

BALANÇO DE SEDIMENTOS EM BACIA TROPICAL SUB-ÚMIDA NO CEARÁ

Teresa Raquel Lima Farias¹ ; José Carlos de Araújo²; Pedro Henrique Augusto Medeiros³

RESUMO – Quantificou-se o balanço de sedimentos no ano de 2007 em uma pequena bacia (9,3 km²) tropical sub-úmida localizada na região serrana cearense, onde são observadas diversas alterações do meio natural: uso do solo para fins agrícolas sem práticas de conservação em encostas com altas declividades, presença de áreas desprovidas de vegetação, solo exposto, pequenos reservatórios de acumulação de água, além de microbarragens de contenção de sedimentos, construídas como medida de compensação ambiental. Com base em medição da carga suspensa e na modelagem da carga de leito, estimou-se a produção de sedimentos e a retenção nas barragens. Caso não houvesse obras de retenção (barragens e microbarramentos) na bacia, a produção de sedimentos, no ano de 2007, teria sido de 163 ton.km⁻².ano⁻¹, ou seja, cerca de 1.523 ton.ano⁻¹. Desse total, 83% correspondem ao aporte de sedimentos no exutório, 13% à retenção pelos reservatórios de água e 4% de acumulação pelos microbarramentos de contenção de sedimentos. Os resultados sugerem que, apesar de as microbarragens de contenção de sedimentos apresentarem-se como um válido instrumento de gestão hidro-ambiental, sua utilização deve estar associada a práticas adequadas de manejo do solo, principalmente nas atividades agrícolas, de forma a contribuir para o manejo sustentável da área.

ABSTRACT – Sediment balance was performed in a small tropical sub-humid watershed (9.3 km²) in the State of Ceará, Brazil, for the year of 2007. Several anthropogenic impacts can be noticed in the watershed, such as agricultural activities without conservation practices even in steep hillslopes, deforested areas, small reservoirs and sedimentation dams, built as an environmental compensation instrument. Based on the measurement of suspended load and on the modelling of bed load, sediment yield and sediment retention in the watershed could be assessed. If there were neither reservoirs nor sedimentation dams, sediment yield would have been, in 2007, 163 ton.km⁻².year⁻¹. Out of this value, 83% correspond to the load that flows through the watershed outlet, 13% to the sediment retained in the reservoirs, and 4% to the sediment retained in the sedimentation dams. Results suggest that, despite the validity of the sedimentation dams as an environmental compensation instrument, its use is only meaningful if associated with soil conservation practices.

Palavras-chave: produção de sedimentos, manejo do solo, bacias hidrográficas

¹) Professora do Departamento de Construção Civil do IFCE, Fortaleza –CE, e-mail: teresafarias@ifce.edu.br

²) Professor do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC, Fortaleza –CE, e-mail: jcaraujo@ufc.br

³) Engenheiro Civil, Doutorando em Recursos Hídricos, UFC, Fortaleza –CE, e-mail: phamedeiros@gmail.com

1 - INTRODUÇÃO

As atividades humanas têm causado um aumento considerável no impacto do meio ambiente. Observa-se que a erosão de solo, um processo que ocorre por condições naturais, pode ser acelerado por mudanças no uso do solo, principalmente pelo desmatamento e atividades agrícolas, aumentando dessa forma a taxa de erosão.

A quantificação da taxa de erosão em bacias hidrográficas é tarefa necessária para o desenvolvimento de planos de manejo nestas áreas. Segundo De Vente *et al.* (2007) os planos de manejo devem considerar os impactos da erosão de duas maneiras. Aqueles relacionados a perda de solo em campo, com ruptura da estrutura do solo e declínio de matéria orgânica e nutrientes, conduzindo a uma diminuição da fertilidade do solo, e conseqüentemente da produção de alimentos e da cobertura vegetal. E os efeitos relacionados aos problemas de sedimentação em canais, aumentando o risco de enchentes e reduzindo a vida útil de reservatórios, o que representa também impacto na disponibilidade hídrica. Araújo *et al.* (2006) avaliaram o impacto do assoreamento na disponibilidade hídrica do Ceará, concluindo que a vazão regularizável com 90% de garantia decai cerca de 380 L.s^{-1} anualmente no estado somente por causa do assoreamento dos reservatórios.

Este artigo objetiva realizar uma avaliação do balanço de sedimentos, no ano de 2007, na bacia de Pai João, localizada na região serrana cearense, onde são observadas diversas alterações do meio natural devido às atividades antrópicas. Verifica-se nesta bacia: uso do solo para fins agrícolas sem práticas de conservação em vertentes com altas declividades, presença de áreas desprovidas de vegetação, com a presença de solo exposto, ou seja, áreas potencialmente geradoras de sedimentos, existem ainda pequenos reservatórios de acumulação de água, que acabam por reter sedimentos, além de microbarragens de contenção de sedimentos, construídas com o objetivo de minorar o efeito negativo do excesso na produção de sedimentos.

Dessa forma, buscou-se quantificar a produção de sedimentos na bacia, ou seja, o aporte sólido no seu exutório, além da massa de sedimentos retida nos pequenos reservatórios de acumulação de água, e a retenção de material sólido pelos microbarramentos de contenção de sedimentos, quantificando assim o balanço de sedimentos na área.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia de Pai João é uma sub-bacia do rio Pesqueiro, localiza-se no município de Aratuba-CE e no Maciço de Baturité (Figura 1), a aproximadamente 100 km de Fortaleza-CE. O Maciço de Baturité é considerado um geossistema importante, tendo em vista seu papel na recarga dos mananciais das bacias hidrográficas metropolitanas e sua tradição na produção de alimentos como feijão, milho, café, cana-de-açúcar e hortifrutigranjeiros. Vários impactos ambientais negativos ameaçam o equilíbrio ecológico e os recursos naturais da região. A exploração predatória das terras, aliada às condições de relevo acidentado e a carência de práticas conservacionistas têm intensificado os processos de degradação dos solos.

