro e mosaico das imagens	55
3.3.3.2 – Filtragem	56
3.3.3.3 – Segmentação	58
3.3.3.4 – Classificação	59
3.3.4 – Integração dos dados	61

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 – Polígonos base (fatiamento do MNT nas cotas)	63
4.2 – Volumes e áreas a partir das imagens JERS-1/SAR	67
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	75
5.1 - Conclusões	75
5.2 – Considerações finais e recomendações	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A – FÓRMULAS GENÉRICAS UTILIZADAS	89
APÊNDICE B – ALGORITMO DE RECORTE - LEGAL	91
APÊNDICE C – UTILIZAÇÃO DO SPRING	93

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Consumo energético no Brasil (1973-1988)	20
2.1 Desenho esquemático de uma secção de reservatório hidrelétrico	26
2.2 Representação da antena sintética SAR	33
2.3 Espalhamento em imagens SAR	35
3.1 Área de estudo: Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa - Minaçu/GO	47
3.2 Fotografias do reservatório: (A)visão panorâmica da margem direita do reservatório; (B) vista aérea do reservatório; (C) vista aérea da barragem	49
3.3 Imagem JERS-1/SAR da região da UHE Serra da Mesa, identificador 389/324, obtida em 04.03.97	51
3.4 Mosaico de imagens JERS-1/SAR da região da UHE Serra da Mesa, identificadores 388/324 e 389/324, obtidas em 19.11.97	51
3.5 Esquema metodológico	52
3.6 Mapa de isolinhas da UHE – Serra da Mesa (coordenadas planas em milhares de metros)	54
3.7 Resultado visual das filtragens sobre as imagens JERS-1/SAR	57
3.8 Resultados visuais das classificações para a parte central da imagem JERS-1/SAR de 04.03.97	60
4.1 Área correspondente à cota 414 do MNT da UHE Serra da Mesa	64
4.2 Área correspondente à cota 439.77 do MNT da UHE Serra da Mesa	64
4.3 Área correspondente à cota 450 do MNT da UHE Serra da Mesa	65
4.4 Área delimitada como água na imagem JERS-1 de 04.03.97	68
4.5 Área delimitada como água na imagem JERS-1 de 04.03.97	68

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Perfil da energia elétrica no Brasil (1883-1950)	19
2.1 Propriedades do sensor JERS-1/SAR	37
3.1 Relação cota-dia da UHE Serra da Mesa	50
3.2 Fitomassa do reservatório de Serra da Mesa	60
4.1 Valores de área para a cota 460 – Regressão linear	63
4.2 Volumes e áreas – Cota 414 - MNT	66
4.3 Volumes e áreas – Cota 439.77 – MNT	66
4.4 Volumes e áreas – Cota 460 – MNT	67
4.5 Volumes e áreas – Cota 414 – Imagem JERS-1	69
4.6 Volumes e áreas – Cota 439.77 – Imagens JERS-1	69
4.7 Dados pluviométricos – ANEEL – Estação São Félix	72

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - ENERGIA E DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento econômico dos países está estreitamente associado ao aumento da demanda energética. Assim, a transformação e disponibilização de energia atende a uma necessidade crescente de consumo, alcançando números cada vez maiores (Tabela 1.1).

TABELA 1.1: PERFIL DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL (1883-1950).

	1883	1889	1900	1910	1920	1930	1940	1950
Localidades servidas	1	5	24	125	886	1770	2852	3792
Fornecedoras	1	3	11	88	306	1009	1617	1763
Número de usinas	1	3	11	88	343	1211	1914	2092
Termelétricas	1	2	6	28	134	492	914	987
Hidrelétricas	-	1	5	60	204	708	983	1089
Mistas	-	-	-	-	5	11	17	16
Capacidade (MW)	0,05	0,75	12,08	159,85	357,20	778,80	1243,87	1883
Termelétricas (MW)	0,05	0,50	6,58	21,99	77,82	148,75	234,53	346,83
Hidrelétricas (MW)	-	0,25	5,50	13786	279,38	630,05	1009,34	1536,17

FONTE: Müller (1995, p. 11)

No entanto, as fontes tradicionais de energia (petróleo e carvão), além de potencialmente poluidoras, não são renováveis. Após a segunda guerra mundial, com maior intensidade, os países desenvolvidos têm procurado diversificar suas fontes de energia de forma a minimizar alguns problemas potenciais ao seu crescimento: a dependência de fornecedores de petróleo, a esgotabilidade destas fontes e sua capacidade poluidora. Os estudos de outras fontes de energia se voltaram para a hidreletricidade, os combustíveis biológicos (álcool, metano) e a energia nuclear.

No Brasil, a regulamentação da exploração de madeira pelo extinto Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), obrigando os grandes consumidores a executar

programas de reflorestamento, a implementação do Proálcool, programa de apoio ao desenvolvimento do álcool combustível, o choque dos preços do petróleo, em 1979, impactando o consumo deste produto, e o pesado investimento em grandes usinas hidrelétricas, determinaram uma mudança estrutural na matriz energética nacional no início da década de 80 (Figura 1.1).

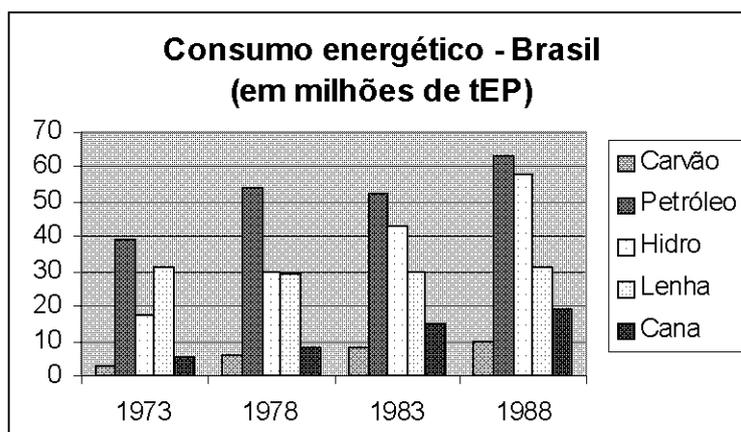


Fig. 1.1 – Consumo energético no Brasil (1973-1988).
 FONTE: adaptada de BEN (1989, citada por Dias Leite, 1997)

1.2 - A HIDRELETRICIDADE NO BRASIL

As condições hídricas favoráveis do Brasil, determinaram um direcionamento ao investimento hidrelétrico desde os primórdios deste século. Estes investimentos foram inicialmente baseados em recursos externos, liderados por empresas como a *SP Railway*, em São Paulo e a *Light*, no Rio de Janeiro. Após a década de 40, entretanto, sob o governo de Getúlio Vargas, implantou-se uma política de investimento estatal no setor hidrelétrico. Isto possibilitou um considerável aumento do conhecimento e tecnologias próprias na geração hidrelétrica (Müller, 1995). Mais tarde, com a instauração da ditadura militar, supostamente nacionalista, e a era do “milagre” brasileiro, foram feitos os maiores investimentos em hidrelétricas no país. Nesta época, foi criada a Eletrobrás e definido o modelo de produção/distribuição de energia

hidrelétrica através da criação da Eletrosul (1968), Eletronorte (1972). Na segunda metade da década de 70, deu-se início à construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu (1976), em cooperação bilateral com o Paraguai. A compra da *Light* pela Eletrobrás, em 1979, foi o passo definitivo para o estabelecimento do modelo energético instituído durante o regime militar. Dois outros grandes projetos seriam desenvolvidos no início da década de 80: a Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no baixo Tocantins, cujas obras foram iniciadas em 1983, e a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, no alto Tocantins, cujo projeto, iniciado em 1980, sofreu um grande atraso em função da mudança no perfil político brasileiro em meados da década de 80, vindo a ser concluído no início dos anos 90. Itaipu, Tucuruí e Serra da Mesa representam os três maiores empreendimentos hidrelétricos brasileiros até então.

Atualmente, cerca de 95% da energia elétrica gerada no Brasil têm origem hidrelétrica (Eletrobrás, 1991). A bacia do rio Paraná é hoje a principal matriz de hidreletricidade. Características como relevo de encaixe (planalto) e alta declividade total, contribuem para o grande aproveitamento hidrelétrico desta bacia. A bacia amazônica vem sendo estudada como importante matriz para expansão do sistema hidrelétrico brasileiro e construção de futuras usinas. Estes projetos incluem a duplicação da potência instalada em Tucuruí, a exploração do potencial hidrelétrico do alto Tocantins (UHE Serra da Mesa) e a construção de dezenas de usinas de pequeno e médio porte ao longo dos principais tributários da bacia.

Segundo Cadman (1998), engenheiro de projetos da Eletronorte, o reservatório de Serra da Mesa funcionará como um regulador das vazões à jusante, possibilitando a otimização do aproveitamento hidrelétrico do médio Tocantins.

1.3 - A HIDRELETRICIDADE E A QUESTÃO AMBIENTAL

A pressão internacional pela utilização de fontes energéticas com menor potencial poluidor contribuiu, ainda que em caráter secundário, para o direcionamento da política energética do país no caminho da expansão da geração hidrelétrica. A queima de

combustíveis fósseis (principalmente o petróleo e o carvão) e o desmatamento por queimadas, são os principais emissores de gás carbônico (CO₂) para a atmosfera¹, o que afeta o clima em termos de mudanças globais. Um dos problemas associados à opção hidrelétrica é a falta de estudos conclusivos sobre o impacto ambiental quantitativo de uma usina de grande porte. Estima-se que o alagamento de áreas extensas florestadas, tem influência direta nos níveis de CO₂ e metano (CH₄) lançados para a atmosfera regionalmente.

Resultados obtidos por Tavares de Lima (1998), identificaram no reservatório de Tucuruí uma fonte considerável de CH₄ para a atmosfera, especialmente nos períodos de estiagem, sendo que parcela significativa de material orgânico provém de bancos de macrófitas aquáticas. Outros trabalhos similares somam um grande esforço de pesquisa para a quantificação de fluxos de gases estufa para a atmosfera, a partir de grandes reservatórios.

No entanto, existem poucos dados quantitativos e estudos conclusivos sobre estas emissões, o que empobrece a definição da hidreletricidade como energia limpa.

Além da questão das emissões de gases estufa, o mau dimensionamento de reservatórios em fase de projeto ocasiona outros tipos de danos ambientais e sócio-econômicos. O alagamento de áreas consideradas não alagáveis, a necessidade de deslocamento de comunidades inteiras e a baixa relação potência/área alagada são problemas conhecidos da comunidade científica voltada para estudos de reservatórios.

No Brasil, destacam-se os casos de Tucuruí, no qual, em fase de enchimento, teve que se proceder novo deslocamento populacional em função do alagamento não planejado de áreas adjacentes; Balbina, cuja relação potência/área é da ordem de 0,1 MW/km², considerada baixíssima; e Sobradinho, cujo projeto definiu o deslocamento de cerca de 60.000 pessoas (Dias Leite, 1997; Müller, 1995).

A decisão da construção da UHE Tucuruí, se apoiou, dentre outros argumentos, nas estimativas de custos do projeto, considerados relativamente baixos. No entanto, tais

¹ Folha de São Paulo, caderno Mundo, 30/11/97 p. 1. FONTE: Centro de Análise de Informações de CO₂.

estimativas simplesmente desconsideraram os custos sócio-econômicos e ambientais (Monosowsky, 1994).

Em média, um terço dos acidentes com barragens verificados no mundo têm sido decorrentes da capacidade inadequada dos seus vertedouros, os quais são sujeitos a suportar cargas maiores do que as especificadas no projeto (Pessoa, 1992).

O desenvolvimento de novas técnicas e a proposição de modelos mais realísticos para o cálculo de parâmetros de alagamento de reservatórios hidrelétricos, pode contribuir para a otimização dos projetos, de certa forma minimizando os impactos ambientais e sócio-econômicos associados a estes empreendimentos.

1.4 - OBJETIVOS E METAS

Traçado um panorama da situação hidrelétrica brasileira e tendo ciência dos possíveis efeitos ambientais envolvidos nesta área, o presente estudo objetivou estabelecer uma metodologia aplicável à estimativa de parâmetros de alagamento (área e volume) de reservatórios hidrelétricos, de forma a apoiar decisões referentes a estes empreendimentos.

Para a consecução do objetivo geral proposto, utilizou-se como objeto de estudo o reservatório da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa (Minaçu, GO), o qual se encontra em fase final de enchimento, e para o qual foram determinados o volume e a área de alagamento na cota máxima (460 metros) e nas cotas determinadas por imagens de radar (JERS-1/SAR) cedidas por Furnas S.A., obtidas durante o enchimento.

O trabalho apresenta ainda, como objetivo secundário, a formação de uma base de consistência ao Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING (Netgis, 1997), no que se refere à metodologia de cálculo de volume, bem como às interfaces das rotinas de segmentação e classificação de imagens propostas no programa.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – CONCEITOS BÁSICOS

A engenharia de barragens e a hidrologia, estabeleceram alguns conceitos relativos a reservatórios hidrelétricos, os quais são explanados a seguir para melhor entendimento do texto:

- MONTANTE – região da rede de drenagem, bacia ou manancial hídrico, localizada em nível altimétrico superior ao do objeto referenciado;
- JUSANTE – contrário de “montante”, ou seja, região da unidade de estudo (rede de drenagem, bacia ou manancial hídrico) localizada em nível altimétrico inferior ao do objeto referenciado;
- COTAS – valor “z” em um sistema de eixos tridimensional “x,y,z”, atribuído a uma localização no terreno. Uma sequência de pontos com a mesma cota se constitui numa isolinha. Esta é a representação básica de uma curva de nível (Ex.: cota 460 representa a curva de nível de 460 metros);
- NÍVEL MAXIMUM MAXIMORUM – nível do reservatório projetado como nível máximo de suporte ao alagamento;
- NÍVEL MÁXIMO NORMAL – nível projetado como máximo de suporte operacional da usina;
- NÍVEL MÍNIMO NORMAL – nível mínimo de operação, abaixo do qual não há geração de energia pelas turbinas;
- VOLUME MORTO – volume contido abaixo do nível mínimo normal do reservatório;

- VOLUME ÚTIL – volume contido entre os níveis mínimo e máximo normais do reservatório;
- EXUTÓRIO – ponto mais à jusante de uma bacia hidrográfica, por onde se dá o escoamento do canal principal da bacia;

A Figura 2.1 apresenta um esquema dos principais conceitos envolvidos na construção de reservatórios.

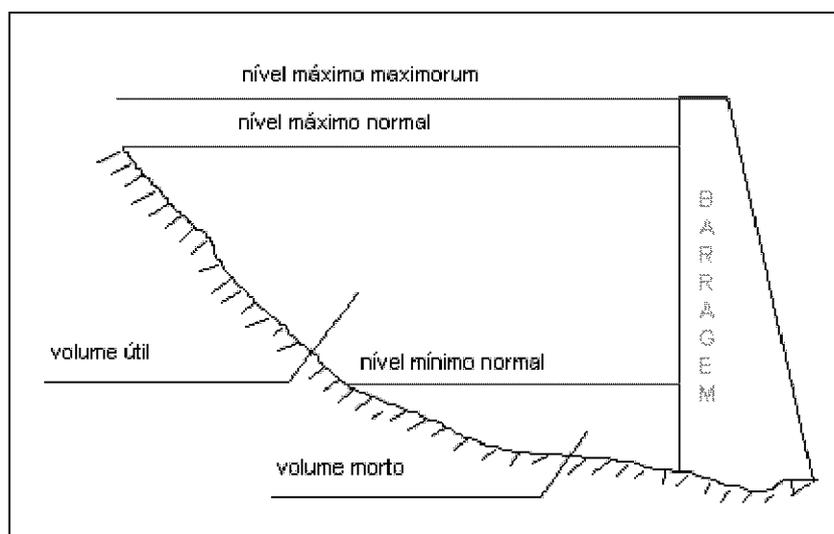


Fig. 2.1 – Desenho esquemático de uma seção de reservatório hidrelétrico.
 FONTE: adaptada de Lanna (1997, p. 710).

2.2 – RESERVATÓRIOS: CONTEXTUALIZAÇÃO

Uma vez que a demanda energética aumenta a cada ano, acompanhando o crescimento econômico nacional, a necessidade da expansão da capacidade de geração de energia aponta para a utilização cada vez maior da hidreletricidade na composição da malha energética do país. Outros fatores que corroboram esta premissa são a crise do projeto

nuclear brasileiro e a dependência externa em relação à produção de combustíveis fósseis.

