

## **Estimativa de Valores Regionais dos Parâmetros do Solo do Modelo KINEROS2 para o Semiárido Paraibano**

**Fernanda Maria de Lima Paiva, Vajapeyam Srirangachar Srinivasan**

*Universidade Federal de Pernambuco*

*fernandamlpaiva@yahoo.com.br, vajapeyam@yahoo.com*

**Celso Augusto Guimarães Santos, Richarde Marques da Silva**

*Universidade Federal da Paraíba*

*celso@ct.ufpb.br, richarde@geociencias.ufpb.br*

*Recebido: 09/08/10 - revisado: 04/10/10 - aceito: 26/07/11*

---

### **RESUMO**

Este trabalho descreve os resultados da estimativa de valores médios regionais de dois parâmetros do solo do modelo KINEROS2 (*Kinematic Runoff Erosion Model*) para condições da região semiárida da Paraíba: coeficiente de impacto das gotas de chuva ( $c_f$ ) e coeficiente de coesão do solo ( $c_o$ ). A realização da estimativa dos parâmetros  $c_f$  e  $c_o$  serve como referência para outras bacias não instrumentadas na região semiárida. Os parâmetros  $c_f$  e  $c_o$  foram calibrados em dois locais hidrologicamente semelhantes: na Bacia Experimental de Sumé (BES) e na Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC). A estimativa dos dois parâmetros foi realizada Utilizando os dados observados de lâmina escoada e produção de sedimentos das duas bacias experimentais. Foram realizadas a calibração, a validação, e a estimativa dos valores regionais pelos valores médios dos parâmetros  $c_f$  e  $c_o$ . Esses valores regionais foram utilizados para simular a erosão nas unidades experimentais das duas Bacias Experimentais. Os resultados obtidos mostram que o conjunto de valores dos parâmetros obtidos pela média dos valores na BES e na BESJC pode servir como uma boa primeira estimativa para a região semiárida paraibana.

**Palavras-chave:** parâmetros regionais; escoamento superficial; erosão; modelo KINEROS2.

---

### **INTRODUÇÃO**

A erosão do solo é dependente das chuvas, do tipo de solo, da topografia, das práticas de cultivo e das medidas de conservação. Estes fatores são atenuados em climas semiáridos (Cruse et al., 2006). Regiões áridas e semiáridas são caracterizadas por uma combinação de alta variabilidade temporal de precipitação e heterogeneidade espacial das propriedades da superfície do solo (Nearing et al., 2007). Os diversos ambientes áridos e semiáridos existentes em todo planeta são bastante diferentes quanto às formas de relevo, solo, fauna, flora, e, sobretudo, a forma da ocupação antrópica. Por esta razão, e ainda devido à falta de informações, não é fácil determinar precisamente os valores de parâmetros físicos do solo para modelos hidrossedimentológicos em zonas semiáridas (Srinivasan e Paiva, 2009). Além disso, o conhecimento dos efeitos da variação da cobertura vegetal e das características físicas do solo sobre o

movimento de sedimentos e água é muito importante para a tomada de decisões acerca do manejo do solo (Kuhnle et al., 1996). Assim, a modelagem dos processos de erosão do solo nas condições reais se torna um desafio e uma necessidade.

Uma das maneiras de se avaliar as influências do tipo de solo e da cobertura vegetal sobre os processos erosivos é a partir do emprego de modelos matemáticos. Esses modelos são ferramentas valiosas para simulação dos processos hidrossedimentológicos, desde que estejam adequadamente parametrizados. Atualmente, modelos vazão-erosão são largamente empregados para o planejamento conservacionista e no controle da erosão e de seus impactos (Machado et al., 2003; Silva et al., 2007). Existem vários tipos de modelos, com diferenças importantes na sua formulação e estruturação. Portanto, a escolha de um modelo depende da qualidade dos dados disponíveis, de uma calibração satisfatória e de sua validação (Srinivasan e Paiva, 2009).

Outro importante fator no estudo da diferenciação do comportamento hidrossedimentológico em bacias hidrográficas é o tamanho da bacia. O efeito de escala reflete diretamente nos valores dos parâmetros que afetam o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Molinier et al. (1987), por exemplo, realizaram uma primeira avaliação deste efeito na região do Cariri paraibano procurando estabelecer uma relação entre a lâmina escoada e a altura da chuva nas diversas escalas como: parcelas de 1 m<sup>2</sup>, 100 m<sup>2</sup>, microbacias e subbacias. Verificaram que a lâmina escoada gerada para um mesmo evento de precipitação, diminui com o aumento da área de contribuição. Assim, o efeito de escala limita a transferência dos parâmetros dentro de uma região hidrológicamente homogênea para bacias da mesma ordem de grandeza. Na ausência dos estudos sobre efeitos de escala, a utilização dos parâmetros calibrados numa bacia alheia deve ser feita com cautela, mas, quando os parâmetros têm características físicas, a representatividade deles numa região pode ser mais ampla.