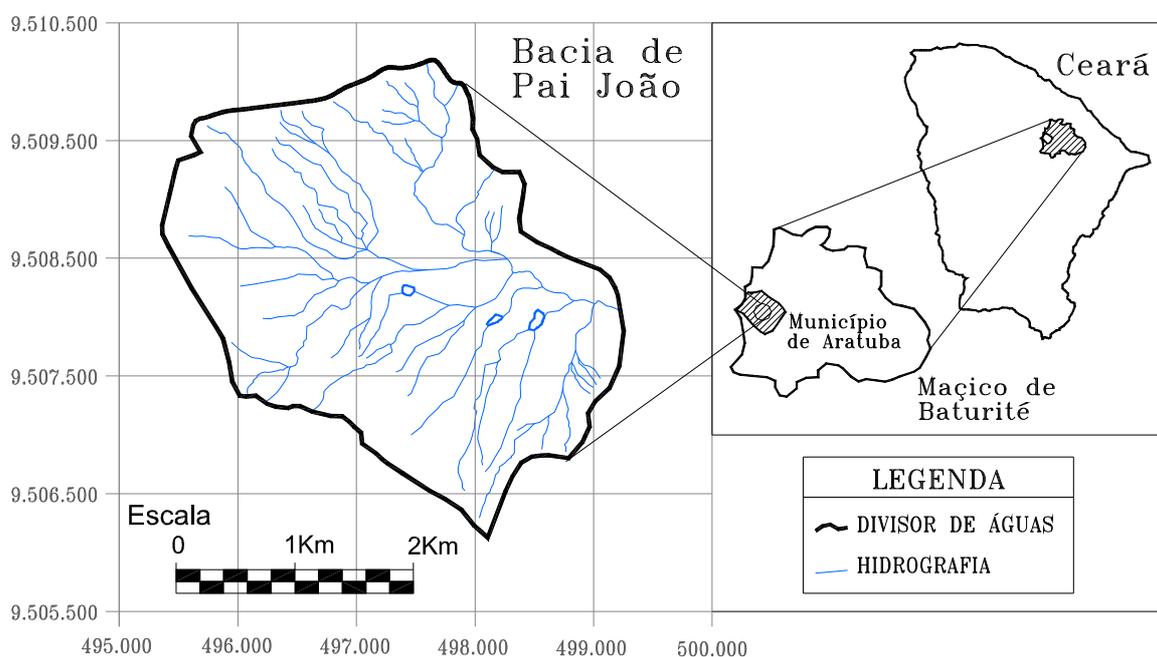


Figura 1 - Localização da Bacia de Pai João em relação ao Estado do Ceará

A Bacia de Pai João tem área de drenagem de 9,3 km², apresenta uma média de precipitação pluviométrica de 870 mm anuais (série histórica de 2000 a 2007, Posto Pai João, FUNCEME, 2008), possui três pequenos reservatórios localizados em sítios e fazendas da área, com respectivas capacidades de acumulação de 40.900 m³, 15.400 m³ e 11.400 m³, além de rede de drenagem intermitente, com a presença de escoamento de base durante alguns meses do ano.

É uma área de relevo acidentado com vales encaixados em V e planícies aluvionares restritas à área da drenagem principal. As altitudes variam de 230 m a 850 m, compondo um relevo de 620 m, com declividade média de 40,2 %. A bacia de drenagem é de 4ª ordem com alta densidade de drenagem (4,4 km.km⁻²) e tempo de concentração de 40 min.

Eichert (2008) realizou estudo sobre usos e ocupação do solo nesta bacia. O mapa temático de vegetação e usos do solo (Figura 2) foi desenvolvido com base em imagens de satélite e validado através de levantamentos de campo. A bacia de Pai João possui 36% da área coberta por vegetação densa e 50% por vegetação aberta, ou seja, 86% da área da bacia possuem cobertura vegetal natural, com a predominância de vegetação aberta; a área utilizada para agricultura, sem práticas de conservação, corresponde a 5% da bacia; 8% correspondem a terras degradadas, com a presença de solo descoberto e vegetação queimada; 1% da área da bacia compreende a área urbanizada no povoado de Pai João e edificações existentes em sítios e fazendas.

