

Cálculo do Volume e Análise da Deposição de Sedimentos do Reservatório de Três Irmãos

Liliane Lazzari Albertin, Artur José Soares Matos, Frederico Fábio Mauad

Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Departamento de Hidráulica e Saneamento/São Carlos/USP

lilianelazzari@hotmail.com, arturjmatos@gmail.com, mauadffm@sc.usp.br

Recebido: 16/06/09 - revisado: 27/10/09 - aceito: 24/08/10

RESUMO

Este artigo apresenta o cálculo do volume atual do reservatório de Três Irmãos, SP, mais especificamente, quantifica a perda de volume de seus compartimentos devido à deposição e compactação de sedimentos. Ocorrido o assoreamento, foi determinada a nova curva operacional cota-área-volume. Para tanto, foi realizado o levantamento batimétrico da represa. Os resultados mostram que houve redução de 14,3%, 14,5% e 14,2% nos volumes total, útil e morto, respectivamente, totalizando um volume de sedimentos de 1.909.618.301,3 m³ em todo o reservatório. Através da sobreposição de dois Modelos Digitais de Terreno, quais sejam, um anterior ao enchimento do reservatório, gerado através das cartas topográficas do IBGE datadas de 1972, e outro gerado a partir dos dados da batimetria realizada durante o ano de 2008, foi possível observar as áreas onde houve depósito e compactação de sedimentos. As erosões se concentram no leito do rio e nas margens e atingiram uma escavação de aproximadamente 12 m. Os maiores depósitos de sedimentos se concentram no início do barramento e nas entradas dos afluentes e chegam a alcançar cotas em torno de 18 m acima do que era encontrado em 1972.

Palavras-chave: Sedimentos, assoreamento, batimetria de reservatórios.

INTRODUÇÃO

Todo reservatório, independente da sua finalidade e característica de operação, está fadado ao processo de assoreamento, pois eles funcionam como grandes bacias de detenção de sedimentos, propiciando condições favoráveis à sedimentação do material sólido transportado pelo curso d'água ou advindo pelo escoamento superficial da bacia hidrográfica devido à redução da velocidade do fluxo de água e do alargamento da seção transversal.

Frente a esta situação, foi investigado o volume do reservatório de Três Irmãos, mais especificamente, foi quantificada a perda de volume de seus compartimentos devido à deposição e à compactação de sedimentos ocorridos desde a época de seu enchimento até os dias atuais. Detectado o assoreamento, foi determinada a nova curva operacional cota-área-volume.

O reservatório de Três Irmãos, localizado a noroeste do Estado de São Paulo, é o último e o maior da série de reservatórios construídos em cascata no rio Tietê. Não é o maior somente em área, sua UHE, com potência instalada de 807,50 MW, é também a maior usina desse rio.

Ela faz parte do Sistema Interligado Nacional (SIN), um parque gerador energético cuja finalidade é o suprimento da demanda de energia elétrica do Brasil. Foi construído principalmente para atender a esta finalidade, mas é aproveitado para o atendimento de múltiplos usos da água.

Em suma, é um sistema hídrico que merece especial cuidado. A estimativa do assoreamento e o seu acompanhamento durante a operação da represa devem ser realizados para que a vida útil seja respeitada.

Para tanto, foi realizado o levantamento batimétrico da represa de modo a se determinar o volume atual de água do reservatório. Este levantamento incluiu o planejamento de seções batimétricas, o levantamento de campo, o processamento das informações obtidas, a geração de modelos digitais do terreno submerso da represa e mapas com isolinhas altimétricas (curvas de nível), bem como a geração dos polinômios cota-área-volume.

A deposição e compactação de sedimentos foram verificadas a partir da comparação de dois modelos digitais de terreno. O primeiro gerado através da digitalização de cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, datadas de 1972, e o segundo gerado a partir

dos dados da batimetria do reservatório realizada durante o ano de 2008.

Verificou-se que os volumes de sedimentos depositados e compactados em cada compartimento do reservatório foram de 500.906.557 m³ e 1.408.711.744,3 m³ de assoreamento nos volumes útil e morto, totalizando um volume de sedimentos de 1.909.618.301,3 m³ em todo o reservatório. Este último dado resulta numa perda de 14,3% do volume total.

O reservatório de Três Irmãos se distribui ao longo de terrenos predominantemente de média criticidade e, secundariamente, alta criticidade à ocorrência de processos erosivos. Esses dados sugerem que as contribuições sedimentares marginais ao reservatório devem ser pequenas e localizadas. Entretanto, como a maior parte da bacia é ocupada por terrenos de alta criticidade, é esperado que exista uma produção sedimentar contínua e de maior amplitude nessas áreas, cujo impacto será o inevitável assoreamento de canais fluviais e do reservatório.

As medidas para proteção, tratamento e conservação das terras da bacia, além da proteção das margens com vegetação ciliar parecem ser as alternativas economicamente melhores, diminuindo as taxas de erosão e aumentando a produtividade dos solos para a agricultura.

SEDIMENTOLOGIA EM RESERVATÓRIOS

Com a construção de uma barragem, para a formação de um reservatório, há uma série de modificações do regime de vazão do rio, alterando significativamente o equilíbrio sedimentológico da bacia hidrográfica.

Os reservatórios propiciam condições favoráveis para a sedimentação, tendo em vista a redução da velocidade do fluxo de água. Os sedimentos, carregados pelo curso d'água, podem se acumular no compartimento do volume útil do reservatório ou em cotas inferiores, reduzindo o volume morto e sua vida útil. Os sedimentos depositados no volume útil alteram a vazão regularizada, a capacidade de produção de energia elétrica e o atendimento de outros usos consuntivos e não consuntivos da água.

Ao longo do reservatório, formam-se depósitos de sedimentos com distribuição granulométrica característica, variando o tamanho dos grãos de montante (onde se deposita o material mais grosseiro) para jusante (com material fino).

Uma vez que os sedimentos acumulados alcançam a soleira da tomada d'água, não há mais condições para a operação adequada do reservatório, esgotando-se sua vida útil.