Assim, vários projetos de geração de energia a partir de usinas hidrelétricas tem sido elaborados e concluídos. O crescimento destes projetos, dado o porte e a quantidade dos empreendimentos, requer uma contrapartida científica de estudo do suporte do meio e dos efeitos ambientais e sócio-econômicos oriundos dos mesmos. Os estudos inerentes a estas atividades, apesar de constarem legalmente nos projetos (CONAMA, 1986), se tornam incipientes devido ao caráter de urgência que é dado a estes. O tempo para a realização de estudos de maior efetividade e confiabilidade é exíguo, comprometendo seus resultados. De modo geral, os trabalhos mais significativos são realizados após a implantação do projeto hidrelétrico.

Estas observações são salientadas por Teixeira et al. (1994), que, ao analisarem o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da UHE Serra da Mesa, concluíram tratar-se de documento com detalhamento padronizado, de visão reducionista e desmembrada da realidade local. Segundo estes, a abordagem fatorial anula as diferenciações intra e inter-regionais, limitando as realidades sociais à dinâmicas que as esvaziam de conteúdo, constituindo quadro propício de justificativa do empreendimento.

2.3 – RESERVATÓRIOS: IMPORTÂNCIA E RELAÇÕES AMBIENTAIS

Margalef (1983), definiu um reservatório como sendo um sistema híbrido entre um rio e um lago. Segundo este, o rio represado regula e retarda seu fluxo; o repositório de águas apresenta um equilíbrio mais avançado, tanto em termos dos limites físicos, quanto em termos de suporte à vida. A taxa de renovação da água é menor que em um rio, porém maior que em um lago e as organizações, verticais de um lago e horizontais de um rio, assumem uma característica intermediária em um reservatório, o que determina uma necessidade de estudos específicos relativos a estes meios.

Os impactos ambientais do represamento de rios estão associados ao tamanho e volume do reservatório, tempo de residência da água e localização geográfica, sendo os principais: inundação de áreas agrícolas, empecilho à migração de peixes, perda de vegetação e fauna, mudanças na fauna e flora aquáticas, mudanças no regime hidrológico, alterações no transporte de sedimentos, proliferação de vetores de doenças de veiculação hídrica, perda do patrimônio histórico/cultural, efeitos sociais na população local e mudanças nas atividades econômicas locais (Tundisi, 1994).

Os rios com maior potencial de aproveitamento hidrelétrico, geralmente suportam vários empreendimentos, que são construídos em cascata. A regularização da vazão, obtida com o represamento, potencializa o uso hidrelétrico à jusante, favorecendo novos empreendimentos. Este efeito acaba por multiplicar os impactos decorrentes destas construções.

Em decorrência da construção de usinas hidrelétricas no Brasil, originaram-se muitos tipos de degradação ambiental, entre elas, a redução do fluxo d'água, modificando a distribuição vertical e horizontal de características bióticas e abióticas, resultando frequentemente em processos de eutrofização. De acordo com Tundisi (1986), as principais causas da eutrofização são os despejos de esgotos domésticos, industriais e resíduos agrícolas, a poluição atmosférica na forma de precipitação e a vegetação remanescente em represas não desmatadas antes do fechamento das comportas. Este último fator, associado à lixiviação de insumos agrícolas, aplica-se diretamente a reservatórios hidrelétricos.

A eutrofização, segundo Tundisi (1994), é um fator importante no “envelhecimento” dos reservatórios no hemisfério sul, sendo comum neste processo uma fase de dominância de macrófitas aquáticas. O estudo comparativo destes processos é importante na determinação da vida útil dos reservatórios hidrelétricos.

Silva (1994), descreve o aumento dos gradientes físicos, químicos e biológicos como fator condicionante ao surgimento de compartimentos de água com características diferenciadas, que, por si, alteram a estrutura espacial do reservatório. Esta estrutura, determinante do funcionamento da represa, depende dos níveis de entrada e saída de

água, bem como do volume e área de alagamento. O balanço hídrico, neste caso, representa um importante fator ecológico, agindo na modificação dos níveis de oxigênio dissolvido e no transporte de nutrientes, organismos plantônicos e sedimentos.

Tal constatação é corroborada por Pereira Filho (1991), para o qual, grandes reservatórios dendríticos, com tipos de sub-bacias e profundidades variáveis, determinam variações espaciais na qualidade da água e condições de vida no interior dos mesmos.

2.4 – HIDROLOGIA E PARÂMETROS FISIAGRÁFICOS DE BACIA

A bacia hidrográfica, elemento básico de análise nos estudos hidrológicos, consiste em uma área de captação das águas de precipitação, caracterizada por um declive interno determinante do movimento das águas no sentido periferia-centro. Este movimento ocorre por escoamento superficial ou infiltração aos níveis freáticos. A parcela precipitação/escoamento, no âmbito do ciclo hidrológico, é a principal responsável pela dinâmica hídrica de reservatórios. Estes podem ser percebidos como receptores à jusante das águas da bacia, estando suas oscilações sujeitas às variações no regime hídrico local e a montante.

Dados fisiográficos de uma bacia hidrográfica, são aqueles que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite, sendo as mais utilizadas: área da bacia, índices de drenagem, índices de declividade e o modelo numérico do terreno (Silveira, 1997). A partir destes, são derivados outros parâmetros como: potencial hídrico, dado pela área da bacia multiplicada pela lâmina de precipitação, os índices de ordenamento dos canais de drenagem, dados pela decomposição dos índices de drenagem, mapas temáticos de escoamento e declive, dados pelo agrupamento dos índices de declividade e estimativas de volume de mananciais e transporte de sedimentos, obtidos a partir de um Modelo Numérico do Terreno.

O volume do reservatório, caso específico do presente trabalho, está condicionado à ocorrência dos processos hídricos à montante. Uma simplificação do cálculo do volume útil, em tempos de projeto, para o atendimento a uma demanda específica, de forma a possibilitar uma regularização da vazão do reservatório, é proposto por Lanna (1997):

$$S_0 + \sum_{t=1}^n q_t = N.X + S_n \quad (2.1)$$

onde S_0 é o armazenamento inicial, que, somado aos deflúvios afluentes (q_t), em “n” intervalos de tempo, seria igual à soma das cargas retiradas (“X”, nos “N” intervalos) mais o armazenamento final (S_n).

Esta simplificação desconsidera os fatores de evaporação, porém, deixa clara a relação entre o volume do reservatório e a precipitação na bacia de drenagem.

2.5 – SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

2.5.1 – O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NOS ESTUDOS DE RESERVATÓRIOS

Convencionalmente, os métodos utilizados para monitoramento de reservatórios e recursos hídricos incluem amostragens pontuais, observações de campo e compilações de dados em relatórios. A utilização de dados de sensoriamento remoto complementa estas informações e permite maior agilidade nos levantamentos, além de menor custo. Especialmente no Brasil, onde as condições hidrográficas facilitam a proliferação de reservatórios hidrelétricos, a área ocupada por estes reservatórios é muito extensa. A variação do relevo da região do reservatório, característica essencial para o aproveitamento dos recursos de vazão na geração hidrelétrica, determina um padrão dendrítico de espalhamento superficial nas feições de alagamento. Desta forma, as áreas do entorno da represa abrangem regiões de difícil acesso, dominadas por vegetação de médio e grande porte. Assim, o uso de dados de SR para estes estudos torna-se importante, uma vez que permite o reconhecimento/identificação de alvos localizados sobre grandes extensões superficiais. Os sensores imageadores que atuam na faixa do

espectro eletromagnético conhecida como espectro óptico (abrange a região do visível e infravermelho), foram os mais utilizados para levantamentos ambientais desde os primórdios do sensoriamento remoto. Os sensores ópticos utilizam a energia proveniente de uma fonte externa, no caso o sol, captando a parcela desta energia que é refletida pelos alvos imageados. Por esta razão, o imageamento por estes sensores está sujeito às interferências atmosféricas e meteorológicas. Uma formação de nuvens, chuva ou adensamento de particulados sobre o alvo impede a passagem da radiação solar incidente ou refletida, prejudicando a captação da energia refletida por este.

Uma das séries de plataformas orbitais de sensores ópticos mais bem sucedidas foi a missão LANDSAT, que colocou em órbita os sensores *Multispectral Scanner System* (LANDSAT 1, 2 e 3) e *Thematic Mapper* (LANDSAT 4 e 5). Esta missão, de indiscutível sucesso, permitiu a realização de uma série de estudos ambientais de monitoramento e avaliações quantitativas e qualitativas.

No entanto, como mostram alguns trabalhos citados a seguir, a resolução espacial dos sensores da missão LANDSAT representa um fator limitante para aplicações que exigem maior precisão planimétrica. Este é o caso das aplicações hidrológicas quando se trabalha com escalas maiores. Uma das variáveis de maior peso nas determinações de parâmetros de alagamento (área e volume) é a correta definição dos limites do reservatório. Manavalan et al. (1993) concluíram que as características físicas do reservatório (*shape factor*) e a resolução espacial do sensor interferem sensivelmente na acurácia destas determinações. Esta delimitação pode se tornar imprecisa a partir de dados de sensores ópticos, uma vez que, em áreas de alagamento onde exista uma vegetação mais densa, a resposta dos sensores ópticos muitas vezes está relacionada ao dossel de vegetação, não detectando a água abaixo deste.

Gupta e Banerji (1985) monitoraram o volume do reservatório Ramganga (Índia) utilizando imagens Landsat-MSS. O modelo apresentado tem sua acurácia baseada em dois pontos: a precisa definição terra-água e a localização, na imagem, de áreas planas nos limites do reservatório, com baixo gradiente altimétrico (*low channel gradient*), as quais seriam utilizadas como ponto de controle para o monitoramento do alagamento.

Estas áreas caracterizam melhor as oscilações do nível do reservatório ao longo do tempo.

Outros estudos realizados com dados LANDSAT, voltados para a determinação de limites de reservatórios, White (1978) e Managond et al.(1985), apresentaram resultados insatisfatórios no tocante à precisão, provavelmente relacionados com a baixa resolução espacial do sensor. Cabe salientar que tais trabalhos foram realizados a partir de imagens MSS, com resolução espacial de 80 metros. A literatura especializada não registra trabalhos desta natureza baseados na série TM da missão LANDSAT, sugerindo a não aplicabilidade destes dados na determinação de limites de reservatórios, quando o interesse maior é a precisão.

No início desta década, foram desenvolvidos e aprimorados alguns sensores que atuam na faixa de microondas do espectro eletromagnético. Dentre estes, destacam-se os que geram e emitem o seu próprio sinal, o que os torna de certa forma independentes das condições atmosféricas no processo de obtenção de imagem. São os chamados sensores ativos de microondas.

Uma vez que a geração de sinal com potência suficiente para atingir a superfície da Terra e retornar ao sistema sensor, demandaria dispositivos transmissores (antenas) de grandes proporções, fato que poderia inviabilizar sua colocação em órbita, os sistemas *Synthetic Aperture Radar* (SAR), ou *radar* de abertura sintética ganharam terreno no campo dos sensores de microondas (Ulaby et al., 1982). O termo *radar* é uma sigla derivada da expressão “*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging” e diz respeito à forma com que o sinal de microondas é refletido pelo alvo e detectado pelo receptor, permitindo a determinação da distância e direção do alvo. A abertura sintética é provida através da integração de uma sequência de pulsos ao longo da direção azimutal na geração de uma imagem, simulando uma antena de maior abertura (Figura 2.2).

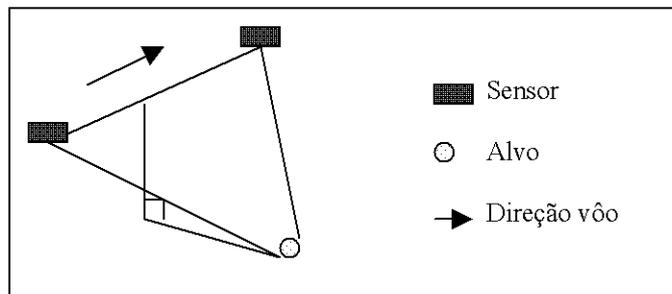


Fig. 2.2 – Representação da antena sintética SAR. O comprimento da antena sintética é dado pela distância entre a primeira e a última visada do sensor para o alvo, ao longo da linha de voo.
 FONTE: adapt. de NETGIS (1997).

Estudos em várias regiões do mundo, têm demonstrado as potencialidades dos sensores SAR no imageamento de áreas desfavoráveis ao sensoriamento óptico. Além disto, a interação das microondas com a superfície, determina padrões distintos de retroespalhamento (porção da energia espalhada na superfície e que retorna ao sensor), permitindo a discriminação de diferentes alvos, muitas vezes não detectáveis por sensores ópticos.

Assim como acontece com os sensores ópticos, os sensores SAR apresentam variações no tocante às bandas de atuação no espectro. Estas variações, associadas aos ângulos de incidência e larguras de faixa de imageamento, determinam as melhores aplicações para cada sensor.

A figura 2.3 ilustra os tipos de espalhamento característicos de imagens SAR:

- Especular – ou de superfícies lisas – no qual o sinal transmitido incide sobre uma superfície lisa, sendo refletido por esta. O ângulo de reflexão, nestes casos é igual ao ângulo de incidência;
- Difuso – no qual, o sinal transmitido incide sobre uma superfície rugosa, sendo espalhado em diversas direções;

- Double bounce/Corner reflector – similar ao espalhamento especular, porém, com nova reflexão do sinal sobre uma superfície perpendicular ao plano de incidência inicial, fazendo com que o sinal retorne na direção da fonte emissora;
- Volumétrico – espalhamento do sinal em um pacote superficial verticalmente homogêneo. O sinal penetra pela camada mais externa, sofrendo múltiplos espalhamentos dentro deste pacote superficial.

Segundo Hess et al. (1990), a banda L de sensores SAR (23,5 cm) geralmente provê boa separação entre florestas alagadas e não alagadas. Tal característica se deve à maior penetração da onda no dossel e ao efeito *double-bounce* (aumento do retroespalhamento de determinados alvos através de reflexão de canto). No caso, a onda eletromagnética penetra através do dossel, sofre um primeiro espalhamento quase especular na água, sendo direcionada para os troncos das árvores e retornando para o sensor como resposta do alvo. Tal característica torna-se importante para o estudo de reservatórios cujas margens possuam vegetação de médio e grande porte.

Resultados semelhantes foram encontrados por Richards et al. (1987), em estudos realizados com dados SIR-B. Segundo os autores, a dominância de espalhamento tronco-superfície só acontece para sensores SAR atuantes na banda L, em polarização HH, quando comparado com sensores atuantes nas bandas C e X com polarizações diversas. Nas bandas C e X, de menor comprimento de onda, o espalhamento volumétrico e a atenuação do dossel dificultam a penetração das microondas e o retroespalhamento, como função da reflexão superfície-tronco, em florestas inundadas.

A reflexão *double bounce* em florestas inundadas, possibilita a discriminação destas áreas, que, de modo geral, estão presentes nos reservatórios da bacia amazônica.

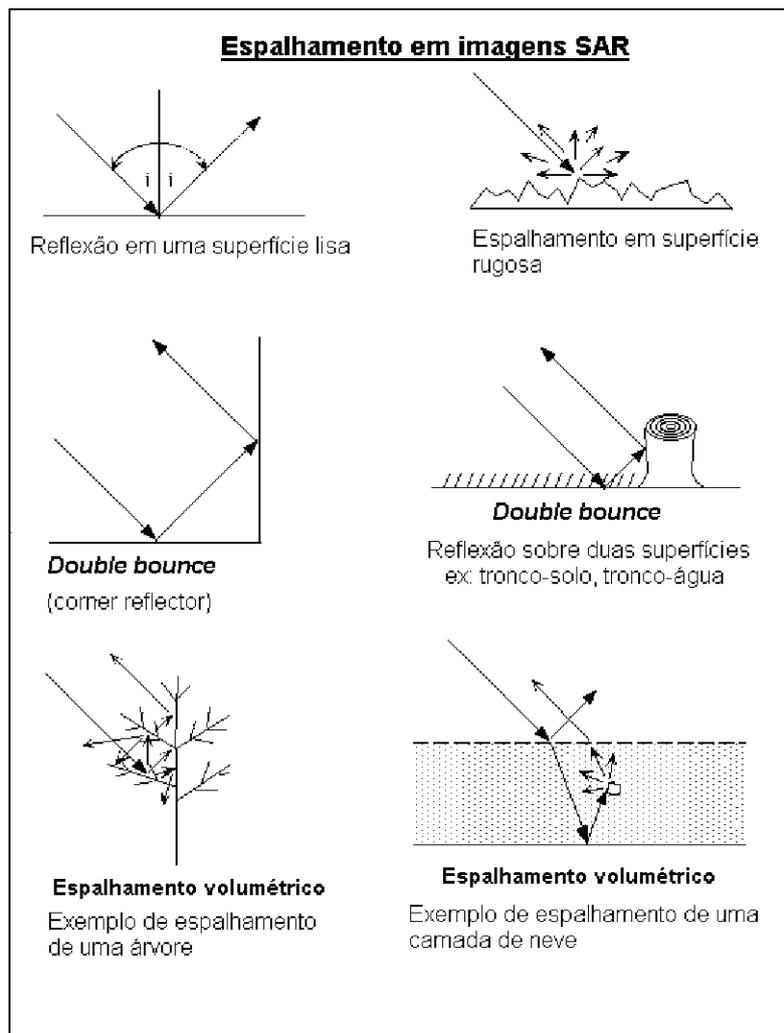


Fig. 2.3 - Espalhamento em imagens SAR.
 FONTE: adap.de Richards (1993, p. 5).

