

# PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO KINEROS2 EM UMA BACIA SERGIPANA

*Ricardo de Aragão<sup>1</sup>, Eduardo Eneas de Figueiredo<sup>2</sup>, Vajapeyam S. Srinivasan<sup>2</sup>,*

*Laércio Leal dos Santos<sup>3</sup>, Fernanda Maria de Lima Paiva<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- O modelo KINEROS2 foi aplicado à sub-bacia do rio Japarutuba-Mirim, secção Fazenda Pão de Açúcar (136 km<sup>2</sup>), em Sergipe, visando determinar o melhor conjunto de valores de parâmetros que permita a simulação de lâmina escoada e vazão de pico (volume escoado) devido a um evento de precipitação. Diferentes grupos de parâmetros foram obtidos a partir da calibração do modelo segundo esses critérios de ajustamento (pico e volume), os quais podem ser utilizados como base para uma avaliação dos efeitos do uso do solo e variabilidade climática na região. Os resultados mostram que a condutividade hidráulica e a rugosidade da superfície são parâmetros governantes do processo de geração do escoamento e, conseqüentemente, da erosão do solo. Apesar de não ter sido desenvolvido para grandes bacias, o modelo conseguiu simular, com boa aproximação, os valores observados e fornecer uma estimativa de produção de sedimentos compatível com as dimensões da bacia.

**ABSTRACT** --- The model KINEROS2 was applied to a sub-basin of the Japarutuba-Mirim river basin, at Fazenda Pão de Açucar (136 km<sup>2</sup>) in the state of Sergipe, with the objective to determine representative parameter values to be used in the runoff simulation. Different groups of parameter values were obtained in the model calibration by comparing simulated peak discharges and volumes with the observed ones, which can be used to simulate the effects of land use change impacts and rainfall variability in the study region. The results showed that the hydraulic conductivity and surface roughness are the governing parameters in the runoff generation and, consequently, soil erosion. Although the model was not developed to simulate processes at large basins, the runoff simulation results approached well the observed values, and also generated sediment yields compatible with the catchment size.

**Palavras-chave:** modelo distribuído, escoamento, erosão do solo, simulação.

---

<sup>1</sup> Prof. da Univ. Federal de Sergipe - SE, Av. Marechal Rondon, s/n Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, 49100-000; e-mail: [ricardoaragao@ufs.br](mailto:ricardoaragao@ufs.br)

<sup>2</sup> Prof. da Univ. Federal de C. Grande-PB; C. Postal 505 CEP: 58.100-970, C. Grande – PB. Fone (83) 3310-1156

<sup>3</sup> Doutorandos em Engenharia Civil - Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, (DECIV/CTG/UFPE), Av Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife/PE. Caixa Postal 7800. CEP: 50741 - 530. Tel: (81) 2126 - 7216. E-mail: [englaercio@yahoo.com.br](mailto:englaercio@yahoo.com.br) ; [fernandamlaipaiva@yahoo.com.br](mailto:fernandamlaipaiva@yahoo.com.br)

# 1 - INTRODUÇÃO

A necessidade de um melhor manejo e aproveitamento dos recursos hídricos, como também o problema de escassez ou falta completa deles tem levado os pesquisadores que lidam com o assunto a procurar relacionar a informação mais importante, o volume escoado ou aproveitável devido a um evento de precipitação, com características da bacia onde o mesmo ocorre. As primeiras iniciativas foram com os modelos empíricos (Singh, 1995; Beven, 2001; Singh e Woolhiser 2002).

Posteriormente, os processos hidrológicos foram traduzidos em equações matemáticas que, de forma mais adequada, procuram fornecer resultados o mais próximo possível do que ocorreria na realidade, dando lugar ao que hoje se conhece como modelos hidrológicos de base física para bacias hidrográficas. Estes modelos são desenvolvidos para fornecerem respostas em diferentes locais da bacia e com um nível de detalhe que depende da necessidade do modelador, com larga aplicação em diversas atividades humanas sendo muitas vezes imprescindível para a tomada de decisão (Singh e Woolhiser 2002).

Dentre as atividades humanas que impactam bacias hidrográficas está o desmatamento, que facilita a remoção e o transporte de sedimentos e nutrientes do solo para corpos hídricos (lagos, rios, reservatórios), reduzindo a produtividade das culturas (o que exige mais área e mais desmatamento) como também poluindo e assoreando os mananciais (o que exige investimentos de dragagem e de produtos para tornar a água potável). Estes impactos também podem ser quantificados com modelos de base física (Figueiredo, 1998; Beven, 2001; Singh e Woolhiser 2002; Canfield et al, 2005). Para tanto, fazem-se necessários dados observados visando ajustar os principais parâmetros do modelo a ponto de fazê-los fornecer respostas coerentes com a área de estudo.

Dentre os modelos de base física disponíveis na literatura está o KINEROS2 proposto por Smith et al. (1995) e que tem sido largamente aplicado em bacias de diferentes tamanhos e diferentes coberturas/usos fornecendo satisfatórios resultados (Srinivasan et al., 2006; Aragão et al., 2006; Santos et al., 2007; Aragão et al., 2008). Dada estas características, este modelo foi aplicado em uma sub-bacia do Rio Japaratuba-Mirim, tributário do rio Japaratuba, na seção fazenda Pão de açúcar, no Estado de Sergipe visando a sua parametrização considerando diferentes rugosidades da superfície e condutividades hidráulicas, que refletem diferentes usos e coberturas vegetais, diferentes texturas para os horizontes que compõe o solo visto ser esta bacia bastante antropizada devido ao extrativismo e a agropecuária. Pretende-se, portanto, reproduzir os valores de escoamento superficial e produção de sedimento observado para diversos eventos monitorados (ou não) e assim caracterizar o impacto das ações humanas sobre os recursos hídricos.

## 2 – A ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Sergipe (área de 22.050 km<sup>2</sup>) é o menor estado da região Nordeste, possui uma população de 1.900.000 (SEPLANTEC, 2000), e tem o extrativismo (petróleo, gás e potássio) e a agropecuária (criação de gado e plantação de cana-de-açúcar) como seus principais meios de geração de riqueza. Por outro lado, todas estas atividades são de grande impacto para o meio ambiente, visto que, tanto para a exploração de petróleo e gás quanto para as atividades agropecuárias, se faz necessária a remoção de vastas áreas de mata nativa, o que causa sérios problemas para o meio ambiente.

As atividades citadas acontecem em todas as bacias que compõe o Estado (Rio São Francisco, Rio Japaratuba, Rio Sergipe, Rio Vaza Barris, Rio Piauí, Rio Real), entretanto, de acordo com estudos efetuados por Fontes (1997), SEPLANTEC (2004) e Aragão e Almeida (2009) destas bacias, a do rio Japaratuba é a que tem sofrido um dos maiores impactos, visto que, tendo uma área de ~1700 km<sup>2</sup>, apenas aproximadamente 8% da mata nativa ainda pode ser encontrada.

A precipitação média na região litorânea do estado é da ordem de 1400 mm/ano e no noroeste de 500 mm/ano (semi-árido sergipano). Na região litorânea o clima é bastante úmido, porém no interior do estado torna-se semi-árido. No Estado, 45% da área total são utilizadas para pastagens, 20% para cultivo irrigado, 17% é de mata secundária, 11% de floresta e os 7% restantes dividem-se entre cidades, mangues, vegetação restinga, dentre outras (SEPLANTEC, 2000; 2004). Os solos das regiões tropicais úmidas (próximo à costa) mostram-se de baixa fertilidade e baixa salinidade, enquanto que os solos da região semi-árida são férteis, mas a salinidade varia de média a alta.

### 2.1 A bacia do Rio Japaratuba

A bacia do rio Japaratuba (10°13'00'' e 10°47'00'' de latitude Sul e 36°48'00'' e 37°19'00'' de longitude) tem sido fortemente impactada ao longo dos últimos séculos até os presentes dias tanto por atividades de extrativismo como por atividades agropecuárias. O rio principal tem uma extensão de aproximadamente 94 km (Figura 1). O período chuvoso ocorre entre os meses de abril e agosto sendo maio os meses de maio e junho os mais chuvosos.

Como uma das suas características a bacia possui três regiões climáticas com diferentes regimes de precipitação: litoral úmido (1000 mm <P<sub>média</sub> < 1400 mm), agreste (700 mm <P<sub>média</sub> < 900 mm) e semi-árido (400 mm <P<sub>média</sub> < 700 mm; período chuvoso entre janeiro e maio), Figura 2. A temperatura média anual é de 25 °C e a umidade relativa do ar é ~74 %.

