

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental***

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

IX-002 - MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NA BARRAGEM PIRAPAMA EM PERNAMBUCO

Richarde Marques da Silva⁽¹⁾

Geógrafo pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da UFPB (PPGEU) – UFPB – Centro de Tecnologia – Departamento de Tecnologia da Construção Civil.

Celso Augusto Guimarães Santos

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutorado e Pós-Doutorado em Recursos Hídricos pela *Ehime University*, Japão. Professor do Curso de Engenharia Civil da UFPB – Centro de Tecnologia – Departamento de Tecnologia da Construção Civil.

Iltonio Alves Nitão

Graduando em Engenharia Civil – UFPB – Centro de Tecnologia – Departamento de Tecnologia da Construção Civil. Bolsista de Iniciação Científica CNPq/PROFIX.

Endereço⁽¹⁾: Rua Caetano de Figueiredo, nº. 243, Cristo Redentor, João Pessoa-PB – CEP: 58070-520 - Brasil. Telefone: (83)223-2230

 : richarde@lrh.ct.ufpb.br.

RESUMO

A precipitação em bacias hidrográficas no Nordeste do Brasil apresenta uma grande variabilidade espacial e conseqüentemente essa variação influencia diretamente no escoamento superficial e na produção de sedimentos. Assim, o presente estudo busca descrever os resultados do escoamento superficial e a produção de sedimentos na barragem Pirapama, em Pernambuco, através do modelo hidrossedimentológico Kinneros. A aplicação do modelo abrangeu diversas etapas, tais como: (a) seleção dos dados de precipitação; (b) discretização da bacia em planos e canais; e (c) a simulação propriamente dita dos processos hidrológicos. Os parâmetros usados neste artigo foram obtidos a partir de simulações já realizadas para esta bacia. Os resultados expostos mostraram que o modelo Kinneros pode ser considerado também uma ferramenta promissora para a simulação dos processos de escoamento superficial e na predição de erosão e, possivelmente, de grande valia no acoplamento de modelos de previsões climatológicas e hidrológicas. Tais resultados mostraram que os procedimentos aplicados geraram uma grande quantidade de informações sobre o meio físico e sobre a susceptibilidade à erosão na barragem Pirapama.

Palavras-chave: erosão, vazão, modelos hidrológicos, Pirapama.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o interesse por estudos de possíveis impactos ambientais causados pelas atividades humanas, tem levado um considerável número de pesquisadores ao desenvolvimento de inovações técnico-científicas, que buscam entender as transformações ocorridas através das mudanças no uso do solo.

Para efeito deste estudo, a bacia hidrográfica do Rio Pirapama, localizada no Estado de Pernambuco, mais precisamente na parte sul-oriental a aproximadamente 8° 22' de Latitude Sul e 35° 00' de Longitude Oeste (**Figura 1**), foi escolhida por estar inserida numa zona úmida do Nordeste do Brasil e por drenar uma superfície com aproximadamente 600 km², além de possuir uma barragem que fornece água para uma das maiores metrópoles do Brasil, a Região Metropolitana do Recife, constituída pelos municípios de Paulista, Igarassu, Abreu e Lima, Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda e São Lourenço da Mata.

A necessidade latente de estudos hidrossedimentológicos voltados à análise da modelagem dos processos de erosão em

bacias hidrográficas periurbanas é de grande relevância para estudos de drenagem urbana. Pois, a conseqüente deposição do material erodido acarreta sérios problemas, uma vez que, a erosão reduz a produtividade de plantações e o aparecimento de ravinas pode prejudicar o sistema de abastecimento d'água local, degradando a qualidade da água, além de atuar como agente transportador de sólidos porosos absorvidos

com poluentes químicos.

Nos dias de hoje, a utilização de modelos hidrológicos beneficia a realização de pesquisas, buscando uma melhor quantificação e representação dos componentes hidrológicos. Em suma, através de simulações hidrológicas com resultados confiáveis, podem ser planejados e executados projetos nas áreas de saneamento e de drenagem, como: (a) dimensionamento de reservatórios; (b) sistemas de escoamento de águas pluviais; e (c) instalações de esgotamento sanitário. Como os processos de monitoramento da água dependem de um grande número de fatores, sua análise e previsão, quantitativa ou qualitativamente, requerem, geralmente, a utilização de modelos matemáticos. Assim, o modelo hidrológico se torna uma ferramenta extremamente útil que permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica, como, por exemplo, prever as conseqüências de modificações no uso do solo; as vazões decorrentes de determinadas chuvas intensas; efeito da construção de açudes e o impacto da urbanização de uma bacia.

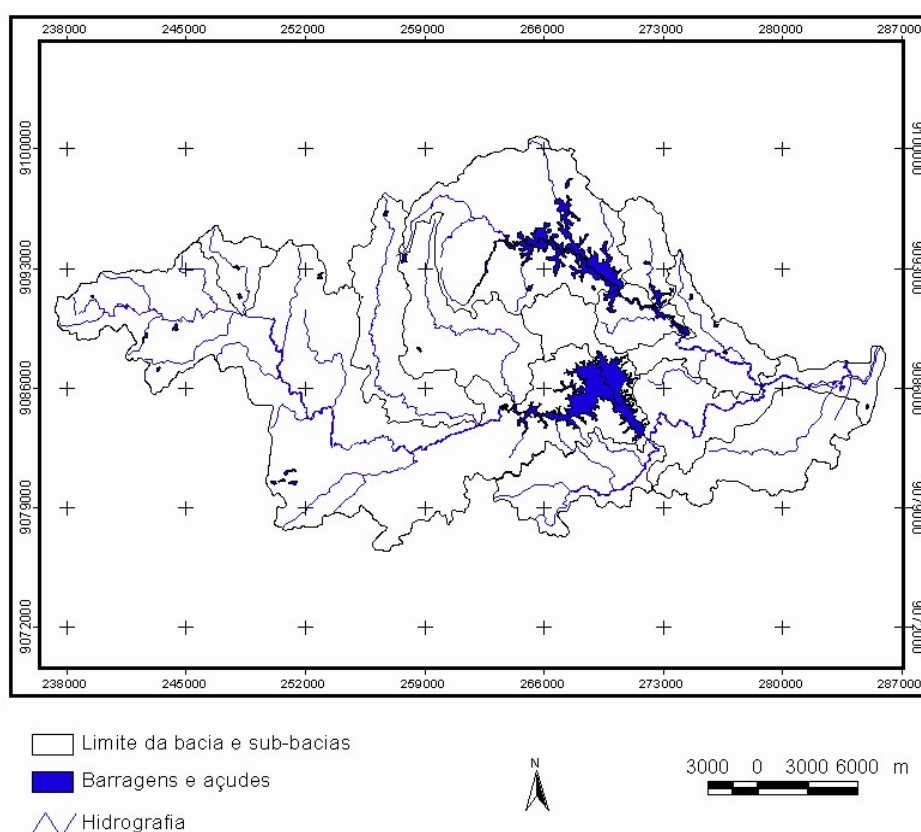


Figura 1: Localização da bacia Pirapama e sua hidrografia.