Costa et al. (1997a), trabalharam com dados SAR, Radarsat e JERS-1, na discriminação de florestas, florestas inundadas, pastagens, macrófitas aquáticas e água, no nordeste amazônico (Lago Grande), e os resultados apresentaram uma boa discriminação da classe água para ambos os sensores. Uma variação nos resultados de um e de outro, relacionados aos diferentes ângulos de incidência e comprimento de onda, são apresentados quando da discriminação de outros alvos (floresta, pastagens e macrófitas).

Novas investigações realizadas por Costa et al. (1997b) na mesma região, concluíram que o uso de composições multitemporais dos sensores SAR, Radarsat e JERS-1,

podem apresentar resultados ainda melhores devido ao caráter de complementaridade inserido pelos diferentes ângulos e comprimentos de onda.

Durante o processo de enchimento, a água represada cobre áreas com diferentes tipos de vegetação. Assim, matas de galeria, campos cerrados, pastagens e até áreas de solo exposto e rochas são cobertas pelas águas. Desta forma, a utilização de dados SAR se coloca como uma ferramenta complementar no estudo de reservatórios, dada sua capacidade de imageamento de alvos de difícil detecção por sensores ópticos.

Uma consideração importante deve ser dirigida para o *speckle* das imagens SAR. Segundo Trevett (1986), o *speckle* é o resultado de oscilações ruidosas aleatórias que se misturam ao sinal retroespalhado pelo alvo, afetando a imagem formada. O efeito observado é similar ao que se costuma chamar de *salt and pepper*, ou seja, uma grande quantidade de pontos brancos e pretos espalhados aleatoriamente pela imagem.

Ulaby et al. (1982), definem o *speckle* como um ruído de caráter multiplicativo, ou seja, quanto maior a intensidade do sinal, mais intenso é o ruído. Segundo estes, o efeito do *speckle* é mais severo nas imagens SAR, em relação a outros tipos de imagem de radar, devido à resposta em amostras independentes por *pixel*, inerente à este tipo de sensor.

Sant'anna (1995), aponta duas técnicas para a redução do ruído *speckle*: o processamento *multilook* e a filtragem espacial. A diferença entre elas está no compromisso assumido entre a quantidade de *looks* e a perda da resolução azimutal, na primeira, e entre a relação sinal-ruído e a perda da resolução, na segunda.

2.5.2 - DADOS JERS-1/SAR

A missão JERS foi concebida para monitoramento e estudos ambientais visando a cobertura de diversas áreas. Lançado em fevereiro de 1992 com dois sensores a bordo, um SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e um OPS (*Optical Sensor*), o satélite JERS-1 possuía resolução temporal de 44 dias, e espacial de 18 metros, estando em órbita polar, héliossíncrona, em uma altitude de 568 km (Tabela 2.1). Sua vida útil inicialmente prevista era de 2 a 4 anos, quando seria substituído pelo JERS-2. Recentemente foi

informada a inoperância do primeiro satélite, sendo que, até este momento, não se realizou o lançamento do segundo satélite.

O sensor SAR a bordo do JERS-1, é um sensor de microondas que atua na banda L (23,5 cm), polarização HH, cobrindo uma faixa de 75 km. A característica ativa dos sensores de microondas e sua faixa de atuação espectral, possibilitam a obtenção de dados de áreas sob condições atmosféricas limitantes à atuação dos sensores ópticos (chuvas, cobertura de nuvens, neblina, entre outros fatores).

TABELA 2.1: PROPRIEDADES DO SENSOR JERS-1/SAR

Altura de órbita	568 km
Ângulo de incidência	35°
Resolução espacial	18 metros
Largura de faixa imageada	75 km
Frequência	1275 Mhz
Inclinação da órbita	98°
Frequência de recobertura	44 dias
Horário de aquisição	10:30-11:00

FONTE: NASDA (1998).

2.5.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS

2.5.3.1 – FILTRAGEM

A filtragem de uma imagem é uma técnica utilizada para suavizar ou realçar feições de interesse na mesma, caracterizando um pré-processamento. Em síntese, trata-se de um mecanismo que realiza uma recomposição, pixel a pixel da imagem, conforme uma máscara ou padrão definido.

Conforme citado anteriormente, o *speckle*, ruído com efeito multiplicativo sobre a imagem, representa um inconveniente nas imagens SAR. As operações de filtragem, neste caso, geralmente são necessárias para se tentar minimizar o efeito deste ruído sobre o processamento das imagens.

Uma diversidade de tipos de filtros encontram-se disponíveis para a utilização no tratamento de imagens digitais. Estão disponíveis desde filtros conceitualmente mais simples, como os de média e mediana (Richards, 1993; Eliason e McEwan, 1990; Jain, 1989), filtros adaptativos de Frost, Lee e Kuan (Sant'anna, 1995; NETGIS, 1997), até filtros robustos, baseados em modelos autorregressivos (Soares, 1998; Dutra, 1990). Salientam-se os listados a seguir, com uma breve descrição de cada um, devido à ampla utilização no tratamento de imagens SAR e à disponibilidade dos mesmos no programa SPRING:

- Filtro linear passa-baixa – promove uma suavização generalizada da imagem através da adoção de um valor médio para a região da imagem à qual foi aplicada a máscara. Também chamado de filtro de média.
- Filtro morfológico de mediana – para a máscara aplicada, adota o valor da mediana dos pixels da imagem, suavizando a imagem. As informações de borda são menos afetadas.
- Filtro de Frost – filtro adaptativo que incorpora a dependência estatística do sinal original e preserva a estrutura de bordas.
- Filtro de Lee – filtro adaptativo linear que adota um modelo multiplicativo para o ruído. O resultado da linearização transforma o modelo multiplicativo em aditivo, ou seja, o ruído e o sinal tornam-se independentes.

Richards (1993), aponta o filtro de mediana como uma técnica alternativa ao filtro de média, para a suavização da imagem quando se necessita da manutenção das bordas. Segundo este, a remoção de ruídos impulsivos em tons brancos e pretos, é um exemplo de aplicação na qual se enquadra bem o uso de um filtro de mediana.

Sant'anna (1995) testou vários filtros para aplicações em imagens SAR. De acordo com este autor, o filtro de Frost, aplicado a uma imagem SAR tem características superiores aos demais testados, dentre eles os de média, mediana, Lee e Kuan, no que se refere à menor perda de resolução e aumento da relação sinal-ruído. Recomenda, no mesmo

trabalho, a utilização do filtro de Frost, caso o critério adotado seja a detecção de bordas.

Cabe ressaltar que o filtro ideal para o presente estudo é aquele que mantenha as feições características de borda, suavize o ruído *speckle* e não provoque o deslocamento dos pixels da imagem.

2.5.3.2 – SEGMENTAÇÃO

A segmentação, é a divisão em partes bem delimitadas de um conjunto, no caso a imagem. No contexto do processamento de imagens, os segmentos, ou partes de um todo, representam regiões com características distintas das regiões adjacentes, determinada por atributos como área, perímetro, variância e média, dentre outros.

Ballard e Brown (1992), descrevem uma segmentação do domínio R , de uma imagem, como um conjunto finito de regiões, tal que a união de todas as regiões compõe o domínio R e as intersecções entre regiões distintas resultam num conjunto vazio.

Existem várias técnicas desenvolvidas e em desenvolvimento para a segmentação de imagens. Segundo Gonzalez e Wintz (1987), estas técnicas, em geral, se baseiam em duas características da distribuição dos tons de cinza em uma imagem digital: a descontinuidade e a similaridade. A primeira se baseia na mudança abrupta dos níveis de cinza e a segunda, no agregamento de pixels considerando sua semelhança com os pixels vizinhos.

Um algoritmo de segmentação de imagens, baseado no método da similaridade/crescimento de regiões, foi desenvolvido e incorporado ao programa SPRING (Netgis, 1997). Por este processo, rotula-se inicialmente cada pixel como uma região distinta. A partir daí, são feitos testes estatísticos que comparam a média entre as regiões adjacentes, aos pares, agregando regiões similares, seguindo um critério previamente determinado. Este critério, baseado na distância euclidiana (d) entre dois pixels, X_1 e X_2 ,

$$d(x_1, x_2) = \{(x_1 - x_2)^t (x_1 - x_2)\}^{1/2} \quad (2.2)$$

representa um limiar superior de similaridade, abaixo do qual duas regiões são consideradas similares.

Um segundo critério definido previamente pelo usuário é a área mínima (em número de pixels) a ser considerada para a determinação das regiões.

Com base nestas considerações, a relação que se pode inferir é a da existência de um número maior de regiões, ou segmentos da imagem, quanto menores forem os índices de similaridade e área escolhidos.

Ao final da segmentação, a imagem estará simbolicamente representada por uma lista de regiões e seus atributos, uma lista de arcos (limites entre regiões) e atributos e uma lista de nós (encontro de regiões) (Erthal et al., 1991).

Segundo Nascimento (1997), o tempo de processamento para a segmentação é diretamente proporcional ao tamanho da imagem (dado pelo número de linhas e colunas) e inversamente proporcional aos limiares definidos.

A avaliação da segmentação pode ter um caráter qualitativo, através de análise visual. Por este método, sobrepõe-se uma janela móvel (acoplamento) da imagem segmentada sobre a imagem original, fazendo que este *overlay* percorra a imagem, permitindo o acompanhamento do usuário. Este recurso está disponível no SPRING.

2.5.3.3 – CLASSIFICAÇÃO

A classificação é o processo de atribuição de elementos de imagem à classes homogêneas em relação a estes elementos. O processo pode ser supervisionado ou não supervisionado, com relação à influência do usuário na classificação. O primeiro caso exige uma etapa de treinamento do algoritmo de classificação através da indicação, pelo usuário, de classes de seu conhecimento. Com base nestas definições, o algoritmo

classifica os demais pixels ou regiões da imagem. O segundo processo é automático, ou seja, o usuário apenas define limites de tolerância para a confusão que o classificador possa gerar ao determinar as classes. Os critérios adotados para a atribuição de pixels ou regiões às classes, definem os diversos tipos de classificadores.

A classificação de imagens SAR é bastante sensível ao *speckle* presente nestas. Além do *speckle*, os níveis digitais de imagens SAR geralmente não possuem distribuição gaussiana, pressuposto de boa parte dos algoritmos de classificação disponíveis.

Dada a complexidade das imagens SAR, torna-se difícil definir previamente um classificador ótimo para a imagem e para o objetivo em estudo. Geralmente vários testes são realizados, adotando-se o método que melhor se aplica a cada caso.

Dentre os classificadores disponíveis para aplicação em imagens SAR destacam-se aqueles que se baseiam em parâmetros estatísticos da imagem ou os que associam informações contextuais à classificação. A primeira abordagem considera, para efeitos de classificação, a pertinência de um pixel a uma classe baseado nas propriedades do pixel. Já os do segundo tipo, classificadores contextuais, procuram associar dados da vizinhança dos pixels que estão sendo classificados.

Um dos classificadores comumente utilizados é o classificador estatístico de máxima verossimilhança (MAXVER). Por este estimador, define-se a probabilidade de um pixel pertencer a dada classe, com base em parâmetros estatísticos desta. O classificador MAXVER implementado no programa SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), pressupõe distribuições gaussianas para as classes a serem definidas. Antes da classificação, é realizado o treinamento, no qual são adquiridas as médias e matrizes de variância e covariância, de forma a orientar o processo de classificação a partir de áreas previamente conhecidas.

Porém, a distribuição dos níveis digitais em imagens SAR nem sempre é gaussiana. Uma comparação entre classificações com base em distribuições gaussianas e aquelas ajustadas às classes foi realizada por Vieira (1996). Segundo este, as classificações que

utilizam distribuição ajustada para cada classe apresentam resultados superiores àquelas que pressupõem normalidade, para dados JERS-1/SAR.

Dutra (1990), realizou testes de implementação de um classificador textural baseado em modelos *ARMA* (modelos autorregressivos de média móvel), aplicado a imagens SAR580 e SPOT. Os resultados apontaram uma melhoria do processo de classificação quando as feições texturais possuem boa distinção entre si e pertencem a regiões amplas (do ponto de vista da homogeneidade). Porém, a aplicação do modelo às imagens SAR, não apresentou avanços relevantes devido ao mascaramento de texturas naturais pelo ruído *speckle*. Soares (1998), obteve bons resultados na utilização de modelos autorregressivos em um processo de pré-classificação (filtragem com filtros inversos autorregressivos), aplicados a uma imagem JERS-1/SAR. No caso, a comparação se fez sobre a classificação de imagens originais e de imagens filtradas segundo o método citado.

Outro classificador que tem apresentado bons resultados para imagens SAR é o de semivariograma, descrito por Curran (1988). Trata-se da análise textural através de valores de semivariância que denotam a distinção entre pixels separados por um intervalo (*lag*).

Baseado em estudos de aplicação da classificação por semivariogramas a imagens JERS-1/SAR, Miranda et al. (1998) reportam a boa capacidade deste, na identificação de unidades de vegetação e água, uma vez que apresentam assinaturas distintas em semivariogramas.

A classificação por crescimento de regiões é outra técnica de classificação de imagens que vem sendo utilizada como alternativa para a classificação de imagens SAR. Baseada em informações contextuais obtidas por um processo prévio de segmentação da imagem e amostras de treinamento (no caso de classificação supervisionada), o classificador determina o agrupamento dos pixels ou regiões nas classes anteriormente definidas. Para isto existem vários métodos, cada qual utilizando um critério para a determinar o agrupamento de pixels a uma dada classe. Richards (1993), aborda alguns métodos de classificação por mínima distância, determinados por diversas funções,

dentre as quais destacam-se a distância de Mahalanobis, do pixel “**X**” à média da classe “**i**”,

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{m}_i) = (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)^t \Sigma_i^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i) \quad (2.3)$$

onde “**x**” é o vetor dos níveis digitais do pixel, “**m_i**” é o vetor de médias da classe “**i**” e “**Σ_i**” é a matriz de variâncias e covariâncias da classe “**i**”; e a distância de Bhattacharya,

$$d(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = 1/8 (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)^t \{ (\Sigma_i + \Sigma_j) / 2 \}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) + \\ + 1/2 \ln \{ [|(\Sigma_i + \Sigma_j) / 2|] [|\Sigma_i|^{1/2} |\Sigma_j|^{1/2}]^{-1/2} \} \quad (2.4)$$

onde “**m_k**” corresponde ao vetor de médias da classe “**k**” e “**Σ_k**” é a matriz de variâncias e covariâncias da classe “**k**”.

Os classificadores que utilizam as equações acima, chamados de classificadores de mínimas distâncias, realizam a classificação determinando a pertinência dos pixels ou classes àquelas classes cuja distância “**d**” seja menor que um limiar determinado.

Outra hipótese de classificação, quando o interesse está em uma região contígua no interior da imagem, com diferenças marcantes no tocante aos níveis digitais de cinza em relação ao restante da imagem, é a limiarização. Esta técnica consiste em determinar um intervalo de níveis de cinza, fora do qual os pixels da imagem são elevados a um valor de contraste. Geralmente utiliza-se o valor 255 para imagens de 8 *bits*. O resultado é a permanência na imagem resultante de valores que estejam dentro do intervalo especificado, procedendo-se a identificação da classe desejada.