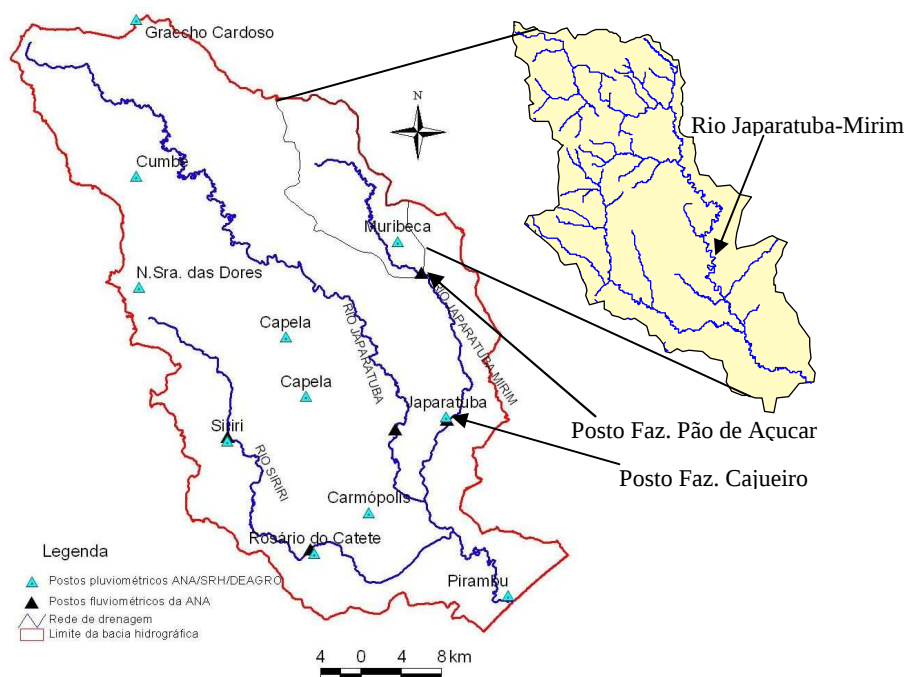


Figura 1 – Bacia do rio Japaratuba e a sub-bacia do rio Japaratuba-Mirim a ser modelada.

A bacia é composta das sub-bacias dos rios Japaratuba (54% da área total), Siriri (23,37% da área total) e Japaratuba-Mirim (~20% da área total). A nascente do rio Japaratuba fica na porção semi-árida da bacia (inseridas no polígono da seca), em uma altitude pouco superior a 240 m. A declividade média do curso principal é de 2,6 m/km, a declividade média do rio Siriri é de 4,1 m/km. A sub-bacia do rio Japaratuba-Mirim, com largura média de 8,83 km e área de drenagem de 335,4 km<sup>2</sup> tem sua nascente no município de Aquidabã (semi-árido), comprimento de ~60km e alcança o rio principal pela sua margem direita (Figura 1).

O monitoramento hidrológico é feito através de estações fluviométricas e o climatológico com estações pluviométricas (convencional), duas estações pluviométricas automáticas, que foram instaladas através do presente projeto de pesquisa (Aragão et al., 2007; Aragão et al., 2008), uma estação climatológica convencional, operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), e duas estações agrometeorológica, instaladas nos municípios de Japaratuba (SRH-SE/CEMESE) e Rosário do Catete (Cia Vale do rio Doce), Figura 1. De acordo com a SRH-SE (SEPLANTEC, 2000; SEPLANTEC, 2004), existem diversos poços tubulares perfurados no interior desta bacia, principalmente na região do curso médio e baixo Japaratuba e é este aporte hídrico 61,67% (110704 m<sup>3</sup>/mês), o principal componente de abastecimento de água da região, sendo o complemento para o abastecimento proveniente de mananciais superficiais (38,32% ou 68800 m<sup>3</sup>/mês).

O potencial hídrico da bacia é baixo se comparado com o das outras bacias do Estado e mesmo assim, tem sido bastante afetado pelos vários usos da terra. A vazão média na área da bacia atinge 3,94 m<sup>3</sup>/s para o posto estação Japaratuba (Figura 3), 0,66 m<sup>3</sup>/s para o posto Fazenda Pão de

Açúcar, 1,70 m<sup>3</sup>/s para o posto Fazenda Cajueiro, 0,81 m<sup>3</sup>/s para o posto Siriri e 3,29 m<sup>3</sup>/s para o posto Rosário do Catete.

O clima na bacia varia de sub-úmido úmido, com excedentes hídricos no fim do outono e inverno, a semi-árido, com elevados valores de evapotranspiração potencial, pronunciada deficiência hídrica durante primavera, verão e outono e umidade somente nos meses de inverno (ocorre nos municípios de Feira Nova, Gracho Cardoso, Cumbe, Aquidabã, localizados no alto Japaratuba). Da área total da bacia, 9,63 % pertencem à região semi-árida, 30,18 % a porção litoral úmido e 60,17 % estão localizadas no agreste (Figuras 1 e 4).

Em recente estudo efetuado através do processamento de imagens dos satélites TM/LANDSAT 5 e ETM+/LANDSAT 7, Aragão e Almeida (2009) constataram que, da cobertura vegetal original, apenas 8% ainda permanecem (Figura 5). O mesmo estudo mostra que a área de pastagem ocupa um total de 32,51 % do total e a área relativa ao cultivo ocupa 41,5% do total e isto, certamente, causou profundas mudanças no balanço hídrico da bacia. Nos municípios de Capela, Japaratuba também tiveram como foco a lavoura e este cultivo, em sua maioria, pode ser atribuído à plantação de cana-de-açúcar, principalmente por causa da recentemente expansão da indústria sucro-alcóoleira, dado que ocorreu o incentivo para o retorno à plantação de cana-de-açúcar e produção de álcool. Já os municípios de Aquidabã e Muribeca tiveram como o foco de atividades a pecuária (Aragão et al., 2008; Aragão e Almeida, 2009)..

As manchas de solo predominantes na área da bacia são as do tipo podzólicos vermelho amarelo e podzólicos vermelho amarelo equivalente eutrófico seguidas de latosolo vermelho amarelo e solos aluviais. Maiores informações sobre a bacia e os estudos hora em andamento poderão ser vistos em Fontes (1997), Aragão et al. (2008), Aragão e Almeida (2009).

### **3 – METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi necessária a coleta de dados sobre escoamento, clima, características da bacia, bem como visitas periódicas à área da bacia. A partir de então os dados necessários para a modelagem foram gerados.

#### **3.1 - Dados utilizados**

Os dados sobre uso do solo, vegetação, localização dos postos pluviométricos, fluviométricos, uso e tipo de solo e outros a eles pertinentes foram disponibilizados pela Secretaria do Meio ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH-SE), através do Atlas de Recursos Hídricos (SEPLANTEC, 2004). Os dados de vazão são provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA), via portal HIDROWEB (ANA, 2002), e coletados pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM.

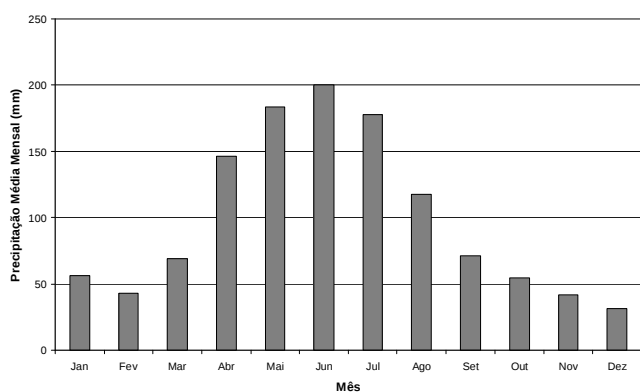


Figura 2 - Precipitação média mensal no médio Japarutuba (Faz. Pirangi-01037078) Fonte: ANA (2002)

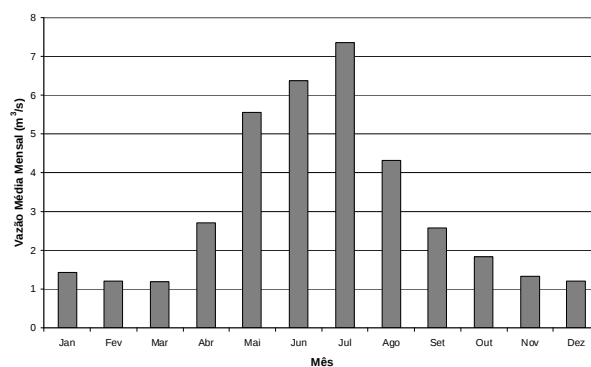


Figura 3 - Vazão média mensal na estação de medição no rio Japarutuba estação Japarutuba (50040000) - Fonte: ANA (2002)

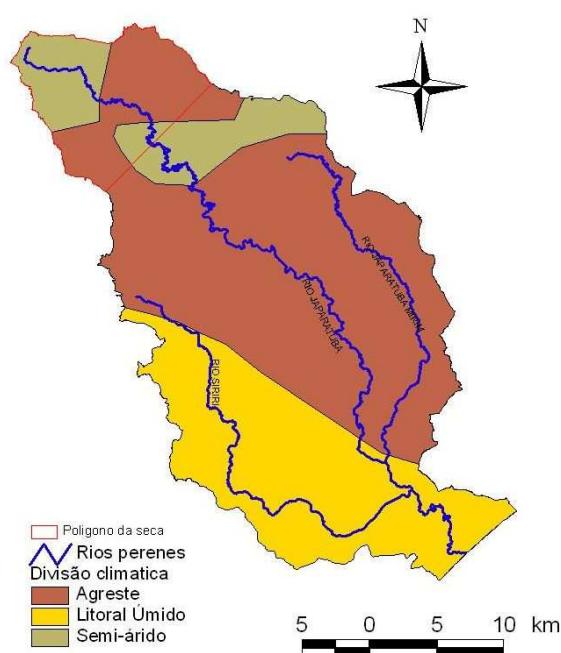


Figura 4 – Regiões climáticas na área da bacia (Fonte: SEPLANTEC, 2004)