OBJETIVO

Os estudos de impactos de erosão contam hoje com modelos de predição, que possibilitam a simulação de perdas de solo e seleção de práticas para seu controle, facilitando, desta forma, a adoção de medidas pontuais no que tange o planejamento ambiental e a priorização de ações mitigadoras. Dentro desta ótica, o presente trabalho teve como objetivo, a avaliação do modelo hidrossedimentológico distribuído Kineros – *Kinematic Runoff and Erosion Model*

(WOOLHISER et al., 1990) na simulação do escoamento superficial e erosão numa barragem inserida numa bacia hidrográfica periurbana.

METODOLOGIA

Para efeito deste trabalho, foram coletados dados de precipitação dos seis primeiros meses do ano de 2001 do posto pluviométrico Pirapama, localizado a -8° 16' de Latitude Sul e -35° 03' de Longitude Oeste, inserido no município de Cabo de Santo Agostinho. Esses dados foram obtidos junto ao HIDROWEB, contido no seguinte endereço: <http://www.hidroweb.ana.gov.br>, e sob responsabilidade da ANA (Agência Nacional de Águas) e operado pela CPRM (Companhia Pernambucana de Recursos Minerais), que monitora diariamente o posto desde 1986. Este período foi escolhido, uma vez que, compreende a temporada chuvosa da região, objeto de estudo. No que tange a composição física da bacia, foram levantadas as seguintes informações: mapas de solos (**Figura 2**) e da geologia (**Figura 3**), bem como as cartas topográficas da área.

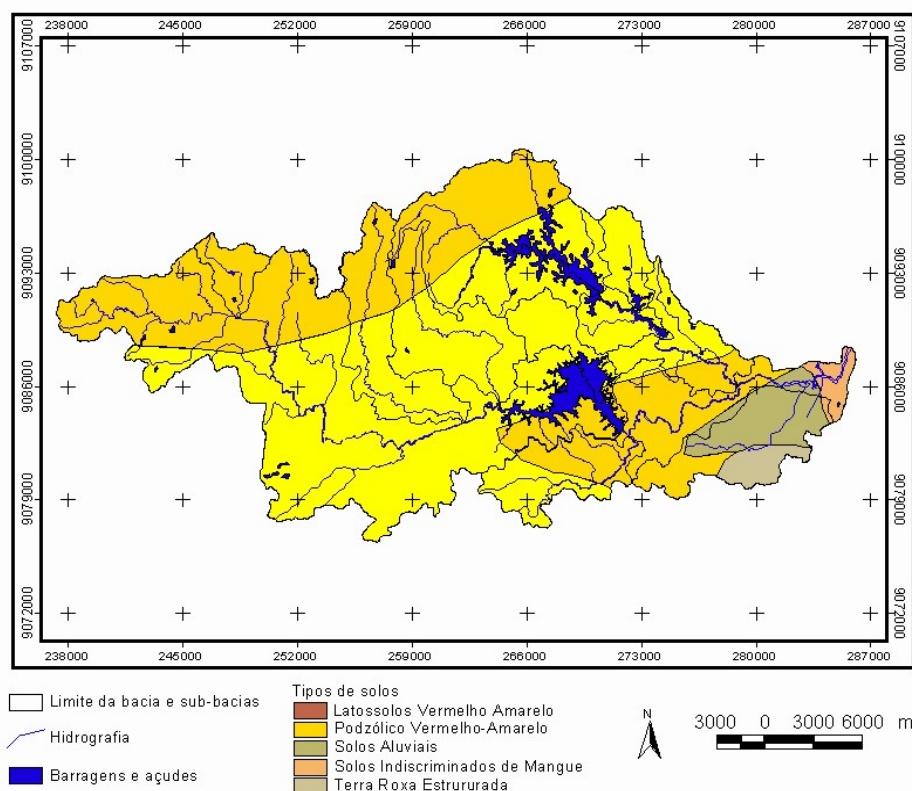


Figura 2: Classificação dos solos encontrados na bacia do rio Pirapama.

A partir de cartas topográficas da Sudene de Vitória de Santo Antão e Recife, ambas na escala de 1:100.000, foram digitalizadas todas as curvas de nível (com equidistância de 40 m), sendo então elaborado o mapa altimétrico de toda a bacia hidrográfica, além do Modelo Numérico do Terreno (MNT). Facilitando assim, a discretização da bacia hidrográfica em planos e canais, onde cada elemento possui suas características específicas, tais como comprimento, condutividade hidráulica, declividade, porosidade e porcentagem de rochas. A simulação utilizando o modelo hidrossedimentológico distribuído Kineros deu-se a partir da calibração dos parâmetros de umidade, condutividade hidráulica e infiltração.

Os parâmetros de vazão do modelo foram calibrados para ajustar os dados calculados aos observados, já para os parâmetros de erosão, foram utilizados os valores testados por Santos et al. (2003), com o objetivo de se ter uma estimativa do total de sedimentos transportados para a barragem.

