

## Erosão Hídrica do Solo no Semi-árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé

Vajapeyam S. Srinivasan, Celso Augusto Guimarães Santos, Carlos de Oliveira Galvão

Depto. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande - Rua Aprígio Veloso, 882  
58109-970 Campina Grande, PB - Fone (83) 310-1157 - Fax 310-1388 - vajapeya@dec.ufcg.edu.br, celso@dec.ufcg.edu.br, galvao@dec.ufcg.edu.br

Recebido: 10/01 - revisão: 05/02 - aceito: 04/03

### RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade apresentar a experiência obtida em duas décadas com os estudos de medição do escoamento superficial e da erosão do solo causada pela chuva natural na região semi-árida da Paraíba. Os estudos foram realizados na Bacia Experimental de Sumé, que foi instalada numa das sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé. O trabalho de implantação, iniciado em 1981 pela então Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) com o apoio do ORSTOM (França) e do CNPq, contava com nove parcelas de erosão de 100 m<sup>2</sup> com diferentes coberturas e declividades e quatro microbacias de aproximadamente 0,5 ha de área, além de várias parcelas de 1 m<sup>2</sup> sob chuva simulada. Duas das microbacias estavam desmatadas, enquanto as outras estavam cobertas pela vegetação nativa (Caatinga). Com os dados coletados, foram realizados análises e estudos comparativos do escoamento superficial e erosão do solo entre as diversas unidades de experimento. Os resultados reforçam a necessidade de técnicas de modelagem para a previsão do escoamento e erosão proveniente. Foram utilizados diversos modelos para avaliar o escoamento e os resultados em geral foram bastante satisfatórios. No caso da erosão do solo, foi utilizado um modelo distribuído hidrodinâmico. Apresenta-se uma discussão sobre os diversos aspectos deste processo de modelagem e acredita-se que esta experiência pode ser muito útil na avaliação da erosão hídrica na região semi-árida do Nordeste brasileiro.

**Palavras-chave:** semi-árido; modelagem; erosão; escoamento superficial.

### INTRODUÇÃO

No manejo dos recursos hídricos na região semi-árida do Nordeste, duas tendências opostas se apresentam. A primeira é a necessidade de maximizar o escoamento superficial, armazenando um maior volume possível de água nos reservatórios, para uso na época de estiagem. Neste caso, a vegetação é considerada uma corrente pelo desperdício de água por evapotranspiração e por favorecer a infiltração. A segunda é a necessidade de favorecer a infiltração da água no solo, permitindo armazenar no próprio local as águas precipitadas, aumentando a produção vegetal, reduzindo a erosão do solo e protegendo a camada fina do solo da superfície. Essas duas tendências não são obrigatoriamente antagônicas, pois quando as condições naturais permitem, o aproveitamento integrado de uma bacia de pequeno a médio porte pode conter zonas de maximização do escoamento superficial, zonas de armazenamento de águas e zonas de utilização dos recursos hídricos e do solo. Por exemplo, as zonas de maximização do escoamento poderiam ser escolhidas nas áreas de declividades altas, com solos rasos e pouco permeáveis - geralmente de baixa produtividade e impróprias para o cultivo, enquanto que as zonas de utilização dos recursos hídricos poderiam ser escolhidas nas áreas planas com solos mais profundos e perme-

áveis, capazes de armazenar bastante água e aptos para o cultivo (Srinivasan et al., 1988; Cadier et al., 1983; Lal, 1990).

Com base no conceito exposto acima, a Bacia Experimental de Sumé foi instalada com o objetivo de obter os subsídios básicos sobre a produção do escoamento superficial e do solo erodido da superfície, em diversas condições da ocorrência e manejo das unidades hidrográficas. Estas informações são essenciais no processo de identificação das zonas de produção ou de captação de água e das zonas de utilização, como, por exemplo, um perímetro de irrigação.

Este artigo relata a experiência acumulada e os resultados obtidos em duas décadas de estudos dos processos do escoamento superficial e da erosão do solo causada pela chuva natural nessa bacia, localizada na região semi-árida da Paraíba. O trabalho de implantação foi iniciado em 1981 pela então Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) com o apoio do então ORSTOM, hoje IRD, instituto francês de cooperação técnica, e do CNPq. A bacia foi monitorada entre 1982 e 1990, quando a falta de financiamento ao trabalho de campo interrompeu a coleta de dados de escoamento e erosão. Em 1996 este trabalho foi reiniciado numa escala limitada, com a concessão de recursos modestos pela FAPESQ-PB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba), encerrando-se em 1997,

devido à retomada da área da pesquisa pelo proprietário para outras atividades.

## A BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

A Bacia Experimental de Sumé está contida na Bacia Representativa de mesmo nome, situada na região semi-árida da Paraíba ( $7^{\circ}40' S$ ,  $37^{\circ}00' W$ ), a 15 km da cidade de Sumé, BR-412, a 240 km de João Pessoa, localizada numa propriedade particular chamada Fazenda Nova. Os estudos hidrológicos realizados na Bacia Representativa de Sumé (Cadier e Freitas, 1982) mostraram que as condições climáticas e do solo são representativas de uma grande parte da região semi-árida do Nordeste do Brasil e, portanto, os estudos hidrossedimentológicos realizados nesta bacia têm o potencial de fornecer resultados aplicáveis para quase toda esta região.

Na Bacia Representativa de Sumé, foram monitoradas três sub-bacias (Cadier e Freitas, 1982): uma bacia de  $137 \text{ km}^2$  (Gangorra), com 60% de solo bruno não cálcico, 20% de solo litólico e 20% de solo podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico; a bacia de Umburana ( $10,7 \text{ km}^2$ ), com 75% de solo bruno não cálcico mais ou menos vértico e 25% de solo litólico; e a bacia de Jatobá ( $27 \text{ km}^2$ ), com 80% de sua superfície com solo podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico muito permeável. A Bacia Experimental foi instalada dentro da sub-bacia Umburana.

O clima na região é do tipo subdesértico quente, de tendência tropical, com a estação chuvosa se concentrando em três meses do ano, com precipitação anual média de 590 mm e desvio pluviométrico anual médio em relação à normal de cerca de 50%. A temperatura média anual é de  $24^{\circ}\text{C}$ , a insolação anual média é de 2800 horas e a evaporação anual média no tanque classe A é de 2900 mm.

O solo predominante da bacia experimental é o bruno não cálcico vértico, representativo da zona semi-árida, com permeabilidade lenta. Os testes de infiltração no local indicaram uma variação entre 5 mm/h a 26 mm/h pelo método de Müntz (Leprun, 1983). Os solos são bastante ricos, com profundidades em torno de 50 cm a 1 m, e em muitos locais ocorre afloramento de rocha. O embasamento é cristalino e, apesar de fraturado, é quase impermeável, ou seja, a percolação profunda para o leito rochoso é insignificante.

O relevo é pouco ondulado a ondulado, com declividade variando entre 4% e 9%. O recobrimento vegetal é de dois tipos: a caatinga nativa densa hiperxerófila arbustiva e a arbórea.

## As unidades experimentais

Os estudos de erosão e escoamento superficial foram conduzidos em três níveis de escala: microbacias com áreas em torno de 0,5 ha, parcelas de erosão do tipo Wischmeier

de  $100 \text{ m}^2$ , estas sob chuva natural, e parcelas de 1 m<sup>2</sup> sob chuva simulada. Ao todo, foram instaladas quatro microbacias e nove parcelas do tipo Wischmeier. Todas estas unidades experimentais foram instaladas relativamente próximas umas das outras.

Duas das microbacias foram mantidas com a vegetação nativa de caatinga na condição original da região, enquanto as duas outras bacias foram totalmente desmatadas, retirando-se até a vegetação rasteira. Assim seria possível avaliar a influência do desmatamento sobre o escoamento superficial e sobre a erosão do solo. A declividade da superfície variou entre 6,1% na microbacia 2 (1,07 ha, caatinga) e 7,1% na microbacia 3 (0,52 ha, desmatada). Nas nove parcelas de Wischmeier ( $100 \text{ m}^2$ ), a declividade variou entre 3,8% (parcela 1, desmatada) e 9,5% (parcela 5, caatinga). As diversas coberturas vegetais mantidas variaram desde a de vegetação rasteira com cobertura morta até culturas em sulcos cultivadas morro abaixo e em contornos nivelados. Uma descrição mais detalhada das microbacias e das parcelas foi apresentada por Srinivasan et al. (1988). A Tabela 1 apresenta um resumo das características das microbacias enquanto que na Tabela 2 encontra-se o resumo das condições físicas das parcelas.

As parcelas de 1 m<sup>2</sup> foram submetidas apenas a chuvas simuladas em condições totalmente controladas (Molinier et al., 1987). A experimentação sob chuva simulada foi realizada sobre solos bruno não cálcicos vérticos e vertissolos, próximo das parcelas de  $100 \text{ m}^2$ .

## Coleta de dados de escoamento e erosão

As quatro microbacias estavam equipadas com tanques coletores de água e de sedimentos escoados durante cada evento de chuva. Os tanques tinham uma capacidade de 2300 litros, e um vertedor triangular de  $90^{\circ}$  instalado no final do tanque coletor permitia o sangramento do excesso do escoamento. Um ou mais linigráficos instalados nos tanques coletores permitiam o registro da variação do nível d'água passando pelo vertedor, para o estabelecimento do hidrograma do evento e o posterior cálculo do volume total do escoamento superficial. O volume total do escoamento superficial era obtido somando-se o volume extravasado pelo vertedor ao volume retido no tanque coletor. O volume total era transformado em lâmina escoada sobre a microbacia. Curvas de calibragem foram estabelecidas para todos os tanques coletores e vertedores logo depois da instalação. Assim, com os dados dos linigráficos, foi possível não somente obter a lâmina escoada como também o hidrograma do evento. No caso da erosão, a massa de sedimentos erodida foi obtida pela soma das quantidades de sedimentos retidos no tanque coletor e dos sedimentos levados pela sangria. A quantidade de sedimentos que passou pelo vertedor foi determinada pela coleta contínua de uma parte do fluxo, em diversos níveis.

**Tabela 1. Características físicas das microbacias.**

Microbacia	Área (ha)	Declividade (%)	Cobertura
1	0,62	7,0	Caatinga Nativa
2	1,07	6,1	Caatinga Nativa
3	0,52	7,1	Desmatada
4	0,48	6,8	Desmatada

veis nos tanques coletores, através de mangueiras ligadas a tomadas de amostragem localizadas no vertedor. A quantidade de sedimentos retidos no tanque coletor foi obtida através de um processo de amostragem de mistura em que as amostras foram coletadas em diversas fases do esvaziamento do tanque, como durante a sifonagem da água decantada da superfície (amostras de 5 litros), durante o esvaziamento pelo fundo (amostras de 1 litro) e da homogeneização do resíduo no tanque (amostras de 1 litro). Após a coleta de até sete amostras para análise da concentração dos sedimentos, o tanque era totalmente esvaziado e limpo para receber o fluxo do próximo evento de chuva.