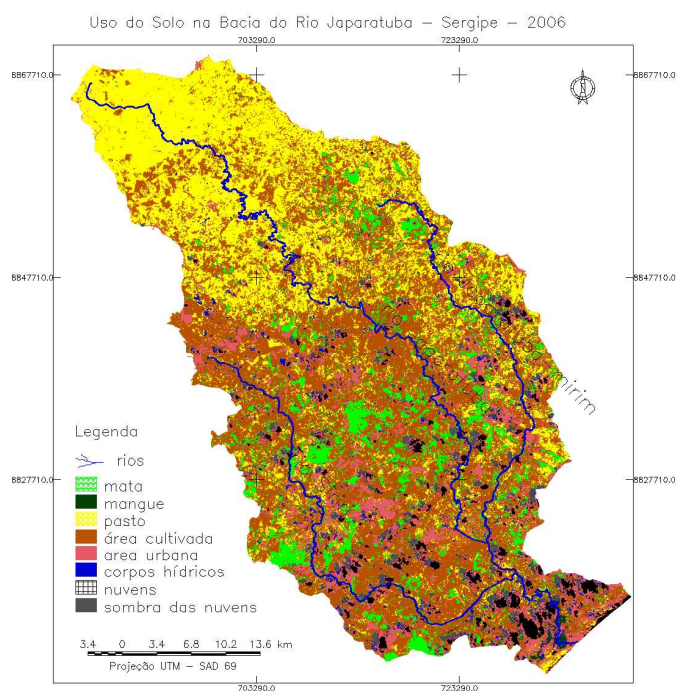


Figura 5 – Uso do solo na área da Bacia do Rio Japarutuba (Fonte: Aragão e Almeida, 2009)

Os dados de precipitação, distribuídos no tempo, bem como os dados de clima (evaporação, temperatura) são provenientes da estação Fazenda Experimental Pirangi – latitude 10°29' Sul e longitude 37°04' Oeste (código 01037078), localizada no município de Capela, monitorada pela CPRM/ANA e que cobrem o período de 1990 a 2005. Os detalhes sobre a geologia e uso de solo são oriundas do trabalho feito por Fontes (1997), SEPLANTEC (2000) e SEPLANTEC (2004).

De acordo com ANA (2002) e SEPLANTEC (2004), foram instaladas na bacia cinco estações fluviométricas (ANA, 2002), Figura 1, e destas, as instaladas no curso principal do rio Japarutuba-Mirim, Fazenda Pão de Açúcar e Fazenda Cajueiro, fornecem condições ideais para a aplicação do modelo sob análise visto que estão aninhadas. Destas duas seções, a estação Fazenda Pão de Açúcar possui área de contribuição próxima de 100 km<sup>2</sup>, que é o requisito para aplicação do modelo

KINEROS2 (Smith et al., 1995). Assim, nas simulações aqui realizadas, considerou-se esta seção e os dados de vazão média dela provenientes, correspondentes ao período 1973 a 2005 por estarem os mesmos consistidos.

Em levantamento inicial sobre a área de contribuição para a seção Fazenda Pão de Açúcar foi observado uma incompatibilidade entre os dados contidos no HIDROWEB, os dados do mapa da região e também os dados do Atlas de Recursos Hídricos (SEPLANTEC, 2004). Assim, procurando discernir esta e outras dúvidas, foram efetuadas diversas campanhas de campo na área da bacia para verificar, com apoio de GPS, os reais contribuintes para esta bacia e finalmente a sua área de drenagem. Foi constatado que a bacia de contribuição tem de fato uma área de 136 km<sup>2</sup>.

A partir da informação acima, e tomando-se como base os dados da missão topográfica radar Shuttle (SRTM), em espaçamento de 90 m x 90 m (Miranda, 2005) foi gerado o modelo tridimensional do terreno visando à delimitação da bacia em sub-bacias ou planos topográficos.

Além da necessidade destas informações, a aplicação de um modelo de base física a uma dada bacia implica na disponibilidade de dados sobre características do solo (textura do solo, granulometria, quantidade de horizontes e suas profundidades), tipo de cobertura, topografia e levantamento plani-altimétrico. Considerando que nem todas estas informações estão disponíveis para a área em questão, parte dos dados necessários foi adotada a partir de valores sugeridos na literatura (Chow, 1988).

Dada a área da bacia (136 km<sup>2</sup>), a diversidade de uso e tipo de solo e considerando os dados de vazão, observou-se que, na maioria dos hidrogramas o intervalo de tempo entre a ascensão e a recessão cobre diversos dias. Para tanto, é esperado que não somente um, mas vários eventos de precipitação contribuam para a geração deste escoamento. Assim sendo, aproveitando uma característica do KINEROS2 de redistribuir a umidade do solo entre eventos (Smith et al., 1995), a seleção dos eventos de precipitação utilizados no presente trabalho cobrem não somente um único intervalo e sim um ou mais dias com chuva, o que corresponde ao período de geração do hidrograma.

A partir de uma análise previa e comparativa entre os dados de precipitação disponíveis e os respectivos hidrogramas resultantes hidrogramas relativos a pequenos, médios e grandes volumes/vazão de pico foram selecionados em um total de 12 eventos. A seguir, foi efetuada a separação do escoamento de base e o superficial para cada hidrograma e, posteriormente, os volumes a eles associados foram transformados em lâminas.

### **3.2 – O modelo KINEROS2**

O modelo KINEROS2 – Kinematic Runoff Erosion model (Smith et al., 1995) é uma versão avançada do modelo KINEROS (Woolhiser, 1990) tem como principal característica o fato de possuir equações que são baseadas nos processos físicos que norteiam a infiltração, o escoamento

superficial, e a erosão que ocorrem nas vertentes e nos rios. A bacia é representada (discretizada) no modelo através de um conjunto de planos retangulares e de elementos de canais, em forma trapezoidal, com os planos contribuindo para os canais com fluxo lateral ou na sua entrada de montante.

Por ser distribuído, cada elemento, plano ou canal, poderá ter um conjunto de parâmetros que o caracteriza e que podem ser únicos. O modelo utiliza a equação de Saint Venant com a simplificação da onda cinemática para a propagação do escoamento superficial unidimensional nos planos e nos canais. O processo de infiltração é modelado para uma chuva não permanente através do modelo de Smith e Parlange (Smith et al. 1995) dada através da equação:

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha/B} - 1} \right] \quad (1)$$

sendo  $f_c$  a taxa de infiltração,  $K_s$  a condutividade hidráulica saturada,  $\alpha$  é o parâmetro que representa o tipo de solo,  $B = (G + h)(\theta_s - \theta_i)$  é o fator que combina o potencial de capilaridade  $G$  e a capacidade de armazenamento de água do solo,  $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i)$ ,  $h$  é a profundidade de fluxo,  $\theta_s$  e  $\theta_i$  são as umidades volumétricas de saturação e inicial, com  $\theta_i = \phi \cdot S_i$ ,  $\phi$  é a porosidade e  $S_i$  é a saturação inicial do solo. O parâmetro  $\alpha$  que representa o tipo de solo se aproxima de 0 para uma areia e, neste caso, a Equação (1) aproxima-se à equação de Green-Ampt, e de 1 para um solo areno-argiloso (“loam well-mixed”), em cujo caso a Equação (1) representa a equação de infiltração de Smith e Parlange.

O potencial de capilaridade é determinado pela equação abaixo:

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad (2)$$

onde  $K(\Psi)$  é a condutividade hidráulica do solo dependente do potencial mátrico do solo ( $\Psi$ ) e  $K_s$  a condutividade hidráulica saturada do solo.

O modelo de infiltração também leva em consideração a recuperação da capacidade de infiltração do solo, a qual ocorre em períodos em que não há precipitação, ou em períodos em que a precipitação não produz escoamento, geralmente quando a intensidade de precipitação é inferior à permeabilidade do solo. A equação utilizada no modelo para o cálculo da variação da umidade do solo nestes períodos é a seguinte:

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[ r - K_i - \left( K(\theta_0) + \frac{\beta p K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right] \quad (3)$$

onde  $\Delta\theta_{i0} = \theta_0 - \theta_i$  é diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento;  $I$  é a lâmina de infiltração acumulada (m);  $r$  é a taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água no solo, a qual pode ser menor do que a permeabilidade  $K_s$ , negativa (devido à evaporação) ou zero;  $\beta = \frac{1}{Z(\theta_0 - \theta_i)} \int_0^Z (\theta - \theta_i) dz = 0,85$  é um fator de forma;  $Z$  é a profundidade

da frente de molhamento;  $p$  é um fator efetivo de profundidade ( $p = 2$  para  $r = 0$ ;  $p = 1,5$  para  $0 < r < K_s$ ;  $p = 3$  para  $r < 0$ );  $G(\theta_r, \theta_0)$  é o valor efetivo do potencial de capilaridade na frente de redistribuição de água.

Nos períodos, onde a umidade do solo está abaixo da umidade de saturação, a equação utilizada para calcular a condutividade hidráulica do solo é (Brooks e Corey, 1964):

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2/\lambda} \quad (4)$$

onde  $\theta$  é a umidade do solo no período de redistribuição de água;  $K_s$  é a condutividade saturada;  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são as umidades residual na saturação;  $\lambda$  é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros.