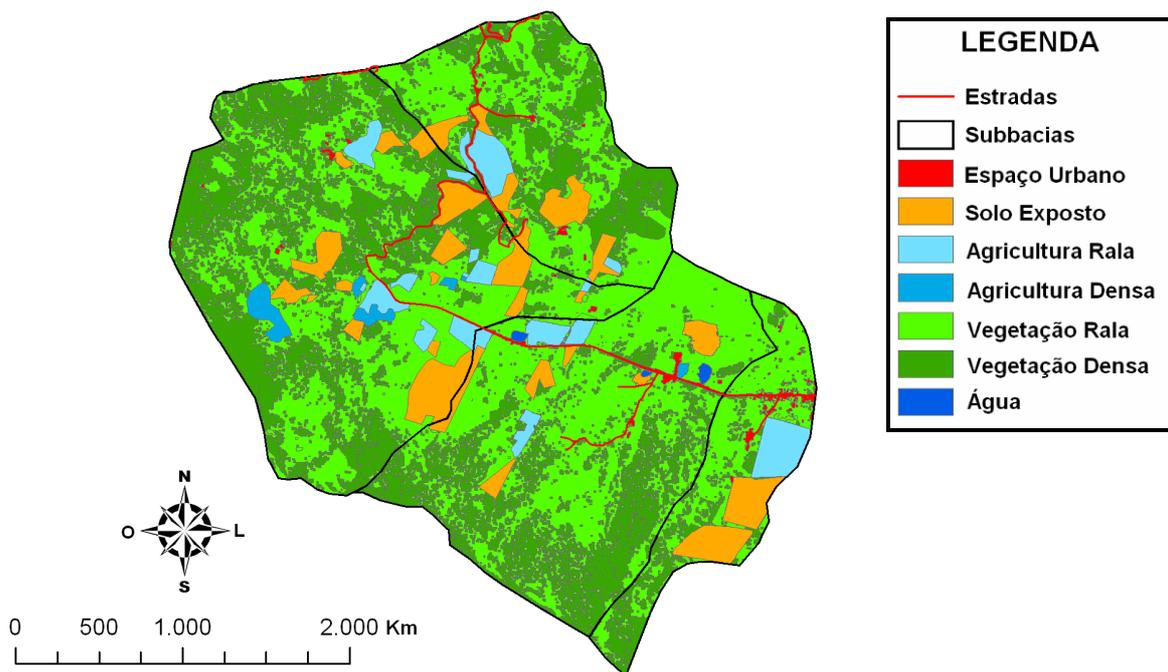


Figura 2 - Mapa de vegetação, uso e ocupação do solo da Bacia de Pai João. Fonte: Eichert (2008)

- Microbarragens de contenção de sedimentos

As barragens de contenção de sedimentos são constituídas por enrocamento sem argamassa arranjado sobre o leito de pequenos riachos ou em encostas e funcionam como uma barreira sedimentológica em trechos de pequenos talwegues, forçando a deposição de sedimentos transportados pela corrente de água, cuja alternância de fluxos permite uma composição de partículas multivariadas em sua granulometria, impedindo o desgaste do solo provocado pela exportação de sedimentos, nutrientes e matéria orgânica (Silva, 2007). Com o passar do tempo, no espaço localizado imediatamente a montante do microbarramento, gera-se um terraço de solo (Figura 3) que, por sua vez, também retém água mediante umidade intersticial. Dessa maneira, o solo que seria depositado nos rios e reservatórios é retido nas áreas altas, podendo ser aproveitado para a produção agrícola.

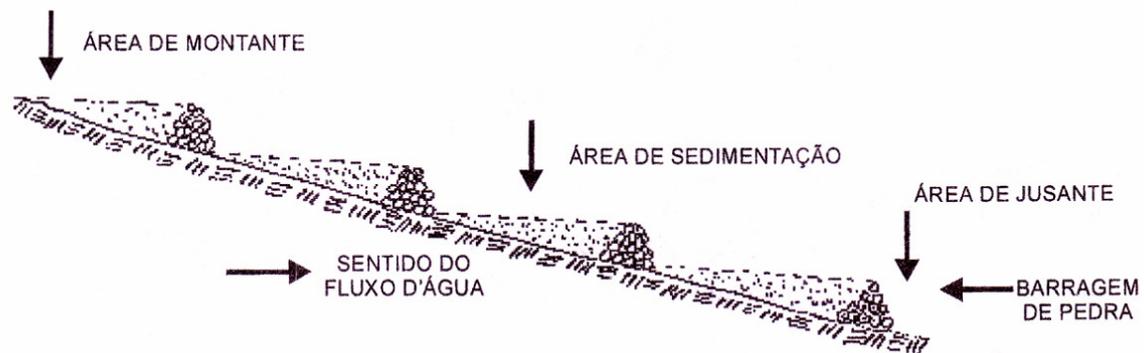


Figura 3 - Esquema do sequenciamento de barragens de contenção de sedimentos. Fonte: Ceará (2001).

Como medida de compensação ambiental, foram construídas no âmbito do Programa Hidro-Ambiental do Ceará (PRODHAM, Governo do Estado) 88 barragens do tipo marco zero nesta bacia, das quais 37 ainda com capacidade de acumulação no ano de 2007, de acordo com levantamento realizado na área no período antecedente às chuvas daquele ano.

Entretanto, apesar da utilização das barragens e cordões de pedra como medida de compensação ambiental no sentido de mitigar os efeitos da erosão na Bacia de Pai João, verifica-se ao mesmo tempo a utilização de práticas inadequadas de manejo do solo, como é o caso das queimadas (Figura 4b), muito freqüentes em áreas de plantio de culturas de subsistência, causando o empobrecimento e a degradação do solo, aumentando o escoamento superficial e o transporte de sedimentos. Na Figura 4 são apresentados aspectos gerais da bacia.



(a) Microbarragem de contenção de sedimentos



(b) Queimada da vegetação



(c) Barragem de acumulação de água



(f) Vertente com solo exposto

Figura 4 – Aspectos gerais da bacia de Pai João

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Instrumentação e Monitoramento

Na Bacia de Pai João, no ano de 2006, com recursos do projeto PROSED (Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas sob Diferentes Contextos Geoambientais, processo nº 552411 / 2005-1 - Edital MCT / CNPq / CT-HIDRO nº 13 / 2005), realizou-se instrumentação para monitoramento de variáveis hidrológicas e sedimentológicas no ano de 2007. Foram instalados dois pluviômetros para registro diário de chuva, réguas linimétricas na seção do exutório para controle de nível d'água e estimativa de vazões na bacia. Procedeu-se ainda, ao treinamento de pessoal residente no local para realização desses registros e de amostragem na seção de controle do rio principal para análise da concentração de material sólido em suspensão, a fim de estimar as vazões líquidas e sólidas.

