

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ÁREA DE ENGENHARIA EM RECURSOS HÍDRICOS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

AVALIAÇÃO COM MODELAGEM

**HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DA
PARAÍBA**

ALUNO: LAÉRCIO LEAL DOS SANTOS

SUPERVISOR / ORIENTADOR: VAJAPEYAM S. SRINIVASAN

Campina Grande, Dezembro de 2004

LAÉRCIO LEAL DOS SANTOS

RELATORIO DO ESTÁGIO SUPERVISIONADO

SUPERVISOR / ORIENTADOR: VAJAPÉYAM S. SRINIVASAN

Relatório apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Campina Grande – PB, Dezembro de 2004



Biblioteca Setorial do CDSA. Julho de 2021.

Sumé - PB

AGRADECIMENTOS

Ao grandioso Deus por me guiar em seus caminhos com saúde, paz, harmonia, sucesso e sabedoria durante toda essa caminhada.

Aos meus pais, Lourival Araújo dos Santos e Maria Natividade Leal dos Santos e meu irmão e minha cunhada pelo apoio, carinho e o incentivo de me encorajar para nunca desistir.

Ao Professor Dr. Vajapeyam S. Srinivasan, por me proporcionar essa oportunidade de desenvolver este estágio podendo ainda mais compartilhar de seus conhecimentos além de outras atividades de pesquisa.

Ao mestre Elton Cruz pelas inúmeras vezes que me auxiliou sem nenhuma restrição.

A todos os meus amigos que me incentivaram, apoiaram e de alguma forma me deram forças para seguir em frente.

SUMÁRIO

1.0 - APRESENTAÇÃO	01
2.0 - RESUMO DO PROJETO	01
2.1 – OBJETIVO DO PROJETO	02
3.0 - INTRODUÇÃO	03
3.1 – MATERIAL E METODOS	06
3.1.1 – BACIA EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DO CARIRI	06
3.1.2 – O MODELO WEPP (Water Erosion Prediction Project)	10
3.1.2.1 – Calculo de Infiltração no Modelo	12
3.1.2.2 - Escoamento sobre os Planos	14
3.1.2.3 - Fluxo nos Canais	14
3.1.2.4 - Erosão nos Planos e Canais	15
3.1.3 - O MODELO KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model)	16
3.1.3.1 - Modelo de Infiltração	17
3.1.3.2 - Fluxo nos Planos	18
3.1.3.3 - Condições de Fronteira	19
3.1.3.4 - Recessão e Microtopografia	20
3.1.3.5 - Fluxo nos Canais	21
3.1.3.6 - Modelagem da Erosão nos Planos e Canais	22
3.1.3.7 - Parâmetros de Entrada do Modelo Kineros2	23
3.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS	25
3.2.1 - MODELOS CHUVA-VAZÃO	26
3.2.2 - MODELOS EMPÍRICOS	26
3.2.3 - MODELOS CONCEITUAIS CONCENTRADOS	26
3.2.4 - MODELOS FUNDAMENTAIS	27
3.2.5 - MODELOS DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	28
4.0 - APLICAÇÃO DOS MODELOS	29
5.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1 - APLICAÇÃO DO MODELO WEPP à Bacia Experimental de São João do Cariri	30
5.2 - Aplicação do Modelo KINEROS à Bacia Experimental de São João do Cariri	33

5.3 - Análise de dados em relação à precipitação, escoamento e produção de sedimentos para o modelo WEPP	35
5.4 - Análise de dados em relação à precipitação, escoamento e produção de sedimentos para o modelo KINEROS	36
6.0 - CONCLUSÃO	38
7.0 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	40
ANEXOS	

SUMÁRIO FIGURAS

Figura 1. Estação Climatológica	07
Figura 2. Assentamento das Parcelas Experimentais	08
Figura 3. Croqui de localização das instalações de São João do Cariri	09
Figura 4. Vertedores	10
Figura 5. Fluxograma para o modelo WEPP.	11
Figura 6. Discretização da Micro-bacia 01	ANEXO
Figura 7. Discretização da Micro-bacia 02	ANEXO
Figura 8. Discretização da Micro-bacia 03	ANEXO

SUMÁRIO TABELAS

Tabela 1 - Classificação Sobre a Mudança e Uso do Solo.	05
Tabela 2 - Composição granulométrica do solo da parcela 1	30
Tabela 3 - Composição granulométrica do solo da parcela 2	32
Tabela 4 – Calibração dos parâmetros Ke e Kr da Micro-bacia 01	ANEXO
Tabela 5 - Calibração dos parâmetros Ke e Kr da Micro-bacia 02	ANEXO
Tabela 6 - Calibração dos parâmetros Ke e Kr da Micro-bacia 03	ANEXO
Tabela 7 - Calibração dos parâmetros Ke e Ki da Parcela 01	ANEXO
Tabela 8.1 - Calibração dos parâmetros Ke e Ki da Parcela 01 (Vegetada)	ANEXO
Tabela 8.2 - Calibração dos parâmetros Ke e Ki da Parcela 01 (Desmatada)	ANEXO
Tabela 9 – Valor médio de Ks para a Parcela 01	ANEXO
Tabela 10 - Valor médio de Ks para a Parcela 02	ANEXO
Tabela 11 - Valor médio de Ks para a Micro-bacia 01	ANEXO
Tabela 12 - Valor médio de Ks para a Micro-bacia 02	ANEXO
Tabela 13 - Valor médio de Ks para a Micro-bacia 03	ANEXO