### 3.2.1 - Fluxo nos planos

Para a modelagem desta componente, o KINEROS2 utiliza as equações de Saint Venant com a simplificação da onda cinemática para a propagação do escoamento superficial unidimensional nos planos e nos canais:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (5)$$

onde  $h$  é o volume de água armazenado por unidade de área, os parâmetros  $a$  e  $m$  são relacionados à inclinação, à rugosidade da superfície e ao regime do fluxo,  $t$  é o tempo,  $x$  é a distância ao longo do sentido da inclinação, e  $q(x, t)$  é a taxa de fluxo lateral.

### 3.2.2 - Fluxo nos canais

O escoamento nos canais é simulado considerando o fluxo não-permanente e também se baseia na aproximação da onda cinemática. Os canais podem receber fluxo lateral uniformemente distribuído, mas variável com o tempo, proveniente de planos ou de um ou dois canais, em somente um ou nos seus dois lados:

$$Q = aR^{m-1}A \quad (6)$$

onde  $Q$  é a vazão no canal ( $m^3/s$ ),  $R$  é o raio hidráulico (m),  $A$  é a área da seção transversal ( $m^2$ ). Se for utilizada a equação de resistência de Manning,  $a = S^{1/2}/n$  e  $m = 5/3$ . As equações cinemáticas para os canais são resolvidas por uma técnica implícita de diferenças finitas definido em quatro pontos, similar ao que foi feito para os planos.

### 3.2.3 – Erosão do solo

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

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t) \quad (7)$$

onde  $C_s$  é a concentração de sedimento no fluxo ( $m^3/m^3$ ),  $Q$  é a vazão hidráulica ( $m^3/s$ ),  $A$  é a área da seção transversal do plano ou canal ( $m^2$ ),  $e$  é a taxa de erosão do solo ( $m^2/s$ ) e  $q_s$  é taxa de entrada lateral de sedimento no fluxo, nos canais ( $m^3/s/m$ ).

O processo erosivo sobre os planos ocorre pelo impacto das gotas de chuva ( $e_s$ ) e a erosão e transporte pelo fluxo superficial ( $e_h$ ). Por outro lado, a erosão causada pelo fluxo superficial leva em consideração a capacidade que o fluxo possui de erodir e transportar a carga erodida. Caso não haja capacidade para tal haverá a deposição do excesso desagregado e em movimento. No modelo KINEROS2, a erosão hidráulica é simulada através da aplicação da equação modificada de Engelund-Hansen (Smith et al., 1995). Uma vez em movimento, os sedimentos chegam ao leito do canal através da alimentação na extremidade de montante ou através de uma distribuição lateral. A erosão total causada pela chuva e pelo escoamento é:

$$e = e_s + e_h \quad (8)$$

onde  $e_s$  e  $e_h$  são dados pelas equações:

$$e_s = c_f e^{(-c_h h i^2)} \quad (9)$$

$$e_h = c_o (C_m - C_s) A \quad (10)$$

onde  $i$  é a intensidade da precipitação;  $C_f$  é um coeficiente relacionado às propriedades do solo e da superfície e deve ser determinado experimentalmente ou por calibração;  $e^{(-c_h h i^2)}$  é um fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas de chuva devido ao aumento da profundidade de fluxo ( $h$ );  $C_h$  representa a efetividade do amortecimento da superfície da água, assumido igual a 656;  $C_m$  é a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte;  $C_s = C_s(x,t)$  é a concentração real de sedimentos no fluxo;  $g$  é a aceleração da gravidade,  $S_s$  é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65,  $d$  é o diâmetro do sedimento e  $C_o$  é um coeficiente da taxa de transferência de sedimentos dado pelas equações abaixo para as condições de erosão e deposição;

$$C_o = c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s \leq C_m \text{ (erosão)} \quad (11)$$

$$C_o = \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s > C_m \text{ (deposição)} \quad (12)$$

onde  $v_s$  é a velocidade de queda da partícula e  $h$  a profundidade de fluxo.

O modelo utiliza a fórmula de capacidade de transporte de Engelund e Hansen (1967), com a inclusão de um limite crítico do valor da potência unitária do fluxo  $\Omega = uS$  (*Unit Stream Power*) igual a 0,004 m/s, onde  $u$  é a velocidade do fluxo e  $S$  é a declividade do canal. A equação para o cálculo da capacidade de transporte é a seguinte:

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - 0,004) \quad (13)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $S_s$  é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65,  $d$  é o diâmetro do sedimento e  $h$  a profundidade de fluxo.

A simulação do transporte de sedimentos para os canais é realizada de maneira semelhante à simulação do transporte de sedimentos nos planos. A principal diferença nas equações é que a erosão por impacto das gotas de chuva é desprezada, e o termo  $q_s$  torna-se importante na representação da entrada de fluxo lateral.

### 3.3 – Os parâmetros do modelo

As equações que fazem parte do modelo KINEROS2, e que representam os processos do ciclo hidrossedimentológico, possuem vários parâmetros que precisam ser determinados antes das simulações. Trabalhos anteriores, realizados com o modelo KINEROS2 (Canfield et al., 2005; Srinivasan et al., 2006; Aragão et al., 2008) mostram que existe uma grande sensibilidade da resposta do modelo (lâmina e produção de sedimentos) aos seguintes parâmetros:  $S_i$  (saturação inicial relativa -  $\theta = \phi S_i$ ),  $K_s$  (condutividade hidráulica saturada),  $G$  (potencial de capilaridade),  $n$  (coeficiente de Manning),  $C_f$  (coeficiente relacionado às propriedades do solo e da superfície) e,  $C_g$  ou  $C_o$  (coeficiente da taxa de transferência de sedimentos).

Por ser KINEROS2 um modelo que simula eventos individuais, a saturação anterior deverá ser informada no início do evento e, portanto, é um parâmetro que deve ser calibrado, visto que desta informação depende o valor do escoamento superficial e, por consequência, a produção de sedimentos calculada. Os outros parâmetros citados poderão ser também estimados com base em características da bacia (Lopes e Canfield, 2004) ou calibrados.

## 4 - DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS

### 4.1 - Discretização da Bacia

Para a aplicação do modelo KINEROS2 a uma bacia hidrográfica a transformação de sua área de vertente em elementos planos retangulares e os seus cursos de água em canais trapezoidais é requisito fundamental. Esta representação e o número de elemento a ela associada é crucial para que os resultados do modelo sejam coerentes com os valores observados (Lopes e Canfield, 2004; Santos et al., 2007). No presente trabalho a bacia de contribuição para a seção Fazenda Pão de Açúcar foi discretizada em 93 elementos (66 planos e 27 canais). Para realizar estas discretizações, inicialmente foi efetuada a modelagem digital do terreno (Figura 6) para verificação dos planos e canais. A partir destas foram consideradas as características de cobertura vegetal, rede de drenagem, declividade e a topografia, cujos resultados estão mostrados na Figura 7.

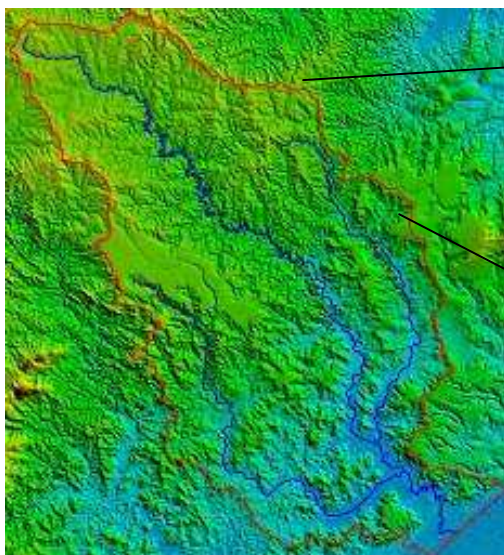


Figura 6 – modelo digital do terreno da bacia do rio Japaratuba

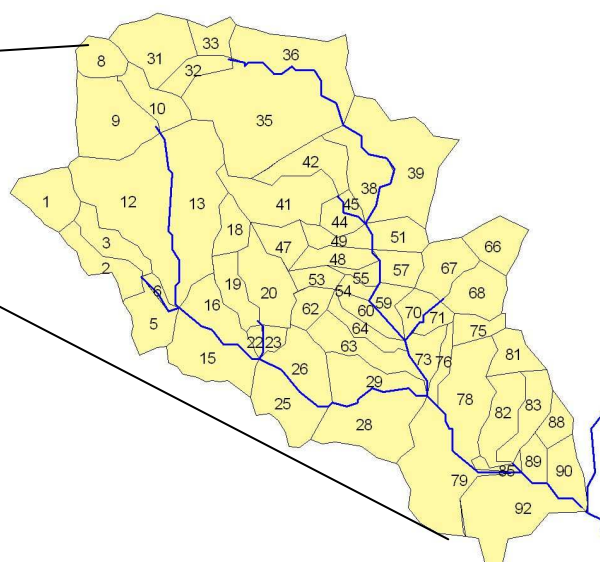


Figura 7 - Discretização da bacia em 93 elementos

Considerando que a cobertura da região é praticamente formada por pastagem, área de cultivo e mata secundária, foram utilizados, inicialmente, para cada parte da bacia, valores diferenciados para o coeficiente de rugosidade de Manning,  $n$ , indicados por Chow (1988) e Imam (2000) e fixado em 0,035, para canais, e entre 0,17 e 0,40 para planos. Segundo Chow et al. (1988) o valor do número de Manning influencia mais a forma do hidrograma simulado do que o volume escoado. Neste estudo será verificada, inicialmente, a capacidade do modelo em simular a lâmina, vazão de pico, volume escoado para, posteriormente, simular a produção de sedimentos.