Foram realizadas em 2007 campanhas sistemáticas intensificadas no período de chuvas, para coleta de dados (precipitação, medidas de nível d'água, amostras para análise de sedimentos), além de medições de vazão utilizando micromolinete, permitindo determinar uma curva-chave de vazões para a seção de controle localizada no exutório da bacia.

3.2 – Determinação de vazões afluentes

A curva-chave de vazões apresentada na Figura 5, foi utilizada para a estimativa de vazões afluentes no período de deflúvio. A extrapolação desta curva foi realizada com a aplicação da equação de Manning, possibilitando determinar vazões nos eventos extremos a partir de correlação com a profundidade do nível d'água que variou de 0,05 m, a 0,60 m nos maiores eventos, ou seja,

com estimativa de vazões chegando a $800 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. O coeficiente de rugosidade de Manning calibrado foi igual a 0,20.

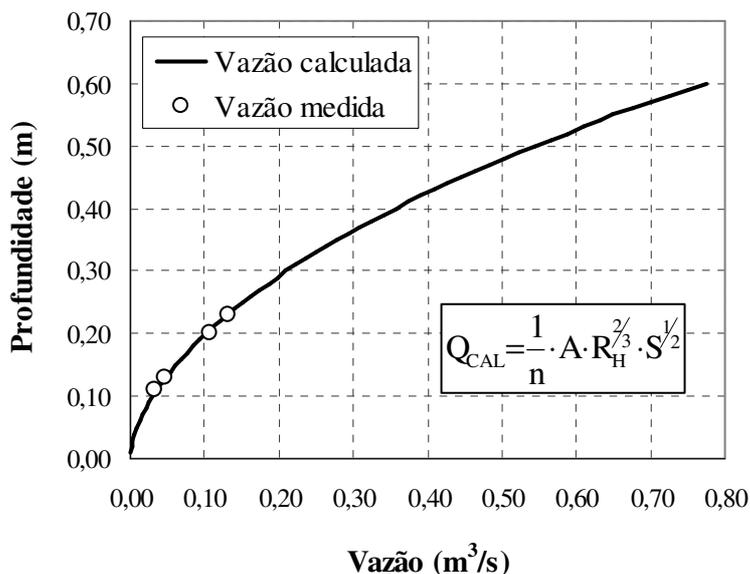


Figura 5 – Curva-chave de vazões da Bacia de Pai João, ano de 2007

A Figura 6 apresenta os hietogramas e hidrogramas correspondentes para o período de deflúvio (18/04/07 a 07/08/07, três meses). Os hidrogramas foram estimados através de medições diárias de nível d’água e da curva-chave de vazões (Figura 5) obtida para a seção de controle. O deflúvio na área foi resultado de 14 eventos chuva-deflúvio. Considerando apenas as vazões medidas nos dias de eventos de chuva e um escoamento de base médio de $10 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, a lâmina total escoada em 2007 na bacia foi estimada em 53 mm, o que corresponde a um coeficiente de escoamento superficial de 7% em 2007.

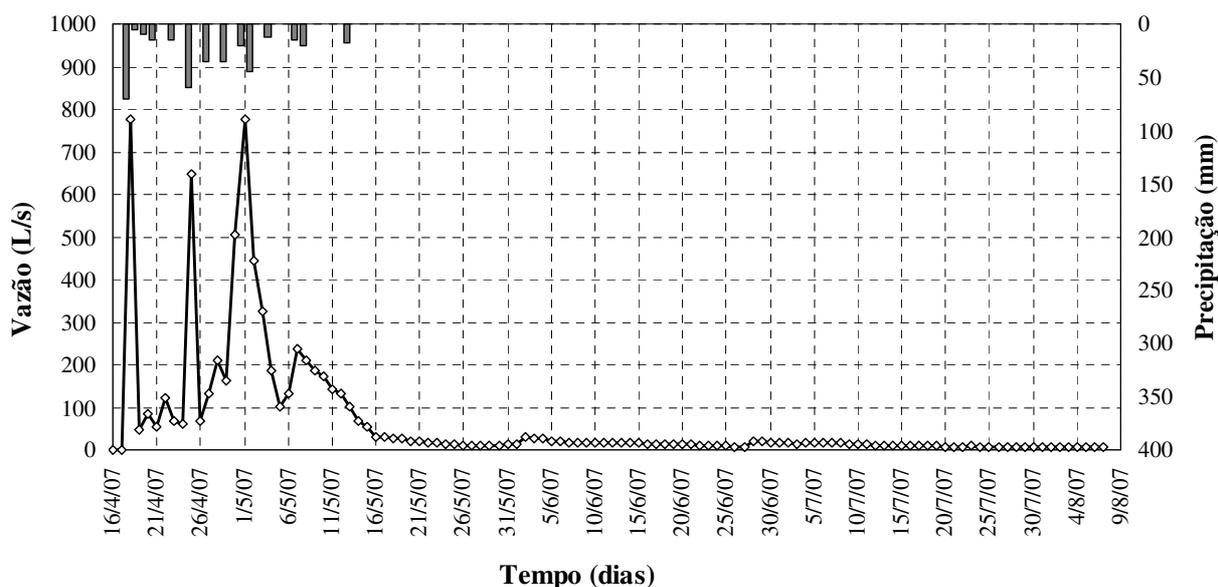


Figura 6 – Hietograma e hidrograma diários da Bacia de Pai João (período de 18/04/07 a 07/08/07)

3.3 – Determinação das descargas sólidas

3.3.1 - Medição da Descarga Sólida em Suspensão

Durante os eventos chuva-deflúvio, realizaram-se coletas de amostras para análises da concentração de material sólido em suspensão. As concentrações medidas foram, então, relacionadas às respectivas vazões instantâneas medidas com micro-molinete ou estimadas pela curva-chave de vazões a partir de registros de nível d'água no momento da coleta de forma a compor uma curva-chave de sedimentos que relacionasse descarga líquida e sólida, utilizada na estimativa anual da produção de sedimentos, computando a taxa de descarga sólida em suspensão dos eventos chuva-deflúvio e dos demais dias em que houve escoamento nessas áreas e que não houve medição da concentração de sedimentos em suspensão.