Este trabalho tem por objetivo estimar parâmetros regionais do solo para o modelo KINEROS2, a partir dos dados de lâmina escoada e erosão, coletados nas Bacias Experimentais de Sumé e de São João do Cariri, ambas localizadas na região do Cariri Paraibano, no semiárido brasileiro.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Bacia Experimental de Sumé

A Bacia Experimental de Sumé (BES) está contida na região semiárida da Paraíba, centrada na coordenada geográfica 7°40' de latitude Sul e 37°00' de longitude Oeste. Essa bacia experimental foi instalada em 1982 e operada até meados de 1991, atualmente, encontra-se desativada, razão pela qual foi implantada a Bacia Experimental em São João do Cariri (Srinivasan e Galvão, 2003). A precipitação média anual é de aproximadamente 550 mm, com decenal seca igual a 300 mm e decenal úmida igual a 900 mm. O período mais chuvoso se concentra entre 15 de fevereiro e 20 de abril. A precipitação em 24 h, ultrapassada cinco vezes por ano é igual a 30 mm, uma vez por ano é igual a 61 mm e uma vez a cada 10 anos é igual a 107 mm. (Cadier e Freitas, 1983). A temperatura média anual varia entre 23 e 27°C com amplitudes térmicas diárias de 10°C (Albuquerque et al., 2002).

### As parcelas de erosão e as microbacias da BES

Na BES foram instaladas, progressivamente, nove parcelas de erosão, com diferentes declividades e cobertura vegetal, representando, dessa forma, várias combinações de declividade, manejo e cobertura vegetal nas parcelas. As parcelas eram do tipo Wischmeier com uma área de 100 m<sup>2</sup> (22,0 m × 4,55 m). Neste estudo, foram utilizados dados obtidos das parcelas 1 e 4, ambas desmatadas. As características destas parcelas estão mostradas na Tabela 1

Quatro microbacias foram implantadas na BES sendo duas na mata nativa e outras duas nas áreas desmatadas e operadas, sempre, com o solo nu. Como no caso das parcelas, apenas dados coletados nas microbacias desmatadas, M3 e M4 foram utilizados neste trabalho. As microbacias começaram a ser operadas no início do período chuvoso de 1982. As características relativas às microbacias M3 e M4 estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 1 – Características das parcelas de erosão da BES.**

P	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal	Período de Observação
P1BES	3,8	Desmatada	1982 – 1991
P4BES	7,0	Desmatada	1982 – 1991

**Tabela 2 – Características das microbacias da BES.**

M	Área (ha)	Declividade média (%)	Cobertura Vegetal
M3BES	0,52	7,1	Desmatada
M4BES	0,48	6,8	Desmatada

Os dados de escoamento ocorrido e sedimentos produzidos foram obtidos a partir das medições no campo. Os detalhes de instalação dos equipamentos de medição e os procedimentos adotados para a coleta de dados em cada evento da precipitação podem ser encontrados na publicação específica da Bacia Experimental de Sumé (Srinivasan e Galvão, 2003).

No que tange aos dados de chuva utilizados no estudo, foram utilizadas informações pluviográficas de cada evento de precipitação, que gerou escoamento, recebendo um número de identificação e a denominação de “cheia”. Na BES, os dados foram coletados no período entre 1982–1991, quando foram registrados 264 eventos. No presente trabalho, foram utilizados 100 eventos, escolhidos aleatoriamente nos registros de cada

unidade experimental. Foram utilizados apenas os dados das P1 e P4 e das M3BES e M4BES, pelo fato que as parcelas e microbacias da Bacia Experimental de São João do Cariri eram operadas nas condições semelhantes a estas.

#### Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC)

A BESJC possui área de aproximadamente 15 km<sup>2</sup> e está localizada dentro da bacia hidrográfica do Riacho dos Namorados, centralizada na coordenada geográfica 7° 22' de latitude Sul e 36° 31' de longitude Oeste, com a altitude variando entre 450 e 500 m. O clima da região, segundo a classificação climática de Köeppen, é do tipo climático BSh, caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas. A precipitação média anual é de 695 mm, a temperatura média anual é de 24°C e a umidade relativa média anual é de 57% (Santos et al., 2007).

#### As parcelas e as microbacias da BESJC

As Tabelas 3 e 4 apresentam as características das parcelas e microbacias instaladas na BESJC. As instalações de parcelas e microbacias seguiram as mesmas normas adotadas na BES. Em junho de 2000 foi instalada a micro-bacia M1 e em julho de 2001, foram instaladas as microbacias M2 e M3, sendo a M2 contida dentro da M3.

Os dados utilizados das duas parcelas de erosão e duas microbacias da BESJC são, como no caso de BES, referentes à lâmina escoada e à produção de sedimentos em cada evento de chuva. Esses dados foram obtidos da mesma forma descrita no caso de BES. Enquanto a operação da BES foi encerrada em 1991, a BESJC continua sendo operado com o apoio dos projetos IBESA – Instalação de Bacias Experimentais no Semi-árido e BEER/UFCG (Bacias Experimental e Representativa da Rede de Hidrologia do Semi-Árido) financiado pelo programa CT-Hidro da FINEP.