1.0 – APRESENTAÇÃO

A região semiárida paraibana possui camadas de solos agricultáveis relativamente finas, seguidas de camadas rochosas. Na presença de chuvas, esse tipo de solo permite que o processo de erosão ocorra mais facilmente. Porém outros fatores tem contribuído para ocorrência desse fenômeno, tais como: desmatamento da região, culturas impróprias para o solo, criação de animais, etc.

Sabe-se que a principal causa da degradação dos solos é o processo erosivo, que provoca a perda de solo, além de retirar a capacidade produtiva do mesmo. Uma vez erodido, o solo é transportado para os locais de armazenamento, exigindo maiores investimentos para o tratamento da água, ou seja, causando um problema econômico. Pode-se observar que, o processo erosivo, traz não apenas consequências econômicas, mais sociais, já que a atividade agrícola fica comprometida pela pequena capacidade produtiva do solo.

A vegetação nativa da região é um agente importante na prevenção ou redução desse processo, já que proporciona uma maior proteção ao terreno, permite que a chuva não caia diretamente no solo, aumenta o poder de infiltração, diminuindo assim o escoamento superficial e como consequência, a erosão.

Com o desmatamento desordenado e crescente na região para meios de sobrevivência, criação de animais, muitas vezes sem apoio de órgãos competentes, favorecem o processo erosivo. O desmatamento por sua vez serve para inúmeras atividades, como: aumentar o espaço dos rebanhos e também para alimentá-los, para o uso em festas folclóricas da região nordestina em geral, como o São João, onde a prática de queimar fogueiras é tradicional, para as olarias, padarias entre outras atividades que necessitam de madeira.

2.0 - RESUMO DO PROJETO

Os processos que envolvem a erosão são temas de estudo em todo o Mundo. As regiões semi-áridas são as que recebem maior atenção, por essa atividade ocorrer com maior frequência. A região semi-árida do Brasil não fica de fora desse problema, onde o processo é tão intenso que existem áreas em processo de desertificação. Nessas áreas a cobertura vegetal e a fertilidade do solo são bastante sensíveis.

Em épocas de inverno, a precipitação ocorre sem que o solo possua uma cobertura vegetal que o proteja, e que permita que ocorra a infiltração da água no solo, fazendo com que toneladas de sedimentos sejam transportados pelo escoamento superficial. Dessa forma, é necessário o reconhecimento da região, das suas características geológicas, físicas e químicas que envolvem o solo.

Assim, os estudos serão realizados utilizando dados coletados nas microbacias e parcelas de erosão sob diferentes condições de graus de declividades e de cobertura vegetal. Pretende-se utilizar os dados da bacia experimental de São João do Cariri, parte já coletados pela equipe da UFCG, e novos dados a serem coletados na Bacia Escola.

Além de quantificar o escoamento superficial, será criado um banco de dados com as informações de chuva da região, suas características e sua pedologia. É importante para este trabalho possuir os dados da granulometria do solo, da bacia experimental e das parcelas.

A criação do Banco de Dados será de extrema importância para estudos posteriores por diversos pesquisadores com o objetivo de reconhecer a região e o processo de erosão nela envolvido. Este Banco de Dados contém informações obtidas diretamente da Bacia Escola de São João do Cariri, e dados a ele acrescentados por pesquisas já realizadas.

2.1 - OBJETIVO DO PROJETO

Catalogação e processamento dos dados coletados na Bacia Escola de São João do Cariri, análise de consistência e homogeneização dos dados processados e formação de um banco de dados hidrossedimentológicos; quantificar os processos do escoamento superficial e conseqüentemente produção de sedimentos em diferentes escalas de produção (duas parcelas de erosão de 100 m² e uma microbacia de 1800 m²); avaliar os efeitos de cobertura vegetal sobre a produção de água e sedimentos; avaliar os efeitos de escala com e sem o efeito da cobertura vegetal com base nos dados; modelagem do processo de escoamento superficial e erosão do solo.

Pretende-se também realizar vários trabalhos de campo, como: levantamento topográfico, análise granulométrica e coleta de dados pertinentes. Posteriormente, os dados serão processados, e verificados quanto à consistência, obtendo dessa forma, as características físicas dos experimentos de escoamento/erosão que estão instalados na Bacia Escola de São

João do Cariri a fim de realizar uma modelagem hidrossedimentológica nas duas parcelas e na microbacia instaladas nesta Bacia Escola.