3.3.2 - Modelagem da Taxa de Transporte de Fundo

Para realizar a estimativa da taxa de transporte de fundo ou carga de leito, uma vez que não foi possível realizar sua medição, desenvolveu-se um modelo em linguagem de programação Fortran, tendo por base os métodos desenvolvidos por Einstein (1942) e Brown (1943) *apud* Bogárdi (1974) e Haan *et al.* (1994). O modelo utiliza os dois métodos, pois a relação de Einstein (1942) foi desenvolvida para material de leito com partículas de granulometria uniforme, dessa forma, optou-se pela relação desenvolvida por Brown (1943) para a faixa em que foi medido, fora desta faixa o modelo utiliza a relação original de Einstein.

- Parâmetros de entrada do modelo

O modelo é capaz de simular a taxa de transporte de fundo para cada evento de acordo com as características hidráulicas do escoamento no canal. São parâmetros de entrada do modelo: o raio hidráulico R_H (m) e a largura do leito do canal w (m), que variam de acordo com o nível d'água em cada evento chuva-deflúvio. São necessários ainda, a declividade da linha de energia S_f ($m \cdot m^{-1}$), o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido ν ($m^2 \cdot s^{-1}$) e o peso específico do fluido γ ($N \cdot m^{-3}$). Com relação aos parâmetros relativos ao sedimento transportado pelo leito, são necessários peso específico da partícula γ_s ($N \cdot m^{-3}$) e os diâmetros representativos da partícula d (m).

Para realizar a estimativa dos parâmetros do modelo relativos às características do sedimento, realizou-se coleta de material de leito em uma seção do exutório. Através de ensaios em laboratório foram determinados a granulometria deste material e a sua densidade. O modelo permite a entrada de vários diâmetros representativos da partícula de sedimento transportada pelo fundo. Para as áreas em estudo, a entrada no modelo foi realizada com os seguintes diâmetros, d_{10} (diâmetro de 10% do que passa), d_{30} , d_{50} , d_{70} , e d_{90} , estimados a partir da curva granulométrica do material de leito.

3.4 - Balanço de Sedimentos

O balanço de sedimento é definido como uma contabilização de fontes e trajetórias de redistribuição de sedimentos em uma unidade de área por unidade de tempo (Slaymaker, 2003).

O aporte de sedimentos que chega ao exutório da Bacia de Pai João foi estimada com base nos eventos em que houve monitoramento de descargas sólidas em suspensão, na curva-chave de sedimentos determinada para a área, e na modelagem do transporte de leito. Dessa forma, o aporte total foi estimado somando-se as cargas em suspensão obtidas diretamente por medição ou pela equação da curva-chave às respectivas descargas de leito, para todos os dias em que houve deflúvio na área (período de 18/04/07 a 07/08/07).

Realizou-se, ainda, estimativa da produção anual de sedimentos na área caso não houvesse interferências de barragens de água e de microbarramentos de contenção de sedimentos. No balanço de sedimentos da bacia foram computados o total de sedimentos que chega ao exutório, a retenção de sedimentos nos microbarramentos e a retenção nas três pequenas barragens de acumulação de água existentes na área, utilizando a seguinte relação (1):

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \dot{M}_e - \dot{M}_s \quad (1)$$

em que, $\Delta M/\Delta t$ é a variação da massa de sedimentos no tempo, \dot{M}_e é a massa de sedimentos que entra no sistema, \dot{M}_s é a massa que sai do sistema e corresponde ao aporte de sedimentos no exutório por unidade de tempo.

- Acumulação de sedimentos nos reservatórios de água

A estimativa de acumulação de sedimentos nas três barragens de água existentes na bacia foi realizada utilizando a curva empírica de Brune (1953), *apud* Haan *et al.* (1994), em que é necessário o volume de acumulação de água dos reservatórios. O volume de acumulação de água das barragens foi estimado utilizando-se a equação de capacidade de armazenamento de reservatórios de Molle e Cadier (1992), que tem por base dados de geometria dos reservatórios que foram obtidos de imagens de satélite e do mapa topográfico da área. Os reservatórios têm capacidades de acumulação de 40.900 m³, 15.400 m³ e 11.400 m³ e apresentaram eficiência de retenção de sedimentos de 93%, 95% e 100% (neste caso não houve sangria em 2007) respectivamente. Para cálculo do aporte de sedimentos aos reservatórios, utilizou-se a produção de sedimentos específica estimada no exutório da bacia multiplicada pela área da bacia contribuinte. A massa de sedimentos retida nos reservatórios foi então estimada pelo produto do aporte de sedimentos pelos percentuais de retenção citados.