A barragem impede a passagem das partículas e possibilita o depósito das mesmas. A distribuição dos depósitos de sedimentos não é uniforme, podendo haver áreas com maiores ocorrências de sedimentação que outras (Borges et al., 2004).

O assoreamento de reservatórios constitui-se num problema de graves consequências hidráulicas e econômicas, chegando mesmo a colocar em risco o desempenho de obras de geração de energia elétrica, de abastecimento e de navegação.

Problemas trazidos pela deposição de sedimento no reservatório dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume. Essa redução interfere no uso para o qual o mesmo foi construído, como geração de energia, abastecimento público, industrial ou irrigação, contenção de enchentes, dentre outros.

Ainda vinculados à sedimentação, destacam-se problemas operacionais como abrasão de componentes, tubulações e pás de turbina; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia diminuindo o calado para a navegação, além de afetar a segurança da barragem.

Não só a montante da barragem que ocorrem problemas com o acúmulo de sedimentos. A água limpa escoada para jusante tem um maior poder de erodir margens e leitos do canal de escoamento, uma vez que a carga sólida no fluxo é menor que o valor de saturação, devido ao desequilíbrio provocado pela retirada da carga natural de sedimentos no escoamento (Carvalho, 1994).

Além dos problemas de assoreamento e conseqüente perda de volume, também ocorre o acúmulo de nutrientes na água, fator que propicia a reprodução de organismos em toda a superfície do lago, o que pode causar problemas quanto à operação da casa de máquinas, como abrasão excessiva nas turbinas, impedimento da passagem da água pelas grades da tomada d'água, entre outros.

O assoreamento de um reservatório é algo inevitável. A deposição e compactação de sedimentos no reservatório é a última etapa de um processo que se inicia na erosão superficial da bacia hidrográfica. O material é erodido devido à ação da água, vento, gravidade. Uma parte desse material pode ficar retida em depressões naturais ou ser interceptada

tada pela vegetação ou obstáculos existentes, outra parte acaba atingindo o leito dos rios.

Os fatores que podem vir a interferir no processo de sedimentação são altura e intensidade de chuva, tipo de solo e formação geológica, cobertura vegetal, ocupação e uso do solo, topografia e características fisiográficas da rede de drenagem. Carvalho (1994) salienta que com o crescente aumento populacional em todo o planeta, a ação humana pela ocupação e uso da terra tem sido, entretanto, o fator de maior aumento da erosão e do transporte de sedimentos nos rios, influenciando significativamente nos problemas decorrentes.

Outros parâmetros da bacia hidrográfica e do reservatório, que não são materiais em suspensão provenientes da carga de lavagem da bacia, influenciam na taxa de sedimentação. Alguns dos mais importantes são o tamanho e a forma do reservatório; a razão entre a capacidade do reservatório e tamanho da bacia; razão entre a capacidade do reservatório e o deflúvio afluente; topografia da bacia, uso da terra e cobertura vegetal, declividade e densidade da rede de canais; características físicas e químicas do sedimento afluente; forma de operação do reservatório; e o clima característico na área (Dendy, 1968).

Para o acompanhamento do assoreamento, os levantamentos batimétricos indicam a evolução dos depósitos de sedimentos no fundo do lago. Este levantamento é necessário para a determinação da disponibilidade hídrica através das curvas Cota X Área X Volume, possibilitando desta forma a verificação do volume do reservatório, depósito de remanso, entre outros.

DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O reservatório de Três Irmãos localiza-se na Bacia Hidrográfica do Baixo Tietê, noroeste do Estado de São Paulo (Figura 1). Esta bacia possui uma área de drenagem de 15.471,81 km² dentro da qual estão contidos os reservatórios de Três Irmãos e Nova Avanhandava, no rio Tietê, e Jupia, no rio Paraná.

Três Irmãos é também uma barragem de contenção de cheias. Além disso, este reservatório está interligado com o reservatório de Ilha Solteira através do Canal de Pereira Barreto, numa transposição de bacia hidrográfica.

Este canal, com 9.600 m de extensão, interliga o reservatório de Três Irmãos, no rio Tietê, ao rio São José dos Dourados, afluente da margem esquerda do rio Paraná e ao reservatório de Ilha

Solteira. A transposição é feita de forma livre, portanto, sem estrutura do tipo comportas para o controle do nível d'água.

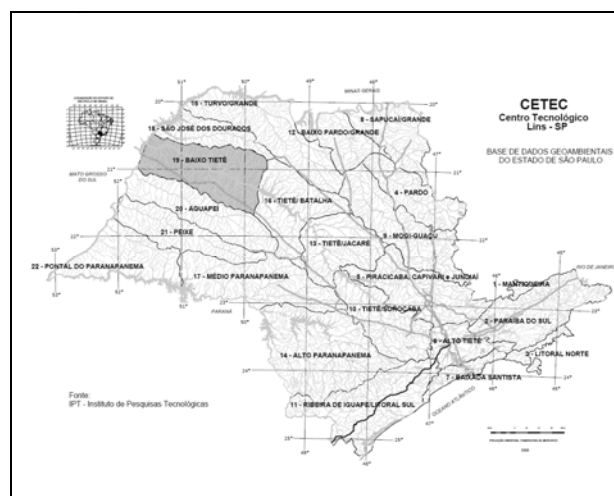


Figura 1 - Localização da UGRHI-19 no Estado de São Paulo

Fonte: São Paulo, 1999

O Canal Pereira Barreto é utilizado para transferência de água para aproveitamento em geração de energia e navegação. O sentido do escoamento no canal é função da afluência de água aos reservatórios, conseqüentemente, dos seus níveis d'água.

A UHE Três Irmãos dista, aproximadamente, 28 km da foz do rio Tietê no rio Paraná. Foi construída pela construtora Andrade Gutierrez e tem capacidade de operar com oito turbinas, totalizando uma potência instalada de 1.292 MW, o suficiente para atender a demanda energética de uma cidade de 1,5 milhões de habitantes. Porém, atualmente, possui cinco unidades geradoras em operação, totalizando 807,5 MW instalados. Dados característicos da usina são apresentados na Tabela 1.