Nas parcelas de 100 m<sup>2</sup>, todo o escoamento e os sedimentos erodidos foram dirigidos para um tanque de cimento amianto com uma capacidade de 1000 litros, no qual foi mantido um balde calibrado, para a coleta de pequenos volumes do escoamento. O transbordamento do balde enchia o tanque, que estava equipado com nove tubos extravasadores de tamanho uniforme e instalados com espaçamentos iguais entre si. O tubo central era ligado a um segundo tanque de 1000 litros, e os outros oito tubos derramavam o excesso. Assim, o volume total do escoamento foi calculado somando-se ao volume do primeiro tanque nove vezes o volume acumulado no segundo. A coleta de várias amostras de 1 litro, nos dois tanques permitia a determinação da concentração dos sedimentos e posterior cálculo da massa de sólidos erodidos.

As parcelas de 1 m<sup>2</sup> foram submetidas a chuvas artificiais através de um mini-simulador de chuva, que permitia modificar a intensidade da chuva em qualquer momento, sem interrupção, de modo progressivo e contínuo, podendo reproduzir qualquer chuva natural. Um estudo das relações intensidade-duração-freqüência das chuvas da região de Sumé permitiu determinar as características das chuvas simuladas (Molinier et al., 1987). No total, 55 chuvas foram aplicadas a sete parcelas de 1 m<sup>2</sup>, sob diversas condições de solos, de cobertura vegetal e de intensidade de chuva. O escoamento gerado e o solo erodido foram captados num receptor equipado com um linígrafo que permitia a determinação do hidrograma e volume total do escoamento. A quantidade de solo erodido era determinada através da concentração de sedimentos obtidos em várias amostras. Uma sonda de nêutrons foi utilizada para medir a umidade do solo e uma bateria de tensiômetros para conhecer o potencial de água no solo.

**Tabela 2. Características físicas das parcelas.**

Parcela	Declividade (%)	Cobertura vegetal e estado da superfície
1	3,8	Desmatada
2	3,9	Com cobertura morta
3	7,2	Com cobertura morta
4	7,0	Desmatada
5	9,5	Caatinga Nativa
6	4,0	Palma (morro abaixo)
7	4,0	Palma (em sulco nivelado)
8	4,0	Manejada (Wischmeier)
9	4,0	Caatinga renascida (6 anos)

Os detalhes das medições nas microbacias e parcelas de 100 m<sup>2</sup> foram apresentados por Cadier et al. (1983), e por Molinier (1985) para as parcelas de 1 m<sup>2</sup> sob chuva simulada.

Os dados de pluviometria e pluviografia foram obtidos através de um conjunto de pluviômetros e pluviógrafos instalados na bacia experimental. Além destes, uma estação climatológica instalada na bacia fornecia os dados complementares, tais como, a evaporação no tanque classe A, horas de insolação, temperatura - máxima e mínima - e umidade do ar.

## Controle das condições físicas na bacia

Para uma avaliação comparativa dos processos mediados, foi necessário manter as condições físicas das parcelas e microbacias uniformes durante o período chuvoso, quando os dados estavam sendo coletados. Este controle foi exercido rigorosamente nas parcelas e microbacias onde a vegetação não era caatinga. Nas parcelas e microbacias desmatadas, a vegetação superficial era removida freqüentemente. Na parcela 8 - tipo padrão da Parcela Wischmeier - o solo era arado periodicamente e nas parcelas com vegetação rasteira e cobertura morta, a vegetação era roçada e deixada na parcela. Além destes procedimentos de manutenção das parcelas e microbacias, um registro de dados sobre as condições da vegetação e da superfície do solo foi mantido continuamente.

## ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Um total de 284 eventos de escoamento ocorreu e tais eventos foram monitorados entre 1982-91 e 1996-97. Nessa região, a maior parte dos eventos de precipitação tem duração menor que uma hora e vários dias consecutivos com precipitação contínua são bastante raros. Em virtude da ordem de grandeza das áreas estudadas, não ocorre armazenamento subterrâneo significativo que gere escoamento de base prolongado, reduzindo o tempo de concentração das microbacias e a duração do escoamento. Por isto, nas anális-

ses deste artigo haverá sempre a referência a “eventos”, significando precipitação seguida de escoamento superficial e produção de sedimentos. Precipitações que não geraram escoamento em qualquer das áreas monitoradas não foram registradas como “eventos”. A Figura 1 apresenta o hietograma e hidrograma de um evento típico em uma das microbacias.

A Figura 2 mostra, como ilustração, a distribuição da lâmina escoada e produção de sedimentos registrados na microbacia 4, nesse período. Apesar do fato do número total de eventos ser significativo, grande parte deles corresponde a precipitações pequenas, com escoamento e erosão próximos a zero. Assim, para obter resultados representativos, ainda seria necessário coletar mais dados, de modo que a faixa de variação do escoamento superficial e da erosão fosse uniformemente coberta. Entretanto, os dados coletados permitem uma avaliação qualitativa e comparativa, e fornecem uma base para testar ou desenvolver modelos de previsão de escoamento superficial e erosão do solo (Gomes et al., 1987).

### O papel da cobertura vegetal e da declividade do terreno

As influências da caatinga nativa e da vegetação rasteira na produção do escoamento superficial e na prevenção da erosão podem ser avaliadas comparando os dados das microbacias desmatadas com os dados das microbacias com vegetação natural não perturbada. Nas microbacias desmatadas, com exceção das chuvas de intensidade muito baixa, sempre ocorria o escoamento superficial, enquanto que nas microbacias com vegetação, eventos com precipitações de até 30 mm não geravam escoamento, conforme as Figuras 3 e 4.

O retardamento do fluxo e o aumento da infiltração no solo, pela existência de vegetação, proporcionam um excelente mecanismo de proteção ao solo raso contra a erosão. Até os eventos de maiores precipitações não produziram erosão nas microbacias com caatinga. A mesma situação foi verificada com as parcelas de 100 m<sup>2</sup>.

A parcela 5, com uma declividade de 9,5%, não produziu erosão significativa em qualquer evento registrado. Esta parcela foi mantida com a caatinga nativa e, como no caso das microbacias, produziu o menor escoamento superficial entre todas as parcelas. O efeito significativo da proteção da superfície pela vegetação nativa pôde ser observado até mesmo com a caatinga regenerada, conforme as observações na parcela 9, em que havia um pousio de 6 anos até 1986, depois de ter sido desmatada para plantio. O escoamento e a erosão nesta parcela ficaram próximos aos da parcela 5. Este é um resultado importante do ponto de vista da recuperação ambiental e da prevenção do processo de desertificação, evidenciando o poder restaurador dos ecossistemas naturais pós-degradação.

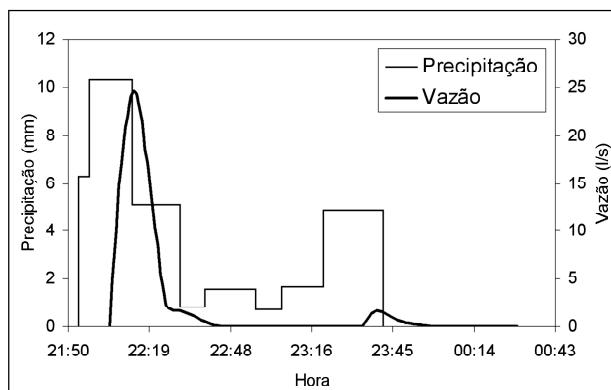


Figura 1. Hidrograma e hietograma para o evento de 23/04/1982.

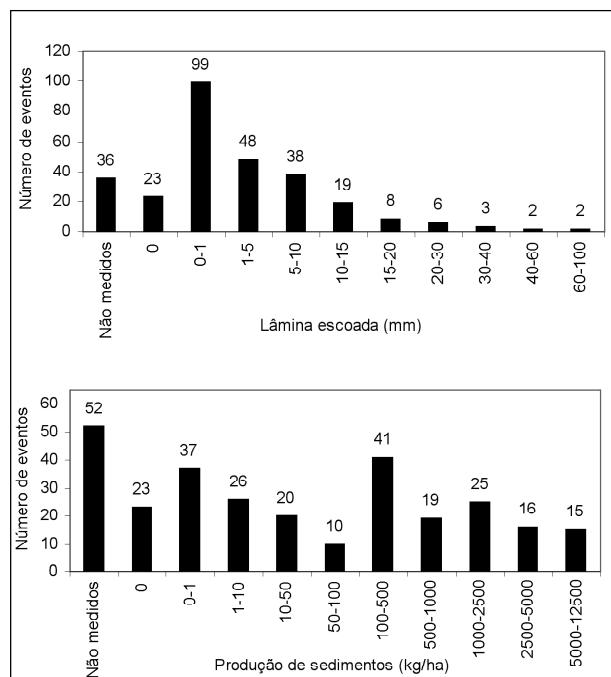


Figura 2. Distribuição da ocorrência de eventos por magnitude de lâmina escoada e produção de sedimentos na microbacia 4 (desmatada).

Nas microbacias desmatadas, a variação do escoamento superficial com a precipitação foi bastante dispersa, mas quando a influência da saturação do solo pelas chuvas antecedentes é levada em conta através de um índice de precipitação antecedente - IH, a variação do escoamento com a precipitação se torna mais consistente. Este fato pode ser verificado na Figura 4, em que o índice IH utilizado foi calculado como:  $IH_i = K(IH_{i-1} + P_{i-1})$ , onde o subscrito representa o dia  $i$  ou o anterior ( $i - 1$ ),  $P$  é a precipitação em mm, e  $K$  é um redutor, cujo valor utilizado foi de 0,95. O índice IH foi útil também na análise da erosão do solo. As taxas de erosão foram invariavelmente associadas com chuvas de alto índice de erosividade (o produto da energia cinética da chuva e a maior intensidade em 30 minutos daquele evento) e

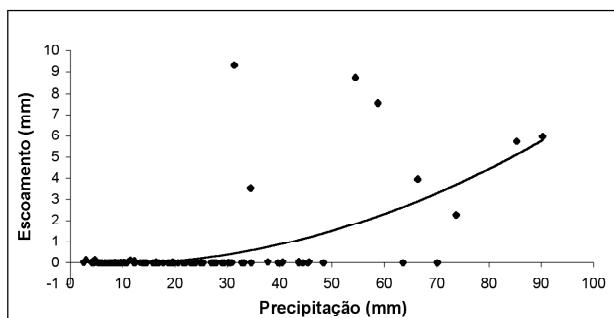


Figura 3. Precipitação versus escoamento nos eventos da microbacia 1 (caatinga).

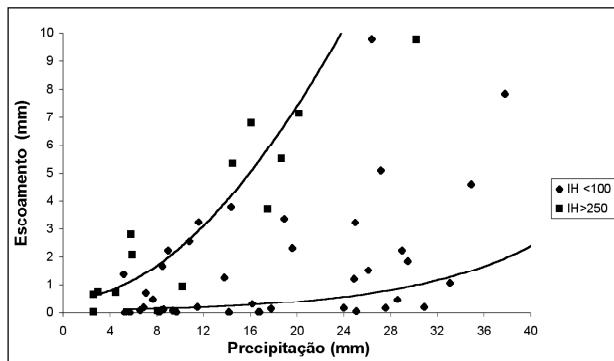


Figura 4. Precipitação versus escoamento nos eventos da microbacia 3 (desmatada), tendo IH como parâmetro.

de altos índices de precipitação antecedente. O efeito notável da umidade antecedente foi evidenciado em vários casos em que, mesmo com altos índices de erosividade de chuva, a erosão foi pequena devida ao baixo valor do índice de umidade antecedente (Figura 5). A erosividade da chuva ( $EI_{30}$ ) é definida como o produto da energia cinética das gotas de chuva pela máxima intensidade de precipitação observada em um intervalo de 30 minutos (Wischmeier e Smith, 1958).