- Retenção de sedimentos nos microbarramentos

A estimativa de sedimentos que é retida nos microbarramentos foi realizada através de experimento realizado com três microbarramentos sucessivos. Foi levantada a relação cota-volume desses microbarramentos e em cada um foi instalada uma régua de precisão, fazendo-se coincidir o zero com o nível mínimo do reservatório, permitindo avaliar a acumulação de sedimentos através da relação cota-volume ao longo do ano de 2007. Para avaliar a massa de sedimentos retida nas barragens foram realizados ensaios para determinar a massa específica aparente seca do material acumulado, estimada em $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$. Monitorou-se ainda, vazão e concentração de sedimentos em uma seção de controle imediatamente a jusante do terceiro barramento sucessivo, para avaliar a massa de sedimentos que passa a jusante da terceira barragem. Com base nos dados monitorados verificou-se que a eficiência de retenção do sistema oscilou, temporalmente, entre 6% e 11%, com média próxima a 10%. O resultado encontrado é compatível com o observado por Brune (10%) para reservatórios com baixo tempo de residência (da ordem de um dia), o tempo de residência do sistema estudado é de 0,4 dias (ver Araújo *et. al.*, 2007).

O valor médio de sedimentos acumulados em um microbarramento para o ano de 2007, com base nas medições realizadas em três microbarramentos sucessivos foi extrapolado para os 37 microbarramentos localizados na bacia de Pai João, ainda com capacidade de acumulação no ano de 2007, de acordo com o levantamento realizado no período antecedente às chuvas do mesmo ano, a fim de estimar o total de sedimentos no ano de 2007 que se acumulou nas barragens de contenção.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Aporte Sólido no Exutório

Determinou-se uma curva-chave de sedimentos em suspensão para a bacia de Pai João (Figura 7) a partir de eventos monitorados no ano de 2007. Esta foi obtida através de regressão com equação na forma exponencial, apresentando coeficiente de determinação R^2 igual a 0,90 e coeficiente de eficiência estatística de Nash e Sutcliffe (1970) igual a 0,91. A equação (2), na qual Q_{SS} é a descarga sólida em suspensão (Kg.s^{-1}) e Q_{LI} é a descarga líquida instantânea, foi obtida para vazões afluentes na faixa de 30 L.s^{-1} a aproximadamente 800 L.s^{-1} . As medições de concentração de sedimentos apresentaram valores na faixa de 10 mg.L^{-1} a 50 mg.L^{-1} , incluindo os dias com escoamento de base.

$$Q_{SS} = 0,0008 \cdot e^{0,0054 \cdot Q_{LI}} \quad (2)$$

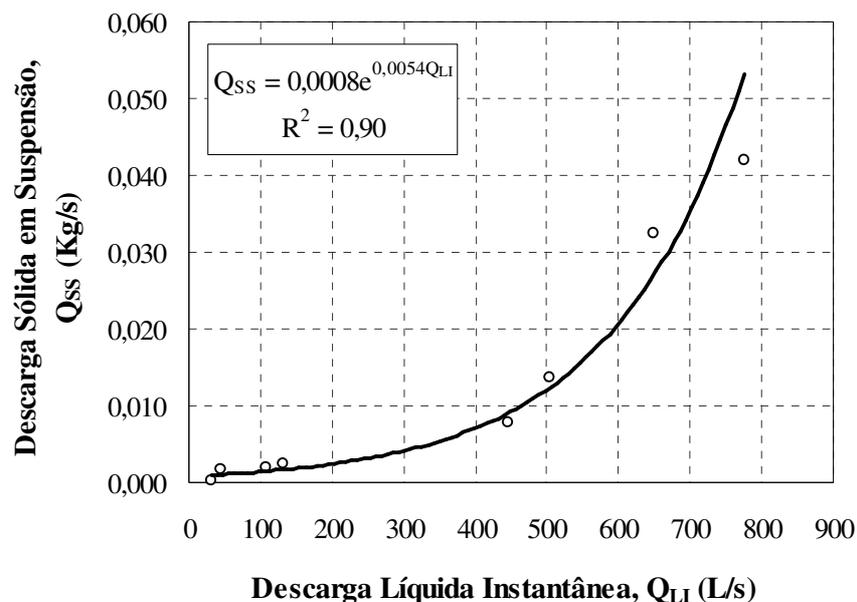


Figura 7 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da Bacia de Pai João

4.1.1 - Descarga Sólida em Suspensão

Foram monitorados seis eventos chuva-deflúvio na Bacia de Pai João no ano de 2007, cujos resultados de produção de sedimentos em suspensão são apresentados na Tabela 1. Devido ao sistema de medição de deflúvio utilizado na área, a estimativa do volume escoado durante os eventos ficou comprometida uma vez que é realizada diariamente uma única medição de nível d'água, não sendo possível determinar com precisão o hidrograma do evento.

Tabela 1 – Eventos monitorados e cargas de sedimentos em suspensão na Bacia de Pai João

Data do Evento	Precipitação (mm.dia ⁻¹)	Descarga Líquida Q _{LI} (L.s ⁻¹)	Concentração de Sedimentos em suspensão (mg.L ⁻¹)	Descarga Sólida em Suspensão Q _{SS} (Kg.s ⁻¹)	Descarga de Sedimentos em Suspensão no Exutório (Kg.dia ⁻¹)
18/4/2007	70	775	54	0,042	3.617
19/4/2007	25	46	39	0,002	154
25/4/2007	60	648	50	0,032	2.800
27/4/2007	35	132	18	0,002	205
30/4/2007	20	503	27	0,014	1.182
02/5/2007	45	445	18	0,008	683

4.1.2 – Descarga sólida de leito

A taxa de transporte de fundo foi estimada através de modelagem matemática, uma vez que não foi possível realizar esta medição diretamente em campo. Foi utilizado o modelo EB, que

utiliza as equações desenvolvidas por Einstein (1942) e Brown (1943). Os resultados das simulações do modelo para os seis eventos monitorados em 2007 são apresentados na Tabela 2

Tabela 2 – Carga de Sedimentos dos eventos monitorados em 2007 na Bacia de Pai João. Avaliação das descargas sólidas em suspensão e de leito através de medida e modelagem.