A região constituiu uma das últimas fronteiras de expansão agropecuária do Estado de São Paulo e possui atualmente como atividades mais significativas a pecuária de corte e a cana-de-açúcar, uma vez que a cafeicultura e o algodão perderam importância nos últimos anos. Estas duas últimas culturas exerceram grande influência nos processos de degradação dos solos em vastas áreas da região. Mesmo a pecuária, quando realizada com manejo inadequado de pastagens e dos animais, contribuiu para a formação de processos erosivos e assoreamento dos cursos d'água, embora a pecuária de corte,

predominante na região, passou a ser considerada como uma alternativa para recuperação progressiva dos solos (SÃO PAULO, 1999).

Tabela 1 – Características da UHE Três Irmãos

Concessionária	CESP
Município	Pereira Barreto
Manancial	Tietê
Área de drenagem (km ²)	69.900
Área alagada (km ²) no N.A. máximo	756,54
N.A. mínimo (m)	323
N.A. máximo (m)	328
N.A. máximo maximorum (m)	328,4
Volume total (10 ⁶ m ³)	13.371,21
Volume morto (10 ⁶ m ³)	9.923,23
Volume útil (10 ⁶ m ³)	3.447,98
Potência instalada (MW)	807,5
Vazão regularizada (m ³ /s)	480

Fonte: São Paulo, 1999; CESP (2008) e CESP (comunicação pessoal)

É válido ressaltar que a monocultura, principalmente em grandes áreas, nunca se mostra como uma boa prática para o solo, pois acarreta no empobrecimento de nutrientes, demanda por insumos agrícolas e, no caso da cana-de-açúcar, erosão do tipo laminar nas épocas entre colheita, plantio e fase de crescimento.

Quanto às pastagens, tem-se o problema da erosão laminar e linear, sendo a primeira devido à vegetação utilizada (gramíneas) e a última causada principalmente pela criação de caminhos preferenciais de escoamento, nos trilhos gerados pelo pisoteamento por parte do gado.

O carreamento do solo para os corpos d'água, além de causar o assoreamento, pode também trazer grandes prejuízos à qualidade da água devido à presença de nutrientes (metais, sais e, principalmente, compostos nitrogenados e fosfatados), podendo levar à eutrofização do meio, o que propicia o desenvolvimento de algas e macrófitas. Esta proliferação pode gerar complicações para as turbinas das UHEs.

Para finalizar, os mapas da distribuição das classes de potencialidade à erosão na Bacia do Baixo Tietê, apresentado em São Paulo (1999), revelou que cerca de 70% da área total da bacia correspondem a áreas com alto grau de potencialidade à erosão, cerca de 25% a áreas com médio grau e aproximadamente 5% a terrenos com baixo grau de potencialidade a erosão.

METODOLOGIA

Digitalização, georreferenciamento e registro das cartas topográficas do IBGE

A base cartográfica do IBGE utilizada para o trabalho constituía-se de 10 cartas topográficas em escala 1:50.000 com área de cobertura de 15' X 15' cada uma, analógicas em 10 folhas articuladas e em bom estado de conservação. Articuladas conforme ilustrado na Figura 2, essas cartas topográficas cobrem uma área de 7.560 m².

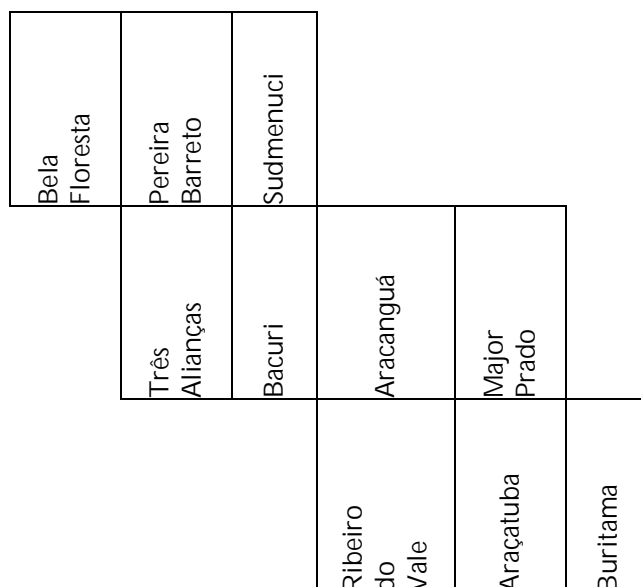


Figura 2 - Articulação das cartas topográficas

Para a digitalização, foi utilizado um scanner para grande formato da marca HP modelo Designjet Scanner 4200. A resolução de digitalização utilizada foi de 300 DPI, o que forneceu um pixel correspondente a 4,233 m do terreno.

Para o georreferenciamento e registro da base cartográfica proveniente da digitalização, adotou-se como pontos de controle o cruzamento de quadrículas UTM.

Inicialmente, as imagens das cartas foram referenciadas ao datum Córrego Alegre sendo adotada a projeção UTM, conforme a indicação presente na carta analógica. Posteriormente, as cartas referenciadas ao Córrego Alegre foram transformadas para o referencial WGS 84.

A ilustração apresentada na Figura 3 exemplifica o resultado final obtido após a digitalização,

georreferenciamento e registro das cartas topográficas do IBGE.

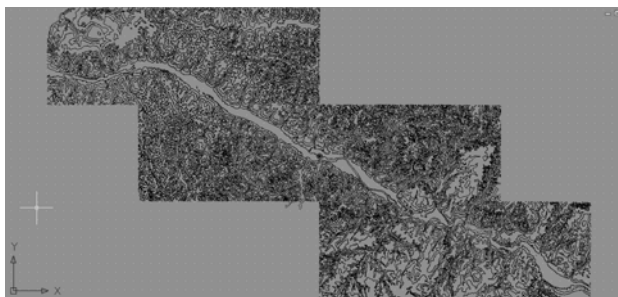


Figura 3 - Digitalização, georreferenciamento e registro das cartas topográficas do IBGE

Batimetria do reservatório de Três Irmãos

A batimetria do reservatório foi realizada pelo Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. Para sua realização, foi utilizado um Ecobatímetro modelo Bathy 500 MF da SyQwest Inc., mono feixe na frequência de 200 khz, trabalhando em conjunto com um DGPS, ambos conectados em um computador, onde foi utilizado o software Hypack para a obtenção e processamento dos dados, exemplo ilustrado na Figura 4.