**Tabela 3 – Características das parcelas (P) da BESJC.**

P	Declividade Média (%)	Cobertura vegetal	Período de Dados
P1 BESJC	3,4	Desmatada	1999–2009
P2 BESJC	3,6	Vegetação rasteira	1999–2000
		Desmatadas	2001–2009

Foram utilizados dados de 179 eventos nas duas parcelas, 160 eventos na M1 e 116 eventos na M3, coletados no período de 1999 a 2009.

**Tabela 4 – Características das microbacias (M) da BESJC.**

M	Área (ha)	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal
M1BESJC	0,18	7,5	Desmatada
M3BESJC	1,63	7,1	Com resto de Caatinga

#### O Modelo KINEROS2

O KINEROS2 – *Kinematic Runoff-Erosion Model* (Woolhiser et al., 1990) é um modelo que simula a vazão e a erosão durante um evento ou uma seqüência de eventos de chuva numa bacia. É um modelo do tipo distribuído de base física e simula os processos de infiltração, geração e propagação do escoamento superficial, erosão por impacto da chuva e erosão pelo cisalhamento do fluxo. Os processos são distintos para superfícies planas e canais. Por esta razão, a bacia hidrográfica deve ser representada por um conjunto de planos e canais. A propagação do fluxo espacialmente variado nos planos quanto nos canais, é simplificada pela utilização da forma de uma onda cinemática.

No KINEROS2, os sedimentos produzidos pela erosão são transportados pelo fluxo ao longo dos planos e nos canais de acordo com a capacidade do fluxo para o transporte. Os resultados finais da simulação são o hidrograma e sedigrama no exutório da bacia, que podem ser transformados em volume do escoamento gerado e em massa de sedimentos produzidos. Mais detalhes sobre o modelo KINEROS2 são encontrados em Woolhiser et al. (1990).

#### Fluxo nos planos e canais

A equação da continuidade unidimensional para um plano com a entrada do fluxo lateral e para um canal é dada pela Equação (1):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q(x, t) \quad (1)$$

no qual A é a área da seção transversal (m<sup>2</sup>), Q a vazão no canal (m<sup>3</sup>/s), e o q<sub>c</sub>(x, t) é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m<sup>2</sup>/s). Para o cálculo do fluxo no plano utiliza-se a simplificação da equação de Saint-Venant:

$$q = ah^m \quad (2)$$

sendo  $q$  é a descarga por unidade de largura ( $m^2/s$ ). A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção após a simplificação da onda cinemática é dada pela Equação (3):

$$q = aR^{m-1}A \quad (3)$$

no qual  $R$  é o raio hidráulico (m),  $a = S^{1/2}/n$  e  $m = 5/3$ , onde  $S$  é a declividade e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning. Pela aproximação da onda cinemática, a declividade da linha de energia é considerada igual a declividade do plano ou do canal.

### Erosão nos planos e canais

A equação geral que descreve a dinâmica dos sedimentos dentro do fluxo é a equação de balanço de massa, expressa por:

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (4)$$

sendo  $C_s$  a concentração de sedimento no fluxo ( $m^3/m^3$ ),  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ ),  $A$  é a área da seção transversal do fluxo sobre o plano ou no canal ( $m^2$ ),  $e$  é a taxa de erosão do solo do leito por unidade de largura ( $m^2/s$ ),  $q_s$  é a taxa de entrada lateral de sedimentos no fluxo nos canais por unidade de comprimento ( $m^3/s/m$ ).

A erosão total nos planos seria a soma da taxa da erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva ( $e_s$ ) e da erosão pelo fluxo ( $e_h$ ):

$$e = e_s + e_h \quad (5)$$

A erosão por impacto das gotas de chuva é estimada pela seguinte expressão:

$$e_s = c_f e^{-c_h h_i^2} \quad (6)$$

onde  $i$  é a intensidade da precipitação ( $mm/h$ ),  $c_f$  é um parâmetro a ser determinado por calibração que está relacionado às propriedades do solo e da superfície,  $e^{-c_h h_i^2}$  é um fator que representa a diminuição dos efeitos do impacto das gotas de chuva pelo aumento da lâmina da água no solo, e  $c_h$  representa a efetividade do amortecimento da superfície de água (Equação 6). Este valor foi fixado no modelo em 656 (Santos et al., 2004). A taxa de

erosão hidráulica ( $e_h$ ) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a concentração máxima da capacidade de transporte,  $C_m$  e a concentração atual de sedimento,  $c_s(x,t)$ , pela relação:

$$e_h = c_g (C_m - c_s) A \quad (7)$$

em que,  $c_g$  é um coeficiente de transferência dado por,

$$c_g = \frac{v_s}{h} \text{ se } c_s > C_m \text{ (deposição)} \quad (8)$$

e

$$c_g = c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } c_s \leq C_m \text{ (erosão)} \quad (9)$$

sendo  $c_o$  um parâmetro que reflete à coesão do solo, e  $v_s$  a velocidade de queda das partículas ( $m/s$ ). Os coeficientes  $c_o$  e  $c_f$  das Equações (6) e (9) foram os objetos de investigação neste estudo.