2.5.4 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT)

Parte do trabalho desenvolvido incluiu a geração de um modelo de superfície, necessário para a determinação dos parâmetros de alagamento do reservatório. Este

modelo, conhecido como Modelo Numérico do Terreno (MNT), representa a distribuição espacial tridimensional (num sistema de eixos x , y e z , por exemplo, onde x e y seriam as coordenadas cartesianas do plano e z , a cota do parâmetro de interesse) dos dados em estudo. Dois métodos para a geração de modelos digitais de elevação são normalmente os mais empregados: o modelo de grade retangular regular e o modelo de malha triangular. Enquanto o primeiro é obtido pela geração de uma malha poliédrica baseada em polígonos regulares, o segundo advém de uma malha irregular de triângulos.

Segundo Namikawa (1995), os modelos de malha triangular permitem uma representação mais fiel da distribuição superficial em regiões com linha de quebra de relevo acentuadas, devido à redução de redundâncias na geração do modelo. Isto é possível com a geração de malhas mais finas em regiões de grande variação (da cota z) e mais espaçadas em regiões planas. No entanto, o custo computacional dos modelos de malha triangular é alto. Em estudo de um modelo de malha triangular, Felgueiras et al. (1989), encontraram uma relação exponencial entre o tempo de processamento e o número de amostras utilizadas, ou seja, quanto maior o número de amostras, exponencialmente maior é o tempo de processamento.

A extração de dados hidrológicos a partir de modelos numéricos de terreno tem sido estudada desde a década de 70. Peucker e Douglas (1975), conseguiram caracterizar pontos específicos na superfície para a extração de informações de relevo, a partir de uma grade retangular, praticamente iniciando estudos neste sentido. Marks et al. (1984), trabalharam com delineamentos de bacia a partir de modelos numéricos de terreno, utilizando uma janela de 3x3 células sobre a matriz, para rastrear depressões com base na vizinhança de células. Wichel et al. (1992), obtiveram sucesso ao determinarem associações de sub-bacias a partir de um Modelo Numérico de Terreno, além de calcular o volume total de água e determinar a localização e a altitude do exutório da bacia.

Segundo Benosky e Merry (1995), os cálculos de área e perímetro através de representação matricial, têm sua precisão determinada pela resolução do modelo, ou, em outras palavras, pela representação espacial correspondente a uma célula do modelo. No

entanto, para áreas de maior dimensão, os erros associados à resolução do modelo devem ser de escala menor que os erros sistemáticos relacionados à obtenção das amostras.

De acordo com Sallum (1998), o modelo usado pela ELETRONORTE para cálculo de volume adota a equação:

$$V = Eq/3 \cdot [Ax + Ay + (Ax \cdot Ay)^{1/2}] \quad (2.5)$$

onde “V” corresponde ao volume total entre as cotas base de “Ax” e “Ay”, que são, respectivamente as áreas internas dos planos definidos pelas curvas de nível “x” e “y”. “Eq” é a equidistância entre estas curvas de nível.

O método utilizado pela U.S. Army Corps of Engineers, segundo Tingle (1998), é similar ao descrito no parágrafo anterior. Ou seja, através de dados de planimetria e altimetria são obtidas as áreas para dadas elevações. A área calculada é multiplicada pela elevação para se obter o volume contido entre as cotas desejadas.

O volume obtido através da equação 2.5, acima, corresponde ao volume de um “tronco de cone”, onde “Ax” representa a área da base, “Ay” representa a área de uma seção horizontal paralela à base e “Eq” seria a altura entre as seções (Sant’anna, 1999).

Um método de cálculo de volume a partir de grades retangulares foi proposto por Rosim e Namikawa (1996). Este método utiliza polígonos para delimitar a região de interesse para o cálculo de volume. Às células de uma grade retangular, dada pelo MNT, internas a este polígono base, é aplicado um cálculo considerando a área da base multiplicada pela altura (cota z). O volume total é obtido através do somatório dos volumes das células:

$$V = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot z_i) \quad (2.6)$$

onde “V” corresponde ao volume total, “A_i” é a área da base da célula “i” e “z_i” é a cota correspondente à célula “i”. A vantagem deste método é a de associar o cálculo de

volume ao MNT. A resolução ou precisão do método está atrelada à resolução do MNT, ou seja, quanto menor for a área representada por cada célula da grade, maior será a precisão do modelo.

A função de cálculo de volume implementada no *software* ARC/INFO (ESRI, 1991), é baseado em um modelo de malha triangular irregular (*TIN*). É realizada uma interpolação linear para calcular o volume das feições superficiais entre uma cota base especificada e o ponto mais alto do modelo de malha triangular. Assim como no programa SPRING (Netgis, 1997), a função requer um limite superficial, para o cálculo, previamente definido. No entanto, esta definição deve ser considerada na momento da criação do modelo *TIN*, não podendo ser modificada posteriormente.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa está localizada no norte do Estado de Goiás, na cidade de Minaçu (13°50' S / 48°18' W) (Figura 3.1).

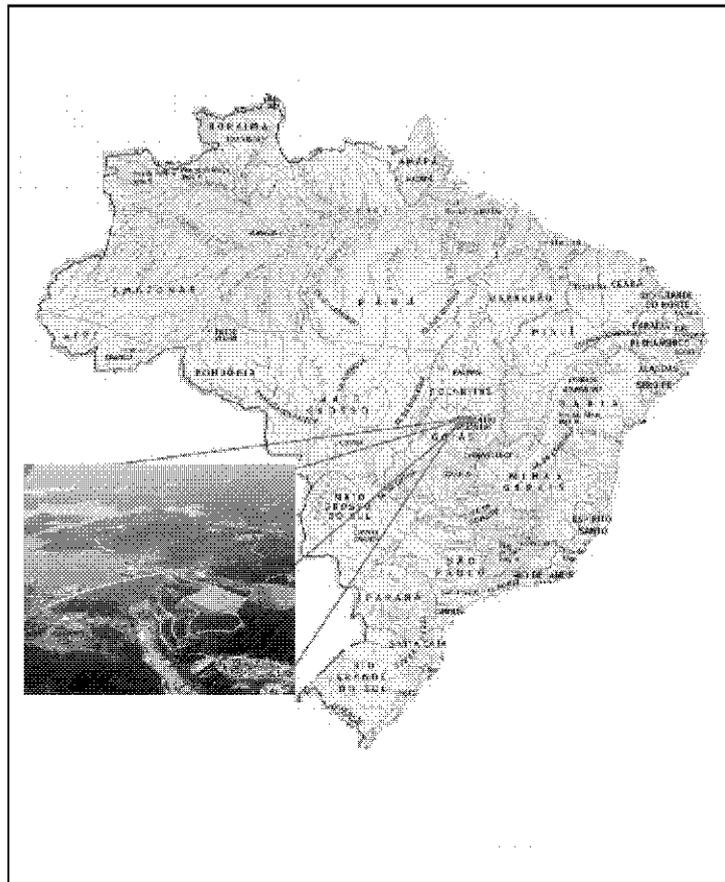


Fig. 3.1 - Área de estudo: Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa - Minaçu/GO

Trata-se de um represamento do rio Tocantins em sua porção mais à montante. Envolve a descarga dos três principais tributários da nascente do Tocantins: rio Bagagem, rio Maranhão ou Tocantinzinho e rio Claro.

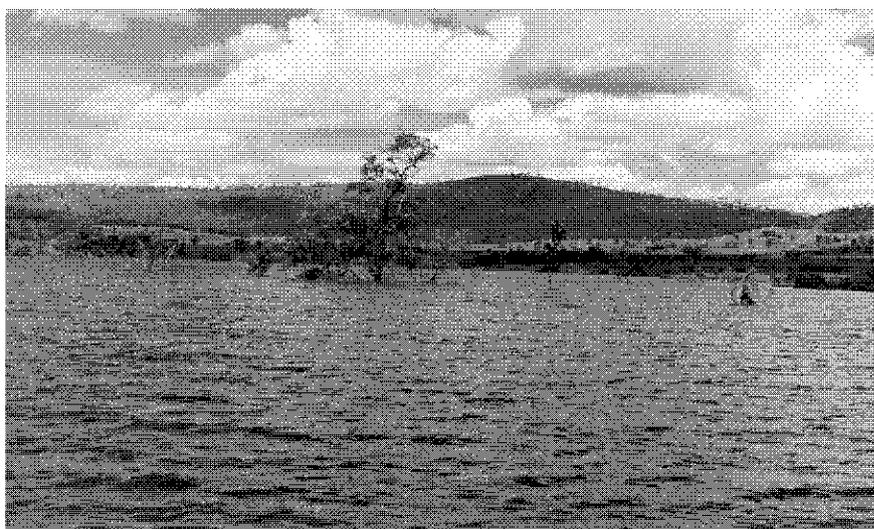
A área de abrangência do reservatório compreende uma porção crustal antiga (anterior ao pré-cambriano), com formações de interesse geológico-econômico. No entanto, boa parte destes recursos continuará disponível por estar em locais com altitude bem mais elevada que a cota máxima do reservatório. É o caso do complexo Niquelândia, que margeará dois grandes braços da represa.

Algumas formações sedimentares recentes são encontradas à jusante da região de alagamento. O solo predominante no local é do tipo latossolo vermelho-amarelo distrófico, que cobre boa parte do Planalto Central Goiano.

O relevo apresenta variações rápidas com formas aguçadas, com diferentes ordens de grandeza, separadas geralmente por vales em “V”. A vegetação predominante é o cerrado típico, arbóreo aberto com florestas de galeria e presença mínima de trechos com vegetação densa (Projeto RADAMBRASIL, 1981) (Figura 3.2).

Esta característica de relevo propicia o alagamento em forma dentrítica, favorecendo o surgimento de compartimentos ou corpos d’água, alguns com comportamento estanque em termos de hidrodinâmica.

Uma grande variação do nível do reservatório pode ser estabelecida pelo regime hídrico da região. As cotas pré-definidas como mínima e máxima são 413 e 460 metros, respectivamente, afetando conseqüentemente o volume e a vazão da represa, alternadamente, em épocas secas e chuvosas.



(A)



(B)

(C)

Fig. 3.2 – Fotografias do reservatório: (A) visão panorâmica da margem direita do reservatório; (B) vista aérea do reservatório; (C) vista aérea da barragem.

A região de abrangência do reservatório mantém as condições climáticas peculiares ao centro oeste brasileiro, apresentando uma estação chuvosa no verão, com médias de

precipitação mensal em torno de 250-350 mm, e uma estação seca no inverno, quando a média cai para 0-25 mm mensais.

A forte seca que acontece nos meses de julho-agosto-setembro determina uma espécie de “ciclo do fogo”, quando ocorrem grandes queimadas na região. A vegetação começa a se regenerar no início de novembro e atinge um máximo de produção no fim do verão.

Estas variações são importantes do ponto de vista do analista de dados de sensoriamento remoto, uma vez que estes padrões podem afetar a imagem de diversas formas.

3.2 MATERIAL

Os dados trabalhados foram disponibilizados pela empresa FURNAS S.A.:

- Levantamento topográfico na forma de mapas com escala de 1:25.000, curvas de nível a cada 5 metros e linhas mestras a cada 25 metros (48 mapas);
- Pontos de controle cota-dia, obtidos com GPS e linímetro (Tabela 3.1);
- Imagens JERS-1/SAR da região, com resolução final de 18 metros, obtidas durante o período de alagamento (identificadores 388-324/389-324, datas de aquisição: 04.03.97 e 19.11.97) (Figuras 3.3 e 3.4);

TABELA 3.1: RELAÇÃO COTA-DIA DA UHE SERRA DA MESA

Data	Cota
04.03.97	414,00 metros
19.11.97	439,77 metros
20.12.98	446,00 metros

O trabalho foi desenvolvido no INPE, contando com a utilização dos seguintes recursos:

- Estações de trabalho e *softwares* de tratamento de imagens e geoprocessamento (SGI e SPRING);

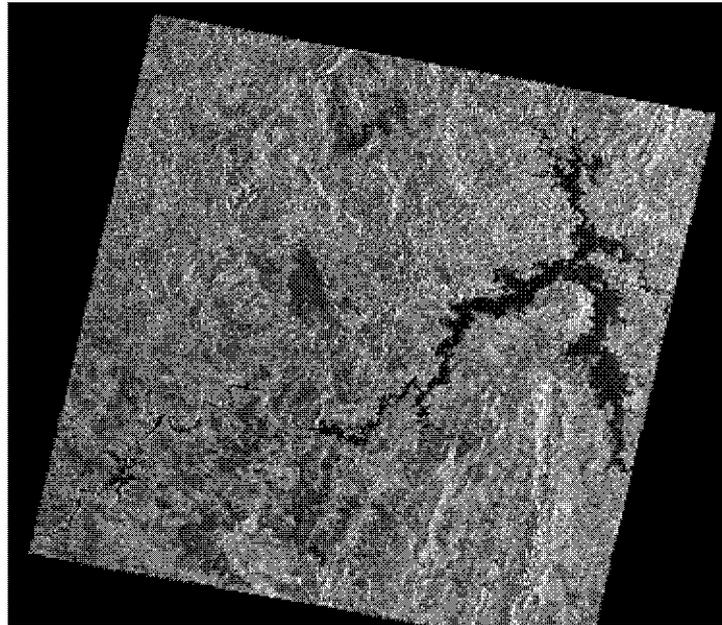


Fig. 3.3 – Imagem JERS-1/SAR da região da UHE Serra da Mesa, identificador 389/324, obtida em 04.03.97.

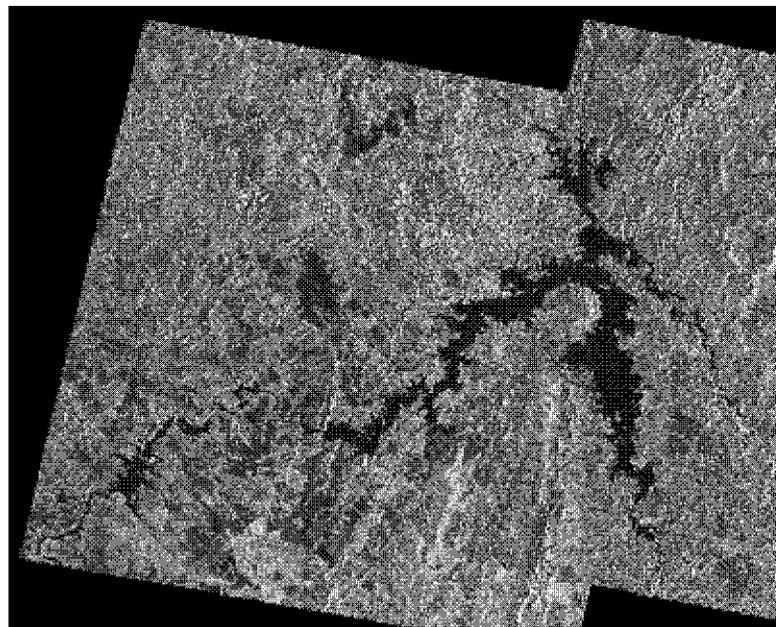


Fig. 3.4 – Mosaico de imagens JERS-1/SAR da região da UHE Serra da Mesa, identificadores 388/324 e 389/324, obtidas em 19.11.97.

3.3 - METODOLOGIA

O trabalho pode ser caracterizado em 3 etapas, conforme esquema metodológico apresentado na Figura 3.5.