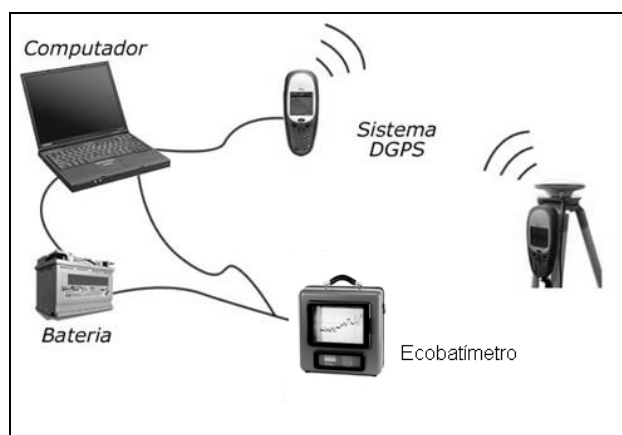


Figura 4 – Esquema dos equipamentos para realização da batimetria

A partir do modelo digital de terreno gerado pela digitalização, registro e georreferenciamento das cartas topográficas do IBGE, na escala 1:50.000, foi feito o planejamento dos transectos para o levantamento de campo.

As seções foram planejadas numa configuração contínua, em “zigue-zague”, caracterizando transectos paralelos, perpendiculares ao eixo longitudinal do curso d’água e espaçados em aproximadamente 1,5 km cada um, sendo que a diagonal entre cada um deles foi também levantada.

O planejamento das seções foi feito no software Hypack. Elas estão apresentadas, juntamente com o contorno do reservatório, no mapa da Figura 5. Esse é o caminho que o barco deveria percorrer para capturar os dados de profundidade com o ecobatímetro. Com o auxílio do DGPS, o software identifica as coordenadas e auxilia a navegação.

O levantamento foi realizado no corpo central do reservatório de Três Irmãos, bem como nos braços secundários, totalizando aproximadamente 500 seções (Figura 5) e 40 dias de coleta em campo.

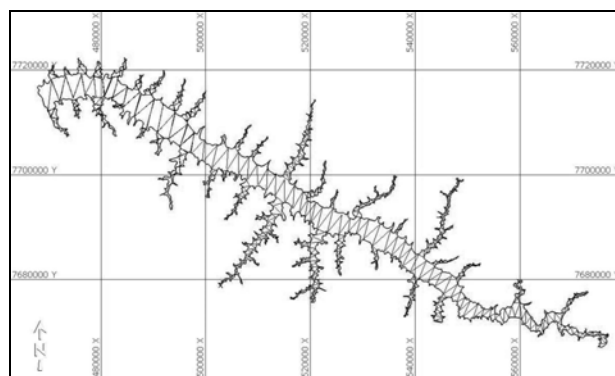


Figura 5 – Planejamento de seções batimétricas

Após o trabalho de campo, partiu-se para o processamento das informações coletadas, com o objetivo de se analisar os dados obtidos e filtrar as informações necessárias à elaboração dos mapas com curvas de nível e à geração dos polinômios cota-área-volume.

Os dados brutos das coordenadas geográficas e das profundidades adquiridos pelo DGPS e ecobatímetro, respectivamente, são coletados pelo software Hypack em arquivos específicos. Cada arquivo é analisado detalhadamente para a verificação de pontos discrepantes ou fora da tendência esperada de valores. Quando encontrado alguma imperfeição, é feito a suavização das curvas.

Para ilustração, a Figura 6 mostra um exemplo de um transecto com falhas nas medidas de profundidade. O mesmo transecto é apresentado na Figura 7 após passar pelo processo de correção e suavização das curvas.

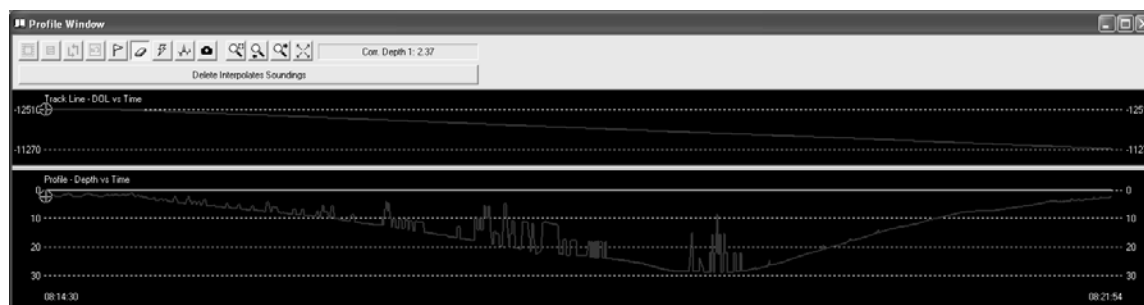


Figura 6 - Transecto apresentando medidas discrepantes

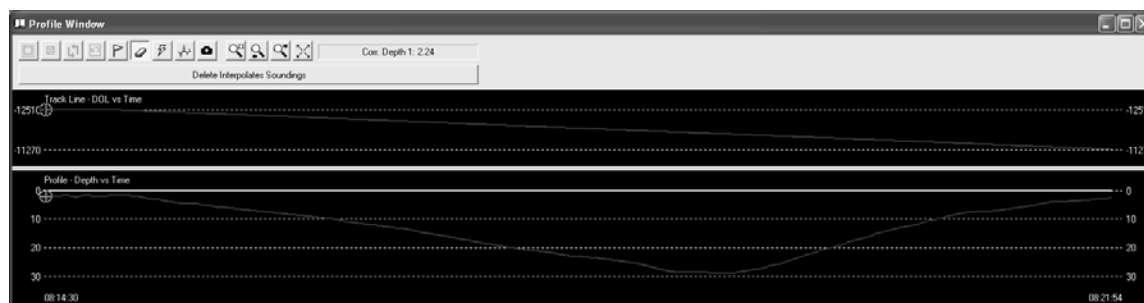


Figura 7 - Transecto após correção

Nos dados exportados estão contidas informações sobre as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e a profundidade de todos os pontos de cada transecto.

