



## OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO USANDO *HOST PARASITE CO-EVOLUTIONARY (HPC)*

*Paula Karenina de Macedo Machado Freire*<sup>1</sup>, *Celso Augusto Guimarães Santos*<sup>2</sup> & *Sudhanshu K. Mishra*<sup>3</sup>

**RESUMO** --- Este artigo apresenta os conceitos essenciais e aplicação para otimizar os parâmetros de um modelo de erosão usando dados coletados em uma bacia experimental localizada no Nordeste do Brasil, com um método de otimização global conhecido como *Host Parasite Co-evolutionary (HPC)*, que é adequado para a solução de problemas de otimização de grande escala e oferece opções mais amplas em matéria de voo aleatório, função de detecção e tendências co-evolucionárias. Suas bases lógicas são mais seguras que o algoritmo de busca *cuckoo* tradicional ou que o *cuckoo-host co-evolution (CHC)*. O modelo hidrossedimentológico que foi escolhido para ser otimizado aqui é o *Watershed Erosion Simulation Program (WESP)*, que foi desenvolvido para pequenas bacias semiáridas para simular processos de escoamento superficial e erosão. Os dados de campo foram coletados em uma bacia experimental localizada em uma região semiárida do Brasil. Com base nestes resultados, os seguintes parâmetros de erosão foram otimizados: o parâmetro de tensão-umidade do solo ( $N_s$ ) que depende também do teor de umidade inicial; o parâmetro de erosão do canal ( $a$ ); parâmetro de desprendimento do solo ( $K_R$ ); fator de erodibilidade do cisalhamento pelo impacto da chuva ( $K_I$ ).

**ABSTRACT** --- This paper presents the essential concepts and application to optimize the parameters of an erosion model using data collected in an experimental basin located in northeastern Brazil, with a global optimization method known as *Host Parasite Co-evolutionary (HPC)* which is suitable for solving optimization problems of large scales and offers wider choices in matters of random flight, detection function, and co-evolutionary tendencies. Its logical foundations are more secure than the traditional cuckoo search algorithm or than the cuckoo-host co-evolution (CHC). The physically-based erosion model that was chosen to be optimized here is the *Watershed Erosion Simulation Program (WESP)*, which was developed for small semiarid basins to simulate runoff and erosion processes. The field data were collected in an experimental basin located in a semiarid region of Brazil. On the basis of these results, the following erosion parameters were optimized: the soil moisture-tension parameter ( $N_s$ ) that depends also on the initial moisture content, the channel erosion parameter ( $a$ ), the soil detachability factor ( $K_R$ ), and the sediment entrainment parameter by rainfall impact ( $K_I$ ).

**Palavras-chave:** otimização, *Host Parasite Co-evolutionary*, *Watershed Erosion Simulation Program*.

<sup>1</sup> Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – UFPB. E-mail: pulkymm@gmail.com

<sup>2</sup> Professor Dr. Universidade Federal da Paraíba. E-mail: celso@ct.ufpb.br

<sup>3</sup> Professor Dr. North-Eastern Hill University. Shillong, Índia. E-mail: mishrasknehu@yahoo.com

## INTRODUÇÃO

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água (Whitehead & Robinson, 1993). A compreensão do conjunto de processos físicos que ocorrem na bacia é imprescindível para interpretação dos resultados obtidos, suas limitações e sua aplicabilidade a outras regiões, e por isso, cada vez mais, modelos mais complexos têm surgidos (McCulloch & Robinson, 1993). Neste contexto, esta modelagem hidrológica surge como uma ferramenta extremamente útil que permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (Tucci, 1998).

A otimização é um problema comum em muitos campos da ciência, uma vez que a otimização de uma função matemática corresponde à busca de seu valor máximo ou mínimo. Estas funções podem também ter um conjunto de restrições para as variáveis a serem otimizadas. Muitas técnicas têm sido propostas a fim de encontrar esses valores. No entanto, a maioria destas técnicas tradicionais não são muito eficientes para resolver problemas de otimização não-linear. Sabe-se que os modelos distribuídos de base física têm sido amplamente utilizados para prever o escoamento e/ou a produção de sedimentos nas bacias, especialmente aqueles baseados em onda cinemática, mas normalmente eles têm uma grande quantidade de parâmetros a serem determinados, e assim, uma ferramenta robusta de otimização é adequada para esta tarefa.