Nas parcelas de 100 m<sup>2</sup>, a influência da declividade, da cobertura vegetal e da prática de cultura sobre o escoamento e erosão pôde ser verificada. A declividade não parece ter uma grande influência sobre o volume total do escoamento gerado. Entretanto, a influência da declividade sobre a erosão é apreciável (Srinivasan et al., 1999). Uma comparação da lâmina escoada e a erosão produzida, entre as duas parcelas desmatadas com declividades de 3,8% e 7%, mostrou que a dispersão de dados da lâmina escoada é simétrica em torno da linha de igualdade (Figura 6), enquanto que a dispersão de dados de erosão ficou concentrada num lado da linha de igualdade, indicando que a maior declividade provoca a maior erosão (Figura 7).

Como exemplo, em um evento de 34,5 mm de chuva, ocorrido em 25 de março de 1989, o escoamento registrado nas quatro microbacias foi: 0,008, 0,014, 14,85 e 15,54 mm, respectivamente. A produção de sedimentos correspondente foi: 0,186, 0,334, 7438,0 e 7785,2 kg/ha.

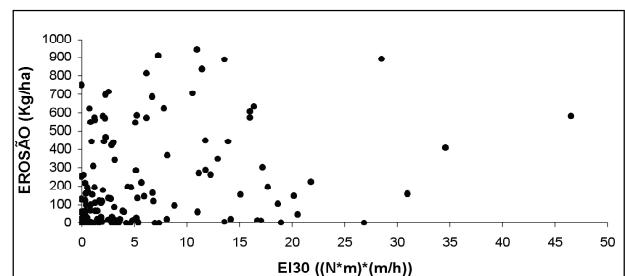


Figura 5. Erosividade da chuva ( $EI_{30}$ ) versus erosão na microbacia 3 (desmatada).

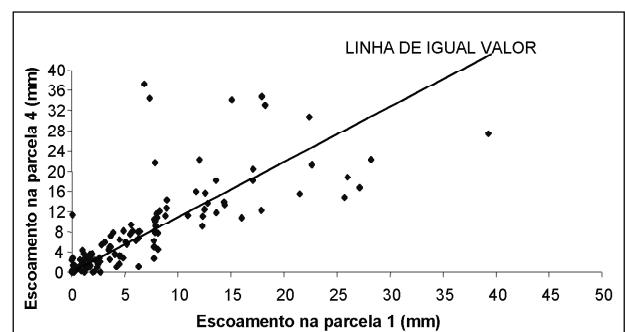


Figura 6. Escoamento na parcela 1 (decl. 3,8%) versus escoamento na parcela 4 (decl. 7%), ambas desmatadas.

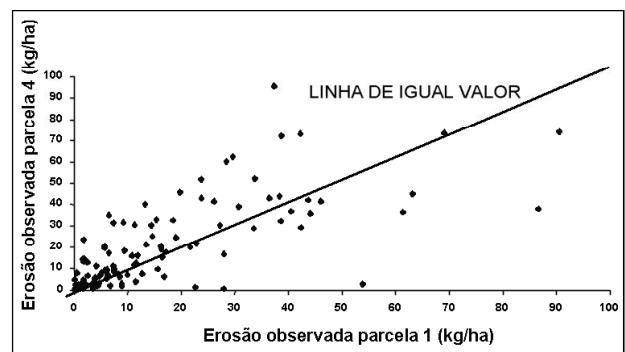


Figura 7. Erosão na parcela 1 (decl. 3,8%) versus erosão na parcela 4 (decl. 7%), ambas desmatadas.

A influência da vegetação rasteira com cobertura morta é mínima em termos de escoamento. Apenas para chuvas bem menores a cobertura morta reduziu o escoamento total em relação ao escoamento na parcela desmatada. Para chuvas grandes, as lâminas escoadas foram praticamente as mesmas. Em termos de erosão, porém, notou-se uma grande diferença. A erosão observada em cada parcela com cobertura morta foi quase zero, até mesmo quando ocorreram chuvas intensas, enquanto que nas parcelas desmatadas a erosão sempre ocorreu, desde que tenha existido escoamento superficial (Gomes et al., 1987; Srinivasan et al., 1988).

A prática de manejo da cultura de palma também se mostrou bastante influente sobre o escoamento e a erosão. O plantio morro abaixo sempre produziu maior escoamento e maior erosão quando comparado com o plantio em

linhas de contorno (curvas de nível). Notou-se que o aumento da erosão na parcela com o plantio morro abaixo foi bem maior do que o aumento do escoamento (lâmina total), em comparação com o plantio em contorno (Gomes et al., 1987).

### Efeitos de escala

A diferenciação do comportamento hidrológico com o tamanho da superfície da bacia é um dos objetivos importantes do estudo na Bacia Experimental de Sumé. De fato, este efeito apresenta-se claramente, sendo o escoamento e a produção de sedimentos por unidade de área sempre maiores no caso das menores parcelas em relação às parcelas maiores e às microbacias de mesmas características.

Molinier et al. (1987) realizaram uma primeira avaliação deste efeito, procurando uma relação entre a lâmina escoada nas diversas escalas L, a altura da chuva do evento P e o índice de precipitação antecedente IH, anteriormente definido:

$$L = aP + b \ln(IH) + cP \ln(IH) + d \quad (1)$$

Os resultados (Tabela 3) mostraram que não é possível diferenciar, no que concerne ao escoamento, três das parcelas de 1 m<sup>2</sup> (E1, E2, EB), cujos coeficientes são idênticos. Apesar de ter o mesmo tipo de solo (bruno não cálcico várzea), a parcela E3 escoa um pouco mais, e a parcela EE, sob vertissolo, ainda mais. Pode-se verificar a influência do horizonte várzea sobre a infiltração e o escoamento. As parcelas onde a camada várzea é menor escoam menos (E1, E2, EB) e o escoamento aumenta com a espessura dessa camada (E3) até um máximo nos vertisolos (EE).

O solo das parcelas de 1 m<sup>2</sup> acima referidas estava num tratamento particular, como o solo das microbacias 3 (MB3) e 4 (MB4) e das parcelas de 100 m<sup>2</sup> 1 (W1) e 4 (W4). Os resultados evidenciam o comportamento similar das parcelas W1 e W4 e destacam a diferença entre as duas microbacias, MB4 sendo maior do que MB3. Para a escala de superfície da bacia de Umburana (BU), de 10,7 km<sup>2</sup>, que tem solos semelhantes às outras unidades experimentais, as relações entre a pluviometria e a lâmina escoada correspondente a um índice de precipitação antecedente não são mais lineares, exceto, talvez, com chuvas fortes, quando os solos da bacia estão saturados.

Em geral, pode-se concluir que o efeito da heterogeneidade dos solos devido ao crescimento da superfície diminui quando a altura da chuva aumenta e os solos se saturam. É o caso, por exemplo, das zonas aluviais das bacias que armazenam uma grande parte da água de escoamento com chuvas pequenas, mas, que se tornam mais impermeáveis com fortes chuvas.

**Tabela 3. Coeficientes da Equação (1) para as várias escalas e unidades experimentais.**

	a	b	c	d
E1-E2-EB	-0,272	-0,662	0,201	0,87
E3	0,308	0,786	0,103	-5,91
EE	0,351	1,315	0,105	-8,96
W1-W2	-0,336	-0,649	0,196	0,97
MB4	-0,440	0,153	0,187	-2,97
MB3	-0,430	0,166	0,170	-2,49
BU	-1,59	-10,04	0,416	38,2

### Síntese da análise

Os dados coletados na Bacia Experimental de Sumé e a análise destes levam a concluir que os processos de geração do escoamento superficial e da produção de sedimentos pela erosão são bastante complexos. Métodos simples de correlação entre parâmetros óbvios não fornecem resultados satisfatórios, apesar das indicações claras das tendências e influências qualitativas. Portanto, uma compreensão dos processos envolvidos na geração do escoamento superficial e do fluxo dos sedimentos erodidos requer técnicas mais sofisticadas de análise. Os modelos hidrológicos e sedimentológicos seriam de grande valia nesta direção e por isso procurou-se identificar os modelos que pudessem fornecer resultados satisfatórios com os dados coletados e também que pudessem servir como ferramentas aplicáveis regionalmente (O'Connell e Todini, 1996).

## MODELAGEM DOS PROCESSOS

Modelos matemáticos são ferramentas muito importantes e úteis para previsão ou simulação nos processos hidrológicos e sedimentológicos. Existem vários tipos de modelos, com diferenças importantes na sua formulação e estruturação. Portanto, a adequação de um modelo para uma certa região ou um conjunto de dados depende da qualidade dos resultados obtidos. Consequentemente, a escolha de um modelo depende de um processo de calibração e validação do mesmo. Foram testados dois modelos para previsão do escoamento, sendo um empírico e o outro conceitual. Para simular o conjunto de escoamento superficial e produção de sedimentos foi utilizado um modelo hidrodinâmico distribuído, que simula o hidrograma e sedigrama na saída da bacia ou unidade experimental.

### Modelo SUDENE/ORSTOM

As análises anteriores sugerem a necessidade de um índice de precipitação antecedente do solo como parâmetro para relacionar o escoamento com a precipitação. Um mo-

do empírico simples com este princípio foi desenvolvido pelo programa de cooperação SUDENE/ORSTOM nos seus estudos sobre as bacias representativas do Nordeste (Cadier, 1992; Doherty et al., 1994). O chamado modelo SUDENE/ORSTOM calcula a lâmina escoada em intervalos diários. A geração do escoamento superficial direto é obtida pelo ajuste de três hipérboles, que relacionam a lâmina escoada com a precipitação, tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro. A Figura 8 (Doherty et al., 1994) mostra os parâmetros que definem essas hipérboles: o valor do índice IH correspondente à curva; o valor da precipitação na origem da curva -  $X_0$  - ou seja, altura da chuva para a qual a lâmina escoada é nula; a declividade da tangente ao trecho final da hipérbole - P (coeficiente de escoamento para as precipitações maiores); o valor da precipitação no ponto em que o prolongamento desta tangente corta o eixo horizontal -  $X_1$ ; e o valor da ordenada da curva neste ponto -  $Y_1$ . Além destes, são estabelecidos dois valores limites do índice IH,  $IH_{\min}$  e  $IH_{\max}$ . No caso em que o IH de um evento estiver além destes limites, o cálculo da lâmina correspondente é realizado com a curva do valor limite. A partir das três curvas são determinadas outras curvas não representadas, através da interpolação linear entre os parâmetros das duas curvas mais próximas.

