

## Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação

José Carlos de Araújo

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici, bloco 713 - Caixa Postal 6018  
60451-970 Fortaleza, CE - Tel. (85) 288-9624 - Fax 288-9627 - jcaranjo@ufc.br

Recebido: 11/01 - revisão: 06/02 - aceito: 04/03

### RESUMO

Considerando-se a importância estratégica dos reservatórios para o semi-árido, faz-se necessário investigar os processos que comprometem seu rendimento quantitativo e qualitativo ao longo do tempo. Entre estes merece destaque o processo de assoreamento, objeto de estudo desta pesquisa. No presente artigo propõe-se metodologia para estimar assoreamento em reservatórios do semi-árido a partir de parâmetros topográficos, pluviométricos, pedológicos e de cobertura vegetal da bacia hidrográfica, gerando-se um modelo intitulado HidroSed. O modelo permite estimar o transporte difuso de sedimentos pelos métodos de Maner, Roehl e Williams-Berndt. Para validação do modelo foram analisadas seis bacias hidrográficas rurais e uma bacia urbana, todas localizadas no estado do Ceará e controladas por um reservatório. As bacias estudadas apresentam grande amplitude de área de contribuição ( $3 \text{ km}^2$  a  $1220 \text{ km}^2$ ), capacidade de reserva ( $0,5 \text{ hm}^3$  a  $126 \text{ hm}^3$ ) e características fisiográficas (sertão, serra, litoral). Após aplicação do modelo HidroSed (com passos mensais e sem calibração de parâmetros) foi realizada campanha para medir a redução de volume do reservatório desde sua conclusão até a data de medição de controle. Através da realização de sondagens mediu-se a massa específica aparente do material assoreado, o que permite calcular a massa assoreada no período que foi, em média, de 68 anos. A comparação dos valores simulados e medidos demonstrou que o modelo errou, em média, apenas 29%, quando a formulação de Maner foi utilizada. Ficou demonstrada a pouca aplicabilidade das equações de Roehl e Williams-Berndt para as bacias estudadas. De acordo com os dados de campo, a taxa de assoreamento característica é de aproximadamente  $2,7 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , o que corresponde à perda média de volume de 1,85% a cada década. Para o estado do Ceará isso significa uma perda aproximada de  $22 \text{ hm}^3$  por ano.

**Palavras-chave:** assoreamento; reservatórios; semi-árido.

### INTRODUÇÃO

O Semi-árido Brasileiro abrange uma área de quase  $1.000.000 \text{ km}^2$  e abriga uma população em torno de 15 milhões de habitantes, onde o conflito pela água já é uma realidade. Seu abastecimento hídrico depende em grande parte das águas superficiais acumulada nos reservatórios: no Ceará, por exemplo, 93% da água oferecida aos usuários vêm dos açudes. Considerando-se que brevemente toda a capacidade estratégica de acumulação de água nos reservatórios esteja construída (isto é, não será mais possível aumentar a oferta de água eficientemente pela construção de novos reservatórios), é fundamental para o desenvolvimento sustentável da região a conservação da qualidade e da quantidade da água acumulada. Neste sentido os sedimentos carreados e depositados nos açudes do Semi-árido apresentam um grande potencial de deterioração quantitativo e qualitativo da água oferecida superficialmente. De fato, os reservatórios do semi-árido conseguem regularizar apenas cerca de 40% da vazão afluentes, “perdendo” 60% entre evaporação e extravasamento. Com o assoreamento a tendência geral é de aumento das perdas por evaporação (uma vez que as relações cota - área - volume sofrem alterações) e das perdas

por extravasamento (uma vez que há redução da capacidade acumulativa do reservatório).

Este artigo relata os principais resultados obtidos ao longo de pesquisa desenvolvida pelo grupo de Hidrossedimentologia do Programa WAVES entre setembro de 1998 e dezembro de 2000. WAVES (Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in Northeast Brazil) é um programa de cooperação entre Brasil e Alemanha que tem por objetivo estudar a vulnerabilidade dos ecossistemas e da sociedade em função da disponibilidade de água no Nordeste do Brasil. O grupo de Hidrossedimentologia está inserido na área de conhecimento hidrologia e gestão de recursos hídricos tendo como objetivo principal a caracterização do assoreamento em reservatórios do Semi-árido.

Para isso foram dados os seguintes passos: (i) elaboração do modelo HidroSed; (ii) simulação do processo em sete bacias representativas do semi-árido; e (iii) validação de seus resultados através de levantamentos de campo. A modelagem consta de três etapas fundamentais: avaliação da produção de sedimentos por erosão laminar; validação do transporte difuso do sedimento na bacia; e avaliação da retenção do sedimento no reservatório. Simula-se, então, o processo de erosão - transporte - assoreamento para cada bacia a ní-

vel mensal desde a data do fechamento do boqueirão até o momento da medição de controle sem calibração. Para validar a simulação compararam-se os resultados da simulação com os dados de assoreamento medidos no campo.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

Para consecução dessa pesquisa foram selecionadas sete bacias hidrográficas de reservatórios que fossem representativas para o estado do Ceará. As bacias estudadas são controladas, em seu exutório, pelos seguintes reservatórios: (1) Acarape do Meio, no município de Redenção, localiza-se em região serrana, pertencendo à bacia Metropolitana, a vegetação que recobre a área é predominantemente mata úmida e seca; (2) Várzea do Boi, no município de Tauá, localiza-se no sertão dos Inhamuns, pertencendo à bacia do Alto Jaguaribe, a vegetação que recobre a área é a caatinga arbórea/arbustiva; (3) São Mateus, no município de Canindé, localiza-se no sertão central, pertencendo à bacia do Curu, a vegetação que recobre a área é a caatinga arbustiva; (4) Cedro, no município de Quixadá, o mais antigo açude do estado localiza-se no sertão central, pertencendo à bacia do Banabuiú, a vegetação que recobre a área é caatinga arbustiva; (5) Várzea da Volta, no município de Moraújo, localiza-se no sertão pré-litorâneo, pertencendo à bacia do Coreaú, a vegetação que recobre a área é caatinga arbustiva e mata seca; (6) Canabrava, no município de Farias Brito, localiza-se na região do Cariri, tropical semi-úmido, divisa das bacias do Alto Jaguaribe e Salgado, a vegetação que recobre a área é a caatinga arbórea/arbustiva; e (7) Santo Anastácio, no município de Fortaleza, localiza-se na região litorânea, pertencendo às bacias Metropolitanas, a vegetação que recobre a área é tabuleiro litorâneo. Das bacias estudadas, todas são características de áreas rurais, exceto a do açude Santo Anastácio (7) está situada em área urbana. Selecionou-se a bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio como área piloto do estudo, para estabelecimento da metodologia adequada a ser adotada nas outras áreas de estudo (Fernandes, 2000).

A Tabela 1 apresenta as principais características físicas das bacias estudadas. Observe-se que a área das bacias varia de 3 km<sup>2</sup> a 1220 km<sup>2</sup>, tendo média pouco abaixo de 300 km<sup>2</sup>; o período de simulação médio é de 68 anos e o volume inicial dos reservatórios varia de 0,5 hm<sup>3</sup> a 126 hm<sup>3</sup>, apresentando média de 34 hm<sup>3</sup>. Assim, acredita-se que as áreas estudadas sejam representativas das bacias do semi-árido cearense.

### Modelagem das bacias

Sobre mapa, na escala 1:100.000 (para a bacia Santo Anastácio, na escala 1:10.000), são definidas as bacias hidrográficas de cada reservatório. A bacia é, então, subdividida

**Tabela 1. Características das bacias estudadas.**

Bacia	Área da bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )	Período de simulação (anos)	Volume inicial do reservatório (hm <sup>3</sup> )
Acarape do Meio	208,19	74	34,1
Várzea do Boi	1.221,20	47	51,9
São Mateus	226,94	46	10,3
Cedro	219,96	94	125,7
Várzea da Volta	155,24	81	12,5
Canabrava	2,85	57	1,2
Santo Anastácio	9,34	75	0,5
Média	291,96	68	33,7

em células (ou quadrículas) consideradas, para efeito de modelagem, homogêneas. Para as bacias dos açudes Acarape do Meio, Cedro, São Mateus, Canabrava, Várzea da Volta e Alto Alegre foram adotadas células de 4 km<sup>2</sup>; para a bacia do açude Várzea do Boi, por apresentar uma área maior, adotaram-se células de cerca de 25 km<sup>2</sup>; enquanto que para a bacia urbana Santo Anastácio foram definidas células de cerca de 1 km<sup>2</sup>.

### Bases do modelo HidroSed

O modelo HidroSed foi gerado ao longo desta pesquisa para quantificar o fenômeno do assoreamento em reservatórios no Semi-árido a partir do conhecimento de precipitação, topografia, pedologia, vegetação e uso de solo. A escala de trabalho é, espacialmente, a bacia hidrográfica e, temporalmente, décadas, embora a simulação seja feita para cada célula e em passos mensais. Isso significa que não se pretende avaliar a produção e o transporte de sedimentos na escala do lote agrícola, nem tampouco na escala do evento. Deseja-se, sim, avaliar assoreamento na escala de planejamento. O modelo permite, portanto, avaliar o impacto de ações antrópicas em bacias, assim como o impacto de alterações climáticas sobre o processo de assoreamento e, consequentemente, sobre a disponibilidade de recursos hídricos superficiais no Semi-árido. A Figura 1 apresenta, esquematicamente, as etapas consideradas na geração do modelo, enquanto que a Figura 2 apresenta o fluxograma básico do algoritmo HidroSed.

O modelo HidroSed parte do princípio que, com base na observação de campo, a contribuição mais significativa de sedimentos nas regiões semi-áridas provém da erosão laminar. De fato, nas sete áreas estudadas, nenhuma ocorrência relevante de erosão em canais foi observada. Assim, após a ocorrência da erosão a nível local, o sedimento inicia sua trajetória em direção ao reservatório. Inicialmente o deslocamento ocorre de modo difuso, sobre o terreno, onde grande parte dos sedimentos localmente deslocados fica retida. Depois, ao atingir o leito dos drenos mais expressi-

vos, o sedimento pode ser depositado e/ou erodido do leito. De acordo com observação de fotos antigas (geralmente fotos de 1958 do DNOCS) em comparação com o leito atural dos rios estudados, foi possível verificar que nem a ocorrência de significativos depósitos nem a ocorrência de erosão nos leitos foi observada. Por essa razão, a primeira versão do modelo HidroSed admite hipótese simplificadora de que, considerando-se a escala de tempo utilizada (sete décadas em média), a massa de sedimentos que chega aos drenos é a mesma massa que chega aos reservatórios.

### Cálculo da erosão localizada

O cálculo da erosão localizada se dá através de adaptação da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) que apresenta a seguinte expressão:

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

onde  $M_L$  é a erosão localizada ( $t.\text{ano}^{-1}$ ); R o fator de erosividade da chuva ( $\text{MJ.mm.h}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ); K o fator de erodibilidade do solo ( $t.h.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ); L o fator topográfico que representa o comprimento do declive do terreno natural (adimensional); S o fator topográfico que representa a declividade (adimensional); C o fator que representa a cobertura vegetal e o uso do solo (adimensional); P o fator que reflete práticas conservacionistas (adimensional); e A a área ( $\text{ha}$ ). Para cada célula foram calculados os fatores previstos pela USLE nas bacias dos açudes em estudo, descritos a seguir, no período compreendido entre o ano do término da construção do açude e o ano de levantamento dos dados topo-batimétricos.