Desta forma, este trabalho busca otimizar os parâmetros de erosão de um modelo hidrossedimentológico (WESP) através da técnica *Host Parasite Co-evolutionary* (HPC).

## MÉTODOS E MATERIAIS

### *Host Parasite Co-evolutionary* (HPC)

Desenvolvido por Mishra (2013), o *Host Parasite Co-evolutionary* é uma variação do *Cuckoo Search* original de Yang e Deb (2009) que se baseia na ideia de como os cucos põem seus ovos nos ninhos hospedeiros, como, se não detectados (ou destruídos), estes ovos são chocados pelos hospedeiros, como os filhotes de cuco depois se juntam à população de cucos e como uma representação matemática de tudo isso pode ser usada para procurar o ótimo global de uma função. Neste algoritmo, em uma população de parasitas (cucos) e em uma população de hospedeiros (corvos), cada indivíduo parasita bem como indivíduo hospedeiro são representados por um ponto. Estes pontos serão gerados aleatoriamente dentro do domínio da função a ser minimizada. Assim,

quanto menor o valor da função, melhor a adequação. Cada parasita voa aleatoriamente e se a sua aptidão pós-vôo for melhor que a sua aptidão pré-vôo, então ele escolherá aleatoriamente um ninho hospedeiro que não tenha ainda sido invadido por outro parasita e onde a qualidade dos ovos do hospedeiro são inferiores aos do ovo do parasita. Os ovos do parasita, no entanto, podem ser detectados pelo hospedeiro e destruídos. Se não for detectado, no entanto, o filhote, depois de ser chocado no ninho do hospedeiro irá se juntar à população de parasitas. Só os melhores parasitas, no entanto, vão entrar para a próxima geração.

No início, são gerados aleatoriamente  $n_c$  indivíduos parasitas  $x(t)$  e  $n_k$  indivíduos hospedeiros  $y(t)$ , como pontos do domínio dimensional  $m$  da função  $f(\cdot)$  a ser otimizada.

Cada parasita  $x_i^{(t)}$  escolherá aleatoriamente um hospedeiro  $y_j^{(t)}$  e fará um esforço para se atualizar em cada um das suas  $m$  coordenadas tendo em vista: (a) um vôo aleatório; (b) uma direção aleatória  $\pm$ , e (c) uma diferença entre as suas próprias coordenadas e as do hospedeiro escolhido correspondente, *i.e.*,  $x_i^{(t)} \Leftarrow x_i^{(t)} + \delta x_i^{(t)}$ , se  $f(x_i^{(t)} + \delta x_i^{(t)}) < f(x_i^{(t)})$ , onde o vôo aleatório é dado por  $\delta x_i^{(t)} = a \circ r \circ \phi(\beta) \circ (y_j^{(t)} - x_i^{(t)})$  para cada coordenada de  $x_i^{(t)}$ . Aqui  $r$  é uma matriz de números aleatórios uniforme e independentemente distribuídos em  $(-0.5, 0.5)$ ,  $a$  é um *array* de números independentes de aleatoriedade de distribuição- $\Gamma(1/2)$  em  $(0,1)$ , e  $\phi_k(\beta)$  é um *array* de números aleatórios independentes que efetua um vôo aleatório. Cada um dos três *arrays* de números aleatórios possui  $m$  elementos. No entanto, se  $f(x_i^{(t)} + \delta x_i^{(t)}) \geq f(x_i^{(t)})$ , então  $x_i^{(t)}$  mantém seu status *quo*.

Cada parasita  $x_i^{(t)}$  que foi melhorado fará uma tentativa de colocar seus ovos em um ninho escolhido aleatoriamente  $y_j^{(t)}$  desde que (a) o ninho hospedeiro escolhido ainda não contenha nenhum ovo de parasita; (b)  $f(x_i^{(t)}) < f(y_j^{(t)})$  e (c) a tentativa não é frustrada pela escolha do hospedeiro, pois a população hospedeira tem uma função de detecção de evolução. Com base no sucesso dos parasitas,  $p^{(t)}$ , a probabilidade do sucesso da população de parasitas ao longo das gerações é atualizada.