A profundidade foi transformada em altitude através da subtração de seu valor das medidas de cotas registradas na régua linimétrica do reservatório correspondente a cada dia da campanha de campo.

Após o processamento dos dados, seguiu-se à elaboração da planilha final, contendo um resumo das informações necessárias à realização dos trabalhos de interpolação e geração de mapas e superfícies, quais sejam, localização geográfica e cota da superfície de fundo.

Geração do Modelo Digital de Terreno e Mapa com Curvas de Nível

A partir dos dados processados gerou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o mapa com curvas de nível da represa de Três Irmãos.

O trabalho foi feito em um software destinado a trabalhos de topografia, projeto ou construção denominado TopoGRAPH 98SE, desenvolvido pela empresa brasileira char*Pointer Informática.

Os dados de entrada são os pontos de cada transecto e do contorno da represa, todos com informações de cota, latitude e longitude.

O contorno do reservatório de Três Irmãos foi obtido através da digitalização e georreferenciamento das cartas topográficas do IBGE. Ele se referiu à curva de nível pertencente à cota de 340 m, acima do nível de água máximo da represa.

Dados de latitude, longitude e cota dos pontos do contorno, como dos transectos, formam a base para a geração do MDT, realizada no TopoGRAPH, através de modelagem da superfície por meio de grade triangular e triangulação pelo método de Delaunay.

Geração das Curvas Cota-Área-Volume

A partir do modelo numérico de terreno obtido através do TopoGRAPH foram geradas as curvas cota-área-volume.

Nesse mesmo software, foi calculada a área referente a cada curva de nível em um intervalo de 1 em 1 metros a partir da cota mínima. Os dados da cota e área foram inseridos em uma planilha eletrônica na qual foi feito o ajuste da curva polinomial de forma a se encontrar a melhor correlação.

Com relação ao volume, ele foi calculado a partir dos valores de áreas, nos mesmos intervalos de curvas de nível, conforme demonstra a Figura 8. Considerou-se o reservatório seccionado pelos planos de nível que contêm as curvas de nível. Calculou-se o volume de cada secção, respectivamente,

V1, V2 e V3. O volume total resultou da soma dos volumes de todas as secções.

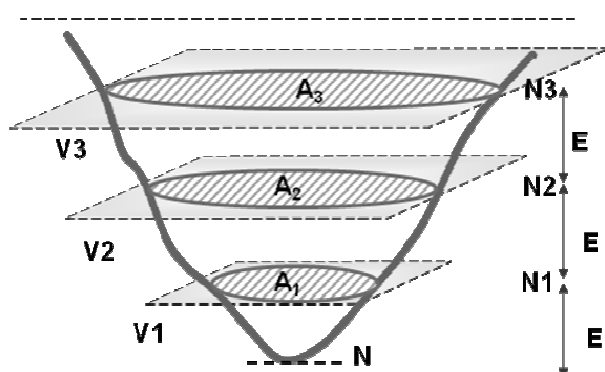


Figura 8 – Método de cálculo do volume

O volume V1 respeita ao sólido com base A1, limitado pela curva de nível N1 e cuja superfície lateral é a superfície do terreno. V1 foi calculado de acordo com a Figura 9, na qual A1 é a área limitada pela curva de nível de cota N1 e h é a diferença de cota entre o ponto mais baixo e a curva de nível.

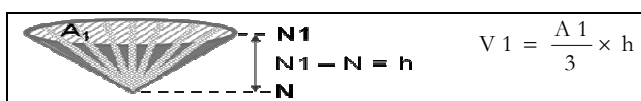


Figura 9 – Método de cálculo do volume V1

O volume V2 (Figura 8) corresponde ao sólido limitado pelas bases de área A1 e A2 e pela superfície do terreno. Foi calculado de acordo com a Figura 10, na qual A2 e A3 são as áreas limitadas respectivamente pelas curvas de nível de cota N2 e N1, e E é a equidistância natural (diferença de cota entre as curvas de nível).

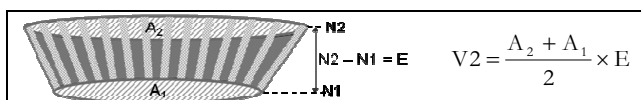


Figura 10 – Método de cálculo do volume V2

Finalmente, o volume total corresponde ao somatório de todos os volumes parciais. Os dados da cota e volume também foram inseridos em uma planilha eletrônica na qual se fez o ajuste da curva polinomial de forma a se encontrar a melhor correção.

Análise da deposição e compactação de sedimentos

Os depósitos de sedimentos ocorridos no terreno de fundo do reservatório desde a sua construção até os dias atuais foram visualizados e calculados a partir da comparação de dois modelos digitais de terreno, a saber:

- O primeiro gerado através da digitalização de cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, datadas de 1972.
- O segundo gerado a partir dos dados da batimetria do reservatório realizada durante o ano de 2008.

Com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas – Idrisi 15.0 da SulSoft, os pontos cotados de ambos os modelos foram sobrepostos e realizou-se uma álgebra de mapas.

O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são as funções que realizam análises espaciais. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais e fazem simulações sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros, e vêm sendo bastante utilizadas nos estudos hidrossedimentológicos, por exemplo, Silva et al. (2007).

Em uma álgebra de mapas, as operações podem ser descritas segundo expressões similares às utilizadas na matemática para a descrição de operações aritméticas e booleanas, exceto por envolverem representações de dados espaciais ao invés de números.

No caso da álgebra de mapas realizada com os MDTs de Três Irmãos, os atributos numéricos referem-se às cotas de cada ponto localizado geograficamente. A operação realizada foi a subtração algébrica dos pontos cotados no MDT obtidos a partir da digitalização das cartas do IBGE antes do enchimento do reservatório com os pontos cotados no MDT obtidos pelo levantamento batimétrico.