3.0 - INTRODUÇÃO

Com o objetivo de suprir a procura por informações sobre o comportamento do solo do semi-árido nordestino, na presença ou não de vegetação a Universidade Federal de Campina Grande em convênio com o CNPq vem desenvolvendo um projeto que tem como finalidade avaliar os processos hidrossedimentológicos e quantificar as conseqüências das diversas modificações do meio ambiente na Região dos Cariris Velhos. Os estudos são realizados na Bacia Experimental de São João do Cariri no riacho dos Namorados, que foi instalada pela UFPB Campus II (hoje UFCG) no semi-árido paraibano com recursos do Convênio GTZ (Alemanha) / UFCG (Brasil), com o objetivo de atender as necessidades de um laboratório de campo, para a Área de Engenharia de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da UFCG. Os dados desta bacia, parte já coletados, estão em fase de processamento e análise e serão utilizados para as mesmas finalidades dos dados da Bacia Experimental de Sumé.

Os estudos iniciados em Junho de 1999 na Bacia Escola tem como objetivo criar uma metodologia para medir escoamentos e produção de sedimentos sobre parcelas e microbacias permitindo a quantificação das conseqüências do desmatamento na caatinga. Os resultados devem ser utilizados para o dimensionamento e a operação de pequenos perímetros de irrigação, a construção de pequenas barragens, etc.

A interferência do homem sobre o meio ambiente através da construção de açudes, perímetros irrigados, agricultura e pastagem provoca modificações significativas na superfície do solo.

A agricultura e a pecuária são atividades que estão associadas à retirada e substituição da cobertura vegetal nativa por plantios e pastagens respectivamente. O impacto causado pela retirada da cobertura vegetal, devido ao desmatamento, reflete-se nos parâmetros de infiltração da água no solo, e conseqüentemente, no escoamento superficial.

O valor *CN* do método do SCS (McCuen, 1982), é um parâmetro que está associado ao solo e as condições de uso no cálculo da capacidade de armazenamento de água no solo. Este número, que depende das características e do tipo do uso do solo, pode variar dentro de uma escala que vai de 0 (solo com permeabilidade infinita) a 100 (solo totalmente

impermeável). Os solos com florestas apresentam alta capacidade de infiltração (Pritchett, 1979) e, conseqüentemente, a quantidade de escoamento superficial produzida é pequena.

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) é um parâmetro utilizado no cálculo da velocidade de fluxo que vai afetar o escoamento. Alterações nas condições de cobertura vegetal, causadas principalmente pelo desmatamento, provocam modificações nos valores do coeficiente de rugosidade de Manning e conseqüentemente no processo de escoamento, (Chow, 1959; Shih e Rahi, 1982).

Um estudo realizado por Pickels (1931) citado por Chow (1959), por exemplo, nos canais de drenagem da cidade de Illinois, Estados Unidos, constatou que houve um aumento do coeficiente de rugosidade dos canais devido ao crescimento da vegetação.

Engman (1986) apresentou, em forma tabelar, os coeficientes de rugosidade de Manning para vários tipos de superfícies naturais e agrícolas, avaliados através da análise de hidrogramas observados, oriundos de chuvas simuladas. Outros trabalhos relativos à avaliação do coeficiente de rugosidade de Manning podem ser encontrados na literatura (Woolhiser, 1975; Huggins, 1966; Foster, 1968; Burman, 1970; Ree, 1977).

O comportamento do escoamento superficial em bacias rurais depende principalmente das características físicas da bacia de drenagem como a declividade, sistema de drenagem e cobertura vegetal.

Os efeitos das alterações nas condições naturais de uso do solo sobre o escoamento podem ser percebidos, principalmente, nas vazões médias e mínimas e no comportamento das enchentes. “Estudos experimentais existentes mostram que existe aumento do escoamento médio em pequenas bacias hidrográficas rurais com o aumento do desmatamento” (Tucci, 1997). A classificação dos principais tipos de alterações do uso do solo é mostrada na Tabela 1.0.

A retirada da vegetação pode provocar alterações também nas precipitações da região, pois ocorre uma redução do volume evaporado devido à diminuição da interceptação vegetal. Bruijnzeel (1996) cita o trabalho de Meher – Homji (1989) onde são mostrados alguns estudos que procuram associar evidências circunstanciais de redução de precipitação associados ao desmatamento. Porém, McCulloch e Robson (1993) afirmam que não existe nenhuma evidência de que a retirada ou aumento da vegetação afete a precipitação.

Tabela 1 - Classificação Sobre a Mudança e Uso do Solo.

