

## A Necessidade da Consideração do Processo de Assoreamento no Planejamento e Operação de Reservatórios

Adelena Gonçalves Maia, Swami Marcondes Villela

Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP

adelena@sc.usp.br, swami@shs.com.br

Recebido: 16/03/05 – revisado: 28/07/05 – aceito: 30/01/06

---

### RESUMO

*Este trabalho tem como objetivo principal abordar a importância da estimativa do volume de sedimento acumulado em um reservatório para o estudo do seu planejamento e operação. Atualmente, no Brasil, poucos são os reservatórios que mantêm as suas curvas cota vs. área vs. volume atualizadas, fazendo com que o volume d'água acumulado no reservatório, levantado através da leitura de régua limnimétricas, seja superestimado. Desta forma, se faz necessário o levantamento do volume de sedimento acumulado nos reservatórios, através da utilização de modelos de transporte e deposição de sedimento, ou mesmo com a utilização de levantamento batimétricos. Este trabalho apresenta alguns dos modelos que atualmente são utilizados para a estimativa do assoreamento de reservatórios e demonstra a necessidade de se levantar um maior número de dados sedimentométricos para a utilização de modelos que se baseiam na dinâmica dos fluidos computacional. Na fase de estudo de viabilidade de implementação de um reservatório a consideração da redução do volume útil também é um importante fator a ser considerado no estudo da viabilidade econômica do empreendimento. Por fim, o que se pretende com este artigo é incitar os hidrólogos brasileiros a considerar o fenômeno do assoreamento nos modelos que trabalham com o planejamento e operação de reservatórios.*

**Palavras-chave:** assoreamento de reservatórios; modelos de planejamento e operação de reservatórios.

---

### INTRODUÇÃO

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 abastecimento e de navegação (Kutner, 1977). O comentário apresentado mostra que a preocupação com os impactos do acúmulo de sedimentos nos reservatórios não é recente. Esta preocupação começou a vir à tona quando os primeiros reservatórios construídos passaram a ter a sua operação alterada por este fenômeno. Atualmente o problema é tratado, na maioria das vezes, através de ações corretivas, não sendo vislumbrado as ações preventivas que poderiam ser empregadas para a minimização dos impactos negativos, inclusive econômicos, trazidos pelo processo gradual de assoreamento de reservatórios.

Os problemas trazidos pela deposição de sedimento no reservatório dizem respeito principalmente à redução do volume útil do reservatório, que irá interferir no uso para o qual foi

construído, como: geração de energia, abastecimento público ou industrial, irrigação, contenção de enchentes, dentre outros. Pode-se ainda destacar problemas operacionais vinculados a este processo, como: abrasão de componentes – tubulações, pás de turbina, sistemas hidráulicos; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação 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 da afetar a segurança da barragem.

Estudos têm sido realizados para a determinação dos atuais volumes dos reservatórios, já em operação, assim como prognósticos da sua vida útil. Estes estudos na maioria das vezes se baseiam em modelos simplificados, em função da insuficiência de dados para a realização de um estudo mais detalhado. Modelos computacionais baseados na dinâmica dos fluidos já foram desenvolvidos, mas não são comumente utilizados no Brasil, principalmente devido à falta de dados necessários para a sua utilização.

A previsão de assoreamento de um reservatório deve ser uma importante ferramenta a ser utilizada no estudo de viabilidade de implementação do projeto, visto que este é um fator determinante na vida útil do empreendimento e sua conseqüente viabilidade econômica. Na fase de operação do reservatório a atualização das curvas cota *vs.* área *vs.* volume deve ser uma tarefa de fundamental importância, para que a alocação de água possa ser realizada baseada num real volume útil do reservatório e não mais em levantamentos realizados na época do seu enchimento.

Os atuais modelos de alocação de água de reservatórios não consideram o processo de assoreamento, esta consideração apenas pode ser feita pelo usuário através da alteração dos dados de entrada dos volumes do reservatório. A inclusão de informações referentes à redução do volume útil do reservatório é uma proposta que deve começar a ser pensada pelos pesquisadores, para que se possa, desta forma, oferecer respostas mais confiáveis sobre o comportamento do sistema.

## ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

Segundo Borland & Miller (1958) o primeiro método estritamente matemático desenvolvido para o cálculo da redução do volume de reservatórios, foi o método de incremento de área, desenvolvido por Cristofano (sem data). O método é útil para se fazer estimativa rápida da altura de sedimento no reservatório em um período de tempo pré-determinado. Com a implementação do método é possível determinar a nova curva cota *vs.* área *vs.* volume em função do assoreamento sofrido pelo reservatório no período em análise.

As técnicas que se seguiram, de estimativa do assoreamento de reservatórios, foram inicialmente desenvolvidas experimentalmente, com o cálculo do percentual de retenção de sedimentos pelo reservatório. Esta eficiência de retenção de sedimento, por parte do reservatório, depende de um grande número de fatores como a capacidade do reservatório, a vazão líquida de entrada no reservatório, a idade, forma e operação do reservatório, além das características do sedimento.

Inicialmente a eficiência de retenção foi relacionada a um fator determinado pela razão entre a capacidade do reservatório e a área da bacia de drenagem em estudo (C/W). Esta relação foi utilizada no estudo desenvolvido por Brune & Allen (1941) onde através dos dados de 23 reservatórios os

autores relacionaram a taxa de erosão da bacia, o fator C/W e o método de operação do reservatório, para a determinação do acúmulo anual de sedimento no reservatório. Segundo os autores não houve uma boa correlação dos dados devido à não análise de outros fatores que apresentam interferência no processo de assoreamento.

Brown apud Brune (1953) foi o primeiro a desenvolver uma curva onde relacionava a razão C/W com o valor de eficiência de retenção do reservatório. Um dos problemas observados na utilização desta curva se deu na comparação entre reservatórios que poderiam apresentar valores iguais da razão C/W, mas localizados em áreas com climas diferentes. Os reservatórios localizados em áreas úmidas poderiam ter uma menor eficiência de retenção do que aqueles localizados em regiões áridas, que podem não apresentar volume d'água suficiente para o processo de vertimento.

O método de Churchill apud Brune (1953) apresenta curvas representativas do percentual de sedimento efluente do reservatório, em função da capacidade do reservatório e da vazão afluente ao mesmo, sendo este chamado de índice de sedimentação, IS (Equação 1).

$$IS = \frac{V^2}{Q^2 \times L} \quad (1)$$

Sendo V o volume do reservatório, em m<sup>3</sup>, Q a vazão afluente média diária durante o período de estudo, em m<sup>3</sup>/s e L o comprimento do reservatório, em m.

De acordo com Brune (1953) o fator IS apresenta uma relação mais próxima com a eficiência de retenção do que a relação entre a capacidade e área de drenagem do reservatório (C/W), inicialmente utilizada. Isto ocorre porque o IS está relacionado não só à área de captação de água da bacia hidrográfica, mas também à quantidade de água que realmente escoar pela bacia e atinge o leito do rio. Brune (1953) apresenta um método baseado na análise de um grande número de reservatórios americanos, para a determinação da percentagem de sedimentos retidos, em função da capacidade de afluência, definida como a razão entre a capacidade do reservatório e o volume afluente anual.

As curvas apresentadas em Churchill (1948) e Brune (1953), são atualmente muito utilizadas, no Brasil, para estimativas preliminares do volume de sedimento acumulado no reservatório. Sendo o

volume de sedimento retido no reservatório (S), em  $m^3$ /ano, calculado a partir de uma relação entre o deflúvio sólido total médio afluente ao reservatório ( $D_{st}$ ), em t/ano, a eficiência de retenção do sedimento afluente ao reservatório ( $E_r$ ), em fração e o peso específico aparente médio dos depósitos ( $\gamma_{ap}$ ), em  $t/m^3$  (Equação 2).

$$S = \frac{D_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} \quad (2)$$

Os principais fatores que afetam o cálculo do peso específico do sedimento, segundo Strand (1974), são a forma como o reservatório é operado, a textura e o tamanho das partículas de sedimento, a taxa de compactação, a idade do depósito e o acúmulo de matéria orgânica. Destes fatores a forma de operação do reservatório tem grande importância, pois determina o grau de exposição do sedimento e, por conseqüente, o seu grau de compactação. Quanto maior a profundidade onde o sedimento é depositado maior será o valor do seu peso específico, devido à maior compactação do material. Para a determinação do peso específico do sedimento depositado no reservatório normalmente se faz uso das fórmulas desenvolvidas por Lane e Koelzer (1943) e Miller (1953) apud Annandale (1987) que levam em consideração o tipo de operação do reservatório, o peso específico inicial do depósito, as frações de argila, silte e areia e o tempo de compactação do sedimento.