**Fator de erosividade da chuva (R)** - O fator R foi calculado a partir da Equação (2), desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer. Para o cálculo da erosividade da chuva anual, deve-se somar os valores calculados para cada mês:

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

para  $P_m$  igual à precipitação mensal ( $\text{mm.mês}^{-1}$ );  $P_a$  a precipitação média anual ( $\text{mm.ano}^{-1}$ );  $R_m$  a erosividade mensal da chuva ( $\text{MJ.mm.h}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ ); R a erosividade anual ( $\text{MJ.mm.h}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ); e m o índice referente ao mês. Para preenchimento de eventuais falhas de dados pluviométricos foram feitas correlações entre o posto pluviométrico em questão e o mais próximo. Nos casos em que isso não foi possível (muitas vezes as falhas ocorreram simultaneamente nos vários postos da região) os valores de precipitação mensal foram admitidos iguais às médias da série disponível para o posto.

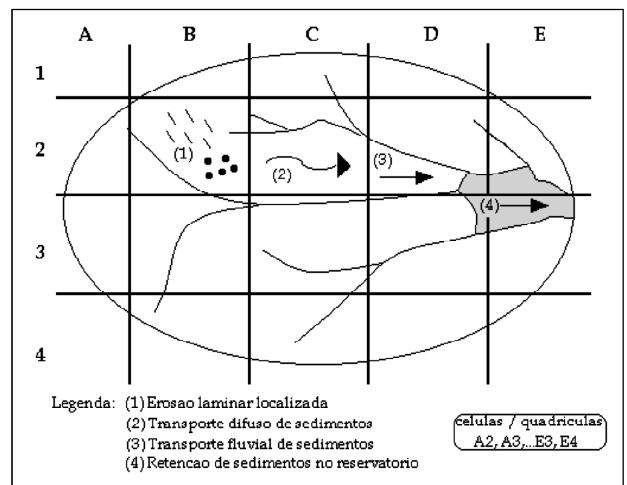


Figura 1. Esquema da concepção do modelo Hidrossedimentológico HidroSed.

**Fator de erodibilidade do solo (K)** - O fator de erodibilidade do solo pode ser determinado através do nomograma de Wischmeier e Smith (1978), reproduzido também em Righetto (1998, p. 751). Para determinação do fator K foram identificadas as principais manchas de solo, sendo coletadas amostras em regiões baixas, de encosta e altas, posteriormente analisadas no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC. Foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento e por sedimentação, de permeabilidade e de avaliação do teor de matéria orgânica. A distribuição do fator K na bacia foi realizada célula por célula, efetuando-se interpolação para estimar o valor representativo das células de acordo com as características observadas.

**Fator topográfico (LS)** - O fator LS foi determinado através da Equação (3) conforme citado em Carvalho, 1994:

$$LS = 0,00984 \cdot Lr^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (3)$$

sendo  $Lr$  o comprimento médio de rampa (m); e D o grau de declive (%). Para a determinação do comprimento médio de rampa Fernandes (2000) propõe:

$$Lr = A_q / (4 \cdot \Sigma L_{\text{dren}}) \quad (4)$$

sendo  $\Sigma L_{\text{dren}}$  a soma dos comprimentos de drenagem em uma célula; e  $A_q$  a área da célula. São considerados, para efeito de drenagem, os cursos d'água, os contornos de lagos e as estradas. Como grande parte dos drenos não são visíveis na escala de trabalho (1:100.000), o comprimento obtido nessa escala deve ser multiplicado por um fator de correção ( $\lambda$ ), estimado através da comparação dos comprimentos de drenagens medidos em cartas nas escalas de 1:100.000 e de 1:10.000 para a região Sertão Central do Ceará. O fator de correção de escala adotado

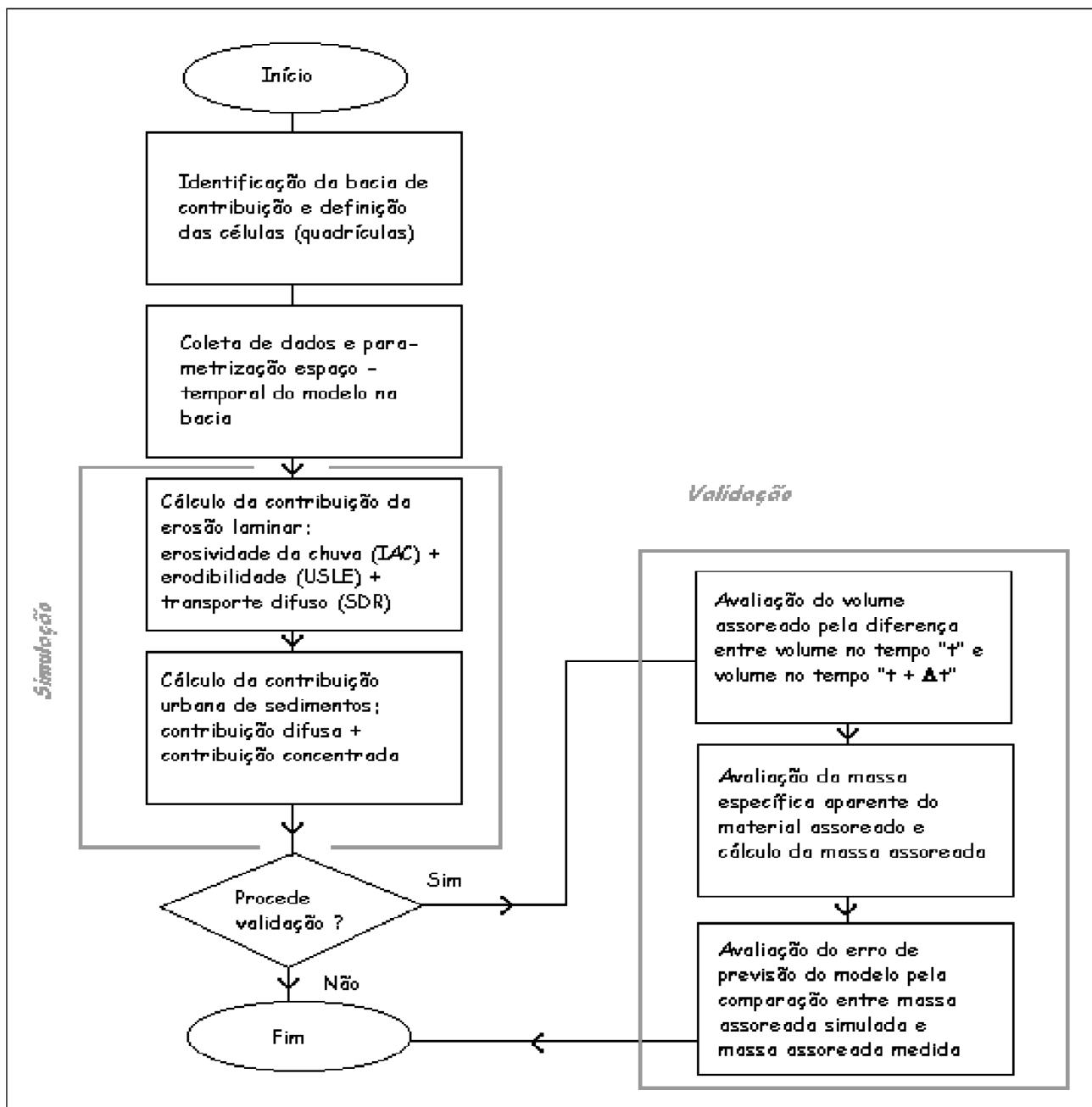


Figura 2. Fluxograma do modelo Hidrossedimentológico HidroSed.

na pesquisa difere quanto à topografia: para bacia íngreme  $\lambda = 3,5$ ; para bacia média a íngreme  $\lambda = 3,0$ ; e para bacia média a plana  $\lambda = 2,5$ . O parâmetro de declividade D é calculado, de acordo com proposta de Fernandes (2000), através da Equação (5a) (quando o terreno não apresenta pontos notáveis de cotas extremas) ou (5b) em caso contrário. De acordo com a denominação utilizada,  $C_{100\%}$  = cota máxima da célula;  $C_0$  = cota mínima da célula;  $C_{90\%}$  = cota abaixo da qual encontram-se 90% da área da célula e  $C_{10\%}$  = cota abaixo da qual encontram-se 10% da área da célula.  $C_{90\%}$  e  $C_{10\%}$  foram determinados através

da curva hipsométrica, traçada a partir das áreas medidas nas cartas digitalizadas:

$$D = (C_{100\%} - C_{0\%}) / (Aq)^{1/2} \quad (5a)$$

$$D = (C_{90\%} - C_{10\%}) / (0,8 \cdot Aq)^{1/2} \quad (5b)$$

**Fatores de uso e manejo do solo e de práticas conservacionistas (CP)** - Para determinação do fator CP são realizadas campanhas e analisadas fotos aéreas, mapas e/ou imagens de satélites disponíveis para cada bacia

nos anos de referência. De uma maneira geral, os anos de referência são o ano de construção das barragens (para os quais há relatórios detalhados), o ano de 1958 (para o qual se dispõe de levantamento aerofoto-gramétrico do DNOCS), 1969 (levantamento da SUDENE) e 1997 (levantamento da COGERH), além de novas imagens de satélite e visitas a campo. O fator "P" é obtido a partir de dados da literatura (Wischmeier e Smith, 1978). No entanto, para as bacias estudadas, o mais comum é observar ausência total de práticas agrícolas conservacionistas ( $P = 1$ ) exceto, em alguns casos, associações de culturas (milho + arroz, por exemplo) visando redução de erosão. Observe-se que, para vegetações naturais,  $P = 1$  por definição. Devido à falta de estudos sobre o fator C para o Nordeste Brasileiro, foram adotados os valores obtidos por Roose para região semi-árida da África (Reining, 1992), conforme mostrado na Tabela 2.

Para cada ano e cada célula é necessário determinar o fator de uso do solo a partir de três componentes: vegetação natural, uso agrícola e uso urbano. Calcula-se, inicialmente, para cada célula nos anos de referência, o termo CP ponderando-se os valores das componentes pelas áreas correspondentes. A partir dos anos de referência são estimados os valores de CP para os demais anos através de interpolação linear.