O modelo foi calibrado com dados das quatro microbacias, com ajuste satisfatório. As hipérboles ajustadas permitem uma comparação imediata entre o comportamento geral das microbacias. A Figura 9 mostra a relação entre o escoamento e a precipitação das quatro microbacias para o valor 80 mm do índice de precipitação antecedente IH. Há uma clara diferenciação das bacias desmatadas em relação às protegidas com caatinga: tanto o início do escoamento se dá a partir de um maior valor de precipitação nas cobertas com vegetação, como o coeficiente de escoamento para as maiores precipitações nestas é menor que naquelas. A diferença é menor no comportamento entre as microbacias de cada tipo. Para as desmatadas, há apenas uma pequena diferença consistente no valor da lâmina escoada produzida para um mesmo evento de precipitação. A microbacia 3 produz um pouco mais do que a microbacia 4, mantendo-se o mesmo valor do coeficiente de escoamento para as precipitações maiores. Para as microbacias cobertas com vegetação, há diferença também no valor deste coeficiente, demonstrando a variabilidade espacial.

As diferenças de comportamento entre as microbacias desmatadas e as cobertas com caatinga estão muito evidentes nos valores dos parâmetros calibrados. Os valores limites de IH e das curvas são maiores e, acumulando o efeito de redução do escoamento, as curvas são bastante deslocadas para a direita, nas microbacias com caatinga. Uma característica interessante da forma das curvas destas áreas é seu achatamento, refletido pelos valores altos de  $X_0$  e principalmente  $X_1$ , em relação às curvas das microbacias desmatadas. Isto destaca o papel da vegetação nativa sobre o escoamen-

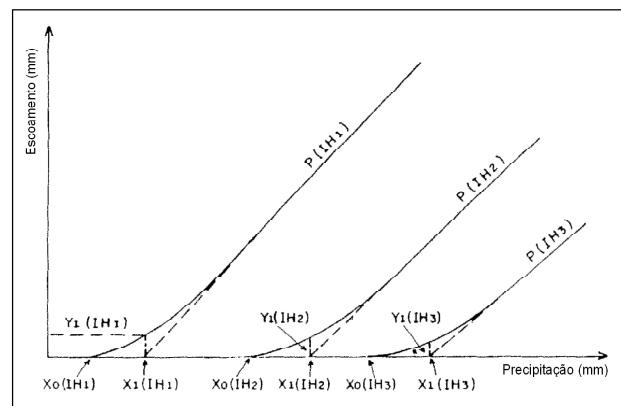


Figura 8. Parâmetros do modelo SUDENE/ORSTOM.

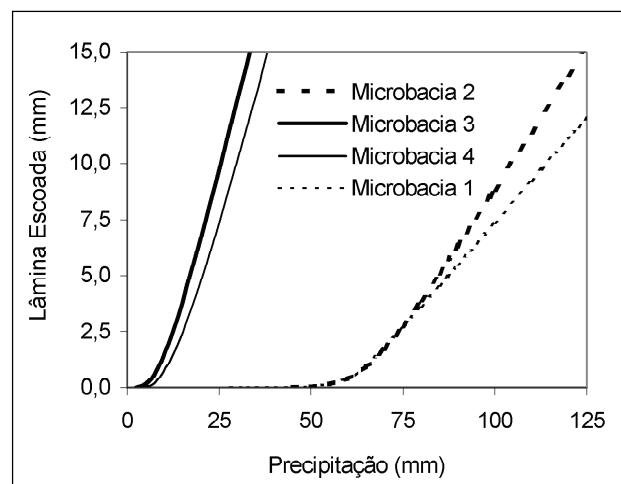


Figura 9. Ajuste do modelo SUDENE/ORSTOM às microbacias da Bacia Experimental de Sumé (IH = 80 mm).

to para a maioria das chuvas ou, inversamente, o efeito enorme do desmatamento no aumento do escoamento.

## Modelo MODIBI

Apesar da contribuição que o modelo SUDENE/ORSTOM forneceu para a compreensão e representação do processo de geração do escoamento nas microbacias de Sumé, ele não permite a modelagem mais detalhada dos processos de infiltração e de fluxos subsuperficiais, de natureza complexa, conforme demonstrado por Molinier et al. (1989). Assim, modelos que simulem os processos de infiltração e evapotranspiração podem trazer resultados mais satisfatórios.

O modelo MODIBI, utilizado com este fim, foi desenvolvido por Ibiza (1983, 1985), e é do tipo conceitual determinístico, com parâmetros globais. Um aspecto importante neste modelo é a representação da interdependência entre a evapotranspiração, a cobertura vegetal, a zona radicular e a infiltração, o que levou à sua seleção para apli-

cação nas microbacias de Sumé, onde a cobertura vegetal e as características da zona radicular são as diferenças principais entre elas.

A Figura 10 mostra o esquema numérico do MODIBI. Dois reservatórios representam a zona mais superficial do solo, onde ocorre a geração do escoamento superficial direto (reservatório de partição) e a evapotranspiração (reservatório horizonte vegetal). Parte da chuva é direcionada diretamente para a zona subsuperficial, onde parte do escoamento é gerada e parte vai para os reservatórios subterrâneos. Nas microbacias de Sumé, a (baixa) percolação profunda gerada pelo modelo refere-se a fugas para bacias de jusante, via subsuperficial ou para o embasamento cristalino fraturado. O escoamento total é obtido como a soma do escoamento superficial direto EC, escoamentos subsuperficiais RS e RS1 e os escoamentos básicos (EBAS1 e EBAS2).

Quando os parâmetros do modelo são conhecidos, os únicos dados necessários são a precipitação diária e a taxa de evapotranspiração potencial. Na fase de calibragem, os escoamentos observados também são necessários para obter a função objetivo a ser minimizada.

O modelo na sua forma completa necessita de 18 parâmetros e coeficientes a serem especificados ou calibrados. Entretanto, muitos podem ser fixados a priori, baseado na experiência e nas recomendações do próprio Ibiza (1988). Um procedimento misto de otimização automática (Rosenbrock, 1960) e de tentativas e erros foi utilizado na calibragem dos parâmetros (Srinivasan e Galvão, 1991).

As comparações das conclusões do estudo de Molinier et al. (1987, 1989) sobre os mecanismos que controlam o balanço hídrico na Bacia Experimental de Sumé, a partir dos resultados sob chuvas simuladas e naturais, com os resultados obtidos com o MODIBI, permitem uma quantificação mais refinada do balanço hídrico.

Considerou-se na modelagem o solo bruno não cárlico vértico como o dominante na região, (Leprun, 1981). Portanto, todas as considerações aqui apresentadas são relativas a este tipo de solo.

Sob chuva simulada, os experimentos realizados levaram à conclusão que o horizonte superior denominado "A" não se comporta apenas como simples reservatório que se enche, porém, suas relações com os horizontes adjacentes, aos quais transmite seus fluxos, são igualmente determinantes. As transferências verticais de A para a camada inferior B seriam lentas. Sob chuva suficiente, ocorreria a saturação de A, se prolongando até após a chuva e criando condições de drenagem lateral. Como a escala diária é bem maior que a duração das chuvas, esses processos de transferência lenta para B e de drenagem se dariam num mesmo intervalo de computação no MODIBI, representados pelo esvaziamento do reservatório de partição e sendo computados como a fuga ou como o escoamento RS, partitionados pelo coeficiente de escoamento rápido Q.

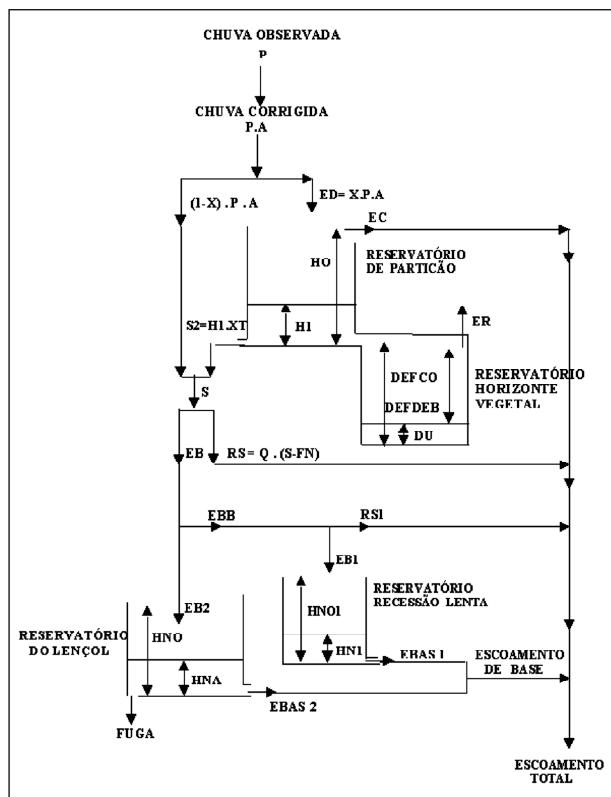


Figura 10. Fluxo Esquemático do Modelo MODIBI.

O horizonte A possui uma espessura de cerca de 20 cm, é poroso e permeável. Este horizonte tem uma baixa capacidade de estocagem de água, mas é o condutor do sistema. Para as microbacias desmatadas, isto se traduz no valor alto do parâmetro X e baixo valor de DEF CO, ou seja, a transferência para os horizontes inferiores e a drenagem subsuperficial ocorre principalmente através do horizonte A, representado pelos reservatórios HO e DEF CO (a transferência seria representada pela descarga de HO, pois o parâmetro XT é igual a 1), e numa menor parcela através dos caminhos preferenciais, representados pela quantidade 1 - X. Os estudos de campo mostram as vias de circulação preferenciais como fendas, raízes, pedras ou mesmo manchas de solos bruno modais ou litólicos. Mas as dimensões de DEF CO nestas microbacias apresentaram-se bem menores que nas microbacias protegidas. Esta grande diferença parece confirmar a hipótese levantada por Molinier et al. (1989) de que a infiltração no solo nu é regida por sua película superficial, que se constitui num obstáculo para a percolação, enquanto que no solo protegido é definida pela capacidade de infiltração do perfil.

Na mesma linha de raciocínio, o parâmetro X seria esperado sensivelmente menor nas microbacias protegidas que nas desmatadas, já que as raízes constituem um caminho preferencial para a infiltração. Não se verificou tal tendência. Isto parece confirmar o papel do horizonte vegetal

como grande controlador do escoamento, principalmente nas microbacias protegidas.

O horizonte B é compactado e pouco permeável, mas retém, quando molhado, importantes quantidades de água. No modelo, considerável fração da água infiltrada é transferida para a "fuga". Parte dessa água de fuga seria a infiltrada para o horizonte B, que a acumula. Outra parte representaria fugas para áreas abaixo do ponto de medição, onde realmente constata-se afloramentos, drenadas pelo horizonte A ou pelo horizonte C, localizado abaixo da camada B. Casos de "curto-círcuito" A-C foram observados, formando-se dois lençóis: um no topo de B, e o outro na base do solo, dentro do C. A última parte da fuga, a menor, seria a drenagem vertical na base do solo, localizada e praticamente desprezível. Caso as microbacias fossem estanques, como as relatadas por Ibiza (1985), a maior parte da fuga calculada - a fuga pelo lençol subterrâneo - seria muito pequena, e a verificação do balanço hídrico seria facilitada.