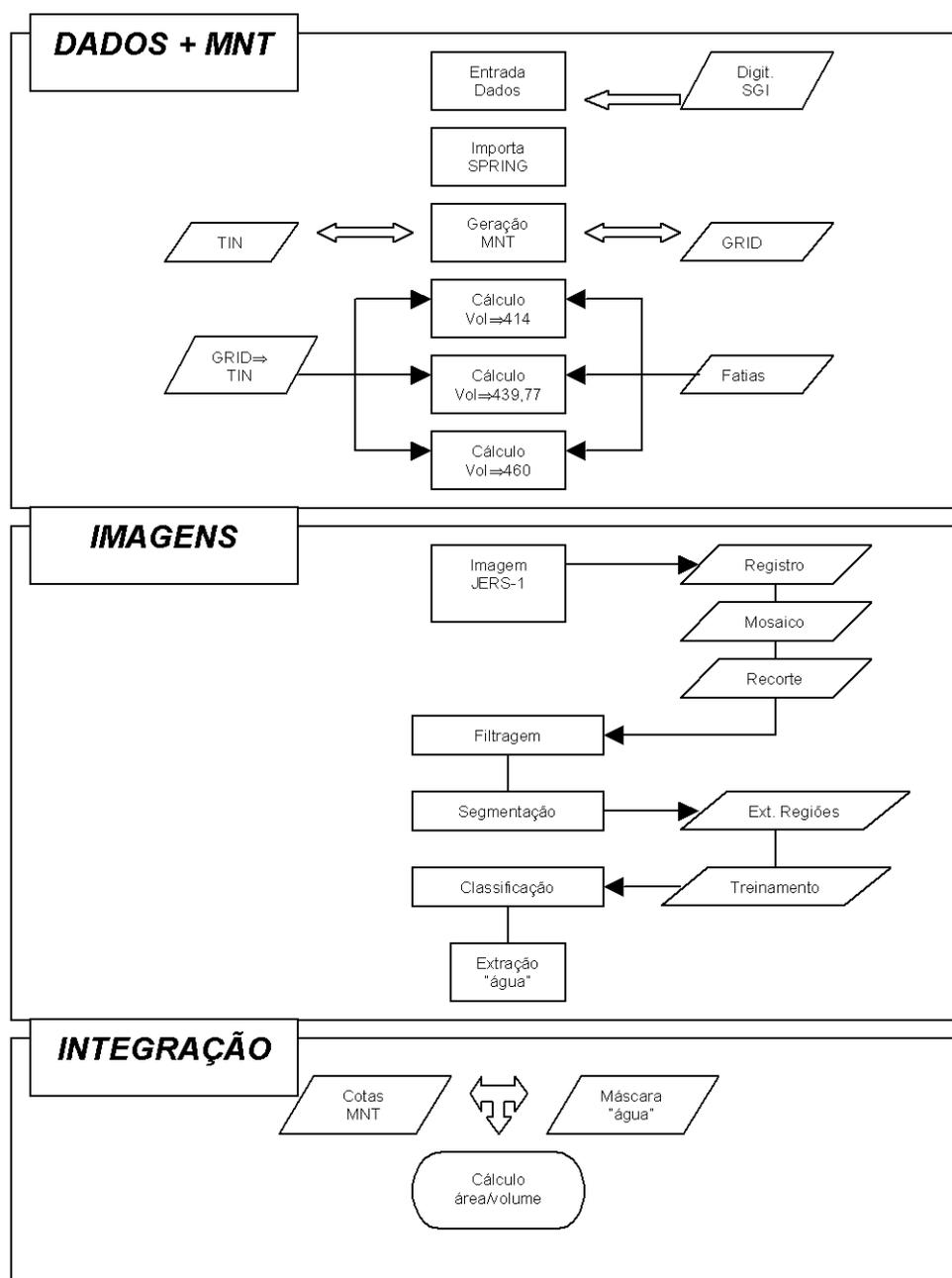


Fig. 3.5 – Esquema metodológico

Todo o processamento, exceto a digitalização dos dados topográficos, feita no programa SGI (Engespaço, 1987), foi realizado no programa SPRING (Netgis, 1997). Os passos são descritos a seguir, com base na ordem cronológica do desenvolvimento do trabalho.

3.3.1 – ENTRADA DE DADOS

Inicialmente foi realizada a digitalização das curvas de nível (mestras) e pontos dos mapas topográficos (escala de 1:25000) com suas respectivas cotas. Para isto foi utilizado o programa SGI (Engespaço, 1987). Este programa trabalha sob sistema operacional DOS, estando disponível em plataforma PC. A entrada de dados pelo SGI evita a instabilidade do ambiente de rede, seja por menor exigência de memória, seja por trabalhar em modo *stand alone*.

Em seguida, procedeu-se à exportação dos dados para o programa SPRING (Netgis, 1997), através de interfaces de exportação e importação de dados.

3.3.2 – GERAÇÃO DE MNT E LEVANTAMENTO DE ÁREA E VOLUME

Foram gerados os modelos numéricos de terreno, utilizando os modelo de grade regular por média ponderada/cota/quadrante dos 8 vizinhos mais próximos e de malha triangular por geração de isolinhas, sem linhas de quebra (tolerância de isolinhas = 10 metros, distância entre pontos de isolinhas = 5 metros, distância entre linhas de quebra = 10 metros, menor aresta = 1 metro). Para isto, a área do reservatório foi dividida em 6 sub-áreas, de forma a distribuir o esforço computacional para a geração do MNT. As sub-áreas foram definidas a partir dos seguintes retângulos (coordenadas planas):

- Sub-área 1: (X1, Y1);(X2, Y2) = (692000,8365000); (732000,8405000)
- Sub-área 2: (X1, Y1);(X2, Y2) = (702000,8405000); (752000,8450000)
- Sub-área 3: (X1, Y1);(X2, Y2) = (752000,8415000); (777000,8460000)
- Sub-área 4: (X1, Y1);(X2, Y2) = (777000,8425000); (817000,8460000)
- Sub-área 5: (X1, Y1);(X2, Y2) = (787000,8395000); (817000,8425000)
- Sub-área 6: (X1, Y1);(X2, Y2) = (769500,8460000); (790500,8485000)

As sub-áreas podem ser visualizadas na Figura 3.6:

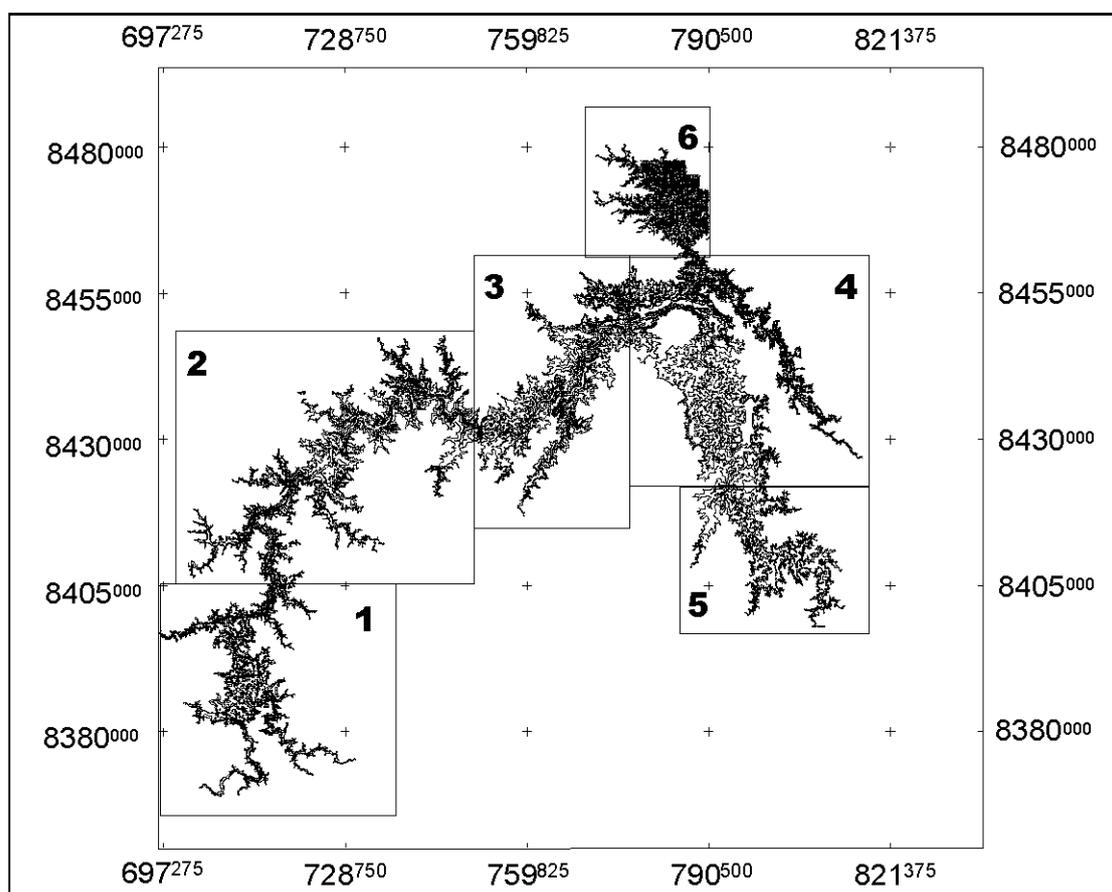


Fig. 3.6 - Mapa de isolinhas da UHE – Serra da Mesa (coordenadas planas em milhares de metros).

As grades retangulares foram fatiadas, para geração das áreas base para cálculo do volume nas cotas 414 (cota-dia relativa à imagem do dia 04.03.97), 439,77 (cota-dia relativa à imagem do dia 19.11.97) e 460 (cota máxima projetada). Para esta última (460 metros), em função da inexistência da mesma em algumas cartas topográficas, foram calculados os resultados da cota 450 e extrapolado o valor para a cota 460 utilizando-se de uma reta de regressão linear, envolvendo os resultados da demais cotas (fórmulas no Apêndice A).

Procedeu-se então ao cálculo da área e volume de alagamento para as cotas estabelecidas. O algoritmo para determinação de volume implementado no SPRING (Netgis, 1997) realiza o cálculo a partir de grades regulares. Porém, de forma a utilizar a melhor representação dos modelos de triangulação para superfícies irregulares, optou-se pela geração de malhas triangulares para as 6 sub-áreas e posterior conversão destas para grades retangulares, que serviram de base de entrada para o cálculo do volume.

Para o cálculo das áreas, foram feitas operações de fatiamento das grades retangulares nas cotas desejadas. Esta operação gerou planos de informação temáticos, a partir dos quais foram calculadas as áreas nas diferentes cotas de alagamento.

3.3.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS

As imagens geradas pelo sensor JERS-1/SAR são fornecidas em 16 *bits*. Para o trabalho no SPRING (Netgis, 1997), as imagens foram convertidas para o padrão 8 *bits*. Para isto foi utilizado o programa “CUT_TAIL”, desenvolvido pela equipe da Divisão de Processamento de Imagens (DPI/INPE). Este programa elimina os *percentis* superior e inferior do histograma da imagem e reescala os *pixels* dentro de um *range* de 256 níveis digitais. As imagens resultantes, apresentaram curvas de distribuição de níveis digitais visualmente similares a curvas gaussianas.

3.3.3.1 – REGISTRO E MOSAICO DAS IMAGENS

O registro das imagens JERS-1 SAR foi feito com base em pontos de controle identificados nas cartas topográficas. Para a imagem da primeira data (04.03.97 – 389324), foram definidos 15 pontos de controle, sendo utilizados 6 destes para o ajuste geométrico com polinômio de 1º grau. O erro dos pontos de controle foi de 0,346 pixels. As imagens posteriores (19.11.97 – 389324/388324) foram registradas a partir da primeira imagem, já que havia boa sobreposição destas duas. O erro de registro para estas duas imagens foi de 0,176 e 0,245 respectivamente.

Em seguida, montou-se um mosaico das imagens 388324 e 389324, obtidas em 19.11.97 (Figura 3.4), de modo a se abranger toda a lâmina d'água.

Optou-se ainda, na fase de pré-processamento, por fazer um “recorte” nas imagens, de forma a se otimizar o processamento pelo ganho de tempo durante o mesmo. Para isto, foi implementado um algoritmo em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), (NETGIS, 1997), cuja descrição encontra-se no Apêndice B deste trabalho. Esta operação foi possível devido à contiguidade da informação a ser extraída das imagens, no caso a máscara água.

3.3.3.2 – FILTRAGEM

Foram testados os filtros: média, mediana, Frost e Lee, para determinação do filtro de melhor rendimento, conforme análise qualitativa, com relação à manutenção das bordas, suavização do *speckle* e não deslocamento de *pixels*.

Os parâmetros utilizados para cada filtro, bem como uma breve descrição do resultado visual da filtragem (Figura 3.7), são apresentados a seguir (as características citadas estão apontadas por setas nas figuras):

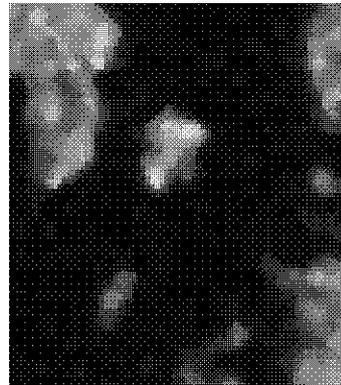
- Filtro de média (1 iteração, janela de 3x3) – este filtro provocou uma grande suavização das feições internas da imagem, bem como das bordas. As áreas com limites bem definidos (ilhas) sofreram pequena retração das bordas;
- Filtro de mediana (1 iteração, M_{tot} , janela de 3x3) – suavizou bem o *speckle* da imagem, sem prejudicar sobremaneira as feições internas. Pouca ou nenhuma alteração foi notada nas bordas;
- Filtro de Frost (adaptativo, coef. correl. 89%, janela 3x3) – suavizou bastante o *speckle*, sem prejudicar de forma acentuada as feições internas. Conservou bem as bordas, porém produziu um pequeno deslocamento de feições características da imagem (deslocamento para sudoeste);



(A)



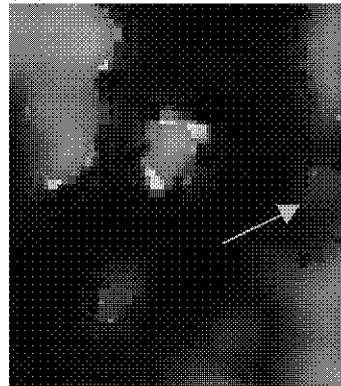
(B)



(C)



(D)



(E)

Fig.3.7 – Visualização das filtragens sobre as imagens JERS-1/SAR. A) Imagem original; B) Filtro de média; C) Filtro de mediana; D) Filtro de Frost; E) Filtro de Lee.

-Filtro de Lee (adaptativo, 1 look, janela 3x3) – provocou boa suavização da imagem, de certa forma homogeneizando algumas feições. Conservou parte das

bordas, porém, algumas áreas menores desapareceram. Notou-se também um pequeno deslocamento das feições características da imagem (sudeste);

O filtro de Frost produziu bons resultados no tocante à manutenção de bordas e suavização do ruído da imagem. De certa forma, corrobora-se aqui os resultados encontrados por Sant'anna (1995). No entanto, devido ao deslocamento provocado pelo filtro de Frost em feições características da imagem, e isto tem implicações no cálculo de volume, optou-se pela utilização do filtro de mediana, o qual também apresentou bons resultados quanto à suavização do ruído e manutenção de bordas, sem provocar o deslocamento de feições internas.

3.3.3.3 – SEGMENTAÇÃO

Para a segmentação das imagens foi utilizado o método da mínima distância euclidiana aplicado ao crescimento de regiões, discutido anteriormente. Para isto, foram testados os limiares de similaridade e área que melhor representaram as feições do reservatório durante o processo de segmentação.

Alguns trabalhos anteriores definiram pares ideais (similaridade/área) para a segmentação de imagens JERS-1/SAR aplicados a estudos de separabilidade de alvos. Boa parte destes trabalhos são sobre florestas e dizem respeito à distinção entre classes de vegetação (florestas, matas de galeria, áreas desflorestadas, pastagens, etc.), sendo que a relação geralmente sugerida é em torno de 8 a 12 para similaridade e 10 a 20 para área. A aplicação do par *default* 8/10, proposto na interface do programa gerou um número muito grande de polígonos em áreas de pouco interesse para este estudo.

O par que melhor representou as feições limítrofes do reservatório, sem no entanto gerar um número muito grande de polígonos, foi 15 para similaridade e 45 para área, sendo este o par adotado para a segmentação das imagens.

3.3.3.4 – CLASSIFICAÇÃO

Foram feitos alguns testes com classificadores para as imagens JERS-1/SAR, objetivando determinar um classificador que permitisse extrair, com boa definição, os limites do reservatório. Uma vez que o escopo do presente trabalho não abrange o teste de desempenho de classificadores, este procedimento foi interrompido tão logo se encontrou um classificador que atendeu à consideração anterior.

Foram testados os seguintes classificadores, com seus respectivos parâmetros:

- Classificador estatístico gaussiano paramétrico por máxima verossimilhança MAXVER (limiar de aceitação = 95%);
- Classificador ICM (*Iterated Conditional Modes*) (peso = 2; limiar = 5);
- Classificador por crescimento de regiões – distância de Bhattacharyya (limiar de aceitação = 75%);

Os testes foram realizados para uma área central do reservatório, a qual continha todas as feições da imagem de interesse no processo de classificação. Definiu-se, para fins de classificação supervisionada, a separação em duas classes: água e não-água.