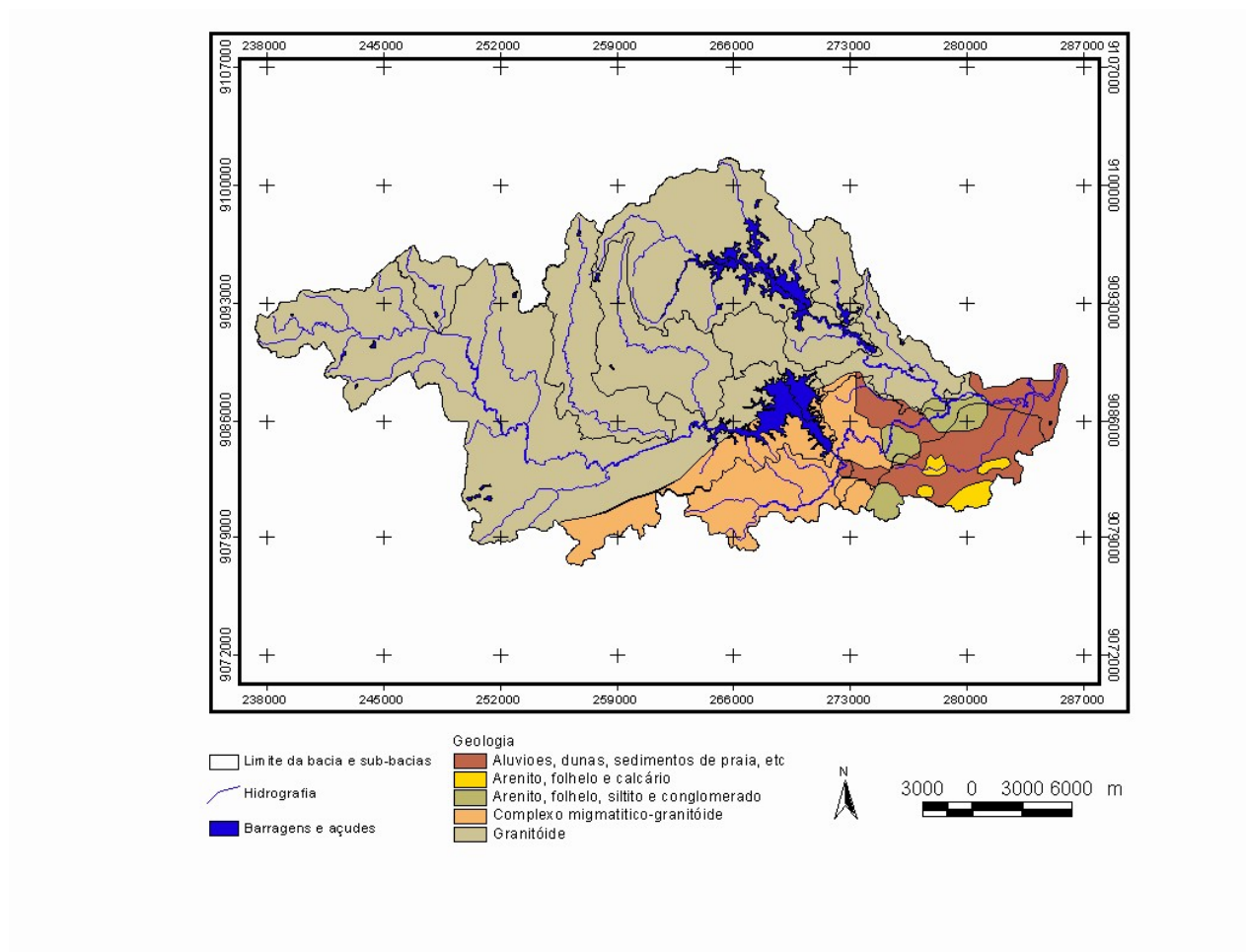


Figura 3: Classificação da geologia da bacia do rio Pirapama.

REFERENCIAL TEÓRICO

A necessidade de solucionar problemas relacionados ao meio ambiente exige análises que, da melhor forma possível, envolvam as atividades antrópicas básicas e as principais condicionantes do meio físico. Para estudos de natureza geoambiental, faz-se necessário o levantamento, a avaliação e o relacionamento de características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, formas de uso e ocupação do solo e hidrologia.

O problema da erosão deve-se não só a existência de solos susceptíveis aos processos de erosão, somados a períodos de elevada pluviosidade, mas também a uma ocupação desordenada e sem critérios básicos de planejamento ambiental, isto é, práticas de uso e parcelamento do solo inadequadas e deficientes. Desta forma, constata-se que parte dos municípios do Brasil apresenta fenômenos de degradação de solos por processos erosivos, causados principalmente pela concentração das águas de escoamento superficial e por uma intervenção antrópica indiscriminada.

Por outro lado, a falta de um levantamento apropriado da produção de sedimentos contribui para a ocorrência de problemas como ocupação de áreas impróprias, exposição do solo, assoreamento de canais e acúmulo de sedimentos em barragens.

A erosão, entendida como um processo de degradação do solo devido à atuação dos fatores naturais e antrópicos, tem cada vez mais merecido a atenção de pesquisadores voltados à produção de sedimentos em áreas urbanas. Atividades humanas, sejam elas agrícolas ou habitacionais, constitui o principal agente causador dos processos erosivos, quando a erosão normal, causada pelos fatores naturais, dá lugar à erosão acelerada, resultado desta interferência antrópica. O seu aumento progressivo nos recursos hídricos pode causar diversos impactos negativos. Entre estes impactos, pode-se citar o assoreamento de riachos, rios e reservatórios. Resultando assim, na diminuição da quantidade e da qualidade da água.

Com o intuito de facilitar estudos hidrossedimentológicos, os modelos hidrológicos vêm dando suporte a estudos cada vez mais amplos, agregando diversos processos (chuva-vazão-erosão), além de sua conexão com outras ferramentas direcionadas a análise geo-ambiental.

Entende-se por modelo hidrológico como sendo uma ferramenta matemática, desenvolvida pela ciência para entender, retratar e para prever o comportamento de diferentes condições dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). Segundo Góes (1993), os modelos hidrológicos são utilizados com o propósito de transferir conhecimentos de medidas ou áreas conhecidas para outros locais onde não se dispunham desses conhecimentos, mas que, sejam necessários para o gerenciamento, planejamento ou tomada de decisões. A necessidade de quantificar as fases do ciclo hidrológico no desenvolvimento de projetos de obras hidráulicas fez com que a utilização de métodos quantitativos fosse empregada para explicar praticamente todos os fenômenos hidrológicos.

Como bem enfatiza Meyer (1978), todas as vezes que se emprega a Matemática, a fim de estudar alguns fenômenos de observação, deve-se essencialmente começar por construir um modelo matemático (determinístico ou probabilístico) para esses fenômenos. Já Santos (2002) relata que o modelo deve simplificar diversos fatores e certos pormenores devem ser desprezados, com o intuito de verificar a validade do modelo. Deve-se deduzir também um certo número de consequências do modelo e depois comparar os resultados previstos com os valores observados.

Os modelos hidrológicos surgiram com a finalidade de gerar dados hidro-climatológicos com séries temporais mais longas e representativas para diferentes projetos de recursos hídricos. Os primeiros modelos desenvolvidos foram os de chuva-vazão, os quais representavam o ciclo hidrológico entre a precipitação e o deflúvio. Esses modelos foram configurados para representar o comportamento da bacia hidrográfica através de equações empíricas, porém não consideram os processos físicos internos. Eles consideravam as perdas por interceptação, evaporação, tempo de empoçamento no solo, infiltração, percolação, água subterrânea, o escoamento superficial e subsuperficial, mas não considerava no seu processo de simulação a distribuição espacial da chuva.

Para suprir as deficiências relativas a questões ambientais ligadas ao processo de urbanização e contaminação dos recursos hídricos, surgiu nas últimas décadas uma nova ramificação de modelos hidrológicos, os distribuídos. Segundo Lacerda Júnior (2002), esses modelos utilizam relações empíricas entre parâmetros e características físicas de cada bacia. Permitindo assim, a divisão da bacia em sub-bacias, em quadrículas ou em planos e canais, como é o caso do modelo KINEROS (WOOLHISER et al., 1990). Esses modelos necessitam de vários parâmetros que têm por objetivo caracterizar o uso e ocupação do solo, além de retratar as diversas propriedades físicas da bacia. Santos et al. (2003) referem-se a esses modelos como sendo de grande valia para estudos de caráter hidrossedimentológicos, uma vez que, podem ser acoplados a modelos atmosféricos e serem aplicados em bacias periurbanas na predição de vazão e erosão.