### Cálculo do índice de transporte difuso de sedimento - SDR

O sistema das Equações (1) a (5) permite calcular com aproximações a erosão localizada, uma vez que a base experimental da USLE foram lotes. Assim, para se calcular a erosão em toda uma bacia há que se considerar o fator de depósito e retenção difusa do sedimento para se chegar ao cálculo da erosão total da bacia. Segundo Khanbilvardi e Rogowski (1984), a razão entre a massa de sedimentos que deixa uma bacia ( $M_E$ ) e a massa de sedimentos localmente erodida ( $M_L$ ) denomina-se taxa de transporte difuso (ou razão de transferência ou ainda, em inglês, Sediment Delivery Ratio), representada pelo símbolo SDR conforme Equação (6). Khanbilvardi e Rogowski (1984) afirmam ainda que o valor médio de SDR é 25% e apresentam três formulações disponíveis na literatura: Maner, Roehl e Williams & Berndt, apresentadas nas Equações (8), (9) e (10):

$$M_E = M_L \cdot SDR \quad (6)$$

A equação de Maner considera fundamentalmente o efeito da declividade do terreno no transporte difuso e é dada por:

$$\text{Log}(SDR\%) = 2,943 - 0,824 \cdot \text{Log}(L_m/F_r) \quad (7)$$

**Tabela 2. Valores do fator "C", de uso e manejo do solo para oeste da África. Fonte: Reining (1992).**

Sistema de uso do solo	Valor característico do fator C
Solo desnudo	1,0
Floresta ou sistema de cultivo com forte cobertura do solo	0,001
Savana ou áreas de pastagem não usadas	0,01
Culturas de crescimento demorado	
1 ano	0,3 - 0,8
2 anos	0,1
Culturas de crescimento rápido	0,1
Milho	0,3 - 0,9
Arroz (cultivo intenso, 2º período de cultivo)	0,1 - 0,2
Algodão, tabaco (2º período de cultivo)	0,5
Mandioca (1º período de cultivo)	0,2 - 0,8
Café, cacau	0,1 - 0,3

Fonte: Reining (1992).

onde  $L_m$  é o comprimento máximo da bacia, em linha reta, medido paralelamente ao rio principal em metros; e  $F_r$  a diferença entre a cota média do divisor de água e a cota do exutório em metros. Roehl modificou a Equação (7) de Maner introduzindo a razão de bifurcação e área da bacia como fatores que influenciam o transporte difuso, chegando a:

$$\text{Log}(SDR\%) = 4,27 - 0,23 \cdot \text{Log}(A) + \\ - 0,51 \cdot \text{Log}(L_m/F_r) - 2,79 \cdot \text{Log}(B) \quad (8)$$

onde A é a área da bacia em *milhas quadradas*; e B a razão de bifurcação da bacia. De acordo com Williams e Berndt, o termo SDR poderia ser calculado, para bacias pequenas, a partir apenas da declividade do rio principal, como mostra a Equação (9):

$$SDR(\%) = 62,7 \cdot S_m^{0,403} \quad (9)$$

sendo  $S_m$  a declividade do curso d'água principal em % e calculada pela Equação (10):

$$S_m(\%) = 100\% \cdot \left[ n \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{S_i}} \right)^{-1} \right] \quad (10)$$

onde  $S_i$  é a declividade no trecho i; e n o número de trechos considerados. Maiores detalhes relacionados ao cálculo dos parâmetros para a determinação do SDR podem ser encontrados em Khanbilvardi e Rogowski (1984) ou em Fernandes (2000).

## Cálculo da retenção de sedimento no reservatório

O cálculo da massa assoreada ( $M_A$ ) é feito pela multiplicação, Equação (11), da massa afluente de sedimentos pela fração de retenção ( $\eta$ ). A fração de retenção do sedimento afluente é estimada, no modelo HidroSed, com base na curva de Brune (Carvalho, 1994), obtida empiricamente para 41 barragens dos EUU. Segundo Brune, a fração média de retenção do sedimento é função direta do tempo de residência médio do reservatório, calculado pela razão entre a capacidade do reservatório ( $V$ ) e a vazão afluente média anual ( $Q_a$ ). Esta formulação apresenta bons resultados para regiões em que o nível do reservatório permanece razoavelmente constante e seu vertimento é contínuo. No caso de reservatórios do semi-árido, no entanto, observa-se retenção média de sedimentos inferior à calculada por Brune, uma vez que é possível constatar alta correlação entre grande entrada e grande saída de sedimentos nos anos de alta pluviosidade (Almeida, 2001). Por exemplo, de acordo com Fernandes (2000), para o Açude Acarape do Meio, a retenção média entre 1924 e 1997 foi da ordem de 80%, não de 98% conforme curva de Brune:

$$M_A = M_E \cdot \eta \quad (11)$$

## Avaliação da contribuição urbana

Nas bacias em que a contribuição urbana não é desprezível, as Equações (6) e (11) devem ser substituídas pela Equação (12), que considera não somente o sedimento originado da erosão laminar, mas também o sedimento originário das contribuições urbanas. Na Equação (12), o termo Pop é igual a população contribuinte e  $\omega$  a contribuição *per capita* de sedimentos:

$$M_A = (M_L \cdot SDR + Pop. \omega) \cdot \eta \quad (12)$$

Dados medidos pela pesquisa no açude urbano de São Jorge (Fortaleza, Ce) durante três meses secos (praticamente nenhuma contribuição da erosão devida à pluviosidade) indicam aporte de sedimentos médio de  $0,56 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , dado esse utilizado para o cálculo do assoreamento no modelo HidroSed (Araújo, Teixeira e Mamede, 2000).

## Validação do modelo a partir de medidas em campo

A validação do modelo, considerando a escala de trabalho (bacia hidrográfica e décadas de simulação) só pode ser feita pela avaliação do assoreamento total ocorrido em um reservatório. O volume assoreado em campo é avaliado

com base na comparação dos dados de topografia na data de construção da barragem e de batimetria ou topografia realizada nas condições atuais dos açudes estudados. A partir dessas informações traçaram-se as curvas cota - volume dos reservatórios nas duas situações e, pela diferença, pode-se avaliar o volume assoreado ( $\Delta V$ ). Para cálculo da massa de sedimento efetivamente depositada é necessária a realização de sondagens para avaliação da massa específica aparente do solo assoreado. São então coletadas diversas amostras de sedimento assoreado em cada um dos reservatórios para análise em laboratório e avaliada a massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) média, dada pela razão entre a massa de solo seco e o volume que essa massa ocupa *in situ*. A massa de sedimento assoreado ( $\Delta M$ ), ao longo do tempo, é dada por  $\Delta M = \rho_{ap} \cdot \Delta V$ .

## RESULTADOS

Os resultados são apresentados, a seguir, de modo individual para cada área estudada. Ao longo da pesquisa parte dos resultados foram publicados parcialmente (Araújo e Oliveira, 2000; Araújo, Fernandes, Oliveira, e Sousa, 2000; Araújo, Oliveira, Machado Jr., Teixeira e Akabassi, 2000; Oliveira, Sousa e Araújo, 1999).

### Bacia do açude Acarape do Meio

O Reservatório Acarape do Meio é formado a partir da Barragem Eugênio Gudin situada no rio Acarape, no município de Redenção, Ceará, com relação entre o volume do reservatório e a bacia de contribuição, de  $0,16 \text{ hm}^3.\text{km}^2$ . A construção da barragem teve início em 1909 e foi concluída no ano de 1924. Suas principais finalidades são abastecimento urbano, industrial e irrigação. Esta foi a bacia piloto do estudo, para refinamento da metodologia a ser adotada nas outras áreas de estudo (Fernandes, 2000). A bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio encontra-se revestida por dois tipos vegetacionais, matas úmidas e secas (Figueiredo, 1989), localizando-se a mata úmida nos setores mais elevados do maciço de Baturité, a partir da cota altimétrica 600 m. Já a mata seca ocupa os níveis inferiores à retaguarda da floresta úmida, apresentando indivíduos de mata úmida e de caatinga. Entretanto, estudos realizados pela SEMACE (Sales, 1997), indicam alto índice de degradação do maciço de Baturité resultante do uso e ocupação desordenado do solo, que condicionaram o aparecimento de tipologias vegetacionais secundárias.

Para determinação do fator de erodibilidade de chuva ( $R$ ) foram utilizados três postos (Redenção, Pacoti e Palmácia). Para o preenchimento de falhas referentes aos anos de 1932-1935 e 1943-1961, adotou-se a média da precipitação mensal da série em estudo. Para determinação do

Tabela 3. Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude Acarape do Meio.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	34,1 $\text{hm}^3$	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	208,2 $\text{km}^2$	Maner	33,4%
Ano de construção	1924	Roehl	49,3%
Ano de verificação	1997	Williams-Berndt	91,2%
Tempo de simulação	74 anos	Erosão na bacia ( $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ )	
Fator R ( $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ )	$8135 \pm 3257 \text{ ano}^{-1}$	Maner	3,45
Fator K ( $\text{t.MJ}^{-1}.\text{h} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$0,037 \pm 0,005$	Roehl	5,09
Fator LS ( $\lambda = 3,50$ )	$2,77 \pm 2,09$	Williams-Berndt	9,42
Fator CP	$0,014 \pm 0,013$	Índice de retenção de Brune	98%
Tempo de residência	1,72 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	31,43 $\text{hm}^3$	Maner	$5,21\text{E} + 06$
Massa específica aparente assoreamento	1,32 $\text{t.m}^{-3}$	Roehl	$7,69\text{E} + 06$
Assoreamento (volume)	2,67 $\text{hm}^3$	Williams-Berndt	$1,42\text{E} + 07$
Assoreamento relativo (vol)	7,8%	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	1,06%. $\text{década}^{-1}$	Maner	+ 47,9%
Assoreamento (massa)	$3,52\text{E} + 06 \text{ t}$	Roehl	+ 118,1%
Taxa de assoreamento (massa)	2,28 $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$	Williams-Berndt	+ 303,5%

fator de erodibilidade (K) foram coletadas seis amostras de solo representativas da bacia, com valores variando entre 0,030 e 0,067  $\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ . Para o cálculo do fator LS considerou-se somente a variação espacial e o fator de escala ( $\lambda$ ) admitido igual a 3,50. Para determinação do fator composto de cobertura vegetal e uso do solo CP foram analisados quatro anos de referência, a saber, 1924, 1958, 1970 e 1997. Para cada célula determinaram-se as formações vegetais adotando índices referentes à vegetação natural, agricultura atual, agricultura de café e zona urbana. Com vistas à determinação do índice de transporte difuso de sedimento (SDR) foram calculados o comprimento  $I_m = 22.300 \text{ m}$ , a diferença de nível entre o divisor e o exutório da bacia  $F_c = 420 \text{ m}$ , a razão de bifurcação  $B = 2,82$  e a declividade média do rio principal 2,54%. Para verificação dos resultados, referir-se à Tabela 3.