RESULTADOS

Curva Cota-Área-Volume

A partir dos dados obtidos no levantamento batimétrico foram elaborados o Modelo Digital de Terreno, o Mapa com Curvas de Nível e a Curva Cota X Área X Volume da represa de Três Irmãos.

Tabela 2 – Valores de área calculados

Cota (m)	Área (m²)	Área calculada pelo ajuste (m²)	Desvio (%)
290	30.035.438,7677	42.212.087,2572	-40,54
291	45.229.368,8790	51.245.555,5219	-13,30
292	61.033.153,5518	60.838.436,1210	0,32
293	73.760.478,2234	70.948.815,5746	3,81
294	88.661.437,4276	81.537.261,0365	8,04
295	103.562.396,6317	92.566.900,0507	10,62
296	115.355.887,0294	104.003.500,3280	9,84
297	122.727.390,8065	115.815.549,5228	5,63
298	130.149.380,9118	127.974.335,0048	1,67
299	137.872.025,2685	140.454.023,6180	-1,87
300	146.392.094,8397	153.231.741,4691	-4,67
301	155.243.334,5208	166.287.653,6888	-7,11
302	175.956.639,7331	179.605.044,2030	-2,07
303	191.865.851,5802	193.170.395,5170	-0,68
304	214.483.488,4204	206.973.468,4701	3,50
305	229.859.640,4633	221.007.382,0145	3,85
306	242.409.022,8365	235.268.692,9969	2,95
307	254.580.368,3709	249.757.475,9105	1,89
308	267.166.691,6832	264.477.402,6835	1,01
309	279.751.590,4172	279.435.822,4442	0,11
310	293.230.626,0093	294.643.841,2914	-0,48
311	307.818.845,0662	310.116.402,0673	-0,75
312	322.395.081,4827	325.872.364,1337	-1,08
313	338.352.952,3222	341.934.583,1361	-1,06
314	354.537.941,8283	358.329.990,7738	-1,07
315	371.344.667,4750	375.089.674,5927	-1,01
316	388.085.117,8309	392.248.957,7240	-1,07
317	405.568.035,5247	409.847.478,6849	-1,06
318	424.824.017,0249	427.929.271,1327	-0,73
319	444.693.873,6936	446.542.843,6425	-0,42
320	465.392.980,4222	465.741.259,4808	-0,07
321	486.484.625,3968	485.582.216,3710	0,19
322	507.618.063,8262	506.128.126,2792	0,29
323	530.623.878,3514	527.446.195,1644	0,60
324	554.454.490,0363	549.608.502,7660	0,87
325	577.698.451,5681	572.692.082,3739	0,87
326	600.809.533,8996	596.779.000,5951	0,67
327	624.451.578,5514	621.956.437,1293	0,40
328	648.694.899,5107	648.316.764,5331	0,06
329	673.566.197,9559	675.957.628,0057	-0,36
330	699.067.591,3015	704.982.025,1478	-0,85

Foram determinadas curvas de nível com espaçamento de 1 metro desde a cota mínima até a máxima. Após, foram calculadas as áreas referentes a cada curva. O resultado das áreas relativas a cada cota está discriminado nas duas primeiras colunas da Tabela 2. Esses dados foram inseridos em uma

planilha eletrônica, na qual foi elaborado o gráfico Cota vs. Área e inserida a equação polinomial que melhor se ajustasse aos dados. O resultado é apresentado na Figura 11.

Tabela 3 – Valores de volume calculados

Cota (m)	Volume total (m³)	Volume calculado pelo ajuste (m³)	Desvio (%)
290	87.781.527,6446	98.312.318,0625	-0,1200
291	125.413.931,4679	143.647.193,1875	-0,1454
292	178.545.192,6833	198.709.325,4375	-0,1129
293	245.942.008,5709	264.048.053,6250	-0,0736
294	327.152.966,3964	340.155.637,2500	-0,0397
295	423.264.883,4260	427.471.987,1875	-0,0099
296	532.724.025,2566	526.389.395,3750	0,0119
297	651.765.664,1745	637.257.266,6250	0,0223
298	778.204.050,0337	760.386.847,9375	0,0229
299	912.214.753,1238	896.055.959,8750	0,0177
300	1.054.346.813,1779	1.044.513.726,0000	0,0093
301	1.205.164.527,8582	1.205.985.304,8125	-0,0007
302	1.370.764.514,9851	1.380.676.619,0625	-0,0072
303	1.554.675.760,6418	1.568.779.086,6250	-0,0091
304	1.757.850.430,6421	1.770.474.351,4375	-0,0072
305	1.980.021.995,0839	1.985.939.013,3125	-0,0030
306	2.216.156.326,7338	2.215.349.358,7500	0,0004
307	2.464.651.022,3375	2.458.886.091,4375	0,0023
308	2.725.524.552,3646	2.716.739.063,3125	0,0032
309	2.998.983.693,4148	2.989.112.003,5000	0,0033
310	3.285.474.801,6280	3.276.227.250,5625	0,0028
311	3.585.999.537,1658	3.578.330.482,4375	0,0021
312	3.901.106.500,4402	3.895.695.446,2500	0,0014
313	4.231.480.517,3427	4.228.628.689,4375	0,0007
314	4.577.925.964,4179	4.577.474.290,4375	0,0001
315	4.940.867.269,0696	4.942.618.588,5000	-0,0004
316	5.320.582.161,7225	5.324.494.915,2500	-0,0007
317	5.717.408.738,4003	5.723.588.323,9375	-0,0011
318	6.132.604.764,6751	6.140.440.321,0000	-0,0013
319	6.567.363.710,0344	6.575.653.595,3750	-0,0013
320	7.022.407.137,0923	7.029.896.750,5625	-0,0011
321	7.498.345.940,0018	7.503.909.034,3750	-0,0007
322	7.995.397.284,6133	7.998.505.068,7500	-0,0004
323	8.514.518.255,7021	8.514.579.581,1875	0,0000
324	9.057.057.439,8959	9.053.112.134,5000	0,0004
325	9.623.133.910,6981	9.615.171.859,2500	0,0008
326	10.212.387.903,4320	10.201.922.180,8125	0,0010
327	10.825.018.459,6575	10.814.625.553,1875	0,0010
328	11.461.591.698,6885	11.454.648.187,6250	0,0006
329	12.122.722.247,4218	12.123.464.783,9375	-0,0001
330	12.809.039.142,0505	12.822.663.260,4375	-0,0011

Foi estabelecido, então, um ajuste que apresentou melhor correlação para os diferentes valores

de cotas. Essa equação, ou modelo matemático, representa o comportamento da área para diferentes cotas.