Como dito acima, os modelos hidrológicos são utilizados para se antecipar aos eventos, representando assim: (a) o impacto da urbanização de uma bacia antes que ela ocorra, para a tomada preventiva de medidas mitigadoras; (b) para a previsão de enchentes em tempo real; (c) para a previsão do impacto na alteração de um rio a partir de obras de represamento; e (d) na ocorrência de períodos de estiagens e possíveis eventos extremos.

No que tange a utilização desses modelos no gerenciamento de recursos hídricos, atualmente vem sendo utilizado de forma multidisciplinar, agregando uma gama de profissionais, todos voltados em uma análise mais criteriosa das potencialidades dos recursos naturais (TUCCI, 1998; RUFINO et al., 2001). Desta forma, é papel do planejador reunir todas as informações a respeito dos recursos ambientais, para que, de forma clara e sucinta, possa estimar e, assim, tomar decisões cabíveis em favor da sociedade e ajudar na preservação do meio ambiente.

Os primeiros estudos utilizando essas ferramentas foram desenvolvidos a partir de 1950, e desde então, vários foram os avanços nessa área do conhecimento. Tucci (1998, p. 127) ressalta a importância de modelos chuva-vazão, uma vez que, "as séries de precipitações, normalmente são mais longas que as de vazão. Além disso, com a modificação das bacias pela construção de obras hidráulicas e alterações no uso do solo, as séries de vazões deixaram de ser homogêneas ou estacionárias".

Os métodos utilizados na hidrologia, até a década de 50, praticamente limitavam-se a indicadores estatísticos dos processos envolvidos. Porém, a partir desse período, com o desenvolvimento técnico-científico, o aprimoramento de técnicas numéricas e estatísticas, ocorreu um importante salto de qualidade nos modelos hidrológicos, propiciando uma melhor representação de um sistema com comportamento não-linear, e com uma grande heterogeneidade espacial e temporal.

O MODELO KINEROS

O Modelo de Infiltração do Solo

A formulação do modelo permite uma aproximação física para a redistribuição da água no solo, incluindo a capacidade de recuperação de infiltração durante as estiagens, determinando o percentual de infiltração depois desta estiagem. O modelo de infiltração descreve a capacidade de infiltração f_c como uma função da profundidade infiltrada I e necessita de quatro parâmetros básicos para descrever as propriedades de infiltração, que são o de condutividade hidráulica efetiva saturada K_s (m/s), a capilaridade integral G (m), a porosidade ϕ , e o índice de distribuição dos tamanhos dos poros λ . O parâmetro C_v é opcional e descreve a variação randômica no espaço das propriedades hidráulicas do solo. Também, existe uma variável relacionada ao evento que é a saturação relativa inicial da camada superior do solo, igual a θ_i/ϕ , no qual θ_i é a umidade inicial do solo. O modelo geral para a infiltrabilidade f_c (m/s) é dado, como uma função de profundidade infiltrada I (m), por:

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

onde B é $(G + h)(\theta_s - \theta_i)$, combinando os efeitos da franja capilar, G , altura do escoamento, h (m), e a capacidade unitária de armazenamento d'água, $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i)$, no qual θ_s é o umidade de saturação do solo. O parâmetro α representa o tipo de solo; i.e, próximo de 0 para areia, neste caso a equação (1) se aproxima da equação de Green-Ampt; e próximo de 1 para um solo franco misto, em tal caso a equação (1) representa a equação de infiltração de Smith-Parlange. Neste modelo existe uma redistribuição de água no solo, pois considera que existindo uma estiagem prolongada durante o evento de chuva o solo deve secar. O método de redistribuição/reinfiltração usado no modelo é descrito em Smith et al. (1993), e também em Corradini et al. (1994).

Escoamento Superficial

O escoamento superficial é o resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica. A modelagem do escoamento superficial em bacias é baseada na resolução de equações diferenciais parciais, as quais descrevem o fluxo e a profundidade do nível da água como sendo funções do tempo e do espaço (LOPES, 2003). Estas equações são formadas pela equação de continuidade, sob a seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad \text{equação (2)}$$

onde Q é a vazão (m^3/s), A é a área da seção transversal do canal (m^2), q é a entrada lateral do escoamento (m^2/s), x é a coordenada espacial (m) e t é a coordenada temporal (s). A equação da quantidade de movimento apresenta a seguinte forma:

$$\frac{\partial (AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial (QC_s)}{\partial x} - g(x,t) = q_s(x,t) \quad \text{equação (3)}$$

onde y é a profundidade do escoamento (m), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S_b é a declividade do fundo do canal e S_f é a declividade da linha de energia, e as outras variáveis já foram mencionadas anteriormente.

Escoamento no Canal

O escoamento nos canais pode ser observado como um processo de escoamento uni-dimensional no qual o fluxo é relacionado a uma área de armazenamento unitária por uma relação exponencial simples:

$$Q = ah^m \quad \text{equação (4)}$$

onde Q é a descarga por unidade de comprimento (m^2/s), e h é o armazenamento de água por unidade de área (m). Os parâmetros a e m são relacionados à declividade, à rugosidade e ao regime do escoamento, e são dadas por $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$ onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning. A equação de continuidade para um canal é dada por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad \text{equação (5)}$$

onde t é o tempo (s), x é a distância na direção da declividade (m), e $q(x,t)$ é a taxa de vazão afluyente lateral (m/s). Para o escoamento superficial, a equação resultante é resolvida usando um método das diferenças finitas de quatro-pontos. A equação de continuidade para um canal com vazão afluyente lateral é dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x,t) \quad \text{equação (6)}$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), Q é descarga no canal (m^3/s), e $q_c(x,t)$ é a rede de vazão afluyente por comprimento de canal (m^2/s). A aproximação cinemática é incorporada na relação entre a descarga do canal e a área da seção transversal tal que:

$$Q = aR^{m-1}A \quad \text{equação (7)}$$

onde R é o raio hidráulico (m). Se for usada a equação de Manning os valores de a e m serão respectivamente: $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$. As equações cinemáticas para canais são resolvidas por uma técnica implícita de quatro-pontos similar àquela para escoamento superficial.