### Calibração e validação dos parâmetros do solo

A calibração dos parâmetros do solo para as parcelas e microbacias da BES e BESJC, foi realizada em quatro etapas: (a) discretização em elementos do tipo plano e canal, (b) calibração da saturação inicial do solo  $S_i$ , (c) calibração dos parâmetros do solo nas parcelas de erosão, e (d) calibração dos parâmetros do solo nos canais em microbacias.

Os valores dos parâmetros para a BES, calibrados anteriormente, foram obtidos com base nos estudos desenvolvidos por Lopes (2002), e Srinivasan et al. (2003). Para a BESJC, os valores foram calibrados por Paiva (2008).

As microbacias foram representadas por uma cascata de elementos planos e de canais, de acordo com o levantamento topográfico e as características de solo e vegetação. Assim, cada elemento, plano ou canal, seria um elemento homogêneo, e ainda, conservando a área total e os comprimentos dos cursos. A M3 da BES foi discretizada em 23 elementos, onde 7 são canais e 16 planos. A M4 da BES foi composta de 20 elementos, sendo 4 canais e 16 planos (Lopes, 2002). A M1 da BESJC foi discretizada em 29 planos e 14 canais, e a M3 da BESJC em 35 planos e 14 canais. Mais detalhes sobre as discretizações das microbacias podem ser encontradas em Paiva (2008).

**Tabela 5 – Valores dos parâmetros físicos do solo usados para as duas bacias experimentais.**

Parâmetros	Símbolo	BES	BESJC	Valores Médios
Capilaridade média do solo	G	260 mm	330 mm	295 mm
Condutividade hidráulica saturada do solo	K <sub>s</sub>	3,5 mm/h	4 mm/h	3,75 mm/h
Fração volumétrica de rocha	R <sub>o</sub>	0,1	0,1	0,1
Porosidade	ϕ	0,320	0,398	0,32
Espaçamento médio da microtopografia	S <sub>p</sub>	0,3 m	0,3 m	0,3 m
Altura da interceptação	I <sub>n</sub>	0,76	0,76	0,76
Fração da cobertura vegetal	C	1,0	1,0	1,0
Coeficiente de rugosidade de Manning	n	0,072	0,072	0,072

Como o modelo é eventual, baseado em eventos, os parâmetros foram calibrados para cada evento da chuva. A saturação relativa inicial do solo ( $S_i$ ), definida como a razão entre a umidade inicial do solo e a porosidade do solo ( $\theta_i/\phi$ ), foi calibrada pelo método de tentativa e erro, ajustando-a até que a lâmina escoada simulada pelo modelo se igualasse à lâmina escoada observada. O parâmetro  $c_f$ , impacto das gotas de chuva e o de coesão do solo ( $c_o$ ), foram calibrados, de modo que o valor da produção de sedimentos simulado aproximasse o melhor possível ao valor observado.

A Tabela 5 mostra os valores dos outros parâmetros físicos do solo utilizados com base na literatura ou nos testes realizados. Os resultados comparativos entre os valores simulados e observados foram avaliados por meio da utilização do coeficiente de determinação  $R^2$  e do fator de eficiência de Nash-Sutcliffe. Notou-se que o parâmetro  $c_f$  apresentou praticamente a mesma faixa da variação em seus valores nas calibrações da BES e da BESJC, já que as duas bacias estão localizadas em uma área considerada hidrologicamente homogênea. O  $c_f$  é um parâmetro calibrável que controla a erosão nos planos e, portanto, precisa ser estimado para cada tipo do solo e das condições da superfície. Assim, nas duas bacias experimentais, esse parâmetro foi calibrado evento a evento em cada parcela de erosão e microbacia, apesar de ser não muito sensível para solos do presente caso. Devido à larga variação numérica deste parâmetro adotou-se o valor médio obtido a partir da calibração de vários eventos, tanto nas parcelas quanto nas microbacias. Os valores médios de  $c_f$  e  $c_o$  para os canais estão mostrados na Tabela 6.

O parâmetro  $c_o$  variou entre 0 e 1 nas unidades desmatadas da BES. Lopes (2003) verificou que um valor fixo de 0,01 era satisfatório para as parcelas e canais de microbacias da BES.

Entretanto, na BESJC foi necessário considerar valores diferentes nas calibrações, para planos e canais de microbacias e das parcelas. Os valores otimizadas de 0,01 para planos e 0,0001 para canais foram obtidos depois de várias simulações. Esta diferença é devido ao fato de que as camadas de solo sujeitas à erosão pelo fluxo apresentam características diferentes nos planos e nos canais na BESJC.