Os hospedeiros também se atualizam,  $y_i^{(t)} \Leftarrow y_i^{(t)} + \delta y_i^{(t)}$ , se  $f(y_i^{(t)} + \delta y_i^{(t)}) < f(y_i^{(t)})$ , mas usando um vôo com parâmetros ligeiramente diferentes de tal forma que  $\delta y_i^{(t)} = \omega \circ \rho \circ \phi(\gamma) \circ (x_j^{(t)} - y_i^{(t)})$ . Aqui  $\rho$  é um *array* de números aleatórios uniforme e independentemente distribuídos em  $(-0.5, 0.5)$ ,  $\omega$  é um *array* de números aleatórios independentes com distribuição- $\Gamma(1/2)$  em  $(0,1)$  e  $\phi(\gamma)$  é um *array* de números aleatórios independentes que efetua um vôo aleatório. Cada um dos três

arrays de números aleatórios possui  $m$  elementos. No entanto, se  $f(y_i^{(t)} + \delta y_i^{(t)}) \geq f(y_i^{(t)})$ , então  $y_i^{(t)}$  mantém seu status *quo*. Finalmente, ordena cada população (de parasitas e de hospedeiros) tal que  $f(x_1^{(t)}) \leq f(x_2^{(t)}) \leq \dots \leq f(x_{n_c}^{(t)})$  e  $f(y_1^{(t)}) \leq f(y_2^{(t)}) \leq \dots \leq f(y_{n_k}^{(t)})$ ; entretanto, tal arranjo não é necessário. Incrementa-se o valor de  $t$  e o indivíduo parasita volta a procurar um novo indivíduo hospedeiro.

Os parasitas são capazes de sobreviver à próxima geração, em primeiro lugar, se os ovos sobrevivem a detecção pelo hospedeiro ou se eles geram uma prole mais inteligente. O valor de  $p^{(t)}$ , probabilidade de sobreviver a detecção de seus ovos no ninho hospedeiro na geração (ou iteração)  $t$ , é uma probabilidade cumulativa *over-the-generation* dada por  $p^{(t)} = \sum_{g=1}^t n_s^{(g)} / (t \times n_c)$ , enquanto  $n_s^{(g)} + n_u^{(g)} = n_c^{(g)} = n_c$  ou a razão entre o número total de indivíduos parasitas com sucesso ao longo das gerações ( $n_s^{(g)}$ ;  $g = 1, t$ ) pelo número de todos os sucessos  $\sum_{g=1}^t n_s^{(g)}$  mais insucessos  $\sum_{g=1}^t n_u^{(g)}$  de parasitas ao longo das gerações, cada uma com  $n_c$  indivíduos. Ao longo das gerações,  $p^{(t)}$  diminui enquanto  $pd^{(t+1)}$  aumenta. Por sua vez,  $pd^{(t)}$  afeta a taxa de sucesso dos parasitas (e, portanto  $p^{(t+1)}$ ) na próxima geração tornando, dessa forma, o sistema co-evolucionário. Isso é modelado com base em observações do mundo real que sugerem uma incidência crescente ao longo das gerações de detecção dos ovos do parasita pela população hospedeira, em última análise, forçando os parasitas a mudarem para novos ou diferentes hospedeiros que ainda não se adaptaram às habilidades dos parasitas.

## O modelo WESP

Lopes & Lane (1988) desenvolveram um modelo hidrossedimentológico distribuído de base física chamado de WESP – *Watershed Erosion Simulation Program*, o qual calcula o escoamento e a produção de sedimentos baseado na aproximação de ondas cinemáticas para o escoamento superficial devido ao excesso de chuva  $r_e$  (m/s). Por sua vez,  $r_e$  é obtido pela subtração da taxa de infiltração  $f(t)$  a partir da intensidade da chuva  $I$ , ou seja,  $r_e = I - f(t)$ . Este modelo foi desenvolvido com o objetivo de gerar hidrogramas e sedigramas em pequenas bacias. O processo de infiltração é modelado com a equação de Green-Ampt (Green & Ampt, 1911), que pode ser escrita na forma:

$$f(t) = K_s \left( 1 + \frac{\Delta\theta\psi}{F(t)} \right) \quad (1)$$

em que  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo saturado (m/s);  $F(t)$  é a altura acumulada da água infiltrada (m);  $\psi$  é a altura de sucção média na frente de molhamento (m);  $\Delta\theta$  é a variação do conteúdo úmido; e  $t$  é a variável tempo (s).