Erosão nos Planos e Canais

A equação geral usada para descrever a dinâmica dos sedimentos em qualquer pontos ao longo do escoamento superficial é uma equação de balanço de massa similar àquela para o escoamento cinemático da água:

$$\frac{\partial (AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial (QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad \text{equação (8)}$$

onde C_s é a concentração de sedimentos (m^3/m^3), Q é a taxa vazão (m^3/s), A é a área da seção transversal do escoamento (m^2), e é a taxa de erosão do solo do leito (m^2/s) e q_s é a taxa de entrada lateral de sedimentos nos canais (m^2/s). Para os planos, e é assumida como sendo compostas de dois principais componentes, i.e., produção de solo erodido pelos impactos das gotas de chuva sobre o solo descoberto, e erosão hidráulica (ou deposição) devido à interação entre a força de cisalhamento da água no solo solto do leito e a tendência das partículas de solo se sedimentarem sob a força da gravidade. A taxa total de erosão é um somatório da taxa de erosão pelo impacto das gotas de chuva e_g e a taxa de erosão hidráulica e_h :

$$e = e_g + e_h \quad \text{equação (9)}$$

A taxa de erosão pelo impacto da chuva é estimada a seguir:

$$e_g = c_f e^{-c_h h} r^2 \quad \text{equação (10)}$$

no qual r é a chuva efetiva (m/s), c_f é uma constante relacionada ao solo e às propriedades da superfície, e $e^{-c_h h}$ é um fator de redução representando a redução na erosão causada pelo aumento da altura da água. O parâmetro c_h representa a efetividade do molhamento da água superficial, assumido como sendo igual a 364,0. A taxa de erosão hidráulica (e_h) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a concentração de equilíbrio e a concentração de sedimento corrente e é dada por:

$$e_h = c_g (C_m - C_s)A \quad \text{equação (11)}$$

onde, C_m é a concentração na capacidade de transporte em equilíbrio, $C_s = C_s(x,t)$ é a concentração de sedimento local corrente, e c_g é um coeficiente de taxa de transferência (s^{-1}), que é computado por:

$$c_g = Co \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s \leq C_m \text{ (erosão) ou } c_g = \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s > C_m \text{ (deposição)} \quad \text{equação (12)}$$

onde Co é o coeficiente de coesão do solo, e v_s é a velocidade da queda da partícula (m/s). O modelo usa a relação da capacidade de transporte de Engelund e Hansen (1967), e a velocidade da partícula é calculada pela seguinte equação:

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(\rho_s - \rho)d}{C_D} \quad \text{equação (13)}$$

no qual ρ_s é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65, d é o diâmetro do sedimento (m), e C_D é coeficiente de resistência da partícula. O coeficiente de resistência da partícula é uma função do número de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34 \quad \text{equação (14)}$$

onde R_n é o número de Reynolds, dado por $R_n = v_s d / \nu$, no qual ν é a viscosidade cinemática da água (m^2/s). A velocidade de uma partícula é resolvida na equação (11), e (12) para v_s . As equações de erosão citadas são aplicadas para cada um dos cinco tamanhos de classes das partículas, que são usadas para descrever um solo quando existe uma variação do tamanho das partículas. As equações (8-14) são resolvidas numericamente para cada espaço de tempo usado nas equações de escoamento, e para cada classe de tamanho de partícula.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo a parte referente aos resultados restringiu-se a porção da bacia, desde suas nascente até a Barragem Pirapama. Este trabalho tem como objetivo dá seqüência aos estudos que vêm sendo desenvolvidos na bacia do rio Pirapama.

Santos et al. (2003) testaram o mesmo modelo na parte superior desta bacia, modelando-a em 12 elementos (8 planos e 4 canais). Essa primeira tentativa na modelagem compreendeu uma área de aproximadamente 82,86 km^2 , cerca de 13,8% de toda a bacia (**Tabela 1**).

Entretanto, com o objetivo de calcular o total escoado e a produção total de sedimentos para o reservatório, a bacia foi modelada neste trabalho até a altura da barragem, abarcando uma superfície de 313,7 km^2 , perfazendo um total de 82,6% da área total. A bacia foi, assim, discretizada em 223 elementos (sendo 158 planos e 65 canais), a fim de obtermos uma melhor representação dos hidrogramas e dos sedimentogramas totais e por tamanho das partículas, os quais podem ser calculados no final de cada elemento. A disposição dos elementos da bacia podem ser visualizada no esquema da **Figura 4**.

Tabela 1. Geometria da Bacia do rio Pirapama

ELEMENTO	ÁREA (km^2)	COMPRIMENTO (m)	LARGURA (m)	DECLIVIDADE
1	7,142	981	7.287,05	-
2	7,902	1084	7.287,05	-
3	-	7.287,05	-	0,0548
4	15,618	1.765	8.851,09	-
5	18,476	2.087	8.851,09	-
6	-	8.851,09	-	0,0316
7	4,684	618	7.584,42	-
8	5,881	775	7.584,42	-
9	-	7.584,42	-	0,0395
10	15,781	3.522	4.480,69	-
11	7,380	1.647	4.480,69	-
12	-	4.480,69	-	0,0982