O cálculo do deflúvio sólido total médio afluente ao reservatório ( $D_{st}$ ) normalmente é feito a partir da soma da descarga em suspensão com a descarga sólida de arrasto, ou ainda por processo de cálculo, o qual exige a amostragens e análise do sedimento em suspensão do leito. Graf (1971) apresenta o método de Einstein (1950), o método de Einstein modificado (Colby & Hembree 1955), o método de Laursen (1958) e o método de Graf & Acaroglu (1968) como processos de cálculo da descarga sólida total. O método desenvolvido por Einstein e modificado em Colby & Hembree (1955) é o mais comumente utilizado. Os artigos científicos atualmente apresentados em encontros nacionais simplificam o processo de determinação do  $D_{st}$  através da utilização da curva – chave de sedimento, que relaciona dados de carga sólida de sedimento em suspensão afluente ao reservatório e vazão líquida afluente.

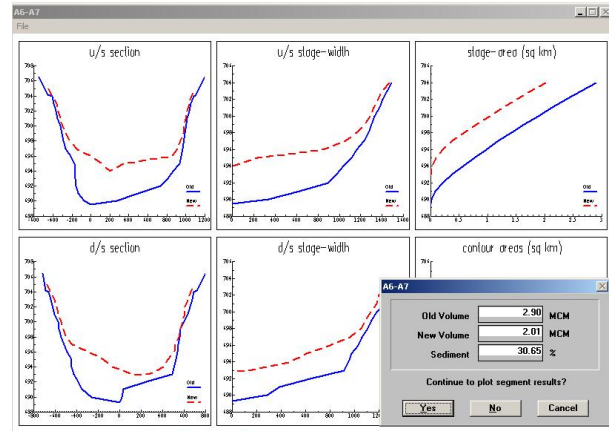


Figura 1 – Análise dos volumes de sedimento acumulado nas seções

Os modelos que se baseiam na dinâmica dos fluidos computacional normalmente utilizam equações de continuidade e quantidade de movimento da água além da equação de continuidade de sedimento para a determinação do volume de sedimento depositado no reservatório, bem como a sua localização. O software RESSASS (Ressass, 2003) é um exemplo deste tipo de modelo, desenvolvido pela Overseas Development Unit da HR Wallingford com o objetivo de analisar resultados do levantamento topográfico do reservatório para determinação do volume de sedimento acumulado no mesmo (Figura 1), bem como prever cenários futuros da topografia do reservatório em função do assoreamento (Figura 2). O modelo trabalha com as equações do movimento do fluxo de água (equações de Saint-Venant) e de sedimento em canais abertos, considerando regime permanente.

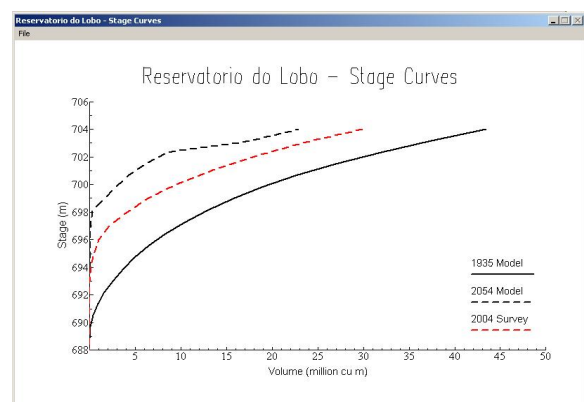


Figura 2 – Curvas cota vs. volume: antiga, atual e prevista

Estes modelos por considerarem um maior número de interferência no sistema, também necessitam de um maior número de dados de entrada e é esta a maior dificuldade para a sua utilização, devido à insuficiência de informações.

Estudos mais detalhados são realizados apenas em algumas regiões, através da batimetria de um reservatório existente, ou ainda por levantamento de dados de concentração de sedimento em suspensão, descarga sólida do leito e granulometria destes materiais, para o estudo de viabilidade de implementação do reservatório na área de estudo. Apenas com uma rede sedimentométrica mais abrangente será possível realizar estudos mais confiáveis a respeito do volume de sedimento já depositado nos reservatórios, bem como previsões da evolução deste processo.

## PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS – NOVO PARADIGMA

O problema de dimensionamento e operação de reservatórios foi inicialmente abordado no ano de 1883, com os estudos de Rippl (Rippl apud Klemes, 1979), para dimensionamento do volume útil de reservatórios isolados. Com o incremento de investimentos na área de obras hidráulicas, principalmente na construção de barragens, os sistemas de recursos hídricos passaram a ser mais complexos, com múltiplos reservatórios e multi-objetivos.

A operação de um reservatório consiste na tomada de decisão do volume de água a ser liberado, em um dado intervalo de tempo, a fim de atender às demandas requeridas pelo sistema. Os modelos inicialmente desenvolvidos tiveram como objetivo básico o dimensionamento de reservatórios, mas devido ao aumento dos usos dados a um mesmo reservatório, bem como os conflitos vinculados a este processo, novos modelos de simulação e otimização foram implementados e são incrementados a cada dia, em busca de melhores resultados e de um gerenciamento integrado, com menores riscos de falha e maior satisfação dos usuários do sistema.

O problema básico na determinação da capacidade do reservatório a ser instalado num curso d'água para o atendimento da demanda, ou ainda a determinação das vazões captadas de um reservatório já existente, recai na relação entre características da vazão afluyente, capacidade do

reservatório e confiabilidade do sistema. O tratamento proposto para o dimensionamento e operação de reservatórios leva em consideração o esquema apresentado na Figura 3, onde a vazão afluyente e captada e a capacidade do reservatório são variáveis com o tempo, não mais se utilizando de um valor fixo para o volume útil do reservatório.

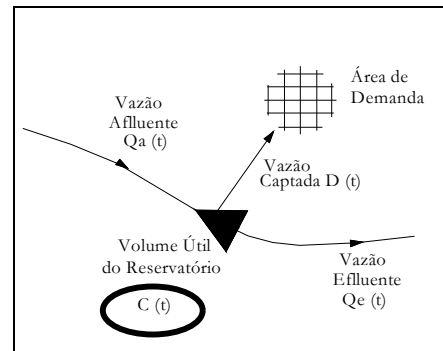


Figura 3 – Esquema proposto para o planejamento e operação de reservatórios (Adaptado de McMahon & Mein, 1978)

Modelo é uma representação simplificada do sistema real que se deseja analisar (Porto & Azevedo, 1997). Os modelos desenvolvidos na área de recursos hídricos não são capazes de englobar todos os fatores que interferem no sistema em análise, a posterior inclusão de processos considerados relevantes é uma evolução natural dos modelos computacionais. O avanço tecnológico e a maior capacidade de processamento dos computadores permitem incluir, sem maiores dificuldades, o processo de assoreamento nos modelos de alocação de água. A inclusão deste processo pode ser feita inicialmente como a inserção, como dado de entrada, de uma taxa de assoreamento, taxa esta que seria estimada através dos modelos de transporte e deposição de sedimento. A Figura 4 apresenta um fluxograma de simulação da operação de reservatório com a consideração da redução de volume do reservatório a cada intervalo de tempo considerado.

Sendo  $S_{t+1}$  o armazenamento no início do tempo "t+1",  $S_t$  o armazenamento no início do tempo "t",  $q_t$  o deflúvio afluyente no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $D_t$  a descarga operada visando ao suprimento das demandas no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $E_t$  a evaporação do reservatório no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $P_t$  a chuva sobre o reservatório no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $C_{t+1}$  a capacidade do reservatório no início do tempo "t+1",  $C_t$  a

capacidade do reservatório no início do tempo “t” e  $V_{\text{assor}}$  o volume de sedimento que acumulou no reservatório no intervalo de tempo  $\Delta t$ . Sendo ainda,  $\Delta t$  o intervalo de tempo compreendido entre “t” e “t+1”.