Dado que o objetivo do presente trabalho é determinar o melhor conjunto de parâmetros que faça com que o modelo simule o escoamento superficial o mais próximo do observado e, como consequência, forneça valores de produção de sedimentos realistas para a área da bacia, diversas abordagens foram utilizadas, considerando para tanto, no primeiro momento, que o solo na região da bacia é formado por um só horizonte e no segundo momento que o solo é formado por dois horizontes, sendo o primeiro com 30 cm de profundidade. Este valor de profundidade no primeiro horizonte foi assumido a partir de observações em várias partes da bacia, durante as visitas de campo, e nos trabalhos de Fontes (1997) e EMBRAPA (1999).

Inicialmente, e considerando um horizonte único, procurou-se calibrar o valor de  $S_i$  visando fazer com que o escoamento superficial simulado fosse próximo do observado, mas não foram conseguidos bons resultados. Assim, considerando que os picos de vazão exercem influência considerável sobre a produção de sedimentos, foram fixados os valores de  $S_i$ ,  $G$ ,  $C_g$  e  $Co$ , compatíveis com as indicações da literatura para a faixa de textura do solo (argiloso), e foi calibrado o valor de  $K_s$ , através do procedimento de tentativa e erro, procurando fazer com que a vazão de pico simulada aproximasse do valor observado. Visto que, na maioria dos eventos, foi possível simular valores de vazão de pico próximos do observado, foi empregada a mesma abordagem para

simular a lâmina observada, ou seja, calibrar o valor de  $K_s$ . Para estas duas situações e considerando um único horizonte, os parâmetros do modelo foram os seguintes:  $S_i = 0.65$ ,  $G = 200$  mm,  $\phi = 0.464$ .

Posteriormente, considerando que a bacia é formada por solos de duas camadas (fato que condiz com a realidade), que além da vazão de pico o volume do hidrograma superficial também influencia o valor da produção de sedimento, que a condutividade hidráulica é uma característica intrínseca do solo e que, a priori, não varia de evento a evento, foram efetuadas simulações com diferentes texturas de solo (Rawls et al., 1982). O objetivo deste procedimento foi de identificar a rugosidade superficial (número de Manning) e os parâmetros de infiltração para as duas camadas, que possibilite a simulação de volume observado em um maior número de eventos.

Apesar de influenciarem o valor de produção de sedimentos, as vazões de pico são mais efetivas para o dimensionamento de obras para eventos extremos e por isso, decidiu-se calibrar  $S_i$  para simular o volume escoado. Imam (2000) fornece uma série de valores de  $n$  de Manning relacionados com a condição de bacia que vão desde a condição de bacia desmatada até a condição de bacia com cobertura vegetal preservada, o que gera uma larga faixa de valores de  $n$ . Entretanto, considerando que a região sob análise passou por momentos de completa remoção da cobertura vegetal, para dar lugar à pastagem até a renovação desta cobertura com mata secundária ou capoeira (SEPLANTEC, 2004; Aragão et al., 2008; Aragão e Almeida, 2009), decidiu-se verificar os dois casos extremos de condições de cobertura e uso do solo, através do número de Manning, que foi fixado hora em 0,24 e depois assumiu valor de 0,40.

Para estas simulações, faz-se necessário o conhecimento da textura do solo nas várias partes que compõe a bacia, o que não está disponível no momento. Entretanto, mesmo que esta informação existisse teria que ser proveniente de amostras em número suficiente para ser representativo de uma bacia de 136 km<sup>2</sup>.

De acordo com Fontes (1997) e SEPLANTEC (2004) a bacia de contribuição da seção Fazenda Pão de Açúcar esta, praticamente, toda inserida na área cujo solo é do tipo podzólicos vermelho amarelo equivalente eutrófico ou Luvisolos (Fontes, 1997; EMBRAPA, 1999) que são solos pouco profundos (60 a 120 cm), argilosos, com seqüência de horizontes A e B e nítida e com saturação de bases altas. Por isso, as considerações de diferentes texturas tiveram de ser efetuadas para os dois horizontes considerados (A e B), visto que para estes a textura varia de franco argilosa a argilosa. Com base nas visitas de campo em diversos pontos da bacia, procurou-se ver os locais onde o perfil do solo estava a amostra, e assim foi possível observar que, tanto para o primeiro como para o segundo horizonte existe uma tendência para uma textura argilosa. Desta forma, foram utilizados, inicialmente, os valores que constam na Tabela 1 e que são valores médios citados por Rawls et al. (1982).

Tabela 1 – Valores de  $n$  de Manning e tipos de textura para dois horizontes do solo (Fonte: Rawls et al., 1982)

| $n$         | Horizonte | Textura                | Porosidade ( $\phi$ ) | Saturação Efetiva | Distribuição do tamanho de poros | $G$ (mm)   | $K_s$ (mm/h) |
|-------------|-----------|------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|------------|--------------|
| <b>0,24</b> | A         | Franco Arenosa         | 0,453                 | 0,412             | 0,38                             | 130        | 26           |
|             | A         | Franco                 | 0,463                 | 0,434             | 0,25                             | 110        | 13           |
|             | A         | Franco Areno Argilosa  | 0,398                 | 0,330             | 0,32                             | 260        | 4,3          |
| <b>0,40</b> | A         | Franco Arenosa         | 0,453                 | 0,412             | 0,38                             | 130        | 26           |
|             | A         | Franco                 | 0,463                 | 0,434             | 0,25                             | 110        | 13           |
|             | A         | Franco Areno Argilosa  | 0,398                 | 0,330             | 0,32                             | 260        | 4,3          |
|             | <b>B</b>  | <b>Franco Argilosa</b> | <b>0,464</b>          | <b>0,390</b>      | <b>0,24</b>                      | <b>260</b> | <b>2,3</b>   |

A partir dos valores de precipitação dos intervalos de eventos de chuva e da propriedade de redistribuição de umidade entre evento do KINERO2 (Smith et al. 1995), procurou-se calibrar o valor de saturação inicial,  $S_i$ , considerando o volume escoado no intervalo de precipitações escolhido. Este procedimento foi empregado para a combinação de número de Manning e parâmetros relativo a cada textura do solo, presentes na Tabela 1. No que diz respeito à produção de sedimentos (SedYield), não há a disponibilidade de dados sobre amostras coletadas para os eventos sob análise de forma que, não será possível a calibração dos parâmetros relacionados ao processo erosivo,  $C_f$  e  $C_o$ . Ao invés disso, os valores destes parâmetros foram fixados em  $C_f=1000$  e  $C_o=0,01$ , visto que, de acordo com Srinivasan et al. (2006) e Santos et al. (2007), para a simulação do processo erosivo em sub-bacias os resultados da simulação não são sensíveis ao valor de  $C_f$  se comparada a variação de  $C_o$ , que diminui com o aumento da área da bacia

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da metodologia descrita nos itens anteriores resultou nos dados contidos nas Tabelas 2 a 5. Observa-se na Tabela 2 que foi possível calibrar o valor de  $K_s$  para todos os eventos sob análise tanto para  $n=0,24$  quanto para  $n=0,40$ . Por outro lado, os valores de  $K_s$  para as simulações com  $n=0,40$  foram ligeiramente menores do que para  $n=0,24$ , sendo justificado pelo fato de que um maior valor de  $n$  significa uma maior rugosidade (ou vegetação do tipo arbustos – Iman, 2000), o que levaria a uma maior infiltração da água que escoar, de forma que, para o modelo gerar uma lâmina próxima ao observado, a condutividade teve que ser menor. Em termos médios, os valores de  $K_s$  para as duas condições de  $n$  foram, aproximadamente os mesmos ( $n=0,24$  e  $K_{s_{\text{méd}}}=1,56$  mm/h;  $n=0,40$  e  $K_{s_{\text{méd}}}=1,30$  mm/h); Por outro lado, dado que a condutividade hidráulica é função da umidade como também do potencial de sucção ( $G$ ), a fixação de um valor de  $S_i$  e  $G$  podem ter influenciado os baixos valores de  $K_s$ . Considerando o conjunto de parâmetros  $S_i$ ,  $K_{s_{\text{méd}}}$ ,  $G$  e porosidade e tomando-se por base o trabalho de Rawls et al. (1982) este solo teria

textura do tipo franco argilosa ou franco silt-argilosa que, de certa forma, confirma a suposição feita inicialmente.

Há de ser dito que nas simulações para lâmina, apesar dos valores calculados serem próximos aos observados, as vazões de pico calculadas foram bem maiores, tendo sido este o motivo de se tentar calibrar o parâmetro  $K_s$  considerando, no primeiro instante, a lâmina observada como referência e em um segundo momento, a vazão de pico observada como referência. Para um  $S_i=0,65$ , o que significa que o solo estava relativamente saturado e propício para gerar escoamento superficial, foi necessário valores de  $K_s$ , relativamente baixos, para que o modelo simulasse os valores de lâmina, que são baixos para todos os eventos.