O modelo só computa a evapotranspiração ao nível do reservatório horizonte vegetal. No caso de Sumé, o horizonte B pouco permeável acumula muita água que lentamente será evapotranspirada. Este termo da evapotranspiração, que não aparece no balanço hídrico fornecido pelo MODIBI, existe e está incluído no total de fugas. Ibiza (1988) admite esta inclusão na concepção do modelo.

No caso das pequenas chuvas de baixa intensidade que não geram escoamento, o parâmetro X dirige a maior parte da água precipitada para o horizonte vegetal, que não chega a transbordar e evapora no mesmo dia ou nos dias seguintes. A parte dirigida para S, representa a parte infiltrada mais profundamente pelos caminhos preferenciais. Ela é totalmente retida (por FN) e dirigida para a fuga.

Estas hipóteses são coerentes com modelo de simulação vertical proposto por Molinier et al. (1989).

Os reservatórios superficiais são importantes conceitualmente, principalmente na separação dos vários componentes do balanço calculado. Pode-se comprovar isto através dos resultados das microbacias 2 e 4, quando foram encontrados diferentes conjuntos de parâmetros "ótimos". A principal distinção conceitual entre eles é a dimensão dos reservatórios horizonte vegetal e de partição. Isto tem influência direta nos termos do balanço hídrico. A partir dos dados medidos disponíveis ainda é prematuro assegurar a precisão e confiabilidade da determinação destes termos, mas certamente eles se mostram coerentes com as hipóteses já levantadas sobre o comportamento hidrológico da bacia. A obtenção de vários conjuntos "ótimos" de parâmetros na calibragem de modelos conceituais tem sido fonte de preocupação para os pesquisadores da área, principalmente quando a intenção é a extração de resultados.

Na validação do modelo, os resultados para as microbacias com cobertura vegetal não foram satisfatórios. No caso das desmatadas, o ajuste foi bom, notando-se, como

esperado, que os parâmetros calibrados na microbacia 3 superestimam o escoamento quando aplicados para a microbacia 4, e vice-versa.

Estes resultados mostram a coerência das informações hidrológicas e do modelo matemático utilizado. Ao mesmo tempo apontam na direção do aprimoramento das ferramentas de modelagem, para aprofundar o entendimento dos sistemas hidrológicos dessa região, dentro do objetivo de utilização operacional dos resultados dos estudos das bacias representativas e experimentais.

## Modelo hidrodinâmico WESP

Os processos associados com a erosão pela chuva são bastante complexos e sujeitos a grande variabilidade espacial. O modelo precipitação-vazão-erosão físico distribuído WESP (Watershed Erosion Simulation Program), desenvolvido por Lopes (1987), para aplicação em pequenas bacias, foi utilizado para modelar os processos em Sumé. O modelo calcula a infiltração através da equação de Green e Ampt (1911):

$$f(t) = K_s \left( 1 + \frac{N_s}{F(t)} \right) \quad (2)$$

onde  $f(t)$  é a taxa de infiltração ( $m/s$ ),  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo ( $m/s$ ),  $N_s$  é o parâmetro do potencial de capilaridade na frente de molhamento ( $m$ ), e  $F(t)$  é a altura acumulada de água infiltrada ( $m$ ).

O início do escoamento superficial corresponde ao tempo em que a taxa de precipitação iguala ou supera a taxa de infiltração. Considerando uma chuva variada em tempo, a equação de Chu (1978) é utilizada para o cálculo de tempo de empoeamento. No modelo WESP, todos os processos são considerados como processo sobre um plano ou como processo num canal. Desta forma, a representação de uma bacia é composta de um conjunto de planos e canais em que a vazão líquida e a vazão sólida ocorrem sequencialmente de um elemento para outro, conforme a topografia da bacia (Figura 11).

**Fluxo no plano** - O fluxo no plano é considerado unidimensional e a equação de continuidade e a da quantidade de movimento com a simplificação da onda cinemática são utilizadas para calcular numericamente a vazão líquida ao longo do plano com a passagem do tempo.

A taxa de transporte de sedimentos é obtida pela equação de continuidade de massa, somando a erosão pelo impacto da chuva com a erosão pelo cisalhamento do fluxo e a entrada a montante do plano, reduzida da taxa de deposição ocorrida no trecho.

A taxa de erosão  $e_1$  ( $kg/m^2/s$ ) pelo impacto da chuva é dada pela relação:

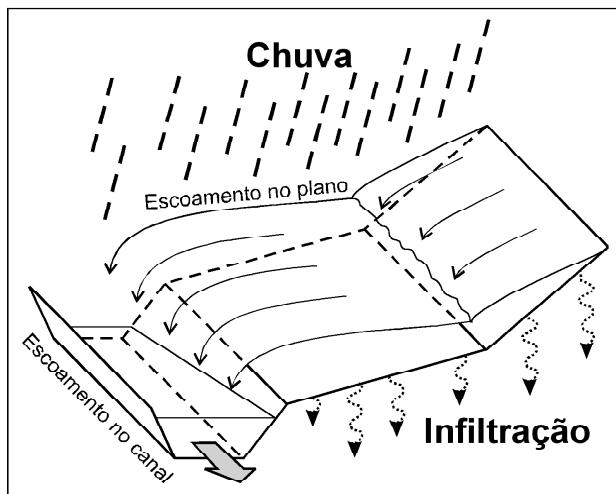


Figura 11. Concepção da bacia em planos e canais.

$$e_I = K_I I r_e \quad (3)$$

onde  $K_I$  ( $\text{kg.s/m}^4$ ) é um parâmetro de desprendimento do solo,  $I$  a intensidade da chuva ( $\text{m/s}$ ) e  $r_e$  é a relação entre o excesso de precipitação ( $\text{m}$ ) e a precipitação total ( $\text{m}$ ).

A taxa de erosão pelo cisalhamento do fluxo  $e_R$  ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ) é expressa pela relação:

$$e_R = K_R \tau^{1.5} \quad (4)$$

onde  $K_R$  ( $\text{kg m/N}^{1.5} \text{s}$ ) é um parâmetro de erodibilidade do solo, e  $\tau$  ( $\text{N/m}^2$ ), é a tensão de cisalhamento efetiva devida ao fluxo.

**Fluxo no canal** - O fluxo concentrado nos canais também é descrito pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento. Utilizando a simplificação da onda cinemática, o escoamento espacialmente variado é determinado numericamente no espaço e no tempo.

Para obter a taxa de sedimentos transportados, a equação de continuidade é utilizada, pela qual o saldo do fluxo de sedimentos deixando um trecho é a soma da entrada lateral ( $\text{kg/m/s}$ ), da entrada a montante ( $\text{kg/s}$ ) e da erosão no local ( $\text{kg/m/s}$ ), reduzida pela deposição ( $\text{kg/m/s}$ ) no trecho. O componente  $e_r$  é a taxa de erosão do material do leito ( $\text{kg/m/s}$ ), e  $d_c$  é a taxa de deposição no canal ( $\text{kg/m/s}$ ).

A taxa de erosão do material do leito  $e_r$  ( $\text{kg/m/s}$ ) é calculada pela expressão:

$$e_r = a(\tau - \tau_c)^{1.5} \quad (5)$$

onde  $a$  é o parâmetro de erodibilidade do sedimento do leito ( $\text{kg.m}^2/\text{N}^{1.5}.s$ ), e  $\tau_c$  é a tensão crítica de cisalhamento de sedimentos ( $\text{N/m}^2$ ).

## Discretização da bacia

Primeiramente, um esquema de planos e canais deve ser selecionado para representar a bacia. A forma de discretização da microbacia pode influenciar nos resultados da simulação e, portanto, diversas alternativas devem ser testadas antes de escolher a configuração que melhor representa a bacia, sem grandes distorções. Uma representação da microbacia 3, com 10 elementos (Figura 12) mostrou ser a melhor para este caso (Santos et al., 1994a, 1994c; Srinivasan e Galvão, 1993).

Os dados referentes a cada elemento podem ser vistos na Tabela 4, onde as seções transversais dos canais têm a declividade lateral de  $1/4$  (relação das dimensões verticais sobre as horizontais).

## Parâmetros do modelo WESP e sua determinação

Alguns parâmetros do modelo WESP podem ser determinados a priori, outros, como o tamanho dos sedimentos, porosidade, saturação inicial e a condutividade hidráulica de saturação, podem ser medidos no campo e o restante dos parâmetros deve ser determinado por um processo de calibração. Dessa forma, ficaram quatro parâmetros para serem determinados através de otimização. Estes parâmetros são:  $N_s$ ,  $a$ ,  $K_I$  e  $K_R$  das Equações (2), (3), (4) e (5). O parâmetro do potencial de capilaridade na frente de molhamento  $N_s$ , na Equação (2), pode ser calibrado diretamente pelo ajuste do valor do escoamento calculado com o valor observado em cada evento (Santos et al., 1998b). Devido ao fato que a saturação inicial do solo varia continuamente, o parâmetro  $N_s$ , que depende da umidade no solo, acaba tendo uma variação de um evento a outro (Srinivasan e Pereira, 1997; Santos et al., 1993, 1997; Srinivasan e Galvão, 1993, 1995).

Os outros três parâmetros estão relacionados ao processo de erosão, e para obtê-los necessita-se de um processo de otimização para minimizar as diferenças entre os valores calculados e observados da produção de sedimentos (Santos et al., 1998a; Srinivasan et al., 1993).

## Ferramentas de otimização

Existem diversos métodos de otimização para minimização e maximização de uma função. No presente caso, existiam três parâmetros de erosão ( $a$ ,  $K_R$  e  $K_I$ ) para serem calibrados conjuntamente. Os métodos conhecidos como Standardized Powell Method (Powell, 1964) ou SP e Shuffled Complex Evolution - University of Arizona ou SCE-UA (Duan et al., 1992) foram aplicados para verificar a eficácia de cada um. Este último foi modificado por Santos et al. (2000) para melhorar seu desempenho.