Para a medida em campo do assoreamento do açude Acarape do Meio utilizaram-se dados do DNOCS para 1924 e batimetria feita pela COGERH em 1997, cujos resultados comparativos cota - volume para 1924 e 1997 estão dispostos na Figura 3. Destes valores é possível verificar redução de 2,67  $\text{hm}^3$  na capacidade de acumulação do reservatório em 74 anos de funcionamento devido ao assoreamento. Os resultados do estudo (Tabela 3) indicam perda de 7,8% da capacidade inicial de acumulação, ou seja, o assoreamento reduziu a capacidade do reservatório a uma taxa média de 0,106% ao ano. Assim, o assoreamento observado foi de 3,5 milhões de toneladas, uma vez que a massa específica aparente do material assoreado é 1,32  $\text{t.m}^{-3}$ . Um evento hidrológico de três dias foi monitorado, no qual foi possível medir a vazão sólida que chegava ao reservatório. Simulando-se a erosão localizada através do modelo HidroSed e com uso da Equação (6) foi possível avaliar SDR = 34,5%. Me-

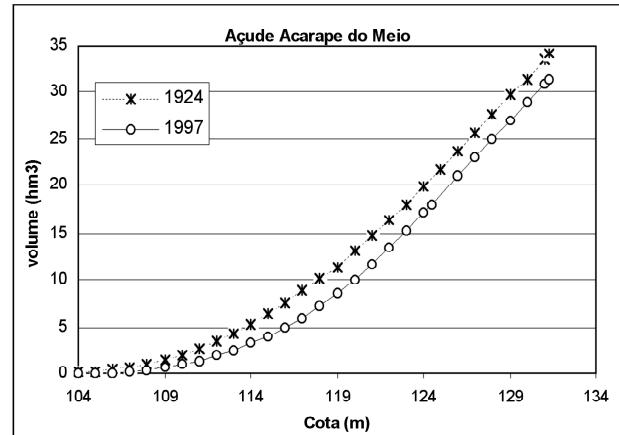


Figura 3. Cota - volume do açude Acarape do Meio em 1924 e em 1997.

diu-se também a massa de sedimentos suspensa no reservatório: com concentração média de  $365 \text{ mg.L}^{-1}$  e volume de apenas  $1,38 \text{ hm}^3$  na ocasião (abaixo do volume morto), a massa em suspensão é de apenas 504 t, desprezível se comparada com a massa efetivamente assoreada (mais de 3,5 milhões de toneladas). O modelo HidroSed, quando a equação de Maner é utilizada, comete erro de previsão do assoreamento de 48%.

### Bacia do açude Várzea do Boi

O Reservatório Várzea do Boi está situado no riacho Carrapateiras, um dos principais afluentes do rio Jaguaribe, no município de Tauá, Ceará. A construção da barragem foi concluída em 1954. Esta barragem tem como finalidade prin-

Tabela 4. Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude Várzea do Boi.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	51,91 hm <sup>3</sup>	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	1221,2 km <sup>2</sup>	Maner	15,6%
Ano de construção	1954	Roehl	10,5%
Ano de verificação	2000	Williams-Berndt	37,4%
Tempo de simulação	47 anos	Erosão na bacia (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	
Fator R (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	6119 ± 4267 ano <sup>-1</sup>	Maner	1,06
Fator K (t.MJ <sup>-1</sup> .h. mm <sup>-1</sup> )	0,032 ± 0,008	Roehl	0,71
Fator LS ( $\lambda = 2,50$ )	0,22 ± 0,22	Williams-Berndt	2,54
Fator CP	0,19 ± 0,09	Índice de retenção de Brune	98%
Tempo de residência	1,01 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	46,09 hm <sup>3</sup>	Maner	5,96E + 06
Massa específica aparente assoreamento	1,20 t.m <sup>-3</sup>	Roehl	4,01E + 06
Assoreamento (volume)	5,82 hm <sup>3</sup>	Williams-Berndt	1,43E + 07
Assoreamento relativo (vol)	11,2 %	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	2,39 %.década <sup>-1</sup>	Maner	-14,7%
Assoreamento (massa)	6,98E + 06 t	Roehl	-42,5%
Taxa de assoreamento (massa)	1,22 t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Williams-Berndt	+104,3%

cipal o suprimento d'água para o Projeto de Irrigação Várzea do Boi, assim como a piscicultura e a perenização do riacho Carrapateiras (Araújo, 1990) e está situada no sertão dos Inhamuns, uma das regiões mais secas do estado. De acordo com Figueiredo (1989), a bacia hidrográfica do açude Várzea do Boi encontra-se recoberta pela Caatinga Arbustiva Aberta. Segundo a descrição de Duque (1982), a caatinga é um conjunto de árvores e/ou arbustos, de fisionomia densa ou aberta, em geral de porte e esgalhamentos baixos, com diversa variação florística, apresentando caducidade e pequeno tamanho das folhas. Na área em estudo a vegetação de caatinga apresenta um padrão arbustivo aberto, caracterizado por árvores de caules retorcidos, que apresentam maior espaçamento de seus indivíduos. Este ambiente é caracterizado por solo raso e pedregoso.

Para o cálculo do fator de erodibilidade da chuva (R) utilizaram-se os postos pluviométricos Riachão do Banabuiú, Santo Antônio, Várzea do Boi, Boa Esperança e Forquilha. Para determinação do fator K foram coletadas 12 amostras representativas de manchas de solo da bacia, variando os valores medidos entre 0,017 e 0,050 t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>. Para o cálculo do fator topográfico LS foram analisados fotos aéreas, mapa e imagens de satélite em três anos de referência: 1958, 1965 e 1997 (fotos COGERH acompanhadas de inspeção no campo) admitido fator de escala ( $\lambda$ ) igual a 2,50. Verificou-se que a vegetação natural em 1997 corresponde, em média, a apenas 77% da existente em 1958. Devido ao fato de não haver práticas agrícolas conservacionistas na região, admitiu-se P = 1,0. Para determinação do índice de transporte difuso de sedimentos foram medidos comprimento  $L_m = 58.900$  m, desnível  $F_r = 440$  m, razão de bifurcação 3,59 e declividade média do curso d'água principal 0,28%.

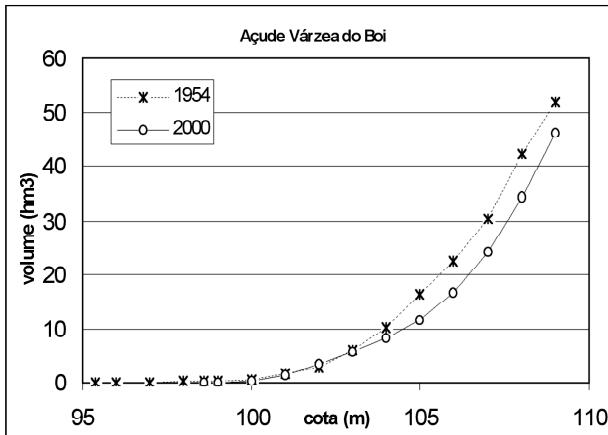


Figura 4. Cota - volume do açude Várzea do Boi em 1954 e em 2000.

Os principais resultados dos estudos podem ser vistos na Tabela 4.

Para avaliação do assoreamento do açude Várzea do Boi foi realizado, no âmbito desta pesquisa, estudo topográfico complementado por levantamento batimétrico da bacia hidráulica em junho de 2000, quando o reservatório se encontrava com capacidade inferior a 1%. A Figura 4 mostra os resultados do levantamento cota - volume nos anos de 1954 e 2000. Desse modo é possível verificar redução de 5,82 hm<sup>3</sup> na capacidade de acumulação do reservatório em 47 anos de funcionamento devido ao assoreamento. Os dados indicam perda de 11,2% da capacidade inicial de acumulação, ou seja, o assoreamento reduziu a capacidade do reservatório a uma taxa média de 0,24% ao ano, taxa aparentemente muito alta. A explicação para esse número vem da baixa relação entre o volume do reservatório e a bacia de contribuição, de apenas

Tabela 5. Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude São Mateus.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	10,34 hm <sup>3</sup>	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	229,35 km <sup>2</sup>	Maner	12,1%
Ano de construção	1954	Roehl	19,6%
Ano de verificação	2000	Williams-Berndt	64,7%
Tempo de simulação	46 anos	Erosão na bacia (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	
Fator R (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	6106 ± 4839 ano <sup>-1</sup>	Maner	2,23
Fator K (t.MJ <sup>-1</sup> .h. mm <sup>-1</sup> )	0,019 ± 0,004	Roehl	3,62
Fator LS ( $\lambda = 2,50$ )	1,30 ± 1,15	Williams-Berndt	11,94
Fator CP	0,13 ± 0,09	Índice de retenção de Brune	97%
Tempo de residência	0,39 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	8,88 hm <sup>3</sup>	Maner	2,26E + 06
Massa específica aparente assoreamento	1,36 t.m <sup>-3</sup>	Roehl	3,66E + 06
Assoreamento (volume)	1,46 hm <sup>3</sup>	Williams-Berndt	1,21E + 07
Assoreamento relativo (vol)	14,1 %	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	3,06 %.década <sup>-1</sup>	Maner	+ 13,7%
Assoreamento (massa)	1,99E + 06 t	Roehl	+ 84,4%
Taxa de assoreamento (massa)	1,60 t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Williams-Berndt	+508,6%

0,04 hm<sup>3</sup>.km<sup>-2</sup>. Prova disso é a relativa baixa taxa de assoreamento (1,22 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>). O assoreamento observado foi de quase 7 milhões de toneladas, uma vez que a massa específica aparente do material assoreado foi de 1,20 t.m<sup>-3</sup>. Os erros de previsão do modelo HidroSed são inferiores aos observados na bacia piloto, sendo a formulação de Maner a que melhor se aproxima dos valores medidos (subestima assoreamento em 14,7%, Tabela 4).

### Bacia do açude São Mateus

O açude São Mateus está situado no rio Canindé, no município de Canindé, no sertão central cearense. A barragem foi construída em 1954, com relação entre o volume do reservatório e a bacia de contribuição 0,05 hm<sup>3</sup>.km<sup>-2</sup>, sendo operada pelo DNOCS e tendo como finalidade principal o abastecimento urbano. De acordo com Figueiredo (1989), a bacia hidrográfica do açude São Mateus encontra-se recoberta pela caatinga arbustiva densa. O algodão foi durante muitos anos a principal atividade da região porém, na última década, uma série de fatores adversos, agravados pela incidência da praga do bichudo, contribuiu para sua decadência. Atualmente a cultura do algodão foi substituída pelas culturas de subsistência e por capoeiras formadas por espécies da caatinga invasoras de áreas degradadas.

A avaliação do fator R foi realizada a partir dos postos pluviométricos Salão e Canindé. Entre 1954 e 1988 foram utilizados os dados de precipitação mensal do posto Salão e a partir de 1989 utilizaram-se dados dos postos Salão e Canindé considerando-se distribuição espacial, de acordo com a proximidade das células aos postos. Para

determinação do fator de erodibilidade K foram coletadas seis amostras representativas para a bacia, estando os resultados entre 0,016 e 0,029 t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>. A topografia da bacia do Açude São Mateus é suave, apresentando fator topográfico (LS) médio igual a 1,30 e fator de correção de comprimento de drenagem  $\lambda = 2,50$ . Para determinação histórica do uso e ocupação do solo foram analisados fotos aéreas (1958, DNOCS), carta da SUDENE (1969) e imagem de satélite (1999, COGERH), complementada por campanha realizada pela equipe da pesquisa. Para cada célula determinaram-se as ocorrências vegetais natural e agrícola para os anos de referência. Durante a campanha foi observada a ausência total de práticas conservacionistas na região ( $P = 1,0$ ). As variáveis para o cálculo do índice de transporte difuso de sedimento (sd) são: comprimento  $L_m = 33.050$  m, desnível  $F_r = 180$  m, razão de bifurcação 3,11 e declividade média do rio principal 1,08%. Os resultados encontram-se na Tabela 5.