No que diz respeito à calibração do parâmetro  $K_s$  para simulação de vazão de pico (Tabela 3), também foi possível ajustar o valor simulado ao observado em todos os eventos. Entretanto, os valores de  $K_s$  para as simulações foram superiores aos encontrados nas simulações para lâmina. Neste caso, como os picos simulados foram, em sua maioria, bem elevados, foram necessários valores altos de  $K_s$  (levando a uma maior infiltração) para o mesmo valor de  $S_i$ , para fazer com que a vazão de pico simulada aproximasse do valor observado. Em média, para estas simulações, o valor de  $K_s$  para  $n=0,24$  foi maior ( $K_s=3,84$  mm/h) do que para  $n=0,40$  ( $3,08$  mm/h), tendo como provável explicação a fornecida acima para a questão da lâmina simulada, ou seja, como  $n=0,40$ , significa uma rugosidade maior, o que força uma maior infiltração ou maior empoçamento, e com isto, foi necessário um menor valor de  $K_s$  para que o modelo simulasse uma vazão de pico próximo da observada.

Por outro lado, quando o solo foi considerado composto de dois horizontes (A com espessura de 0,30 m e B infinito) outras considerações tiveram de ser feitas, visto que até o presente, não estão disponíveis ensaios de granulometria em número suficiente para uma caracterização da textura na área da bacia. Para esta condição foi fixado os valores de  $K_s$  (Tabela 1) para os dois horizontes e calibrado o valor de  $S_i$  procurando ajustar o valor de volume escoado evento a evento (Tabelas 4 e 5). Assim, a combinação dos valores listados na Tabela 1 que permitiu a calibração do parâmetro  $S_i$  para um maior número de eventos, onde valores simulados e observados de volume escoados estiveram próximos, foi para a condição  $n=0,24$ , textura Sandy clay loam (franco areno argilosa-  $K_s=4,3$  mm/h) na primeira camada (0,3m) e textura Clay loam (franco argilosa -  $K_s=2,3$  mm/h) na segunda camada. Este fato também foi constatado através do gráfico de dispersão entre valores de volume observado e calculados (Figura 8) onde o coeficiente de determinação para a combinação acima foi igual a  $R^2 = 0,838$ .

Outro ponto a ser levantado é que, diferentemente do que ocorreu quando foi utilizado  $n=0,24$ , textura franco-areno-argilosa na primeira camada e franco argilosa na segunda camada (Tabela 1), para as outras combinações o valor de saturação inicial relativa,  $S_i$ , esteve sempre muito

próximo da unidade, indicando que outro parâmetro além de Si deve receber maior atenção no que diz respeito à calibração. Observa-se também que, tanto para um só horizonte como também para dois horizontes de solo o valor de Ks da camada mais externa esteve na mesma ordem de grandeza, ou seja,  $\sim K_s = 4 \text{ mm/h}$ , o que pode ser um indicador da tendência geral para a bacia. O fato de o valor de n que propiciou melhores resultados ter sido 0,24 é bem compatível com a realidade, visto que Iman (2002) fornece para pastagem rala de planície (Short grass prairie) um  $n=0.15$  e para pastagem densa (Dense grasses),  $n=0.24$ . Como a tradição da região estudada é a criação de gado e os eventos cobrem diferentes períodos é de se esperar uma compatibilidade com  $n=0,24$ .

As dificuldades encontradas para simular escoamento superficial (lâmina ou vazão de pico) e prever produção de sedimentos na bacia do rio Japarutuba-Mirim através do KINEROS2 são, de certa forma, esperadas, tendo em vista o fato de ser a área da bacia superior ao requisito do modelo ( $100 \text{ km}^2$ ) o que pode fazer com que as equações de propagação de fluxo e suas simplificações fiquem fora da sua faixa de emprego. Isto já foi também observado por Singh (1995) com uma bacia cuja área é  $150 \text{ km}^2$ , mas no presente trabalho os resultados foram bastante promissores.

Em se tratando de cálculo de produção de sedimentos, como não havia dados disponíveis sobre amostras de sedimentos, não foi possível a calibração dos parâmetros  $C_f$  e  $C_o$ , relacionados a esta variável. Desta forma, o valor fornecido pelo modelo foi o mais próximo do que deveria ser observado em bacias desta dimensão caso houvesse medição de sedimento. Isto foi observado por Figueiredo (1998) com simulações em elementos de  $100 \text{ m}^2$  até bacias de  $\sim 100 \text{ km}^2$ , onde ele mostra que para esta última, a produção de sedimentos anual fica abaixo de  $10 \text{ t/km}^2$  ou  $100 \text{ kg/ha}$ .

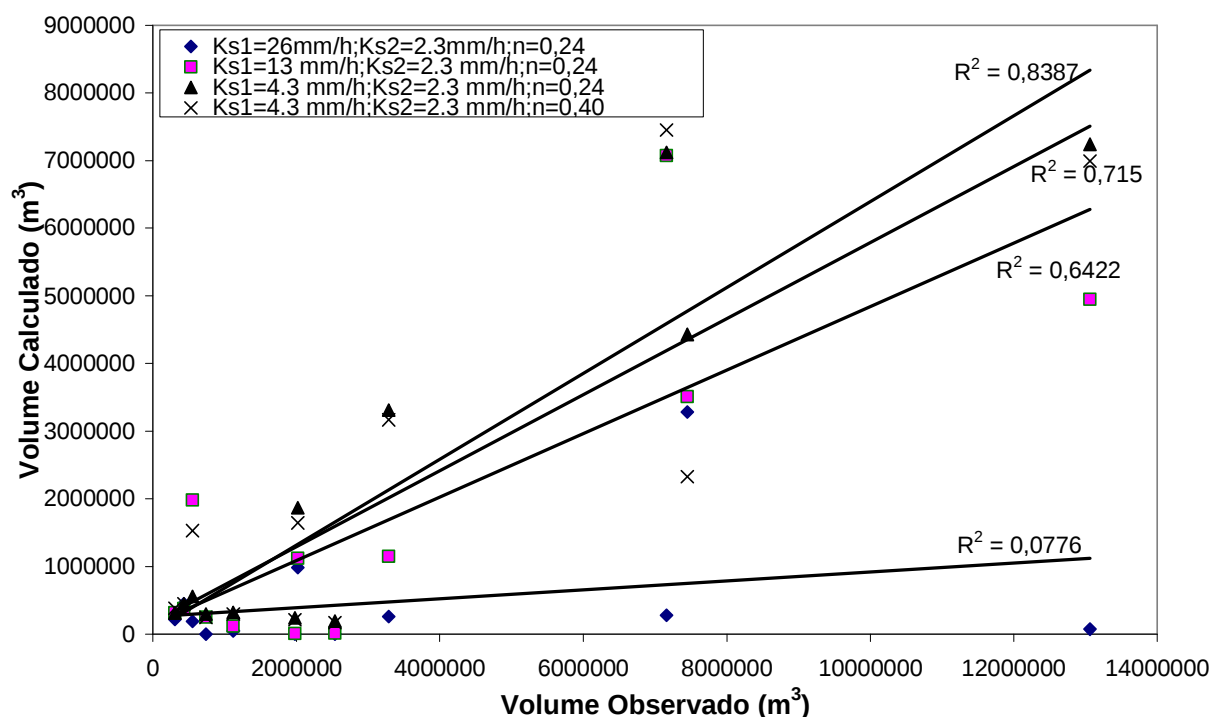


Figura 8 – Comparação entre valores de volume calculado e observados para diferentes Ks e n.

Tabela 2 – Calibração da condutividade hidráulica para ajuste de lâmina escoada considerando dois valores do n de Manning

| EVENTO | DATA             | CHUVA  | QO                | VOL            | LO    | Si   | G   | n de Manning = 0,24 |       | n de Manning = 0,40 |       |
|--------|------------------|--------|-------------------|----------------|-------|------|-----|---------------------|-------|---------------------|-------|
|        |                  |        |                   |                |       |      |     | Ks                  | Lcalc | Ks                  | Lcalc |
|        |                  | mm     | m <sup>3</sup> /s | m <sup>3</sup> | mm    |      | mm  |                     | mm    |                     |       |
| 1      | 30/05 A 01/06/01 | 37,91  | 5,026             | 434246,40      | 3,18  | 0,65 | 200 | 2,0                 | 3,00  | 1,70                | 3,17  |
| 2      | 05/05 a 11/05/02 | 77,42  | 23,39             | 2020896,00     | 14,80 | 0,65 | 200 | 1,40                | 14,40 | 1,25                | 14,51 |
| 3      | 23/05 a 27/05/02 | 44,55  | 12,97             | 1120176,00     | 8,20  | 0,65 | 200 | 0,24                | 8,42  | 0,19                | 8,11  |
| 4      | 02/07 a 06/07/02 | 39,68  | 29,34             | 2534976,00     | 18,56 | 0,65 | 200 | 0,16                | 18,64 | 0,13                | 18,57 |
| 5      | 09/07 a 12/07/02 | 26,54  | 22,93             | 1981152,00     | 14,51 | 0,65 | 200 | 0,03                | 14,39 | 0,02                | 14,55 |
| 6      | 03/11 a 08/11/03 | 173,84 | 82,89             | 7162041,60     | 52,45 | 0,65 | 200 | 3,06                | 52,54 | 3,08                | 52,24 |
| 7      | 10/01 a 14/01/04 | 87,71  | 3,53              | 304992,00      | 2,23  | 0,65 | 200 | 3,16                | 2,44  | 2,90                | 2,26  |
| 8      | 15/01 a 21/01/04 | 89,09  | 38,07             | 3288816,00     | 24,08 | 0,65 | 200 | 2,20                | 24,09 | 1,70                | 24,03 |
| 9      | 26/01 a 02/02/04 | 140,10 | 86,22             | 7449494,40     | 54,55 | 0,65 | 200 | 0,83                | 54,56 | 0,68                | 54,54 |
| 10     | 29/06 a 01/07/04 | 33,41  | 8,55              | 738979,20      | 5,41  | 0,65 | 200 | 0,68                | 5,60  | 0,55                | 5,25  |
| 11     | 29/03 a 31/03/05 | 49,25  | 6,38              | 551232,00      | 4,04  | 0,65 | 200 | 4,30                | 4,27  | 3,30                | 4,49  |
| 12     | 01/05 a 06/05/05 | 136,50 | 151,21            | 13064544,00    | 95,67 | 0,65 | 200 | 0,21                | 95,60 | 0,17                | 95,79 |