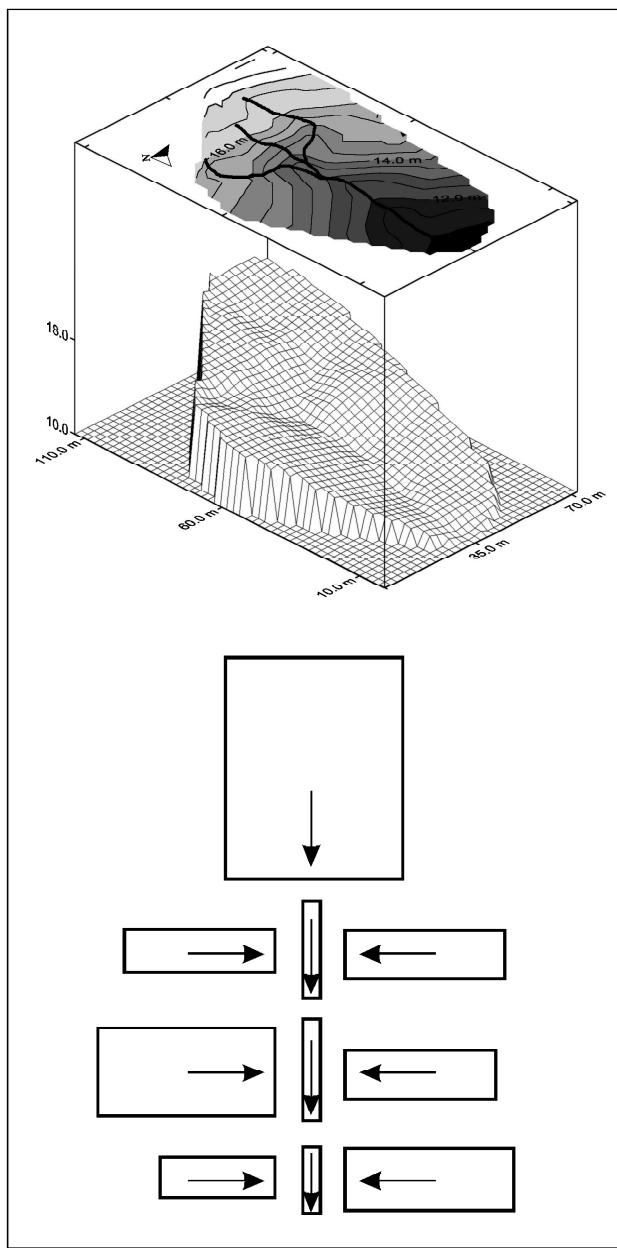


Figura 12. Discretização da microbacia 3 em 10 elementos.

**Método SP (Standardized Powell method)** - Powell (1964) propôs um novo método para encontrar valores de M parâmetros  $x_1, x_2, \dots, x_M$ , onde uma função destes parâmetros,  $J(x_1, x_2, \dots, x_M)$ , fosse um mínimo.

O método de minimização, que modifica uma variável de cada vez, encontra o mínimo de uma função quadrática em um número finito de passos. Cada iteração do procedimento começa com uma busca em M direções independentes  $d_1, d_2, \dots, d_M$ , começando pela melhor aproximação conhecida ao mínimo,  $p_0$ . Estas direções são escolhidas para serem inicialmente as direções coordenadas das variáveis. O método procura em direções conjugadas em cada iteração

Tabela 4. Dimensões dos elementos da representação da microbacia 3 em 10 elementos.

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade (m)
1	2.166,66	41,18	52,60	0,0896
2	349,12	34,87	10,02	0,0936
3	434,45	34,67	12,52	0,0998
4	-	23,04	-	0,0554
5	931,36	41,33	22,54	0,0806
6	447,00	35,67	12,52	0,0903
7	-	23,04	-	0,0466
8	278,85	27,85	10,02	0,0791
9	592,56	39,43	15,03	0,0878
10	-	16,53	-	0,0665

de modo que a nova direção escolhida seja linearmente independente da direção da procura anterior. Depois de M iterações todas as direções são mutuamente conjugadas e em consequência o mínimo exato da função quadrática é encontrado. Se a função a ser otimizada não fosse quadrática, o mínimo não seria exato e seriam necessárias outras iterações para alcançar o mínimo real.

O método foi modificado por Nagai e Kadoya (1979 e 1980), que padronizaram cada parâmetro do modelo, dividindo-os por seus valores iniciais, o que torna os cálculos mais eficientes, principalmente quando as ordens da grandeza dos parâmetros são bastante diferentes entre si.

Os parâmetros são padronizados por seus valores iniciais na forma:

$$x_1 = \frac{N_s}{N_{s0}}, x_2 = \frac{a}{a_0}, x_3 = \frac{K_R}{K_{R0}}, x_4 = \frac{K_I}{K_{I0}} \quad (6)$$

em que o sufixo 0 significa o valor inicial. Os valores iniciais destes parâmetros foram configurados com  $a = 0,0144 \text{ kg m}^2$ ,  $K_R = 2,174 \text{ kg m/N}^{1.5}$  s e  $K_I = 5,0 \times 10^8 \text{ kg s/m}^4$ .

Os valores dos parâmetros devem ser positivos, e se algum parâmetro se tornar negativo, uma função V de penalidade é adicionada à função objetivo para que a mesma se torne suficientemente grande. Santos et al. (1994b, 1995) apresentaram os detalhes do procedimento e os resultados obtidos.

### O Método SCE-UA (Algoritmo Evolutivo)

O método SCE-UA (Duan et al., 1992) pode ser considerado uma ferramenta robusta para problemas típicos de otimização porque ele reúne as seguintes propriedades desejáveis: (i) convergência global na presença de regiões múltiplas de atração; (ii) capacidade de evitar ficar preso em pequenas depressões e inchaços na superfície da função objetivo; (iii) robustez; (iv) não depende da disponibilidade de uma expressão explícita que seja válida para a função

objetivo e da existência das derivadas; e (v) capacidade de lidar com alta dimensionalidade dos parâmetros. Estas propriedades ajudam muito nos problemas comumente encontrados no processo de calibração de parâmetros de modelos.

Além de incorporar as propriedades descritas acima, o método SCE-UA também é baseado na síntese de quatro conceitos: (i) combinação de abordagens determinísticas e probabilísticas; (ii) evolução sistemática, na direção da melhora global, de um complexo (comunidade) de pontos existentes no espaço dos parâmetros; (iii) evolução competitiva; e (iv) baralhamento de complexos. Os passos do método SCE-UA são (a) gerar aleatoriamente uma amostra de  $s$  pontos  $x_1, \dots, x_s$  no espaço possível  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ , onde  $n$  é o número de variáveis a serem otimizadas, calcular o valor da função  $f_i$  em cada ponto  $x_i$ , ordená-los na forma crescente do valor da função, e dividir a amostra em  $p$  complexos  $A^1, \dots, A^p$ , cada um contendo  $m$  pontos onde o 1º ponto, que tem o menor valor da função, está no 1º complexo, o 2º menor valor está no 2º complexo e assim por diante (Figura 13a); (b) evoluir cada complexo independentemente de acordo com o algoritmo CCE (competitive complex evolution) (Figura 13b); (c) baralhar os complexos (Figura 13c); e (d) checar se alguns critérios de convergência pré-especificados foram satisfeitos, caso positivo parar (Figura 13d), senão, checar a redução no número de complexos e continuar a evoluir.

O algoritmo CCE, baseado no esquema Simplex de procura de Nelder e Mead (1965), usado pelo método original SCE-UA, apresenta apenas três passos de evolução: reflexão, contração e mutação. O método simplex é baseado no cálculo inicial de  $(n + 1)$  tentativas. Assim, visualmente, o simplex é uma figura geométrica num espaço  $n$ -dimensional; i.e., um simplex definido por três diferentes condições de tentativas para duas variáveis de controle tem uma forma de um triângulo. Da mesma forma, as formas do simplex num espaço de procura de uma e três variáveis de controle são uma linha e um tetraedro, respectivamente. Por exemplo, pode observar na Figura 14, que mostra um triângulo formado pela seleção de três pontos no espaço bidimensional, já que se trata de duas variáveis de controle. Uma interpretação geométrica é difícil com mais variáveis, mas, a abordagem matemática básica exposta aqui é a mesma. Com o intuito de melhorar o processo de evolução e de fazer o algoritmo atingir a região ótima com maior rapidez e maior precisão, novos passos de evolução foram introduzidos por Santos et al. (2000). Estas modificações foram incluídas no algoritmo CCE. Então o novo algoritmo pode ser chamado de modified competitive complex evolution (MCCE), e MSCE-UA seria o melhor termo para denominar o SCE-UA que usa o MCCE. Os detalhes deste algoritmo podem ser encontrados em Santos et al. (2000).

**Seleção dos parâmetros do algoritmo** - O algoritmo contém muitos componentes probabilísticos e determinísticos que são controlados por alguns parâmetros do próprio

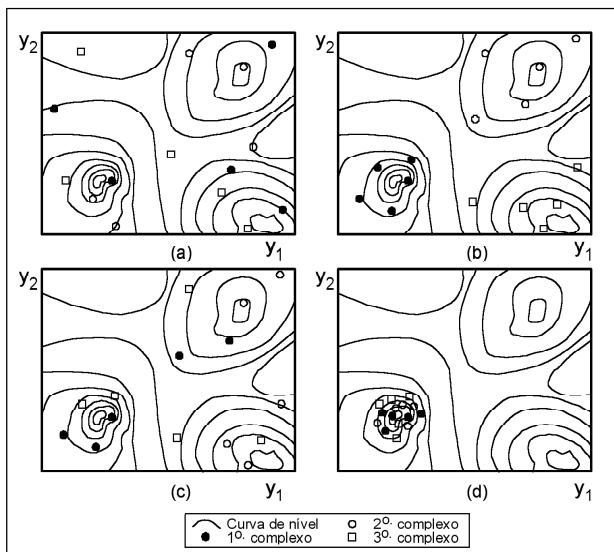


Figura 13. Ilustração do método SCE-UA (shuffled complex evolution).

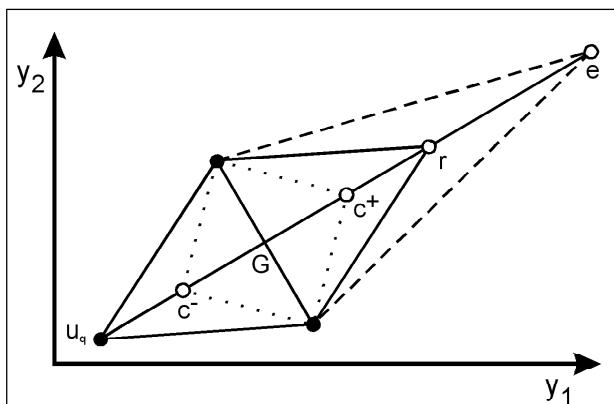


Figura 14. Exemplo dos passos de evolução que podem ser dados por cada complexo num espaço com duas variáveis de controle ( $y_1$  e  $y_2$ ).

algoritmo. Para que o método tenha um desempenho ótimo, estes parâmetros devem ser escolhidos cuidadosamente. O primeiro é o parâmetro  $m$ , o número de pontos em um complexo ( $m > 2$ ), o qual deve ser nem tão pequeno, para evitar que a pesquisa proceda como um simplex ordinário, nem muito grande, para evitar um uso excessivo do tempo de processamento do computador sem uma certeza no ganho de eficácia. Então o valor  $m = 2n + 1$  foi selecionado. Para o número de pontos num subcomplexo  $q$  ( $2 < q < m$ ), o valor de  $n + 1$  foi selecionado porque ele torna o subcomplexo um simplex; isto define uma aproximação de primeira ordem (hiperplano) para a superfície da função objetivo e dá uma estimativa sensata da direção do melhoramento local. O número de filhos consecutivos  $\alpha$  ( $\alpha > 1$ ), gerados por cada subcomplexo foi configurado como um para evitar que a procura se torne extremamente propensa em favor de uma procura local no espaço. O nú-

mero de evoluções de cada complexo  $\beta$  ( $\beta > 0$ ) foi fixado em  $2n + 1$  para evitar que os complexos fossem freqüentemente baralhados se fixado em um valor baixo ou para evitar que eles reduzissem a um pequeno grupo se um valor alto fosse usado. O número de complexos  $p$  foi fixado em dois, baseado na natureza do problema, e o número mínimo de complexos requerido na população  $p_{min}$  ( $1 < p_{min} < p$ ) foi fixado em  $p$  porque este valor forneceu o melhor desempenho em termo de eficácia e eficiência em estudos anteriores.