O conteúdo úmido  $\theta$  e a altura de sucção  $\psi$  podem ser expressos como um único parâmetro que poderia ser chamado de parâmetro tensão-umidade do solo  $N_s$ , tal que:

$$N_s = \Delta\theta\psi_i = (\theta_s - \theta_i)\psi_i \quad (2)$$

em que  $\theta_s$  é o conteúdo úmido na saturação, que é quase igual à porosidade e  $\theta_i$  é o conteúdo úmido inicial do solo. O escoamento superficial é considerado como escoamento laminar superficial ou escoamento concentrado nos canais.

#### *Escoamento laminar superficial*

O escoamento laminar superficial e espacialmente variado são considerados unidimensionais, descrito pela equação do escoamento turbulento de Manning:

$$u = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

em que  $u$  é a velocidade média local do escoamento (m/s);  $R_H(x, t)$  é o raio hidráulico (m);  $S_f$  é a declividade de atrito e  $n$  é o fator de atrito de Manning. Assim, a velocidade local para o escoamento nos planos pode ser obtida considerando o raio hidráulico igual à altura do escoamento ( $R_H = h$ ) e usando a aproximação de ondas cinemáticas, obtém-se que a declividade de atrito é igual a declividade do plano ( $S_0 = S_f$ ):

$$u = \alpha h^{m-1} \quad (4)$$

em que  $h$  é a altura do escoamento (m);  $\alpha$  é um parâmetro relacionado a declividade e rugosidade da superfície, igual a  $(1/n)S_0^{1/2}$ ; e  $m$  é um parâmetro de geometria cujo valor é igual a  $5/3$  para seções retangulares largas.

A equação de continuidade para o plano unidimensional pode, então, ser escrita como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = r_e \quad (5)$$

Das equações (4) e (5), a velocidade e altura do escoamento superficial ( $u, h$ ) podem ser calculadas para um dado excesso de chuva  $r_e$ .

O transporte de sedimentos é considerado como a taxa de erosão no plano menos a taxa de deposição no trecho. A erosão ocorre devido ao impacto das gotas de chuva bem como à tensão de cisalhamento do escoamento. Assim, a equação de continuidade para o transporte de sedimentos é expressa como:

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(cuh)}{\partial x} = e_I + e_R - d \quad (6)$$

em que  $c$  é a concentração de sedimentos no escoamento superficial ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $e_I$  é a taxa de erosão de sedimentos devido ao impacto da chuva ( $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ );  $e_R$  é a taxa de erosão devido à tensão de cisalhamento do escoamento ( $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ); e  $d$  é a taxa de deposição de sedimentos ( $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ). A taxa de erosão devido ao impacto da gota de chuva  $e_I$  é uma função da taxa de desprendimento pelo impacto das gotas de chuva e a taxa de transporte de partículas pelo escoamento raso, expressa como:

$$e_I = K_I I r_e \quad (7)$$

em que  $K_I$  é o parâmetro de desprendimento do solo ( $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$ ). A taxa de erosão de sedimentos devido à tensão de cisalhamento  $e_R$  é expressa (Croley, 1982; Foster, 1982) como:

$$e_R = K_R \tau^{1.5} \quad (8)$$

em que  $K_R$  é um fator de erodibilidade do cisalhamento ( $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{N}^{1.5}\cdot\text{s}$ ); e  $\tau$  é tensão cisalhante efetiva ( $\text{N}/\text{m}^2$ ), que é dada por  $\tau = \gamma h S_f$ ,  $\gamma$  sendo o peso específico da água ( $\text{N}/\text{m}^3$ ). A taxa de deposição de sedimentos  $d$  na equação (6) é dada (Einstein, 1968) por:

$$d = \varepsilon_p V_s c \quad (9)$$

em que  $\varepsilon_p$  é um coeficiente que depende das propriedades do fluido e sedimentos, igual a 0,5 no presente estudo baseado em Davis (1978);  $c(x,t)$  é a concentração de sedimentos em transporte ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); e  $V_s$  é a velocidade de queda das partículas (m/s) calculado pela equação de Rubey:

$$V_s = F_o \sqrt{\frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} g d_s} \quad (10)$$

e,

$$F_o = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g d_s^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g d_s^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \quad (11)$$

em que  $\gamma_s$  é o peso específico do sedimento ( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $d_s$  é o diâmetro médio dos sedimentos (m); e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