Data do Evento	Carga suspensão (medida)		Carga leito (modelada)		Suspensão + leito	
	Descarga Sólida em Suspensão, Q_{SS} (Kg.s ⁻¹)	Percentual em relação ao total	Descarga Sólida de Fundo, Q_{SF} (kg.s ⁻¹)	Percentual em relação ao total	Descarga Sólida Total, Q_{SOL} (Kg.s ⁻¹)	Produção de Sedimentos (ton.dia ⁻¹)
18/4/2007	0,042	11%	0,337	89%	0,379	33
19/4/2007	0,002	1%	0,251	99%	0,253	22
25/4/2007	0,032	9%	0,333	91%	0,365	32
27/4/2007	0,002	1%	0,180	99%	0,182	16
30/4/2007	0,014	4%	0,327	96%	0,341	29
2/5/2007	0,008	2%	0,324	98%	0,332	29
Total		5%		95%		161

A Tabela 2 apresenta, para os seis eventos monitorados em 2007, os valores de descarga sólida de leito obtidos através de modelagem, além dos valores de descarga sólida em suspensão observados. A comparação entre as duas parcelas de descarga sólida na Bacia de Pai João mostrou que a descarga sólida de leito corresponde a 95% da descarga sólida total, enquanto que a descarga sólida em suspensão corresponde a apenas 5% do total. Os eventos dos dias 18/4/2007, 25/4/2007, 30/4/2007 foram os que apresentaram os maiores percentuais de descarga sólida em suspensão em relação à descarga total, 11%, 9% e 4% respectivamente, o que pode estar associado ao poder de fluxo das maiores vazões ocasionando a ressuspensão de sedimentos com maiores percentuais de descargas sólidas em suspensão em relação à descarga sólida total.

Os altos valores de descarga de leito podem ter, em parte, explicação através da análise da composição granulométrica do material de leito, que possui a seguinte distribuição de acordo com a escala da USDA: 21% de pedregulho, 59% de areia grossa, 15% de areia média e 5% de areia fina. Segundo Santos *et al.* (2001), em rios com sedimentos compostos predominantemente de areia e cascalho a carga de leito atinge valores elevados, podendo ultrapassar 50% do total transportado.

Entretanto, a determinação da descarga de leito através de modelagem pode estar conduzindo a uma superestimativa desses valores. As equações utilizadas podem não conseguir explicar de que forma se dá o processo na área. Dessa forma, para uma análise mais consistente da contribuição do transporte de fundo para a produção de sedimentos na bacia seria necessário também a estimativa desta parcela através de medição e monitoramento de maneira a realizar uma avaliação do modelo.

4.2 - Balanço de Sedimentos

Foi contabilizado, na Bacia de Pai João no ano de 2007, aporte total de sedimentos no exutório igual a 1.268 ton, ou $136 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$. Desse total, apenas 23 ton correspondem a material transportado em suspensão, resultando em uma produção de sedimentos em suspensão de $2 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, estimativa esta realizada através de medições em alguns eventos e para os dias em que não houve medição de descargas sólidas utilizou-se a equação da curva-chave de sedimentos desta área (equação 2), tendo por base as vazões afluentes diárias. A carga de leito por sua vez, foi estimada em 1.245 ton, através da aplicação do modelo EB tendo por base parâmetros físicos do sedimento determinados a partir de amostras do material de leito coletadas na área, e características hidráulicas e geométricas do canal.

Através da análise dos valores obtidos para carga de leito e em suspensão, observa-se que 95% do aporte total de sedimentos no exutório da bacia de Pai João correspondem a material transportado pelo leito. Entretanto, estes valores podem estar superestimados, uma vez que não foi realizada medição direta desta parcela, apesar de a modelagem ser baseada em parâmetros medidos em campo.

Levando-se em consideração as interferências existentes nesta área (microbarramentos de contenção de sedimentos e a presença de pequenos reservatórios de água que retém parte do sedimento que seria transportado até o exutório, caso não houvesse essas interferências na área), realizou-se um balanço de sedimentos na bacia a fim de estimar a produção de sedimentos da área, caso não houvesse essas interferências, a fim de avaliar a eficiência das barragens de contenção de sedimentos.

A acumulação total de sedimentos nas três barragens existentes na bacia, estimada com base no método empírico de Brune (1953) *apud* Haan *et al.* (1994), no ano de 2007 foi de 205 ton.ano^{-1} , com valores correspondentes a cada barragem de 122 ton.ano^{-1} , 60 ton.ano^{-1} , 23 ton.ano^{-1} e respectivas capacidades de acumulação de água estimadas em 40.900 m^3 , 15.400 m^3 e 11.400 m^3 .

Com relação à acumulação nos microbarramentos de contenção de sedimentos, a estimativa média anual em um microbarramento foi de $1,35 \text{ ton.ano}^{-1}$, tendo por base as medições realizadas no experimento com três microbarramentos sucessivos na bacia de Pai João, com acumulações correspondentes a $2,16 \text{ ton.ano}^{-1}$, $1,57 \text{ ton.ano}^{-1}$, e $0,32 \text{ ton.ano}^{-1}$. Dessa forma, a estimativa média total de acumulação pelos microbarramentos na bacia de Pai João foi de 50 ton.ano^{-1} , levando-se em consideração a existência de 37 microbarramentos na área ainda com capacidade de acumulação no ano de 2007. Este número foi levantado em um cadastramento dos microbarramentos realizado no período anterior às chuvas de 2007.

A Tabela 3 apresenta o balanço de sedimentos para a área no ano de 2007 com os valores de acumulação de sedimentos nos microbarramentos, nas barragens de acumulação de água e o aporte

de sedimentos no exutório da bacia (produção efetiva de sedimentos) e seus respectivos percentuais em relação à produção de sedimentos da área caso não houvesse a interferência das barragens de contenção de sedimentos e as barragens de acumulação de água.