Para validação do assoreamento do açude São Mateus utilizou-se a batimetria feita pela COGERH em 2000, conforme pode depreender da Figura 5, na qual os ábacos cota - volume em 1954 e em 2000 são mostrados. Desses valores é possível verificar redução de 1,46 hm<sup>3</sup> na capacidade de acumulação do reservatório em 46 anos de operação devido ao assoreamento. Os dados indicam perda de 14,1% da capacidade inicial de acumulação, ou seja, o assoreamento reduziu a capacidade do reservatório a uma taxa média de 3% a cada década, valor muito alto. Assim, o assoreamento observado foi de quase  $2 \times 10^6$  toneladas, uma vez que a massa específica aparente do material assoreado é 1,36 t.m<sup>-3</sup>. Assim como nos casos anteriores, a equação de transporte difuso de sedimentos que melhor se ajustou aos dados foi a

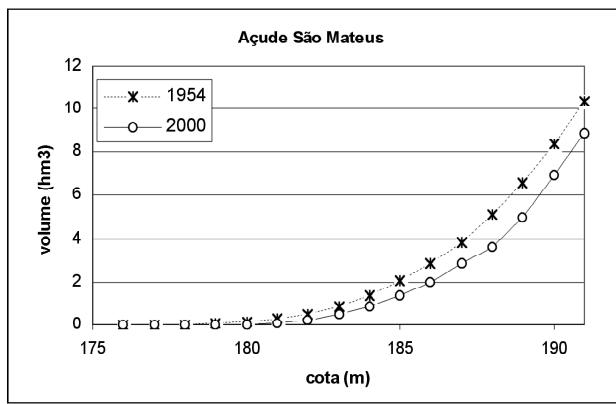


Figura 5. Cota - volume do açude São Mateus em 1954 e em 2000.

de Maner, com erro de previsão inferior a 14% contra 84% de Roehl e 509% de Williams e Berndt (Tabela 5).

### Bacia do açude Cedro

O Reservatório Cedro está situado no rio Sitiá, no município de Quixadá, sertão central, sendo considerada a mais antiga barragem de grande porte do Ceará. Sua construção teve seu início ainda no Império, em torno de 1885, e sua conclusão verificou-se no ano de 1906. Esta barragem tem como finalidades a irrigação, o desenvolvimento das culturas de vazantes, a piscicultura e o abastecimento de água da cidade de Quixadá (Araújo, 1990). Por ter sido uma obra pioneira, o açude do Cedro pode ser considerado superdimensionado, devido ao baixo nível de conhecimento hidrológico da época. Para verificar isso, basta comparar a razão volume - área de contribuição, que é de  $0,57 \text{ hm}^3.\text{km}^2$  contra  $0,14 \text{ hm}^3.\text{km}^2$ , valor médio para as seis demais bacias desta pesquisa. A bacia hidrográfica do açude Cedro é recoberta predominantemente pela vegetação da caatinga arbustiva aberta. A modificação da paisagem local ao longo dos anos ocorreu pela atividade agrícola, acentuada com o progressivo aumento da população, que transformou a fisionomia original da vegetação, principalmente nos aluvões. A maior atividade agrícola da região foi durante muito tempo a cotonicultura, que provocou o desmatamento de extensas áreas. Porém, nas últimas décadas, esta cultura entrou em decadência. A pecuária bovina associada à criação de outras espécies complementou a devastação das áreas nativas de caatinga e a total modificação da paisagem natural, devido à lotação excessiva das pastagens e à compactação do solo devido ao pisoteio excessivo. As áreas de cultivo limitam-se atualmente quase que à agricultura de subsistência de milho e feijão.

Os resultados dos estudos paramétricos são apresentados na Tabela 6. Para o cálculo da erosividade da chuva na bacia utilizaram-se os postos pluviométricos do açude Ce-

dro e de Quixadá. Para o preenchimento dos anos faltos adotou-se a média da precipitação mensal da série em estudo. Para determinação do fator K foram coletadas oito amostras representativas de solo da bacia, sendo verificada baixo coeficiente de variação da erodibilidade (25%) com valor mínimo 0,014 e máximo 0,036  $\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ . Os valores do fator topográfico (LS) foram obtidos a partir da análise de fotos aéreas, carta e imagens de satélite em cinco anos de referência: 1906; 1957, 1974, 1985 e 1999. Para cada célula determinaram-se as formações vegetais adotando índices específicos para vegetação natural e para práticas agrícolas, o que permitiu calcular os fatores C e P (Tabela 2) para cada célula a cada ano pela média ponderada na área. Para a determinação do índice de transporte difuso de sedimento foram calculados o comprimento de referência  $L_{fr} = 18.400 \text{ m}$ , o desnível entre a cota média do divisor e a cota do exutório da bacia  $F_r = 170 \text{ m}$ , a razão de bifurcação 4,06 e a declividade média do rio principal 0,12%. Os resultados (Tabela 6) mostram baixos valores de SDR, sendo o de Maner aquele que mais se aproxima da realidade (18%). Esse fato pode ser verificado pelo fato de que sobre esta formulação incide menor erro (23,2%) contra 48,5% de Roehl e 185,0% de Williams e Berndt.

Para validação do assoreamento do açude Cedro foi realizado levantamento topográfico da bacia hidráulica no âmbito desta pesquisa. O levantamento batimétrico ficou impossibilitado, pois o reservatório encontrava-se, em abril de 2000, praticamente seco (capacidade inferior a 1%), situação que perdura até o momento. A Figura 6 mostra os resultados do levantamento, cota - volume em 1906 e em 2000, de onde é possível verificar redução de  $20,64 \text{ hm}^3$  na capacidade de acumulação do reservatório em seus 94 primeiros anos de operação devido ao assoreamento. Os dados indicam perda de 16,4% da capacidade inicial de acumulação, ou seja, o assoreamento reduziu a capacidade do reservatório a uma taxa média de 1,75% a cada década, valor muito próximo da média observada nas bacias do semi-árido. Assim, o assoreamento observado foi superior a 26 milhões de toneladas, uma vez que a massa específica aparente do material assoreado é de  $1,28 \text{ t.m}^{-3}$ . Observe-se que a taxa de assoreamento desta bacia é altíssima ( $12,77 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ) contra valores da ordem de  $2 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  para as demais bacias estudadas. Isso pode ser explicado pelo superdimensionamento hidrológico do reservatório, assim como pelo alto grau de antropismo na bacia.

### Bacia do açude Várzea da Volta

O Reservatório Várzea da Volta está situado no município de Moraújo, em região de transição entre o sertão e o litoral, tendo sido construída pelo DNOCS em 1919 e apresentando razão entre volume e área de contribuição 0,08  $\text{hm}^3.\text{km}^2$ . A barragem tem com finalidade principal o

Tabela 6. Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude Cedro.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	125,69 hm <sup>3</sup>	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	219,96 km <sup>2</sup>	Maner	18,2%
Ano de construção	1906	Roehl	12,2%
Ano de verificação	2000	Williams-Berndt	67,7%
Tempo de simulação	94 anos	Erosão na bacia (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	
Fator R (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	6828 ± 4198 ano <sup>-1</sup>	Maner	10,02
Fator K (t.MJ <sup>-1</sup> .h. mm <sup>-1</sup> )	0,020 ± 0,005	Roehl	6,71
Fator LS ( $\lambda = 3,0$ )	1,97 ± 2,45	Williams-Berndt	37,16
Fator CP	0,19 ± 0,16	Índice de retenção de Brune	98%
Tempo de residência	4,88 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	105,05 hm <sup>3</sup>	Maner	2,03E + 07
Massa específica aparente assoreamento	1,28 t.m <sup>-3</sup>	Roehl	1,36E + 07
Assoreamento (volume)	20,64 hm <sup>3</sup>	Williams-Berndt	7,53E + 07
Assoreamento relativo (vol)	16,4 %	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	1,75%.década <sup>-1</sup>	Maner	- 23,2%
Assoreamento (massa)	2,64E + 07 t	Roehl	- 48,5%
Taxa de assoreamento (massa)	12,77 t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Williams-Berndt	+185,0%

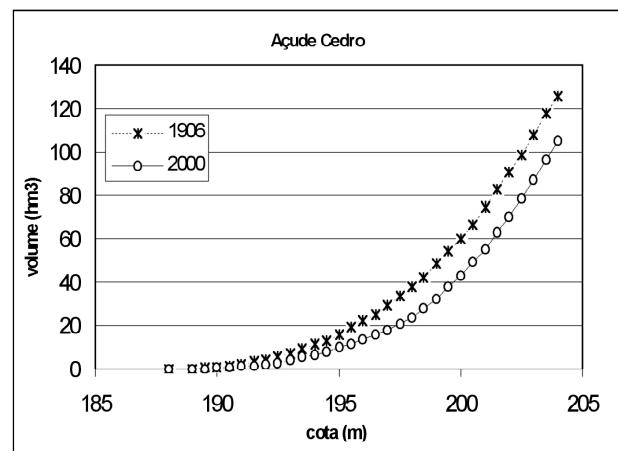


Figura 6. Cota - volume do açude Cedro em 1906 e em 2000.

abastecimento urbano. A cobertura vegetal da área em estudo compõe-se da caatinga arbustiva densa, mata seca e mata úmida. A degradação da vegetação primária é marcante, devido principalmente à prática de monoculturas de milho, mandioca, feijão e banana, juntamente com a extração da madeira das árvores de grande porte, o que localmente ocasionou o detimento dessa vegetação e a predominância de vegetação secundária.

Foi realizada a determinação dos parâmetros da bacia, como mostrado na Tabela 7. Para o cálculo da erosividade das chuvas (fator R) utilizaram-se os postos pluviométricos de Meruoca e Várzea da Volta, de acordo com a proximidade das células em relação aos postos, admitindo-se a correlação entre estes para eventual preenchimento de falhas. Nos meses em que não havia dados para nenhum dos postos adotou-se a média da preci-

pitação mensal da série em estudo. Para determinação do fator de erodibilidade do solo (K) foram coletadas 4 amostras representativas de solo da bacia, com valores variando de 0,016 t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> a 0,041 t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>. Na bacia do Várzea da Volta observaram-se claramente três áreas distintas: uma região alta na serra da Meruoca, uma região de encosta e uma região extremamente plana nas proximidades do açude. Os valores do fator topográfico (LS) obtidos para o açude Várzea da Volta com fator de escala  $\lambda = 3,50$  são, portanto, valores intermediários (LS médio 1,62) com alto coeficiente de variação (96%). Para avaliação dos fatores C e P foram analisados documentos de 1958, 1970 e 1999, além de viagem a campo. Para cada célula determinaram-se as formações vegetais adotando índices específicos para mata, caatinga e agricultura. Em visita de campo verificou-se que praticamente não existem práticas conservacionistas na região, entretanto foi observado que o manto herbáceo se mantém mesmo no período seco. A determinação do índice de transporte difuso de sedimento foi realizada, sendo  $L_m = 20.600$  m,  $F_r = 498$  m, razão de bifurcação 3,28 e declividade do rio principal 5,52%. Os resultados obtidos (Tabela 7), no entanto, são extremamente superiores aos observados em campo: SDR para Maner, por exemplo, igual a 33,7%, o que representa erro de previsão da ordem de 180% (Roehl 191%, Williams e Berndt 943%). Isso porque os modelos usam conceitos de declividade média. Ocorre, no entanto, que a bacia em questão apresenta perfil acidentado - cascata - plano, o que não é contemplado. Por essa razão, propõe-se aqui modificação do cálculo de SDR de Maner, substituindo o termo  $L_m/F_r$  pelo inverso da declividade ponderada na bacia. O resultado é bem superior, reduzindo-se o erro para 32,4%.