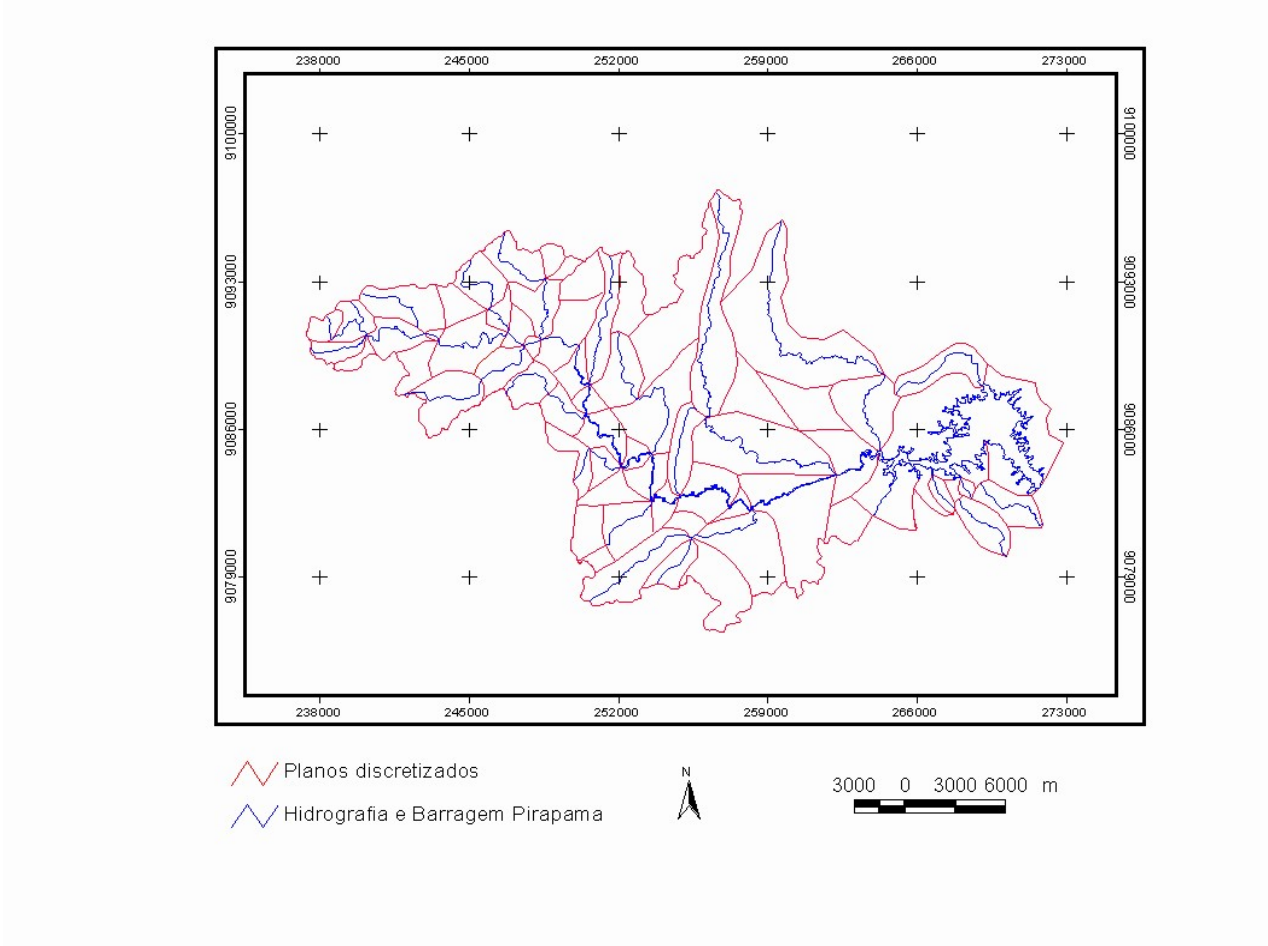


Figura 4: Discretização da bacia em planos e canais até a Barragem Pirapama.

As classes de solos encontradas na bacia Pirapama, segundo MA/DNPEA-SUDENE/DRN (1973), podem ser visualizadas na Tabela 2.

A partir do levantamento junto aos órgãos competentes, foi obtido o mapa digital referente às classes de solos encontrados na área objeto de estudo. A partir de então, as informações foram trabalhadas de acordo com a discretização da bacia em planos e canais, a fim de se obter os parâmetros necessários para a calibração do modelo hidrossedimentológico. A Figura 5 retrata a divisão dos planos e canais discretizados e suas respectivas classes de solo listados na Tabela 2.

Tabela 2: Classes de solos e seus respectivos percentuais granulométricos (MA/DNPEA-SUDENE/DRN, 1973).

CLASSES DE SOLOS	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA			
HORIZONTE A	HORIZONTE A			
	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
Franco-argiloso-arenoso a Argilo-arenoso	25-60%	14-25%	1-11%	20-50%
Franco-argiloso-arenoso	18-39%	10-15%	11-45%	20-45%
Argilolo	1-8%	1-11%	-	-

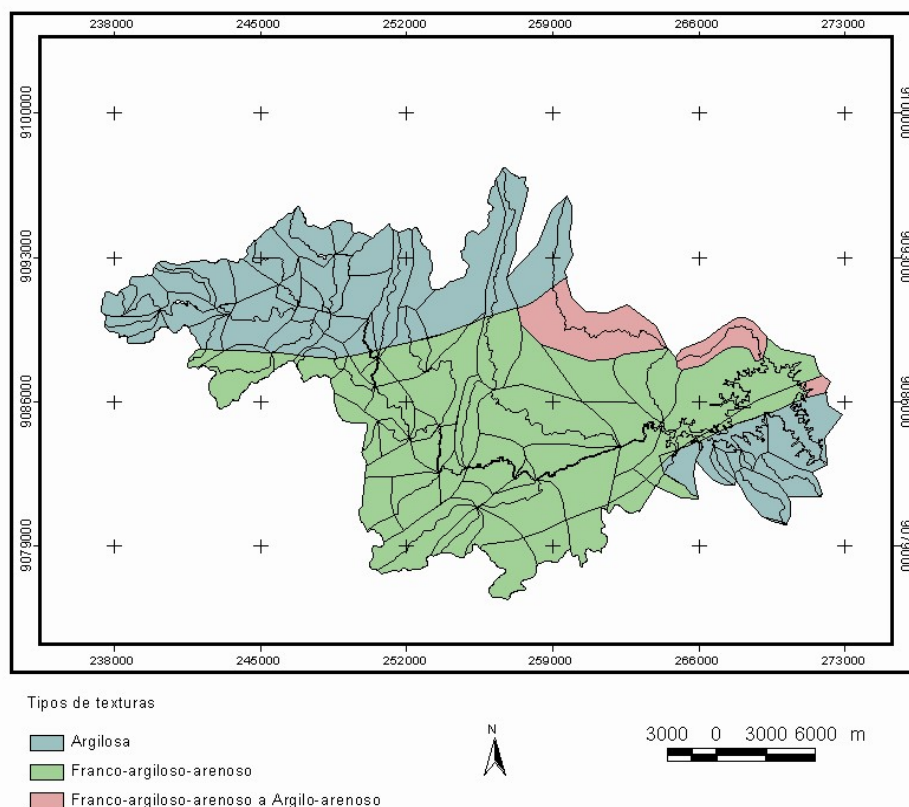


Figura 5: Classes de texturas dos solos da bacia do rio Pirapama.

No que tange a aplicação propriamente dita do modelo KINEROS à bacia Pirapama, deve-se salientar que vários parâmetros foram calibrados e assumiram os seguintes valores: capilaridade integral $G = 900$ mm, porosidade $\phi = 0,42$, $C_v = 0,9$. Outros parâmetros foram assumidos de acordo com a característica da bacia: coeficiente de *Manning* (1,0 para os planos e 0,2 para os canais), interceptação (2 mm), cobertura por copas de árvores, *Canopy* (60%), conteúdo de grandes rochas, *ROCK*, (3%), condutividade hidráulica saturada efetiva ($K_s = 3,2$ mm/h). O grau inicial de saturação do solo, dado por θ_i/ϕ , foi otimizado por tentativa e erro até os hidrogramas observados e calculados se aproximarem, e os parâmetros referentes à erosão pelo impacto da chuva nos planos C_f e o coeficiente de coesão do solo C_o foram selecionados como $C_f = 50$ e $C_o = 0,5$ para se ter uma idéia da potencialidade de erosão da região.

O hidrograma obtido através da plotagem dos dados gerados mostrou que os picos de vazão da bacia foram da ordem de $151,77 \text{ m}^3/\text{s}$, para um total acumulado de $193.902.000,00 \text{ m}^3$, obtido devido ao total de chuva acumulada no mesmo período da ordem de 620,10 mm (**Figura 6**).

Com relação à descarga de sedimentos que adentraram na barragem, percebe-se que o evento de maior descarga foi em torno de $30.332,32 \text{ kg/s}$, para um acúmulo total de $3,51 \times 10^{10} \text{ kg}$ (**Figura 7**).