### *Escoamento concentrado nos canais*

O escoamento concentrado nos canais é também descrito pelas equações de continuidade e do momento. A equação do momento pode ser reduzida para equação do escoamento com a aproximação de ondas cinemáticas:

$$Q = \alpha AR_H^{m-1} \quad (12)$$

em que  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ ); e  $A$  é a área da seção transversal do escoamento ( $m^2$ ). A equação de continuidade para o escoamento no canal é dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_A \quad (13)$$

em que  $q_A$  é a entrada lateral de escoamento por unidade de comprimento do canal. As equações (12) e (13) permitem o cálculo do escoamento no canal. Como o efeito do impacto das gotas de chuva é desprezível no canal, a equação de continuidade para os sedimentos é expressa sem o componente do impacto da chuva por:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial CQ}{\partial x} = q_s + e_r - d_c \quad (14)$$

em que  $C(x,t)$  é a concentração de sedimentos em transporte no canal ( $kg/m^2$ );  $q_s$  é a entrada lateral de sedimento no canal ( $kg\cdot s/m$ );  $d_c$  é a taxa de deposição de sedimentos no canal ( $kg\cdot s/m$ ); e  $e_r$  é a taxa de erosão do material do leito do canal ( $kg\cdot s/m$ ). Os componentes do fluxo de sedimentos para os canais são dados da seguinte forma: a taxa de erosão do material do leito do canal  $e_r$  é obtido de uma equação geral, inicialmente desenvolvida para a capacidade de transporte da carga de leito (Croley, 1982; Foster, 1982):

$$e_r = a(\tau - \tau_c)^{1.5} \quad (15)$$

em que  $a$  é o parâmetro de erodibilidade dos sedimentos; e  $\tau_c$  é tensão de cisalhamento crítica ( $N/m^2$ ), que é dada por  $\tau_c = \delta(\gamma_s - \gamma)d_s$ , em que  $\delta$  é um coeficiente, igual a 0,047 no presente estudo;  $\gamma_s$  é o peso específico dos sedimentos ( $N/m^3$ ); e  $d_s$  é o diâmetro médio dos sedimentos (m). A taxa de deposição de sedimentos no canal  $d_c$  ( $kg\cdot s/m$ ) na equação (14) é expressa por (Mehta, 1983):

$$d_c = \varepsilon_c T_W V_s C \quad (16)$$

em que  $\varepsilon_c$  é o parâmetro de deposição para os canais, considerado igual a 1,0 no presente caso; e  $T_W$  é a largura superior do canal (m). A partir da equação (14), a taxa de transporte de sedimentos ( $CQ$ ) pode se calculada para o escoamento concentrado nos canais com  $A$  e  $Q$  obtidos a partir da

equação (13). As equações foram resolvidas com um esquema implícito em 4-pontos de elementos finitos.

Os parâmetros utilizados do modelo hidrossedimentológico para otimização foram quatro, em que o primeiro foi o parâmetro de tensão-umidade do solo  $N_s$ , presente na equação (2) está relacionado somente ao escoamento. Como depende da umidade antecedente do solo, este parâmetro deve ser diferente para cada evento e sua média não pode ser calculada. Os outros três parâmetros estão relacionados à erosão, seja ela nos planos ou nos canais, são eles: o parâmetro de erosão devido à força cisalhante do escoamento no canal  $a$ , presente na equação (15), e o mesmo para os planos  $K_R$ , equação (10), e o parâmetro de entrada de sedimentos devido aos impactos das gotas de chuva  $K_I$ , equação (9).

### Área de estudo

A área de estudo escolhida foi a bacia experimental de Sumé que está contida na Bacia Representativa de mesmo nome, sendo instalada na propriedade Fazenda Nova, no município de Sumé, Estado da Paraíba. Situa-se na altura do km 118 da BR-412 a 240 km de João Pessoa, entre as cidades de Sumé e Monteiro, fazendo parte da área superior da bacia do rio Paraíba (Cadier & Freitas, 1982). Está localizada na região do Cariri, sendo uma das mais secas regiões do Nordeste (Figura 1).