Já que os três parâmetros de erosão foram calibrados, o número de variáveis a serem otimizadas  $n$  foi tomado igual a 3 e o número de pontos num complexo  $m$  igual a 7 porque  $m = 2n + 1$ . O número de pontos num subcomplexo  $q$  foi igual a  $n + 1$ , assim  $q = 4$ . O número de filhos consecutivos gerados por cada subcomplexo  $\alpha$  foi fixado em 1. O número de passos de evolução  $\beta$  dados por cada complexo foi igual a 7 porque  $\beta = 2n + 1$ . O número de complexos  $p$  foi fixado em 2, assim a população se tornou igual a 14, e finalmente o número mínimo de complexos requeridos na população  $p_{min}$  foi fixado em  $p$ .

Os valores iniciais destes parâmetros foram configurados como  $a = 0,0144 \text{ kg m}^2$ ,  $K_R = 2,174 \text{ kg m/N}^{1.5} \text{ s}$  e  $K_I = 5,0 \times 10^8 \text{ kg s/m}^4$ , e a função objetivo  $J$  contendo apenas a componente da erosão para ser minimizada foi escolhida como:

$$J = \left| \frac{E_o - E_c}{E_o} \right| \quad (7)$$

onde  $E_o$  é a produção de sedimentos observada (kg) e  $E_c$  é a calculada (kg). A otimização para os 45 eventos forneceu uma concordância total entre os dados observados e calculados para cada evento, e as médias dos valores dos parâmetros de erosão foram utilizados para realizar novas simulações. Os resultados das simulações para as produções de sedimentos apresentaram um bom grau de aproximação entre as produções observadas e calculadas, exceto para alguns eventos (Santos et al., 2000).

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As condições hidrossedimentológicas na Bacia Experimental de Sumé, em particular, e na região semi-árida, em geral, variam bastante, o que dificulta uma simples transferência de resultados empíricos para outros locais. A utilização de um modelo que possa adequadamente representar os processos principais se torna uma necessidade para que sejam desenvolvidas técnicas que permitam transferência das informações entre diversas bacias dentro de uma região hidrológicamente homogênea. Os resultados obtidos com diversos modelos apresentados neste trabalho confirmam este aspecto.

Neste contexto, tornam-se de suma importância os dados coletados nas bacias experimentais e a instalação de tais bacias dentro das bacias representativas da região semi-árida, para que os resultados da modelagem possam ser regionalizados. Deve-se enfatizar a coleta contínua de dados sobre longos períodos para que as mudanças naturais ou artificiais nos processos hidrossedimentológicos sejam identificadas. Os processos de erosão pelo impacto da chuva e pelo escoamento têm uma variabilidade espacial muito maior do que do processo de geração de escoamento superficial. Uma clara demonstração deste fato foi observada na Bacia Experimental de Sumé. Enquanto os resultados obtidos com os três modelos para a previsão da lâmina escoada foram não somente satisfatórios, mas também bastante próximos entre si, no caso da erosão do solo os resultados obtidos não foram tão bons. Como exemplo, podemos considerar as microbacias desmatadas 3 e 4, que são bastante próximas. Foram selecionados 24 eventos com uma produção significativa de sedimentos na microbacia 3. Utilizando os parâmetros obtidos pela calibragem do modelo WESP na microbacia 4, o escoamento e erosão foram simulados na microbacia 3. Uma comparação entre os valores calculados e observados nos dois casos é mostrada nas Figuras 15 e 16.

Enquanto os resultados de escoamento são bastante satisfatórios, os valores calculados da erosão apresentam maiores dispersões. Mesmo assim, os resultados da modelagem podem ser considerados encorajadores, pelo fato de que outros métodos, como relações empíricas ou aplicação das equações de transporte, produzem resultados ainda menos satisfatórios (Lal, 1990; Leprun, 1981). A erosão parece ser principalmente relacionada com a erosividade da chuva (Albuquerque et al., 1998; Srinivasan et al., 1988), mas as correlações não produziram bons resultados em nível de cada evento, mesmo levando em conta a variação do índice IH.

É importante lembrar que a geração de um hidrograma fiel é essencial para que o sedigrama gerado seja próximo ao real. Porém, esta condição não é suficiente para assegurar bons resultados de erosão. A produção de sedimentos no exutório da bacia depende de muitos fatores, inclusive das pequenas variações topográficas, que produzem maiores erosões ou deposições ao longo do caminho do fluxo. Um modelo do fluxo unidimensional não consegue levar em conta estes aspectos adequadamente. Portanto, é necessário que os modelos da base física como WESP evoluam para incluir todos os processos envolvidos. Da mesma forma, há necessidade de se desenvolver modelos mais robustos e menos complicados que possam ser utilizados como ferramentas regionais de previsão.

Em relação aos modelos SUDENE/ ORSTOM e MODIBI, os resultados obtidos com a geração do escoamento foram bastante satisfatórios e ainda refletiram bem

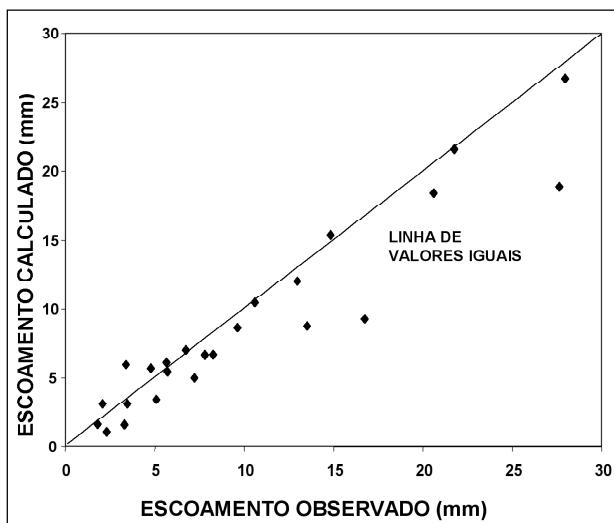


Figura 15. Comparação entre o escoamento calculado pelo modelo WESP e observado na microbacia 3.

as diferenças intrínsecas entre as unidades experimentais com condições físicas semelhantes.

Para as microbacias protegidas com caatinga, os parâmetros das hipérboles do modelo SUDENE/ORSTOM sugerem comportamentos relativos diferentes nas épocas mais secas e mais úmidas: a microbacia 1 teria uma maior resposta nos períodos mais secos e a microbacia 2 nos períodos mais úmidos.

Para as microbacias desmatadas, os parâmetros das hipérboles permanecem praticamente inalterados entre as duas, com exceção do índice de precipitação antecedente IH, que as distingue. O comportamento das duas microbacias foi semelhante, embora o escoamento na microbacia 3 tenha sido maior. As diferenças no manejo da vegetação, entre os períodos identificados, confirmou-se no resultado da modelagem em ambas as microbacias. Para o período 1984-86, quando o solo estava com vegetação, os índices IH das curvas foram maiores e as curvas foram deslocadas para a direita em relação aos anos de 1987-88, quando o solo permaneceu nu todo o tempo.

No caso do modelo MODIBI, os reservatórios conceituais de armazenamento têm um papel fundamental. Conforme discutido anteriormente, o modelo forneceu bons resultados na simulação do escoamento nas microbacias desmatadas, mas nas bacias com a caatinga nativa os resultados não foram satisfatórios. Os processos de movimento da água na zona radicular da vegetação não parecem ser bem refletidos no modelo.

O modelo WESP produziu os resultados esperados, considerando que o modelo trata o fluxo como unidimensional e apenas os processos nos planos e canais. Sem dúvida, as simplificações afetam os resultados, mas parece como um bom ponto de partida para desenvolver modelos mais sofisticados, chegando mais próximo à realidade dos processos. O modelo, apesar de ter base física, precisou de um

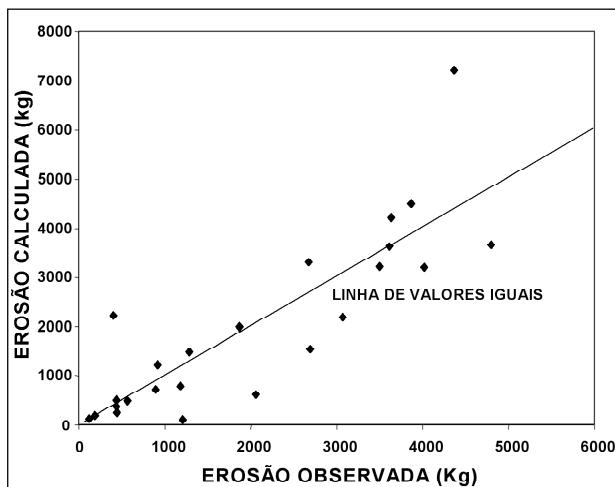


Figura 16. Comparação entre a erosão calculada pelo modelo WESP e observada na microbacia 3.

processo de calibragem ou otimização para determinar os valores dos parâmetros. As tentativas de associar os parâmetros do WESP com fatores físicos mensuráveis não foram bem sucedidas com a exceção do parâmetro  $N_s$ , com algum índice de precipitação antecedente. Uma interdependência entre os parâmetros também foi notada, o que demanda maiores investigações.

Fredman et al. (1998) compararam alguns algoritmos de otimização para identificar os parâmetros de erosão, inclusive o algoritmo genético. Eles apontam que, apesar das vantagens deste algoritmo, o mesmo nem sempre acharia o ponto ótimo. As modificações introduzidas por Santos et al. (2000) no algoritmo devem melhorar bastante este aspecto. Os testes usando funções matemáticas especiais mostraram que o novo algoritmo pôde encontrar seus ótimos globais, provando dessa forma que o mesmo poderia ser usado na otimização de modelos de base física.

## CONCLUSÕES

A experiência obtida em duas décadas com os estudos de escoamento superficial e de erosão do solo, causados pela chuva natural e simulada na região semi-árida da Paraíba, foram apresentados e discutidos neste trabalho, nos seus diversos aspectos, desde a coleta de dados de campo até a modelagem dos processos. Os resultados obtidos na Bacia Experimental de Sumé podem servir como a base para nortear as futuras pesquisas e trabalhos de campo na área de erosão hídrica no Nordeste brasileiro. Os resultados reforçam a necessidade de se ter uma base longa e confiável de dados na região, que exige a continuidade dos trabalhos atuais e a instalação de algumas novas bacias experimentais.

Técnicas de modelagem para a previsão do escoamento e da erosão parecem o caminho certo. Os diversos modelos utilizados para simular o escoamento apresentaram re-

sultados bastante satisfatórios em geral. No caso da erosão do solo, o modelo hidrodinâmico WESP, desenvolvido por Lopes (1987), produziu resultados muito bons do escoamento e satisfatórios de erosão. Para uma avaliação mais completa, mais dados que cubram todos os níveis de erosão são necessários. Algoritmos de otimização são úteis como ferramentas para a calibragem de seus parâmetros e os resultados mostraram que o método SCE-UA Modificado pode ser considerado como uma ferramenta promissora para calibrar os parâmetros do modelo WESP.