**Tabela 6 – Valores médios dos parâmetros do solo calibrados nas unidades experimentais da BES e da BESJC.**

Unidade Experimental	$c_o$	$c_f$
Parcelas P1, P4 da BES e P1 e P2 da BESJC	0,01	$1,26 \times 10^6$
M1BESJC	0,0001	$7,21 \times 10^8$
M3BES	0,01	$8,7 \times 10^5$
M3BESJC	0,0001	$7,56 \times 10^6$
M4BES	0,01	$7,99 \times 10^5$

A validação dos parâmetros físicos do solo na BES e BESJC foi realizada nas próprias bacias. Em cada uma das unidades calibradas, os dados disponíveis foram aleatoriamente divididos em duas partes, sendo uma parte utilizada para calibração e outra para validação. A validação foi realizada utilizando os valores médios de parâmetros calibrados evento a evento, e simulando a lâmina escoada e a produção de sedimentos em cada um dos eventos utilizados para validação. Uma outra validação também foi realizada simulando a produção de sedimentos em todos os eventos com os parâmetros médios calibrados com a exceção da saturação inicial do solo, que foi mantida no seu valor do evento para que o escoamento seja próximo ao valor observado.

### **Validação cruzada dos parâmetros $c_f$ e $c_o$ e determinação dos valores médios regionais**

Gelfan (2005) relatou como um modelo de base física foi parametrizado e calibrado para uma bacia pequena, e os parâmetros do modelo obtidos foram considerados como regionais. Estes parâmetros foram transferidos para uma outra bacia, com apenas duas estações de medição do escoamento, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Em geral, pode não ser prudente considerar apenas uma pequena bacia como uma unidade típica representante de uma região e transferir livremente os seus parâmetros para outras bacias. Por exemplo, Solé-Benet et al. (2003) realizaram um monitoramento por um longo período em duas microbacias no sudeste da Espanha. Relataram a grande influência de escala e dos tipos de solo, resultando em diferenças significativas na lâmina escoada e na erosão dos solos.

A existência dos parâmetros regionais para um modelo hidrossedimentológico é uma hipótese, que implica na possibilidade de simular satisfatoriamente, diversas bacias dentro de uma região hidrologicamente homogênea, com um único conjunto dos parâmetros. Esta ideia também implica na portabilidade de parâmetros calibrados numa bacia para outra com características semelhantes dentro da mesma região. Com o intuito de verificar a portabilidade dos parâmetros  $c_f$  e  $c_o$  nas duas bacias experimentais, foram realizadas simulações cruzadas dos eventos da M3 da BES com os parâmetros da microbacia 1 da BESJC e dos eventos da microbacia 4 da BES, com os parâmetros da microbacia 3 da BESJC e vice-versa. Vale salientar que a saturação inicial calibrada em cada evento foi mantida para simular o escoamento corretamente. A qualidade dos resultados da produção de sedimentos foi verificada por meio dos coeficientes de determinação  $R^2$  entre os valores simulados e os valores observados nos eventos. Diante dos bons resultados obtidos, foi possível pensar na possibilidade de estabelecer um único conjunto de parâmetros aplicáveis para as duas bacias e por extensão, para outras bacias na mesma região. Os valores médios de  $c_f$  e  $c_o$ , de todas as unidades calibradas nas duas bacias foram considerados como a melhor estimativa deste conjunto.

Com os parâmetros médios regionais definidos, foram realizadas novas simulações com os dados da BES e BESJC. Para tanto, todos os eventos foram simulados novamente nas microbacias 3 e 4

de Sumé e microbacias 1 e 3 de São João do Cariri, com este conjunto único de parâmetros. A qualidade da simulação em cada caso foi avaliada como anteriormente, pelos coeficientes de determinação  $R^2$  e o fator de eficiência de Nash-Sutcliffe.

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados das simulações cruzadas entre a BES e BESJC com o parâmetro  $c_f$ . Esta tabela mostra os valores médios e seus respectivos desvios padrão obtidos para  $(E_c/E_o)$ , a relação entre a produção de sedimentos simulada e observada, das microbacias 1 e 3 da BESJC, e 3 e 4 da BES. Os valores de  $R^2$  e o fator de Nash-Sutcliffe obtidos em cada simulação cruzada também estão indicados na mesma tabela. Nota-se que todos os valores de  $R^2$  são superiores a 0,92, e, portanto a qualidade de simulação pode ser considerada como muito boa.

Isto significa que as simulações da produção de sedimentos com KINEROS2 poderiam ser feitas com os parâmetros calibrados na BES ou na BESJC, sem grandes perdas da qualidade da estimativa. Porém, quando avaliado pela proximidade das quantidades de sedimentos erodidos, a erosão nas microbacias de Sumé foi consistentemente superestimada em torno de 50% pelos parâmetros de BESJC.