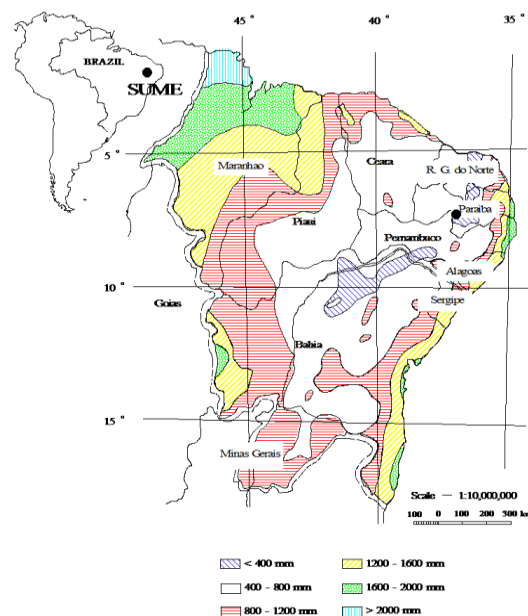


Figura 1 – Localização da Bacia Experimental de Sumé.



Ela é composta por quatro microbacias com áreas entre 0,5 e 1 ha, nove parcelas experimentais de 100 m<sup>2</sup> e uma sub-bacia de 10 km<sup>2</sup>. Na Figura 2 pode ser visualizado o croqui das instalações desta Bacia.

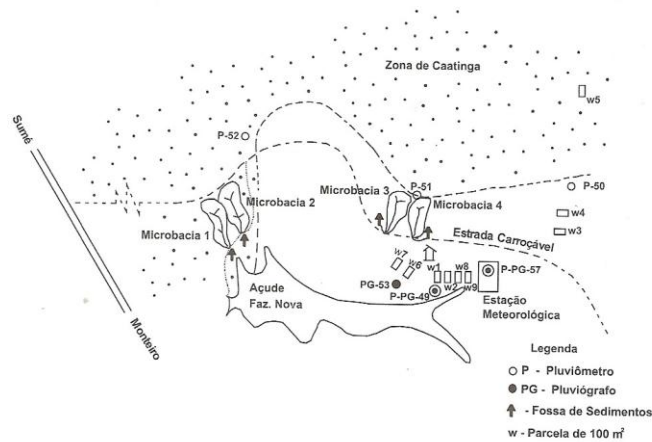


Figura 2 – Croqui de localização das instalações.

As microbacias começaram a ser operadas em 1982, e durante a instalação foram realizados levantamentos topográficos, pedológicos e botânicos (Cadier *et al.*, 1983). Algumas características físicas destas microbacias estão apresentadas na Tabela 1. A microbacia escolhida foi a microbacia 03 (Figura 3), a qual foi discretizada em 10 elementos, sendo sete planos e três canais (Figura 4).

Tabela 1 – Características das microbacias

Microbacia	Área (ha)	Perímetro (m)	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal
01	0,62	398	7,0	Caatinga Nativa
02	1,07	466	6,1	Caatinga Nativa
03	0,52	302	7,1	Desmatada
04	0,48	270	6,8	Desmatada



Figura 3 – Microbacia escolhida para área de estudo (Microbacia 03).

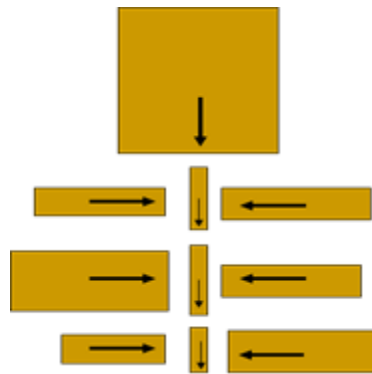


Figura 4 – Discretização da microbacia.

Foram selecionados cinco eventos entre 1987 e 1991, todos durante o mês de maio. Este período foi escolhido porque a microbacia foi bem administrada, sob boas condições de operacionalização e controle de manutenção, dando assim confiabilidade nos dados colhidos nesta época. A Figura 5 mostra a relação entre lâmina escoada e a correspondente produção de sedimentos dos eventos escolhidos.