**Tabela 7.** Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude Várzea da Volta.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	12,50 $\text{hm}^3$	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	155,24 $\text{km}^2$	Maner (modificado)	33,7% (15,8%)
Ano de construção	1919	Roehl	34,9%
Ano de verificação	2000	Williams-Berndt	124,8%
Tempo de simulação	81 anos	Erosão na bacia ( $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ )	
Fator R ( $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ )	$9683 \pm 5921 \text{ ano}^{-1}$	Maner (modificado)	4,61 (2,17)
Fator K ( $\text{t.MJ}^{-1}.\text{h} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$0,032 \pm 0,011$	Roehl	4,77
Fator LS ( $\lambda = 3,50$ )	$1,62 \pm 1,55$	Williams-Berndt	17,06
Fator CP	$0,028 \pm 0,027$	Índice de retenção de Brune	98%
Tempo de residência	1,02 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	10,97 $\text{hm}^3$	Maner (modificado)	$5,68\text{E} + 06$ ( $2,67\text{E} + 6$ )
Massa específica aparente assoreamento	1,32 $\text{t.m}^{-3}$	Roehl	$5,78\text{E} + 06$
Assoreamento (volume)	1,53 $\text{hm}^3$	Williams-Berndt	$2,10\text{E} + 07$
Assoreamento relativo (vol)	12,22%	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	$1,51\%.\text{década}^{-1}$	Maner (modificado)	+181,6% (+32,4%)
Assoreamento (massa)	$2,02\text{E} + 06 \text{ t}$	Roehl	191,4%
Taxa de assoreamento (massa)	$1,61 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$	Williams-Berndt	942,8%

Para determinação do assoreamento em campo do açude Várzea da Volta foi feita batimetria, com recursos desta pesquisa, em maio de 2000. A Figura 7 mostra os ábacos cota - volume nos anos 1919 e 2000. Destes valores é possível verificar redução de  $1,53 \text{ hm}^3$  na capacidade de acumulação do reservatório em seus primeiros 81 anos de funcionamento devido ao assoreamento. Os dados indicam perda de 12,22% da capacidade inicial de acumulação, ou seja, o assoreamento reduziu a capacidade do reservatório a uma taxa média de 1,51% a cada década. Os dois reservatórios mais antigos (Cedro e Várzea do Boi) apresentam taxas de assoreamento muito próximas da média estadual ( $1,83\%.\text{década}^{-1}$ ). O assoreamento observado foi de aproximadamente 2 milhões de toneladas, uma vez que a massa específica aparente do material assoreado é  $1,32 \text{ t.m}^{-3}$ .

### Bacia do açude Canabrava

O açude Canabrava, construído no ano de 1944, está localizado no município de Farias Brito, na divisa entre as bacias do Alto Jaguaribe e do Salgado, em região alta com relevo acidentado e precipitações superiores às dos sertões central e dos Inhamuns. A razão entre seu volume inicial ( $1,22 \text{ hm}^3$ ) e a área de contribuição ( $2,85 \text{ km}^2$ ) é  $0,43 \text{ hm}^3.\text{km}^{-2}$ , alta para os padrões do semi-árido. No entanto, devido às precipitações relativamente altas da região, o reservatório enche com boa freqüência, vertendo em média uma vez a cada três a quatro anos. Devido ao uso de suas margens para dessedentação de animais, o reservatório apresenta atualmente sinais de eutrofização, com desenvolvimento de macrófitas.

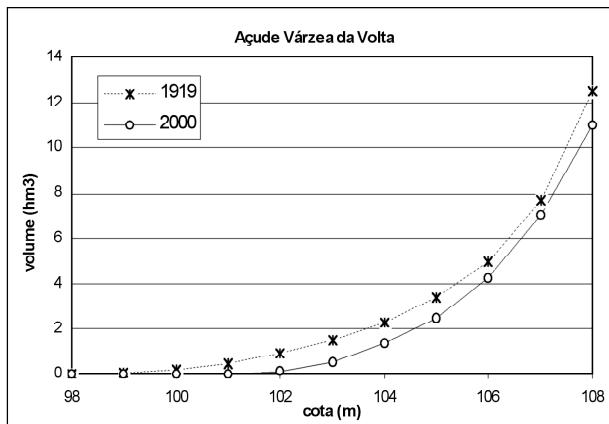


Figura 7. Cota - volume do açude Várzea da Volta em 1919 e em 2000.

Para o cálculo da erosividade de chuva utilizou-se o posto pluviométrico mais próximo da área de estudo (Missão Velha), uma vez que não há posto dentro de sua pequena bacia. Para o preenchimento de falhas adotou-se a média da precipitação mensal da série em estudo. Para determinação do fator de erodibilidade do solo (K) foram coletadas duas amostras representativas do solo da bacia, apresentando o mesmo valor:  $0,032 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ . Os valores do fator topográfico (LS) obtidos para a bacia do açude Canabrava são intermediários, com média 1,80, tendo sido adotado fator de escala  $\lambda = 3,50$ . Para análise do fator de cobertura vegetal e uso de solo (CP) foram utilizadas informações de seus proprietários para o ano de 1944, carta da SUDENE para o ano de 1970 e realizada viagem de campo para análise atual da cobertura vegetal em 2000. Para cada célula determinaram-se as formações vegetais segundo o critério de caatinga, mata, agricultura do período 1944-1979 (CP mé-

Tabela 8. Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude Canabrava.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	1,22 hm <sup>3</sup>	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	2,85 km <sup>2</sup>	Maner	35,3%
Ano de construção	1944	Roehl	29,2%
Ano de verificação	2000	Williams-Berndt	68,4%
Tempo de simulação	57 anos	Erosão na bacia (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	
Fator R (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	7347 ± 1659 ano <sup>-1</sup>	Maner	5,62
Fator K (t.MJ <sup>-1</sup> .h mm <sup>-1</sup> )	0,032	Roehl	4,65
Fator LS ( $\lambda = 3,50$ )	1,80 ± 1,59	Williams-Berndt	10,90
Fator CP	0,058 ± 0,034	Índice de retenção de Brune	98%
Tempo de residência	3,85 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	1,13 hm <sup>3</sup>	Maner	8,94E + 04
Massa específica aparente assoreamento	1,38 t.m <sup>-3</sup>	Roehl	7,40E + 04
Assoreamento (volume)	0,084 hm <sup>3</sup>	Williams-Berndt	1,73E + 05
Assoreamento relativo (vol)	6,9 %	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	1,21%.década <sup>-1</sup>	Maner	-20,4%
Assoreamento (massa)	1,12E + 05 t	Roehl	-34,1%
Taxa de assoreamento (massa)	6,90 t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Williams-Berndt	+54,4%

dio = 0,180) e agricultura desde 1980 associada a práticas conservacionistas (CP médio 0,120). Para o ano de 1944 toda a área era recoberta por vegetação nativa, apresentando porte arbóreo com características de mata. A partir de 1974 houve desmatamento mais intenso na área em estudo para aumentar a fronteira agrícola. Quanto às práticas conservacionistas, verificou-se que nos últimos anos a agricultura praticada é de consórcio de espécies arbustivas e herbáceas, contribuindo para diminuir o processo erosivo. Além disso, a mata ciliar foi recuperada a partir da década de 80. Os valores do índice de transporte difuso (SDR) obtidos para a bacia do açude Canabrava são relativamente altos (35,3% segundo Maner, 29,2% segundo Roehl e 68,4% segundo Williams e Berndt), próximos daqueles encontrados para a bacia do Açude Acarape do Meio. De fato, embora haja significativa diferença na área das duas bacias, relevo e vegetação são bastante semelhantes. O comprimento paralelo ao rio principal é  $L_m = 2.187$  m, o desnível médio divisor - exutório é 48 m, a razão de bifurcação é da ordem de 5 e a declividade média do curso d'água principal é 1,24%. O modelo HidroSed demonstrou boa capacidade de previsão do assoreamento: quando utilizada a equação de Maner subestimou-se o assoreamento em 20,4%, com Roehl subestimou-se em 34,1% e com Williams e Berndt superestimou-se em 54,4% (Tabela 8).

A determinação do assoreamento em campo foi obtida pela comparação entre as relações cota - volume em 1944 e em 2000 (Figura 8), esta última obtida a partir de levantamento batimétrico realizado no âmbito desta pesquisa. Do levantamento realizado é possível verificar redução de 84.000 m<sup>3</sup> na capacidade de acumulação do reservatório em seus 57 anos de funcionamento devido ao assoreamento. De fato, o volume inicial do reservatório era de aproxima-

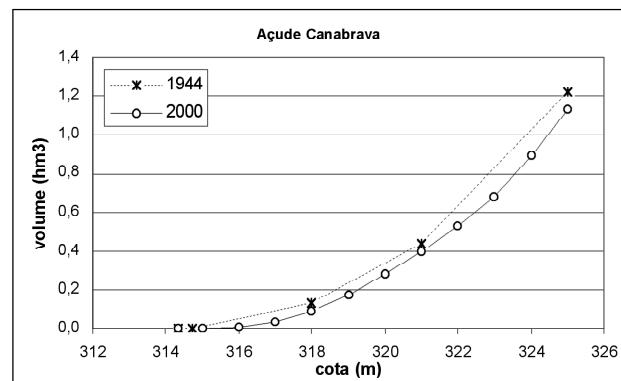


Figura 8. Cota - volume do açude Canabrava em 1944 e em 2000.

damente 1,218 hm<sup>3</sup>, estando hoje com volume de 1,134 hm<sup>3</sup>. Assim, o assoreamento observado foi de 112.000 toneladas, uma vez que a massa específica aparente do material assoreado é de 1,38 t.m<sup>-3</sup>. Os dados indicam, portanto, perda de 6,9% da capacidade inicial de acumulação, ou seja, o assoreamento reduz a capacidade do reservatório a uma taxa média de 0,12% ao ano, valor este abaixo da média estadual certamente devido à preservação da mata ciliar ocorrida a partir da década de 1980.