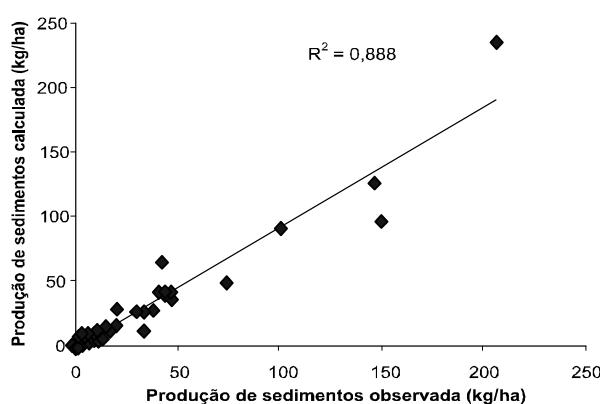
A produção na microbacia 3 da BESJC foi consistentemente subestimada com o parâmetro  $c_f$  da MB3 da BES, em torno de 40%. No caso de MB1 de BESJC simulado com o mesmo parâmetro da M3 da BES, as simulações eventuais oscilaram próximo aos valores observados, com o valor médio da razão  $(E_c/E_o)$  igual a 1,07 ou 7% da superestimação em média.

Considerando que as estimativas da erosão, tanto pelas medições quanto pelas simulações são sujeitas a muitas incertezas, essas variações não são grandes e são aceitáveis, para fins da predição e planejamento. Com base nesses resultados, foi estabelecido um conjunto único de parâmetros, utilizando a média dos valores calibrados em todas as unidades. Com a exceção do parâmetro de saturação inicial do solo, que deve ter seu valor estimado para cada evento de chuva, uma vez que depende das condições iniciais de umidade do solo antes do início do evento.

**Tabela 7 – Resultados das simulações cruzadas com o parâmetro  $c_f$  e comparações entre a erosão simulada ( $E_c$ ) e observada  $E_o$**

Simulações	Valores médios de $(E_c/E_o)$	Desvio Padrão	$R^2$	Nash-Sutcliffe
M3 da BES com o $c_f$ da M3 da BESJC	1,501	0,076	0,958	0,824
M4 da BES com o $c_f$ da M3 da BESJC	1,573	0,074	0,955	0,924
M1 da BESJC com o $c_f$ da M3 da BES	1,070	0,062	0,999	0,958
M3 da BESJC com o $c_f$ da M3 da BES	0,601	0,090	0,993	0,748

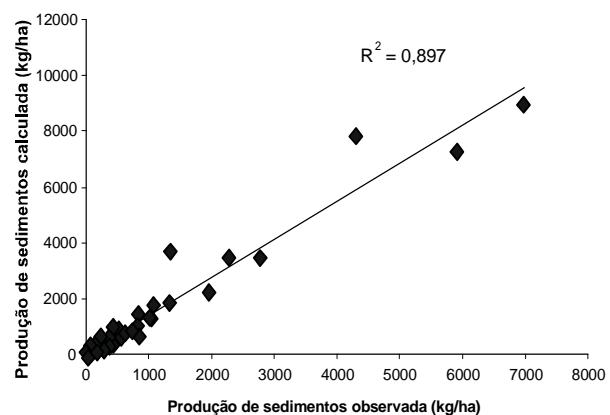
Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas nas M1 e M3 da BESJC e, nas M3 e M4 de BES com o conjunto único dos parâmetros do solo. As Figuras 1 e 2 mostram a comparação gráfica entre  $E_o$  e  $E_c$  na M3 e M4 da BES utilizando os parâmetros regionais, enquanto as Figuras 3 e 4 apresentam a mesma comparação nas microbacias 1 e 3 da BESJC.



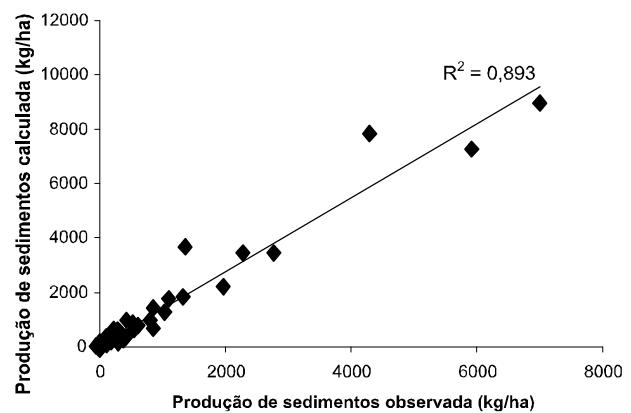
**Figura 1 – Comparação da  $E_o$  com a  $E_c$  na M3BES com os parâmetros médios regionais**

Analisando os resultados da Tabela 8, e as comparações gráficas da produção de sedimentos nas microbacias das duas bacias experimentais, observa-se que o valor de  $R^2$  entre o valor simulado ( $E_c$ ) e o valor observado ( $E_o$ ) em todos os casos ficou muito próximo de 0,9. O fator de eficiência de Nash-Sutcliffe, também apresentou a mesma tendência, indicando bons resultados nas simulações em todos os casos com o conjunto único de parâmetros. Entretanto, notou-se que em todas as simulações o valor médio da relação ( $E_c/E_o$ ) ficou abaixo do valor unitário em todas as microbacias, indicando que o conjunto regional adotado ligeiramente subestima a produção de

sedimentos. Esta subestimação varia entre 14,9 a 21,1%. Como a modelagem do processo de erosão do solo está sujeita a muito mais incertezas do que a do processo da geração do escoamento superficial, os resultados podem ser considerados como bastante satisfatórios.