A **Figura 8** retrata a divisão das partículas de sedimentos em quatro classes (0,5 mm, 0,25 mm, 0,05 mm, 0,005 mm). A descarga de sedimentos de acordo com suas classes de tamanhos mostraram que a maior quantidade transportada para a barragem Pirapama foi a classe correspondente a 0,250 mm, perfazendo um total de $24.486.116.440 \text{ kg}$ (69,769%), atingindo um pico de $23.478,36 \text{ kg/s}$. A segunda classe a contribuir para o acúmulo de sedimentos na barragem, foi a de 0,050 mm, totalizando um recebimento de cerca de $9.631.044.994 \text{ kg}$ (27,440%) e com pico de descarga alcançando $6.171,47 \text{ kg/s}$. A terceira classe analisada por ordem de influência no que tange a quantidade de material transportado para a barragem, foi a de 0,005 mm, que contribuiu com aproximadamente $978.514.949 \text{ kg}$ (2,790%). A última classe de acordo com o tamanho das partículas, foi a de 0,500 mm, que pouco influenciou na produção e acúmulo de solos na barragem, uma vez que, foi transportando apenas 317.088 kg (0,001%).

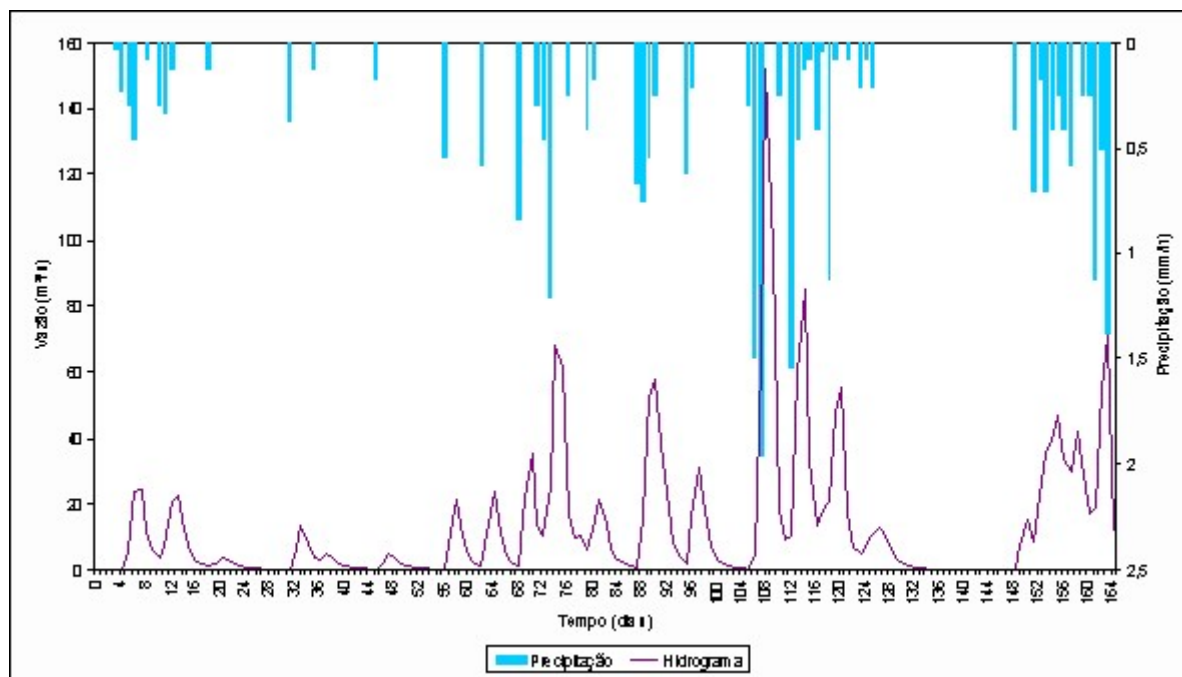


Figura 6: Hidrograma gerado e hietograma com dados observados.

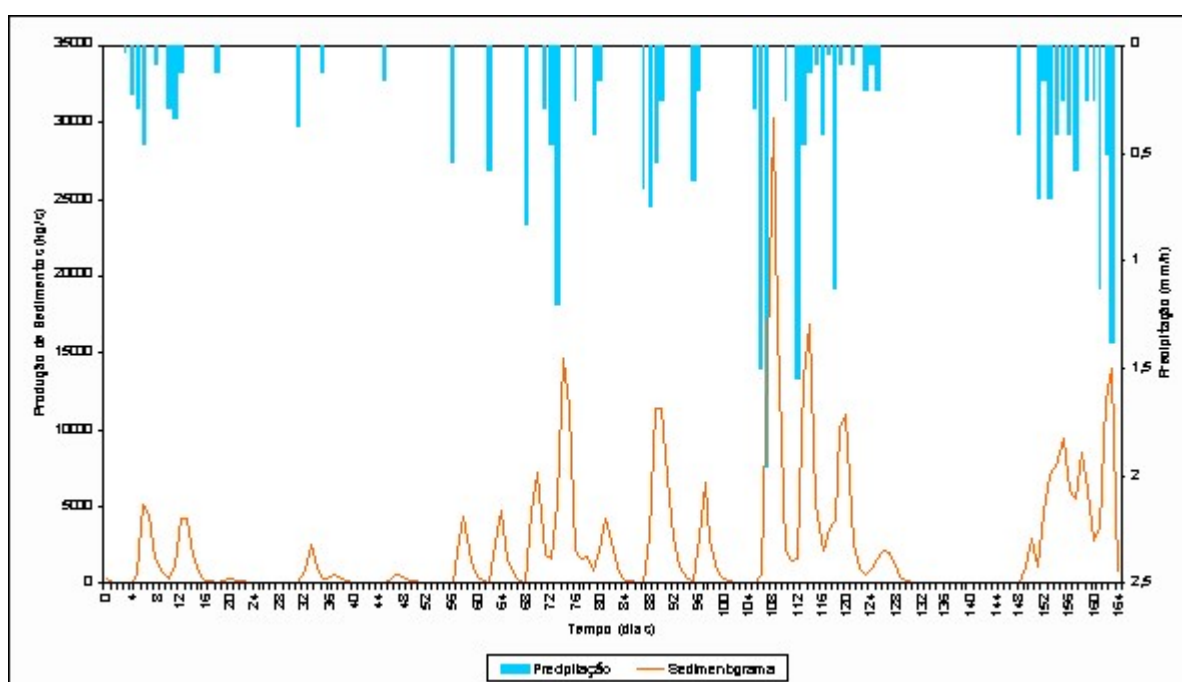


Figura 7: Sedimentograma gerado e hietograma com dados observados.