A terceira e quarta coluna da Tabela 2 apresentam os dados calculados pela equação de ajuste polinomial com os respectivos erros a eles associados. Percebe-se que nas cotas operacionais do reservatório, quais sejam: 323 m (N.A. mínimo) e 328 m (N.A. máximo), os erros relativos ao valor de área pelo cálculo através da equação de ajuste são menores que 1%.

Após o cálculo das áreas, determinou-se o volume de acordo com a metodologia apresentada. O volume calculado corresponde ao volume de aterro para cada curva de nível, espaçadas em 1 metro cada uma, desde a cota mínima até a cota máxima.

O resultado é apresentado nas duas primeiras colunas da Tabela 3. A coluna Volume total corresponde ao volume de aterro para cada cota.

Conforme os dados apresentados, o volume total calculado para a cota máxima de 328 m é $11.462 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Da mesma forma, esses dados foram inseridos em uma planilha eletrônica, na qual foi elaborado o gráfico Cota vs. Volume e inserida a equação polinomial que melhor se ajustasse aos dados. O resultado é apresentado na Figura 12.

Foi estabelecido um ajuste que apresentou melhor correlação para os diferentes valores de cotas, conforme o gráfico disposto na Figura 12. Essa equação, ou modelo matemático, representa o comportamento do volume para diferentes cotas.

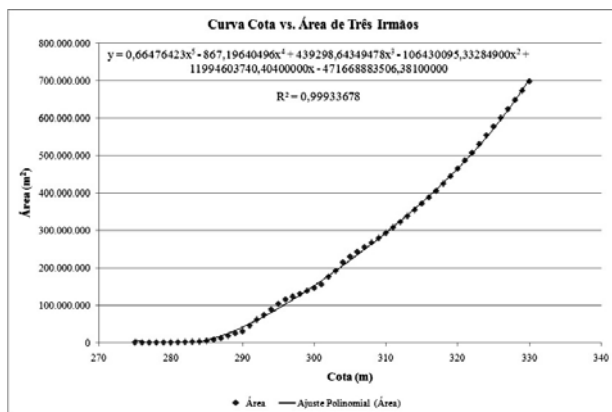


Figura 11 - Relação Cota vs. Área do Reservatório de Três Irmãos

Os volumes calculados pela equação de ajuste e os erros a eles associados são apresentados na terceira e quarta coluna da Tabela 3. Percebe-se que para todos os valores de cota os erros relativos

ao valor de volume pelo cálculo através da equação de ajuste são menores que 0,2%. Já o nível operacional (entre as cotas 323 e 328 m), os erros são inferiores a 0,001%.

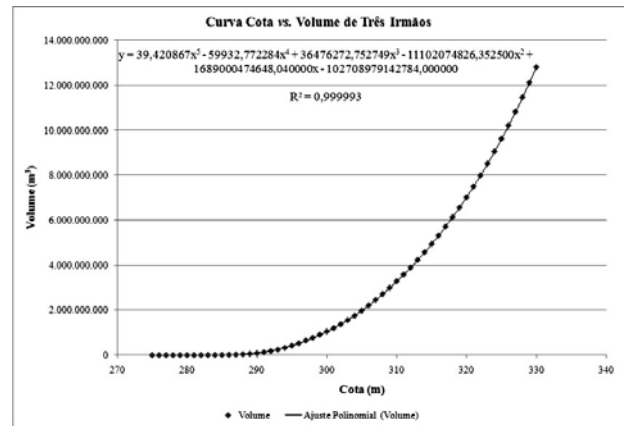


Figura 12 - Relação Cota vs. Volume do Reservatório de Três Irmãos

As informações apresentadas na Tabela 4 correspondem a uma comparação dos valores de área e volume obtidos nos cálculos com os valores da curva cota-área-volume levantada no início da operação do reservatório. O volume útil corresponde ao volume compreendido entre os NAs mínimo e máximo operacional.

Os resultados indicam que houve redução de 14,3%, 14,5% e 14,2% do volume total, útil e morto, respectivamente.

Tabela 4 – Comparação dos valores originais com os valores calculados

Dado	Valor original	Valor calculado
Área no N.A. máximo (km²)	756,54	648,69
Volume no N.A. máximo (10 ⁶ m³)	13.371,21	11.461,59
Volume útil (10 ⁶ m³)	3.447,98	2.947,07
Volume morto (10 ⁶ m³)	9.923,23	8.514,52

A diferença de área entre os valores originais e calculados é devido ao fato de que a área, no primeiro caso, corresponde à área alagada e não se sabe a metodologia do seu levantamento, enquanto

que no segundo caso ela corresponde à curva de nível obtida por cartas topográficas do IBGE. Mesmo assim ambos os valores possuem ordens de grandeza próximas.

Com relação ao volume, é possível observar áreas onde houve depósitos e compactação de sedimentos através da comparação do MDT gerado através da digitalização de cartas topográficas do IBGE e do MDT gerado a partir dos dados da batimetria. Utilizando o software Idrisi 15.0, fez-se a sobreposição dos mapas e realizou-se uma operação de subtração algébrica dos pontos cotados nos MDTs. O resultado se encontra na Figura 13.

Nos locais onde houve diminuição da cota, considerou-se que houve escavação ou erosão. Já nos locais onde houve aumento do valor da cota, considerou-se que houve compactação de sedimentos e assoreamento.

Nota-se que as erosões se concentram no leito do rio e nas margens e atingiram uma escavação de aproximadamente 12 m.