Diante da inexistência de dados de campo que pudessem servir de parâmetros para a classificação, o desempenho dos classificadores foi determinado por matrizes de confusão baseadas nas amostras de treinamento. De acordo com estas análises, notou-se um ótimo rendimento por parte dos três classificadores. A média de acerto para as classificações por pixel (máxima verossimilhança e ICM) foi de 99,38%, sendo que a classificação pelo classificador de máxima verossimilhança apresentou uma confusão média menor: 0,49%.

O classificador por regiões apresentou um índice de confusão igual a zero para o limiar adotado. Este índice, no entanto, não significa à rigor uma classificação com 100% de acerto. O erro associado a esta está nas determinações das bordas. No caso, esta estimativa não é possível devido a inexistência de dados de campo confiáveis em

relação aos limites do reservatório. A confirmação da qualidade da classificação foi feita com base nas informações das cartas do IBGE, exclusivamente para a primeira imagem. A curva de nível de 400 metros nestas cartas é acompanhada pelas feições limites do reservatório na cota 414, com base na análise visual do alvo água.

Além disto, a vegetação predominante na área do reservatório é de pastagens e campos cerrado, com uma pequena concentração de matas de galeria e estacionais nas margens dos tributários da represa (Tabela 3.2) (IESA,1990).

TABELA 3.2: FITOMASSA DO RESERVATÓRIO DE SERRA DA MESA

Cobertura Vegetal	Área (ha)	Ocupação (%)
Mata de galeria	13.119	7,35
Mata estacional	1.483	0,83
Ecótono (mata/cerrado)	3.536	1,98
Cerrado aberto	21.178	11,87
Campo cerrado	117.181	65,68
Agropecuária	16.030	8,99
Outros	5.873	3,29
Total	178.400	100

FONTE: IESA (1990).

O resultado visual da classificação pode ser visto na Figura 3.8.

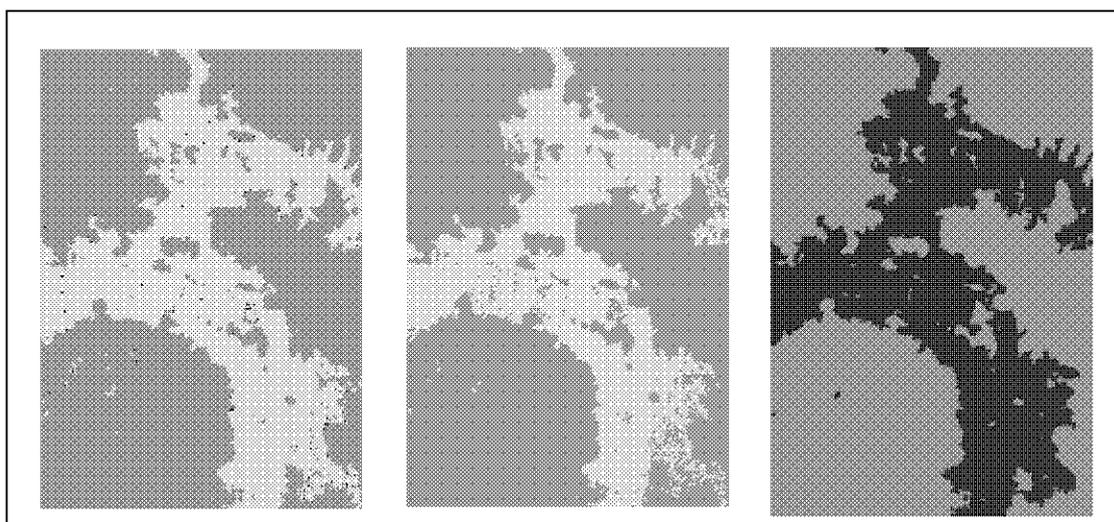


Fig. 3.8 – Resultados visuais das classificações para a parte central da imagem JERS-1/SAR de 04.03.97: MAXVER, ICM e por regiões, respectivamente (Água em azul, outros alvos em vermelho - imagem resultante do classificador por regiões em resalto).

Presume-se que, quando da obtenção da primeira imagem (04.03.97), as matas de galeria já haviam sido encobertas. As fotografias do reservatório (Figura 3.2) apontam este detalhe. Isto indica que o limite água-terra ficou bem salientado na imagem, facilitando a classificação. Caso houvessem resquícios de matas de galeria descobertas, a identificação poderia ser facilitada pelo retroespalhamento *double bounce* dos alvos vegetação-água quando imageados pelo sensor SAR.

O classificador utilizado para a classificação das imagens foi o classificador por crescimento de regiões – distância de Bhattacharyya com o limiar de aceitação de 75%. Como o objetivo do processo de classificação no presente caso é a extração da máscara água, os trechos não classificados externos aos limites do reservatório não são de interesse, podendo-se adotar um menor limiar no processo de classificação.

Após a classificação, procedeu-se à extração da classe “água” das imagens, transformando o resultado da classificação em um modelo temático, para posterior aplicação no cálculo de área e volume do reservatório.

3.3.4 – INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Foram calculados a área e o volume de alagamento com base na máscara “água” obtida na classificação das imagens JERS-1 SAR, sobreposta ao modelo numérico do terreno. Os cálculos foram realizados para as duas datas, 04.03.97 e 19.11.97, sendo utilizadas como base de cálculo as cotas 414 e 439,77 metros, respectivamente. Estes valores, conforme citado anteriormente, foram obtidos por marcações linimétricas durante a passagem do satélite JERS-1 e consequente obtenção das imagens.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à determinação da área e volume de alagamento do reservatório da UHE Serra da Mesa. Alguns aspectos a respeito destas determinações são discutidos.

4.1 POLÍGONOS BASE (FATIAMENTO DO MNT NAS COTAS)

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, estão representadas as áreas extraídas do modelo numérico de terreno (grade retangular regular) para as cotas de monitoramento: 414, 439.77 e 460, respectivamente, sendo que, os valores de área para a última cota, extrapolados, encontram-se listados abaixo (Tabela 4.1):

TABELA 4.1 : VALORES DE ÁREA PARA A COTA 460 – REGRESSÃO LINEAR

cotas	414	439,77	450	coef. a	Coef. b	460
Sub-área 1	5,92	58,23	78,49	0,4954	411,0359	98,84
Sub-área 2	59,76	189,44	232,08	0,2065	401,4566	283,46
Sub-área 3	105,88	214,10	241,70	0,2575	386,3870	285,92
Sub-área 4	180,85	346,92	379,42	0,1728	382,3408	449,46
Sub-área 5	11,32	75,56	99,32	0,4074	409,3021	124,43
Sub-área 6	48,89	90,38	96,32	0,7082	378,9716	114,41
Total	412,62	974,63	1127,33	-	-	1356,52

A partir destas áreas, delimita-se o polígono base para o cálculo do volume, projetando-o sobre o MNT. Esta determinação não considera as imagens, sendo feitas exclusivamente a partir do MNT. Corresponde ao cálculo que deveria ser realizado em tempo de projeto.

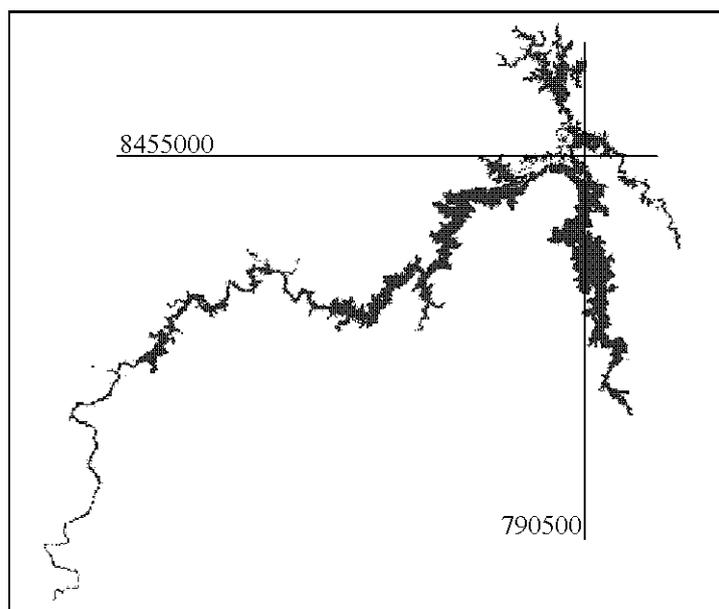


Fig. 4.1 – Área correspondente à cota 414 do MNT da UHE Serra da Mesa (eixos de referência em coordenadas planas).

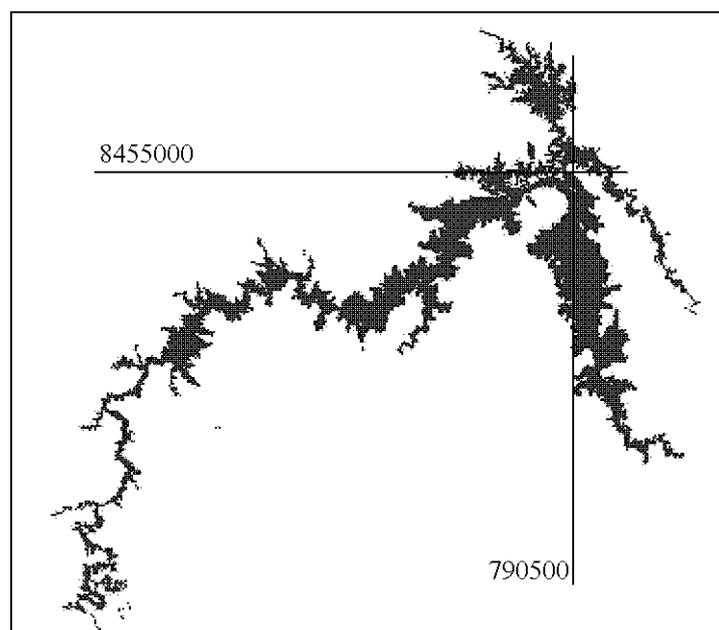


Fig. 4.2 – Área correspondente à cota 439.77 do MNT da UHE Serra da Mesa (eixos de referências em coordenadas planas).

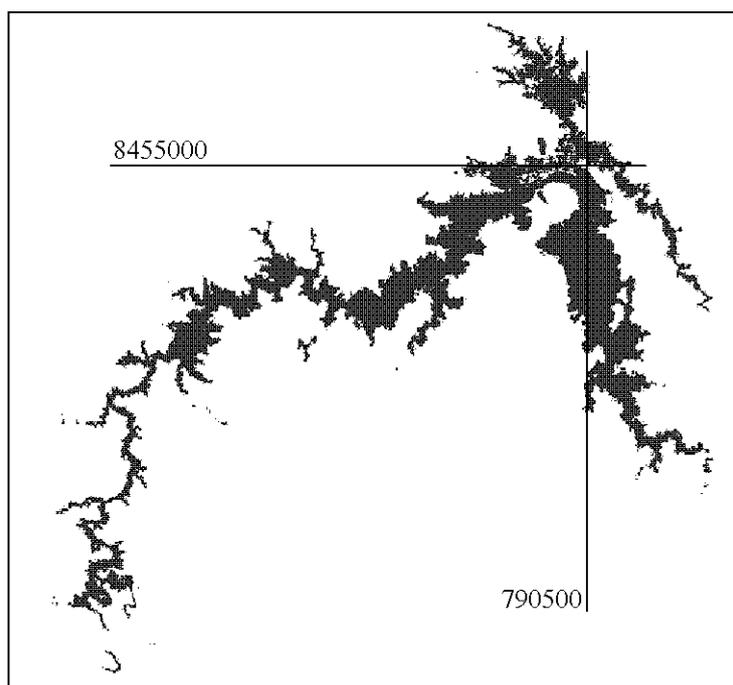


Fig. 4.3 – Área correspondente à cota 450 do MNT da UHE Serra da Mesa (eixos de referência em coordenadas planas).

A opção pela extração destas áreas pelo modelo de grade regular se deu em função da maior facilidade de fatiamento desta em relação à malha triangular, quando se trata de extrair superfícies de modelos numéricos de terreno. Considerou-se neste ponto, que a conversão das redes triangulares em grades retangulares com resolução maior, não tenha prejudicado a qualidade de representação da primeira.

Uma vez que se espera existir uma correlação positiva entre as variáveis área e volume do reservatório, ou seja, para valores maiores de área espera-se encontrar valores maiores de volume, foi calculado o coeficiente de correlação entre os dados encontrados para cada sub-área, de forma a avaliar, em parte, sua correção. Os valores de correlação encontrados apontam uma correlação positiva bastante alta: todas superiores a 0,98 (para as quantidades amostrais estudadas, o valor mínimo do coeficiente de correlação, a um nível de significância de 0.05, deve ser de 0,881). As fórmulas utilizadas para os cálculos de correlação estão listadas no Apêndice A do trabalho.

Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

TABELA 4.2: VOLUMES E ÁREAS – COTA 414 - MNT

COTA 414 - MNT		
Sub-área	Volume (km ³)	Área (km ²)
1	0,05	5,92
2	0,72	59,76
3	2,48	105,88
4	4,16	180,85
5	0,10	11,32
6	1,20	48,89
total	8,71	412,62
correlação :		0,99

Os valores encontrados para a cota 414, obtidos exclusivamente através do MNT, apresentam uma variação para menor sobre o valor de projeto (415,63 km² de área e 8,77 km³ de volume) de 0,7% e 0,68% respectivamente.

TABELA 4.3: VOLUMES E ÁREAS – COTA 439.77 - MNT

COTA 439.77 - MNT		
Sub-área	Volume (km ³)	Área (km ²)
1	0,79	58,23
2	3,97	189,44
3	6,64	214,1
4	10,65	346,92
5	1,03	75,56
6	2,86	90,38
total	25,16	974,63
correlação		0,98

Para a cota 439.77, os resultados apresentam uma variação para menor de 2,5% e 6,8%, respectivamente, em relação à área e volume projetados (1000 km² e 27 km³).

TABELA 4.4: VOLUMES E ÁREAS – COTA 460 - MNT

COTA 460* - MNT		
Sub-área	Volume	Área
1	2,36	98,84
2	8,51	283,46
3	11,46	285,92
4	18,25	449,46
5	2,91	124,43
6	4,79	114,41
total	45,91	1356,52
correlação:		0,98

* valores de área extrapolados por regressão linear

A diferença entre os valores de projeto e os valores encontrados neste trabalho começa a se evidenciar aqui. Os resultados apresentaram uma diferença para menor de 24% em área (1784 km² no projeto) e 15,6% em volume (54,4 km³ em projeto). No entanto, há que se considerar que, dada a inexistência da cota máxima em algumas cartas do levantamento topográfico, o que se tem é uma estimativa dos valores para a cota de 460 metros, estimativa esta que, dado à pequena extensão amostral (3 pontos), pode apresentar um erro considerável.

Apesar disto, percebe-se uma evolução das variações para menor no cálculo do volume e área de alagamento à medida do aumento da cota base de cálculo.

4.2 VOLUMES E ÁREAS A PARTIR DAS IMAGENS JERS-1

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as áreas extraídas das imagens JERS-1, classificadas como água. Estas áreas serviram de base para a determinação do volume, definindo o limite de cálculo no MNT.