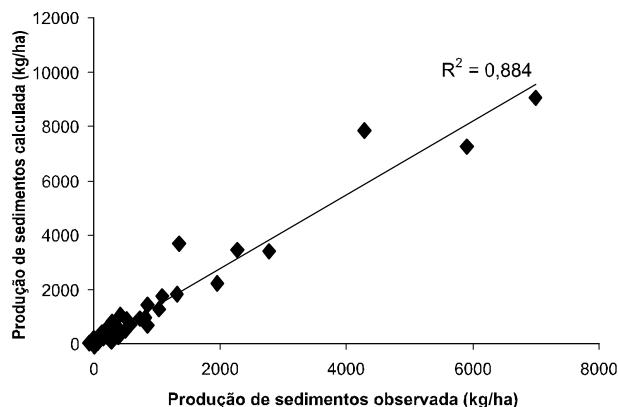
**Figura 2 – Comparação da  $E_o$  com a  $E_c$  na M4BES com os parâmetros médios regionais**



**Figura 3 – Comparação da  $E_o$  com a  $E_c$  na M1BESJC com os parâmetros médios regionais**

**Tabela 8 – Resultados das Simulações com o conjunto único de parâmetros médios**

Unidade Simulada	Valores médios de ( $E_c/E_o$ )	Desvio Padrão de ( $E_c/E_o$ )	R <sup>2</sup>	Nash-Sutcliffe
M1 da BESJC	0,795	0,043	0,893	0,868
M3 da BESJC	0,789	0,059	0,884	0,839
M3 da BES	0,823	0,081	0,888	0,894
M4 da BES	0,851	0,074	0,897	0,901

**Figura 4 – Comparação da  $E_o$  com a  $E_c$  na M3BESJC com os parâmetros médios regionais**

Na maioria das simulações cruzadas entre as microbacias de BES e BESJC, percebeu-se que os parâmetros da BES subestimavam a produção de sedimentos da BESJC, enquanto os parâmetros da BESJC superestimavam a produção da BES. Esta situação, apesar das estimativas serem consideradas satisfatórias em todos os casos, indica que realmente existem algumas diferenças nas características do solo, que são captados no processo de calibração. Entretanto, como dificilmente haveria uma homogeneidade ideal em qualquer bacia hidrográfica em uma região, a determinação de um conjunto regional, a partir de valores médios de parâmetros calibrados em várias bacias dentro da região, para um modelo da base física, levaria para uma estimativa bastante satisfatória. A estimativa dos parâmetros físicos no campo, apesar de ser uma opção, envolveria grandes investimentos para obter um número das medições suficientes como amostras e ainda exigiria a aplicação de técnicas geostatísticas para determinar o valor representativo.

Pomeroy et al. (2005), mostraram que apesar de ter realizado um monitoramento de longo prazo bem instrumentado, em várias bacias hidrográficas no Canadá, nenhuma melhora na compreensão da relação chuva-vazão foi percebida.

Eles atribuem isso, em parte, à utilização de modelos conceituais, em vez de modelos hidrológicos de base física. O mérito dos modelos de base física é que os parâmetros podem ser transferidos para outros locais com mais facilidade do que outros tipos de modelos. Desta forma, parâmetros de erosão do solo regionais definidos para o modelo KINEROS2 na região semi-árida do Cariri do Estado da Paraíba, podem ser considerados realistas.

Assim, os resultados indicaram que os parâmetros da erosão do solo calibrados na BES simularam satisfatoriamente os eventos de BESJC e vice versa.

## CONCLUSÕES

O modelo KINEROS2 apresentou resultados bastante satisfatórios, para simular os processos hidrossedimentológicos na região semi-árida Paraibana. Esta conclusão se baseia nos excelentes valores de R<sup>2</sup>, obtidos entre os valores simulados e observados, da erosão nas fases da validação e simulação cruzada nas duas bacias experimentais.

O parâmetro c<sub>f</sub> é relativamente insensível, mas é o principal no processo da erosão em planos. A faixa da variação deste parâmetro é muito grande, portanto a obtenção do seu valor representativo regional deve ser feito com um maior número dos eventos num maior número das bacias possíveis.