Tabela 3 – Balanço de sedimentos na Bacia de Pai João no ano de 2007

	Massa de sedimentos (ton/ano)	Massa de sedimentos (%)
Total retido nos 37 microbarramentos	50	4
Total retido nas três barragens de água	205	13
Aporte de sedimentos no exutório (produção efetiva de sedimentos)	1.268	83
Produção total de sedimentos na bacia	1.523	100
Carga específica de sedimentos no exutório (ton.km ⁻² .ano ⁻¹)	136	
Produção total de sedimentos na bacia (ton.km ⁻² .ano ⁻¹)	163	

Com base nos resultados apresentados, caso não houvesse obras de retenção (barragens e microbarramentos) na área a produção de sedimentos da bacia de Pai João no ano de 2007 seria de 163 ton.km⁻².ano⁻¹, ou seja, uma estimativa total de 1.523 ton.ano⁻¹. Desse total, 83% corresponderam ao aporte de sedimentos no exutório, 13% à retenção pelos reservatórios de água e apenas 4% de acumulação pelos microbarramentos de contenção de sedimentos, verificando-se a baixa eficiência de retenção desses sistemas na área no ano de 2007 em comparação ao percentual que chega ao exutório. Isso reflete o impacto de elevadas ações antrópicas na área, o uso do solo com práticas inadequadas de manejo, como as queimadas que são muito frequentes na área e plantios em altas declividades.

5 - CONCLUSÕES

Com base na avaliação dos resultados apresentados verificou-se que o transporte de sedimentos nos rios da bacia de Pai João se dá predominantemente pelo leito, esta parcela representando 95% do total transportado. Entretanto, não se descarta a possibilidade da modelagem haver superestimado esses valores, o que necessitaria de uma comprovação através de medições em campo.

A descarga específica pelo exutório na Bacia de Pai João foi estimada, no ano de 2007, em 136 ton.km⁻².ano⁻¹ e o coeficiente de escoamento fluvial foi avaliado em 8%, contabilizando 112

dias de escoamento. Caso não houvesse a interferência de barragens na bacia, sua produção de sedimentos seria de 163 ton.km⁻².ano⁻¹. Desse total, 13% ficaram retidos nas barragens de acumulação de água, enquanto que 4% ficaram retidos nos microbarramentos de contenção de sedimentos.

Os resultados sugerem que, apesar de os microbarramentos de contenção de sedimentos apresentarem-se como válido instrumento de gestão hidro-ambiental, sua utilização deve estar associada a práticas adequadas de manejo do solo, principalmente nas atividades agrícolas, de forma a contribuir para o manejo sustentável da área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do Projeto PROSED (Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas sob Diferentes Contextos Geoambientais, processo nº 552411 / 2005-1 - Edital MCT / CNPq / CT-HIDRO nº 13 / 2005), fundamental para a execução desta pesquisa, à FUNCAP, pela concessão de bolsa de mestrado à primeira autora, e ao CNPq pela concessão de bolsa produtividade em pesquisa ao segundo autor.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, J. C., GÜNTNER, A.; BRONSTERT A. (2006). Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques**, 51(1): 157-170, DOI 10.1623/hysj.51.1.157

ARAÚJO, J. C. ; FARIAS, T. R. L. ; LINARD, A. F. G.(2007). Eficiência de Retenção em Barragens de Contenção de Sedimentos do Tipo Marco Zero. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo.

BOGÁRDI, J. (1974). **Sediment Transport in Alluvial Streams**. Akadémiai Kiadó, Budapest, 826p.

BROWN, C.B. (1943). Sediment Transportation. In: **Engineering Hydraulics**, H. Rouse, ed., John Wiley & Sons, New York.

BRUNE, G. M. (1953) **Trap efficiency of reservoirs**. Trans. Am. Geophys. Union 34(3):407-418.

CEARÁ (2001). **Manual técnico operativo do PRODHAM**. 177f. Secretaria de Recursos Hídricos, Fortaleza.

DE VENETE, J.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; ROMPAEY, A.V.; GOVERS, G. (2007). Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. **Global and Planetary Change**. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.05.002.

EICHERT, B. (2008). **Mapeamento georreferenciado do uso do solo em duas bacias tropicais sub-úmidas no Ceará**. Relatório de Estágio. Grupo de Estudos Hidrossedimentológicos do Semi-Árido - HIDROSED, Depto. Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

EINSTEIN, H. A. (1942) **Formulas for the Transportation of Bed Load**. Trans. ASCE, 107. pp 561-573.

FUNCEME (2008). **Séries Pluviométricas do Posto Pai João (2000-2007) e Aratuba (1974-2007)**. Disponível em: <http://www.funceme.br/DEPAM/index.htm>. Acesso em: 21 jan 2008.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. (1994). **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. Academic Press, San Diego, 588p.

MOLLE, F.; CADIER, E. (1992). **Manual do Pequeno Açude**. SUDENE-DPG-PRN-DPP-APR, Recife, 523p.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). **River flow forecasting through conceptual models – Part I: A discussion of principles**. Journal of Hydrology, 10(3), 282-290.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.S.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F.C. (2001). **Hidrometria Aplicada**. LACTEC-Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 372p.

SILVA, A. F. M. S. (2007). 119f. **Análise da Suscetibilidade à Erosão dos Solos na Microbacia do Riacho dos Barros, Município de Aratuba-Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SLAYMAKER, O. (2003). The sediment budget as conceptual framework and management tool. **Hydrobiologia** 494: 71-82.