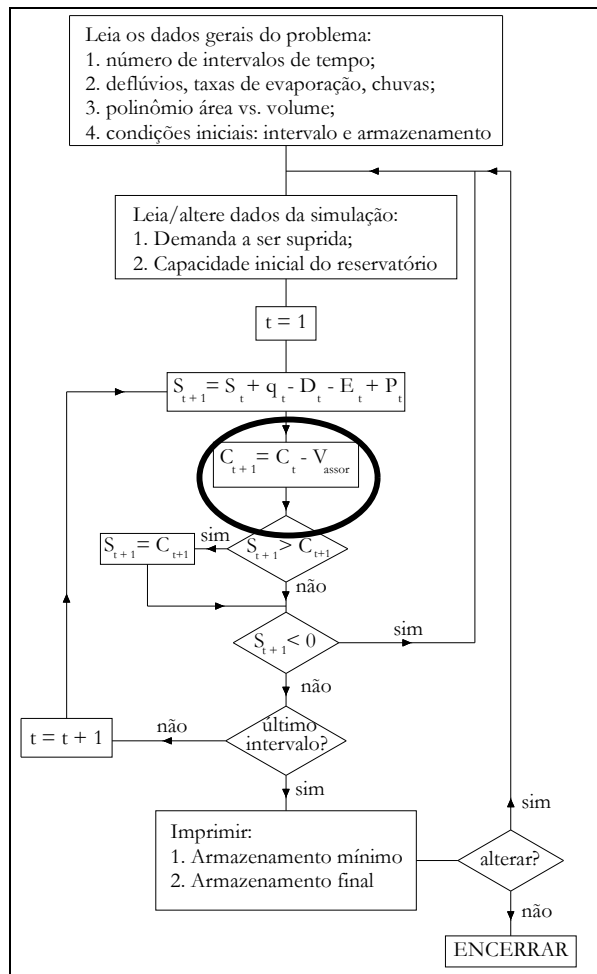


Figura 4 – Fluxograma de simulação da operação de reservatório – considerando o assoreamento (Adaptado de Lanna, 1997)

Mesmo que não existam dados suficientes para a determinação da redução do volume do reservatório, ou mesmo a previsão desta taxa, no caso do planejamento, pode-se gerar cenários otimistas e pessimistas do assoreamento para se obter informações referentes à interferência deste processo na vazão regularizada pelo reservatório. Este estudo pode ainda ser mais um fator a ser considerado na análise locacional do reservatório.

Tate & Farquharson (2000) apresentam um estudo de planejamento de utilização da Barragem de Taberna, no Paquistão, através da geração de

cenários futuros que consideram a elevação do nível mínimo do reservatório devido ao assoreamento, através da atualização da curva cota *vs.* área *vs.* volume. Este estudo fornece resultado quanto ao melhor período de implantação de reservatório a montante, instalação de turbinas extras e utilização da descarga de fundo. O processo de assoreamento considerado neste estudo é de suma relevância para a modelagem do sistema. Este trabalho, assim como outros, devem se tornar cada vez mais freqüentes, devido à importância de mais este fator de interferência no gerenciamento dos reservatórios.

## CONCLUSÕES

A importância da consideração da redução do volume útil do reservatório, devido ao assoreamento, é uma realidade notória, bem como a influência desta redução na vazão regularizada pelo sistema. O que se pretende com este artigo é alertar para a necessidade de inserção do processo de assoreamento nos modelos de planejamento e operação de reservatórios. Os modelos atualmente desenvolvidos não consideram esta interferência, e normalmente os operadores destes modelos não fazem nenhum estudo, a parte, para a análise da sua relevância.

A inclusão de dados de taxa de assoreamento nos modelos de alocação de água também chamaria a atenção dos pesquisadores quanto ao processo de acúmulo de sedimento no reservatório. Podendo assim aumentar o número de levantamentos de dados sedimentométricos e de batimetrias dos reservatórios, para atualização da suas curva cota *vs.* área *vs.* volume.

O Brasil ainda apresenta uma rede sedimentométrica muito efêmera, com poucas medições ao longo do tempo. Para a estimativa do assoreamento que os reservatórios vem sofrendo ao longo dos anos, há a necessidade de se investir mais na coleta destes dados, bem como aumentar o número de medições, principalmente nos períodos úmidos.