O conjunto de parâmetros da erosão do solo, obtidos pela média dos parâmetros médios de c<sub>f</sub> na BES e na BESJC, serve como o conjunto representativo para a região apesar da pequena subestimação da produção de sedimentos. As estimativas deste parâmetro podem ser melhoradas, com a coleta de dados de longo prazo do escoamento superficial e a produção de sedimentos, nos eventos da chuva em outras microbacias instrumentadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelas bolsas de mestrado e da produtividade de pesquisa. Os dados utilizados foram coletados, com o apoio financeiro da FINEP/MCT, pelo grupo de pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande, liderado pelo Prof. Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. *Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n. 1, p. 136-141, 2002.
- CADIER E.; FREITAS, B. J. *Bacia representativa de Sumé*. SUDENE: Recife, Brasil, Série Hidrologia, n. 14. 1983.
- CRUSE, R.; FLANAGAN, D.; FRANKENBERGER, J. *Daily estimates of rain-fall, water runoff, and soil erosion in Iowa*. Journal of Soil and Water Conservation, v. 61, n. 4, p. 191-199, 2006.
- GELFAN, A. N. *Prediction of runoff in poorly gauged basins using a physically based model*. In: Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions. Toronto: Canadian Water Resources Association, p. 101-118, 2005.
- KUHNLE, R. A.; BINGER, R. L.; FOSTER, G. R.; GRISSINGER, E. H. *Effect of land use changes on sediment transport*. Water Resources Research, v. 32, p.3189-3196, 1996.
- LOPES, W. T. A. *Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida da Paraíba*. Dissertação (Mestrado) – Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 2002. 174p.
- MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. *Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 4, p. 727-733, 2003.
- MOLINIER, M.; GALVÃO, C. O.; GOMES, H. P. *Determinação do escoamento de uma bacia hidrográfica através das técnicas de simulação de chuvas*. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos hídricos. Salvador: ABRH, v. 2, p. 530-544, 1987.
- NEARING, M. A.; NICHOLS, M. H.; STONE, J. J.; RENARD, K. G.; SIMANTON, J. R. *Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch*. Water Resources Research, v. 43, 2007.
- PAIVA, F. M. L. *Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana*. Dissertação (Mestrado), Campina Grande, UFCG, 2008. 135p.
- POMEROY, J. W.; GRANGER, R. J.; HEDSTROM, N. R. *The process hydrology approach to improving prediction of ungauged basins in Canada*. In: Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions. Toronto: Canadian Water Resources Association, 2005.
- SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. *Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba*. OKARA: Geografia em debate, v.1, n. 1, p. 16-32, 2007.
- SANTOS, L. L.; SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R.; RIBEIRO, P. J. M. *Avaliação da resposta do modelo KINEROS2 para diferentes representações da bacia hidrográfica*. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e VIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, São Paulo: ABRH, 2007.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, L. P. *Evaluation of soil loss in Guaraíra Basin by GIS and remote sensing based model*. Journal of Urban and Environmental Engineering, v. 1, n. 2, p. 44-52, 2007.
- SOLÉ-BENET, A.; CANTÓN, Y.; DOMINGO, F. *Long term hydrological monitoring of two micro-catchments in semiarid SE Spain*. UNESCO, Paris, IHP-VI Technical Documents in Hydrology, n. 67, 2003.
- SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R.; SUZUKI, K. *Evaluation of an erosion simulation model in a semi-arid region of Brazil*. In: Erosion Prediction in Ungauged Basins (PUBs): Integrating Methods and Techniques. Atlanta: IAHS-AISH Publication, n. 279, p. 109-116, 2003.
- SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O. *Bacia Experimental de Sumé: descrição e dados coletados*. Campina Grande-PB, Universidade Federal de Campina Grande/CNPq, 2003. 129p.
- SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. *Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil*. Science in China Series E-Technological Sciences, v. 52, n. 11, p. 3348-3356, 2009.
- WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. *Kineros, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990. 130p.

***Estimation of the Regional Values of the Soil Parameters of the KINEROS2 Model for the Semiarid Region of Paraíba State***

***ABSTRACT***

*This paper describes the results of the determination of the representative values of the soil parameters  $c_f$  and  $c_o$ , of the KINEROS2 model, for the semiarid region of Paraíba State that may be utilized in the ungauged basins of the region. For this purpose, the values of parameters  $c_f$  (splash coefficient) and  $c_o$  (soil cohesion) calibrated and validated in two hydrologically similar basins were used. Observed data of runoff and sediment yield in Sumé Experimental Basin (BES) and São João do Cariri Experimental Basin (BESJC) were used to calibrate and validate KINEROS2 – Kinematic Runoff Erosion Model. After calibration, validation and cross validation, the average values of these parameters were taken as representative of the regional values of  $c_f$  and  $c_o$ . The results obtained from the simulation of events in the micro-basins of both BES and BESJC show that this set of parameters is quite useful for the semiarid region investigated.*

*Keywords:* regional parameters; surface runoff; erosion; KINEROS2 model.