Tabela 3 – Calibração da condutividade hidráulica para ajuste de vazão de pico escoada considerando dois valores do n de Manning

| EVENTO | DATA             | QO                | VOL            | LO    | Qpico             | Si   | G   | n de Manning = 0,24 |       |                   |          | n de Manning = 0,40 |       |                   |          |
|--------|------------------|-------------------|----------------|-------|-------------------|------|-----|---------------------|-------|-------------------|----------|---------------------|-------|-------------------|----------|
|        |                  |                   |                |       |                   |      |     | Ks                  | Lcalc | QpicoCal          | SedYield | Ks                  | Lcalc | QpicoCal          | SedYield |
|        |                  | m <sup>3</sup> /s | m <sup>3</sup> | mm    | m <sup>3</sup> /s |      | mm  | mm/h                | mm    | m <sup>3</sup> /s | kg/ha    | mm/h                | mm    | m <sup>3</sup> /s | kg/há    |
| 1      | 30/05 a 01/06/01 | 5,026             | 434246,40      | 3,18  | 3,06              | 0,65 | 200 | 3,1                 | 0,73  | 3,11              | 0,33     | 2,82                | 0,72  | 3,02              | 0,31     |
| 2      | 05/05 a 11/05/02 | 23,39             | 2020896,00     | 14,80 | 16,38             | 0,65 | 200 | 2,32                | 3,64  | 16,48             | 4,61     | 1,96                | 5,65  | 16,07             | 9,70     |
| 3      | 23/05 a 27/05/02 | 12,97             | 1120176,00     | 8,20  | 7,47              | 0,65 | 200 | 0,57                | 1,73  | 7,53              | 1,29     | 0,43                | 2,00  | 7,58              | 1,40     |
| 4      | 02/07 a 06/07/02 | 29,34             | 2534976,00     | 18,56 | 16,93             | 0,65 | 200 | 0,63                | 3,34  | 16,86             | 3,95     | 0,45                | 4,56  | 16,55             | 5,46     |
| 5      | 09/07 a 12/07/02 | 22,93             | 1981152,00     | 14,51 | 11,24             | 0,65 | 200 | 0,77                | 1,830 | 11,71             | 1,93     | 0,61                | 1,960 | 11,64             | 2,03     |
| 6      | 03/11 a 08/11/03 | 82,89             | 7162041,60     | 52,45 | 40,37             | 0,65 | 200 | 13,0                | 3,750 | 39,95             | 9,07     | 10,65               | 4,460 | 40,61             | 9,46     |
| 7      | 10/01 a 14/01/04 | 3,53              | 304992,00      | 2,23  | 2,14              | 0,65 | 200 | 5,0                 | 0,560 | 2,08              | 0,178    | 4,25                | 0,601 | 2,21              | 0,196    |
| 8      | 15/01 a 21/01/04 | 38,07             | 3288816,00     | 24,08 | 10,45             | 0,65 | 200 | 10,15               | 1,430 | 10,32             | 1,45     | 8,75                | 1,450 | 10,39             | 1,41     |
| 9      | 26/01 a 02/02/04 | 86,22             | 7449494,40     | 54,55 | 20,21             | 0,65 | 200 | 4,58                | 4,170 | 20,11             | 5,67     | 3,35                | 5,310 | 21,89             | 7,53     |
| 10     | 29/06 a 01/07/04 | 8,55              | 738979,20      | 5,41  | 5,03              | 0,65 | 200 | 1,50                | 1,000 | 5,15              | 0,61     | 1,23                | 1,040 | 5,23              | 0,632    |
| 11     | 29/03 a 31/03/05 | 6,38              | 551232,00      | 4,04  | 1,85              | 0,65 | 200 | 9,15                | 0,452 | 1,97              | 0,147    | 7,8                 | 0,450 | 1,89              | 0,142    |
| 12     | 01/05 a 06/05/05 | 151,21            | 13064544,00    | 95,67 | 55,12             | 0,65 | 200 | 8,04                | 4,910 | 57,96             | 15,15    | 6,3                 | 5,510 | 55,66             | 15,15    |

\* onde VOL=Volume escoado (m<sup>3</sup>), LO=Lâmina observada (mm), Si=Saturação Inicial, Lcalc=Lâmina calculada pelo modelo (mm), Qpico=Vazão de pico observado (m<sup>3</sup>/s), QpicoCal= Vazão de pico calculado (m<sup>3</sup>/s), SedYield=Produção de sedimentos calculada (kg/há)

Tabela 4 – Calibração da saturação inicial para ajuste de volume escoado considerando  $n=0,24$ , uma textura Sandy clay loam (franco areno argilosa- $K_s=4,3$  mm/h) na primeira camada (0,3m) e a segunda camada com textura Clay loam (franco argilosa- $K_s=2.3$  mm/h)

| EVENTO | DATA             | CHUVA  | QO                | VOL            | LO    | Qpico             | n de Manning = 0,24 |      |       |                |                   |          |
|--------|------------------|--------|-------------------|----------------|-------|-------------------|---------------------|------|-------|----------------|-------------------|----------|
|        |                  | mm     | m <sup>3</sup> /s | m <sup>3</sup> | mm    | m <sup>3</sup> /s | Ks                  | Sat  | Lcalc | VOLcal         | QpicoCal          | SedYield |
|        |                  |        |                   |                |       |                   | mm/h                |      | mm    | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> /s | kg/há    |
| 1      | 30/05 A 01/06/01 | 37,91  | 5,026             | 434246,40      | 3,18  | 3,06              | 4,3/2,3             | 0,83 | 3,26  | 445333,00      | 20,57             | 5,35     |
| 2      | 05/05 a 11/05/02 | 77,42  | 23,39             | 2020896,00     | 14,80 | 16,38             | 4,3/2,3             | 0,94 | 13,68 | 1868279,00     | 87,05             | 51,92    |
| 3      | 23/05 a 27/05/02 | 44,55  | 12,97             | 1120176,00     | 8,20  | 7,47              | 4,3/2,3             | 0,95 | 2,34  | 320751,00      | 7,64              | 1,77     |
| 4      | 02/07 a 06/07/02 | 39,68  | 29,34             | 2534976,00     | 18,56 | 16,93             | 4,3/2,3             | 0,95 | 1,40  | 192041,00      | 2,72              | 0,49     |
| 5      | 09/07 a 12/07/02 | 26,54  | 22,93             | 1981152,00     | 14,51 | 11,24             | 4,3/2,3             | 0,95 | 1,77  | 242155,00      | 7,37              | 1,25     |
| 6      | 03/11 a 08/11/03 | 173,84 | 82,89             | 7162041,60     | 52,45 | 40,37             | 4,3/2,3             | 0,75 | 52,15 | 7121518,00     | 326,22            | 477,93   |
| 7      | 10/01 a 14/01/04 | 87,71  | 3,53              | 304992,00      | 2,23  | 2,14              | 4,3/2,3             | 0,65 | 2,29  | 313837,00      | 11,59             | 1,95     |
| 8      | 15/01 a 21/01/04 | 89,09  | 38,07             | 3288816,00     | 24,08 | 10,45             | 4,3/2,3             | 0,90 | 24,25 | 3312547,00     | 216,82            | 149,43   |
| 9      | 26/01 a 02/02/04 | 140,10 | 86,22             | 7449494,40     | 54,55 | 20,21             | 4,3/2,3             | 0,94 | 32,44 | 4430811,00     | 156,51            | 148,73   |
| 10     | 29/06 a 01/07/04 | 33,41  | 8,55              | 738979,20      | 5,41  | 5,03              | 4,3/2,3             | 0,95 | 2,17  | 296623,00      | 8,28              | 1,65     |
| 11     | 29/03 a 31/03/05 | 49,25  | 6,38              | 551232,00      | 4,04  | 1,85              | 4,3/2,3             | 0,71 | 4,09  | 558890,00      | 29,36             | 7,55     |
| 12     | 01/05 a 06/05/05 | 136,50 | 151,21            | 13064544,00    | 95,67 | 55,12             | 4,3/2,3             | 0,94 | 53,02 | 7240874,00     | 387,99            | 494,71   |