Este trabalho apenas levanta esta importante questão e faz parte das pesquisas que atualmente estão sendo realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, pelo grupo de pesquisa “Hidráulica Ambiental”, na linha de pesquisa “Dinâmica da Evolução do Assoreamento em Reservatórios e Consequências Hidráulicas e Ambientais”.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- ANNANDALE G.W. (1987). *Reservoir Sedimentation*. New York, Elsevier Science Publishers. (Developments in Water Science).
- BORLAND, W.M.; MILLER, C.R. (1958). *Distribution of Sediment in Large Reservoirs*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, v.84, n.HY2, Proceeding Paper n.1587, p.1587-1 a 1587-18. April.
- BROWN, C. B. (1943). Discussion of "Sedimentation in Reservoirs" by B. J. Witzig, Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., v. 69, n. 6, p. 793-815, 1493-1499.
- BRUNE, G. M. (1953). *Trap Efficiency of Reservoirs*. Trans. American Geophysical Union. Vol. 34, n.3, June .
- BRUNE, G. M.; ALLEN, R. E. (1941). *A Consideration of Factors Influencing Reservoir-Sedimentation in the Ohio Valley Region*. Am. Geophys. Union Trans. P.649-655.
- CHURCHILL, M. A. (1948). Discussion of "Analysis and use of reservoir sedimentation data" by L.C. Gottschalk, p. 139-140, Proc., Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Washington, D.C., jan.
- CRISTOFANO, E. A. (sem data). *Former Hydraulic Engineer, Project Office, Bureau of Reclamation, Albuquerque, New Mexico*.
- COLBY, B. R.; HEMBREE, C. H. (1955) *Computations of Total Sediment Discharge*. Niobrara River near Cody, Nebraska, U. S. Geol. Survey, Water Supply Paper 1357.
- EINSTEIN, H. A. (1950) *The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows*. U. S. Dept. Agric., Soil Conserv. Serv., T.B. n. 1026.
- GRAF, W. H.; ACAROGLU, E. R. (1968) *Sediment Transport in Conveyance Systems* (Part 1), Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydr., XIII<sup>e</sup> année, n. 2.
- GRAF, W.H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw-Hill Book Company.
- KLEMES, V. (1979). *Storage Mass-Curve Analysis in a Systems-Analytic Perspective*. Water Resources Research. v. 15, n. 2, p. 359-370, april.
- KUTNER, A. S. (1977). *Assoreamento de Reservatórios*. In: Informativo ABGE, n. 11. out (1979), p. 4. Resumo.
- LANE, E. W.; KOELZER, V. A. (1943). *Density of Sediments Deposited in Reservoirs*. Report nº 9, U. S. Interdepartmental Committee, St. Paul District, Corps of Engineers, St. Paul, Minnesota, november.
- LANNA, A. E. (1997). *Regularização de vazões em reservatórios*. In: TUCCI, CARLOS E. M. (org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. ABRH.
- LAURSEN, E. M. (1958) *The Total Sediment Load of Streams*, Proc. Am. Soc. Civil Engrs., vol. 84, n. HY1.
- MCMAHON, T. A.; MEIN, R. G. (1978). *Reservoir Capacity and Yield*. Elsevier. New York.
- MILLER, C. R. (1953). *Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computation*. U. S. Bureau of Reclamation memorandum, february.
- PORTO R.L.; AZEVEDO L.G.T. (1997). *Sistemas de suporte a decisões aplicados a problemas de recursos hídricos*. In: PORTO, R.L.L., org. *Técnicas quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos*. Porto Alegre, UFRGS/ABRH. Cap. 2, p.43-96.
- RESSASS (2003). *Reservoir Survey Analysis and Sedimentation Simulation*. <http://www.hrwallingford.com.uk/software/ressass.html> (25 ago).
- STRAND, R.I. (1974). *Reservoir Sedimentation*. In: *Design of Small Dams*. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation, p.767-796.
- TATE, E. L.; FARQUHARSON, F. A. K. (2000). *Simulating Reservoir Management under the Threat of Sedimentation: The Case of Taberna Dam on the River Indus*. Water Resources Management. EWRA. v. 14, n. 3, p. 191 – 208, jun.

## *The Need to Consider the Siltation Process in Reservoir Planning and Operation*

## ABSTRACT

*This work aims at discussing the importance of estimating sediment volume in reservoir planning and operation. Currently, stage vs area vs volume curves have*

*been updated for only a few reservoirs in Brazil. Therefore reservoir volumes measured by limnimeter are usually overestimated. Thus, it is necessary to estimate accumulated sediment volume in reservoirs, by means of transport and deposition sediment models or reservoir bathymetry. This study introduces some of the models presently used in estimating reservoir siltation and demonstrates the need for more sediment information data in Brazil in order to allow the use of computational fluid dynamics models. During the feasibility study of the implementation of a reservoir, active volume reduction is also an important factor to be considered in studying the economic feasibility of the project. Finally, another goal of this paper is to encourage Brazilian hydrologists to consider siltation in reservoir planning and operation models.*

*Key words: reservoir siltation, reservoir planning and operation models*