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desmatamento ▪ Reflorestamento ▪ Impermeabilização
O uso da superfície	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Urbanização ▪ Reflorestamento para exploração sistemática ▪ Desmatamento: extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas perenes.
Método de alteração	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Queimada ▪ Manual ▪ Equipamentos

Fonte: Dissertação de Mestrado de Cruz, E. S. (2004)

Na literatura encontram – se diversos artigos sobre bacias experimentais, que mostram que o desmatamento produz o aumento do escoamento superficial em bacias rurais (Lal, 1983). No entanto, para as bacias de médio e grande porte os efeitos ainda são pouco conhecidos (Tucci e Clarke, 1997).

Na Ásia, Hsia e Koh (1983) analisaram os resultados de duas bacias experimentais, com a mesma declividade (~ 40%), sendo que uma bacia, de 8,39 hectares, permaneceu com condições naturais e a outra bacia, com, 5,86 hectares foi mantida desmatada. Eles constataram o aumento da vazão média após o desmatamento.

A tendência de crescimento da vazão média, devido à diminuição da cobertura da floresta nas pequenas bacias, é uma das conclusões dos estudos experimentais apresentados por Bosch e Hewlett (1882) e por Bruijnzeel (1990).

No entanto, os resultados indicados na literatura foram obtidos considerando apenas pequenas bacias hidrográficas, o que torna difícil realizar um prognóstico para as grandes bacias, devido a fatores como: variabilidade temporal e espacial, da precipitação, tipo de solo, cobertura etc. (Bruijnzeel, 1996).

Burch et al. (1987) analisaram os hidrogramas de duas bacias, uma de 7,8 e outra 5,0 hectares, com vegetação rasteira e floresta respectivamente, e constataram que o efeito da vegetação foi maior nos períodos secos, com eventos de pequena e média intensidade, pois

em áreas com vegetação densa as precipitações de baixa intensidade não produzem escoamento.

Modelos hidrológicos, que possam considerar os efeitos das mudanças de uso do solo vêm sendo utilizados por pesquisadores em seus estudos. Hugues e Smakhtin (1998) utilizaram dois modelos de precipitação – vazão em bacias distintas considerando a variabilidade de uso do solo. Concluíram que o comportamento dos modelos foi satisfatório e que os resultados nas simulações correspondiam às modificações introduzidas nos parâmetros.

No Brasil, Figueiredo e Srinivasan (1999) utilizaram o modelo NAVMO para avaliar os impactos causados pelo uso do solo e a influência dos açudes sobre o escoamento na bacia hidrográfica do açude de Sumé. Os diferentes tipos de uso de solo foram reproduzidos através de três tipos de cenários. No primeiro cenário, que representa o ressurgimento da vegetação foi considerada uma redução de 40% no valor CN e nos outros cenários, que representavam o desmatamento acelerado da caatinga, foram considerados um aumento de 40% do valor CN, no cenário 2, e de 80% no cenário 3. De acordo com os resultados obtidos concluíram que houve um aumento médio de 120% em relação ao volume anual e de 80% em relação às vazões máximas anuais.

3.1 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 - BACIA EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DO CARIRI

A região onde se encontra a Bacia Experimental de São João do Cariri apresenta-se com clima seco semiárido, solos rasos, subsolo derivado do embasamento cristalino, vegetação de caatinga, relevo ondulado e altitude variando entre 450 m a 550 m.

A microregião pode ser classificada bioclimaticamente como faixa subdesértica quente de tendência tropical, caracterizada por apresentar temperaturas médias anuais em torno de 25°C, índices pluviométricos de 400 mm anuais, com uma distribuição desequilibrada nos índices totais anuais, observando-se uma estação seca muito longa, com duração superior a oito meses, e a umidade relativa do ar abaixo de 65 %

Em Julho de 1998 o Projeto de Hidrologia Aplicada teve um grande reforço em suas atividades com a implantação, pelo Professor Vajapeyan S. Srinivasan, de uma nova pesquisa dentro da Bacia Experimental de São João do Cariri – PB, na qual o objetivo principal era a caracterização hidrossedimentológica dos solos da região através dos estudos de erosão

superficial provocada pelas chuvas. Neste contexto decidiu-se inicialmente instalar duas parcelas experimentais, localizadas a NE da Estação Climatológica de Superfície, seguindo as normas pré-estabelecidas por Wischmeier, com área de $100,0 \text{ m}^2$ ($4,5 \times 22,2 \text{ m}$) cada uma.

A partir de março de 1999, logo após o término das obras de construção das parcelas experimentais, foram observadas as primeiras chuvas que produziram escoamento. Em Junho de 2000, foi instalada a primeira microbacia (MB01), com área de 0,18ha e em Julho de 2001 foram encerradas as obras de instalação de duas novas microbacias, uma de 0,16ha (MB02) e outra de aproximadamente 1,16ha (MB03), sendo a microbacia de número 02 uma subbacia da microbacia de número 03, podendo-se assim, desde já, avaliar o efeito de escala sobre as bacias experimentais da região em estudo.

O curso d'água mais importante da Bacia é o Riacho Namorados, ao longo do qual estão localizados alguns açudes particulares. A Bacia Experimental de São João do Cariri tem uma área de aproximadamente 14 Km^2 e drena suas águas para o açude público dos Namorados construído pelo DNOCS.