Tabela 5 – Calibração da saturação inicial para ajuste de volume escoado considerando  $n=0,40$ , uma textura Sandy clay loam (franco areno argilosa- $K_s=26$  mm/h) na primeira camada (0,3m) e a segunda camada com textura Clay loam (franco argilosa)

| EVENTO | DATA             | CHUVA  | QO                | VOL            | LO    | Qpico             | n de Manning = 0,40 |      |        |                |                   |          |
|--------|------------------|--------|-------------------|----------------|-------|-------------------|---------------------|------|--------|----------------|-------------------|----------|
|        |                  | mm     | m <sup>3</sup> /s | m <sup>3</sup> | mm    | m <sup>3</sup> /s | Ks                  | Sat  | Lcalc  | VOLcal         | QpicoCal          | SedYield |
|        |                  |        |                   |                |       |                   | mm/h                |      | mm     | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> /s | kg/há    |
| 1      | 30/05 a 01/06/01 | 37,91  | 5,026             | 434246,40      | 3,18  | 3,06              | 4,3/2,3             | 0,85 | 3,26   | 445487,00      | 20,29             | 5,26     |
| 2      | 05/05 a 11/05/02 | 77,42  | 23,39             | 2020896,00     | 14,80 | 16,38             | 4,3/2,3             | 0,94 | 12,02  | 1642179,00     | 64,03             | 38,44    |
| 3      | 23/05 a 27/05/02 | 44,55  | 12,97             | 1120176,00     | 8,20  | 7,47              | 4,3/2,3             | 0,95 | 2,186  | 298510,00      | 6,52              | 1,46     |
| 4      | 02/07 a 06/07/02 | 39,68  | 29,34             | 2534976,00     | 18,56 | 16,93             | 4,3/2,3             | 0,96 | 1,24   | 170069,00      | 2,07              | 0,362    |
| 5      | 09/07 a 12/07/02 | 26,54  | 22,93             | 1981152,00     | 14,51 | 11,24             | 4,3/2,3             | 0,95 | 1,560  | 213934,00      | 4,98              | 0,842    |
| 6      | 03/11 a 08/11/03 | 173,84 | 82,89             | 7162041,60     | 52,45 | 40,37             | 4,3/2,3             | 0,75 | 54,560 | 7450665,00     | 444,60            | 469,76   |
| 7      | 10/01 a 14/01/04 | 87,71  | 3,53              | 304992,00      | 2,23  | 2,14              | 4,3/2,3             | 0,72 | 2,770  | 378880,00      | 18,55             | 3,51     |
| 8      | 15/01 a 21/01/04 | 89,09  | 38,07             | 3288816,00     | 24,08 | 10,45             | 4,3/2,3             | 0,93 | 23,200 | 3168107,00     | 185,63            | 30,21    |
| 9      | 26/01 a 02/02/04 | 140,10 | 86,22             | 7449494,40     | 54,55 | 20,21             | 4,3/2,3             | 0,92 | 17,030 | 2325897,00     | 99,94             | 64,75    |
| 10     | 29/06 a 01/07/04 | 33,41  | 8,55              | 738979,20      | 5,41  | 5,03              | 4,3/2,3             | 0,96 | 1,790  | 245682,00      | 5,71              | 1,06     |
| 11     | 29/03 a 31/03/05 | 49,25  | 6,38              | 551232,00      | 4,04  | 1,85              | 4,3/2,3             | 0,93 | 11,210 | 1530830,00     | 70,54             | 36,630   |
| 12     | 01/05 a 06/05/05 | 136,50 | 151,21            | 13064544,00    | 95,67 | 55,12             | 4,3/2,3             | 0,93 | 51,190 | 6991568,00     | 284,26            | 437,76   |

## 5 - CONCLUSÕES

Considerando os dados de precipitação, vazão, características de uso e de solo de uma sub-bacia do rio Japarutuba-Mirim-SE, o modelo KINEROS2 foi aplicado com o objetivo de verificar os valores dos seus parâmetros principais que são mais adequados as condições da bacia e assim poder prever o escoamento superficial e produção de sedimento nesta e em outras sub-bacias do rio Japarutuba devido a eventos consecutivos de chuva. Os resultados mostram a dificuldade de aplicação de modelos de base física em bacias com a área em questão e com o tipo de uso do solo, visto que foi necessária duas abordagens para simulação de lâmina escoada, vazão de pico e volume escoado. Para todas as abordagens observou-se que o valor de  $n$  de Manning, onde foi possível a calibração dos parâmetros principais para um maior número de eventos, foi  $n=0,24$ . Além disso, para a simulação considerando os solos com dois horizontes, a textura mais adequada é a franco-areno-argiloso (horizonte A:  $K_s=4,3$  mm/h) e franco argiloso (horizonte B:  $K_s=2,3$  mm/h).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico –CNPq-Brasil, através do Projeto de *Avaliação dos impactos das ações antrópicas sobre os recursos hídricos numa bacia do Estado de Sergipe*, aprovado no edital Universal 02/2006, Processo No 477467/2006-7. Os autores também agradecem a Universidade Federal de Sergipe – UFS e a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, a Secretaria de Recursos Hídricos de Sergipe – SRH-SE na pessoa do senhor João Carlos, e ao centro de Meteorologia de Sergipe (CEMESE), na pessoa do senhor Overland Amaral pelos dados climatológicos.

## BIBLIOGRAFIA

- ANA (2002). HIDRO - Sistema de Informações Hidrológicas. Versão 1.0. Manual do Usuário.
- ARAGÃO, R; ALMEIDA, J. A. P.. (2009). Avaliação Espaço Temporal do Uso do Solo na Área da Bacia do Rio Japarutuba -Sergipe Através de Imagens LANDSAT. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. NATAL-RN : INPE, v. 1. p. 1231-1238.
- ARAGÃO, R; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. ; DALTRO FILHO, J. (2008) . Avaliação do Processo Hidrossedimentológico na Bacia do Rio Japarutuba-Mirim através do Modelo KINEROS2. Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador-BA: ABRH., v. 1. CD-ROM.
- BEVEN, K. (2001). Rainfall-Runoff Modelling-The Primer. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England. 360p.
- CANFIELD, H. E.; GOODRICH; D. C.; BURNS, I. S. (2005) Selection of Parameters Values to Model Post-fire Runoff and Sediment Transport at the Watershed Scale in Southwestern Forests. USDA-ARS Southwest Watershed Research Center, 2000 E. Allen Rd., Tucson, AZ

- EMBRAPA (1999). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – Brasília. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: EMBRAPA produção de informação. Rio de Janeiro.
- FIGUEIREDO, E. E. (1998). Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-Arid Region of Brazil. PhD Thesis - University of New Castle upon Tyne, UK, 1998. New Castle Upon Tyne.
- FONTES, A. L (1997). Caracterização da bacia do Rio Japarutuba (SE). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Universidade Estadual Paulista, 1997. (Tese de Doutorado em Geografia).
- IMAM, B. (2000). Range of Manning Number. Disponível em: <[http://hydis.eng.uci.edu/CEE273/Homeworks/Homework\\_3/Range%20of%20Manning%20Number.s.pdf](http://hydis.eng.uci.edu/CEE273/Homeworks/Homework_3/Range%20of%20Manning%20Number.s.pdf)>. Acesso em 02 de junho de 2008.
- CHOW, V.T; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988) Applied Hydrology. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. Singapore. 572p.
- LOPES, V.L. e CANFIELD, H.E. (2004). “Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling”. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 40(2):311-319.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevô. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 5 jun. 2009.
- RAWLS, W.J, D.L. BRAKENSIEK, and K.E. SAXTON. 1982. Estimation of soil water properties. Trans. ASAE 25:1316-1320.
- SANTOS, L.L.; SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R.; RIBEIRO, P.J.M. (2007). Avaliação da Resposta do Modelo KINEROS2 para Diferentes Representações da Bacia Hidrográfica. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, SÃO PAULO. ABRH, 2007. v. 1. p. 1-18.
- SEPLANTEC (2000). Estudo Sobre Desenvolvimento de Recursos Hídricos no Estado de Sergipe na República Federativa do Brasil. SERGIPE: Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia/Superintendência de Recursos Hídricos. Relatório Final, 2000.
- SEPLANTEC (2004). Atlas Digital de Recursos Hídricos. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia de Sergipe: Superintendência de Recursos Hídricos, 2004.
- SINGH, V.P. (1995). Watershed Modelling. In: V.P. Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.
- SINGH, V.P., WOOLHISER, D. A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 7, No. 4, July 1, 2002.
- SMITH R. E., GOODRICH, D. C., WOOLHISER, D. A., AND UNKRICH, C. L. (1995). KINEROS – A KINematic Runoff and EROSion Model. In: V. S. Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States.
- SRINIVASAN, V. S. ARAGÃO, R., MORAES, H. A.; SANTOS, L. L. (2006) Applicability of the Model KINEROS2 for the Semiarid Basins of the North-East of Brazil. In: Proceedings of 15TH Congress of Asia and Pacific Division of the IAHS and International Symposium on Maritime Hydraulics, 2006, Chennai, India: IAHS, 2006. v. 1. p.1.
- WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D.C. (1990). KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990.