## AGRADECIMENTOS

Os estudos da Bacia Experimental de Sumé foram financiados por vários órgãos nas suas diversas fases de desenvolvimento, sendo os principais: SUDENE e ORSTOM (França), CNPq/BID, FAPESQ-PB, CNPq e o apoio da CAPES e MONBUSHO (Japão). Vários pesquisadores, técnicos, estudantes e bolsistas de iniciação científica participaram nos trabalhos de campo e no processamento de dados. Em especial, destaca-se a contribuição da equipe de hidrometria da SUDENE, e de Eric Cadier e Michel Molinier (ORSTOM). Vicente Lopes da Universidade de Arizona, além de fornecer o programa WESP, tomou grande interesse na pesquisa e Q. Duan da NOAA dos Estados Unidos forneceu o algoritmo original utilizado no trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; CATANEO, A. & SRINIVASAN, V. S. (1998). Parâmetros de erosividade da chuva e da enxurrada correlacionados com as perdas de solo de um solo bruno não-cálcico várzea em Sumé (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 22, n. 4, p. 743-750.
- CADIER, E. (1992). *Hidrologia das pequenas bacias do nordeste semi-árido; transposição hidrológica*. Recife: SUDENE.
- CADIER, E. e FREITAS, B. J. (1982). *Bacia Representativa de Sumé, primeira estimativa dos recursos de água*. Recife: SUDENE.
- CADIER, E.; FREITAS, B. J. e LEPRUN, J. C. (1983). *Bacia experimental de Sumé, PB; instalação e primeiros resultados*. Recife: SUDENE.
- CHU, S. T. (1978). Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research*, vol. 14, n. 3, p. 461-466.
- DOHERTY, F. R.; ARAÚJO FILHO, P. F. e CADIER, E. (1994). *Modelização hidrológica das pequenas bacias do nordeste brasileiro*. Recife: SUDENE.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S. & GUPTA, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, vol. 28, n. 4, p. 1015-1031.
- FREDMAN, V. L.; LOPEZ, V. L. & HERNANDEZ, M. (1998). Parameter identifiability for catchment scale erosion modeling: a comparison of optimization algorithms. *Journal of Hydrology*, vol. 207, p. 83-97.
- GOMES, H. P.; SRINIVASAN, V. S.; CADIER, E. e GALVÃO, C. O. (1987). Um estudo experimental do escoamento superficial e erosão na região semi-árida paraibana. In: *Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*. Salvador: ABRH, vol. 3, p. 322-337.
- GREEN, W. H. & AMPT, G. A. (1911). Studies on soil physics 1. The flow of air and water through soils. *Journal Agr. Sci.*, vol. 4, n. 1, p. 1-24.
- IBIZA, D. (1983). Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydraulique: variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. *Cahiers ORSTOM - Serie Hydrologie*, vol. XX, n. 1, p. 3-22.
- IBIZA, D. (1985). Etude de l'infiltration au pas de temps journalier, sur les petits bassins versants: refus à l'infiltration par saturation des réserves souterraines. *Cahiers ORSTOM - Serie Hydrologie*, vol. XXI, n. 3, p. 17-50.
- IBIZA, D. (1988). Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJO (MODIBI). Montpellier: ORSTOM.
- LAL, R. (1990). *Soil erosion in the tropics - principles and management*. London: McGraw-Hill.
- LEPRUN, J. C. (1981). *A erosão, a conservação e o manejo do solo no nordeste brasileiro; balanço, diagnóstico e novas linhas de pesquisa*. Recife: SUDENE/ORSTOM.
- LEPRUN, J. C. (1983). Relatório do fim do convênio de conservação e manejo de solo no nordeste brasileiro. Recife: SUDENE/ORSTOM.
- LOPES, V. L. (1987). *A numerical model of watershed erosion and sediment yield*. Tucson: University of Arizona. Ph.D. Thesis.
- MOLINIER, M. (1985). Um minissimulador de chuva ou infiltração de aspersão. In: *Anais VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, São Paulo: ABRH, p. 405-418.
- MOLINIER, M.; AUDRY, P. e LEPRUN, J. C. (1989). Modelagem do escoamento superficial e da infiltração de um solo bruno do nordeste semi-árido. In: *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*. Foz do Iguaçu: ABRH, vol. 1, p. 432-443.
- MOLINIER, M.; GALVÃO, C. O. e GOMES, H. P. (1987). Determinação do escoamento de uma bacia hidrográfica através das técnicas de simulação de chuvas. In: *Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos hídricos*. Salvador: ABRH, vol. 2, p. 530-544.
- NAGAI, A. & KADOYA, M. (1979). Numerical experiments on optimum identification of series tanks model for runoff analysis. *DPRI Annuals Kyoto Univ.*, vol. 22, n. B-2, p. 209-224 (em japonês).
- NAGAI, A. & KADOYA, M. (1980). Optimization techniques for parameter identification of runoff models. *DPRI Annuals Kyoto Univ.*, vol. 23, n. B-2, p. 239-247 (em japonês).
- NELDER, J. A. & MEAD, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Comput. J.*, vol. 7, n. 4, p. 308-313.
- O'CONNELL, P. E. & TODINI, E. (1996). Modeling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview.

- Journal of Hydrology*, vol. 175, p. 3-16.
- POWELL, M. J. D. (1964). An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, vol. 7, p. 155-162.
- ROSEN BROCK, H. H. (1960). An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, vol. 3, n. 3, p. 175-184.
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. & SRINIVASAN, V. S. (1993). Sediment yield observed in a small experimental basin and its simulation by runoff-erosion modeling. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, vol. 37, p. 717-722.
- SANTOS, C. A. G.; SRINIVASAN, V. S.; SUZUKI, K. e WATANABE, M. (1994a). Influência da divisão da bacia na simulação da produção de sedimentos e uma técnica para otimização. In: *Anais II Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste*, Fortaleza: ABRH, p. 202-211.
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. & SRINIVASAN, V. S. (1994b). Optimization of coefficients in runoff-erosion modeling by Standardized Powell Method. *Journal of Hydro-Science and Hydraulic Engineering*, vol. 12, n. 1, p. 67-78.
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. & SRINIVASAN, V. S. (1994c). Scale effects of basin elements on coefficients in runoff-erosion modeling. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, vol. 38, p. 83-88.
- SANTOS, C. A. G.; SRINIVASAN, V. S.; SUZUKI, K. e WATANABE, M. (1995). Otimização dos parâmetros de um modelo hidrodinâmico de erosão pelo Método de Powell. In: *Anais XI Simp. Bras. de Rec. Hid. e II Simp. de Hidráulica e Rec. Hídricos dos Países de Líng. Ofic. Port. Recife: ABRH*, vol. 4, p. 167-172.
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; AZUMA, M. & SRINIVASAN, V. S. (1997). Influence of initial infiltration on runoff hydrographs from a test field in a semiarid region of northeastern Brazil. *Annual Journal of Hydraulic Engineering JSCE*, vol. 41, p. 203-208.
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. & SRINIVASAN, V. S. (1998a). Sediment yield due to heavy rainfall from a test field in Brazil and its analysis by a runoff-erosion model. *Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering*, vol. 42, n. 586/II, p. 117-126.
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. & SRINIVASAN, V. S. (1998b). Influence of the moisture-tension parameter on sedigraphs and hydrographs from a semiarid region in Brazil. In: Summer, W.; Klughoffer, E.; Zhang, W. (ed.) *Modeling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes*. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, vol. 249, p. 231-240.
- SANTOS, C. A. G., SUZUKI, K. & WATANABE, M. (2000). Improvement in a genetic algorithm for optimization of runoff-erosion models. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, vol. 44, p. 705-710.
- SRINIVASAN, V. S. & GALVÃO, C. O. (1991). Event based rainfall runoff modeling for micro-basins in the semi-arid region of Brazil. In: Ouazar, D.; Bensari, D.; Brebbia, C. A. (ed.) *Computer Methods in Water Resources II*. Southampton: Computer Mechanics Publications, p. 199-210.
- SRINIVASAN, V. S. & GALVÃO, C. O. (1993). Erosion and runoff monitoring and modeling in a semi-arid region of Brazil. In: Mizuyama, T.; Hadley, R. F. (ed.) *Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control*. Wallingford: Int. Assoc. for Hydrological Sciences, vol. 217, p. 167-173.
- SRINIVASAN, V. S. & GALVÃO, C. O. (1995). Evaluation of runoff and erosion loss in micro-basins utilizing the hydrodynamic model Wesp. *Advances in Engineering Software*, vol. 22, n. 2, p. 79-86.
- SRINIVASAN, V. S.; GOMES, H. P.; LEPRUN, J. C. & SILVA, I. J. (1988). Erosion studies in Sumé, a semiarid region in the northeast of Brazil. In: Bordas, M. P. & Walling, D. E. (ed.) *Sediment Budgets*. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, vol. 174, p. 307-315.
- SRINIVASAN, V. S. e PEREIRA, J. A. (1997). Modelagem do escoamento superficial e da erosão em microbacias na Bacia Experimental de Sumé - PB. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Vitória: ABRH, vol. 4, p. 377-385.
- SRINIVASAN, V. S.; PEREIRA, J. A. & GALVÃO, C. O. (1999). Studies of erosion and soil loss in the semiarid northeastern region of Brazil. In: Heathwaite, L. (ed.) *Impact of Land Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources*. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, vol. 257, p. 95-102.
- SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K. & WATANABE, M. (1993). Sediment yield observed in a small experimental basin and its simulation by runoff-erosion modeling. *Annual Journal of hydraulic Engineering, JSCE*, vol. 37, p. 717-722.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. AGU*, vol. §39, p. 285-291.

***Soil Erosion by Water in the Brazilian Semi-arid Region: The Experience in the Sumé Experimental Basin***

**ABSTRACT**

*This paper aims to present the experience gained in almost two decades of studies on the various aspects of runoff and soil erosion by natural rainfall in the semi-arid region of Paraíba State. The studies were carried out in the Sumé Experimental Basin, which was installed in one of the sub-basins of Sumé Representative Basin. The implementation which began in 1981, performed by the Superintendency for the Development of the Northeast (SUDENE) with the support of ORSTOM (French Office of Scientific Research and Technology for Overseas Development) and CNPq (Brazilian Research Council) had nine 100 m<sup>2</sup> erosion plots with different vegetation covers and slopes, and four micro-basins with an area of around 0.5 ha. Two of them were bare while the others were covered by native vegetation (Caatinga). Analysis of data and comparative studies about runoff and soil erosion among the plots and micro-basins were done using the collected data, the results of which are presented in this paper. The need to use modeling techniques for the prediction of runoff and erosion is emphasized. Several models were utilized to evaluate the runoff and the results in general have been good. In the case of soil erosion, the WESP model developed by Lopes (1987) was utilized. A discussion about several aspects of this modeling process is presented, and it is believed that the experience gained in this study can be very useful to evaluate water erosion in the semi-arid region of northeastern Brazil.*

*Key words:* semi-arid modeling; erosion; surface runoff.