A bacia localiza-se na parte média da Bacia do Rio Taperoá, com $7^\circ 25'$ de latitude Sul e $36^\circ 30'$ de longitude Oeste, nas proximidades da cidade de São João do Cariri.

Vários instrumentos foram instalados na bacia escola desde 1985, tendo sua operação iniciado em 1987. O monitoramento é realizado através das parcelas experimentais, das micro-bacias, de linígrafos, pluviômetros, pluviógrafos, régua linimétrica, régua de máxima, coleta de material, levantamento topográfico, acompanhamento da erosão e outras atividades.

Uma estação climatológica de superfície – ECS (Figura 1) foi equipada com vários instrumentos para medição das variáveis climatológicas (precipitação, temperatura, radiação, umidade, vento, etc).



Figura 1. Estação Climatológica

Os pluviômetros são instrumentos de leitura direta e permitem a obtenção de dados relativos á quantidade de precipitação.

Os pluviógrafos são instrumentos registradores de precipitação, dotados de um mecanismo de relojoaria, no qual é acoplado o pluviograma, que irá permitir o processamento do registro durante a precipitação ou após o acúmulo de uma determinada quantidade de água (geralmente pequena).

As parcelas são áreas relativamente planas que podem variar de 1 m² a 100 m², com declividade variável, limitadas artificialmente, possuindo como nas Bacias Hidrográficas um exutório, onde são adaptados tanques, de materiais os mais diversos possíveis, que permitem quantificar o escoamento e a erosão produzidas. Na Bacia Experimental adotou-se uma área de 100m², medindo 4,5m de largura por 22,2m de comprimento, tendo como divisores artificiais telhas de fibrocimentoamianto. São concebidas para funcionar sem a intervenção direta do operador durante o seu funcionamento.

As duas parcelas instaladas possuem declividade de 3,4% e 3.6% respectivamente (Parcelas1 e 2). Uma sem vegetação, preparada de acordo com as normas de Wischmeier, é mantida descoberta e preparada com faixa de aração no sentido do declive. Todas as vezes que se fizerem necessárias à aração será realizada. A outra é mantida em pousio de dois anos (Figura 2).

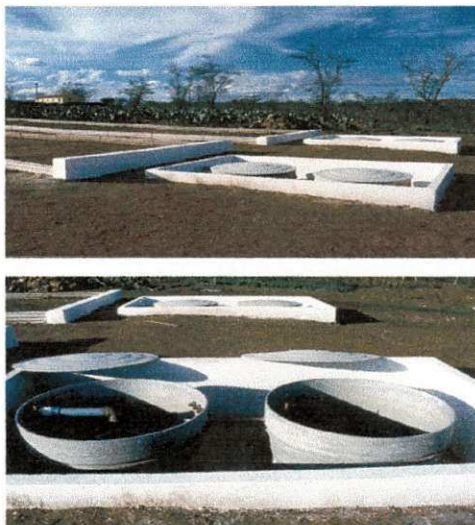


Figura 2. Assentamento das Parcelas Experimentais

Mais recentemente foram instaladas microbacias experimentais para medição do escoamento e erosão do solo. Segundo conceituações do Decênio Hidrológico Internacional, a Bacia, Sub-bacia ou Microbacia Experimental é definida como “aquela na qual se podem

modificar a vontade as condições naturais, como por exemplo a cobertura vegetal ou o solo, mediante procedimento de combate à erosão e onde sejam estudados os efeitos dessas modificações sobre o ciclo hidrológico”.

Sendo a Bacia Hidrográfica a área que drena as águas das chuvas por ravinas, canais e tributários, para um curso principal, com vazão efluente convergindo para uma única saída e desaguando diretamente no mar ou em um grande lago, pode-se afirmar que o conceito de Microbacia é o mesmo de Bacia Hidrográfica, acrescido de que o deságüe se dá também em outro rio, porém a dimensão superficial da Microbacia é menor que 20.000ha.

A Bacia, Sub-bacia ou Microbacia é formada por divisores de água e uma rede, padrão ou sistema de drenagem, rico em ravinas, canais e tributários, caracterizada pela sua forma, extensão, densidade e tipo.

A primeira microbacia, instalada em Junho de 2000, na Bacia Escola São João do Cariri possui área de 0,18ha e tem declividade média em torno de 7,5%, onde se preservou a cobertura vegetal existente da superfície, e no seu exutório adaptou-se uma fossa de sedimentos em fibra de vidro, pré-dimensionada para coletar cheias em áreas de até 1ha com intensidade de precipitação de 150mm/h para inclinação de 9%. A Figura 3, mostra o croqui destas instalações.