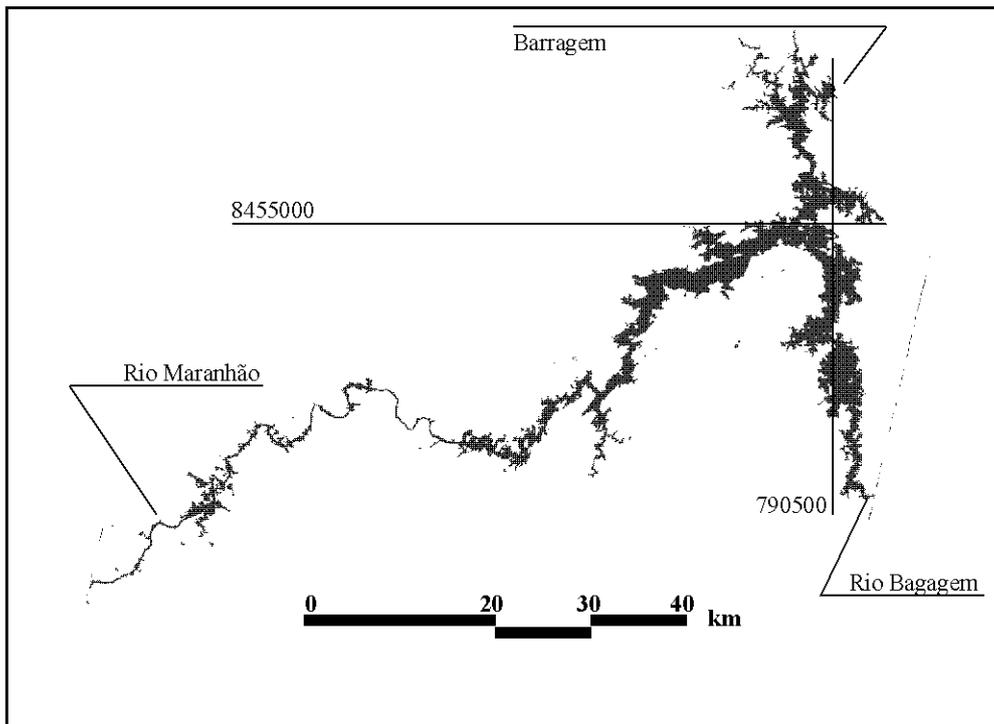


Fig. 4.4 – Área delimitada como água na imagem JERS-1 de 04.03.97 (cota 414)

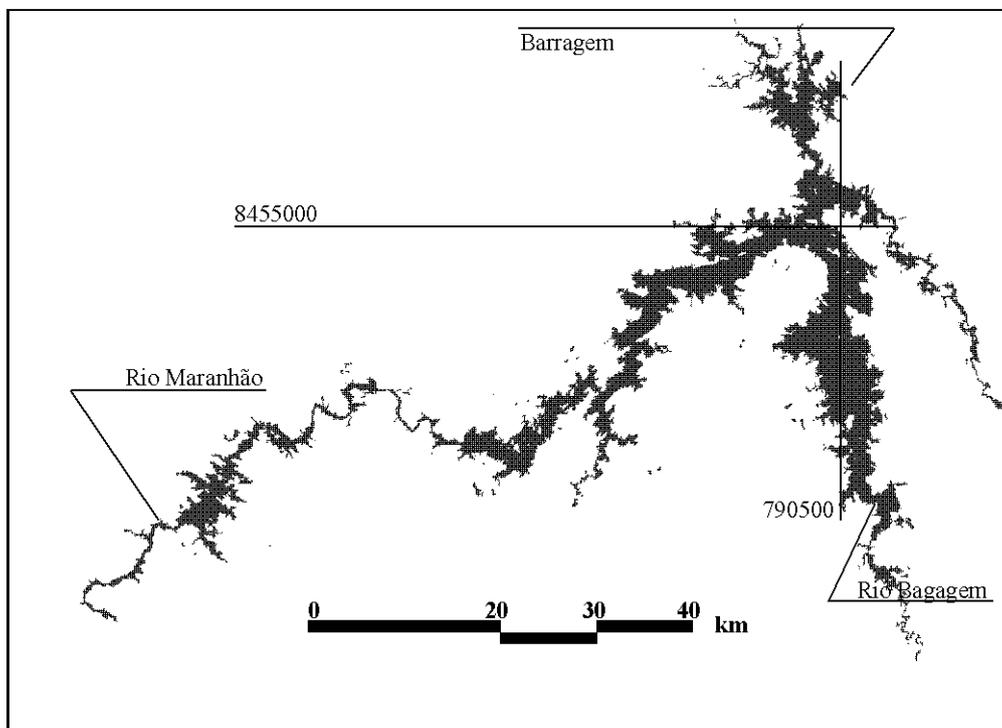


Fig. 4.5 – Área delimitada como água na imagem JERS-1 de 19.11.97 (cota 439.77)

O padrão dendrítico de alagamento pode ser facilmente notado nas imagens “área” obtidas. O reservatório apresentou crescimento maior ao longo do eixo do rio Babagem, com pequeno adensamento na porção mais a jusante do rio Maranhão.

Nota-se ainda um prolongamento das extremidades do reservatório à medida do aumento da cota de enchimento.

Os resultados (Tabelas 4.5 e 4.6), apontam uma significativa variação para menor sobre os valores de projeto.

TABELA 4.5: VOLUMES E ÁREAS – COTA 414 – IMAGEM JERS-1

COTA 414 - JERS		
Sub-área	Volume (Km3)	Area (Km2)
1	0,00	0,00
2	0,20	11,80
3	1,97	68,09
4	3,60	142,96
5	0,00	0,00
6	1,04	34,06
total	6,81	256,91
correlação :		0,99

TABELA 4.6: VOLUMES E ÁREAS – COTA 439.77 – IMAGEM JERS-1

COTA 439 - JERS		
Sub-área	Volume (Km3)	Area (Km2)
1	0,00	0,00
2	1,99	65,25
3	4,93	111,61
4	9,07	229,43
5	0,34	13,59
6	2,37	49,28
total	18,71	469,16
correlação		0,99

Os valores de volume encontrados para as cotas 414 e 439.77 são 22,34% e 30,74%, respectivamente, menores que os valores projetados.

Tais resultados apontam um erro médio de projeto de cerca de 30% com relação às previsões iniciais. De fato, a atual vazão turbinada, diretamente associada ao volume do reservatório, é de 800 m³/s, quando deveria ser de 1163 m³/s para a cota de alagamento atual (446 metros), ou seja, 31,21% menor.

O cálculo da área apresentou valores demasiadamente pequenos, se comparados aos valores de projeto. As variações são de 38.18% e 53.08% a menor, respectivamente para as cotas de 414 e 439.77 metros. Tais variações se mantêm mesmo considerando como valores de projeto, aqueles obtidos a partir do fatiamento do MNT.

Algumas considerações podem ser feitas a respeito destes baixos valores de área. Boa parte se explica pela resolução das imagens JERS-1/SAR. Uma vez que cada pixel original tem resolução de 18 metros quadrados, é certo que a superfície dos tributários da represa não seria detectada, especialmente daqueles que têm largura inferior a 18 metros. Com a perda do processo de filtragem da imagem, este valor pode aumentar, tornando difícil prever o limite de detecção destes tributários. Este fato pode ser comprovado a partir da visualização das áreas extraídas das imagens e daquelas fatiadas do MNT. A imagem obtida em 04.03.97, relativa à cota 414, não apresenta as sub-áreas 1 e 5, enquanto que a imagem obtida em 19.11.97 não apresenta a sub-área 1. Estas sub-áreas contêm os prolongamentos dos braços da represa, que correspondem, basicamente, ao canal de acesso dos tributários ao reservatório.

Estas variantes pouco interferem no cálculo do volume, uma vez que a cota superficial dos rios e tributários é considerada a cota inicial para a determinação do volume. Se não houver acréscimo de cota sobre estas áreas, não terá havido uma variação no volume.

Observando-se as tabelas 4.2 e 4.3, pode-se chegar facilmente a esta constatação. Os valores de área da tabela 4.2, para as sub-áreas 1 e 5 (inexistentes na imagem “água” correspondente à mesma cota de enchimento), representam 4,2% da área total. Porém o volume correspondente é de apenas 1,7% do volume total. Já na tabela 4.3, o valor de área para a sub-área 1 representa 6% da área total. O volume associado, no entanto, é apenas 3% do volume total.

As áreas extraídas do MNT apresentam padrão mais uniforme de alagamento ao longo dos dois eixos principais do reservatório. Apesar de ser um efeito bastante sutil para observação, as imagens apresentam um padrão mais recortado. Tal fato deve estar relacionado com a suavização de feições imposta pela série de operações às quais foi submetido o modelo numérico de terreno.

Além disto, tais feições correspondem a áreas de acesso mais difícil, representando um empecilho aos trabalhos de planimetria de campo. Certamente, algumas feições do relevo dissecado foram mascaradas no levantamento plani-altimétrico da represa.

Dados divulgados por Machado e Silva et al. (1998), obtidos em estudos do reservatório de Serra da Mesa, apontam uma diferença significativa entre os valores extraídos do MNT e de imagens JERS-1 (processada em 16 bits). Segundo estes, a área calculada a partir do MNT, para a cota 406, foi de 612,52 km², enquanto que a extraída da imagem (a data de obtenção da imagem não foi informada), para a mesma cota, foi de 276,85 km². Os autores apontam erros na confecção das cartas topográficas da região (as mesmas utilizadas no presente estudo), e falhas na geração do MNT, como responsáveis pelas discrepâncias encontradas. Outro fato é que, naquele trabalho, as imagens foram registradas a partir de cartas topográficas na escala de 1:100000, escala esta bem menor que as utilizadas na geração do MNT.

Em estudos preliminares na região, Sousa Júnior (1998) apresentou valores de área e volume para um trecho da represa (correspondente à sub-área 1 do presente trabalho), de 143.09 km² e 2.32 km³, respectivamente, para a cota de 460 metros. Os valores de volume são bastante parecidos com os valores aqui apresentados (2.36 km³ – diferença de apenas 1.7%). No entanto, os valores de área correspondentes aos estudos preliminares parecem estar superdimensionados. Esta constatação é também relatada por Machado e Silva et al. (1998).

Tal fato está relacionado com uma característica intrínseca dos programas de geração de modelos numéricos de terreno a partir de grades retangulares: na geração da matriz, as células externas às isolinhas limites da área de interesse recebem os valores de cota desta última isolinha. Isto se deve à inexistência de novos pontos/linhas para

interpolação. No caso, quando se procede o fatiamento do MNT para a cota 460 (interrompida em alguns planos de informação), o programa considera também todas as células da matriz, externas à última isolinha, que receberam os valores de cota desta (450 metros), provocando um superdimensionamento da área. Portanto, o cálculo do volume só é afetado quando a cota base é superior à cota 450, explicando, em parte, as diferenças pouco significativas encontradas.

A velocidade de enchimento do reservatório (de acordo com o projeto inicial, o reservatório atingiria sua cota máxima – 460 metros – em 2 anos, ou seja, em outubro/98), pode ter sido reduzida por vários fatores, muitos dos quais relacionados a erros sistemáticos de projeto. Outro fator que pode ter influenciado o processo de enchimento foi o aumento do período de estiagem na região. Sabe-se que a precipitação dominante do processo de enchimento está relacionada aos meses de outubro a março, quando o volume precipitado é maior, permitindo um escoamento superficial mais consistente e conseqüente descarga na represa. Durante os outros meses, correspondentes ao período seco, boa parte do volume precipitado (que já é pequeno), retorna à atmosfera por processos de evapotranspiração. A contribuição do período de estiagem para o enchimento dos reservatórios é mínima.

Dados fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (1998) (Tabela 4.7), indicam uma precipitação nos meses de outubro à dezembro de 1997, em média 35% menor que a série histórica dos últimos 33 anos para a região. Apesar dos dados não estarem completos (as medidas de precipitação para o ano de 1998 ainda não foram tabuladas pela ANEEL), percebe-se aqui um fator determinante da velocidade de enchimento do reservatório.

TABELA 4.7: DADOS PLUVIOMÉTRICOS ANEEL – ESTAÇÃO SÃO FÉLIX

Mês	Precipitação (mm)		Diferença (%)
	Média histórica (1964-1997)	1997	
OUT	123,60	82,80	-33,01
NOV	190,59	93,20	-51,10
DEZ	215,70	166,80	-22,67
Média	176,63	114,27	-35,31

Coincidentemente, no biênio 97/98 se manifestou uma das mais intensas séries de fenômenos climáticos associados ao El Niño (INPE.CPTEC, 1998). Apesar da região centro-oeste estar localizada em uma faixa de estabilidade em relação ao fenômeno El Niño, caberiam investigações pormenorizadas sobre a influência do mesmo no regime hídrico local.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Cabe salientar que o cálculo de volume de reservatórios, após o alagamento, apresenta problemas quanto à quantificação da eficácia do método. Isto se deve ao fato de não se conhecer o volume exato *a priori*, de forma a aferir o processo.

5.1 – CONCLUSÕES

A metodologia apresentada é de fácil aplicação. Os valores encontrados foram compatíveis com estudos similares realizados pela empresa Furnas S. A. e consultores contratados, indicando uma razoável confiabilidade do método, ainda que relativa. Tais valores permitem concluir que:

- Mantém-se as indicações do erro médio apontado por trabalhos preliminares sobre o volume e área da represa da UHE Serra da Mesa, da ordem de 30% a menor para o volume e 50% a menor para a área, em relação aos valores projetados;
- O erro de projeto já afeta as estimativas de geração hidrelétrica da UHE Serra da Mesa na mesma proporção ao erro médio de volume, ou seja, a usina tem uma vazão de consumo cerca de 30% menor que o previsto para a cota atual de alagamento (446 metros).

A respeito da sistemática de aplicação do sensoriamento remoto à determinação dos parâmetros de alagamento de reservatórios hidrelétricos, pode-se dizer que:

- O filtro de mediana e o filtro de Frost apresentaram bons resultados quanto à manutenção de bordas e suavização do ruído “*speckle*” das imagens JERS-1/SAR utilizadas. No entanto, o deslocamento de feições da imagem, causado pelo segundo, distinguiram o filtro de mediana, dentre os utilizados, como o de melhor aproveitamento;
- As imagens JERS-1/SAR apresentaram boa separabilidade entre os alvos água/não água, para esta região de estudo. Tal fato permite, para regiões similares, onde predomina a vegetação de cerrado, o uso de classificadores comuns no processamento das imagens;
- A resolução das imagens JERS-1/SAR utilizadas (18 metros), garante uma maior acurácia em relação a sensores com menor resolução espacial. Porém, em reservatórios de menor dimensão, o erro associado à resolução espacial do sensor pode se tornar significativo;

Quanto à metodologia de geoprocessamento, bem como quanto ao uso do programa SPRING, pode-se concluir que:

- O método testado representa uma inovação na determinação de área e volume de reservatórios para os fins propostos, uma vez que até então, no Brasil, estas determinações eram feitas com base em curvas cota x área x volume, através de equações genéricas;
- A eficácia do método está diretamente associada ao grau de correção dos dados de entrada: levantamentos topográficos, registro de imagens e dados de campo. O uso de dados incorretos, acarreta erros sistemáticos imponderáveis no processo;
- A conversão de redes triangulares em grades regulares para fins de cálculo de volume representa uma alternativa quando se trabalha com áreas de superfície predominantemente irregular. Associa-se a melhor

representatividade das redes triangulares com a facilidade de manuseio computacional das grades regulares;

- O programa SPRING, em sua versão mais atual para ambiente Windows (v. 3.2), incorpora melhoramentos significativos em relação ao cálculo de volume e manuseio de polígonos, contando com a correção de *bugs* em várias interfaces. Esta versão, em função de seu recente lançamento, não foi testada, no escopo deste trabalho, quanto ao algoritmo de segmentação/classificação de imagens. Para esta tarefa, foram utilizadas as três versões lançadas anteriormente, além de uma versão *beta*, disponível apenas internamente. Para cada passo, uma versão: a segmentação foi realizada na versão 3.0, a vetorização foi feita na versão 3.0 (*beta*) e a extração de regiões na versão 3.1.1. A parte final do processo de classificação por regiões, uma vez concluídas as etapas anteriores, pode ser finalmente realizada em quaisquer das versões. Ver Apêndice C.

5.2 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Boa parte dos projetos das grandes hidrelétricas brasileiras foi desenvolvida há cerca de duas décadas, quando os recursos computacionais ainda não estavam disponibilizados como da forma atual. Este é o caso da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa. O levantamento topográfico realizado durante a fase pré-projeto data de 1981. A obra esteve paralisada durante alguns anos por embargo judicial, quando foi questionado o Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental da obra.

O fato é que este levantamento apresenta erros tanto na planimetria quanto na altimetria. No entanto, tais erros, apesar de evidentes, são de difícil mensuração a partir dos dados existentes, uma vez que estes dados foram obtidos com base naquele levantamento.

Para se obter um refinamento ainda maior das determinações de volume e área, seria necessária a retificação da base cartográfica existente. Esta tarefa poderia ser realizada de duas maneiras, não exatamente excludentes:

- Realização de uma extensa rede de amostragens sobre o reservatório, com o levantamento de cotas batimétricas e posicionamento com GPS. Tal procedimento é realizado com sucesso em reservatórios norte-americanos, especialmente os que estão sob os cuidados da Texas Water Development Board (Solis, 1998). Ali, os dados são obtidos de *transects* ao longo da represa com espaçamento de cerca de 155 metros e estações a cada 6.3 metros. As informações são processadas no programa Arc-View (ESRI), através de redes triangulares irregulares;
- Geração de um modelo numérico de terreno a partir de imagens SAR estereoscópicas, anteriores ao alagamento, baseado em técnicas de interferometria. Este modelo seria completamente independente da base de dados atual, comprovadamente problemática. No entanto, seria preciso fazer uma pesquisa sobre a existência de tais imagens para este estudo.