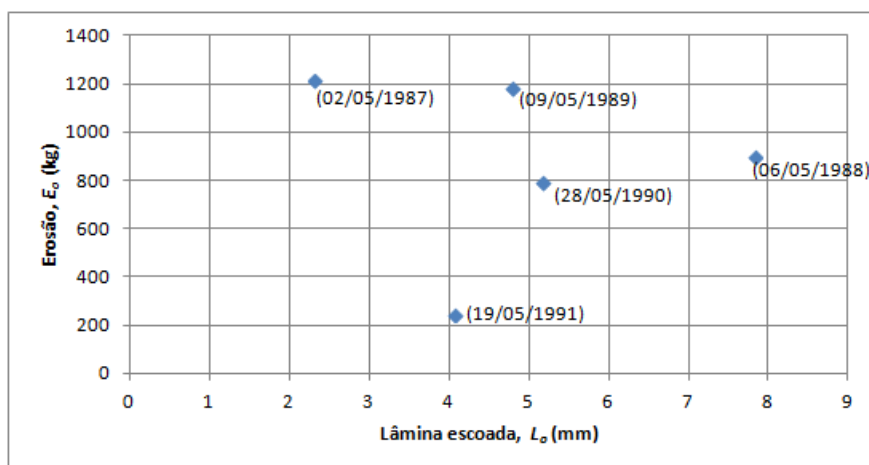


Figura 5 – Lâmina escoada *versus* produção de sedimentos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Otimização dos parâmetros do WESP

Primeiramente, o esquema de planos e canais selecionado para representar a área de estudo, neste caso a microbacia 03 da Bacia Experimental de Sumé, foi o mostrado na Figura 3, com 10 elementos, baseado em Santos *et al.* (1994).

No modelo WESP, alguns valores de parâmetros são fixados *a priori* como é o caso do fator de atrito de *Manning*, onde foi assumido como 0,02 para os planos e 0,03 para canais com base no tipo de solo, suas características de composição, tamanho do grão e da superfície; o peso específico da água ( $9,8 \text{ kN/m}^3$ ), e o peso específico do sedimento ( $2,6 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ). Entretanto, existem alguns parâmetros que são específicos para esta área que devem ser determinados por testes de campo, como a condutividade hidráulica do solo saturado  $K_s$ , cuja média de valor foi definido igual a 5,0 mm/h e o diâmetro médio de sedimentos  $d_s$ , cujo valor foi assumido como igual ao  $d_{50}$  (0,5 mm), baseado em testes de campo. Os outros valores de parâmetros devem ser baseados na literatura ou determinados por calibração através de um processo de otimização.

Existem quatro parâmetros no modelo WESP a serem determinados por otimização ( $N_s$ ,  $a$ ,  $K_R$  e  $K_I$ ). O primeiro parâmetro a ser calibrado no modelo WESP é o parâmetro de tensão-umidade do solo  $N_s$ , da equação (2), o qual foi calibrado usando a seguinte função objetivo:

$$J_L = \left| \frac{L_o - L_c}{L_o} \right| \quad (17)$$

em que  $L_o$  é a lâmina observada (mm); e  $L_c$  é a calculada (mm).

Os três parâmetros restantes estão relacionados com o processo de erosão, de modo que a otimização deve ser feita de acordo com o ajuste dos dados de produção de sedimentos calculados e observados. Como não há valores universalmente aplicáveis para estes três parâmetros de erosão ( $a$ ,  $K_R$  e  $K_I$ ), eles foram otimizados, neste caso, utilizando o método HPC. A faixa em que esses parâmetros podem variar foi escolhida da seguinte forma:  $N_s$  (0,1 a 200 mm),  $a$  (0,001 a 0,1  $\text{kg m}^2$ ),  $K_R$  (0,1 a 10,0  $\text{kg m/N}^{1.5} \text{ s}$ ), e  $K_I$  ( $0,1 \times 10^8$  a  $10,0 \times 10^8 \text{ kg s/m}^4$ ).

Os valores iniciais para os parâmetros de vazão e erosão foram aleatórios e a função objetivo de erosão para minimizar o erro foi dada pela equação (18).

$$J_E = \left| \frac{E_o - E_c}{E_o} \right| \quad (18)$$

em que  $E_o$  é a produção de sedimentos observada (kg); e  $E_c$  é a calculada (kg).

Na Tabela 2, pode ser observado os valores otimizados dos parâmetros de vazão ( $N_s$ ) e dos parâmetros de erosão ( $a$ ,  $K_R$  e  $K_I$ ) do modelo hidrossedimentológico WESP encontrados para cada evento, obtidos através da técnica HPC.