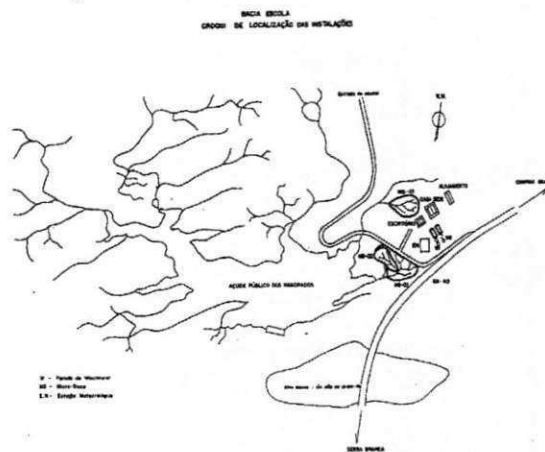


Figura 3. Croqui de localização das instalações de São João do Cariri

Dois linígrafos foram instalados em dois riachos, afluentes ao açude dos Namorados, além de vertedores (Figura 4) convencionais (soleira espessa e delgada).

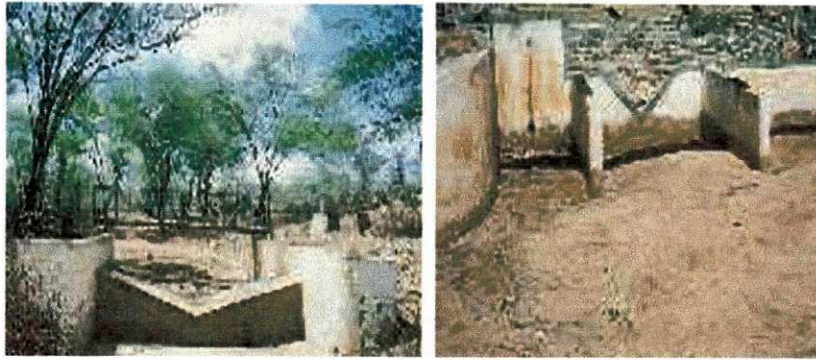


Figura 4. Vertedores

Para quantificar o escoamento e a erosão do solo nessa região foram utilizados dois modelos hidrossedimentológico, orientado a evento, um chamado WEPP (Water Erosion Prediction Project) e o outro chamado KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model), na bacia experimental de São João do Cariri-PB.

A aplicação do modelo foi realizada nas duas parcelas e nas tres micro-bacias, sendo todos, equipados para medir o escoamento superficial e a erosão do solo nos eventos naturais da chuva. As micro-bacias e as duas parcelas eram desmatadas. Os resultados encontrados mostram o efeito pronunciado do desmatamento na produção do escoamento superficial e a erosão, bem como a eficácia do modelo WEPP e KINEROS2 como instrumentos da simulação. Modelos hidrossedimentológicos tem sido de grande valia para este fim, mas, diversos modelos produzem respostas diferentes quando aplicado numa mesma bacia ou região. Portanto, uma avaliação criteriosa destes modelos, com dados confiáveis do campo se torna uma etapa fundamental.

3.1.2 - O MODELO WEPP (Water Erosion Prediction Project)

O WEPP é um pacote de programas computacionais de predição da erosão, desenvolvido através de um programa interinstitucional envolvendo diversas instituições norte-americanas: como: USDA e USDI, órgãos governamentais envolvidas na conservação de água e solo. Tal pacote teve como objetivo elaborar uma tecnologia para o planejamento ambiental e a conservação da água e do solo, a fim de permitir a predição dos impactos resultantes de práticas de manejo das terras para produção agrícola, pastagens e áreas florestais na erosão.

O modelo de erosão do WEPP é um conjunto de programas computacionais de simulação a evento, o qual prediz a perda de solo (ou a deposição) devido ao escoamento superficial em encostas, a perda de solo ou a deposição de sedimentos devido ao escoamento concentrado em sulcos ou pequenos canais, bem como a deposição de sedimentos em reservatórios.

Além do componente de erosão, o WEPP também inclui um componente climático, o qual usa um gerador de informações climáticas diárias; um componente hidrológico (que é baseado nas equações de Green-Ampt modificada para infiltração e soluções das equações de ondas cinemáticas); um componente de balanço hídrico diário; um componente de crescimento de planta e decomposição de resíduos; e um componente de irrigação. O modelo WEPP calcula as distribuições espacial e temporal da perda de solo e sua deposição, além de fornecer estimativas explícitas de quando e onde, numa determinada bacia hidrográfica ou encosta, está ocorrendo erosão, de forma a possibilitar a adoção de medidas de conservação para controlar a perda de solo e a produção de sedimentos.

Existe uma versão do WEPP (Hillslope) que, à semelhança do ANSWERS, subdivide a área a ser avaliada em pequenas células, nas quais os parâmetros hidrológicos e erosivos, como tipo de solo, superfície do solo, cobertura do solo e manejo do solo, dentre outros, são considerados uniformes.