### Bacia do açude Santo Anastácio

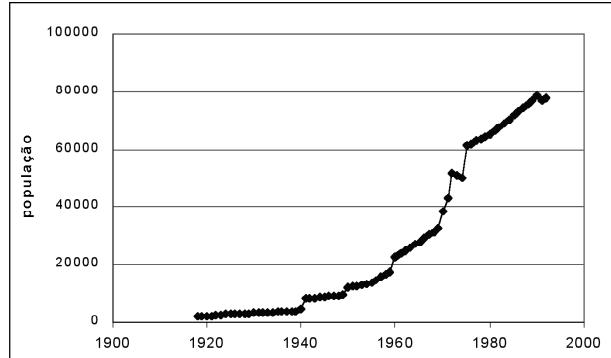
O açude Santo Anastácio está localizado em área urbana de Fortaleza, situada no Campus Universitário do Pici da UFC e sua construção data de 1918. O lago encontra-se atualmente em avançado estado de eutrofização, causada pela intensa contribuição de lixo e esgoto bruto proveniente dos

**Tabela 9.** Características físicas e resultados da aplicação do modelo HidroSed à bacia do açude Santo Anastácio.

Grandezas medidas	Valor	Grandezas simuladas	Valor
Capacidade inicial	0,508 hm <sup>3</sup>	Taxa de transporte difuso SDR	
Área da bacia hidrográfica	9,34 km <sup>2</sup>	Maner	7,2%
Ano de construção	1918	Roehl	82,5%
Ano de verificação	1992	Williams-Berndt	7,3%
Tempo de simulação	75 anos	Erosão na bacia (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	
Fator R (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	9923 ± 4072 ano <sup>-1</sup>	Maner	0,10
Fator K (t.MJ <sup>-1</sup> .h. mm <sup>-1</sup> )	0,013 ± 0,004	Roehl	1,10
Fator LS	2,04 ± 0,84	Williams-Berndt	0,10
Fator CP	0,039 ± 0,023	Índice de retenção de Brune	95%
Tempo de residência	0,45 anos	Assoreamento (t)	
Capacidade no ano de verificação	0,372 hm <sup>3</sup>	Maner	8,97E + 04
Massa específica aparente assoreamento	1,26 t.m <sup>-3</sup>	Roehl	1,57E + 05
Assoreamento (volume)	0,136 hm <sup>3</sup>	Williams-Berndt	8,97E + 04
Assoreamento relativo (vol)	26,8%	Erro de previsão de HidroSed	
Taxa de assoreamento (vol)	3,57%·década <sup>-1</sup>	Maner	-47,7%
Assoreamento (massa)	1,71E + 05 t	Roehl	+8,5%
Taxa de assoreamento (massa)	2,45 t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Williams-Berndt	-47,7%

bairros localizados em sua bacia, cuja área é de 934 ha. A bacia de contribuição apresenta baixa declividade, solo fundamentalmente arenoso e vegetação natural composta principalmente de fruteiras e arbustos. À época de sua construção, a bacia hidrográfica tinha uso plenamente rural. Entretanto, ao longo do tempo, começou a sofrer intenso processo de urbanização. Atualmente a bacia encontra-se completamente urbanizada, sendo mais da metade de sua área ocupada por conjuntos habitacionais, muitos dos quais sem qualquer infra-estrutura. A densidade habitacional atualmente verificada é de aproximadamente 100 habitantes por hectare. A utilização das águas do açude Santo Anastácio restringe-se no momento à exploração pesqueira de subsistência.

Para o cálculo da erosividade da chuva utilizou-se o posto pluviométrico de Fortaleza até o ano de 1981, e do posto Campus do Pici, localizado dentro da bacia, a partir de 1982. Para determinação do fator de erodibilidade do solo (K) foram coletadas três amostras representativas do solo da bacia, que se mostrou pouco erodível, com valores entre 0,009 e 0,020 t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> (Tabela 9). Os valores do fator topográfico (LS) obtidos para o açude Santo Anastácio são avaliados a partir de base cartográfica da Prefeitura Municipal de Fortaleza na escala 1:10.000, ao contrário das demais bacias, cuja base cartográfica estava na escala 1:100.000. O valor médio do fator LS é 2,04 com coeficiente de variação 41%. Para determinação dos fatores de vegetação e uso do solo (CP) foram analisados fotos aéreas e mapas em quatro anos de referência: 1918, 1965, 1970 e 1995. Para cada célula determinaram-se as formações vegetais adotando os índices referentes à vegetação natural e à agricultura, além de índice de uso urbano. Os valores de transporte difuso de sedimentos (SDR) obtidos para a bacia

**Figura 9.** Evolução da população da bacia do açude Santo Anastácio.

do Açude Santo Anastácio são baixos, retrato da topografia suave característica da região: comprimento  $L_m = 4.500$  m, desnível  $F_r = 15$  m, razão de bifurcação 2,24 e declividade média do rio principal 0,48%.

Para avaliação da contribuição urbana de sedimentos, com base na Equação (12), é necessário avaliação fidedigna da população na bacia. Para isso foram obtidos dados de população nos seis bairros que compõem atualmente a bacia em estudo desde o início do século junto a organismos de planejamento da cidade de Fortaleza e do IBGE. A evolução populacional, como mostrado na Figura 9, indica intenso adensamento durante o período em apreço: em 1918 menos de 2000 pessoas habitavam a bacia; em 1992 eram quase 78.000 habitantes. Tal crescimento indica incremento populacional de 5% ao ano, uma taxa muito elevada, porém compatível com a observada em Fortaleza no mesmo período. O levantamento indica, portanto, que nesses 75 anos, habitaram na bacia 2.062.803 pessoas - ano, o que daria uma média de 27.500 habitantes por ano. A contribuição *per capita*

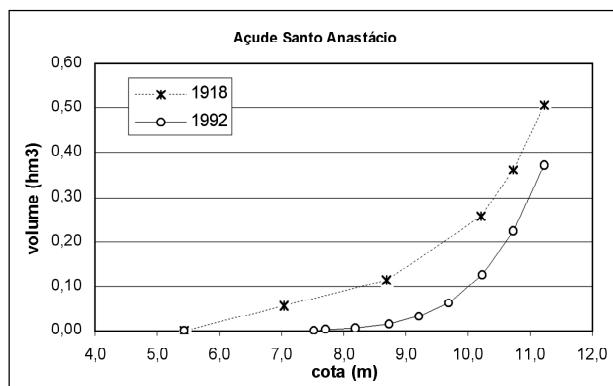


Figura 10. Cota - volume do açude Santo Anastácio em 1918 e em 1992.

admitida foi de  $0,56 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , conforme obtido para a bacia urbana do açude São Jorge (ver item metodologia).

Para determinação do assoreamento em campo avaliou-se inicialmente o ábaco cota - volume em 1918, quando o solo de sua bacia tinha uso exclusivamente rural. Para validação do modelo de previsão do assoreamento duas campanhas foram iniciadas para realização de batimetria no açude Santo Anastácio, porém sem sucesso. A razão do insucesso é a intensa e extensa presença de macrófitas no lago, ocupando atualmente mais de um quarto de sua superfície. Por esta razão foi necessário dispor de dados levantados pelo Departamento de Engenharia de Pesca da UFC no ano de 1992. A Figura 10 mostra o gráfico cota - volume para o açude nas duas datas, de onde é possível verificar que o açude, construído com capacidade máxima de  $508.000 \text{ m}^3$ , dispunha de apenas  $372.000 \text{ m}^3$  após 75 anos de operação. Ou seja, verificou-se redução de  $136.000 \text{ m}^3$  na capacidade do açude, ou 26,8%, o que apontou uma redução média de 3,6% da capacidade de acumulação a cada década. Este valor é o dobro da taxa observada no Ceará e se explica pela forte contribuição urbana. Para avaliação da massa assoreada foram realizadas sondagens, que indicaram massa específica aparente de  $1,26 \text{ t.m}^{-3}$ , ou seja, a massa assoreada entre 1918 e 1992 foi de 171.500 t.

A Figura 11 apresenta a distribuição do assoreamento com a altura (adimensionais), indicando que a grande massa assoreada encontra-se nas cotas mais baixas, não no delta: a altura máxima do reservatório decresceu de 5,80 m em 1918 para 3,70 m em 1992, ou seja, houve redução de 2,10 m no período, ou 36% da altura máxima inicial. Por exemplo, em cotas até 40% da altura total do lago encontram-se cerca de 60% da massa assoreadas. Além disso, em cotas acima de 80% da altura o assoreamento é muito pequeno, indicando processo de retenção tardia dos sedimentos, ou seja, os sedimentos precipitados têm pequeno diâmetro, provenientes de origem urbana (Oliveira, 2001).

Os resultados da simulação do assoreamento do açude Santo Anastácio merecem uma análise mais apurada. Verifica-se a proximidade entre as equações de Maner (7,2%)

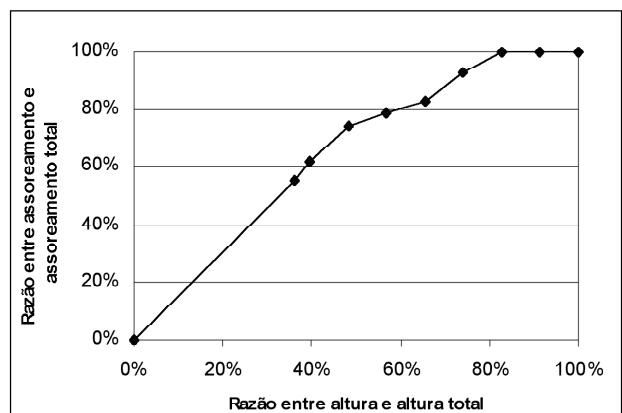


Figura 11. Distribuição altimétrica do assoreamento do açude Santo Anastácio.

e de Williams e Berndt (7,3%), embora o erro de simulação no caso seja de quase 48%. Observe-se que a Equação (9), de Williams e Berndt, só apresentou bom desempenho para a bacia do Santo Anastácio entre as sete regiões estudadas nesta pesquisa. Isso se explica pelo fato de ser bacia com pequena área e topograficamente bem comportada. Já a formulação de Roehl apresenta valor de SDR extremamente alto, improvável (82,5%) exatamente por se tratar de bacia pequena, mas a ele corresponde um erro de apenas 8,5% (Tabela 9). No entanto, tudo indica que o erro relativamente alto da simulação com as equações de Maner e de Williams e Berndt se deva muito mais ao erro na estimativa da contribuição urbana que ao erro da contribuição da erosão hídrica. De acordo com dados da área experimental açude São Jorge, cada habitante contribui com cerca de  $0,56 \text{ kg}$  anualmente para o assoreamento dos açudes urbanos, o que parece muito pouco para o caso do açude Santo Anastácio com base em inspeção de campo. O valor calculado para o açude Santo Anastácio, por regressão, indicaria contribuição *per capita* bem superior: 79 kg anuais. É relevante, no entanto, registrar que nesta cifra encontram-se contribuições concentradas, difusas e de pessoas que geram sedimentos sem que habitem na área. Entre os usuários não residentes, merecem registro professores, funcionários e alunos do Campus do Pici, da Universidade Federal do Ceará, onde se localiza o açude e boa parte da bacia de contribuição.