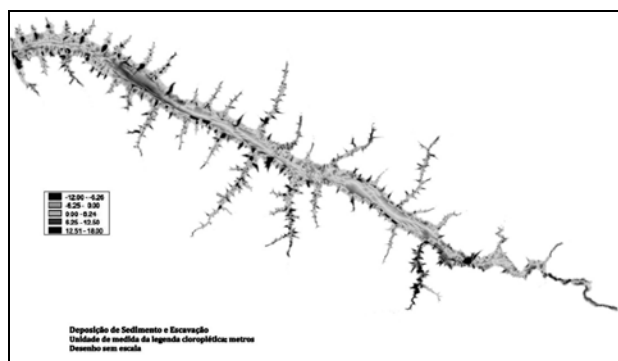


Figura 13 – Deposições de sedimentos e escavações ocorridas no reservatório de Três Irmãos

Os maiores depósitos de sedimentos se concentram no início do barramento e nas entradas dos afluentes. Este resultado condiz com o esperado. Depósitos maiores são formados na entrada dos principais afluentes e na área de remanso do reservatório, uma vez que nestas regiões materiais grosseiros tendem a sedimentar.

Os depósitos de sedimentos chegam a alcançar cotas em torno de 18 m acima do que era encontrado em 1972.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi elaborado o mapa com curvas de nível, a curva operacional cota-área-volume e o cálculo do assoreamento do reservatório

de Três Irmãos, a partir de dados do levantamento batimétrico.

Foi possível determinar a área e o volume para vários intervalos de cota do reservatório, gerando uma nova curva operacional, e esta apresentou um bom ajuste. Com relação à curva cota-área, os erros relativos encontrados para as cotas operacionais dos reservatórios são menores que 1%. Já para a curva cota-volume, os erros relativos são inferiores a 0,001% para o mesmo intervalo de cota (323 m a 328 m).

O volume do reservatório de Três Irmãos, calculado a partir do mapa com isolinhas altimétricas gerado com os dados de batimetria, para a cota máxima operacional do reservatório (328 m) foi de 11.461.591.698,6885 m³. Este volume corresponde ao volume total do reservatório.

O volume morto corresponde ao volume referente à cota mínima operacional do reservatório (323 m) e o valor encontrado foi de 8.514.518.255,7021 m³.

A diferença entre o volume total e o volume morto corresponde ao volume útil, cujo valor encontrado foi de 2.947.073.443 m³.

Considerando que os volumes total, útil e morto da época do enchimento do reservatório eram de 13.371,21·10⁶ m³, 3.447,98·10⁶ m³ e 9.923,23·10⁶ m³, respectivamente, os volumes do reservatório foram reduzidos, ao longo desses anos, nos seguintes percentuais: 14,3% do volume total, 14,5% do volume útil e 14,2% do volume morto.

As diferenças entre os volumes antes do enchimento da represa e os volumes calculados a partir dos dados batimétricos correspondem ao volume de sedimentos depositado e compactado em cada compartimento do reservatório. Os valores encontrados foram respectivamente de 500.906.557 m³ e 1.408.711.744,3 m³ de assoreamento nos útil e morto, totalizando um volume de sedimentos de 1.909.618.301,3 m³ em todo o reservatório.

Com a comparação de dois modelos digitais de terreno (na época da construção e o atual) foi possível observar essas áreas de depósito que prevaleceram no início do barramento e nas entradas dos afluentes.

Desta forma, tornou-se imprescindível um monitoramento batimétrico e sedimentométrico para que as reais dimensões do reservatório fossem previstas e pudessem nortear os planos de gestão dos recursos hídricos.

De fato, inevitavelmente, todos os reservatórios ficarão assoreados. Torna-se necessário, então, medidas preventivas e corretivas do processo de

erosão da bacia hidrográfica e implantação e proteção de matas ciliares às margens do reservatório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Energética de São Paulo (CESP), à Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI) e à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) pela formação do convênio para realização do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento que subsidiou este estudo.

REFERÊNCIAS

- BORGES, F. S. P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; WILSON JUNIOR, G. (2004). Estimativa de batimetria utilizando sensoriamento remoto e krigagem bayesiana. Estudo de caso: reservatório Morro Grande, Rio de Janeiro. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, XXI, 18 a 22 de outubro de 2004, São Pedro/SP. Anais do XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro.
- CARVALHO, N. O. (1994). Hidrossedimentologia prática. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 372 p.
- CESP, 2008. Dados Característicos – UHE Três Irmãos. Disponível em: < http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_Usina3Irmãos_Dados?OpenDocument>. Acesso em: 18 set. 2008.
- DENDY, F. E. (1968). Sedimentation in the Nation's Reservoirs. Journal of Soil and Water Conservation, v. 23, p. 135-137, jul./aug. 1968.
- SÃO PAULO. (1999). Comitê da Bacia Hidrográfica do Baixo Tietê (CBH-BT). Situação dos Recursos Hídricos do Baixo Tietê – UGRHI 19. Minuta Preliminar do Relatório Técnico Final. Lins, São Paulo, 261 p.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, L.P. Evaluation of soil loss in Guaraíra basin by GIS and remote sensing based model. J. Urban Environ. Engng, 1(2), 44-52, doi: 10.4090/juee.2007.v1n2.044052.

sediment deposition and compaction. Once the silting had occurred, a new level-area-volume-operational curve was determined. For this purpose we performed the bathymetric survey of the dam. The results show that there was a reduction of 14.3%, 14.5% and 14.2% in total, useful and dead volumes, respectively, totaling a sediment volume of 1909618301.3 m³ throughout the reservoir. Through the overlapping of two Digital Land Models, i.e., one prior to filling the reservoir, created by the IBGE topographic charts dated 1972, and other based on data generated by bathymetry data during the year 2008, it was possible to observe the areas where there was sediment deposition and compaction. The erosion was concentrated in the river bed and the banks and reached an excavation of approximately 12 m. The largest sediment deposits are concentrated at the beginning of the reservoir and at the inlets of tributaries to meet quotas and get to stages of around 18 m above what was found in 1972.

Key-words: Sediments, Silting, Reservoir Bathymetry.

Calculation of Volume and Analysis of Sediment Deposition in the Três Irmãos Reservoir

ABSTRACT

This article presents the calculation of the current volume of the Três Irmãos Reservoir, SP, more specifically, it quantifies the loss of volume of its compartments due to