Na modelagem para predição da perda de solo, a erosão é considerada separadamente como erosão nos sulcos ou pequenos canais e nos planos. A erosão nos planos é descrita como o processo de desprendimento das partículas de solo pelo impacto das gotas de chuva, transporte pelo escoamento de lâmina rasa e liberação de sedimentos para os pequenos sulcos ou canais. A erosão em sulcos ou pequenos canais é expresso como uma função da capacidade do escoamento em desprender os sedimentos, da capacidade de transporte do escoamento e da carga de sedimentos existentes no escoamento (Flanagan e Nearing, 1995).

O fluxograma do modelo WEPP, onde está indicada como o modelo se comporta internamente, desde seus dados de entrada passando por toda caracterização da área com seus respectivos valores de coeficientes e das variáveis, até os dados de saída do programa, de cada evento nele gerado.

O WEPPSIE (*WEPP Surface Impoundment Element*) é a ferramenta do modelo na qual encontram-se várias situações de terrenos (sulcos) (Foster e Lane, 1987). Para determinar o impacto do escoamento no sedimento transportado, o usuário necessita saber:

1. Ponto máximo do fluxo e do volume;
2. ponto máximo concentração de sedimento e o total de sedimento produzido;
3. o tempo de encher sulco com sedimento.

Para o programa incorporar estes requisitos em seu código, o WEPPSIE inclui cinco seções: uma interface de frente, entrada diária, simulação hidráulica, simulação de sedimentação e produção diária.

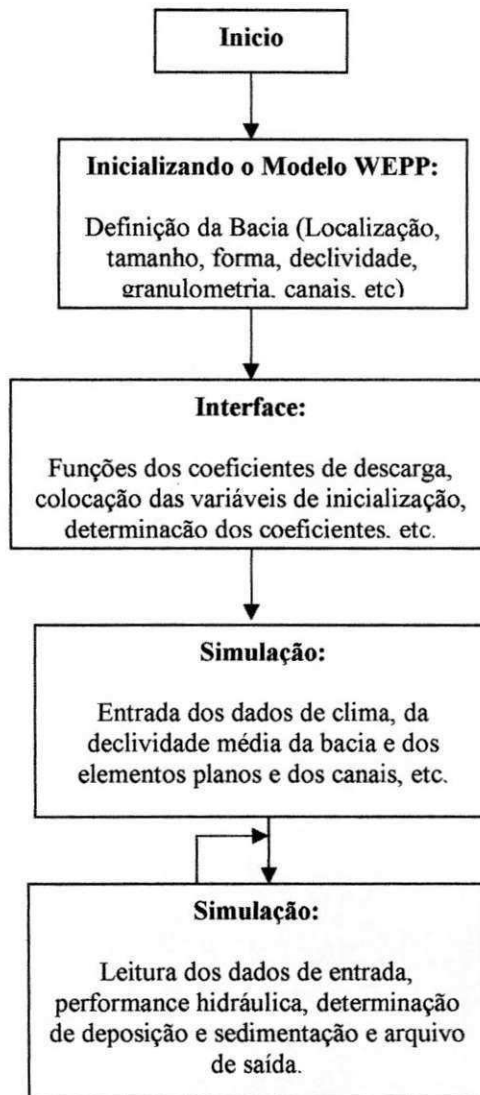


Figura 5 . Fluxograma para o modelo WEPP.

3.1.2.1 - Calculo de Infiltração no modelo.

O índice médio de infiltração, f_i ($m.s^{-1}$), para um intervalo é calculado como

$$f_i = \frac{F_i - F_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

Onde o subscrito i e $i-1$ refere à intervalos correntes e prévios de tempo respectivamente, F = profundidade cumulativa de infiltração (m), e t = tempo (s). A infiltração cumulativa é calculada usando o modelo de Mein e Larson (1973), e o de Green-Ampt Mein-Larson (GAML) como apresentado por Chu (1978) para o caso de intensidade de chuva incidente em um determinado ponto de alagamento.

Chu (1978) calculou um indicador, C_u (m), pelo qual determina, se esse ponto de empoçamento ocorre dentro de um intervalo dado de intensidade chuva, não tendo ocorrido em nenhum ponto do elemento, no começo do intervalo, o empoçamento. Se C_u é positivo, o empoçamento ocorre dentro do intervalo. Neste caso, o tempo para o empoçamento dentro do intervalo é calculado e a partir daí começa o escoamento superficial. Se for negativo, não há excesso da precipitação gerada no intervalo. O indicador é dado por:

$$C_u = R_i - V_i - \left[\frac{K_e \Psi \theta_d}{r_{i-1} - K_e} \right] \quad (2)$$