Ainda, de forma a se obter uma análise comparativa ao método proposto, poderiam ser realizados os seguintes estudos:

- A determinação de área e volume em outro programa de geoprocessamento, utilizando a representação de malha triangular irregular para todo o processo;
- A execução do mesmo procedimento, com a geração do MNT a partir de outros levantamentos topográficos (por exemplo, o do Ministério do Exército-DSG);

Em relação à utilização do programa SPRING, há que se considerar que grande parcela da massa crítica de testes de consistência realizadas sobre o programa está relacionada ao desenvolvimento de dissertações e trabalhos dos cursos de especialização, mestrado e doutorado em Sensoriamento Remoto oferecidos pelo INPE.

De forma a se estreitar o relacionamento e organizar o fluxo de idéias e informações no eixo usuário-desenvolvedor, poderia ser interessante a criação de um fórum de usuários internos com o intuito de auxiliar o processo de manutenção/atualização.

Desta maneira, as indicações, orientações, reclamações e sugestões advindas desta parcela significativa de usuários do programa, estariam organizadamente canalizadas à equipe de desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) **Dados pluviométricos diários – Estação São Félix – 01348002**: SIH - Microssistema de dados hidrometeorológicos. Brasília, 1998.
- Ballard, D. H.; Brown, M.C. **Computer vision**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992. 513 p.
- Benosky, C. P.; Merry, C. J. Automatic extraction of watershed characteristics using spatial analysis techniques with application to groundwater mapping. **Journal of Hydrology**. v. 173, n. 1-4, p. 145-163, Dec. 1995.
- Cadman, J. D. **Regularização de vazão em reservatórios hidrelétricos**. (Eletronorte, Brasília, 1998). Comunicação pessoal.
- Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA 001. **Diário Oficial da União**. Brasília, Fev. 1986.
- Costa, M. P. F.; Novo, E. M. L. M.; Ahern, F.; Pietsch, R. W. Seasonal Dynamics of the Amazon Floodplain through RADAR eyes: Lago Grande de Monte Alegre, case study. [CD-ROM]. In: Geomatics in the Era of Radarsat, 1., Ottawa, 1997. **Anais**. Ottawa: National Defense, 1997b. Paper Section
- Costa, M. P. F.; Novo, E. M. L. M.; Mitsuo II, F.; Mantovani, J. E.; Ballester, M. V.; Ahern, F. Classification of floodplain habitats (Lago Grande, Brazilian Amazon) with RADARSAT and JERS-1 data. [CD-ROM]. In: Geomatics in the Era of Radarsat, 1., Ottawa, 1997. **Anais**. Ottawa: National Defense, 1997a. Paper Section

Curran, J. P. The semivariogram in remote sensing: an introduction. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 493-507. Apr 1988.

Dias Leite, A. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997. 528 p.

Dutra, L. V. **Classificação de texturas usando modelos ARMA e distâncias da função de autocorrelação**. São José dos Campos. 136 p. (INPE-5067-TDL/406).
Dissertação (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1990.

Eletrobrás. **Plano 2015, estudos básicos: versão preliminar**. Rio de Janeiro, 1991. v. 1-2.

Eliason, E. M.; McEwan, A. S. Adaptive box filters for removal of random noise from digital images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 56, n. 4, p. 453-458. Apr 1990.

Engespaço **Manual do SGI**. São José dos Campos, 1987.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). **ARC command references – commands J-Z**. Redlands: ESRI, 1991.

Erthal, G. J.; Fonseca, L. M. G.; Bins, L. S.; Velasco, F. R. D.; Monteiro, A. M. V. Um sistema de segmentação e classificação de imagens de satélite. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 4. São Paulo, 1991. **Anais**. São Paulo: EPUSP, 1991. v. 1, p. 237-240.

Felgueiras, C. A.; Urashima, C. A.; Soares, M. L. C. P. **Geração de modelos de malha triangular em ambiente de microcomputador**. São José dos Campos: INPE, 1989. (INPE-4974-PRE/1539).

Gonzales, R.C.; Wintz, P. **Digital image processing**. Proding: Addison Wesley, 1987. 431 p.

Gupta, R. P. e Banerji, S. Monitoring of reservoir volume using Landsat data. **Journal of Hydrology**, v. 77, n. 1-4, p. 159-170, Apr. 1985.

Hess, L. L., Melack, J. M., Simonett, D. S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 1313-1325, July 1990.

International Engineering (IESA) **Aproveitamento hidrelétrico de São Félix - Usina de Serra da Mesa - Estudos de Meio Ambiente - Diagnóstico base para os programas ambientais**. Rio de Janeiro: IESA, 1990. v. 3.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempo e Estutos Climáticos (INPE.CPTEC). **El Niño 97/98**. [Online]. <www.cptec.inpe.br/products/clima/proelni97/>. 13 Out. 1998.

Jain, A. K. **Fundamentals of digital image processing**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.

Lanna, A. E. L. Regulação de vazões em reservatórios. In: Tucci, C. E. M. ed. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1997. 943 p. Cap. 18, p. 703-720.

Machado e Silva, A. J. F.; Andrade, L. A.; Britto Filho, A. Controle do enchimento da represa de Serra da Mesa. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. **Anais**. São Paulo: Image Multimídia, 1998. Seção de Comunicações Técnico-Científicas.

- Managond, M. K.; Alasingrathan, M. A.; Srivinas, M. G. Storage analysis of Malaprabha reservoir using remotely sensed data. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 19., Ann Arbor, 1985. **Anais**. Michigan: Erim, 1985. p. 749-756
- Manavalan, P.; Sathyanath, P.; Rajegowda, G. L. Digital image analysis techniques to estimate waterspread for capacity evaluation of reservoirs. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 9, p. 1389-1395, Sept. 1993.
- Margalef, R. **Limnología**. Barcelona: Ediciones Omega, 1983. 1010 p.
- Marks, D.; Dozier, J.; Frew, J. Automated basin delineation from digital elevation data. **Geo-processing**, v. 2, n. 3, p. 299-311, 1984.
- Miranda, F.P.; Fonseca, L.E.N.; Carr, J.R. Semivariogram textural classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of the Amazon rainforest. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 549-556, Mar. 1998.
- Monosowsky, E. O sertão vai virar mar. In: Ab'Saber, A. N.; Müller Planteberg, C. ed. **Previsão de impactos: o estudo de impacto ambiental no Leste, Oeste e Sul. Experiências no Brasil, na Rússia e na Alemanha**. São Paulo: EDUSP, 1994. 569 p. Cap. 5, p. 123-142.
- Müller, A. C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995. 412 p.
- Namikawa, L. M. **Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características**. São José dos Campos. 136 p. (INPE-6122-TDI/583). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

- Nascimento, P. S. R. **Avaliação de técnicas de segmentação e classificação por regiões em imagens Landsat-TM, visando o mapeamento de unidades de paisagem na Amazônia.** São José dos Campos. 120 p. (INPE-6391-TDI/607). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.
- National Space Development Agency of Japan (NASDA) **JERS-1/SAR.** [online]. <http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/guide/satellite//sendata/sar_e.html>. 17 Nov. 1998.
- Netgis Geoprocessamento e Informática **Manual do SPRING.** São José dos Campos, 1997. v. 1-4.
- Peucker, T. K.; Douglas, D. H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Computer Graphics & Image Processing**, v. 4, n. 4, p. 375-387, Dec. 1975.
- Pessoa, M. L. Relatório técnico COPEL-SIMEPAR. In: Pessoa, M. L. ed. **Telemetria e sensoriamento remoto com aplicações em hidrologia e meteorologia.** Curitiba: Finep, 1992. 276 p. Cap. 2, p. 185-261.
- Pereira Filho, W. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo da influência das características da bacia de captação na concentração de sólidos em suspensão em reservatórios.** São José dos Campos. 175 p. (INPE-5278-TDI/448). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1991.
- Projeto RADAMBRASIL **Folha SD. 22 Goiás:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: CPRM, 1981. 640 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 25).

- Richards, J. A. **Remote sensing and digital image analysis: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 340 p.
- Richards, J. A., Woodgate, P. W., Skidmore, A. K. An explanation of enhanced radar backscattering from flooded forest. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 1093-1100, July 1987.
- Rosim, S.; Namikawa, L. Cálculo de volume de corte e aterro usando modelagem numérica de terrenos. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. São Paulo: Image Multimídia, 1996. Seção de Comunicações Técnico-Científicas.
- Sallum, H. hsallum@eln.gov.br. **Equação para cálculo de volume de reservatórios**. Sousa Júnior, W. C. wilsonjr@infra.ita.cta.br. 10 Nov. 1998.
- Sant'anna, S. J. S. **Avaliação do desempenho médio de filtros redutores de *speckle* em imagens de radar de abertura sintética**. São José dos Campos. 181 p. (INPE-6125-TDI/586). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- Sant'anna, S. J. S. **Dedução da equação de volume de um "tronco de cone"**. (INPE, São José dos Campos, 1999). Comunicação pessoal.
- Silva, O. F. **Caracterização dos gradientes longitudinais e laterais do reservatório Tucuruí/PA, através da análise estatística dos bancos de dados limnológicos e de imagens TM-Landsat**. São José dos Campos. 115 p. (INPE-5967-TDI/571). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.

Silveira, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C. E. M., ed. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1997. 943 p. Cap. 2, p. 35-51.

Soares, S. M. **Classificação textural de imagens SAR, por modelagem autorregressiva**. São José dos Campos. 195 p. (INPE-6889-TDI/650). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

Solis, R. rsolis@twdb.state.tx.us. **Volume of reservoirs**. Sousa Júnior, W. C. wilsonjr@infra.ita.cta.br. 23 Nov. 1998

Sousa Júnior, W. C. Geoprocessamento aplicado à determinação de parâmetros de alagamento da UHE Serra da Mesa, Minaçu, Go. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. **Anais**. São Paulo: Image Multimídia, 1998. Seção de Comunicações Técnico-Científicas.

Tavares de Lima, I. B. **Utilização de imagens históricas TM para avaliação e monitoramento da emissão de CH₄ na UHE Tucuruí**. São José dos Campos. 90 p. (INPE-6821-TDI/642). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

Teixeira, M. G.; Souza, R. C.; Magrini, A.; Rosa, L. P. Análise dos relatórios de impactos ambientais de grandes hidrelétricas no Brasil. In: Ab'Saber, A. N.; Müller Planteberg, C., ed. **Previsão de impactos: o estudo de impacto ambiental no leste, oeste e sul. Experiências no Brasil, na Rússia e na Alemanha**. São Paulo: EDUSP, 1994. 569 p. Cap. 7, p. 163-186.

Tingle, C. www@nap61.nap-wc.usace.army.mil. **Method of volume determination**. Sousa Júnior, W. C. wilsonjr@infra.ita.cta.br. 30 Nov. 1998.

- Trevett, J. W. **Imaging radar for resources surveys**. Cambridge: Chapman and Hall, 1986. 313 p.
- Tundisi, J. G. Ambiente, represas e barragens. **Ciência Hoje**, v. 5, n. 27, p. 48-54. 1986.
- Tundisi, J. G. Tropical South America: presents and perspectives. In: Margalef, R., ed. **Limnology now: a paradigm of planetary problems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. 553 p. Cap. 12, p. 353-424.
- Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. **Microwave remote sensing – active and passive**. Washington DC : Addison-Wesley, 1982. v. 1-2.
- Vieira, P. R. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**. São José dos Campos, 227 p. (INPE-6124-TDI/585). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Wichel, G. J.; Jenson, S. K.; Baglio, J. V.; Domingue, J.O. **Application of digital elevation models to delineate drainage areas and compute hydrologic characteristics for sites in the James River Basin, North Dakota**. Washington, DC: US Geological Survey, 1992. (USGS 2383).
- White, M. F. Reservoir surface area from Landsat imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 44, n. 11, p. 1421-1426, Nov. 1978.

APÊNDICE A

FÓRMULAS GENÉRICAS UTILIZADAS

A.1 – FÓRMULAS DE REGRESSÃO LINEAR:

A reta de regressão linear tem a seguinte equação:

$$Y = a X + i ,$$

onde “a” representa a inclinação da reta e “i”, a interceção ao eixo das ordenadas. “a” e “i” são estimados pelas seguintes fórmulas:

$$\hat{a} = n (\Sigma xy) (\Sigma x) (\Sigma y) [n (\Sigma(x^2)) - (\Sigma x)^2]^{-1}$$
$$\hat{i} = (\Sigma y) [\Sigma(x^2)] - (\Sigma x) (\Sigma xy) [n (\Sigma(x^2)) - (\Sigma x)^2]^{-1}$$

onde “X” e “Y” são, respectivamente, as variáveis independente e dependente em estudo

A.2 – FÓRMULAS DE CORRELAÇÃO:

A correlação estimada entre duas variáveis “X” e “Y”, expressa por $\rho_{x,y}$, é dada pela seguinte fórmula:

$$\hat{\rho}_{x,y} = n^{-1} \Sigma (x_i - \mu_X) (y_i - \mu_Y) [n^{-1} \Sigma(x_i - \mu_X)^2]^{1/2} [n^{-1} \Sigma(y_i - \mu_Y)^2]^{1/2},$$

onde “n” é o número de amostras das variáveis “X” e “Y”, e “ μ ” é a média amostral das mesmas.

APÊNDICE B

ALGORITMO DE RECORTE – LEGAL

Para diminuir o tempo de processamento das imagens, foi utilizado um algoritmo em linguagem LEGAL que extraiu das mesmas a área de interesse ao estudo. Para isto, o algoritmo se baseia em um limite desenhado manualmente sobre a imagem visualizada, através de um dispositivo serial de entrada (*mouse*).

O algoritmo é inserido em uma interface criada no SPRING. As variáveis devem ser inicializadas no corpo do algoritmo e ao fim da execução são extintas.

O algoritmo (abaixo), é executado como um janela dentro do programa SPRING (é necessário que o SPRING esteja em execução):

```
{
  Imagem entrada("imagens");
  Imagem imagemrecorte("imagens");
  Tematico limite("areas");

  entrada = Recupere (Nome="j_19-11-97_reg");
  limite = Recupere( Nome="limite");
  imagemrecorte= Novo(Nome="j_19-11-97_recorte", ResX=25,ResY=25,Nbits=8);
  imagemrecorte = ( limite.Classe == "n_agua" || entrada==0 ) ? 255:entrada;
}
```

O plano de informação contendo o limite desenhado manualmente define uma máscara sobre a imagem de entrada. Os *pixels* comuns entre a imagem e o limite permanecem com os valores iniciais da imagem. Aos demais *pixels* é atribuído o valor digital 255 (correspondente ao branco na imagem de 8 *bits*).

APÊNDICE C

UTILIZAÇÃO DO SPRING

Atividade	Versão				Observações
	3.0	3.0b	3.1.1	3.2	
Geração de MNT	X	-	X	-	Operação normal;
Fatiamento	X	-	X	-	Operação normal;
Cálculo de volume	X	-	X	X	Muito lento na versão 3.0 (cerca de 72 horas para o cálculo de uma sub-área); alterado na versão 3.1.1, apresentou problemas na identificação dos polígonos limites; os problemas foram corrigidos na versão 3.2;
Filtragem de imagens	X	X	X	-	Operação normal;
Segmentação de imagens	X	X	X	-	3.0 muito lenta (até 60 horas para segmentar uma imagem); nas versões 3.0b e 3.1.1, ocorreram problemas de tempo de resposta (o processo parava por <i>timeout</i> ; a versão 3.0b tem uma melhor interface;
Transf. varredura-vetor	-	X	-	-	Esta tarefa, enquanto passo sequencial à segmentação só está disponível na interface da versão 3.0b
Extração de regiões	X	-	X	-	A versão 3.0 apresentou problemas de visualização de regiões após o processo de extração; versão 3.1.1 normal;
Classificação por regiões	X	X	X	X	Esta etapa foi realizada com sucesso na 4 versões testadas;

- "3.0b" é a versão beta Springtree

- (-) não testadas; (x) testadas

- Testes realizados sobre imagem JERS-1/SAR, 8 Bits, 3493x3750 pixels

- Filtragem com filtro de mediana, janela 3x3, 1 iteração

- Segmentação da imagem total, similaridade = 15, área = 45

- Classificação por regiões, método Bathacharya, limiar = 75%, 2 classes: água e não água