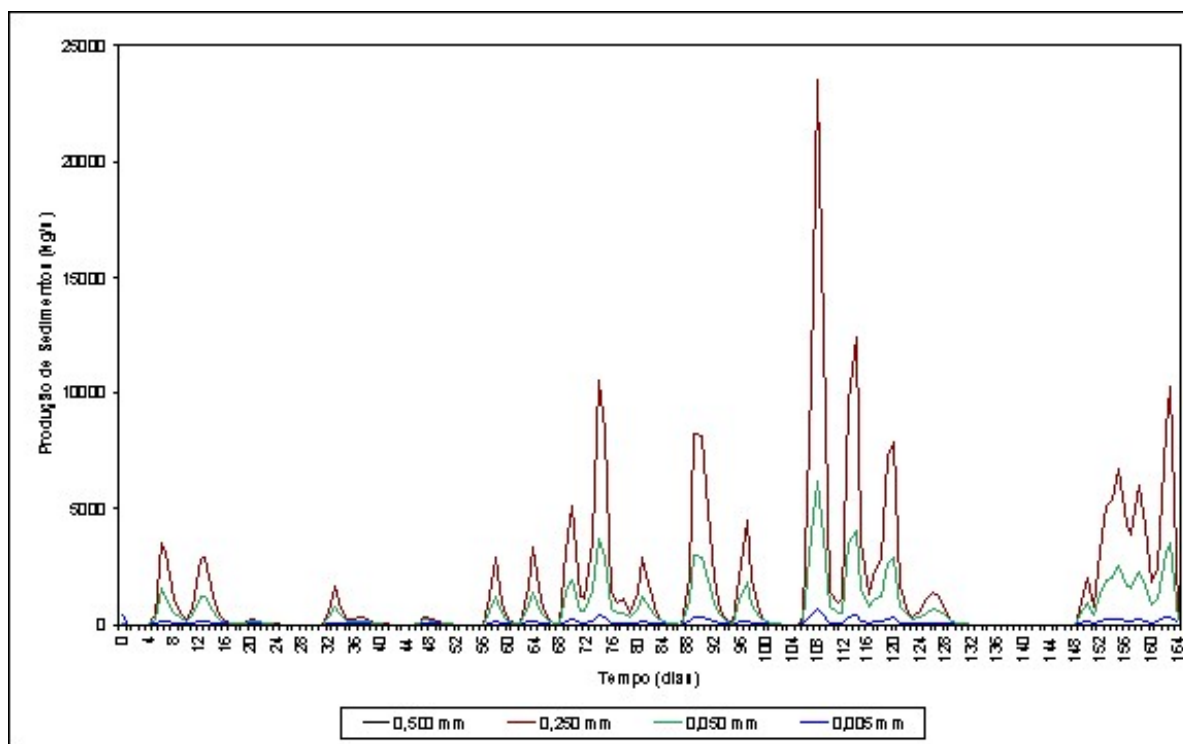


Figura 8: Sedimentograma contendo as classes de sedimentos.

CONCLUSÕES

Podemos concluir que a aplicação do modelo Kinneros é viável e pode ser usado em estudos voltados à simulação da produção de sedimentos, tanto em áreas rurais como urbanas. Neste trabalho, ele foi aplicado na barragem Pirapama, inserida na bacia do rio Pirapama, localizada no Estado de Pernambuco, Brasil.

Os resultados obtidos durante os seis meses avaliados, mostraram que as descargas de sedimentos produzidos

e transportados para a barragem Pirapama atingiram níveis elevados, podendo contribuir para um eventual assoreamento da barragem. Dessa forma, o trabalho ressalta a importância de futuras pesquisas direcionadas ao controle de áreas susceptíveis à erosão. O artigo vem contribuir também para alertar futuros projetos de planejamento voltados ao controle da erodibilidade de solos em áreas vitais para o desenvolvimento humano, como é o caso de barragens e outros equipamentos urbanos.

O modelo Kinneros vem reforçar a necessidade de se manter estações de medições de dados hidrológicos na região Nordeste inclusive no litoral. Pois, dados de erosão são praticamente inexistentes, uma vez que, como mostrado aqui, ferramentas robustas para simulação dos processos de erosão e vazão existem, faltando apenas dados para sua calibração e validação. No que tange a simulação de vazão e erosão, o modelo constatou sua viabilidade para simulação de eventos contínuos de chuva-vazão-erosão e seus impactos sobre uma barragem. Outros estudos podem ser elaborados na avaliação das consequências do acúmulo de sedimentos em reservatórios direcionados ao abastecimento d'água.

Conclui-se que os resultados expostos por este artigo não pretendem relatar a verdadeira descarga de sedimentos que entraram na barragem Pirapama, mas, vem alertar as autoridades responsáveis, para o grau de susceptibilidade da produção de sedimentos em prováveis áreas de risco, como é o caso da barragem Pirapama, pois a bacia do rio Pirapama se mostrou susceptível a produção de sedimentos. Espera-se que este trabalho sirva como base para a realização de outras pesquisas, principalmente aquelas voltadas para essa linha de pesquisa e nessa área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Carl Unkrich do *Southwest Watershed Research Center* – EUA, por fornecer o programa fonte utilizado no estudo, à ANA (Agência Nacional de Águas) pelos dados observados e a Eng^a. Simone Rosa da Silva da SECTMA-PE (Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco) pelas informações fornecidas.

Os autores são apoiados com recursos e bolsas do CNPq e MCT/FINEP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CORRADINI, C.; MELONE, F.; SMITH, R.E. Modeling infiltration during complex rainfall sequences. *Water Resources Research*, 1994. 30(10), 2777-2784.
2. ENGELUND, F.; HANSEN, E. A monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk Forlag. Copenhagen, 1967. 62 p.
3. GÓES, C. C. F. A influências das características da chuva e da cobertura vegetal sobre o escoamento e a erosão do solo. Campina Grande: /s.e./, 1993. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil /PPGEC/CCT/UFPB).
4. LACERDA JÚNIOR, H. B. Um estudo dos efeitos de escala e do uso do solo na parametrização do modelo NAVMO com dados de bacias do Cariri Paraibano. Campina Grande: /s.e./, 2002. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil /PPGEC/CCT/UFPB).
5. LOPES, W. T. A. Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida da Paraíba. Campina Grande: /s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil/CCT/ UFCG).
6. MA/DNPEA-SUDENE/DRN. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife: SUDENE, 1973, v. 1.
7. MEYER, P. L. Probabilidades: aplicações à estatística. Rio de Janeiro: Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1978.
8. RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. de O.; SRINIVASAN, V. S. Representação espacial de processos decisórios na gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas, Maceió. In: Encontro Regional de Recursos Hídricos. Anais... Maceió: Editora Universitária, 2001. Vol. I. p. 499-531.
9. SANTOS, F. de A. S. Previsão estatística da pluviometria da estação chuvosa na costa Este do Nordeste do Brasil. Campina Grande: /s.e./, 2002. Dissertação de Mestrado em Meteorologia/PPGCA/CCT/UFPB.
10. SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; NITÃO, I. A. Aplicação de um modelo hidrossedimentológico distribuído à bacia hidrográfica do rio Pirapama – PE. Curitiba – PR. Anais... XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. CD-ROM., Vol. 1 de 23 a 27 de Novembro de 2003. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
11. SMITH, R.E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. Modeling infiltration for multistorm runoff events. *Water Resources Research*, 1993. 29(1), 133-144.
12. TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Editora Universidade UFRGS/ABRH, 1998.
13. 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, 130 pp., 1990.