Tabela 2 – Valores otimizados dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico WESP

Data	$N_s$ (m)	$a$ (kg m <sup>2</sup> /s)	$K_R$ (kg m/N <sup>1.5</sup> s)	$K_I$ (kg s/m <sup>4</sup> )	$L_o$ (mm)	$L_c$ (mm)	$E_o$ (kg)	$E_c$ (kg)
02/05/1987	0.0317	0.0265	1.8670	2.0012	2.31	2.31	1214.522	1214.522
06/05/1988	0.0058	0.0009	2.3823	3.1462	7.82	7.82	898.472	898.472
09/05/1989	0.0075	0.0103	1.0603	2.8707	4.79	4.79	1186.172	1186.172
28/05/1990	0.0067	0.0045	1.9487	7.1201	5.17	5.17	793.946	793.946
19/05/1991	0.0045	0.0019	1.1162	8.0178	4.06	4.06	245.539	245.539

## CONCLUSÕES

O método de otimização global – *Host Parasite Co-evolutionary* foi aplicado em um modelo hidrossedimentológico de base física chamado WESP com o objetivo de otimizar os principais parâmetros tanto de vazão quanto erosão, usando os dados coletados na bacia experimental de Sumé, localizada na região semiárida do nordeste brasileiro.

O modelo hidrossedimentológico WESP mostrou-se útil para simulação em pequenas bacias e o método HPC provou ser uma técnica de otimização robusta para determinar os valores do parâmetro de tensão-umidade do solo ( $N_s$ ), do parâmetro de erosão do canal ( $a$ ), do parâmetro de desprendimento do solo ( $K_R$ ), e do fator de erodibilidade do cisalhamento pelo impacto da chuva ( $K_I$ ) dos eventos de cheia selecionados.

## BIBLIOGRAFIA

- Cadier, E. & Freitas, B. J. Bacia Representativa de Sumé; primeira estimativa dos recursos de água. 195p. Recife, SUDENE, 1982.
- Cadier, E., Freitas, B. J. & Leprun, J. C. Bacia Experimental de Sumé; instalação e primeiros resultados. 87p. Recife, SUDENE, 1983.
- Croley, T. E. II.: Unsteady overland sedimentation. J. of Hydrology, Elsevier 56, 325–346, 1982.

- Davis, S. S. Deposition of nonuniform sediment by overland flow on concave slopes. MSc Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 1978.
- Einstein, H. A. Deposition of suspended particles in a gravel bed. J. of the Hydraulic Division, Proc. ASCE, 94(HY5), 1197–1205, 1968.
- Foster, G. R. Modeling the erosion process. In: Hydrologic modeling of small watersheds (ed. by C. T. Haan, H. P. Johnson & D. L. Brakensiek), Am. Soc. Agr. Eng., 295–380, 1982.
- Green, W. H. & Ampt, G. A. Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils. J. Agr. Sci., 4(1), 1–24, 1911.
- Lopes, V.L., & Lane, L.J. Modeling sedimentation processes in small watersheds. In Sediment Budgets, ed. by M. P. Bordas & D.E. Walling, IAHS Publication no. 174, 497–508, 1988.
- McCulloch, J.S.G. & Robinson, M. History of forest hydrology. Journal of Hydrology, 150:189–216, 1993.
- Mehta, A. J. Characterization tests for cohesive sediments. In: H. T. Shen (editor), Proc. of the Conference on Frontiers in Hydraul. Engng. ASCE/MIT, Cambridge, Mass., 79–84, 1983.
- Mishra, S.K. Global Optimization of Some Difficult Benchmark Functions by Host-Parasite Coevolutionary Algorithm. Economics Bulletin, Vol. 33 No. 1, pp.1-18, 2013.
- Salas, J. D.: Analysis and modeling of hydrologic time series, in Handbook of Hydrology, editado por D. R. Maidment, Chap. 19, pp. 19.1-19.72, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1993.
- Santos, C.A.G., Suzuki, K., Watanabe, M. & Srinivasan, V.S. Optimization of coefficients in runoff-erosion modeling by Standardized Powell method, J. Hydrosoci. and Hydraul. Engng, 12(1), 67–78. Japan. Soc. Civ. Engrs, 1994.
- Tucci, C.E.M.: Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.
- Whitehead, P.G. & Robinson, M.: Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts. Journal de Hydrology, 145:217–230, 1993.
- Yang, X. S. & Deb, S. : Cuckoo search via Lévy flights. Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009, India), IEEE Publications: USA, 210-214, 2009.