## CONCLUSÕES

Após levantamento de dados hidrossedimentológicos em sete bacias do semi-árido, para as quais foram realizadas simulações com modelo HidroSed sem calibração e avaliações com base em medidas de campo, conclui-se que:

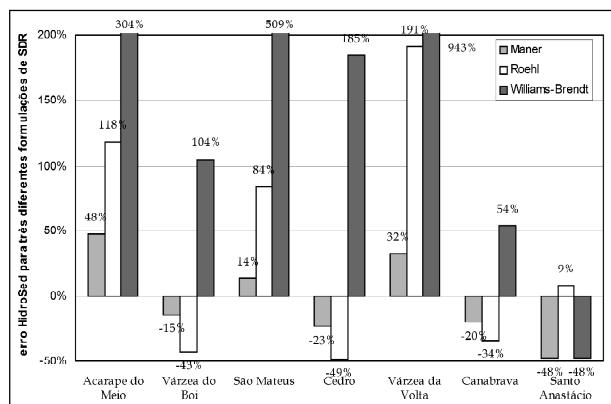
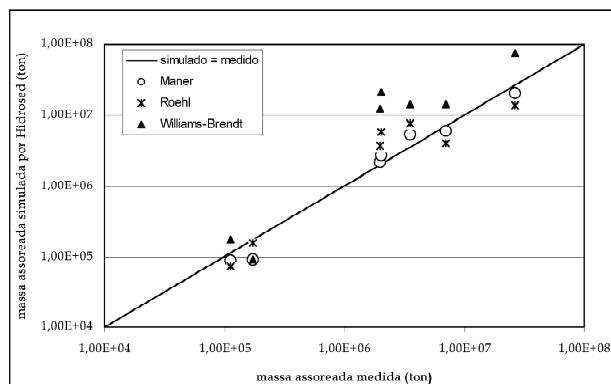
- o modelo de simulação de assoreamento proposto, HidroSed, que tem como base as formulações de Lombardi Neto e Moldenhauer; Wischemeyer e Smith;

**Tabela 10. Síntese dos resultados das simulações realizadas.**

Bacia	Erro de previsão do assoreamento cometido por HidroSed		
	Maner	Roehl	Williams-Berndt
Acarape do Meio	+47,9%	+118,1%	+303,5%
Várzea do Boi	-14,7%	-42,5%	+104,3%
São Mateus	+13,7%	+84,4%	+508,6%
Cedro	-23,2%	-48,5%	+185,0%
Várzea da Volta	+32,4%	+191,4%	+942,8%
Canabrava	-20,4%	-34,1%	+54,4%
Santo Anastácio	-47,7%	+8,5%	-47,7%
Média absoluta	28,6%	75,4%	306,6%
Desvio - padrão absoluto	14,5%	62,4%	324,5%
Média	-1,7%	+41,4%	+292,9%
Desvio - padrão	34,1%	41,0%	338,4%

Fernandes; Reining; Maner; e Brune apresenta resultados encorajadores (Tabela 10 e Figura 12), com erro médio de previsão de 29% sem calibração, para tempo médio de simulação de 68 anos e passos mensais;

- ii. das três formulações de transporte difuso de sedimentos (SDR) utilizadas na literatura, a equação de Maner foi a que melhor se aplicou (erro médio de 29% e desvio - padrão 14,5%), a equação de Roehl apresentou erro médio de 75% e desvio - padrão 62,4%, e a equação de Williams e Berndt não demonstrou aplicabilidade (erro médio 307%), exceto para as duas menores bacias, apresentando inclusive  $SDR > 1$ . Além disso, quando considerados os erros não absolutos, Maner foi a única equação que não apresentou tendência: -1,7% contra +41,4% e +292,9% para Roehl e Williams e Berndt, respectivamente (Tabela 10 e Figura 13);
- iii. foram realizadas medidas que possibilitaram definição atualizada dos gráficos cota-volume de sete bacias, assim como sondagens para determinação da massa específica aparente do material assoreado;
- iv. de acordo com os dados levantados, pode-se concluir que a taxa média (ponderada) de assoreamento nos reservatórios do semi-árido estudados é de 1,85% a cada década, ou seja, no caso do Ceará, isso representa perda de cerca de 22  $hm^3$  de capacidade de reserva a cada ano;
- v. verifica-se, também, taxa média de assoreamento de  $2,68 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , excetuando-se da média a bacia do açude Cedro que, por motivos específicos, apresenta taxa de  $12,77 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ;
- vi. o estudo possibilitou a parametrização de sete bacias do semi-árido, monitoradas quanto aos aspectos hidrossedimentológicos. As Tabelas 11 e 12 apresen-

**Figura 12. Erro de previsão de assoreamento do modelo HidroSed para sete bacias do semi-árido.****Figura 13. Dispersão dos valores de assoreamento calculados e medidos em sete bacias do semi-árido.**

tam os valores das variáveis mais relevantes medidas durante a pesquisa; e

- vii. contatou-se a necessidade de uma formulação física para o índice de transporte difuso de sedimentos (SDR) que consiga caracterizar a heterogeneidade de uma bacia hidrográfica. Como se observa na bacia do açude Várzea da Volta, as formulações existentes não conseguem retratar a realidade, já que são empíricas e geradas a partir de características médias das bacias.

## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi realizado com o apoio do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, da Universidade de Kassel, na Alemanha, através do financiamento de parte significativa dos estudos de campo; da FUNCUME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará, através da concessão de dados hidro-meteorológicos; assim como da COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará e do Departamento de Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará, através da ces-

**Tabela 11.** Variáveis hidrossedimentológicas para sete bacias do semi-árido (\*) máximo e mínimo dos valores médios das bacias.

Variável	R MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	K t.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>	LS	CP	SDR Maner	SDR Roeh	SDR W&B	$\rho_{ap}$ t.m <sup>-3</sup>
Média	6688 ano <sup>-1</sup>	0,030	0,91	0,152	19,7%	34,0%	65,9%	1,29
Desvio padrão	4417 ano <sup>-1</sup>	0,007	0,89	0,095	10,6%	25,3%	37,3%	0,06
Máximo(*)	9923 ano <sup>-1</sup>	0,037	2,77	0,190	35,3%	82,5%	124,8%	1,38
Mínimo(*)	6106 ano <sup>-1</sup>	0,013	0,22	0,014	7,2%	10,5%	7,3%	1,20

(\*) máximo e mínimo dos valores médios das bacias

**Tabela 12.** Avaliação do assoreamento em campo para sete reservatórios do Ceará.

Reservatório	$\rho_{ap}$ (t/m <sup>3</sup> )	ΔVolume (hm <sup>3</sup> )	ΔVolume por década	ΔM (10 <sup>6</sup> t)	ΔM t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>
Acarape do Meio	1,32	2,67	1,06%	3,52	2,28
Várzea do Boi	1,20	5,82	2,39%	6,98	1,22
São Mateus	1,36	1,46	3,06%	1,99	1,60
Cedro	1,28	20,64	1,75%	26,4	12,77
Várzea da Volta	1,32	1,53	1,51%	2,02	1,61
Canabrava	1,38	0,08	1,21%	0,11	6,90
Santo Anastácio	1,26	0,14	3,57%	0,17	2,45
Média	1,29	-	1,85%	-	4,12 (2,68*)

\*excetuando-se a bacia do açude Cedro.

são de dados referentes aos levantamentos batimétricos dos açudes Acarape do Meio e Santo Anastácio, respectivamente. Agradecemos também ao Geógrafo Roberto Cordeiro, do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC pela eficaz realização dos ensaios laboratoriais e aos bolistas Lia Fernandes, Tácito Cunha Sousa, Márcia Regina Lima de Oliveira, José Christiano Machado Júnior e Luis Romero Teixeira.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. B. (2001). *Modelagem da retenção de sedimentos em reservatórios do semi-árido*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, setembro.
- ARAÚJO, J. A. de A. (1990). *Barragens no nordeste do Brasil; experiência do DNOCS em barragem na região semi-árida*. 2 ed. Fortaleza, DNOCS.
- ARAÚJO, J. C. de; FERNANDES, L.; OLIVEIRA, M. R. L. e SOUSA, T. C. (2000). *Mathematical modeling of erosion and reservoir sedimentation in Brazilian semi-arid*. Proceedings of III International WAVES Workshop, Freising, Alemanha.
- ARAÚJO, J. C. de e OLIVEIRA, M. R. L. (2000). *Assessment of erosion and its impact on water availability in Brazilian semi-arid*. Abstracts of the German - Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems, Hamburg.
- ARAÚJO, J. C. de; OLIVEIRA, M. R. L.; MACHADO JÚNIOR, J. C.; TEIXEIRA, L. R. e AKABASSI, L. (2000). Medidas de assoreamento em bacias de reservatórios do semi-árido. *Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, ABRH, Natal, vol. 1, p. 559-562.
- ARAÚJO, J. C. de; TEIXEIRA, L. R. e MAMEDE, G. L. (2000). Assoreamento na bacia urbana de Santo Anastácio, Fortaleza: medidas e avaliação da contribuição *per capita*. *Anais do IV Encontro Nacional de Engenharia dos Sedimentos*, Santa Maria, RS.
- CARVALHO, N. O. (1994). *Hidrossedimentologia prática*. CPRM, Rio de Janeiro.
- DUQUE, J. G. (1982). *O nordeste e as lavouras xerófitas*. Coleção Mossoroense, vol. 143, ESAM/CNPQ, Mossoró.
- FERNANDES, L. (2000). *Processo hidrossedimentológico na bacia do açude Acarape do Meio, Ceará*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, janeiro. 93 p.
- FIGUEIREDO, M. A. (1989). Vegetação. In: *Atlas do Ceará*. IPLANCE, Fortaleza.
- KHANBILVARDI, R. M. & ROGOWSKI, A. A. (1984). Quantitative evaluation of sediment delivery ratios. *Water Resources Bulletin*, vol. 20, n. 6, p. 865-874.
- OLIVEIRA, M. A. (2001). *Eutrofização antrópica: aspectos ecológicos e uma nova abordagem para modelagem da cadeia trófica pelágica em reservatório tropical de pequena profundidade*. Tese de doutorado. Departamento de Eng. Hidráulica e Ambiental, UFC.
- OLIVEIRA, M. R. L.; SOUSA, T. C. e ARAÚJO, J. C. de (1999). Aspectos fitogeotécnicos de erosão no estado do Ceará. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH.

- REINING, L. (1992). *Erosion in Andean hillside farming: characterization and reduction of soil erosion by water in small scale cassava cropping systems in the southern central cordillera of Colombia*. Margraf, Hohenheim tropical agricultural series: 1.
- RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e recursos hídricos*. Ed. EESC/USP, São Carlos, SP, 840 p.
- SALES, M. T. B. F. (1997). *Caracterização de processos erosivos em áreas florestadas e antropizadas na serra de Baturité, CE*. Fortaleza, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. Dissertação de Mestrado.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, n. 537, Washington D.C.

## **Reservoir Sedimentation in the Semiarid: Modeling and Validation**

### **ABSTRACT**

Considering the strategic importance of surface reservoirs for semiarid regions, it is necessary to study the processes that may damage them both quantitatively and qualitatively over time. Among such processes, sedimentation deserves serious scientific investigation. In this paper, a methodology is proposed to estimate reservoir sedimentation in semi-arid regions, and the HidroSed model is generated. The model allows sedimentation rate estimates based on soil, rainfall, topography and vegetation data for a catchment area. The sediment delivery ratio can be computed using the Maner, Roehl and Williams-Berndt equations. In order to validate the model, six rural and one urban watersheds were studied, all located in the semi-arid State of Ceará and controlled by a reservoir. The watersheds studied present large catchment areas (ranging from 3 km<sup>2</sup> to over 1,220 km<sup>2</sup>), maximum reservoir volumes (from 0.5 hm<sup>3</sup> to 126 hm<sup>3</sup>) and a wide variety of natural environments (from very dry "sertão" to relatively humid mountain and coastal regions). After sedimentation simulation by means of HidroSed (with monthly steps and without parameter calibration), in situ surveys were performed so that volume reduction in the reservoirs could be assessed from construction date to control measurement date. Sedimented soil density was also surveyed, so that the sedimentation mass in the period (average 68 years) could also be assessed. Comparison of measured and simulated sedimentation mass showed an average absolute error of only 29% in the seven basins when the Maner SDR formulation was used. Roehl's and Williams-Berndt's formulations showed very limited applicability to the watersheds studied. According to field data, observed sedimentation rate is about 2.7 ton.ha<sup>-1</sup>.year<sup>-1</sup>, which corresponds to an average of 1.85% volume reduction per decade in the reservoirs. For the State of Ceará alone, it means a 22 hm<sup>3</sup> storage capacity decrease per year.

Key words: sedimentation; reservoir; semiarid.