Onde R é a altura da chuva acumulada (m), V é a altura do excesso de chuva acumulada (m), K_e = condutividade hidráulica efetiva saturada ($m \cdot s^{-1}$), Ψ = potencial capilar médio (m), θ_d = déficit de umidade na mistura de solo ($m \cdot m^{-1}$), e r é a taxa de chuva média ($m \cdot s^{-1}$). O déficit de umidade na mistura de solo é calculado como:

$$\theta_d = \eta_e - \theta_v \quad (3)$$

Onde η_e = porosidade efetiva ($m \cdot m^{-1}$) e θ_v = conteúdo volumétrico inicial da água por unidade de área ($m \cdot m^{-1}$). A altura de excesso de chuva acumulado é calculada por

$$V_i = R_i - F_i \quad (4)$$

O indicador para o fim de alagamento no elemento durante um intervalo, admitindo que a superfície estava alagada no início do intervalo, é dado por:

$$C_p = R_i - F_i - V_i \quad (5)$$

C_p (m) é positivo para o caso de alagamento contínuo e negativo para alagamento cessado no intervalo. Quando o excesso da chuva termina dentro do citado intervalo, a infiltração acumulada é calculada como:

$$F_i = R_i - V_{i-1} \quad (6)$$

3.1.2.2 - escoamento sobre os Planos

Visto em uma escala muito pequena, o fluxo nos planos é um processo tridimensional extremamente complexo. Numa escala maior, entretanto, pode ser visto como um processo unidimensional onde se pode aplicar a seguinte equação:

$$q = \alpha h^m \quad (7)$$

onde q é a descarga por unidade de largura (m^2/s) e h é o volume de água armazenado por unidade da área (m). Os parâmetros α e m são dados por: $\alpha = C(S_0)^{0.5}$ onde C é o coeficiente de Chezy ($m^{0.5} \cdot s$) e S_0 é a declividade e $m = 1,5$.

A Eq. (7) é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad (8)$$

Onde t é o tempo (s), x é a distância ao longo do sentido da declividade, e v é o excesso de precipitação (m/s).

Para o modelamento do fluxo nos planos, a Eq. (7) é substituída na Eq. (8), onde se obtém:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = v \quad (9)$$

As equações de onda cinemática, que são simplificações das equações de Saint Venant, não preservam todas as suas propriedades, tais como as utilizadas em modelos difusos, os quais consideram os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, e como nos modelos hidrodinâmicos, onde se consideram todos os termos que representam os efeitos da gravidade, do atrito, da pressão e da inércia do fluxo (Lopes,2002). As equações de onda cinemática são resolvidas no modelo usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos, em relação à distância e ao tempo.

3.1.2.3 - Fluxo nos Canais

A equação da continuidade para um canal com entrada lateral de fluxo é:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Q \quad (10)$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), q é a vazão no canal (m^3/s), e o Q é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s). A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção transversal é dada por:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad (11)$$

onde R é o raio hidráulico (m), $\alpha = C(S_0)^{0,5}$ sendo S_0 é a declividade e C é o coeficiente de Chezy e $m = 1,5$. As equações cinemáticas de fluxo para os canais são resolvidas por uma técnica implícita definida em quatro pontos similar àquela para o fluxo nos planos, com a diferença que a incógnita agora é a área A e não a profundidade do fluxo h , e que as mudanças geométricas devido à variação da profundidade devem ser consideradas.

3.1.2.4 - Erosão nos Planos e Canais

Na modelagem para predição da erosão pelo programa WEPP, é utilizada a equação da continuidade para quantificação do transporte de sedimentos numa área, considerando-se condições de regime permanente, ou seja:

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (12)$$

onde G é carga de sedimentos, $M T^{-1} L^{-2}$, x é o comprimento da encosta L , D_i é a taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas (entre sulcos) $M T^{-1} L^{-2}$ e D_r é taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais, $M T^{-1} L^{-2}$.

A liberação de sedimentos nos canais é considerada independente de x e é sempre positiva. A erosão nos planos é positiva para desprendimento e negativa para deposição de sedimentos.

A taxa de liberação de sedimentos em áreas nos planos (D_i), usada nesse programa, pode ser calculada pela equação 13, proposta por Flanagan e Nearing (1995).

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (13)$$

onde C_i é o parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão dos canais, adimensional, K_i é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos, MTL^4 ; o I_p

é a intensidade de precipitação, $L T^{-1}$ e G_e é o parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo para erosão.

A taxa de liberação de sedimentos em sulcos ou pequenos canais (D_r) é calculado para os casos em que a tensão cisalhante do escoamento exceder a tensão cisalhante crítica do solo e quando a carga de sedimentos for menor que a capacidade de transporte do escoamento. O valor de D_r pode ser obtido, utilizando-se a equação apresentada por Tiscareno Lopez et al. (1994):

$$D_r = C_r K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (14)$$

onde C_r é o fator que considera a cobertura existente no plano adimensional, K_r é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos canais TL^{-1} , τ é a tensão de cisalhamento atuante nas partículas de solo em decorrência do escoamento $ML^{-2}T^{-1}$, τ_c é a tensão de cisalhamento necessária para a ocorrência da liberação de partículas, MT^{-1} calculado internamente pelo modelo em função da granulometria e T_c é a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento $ML^{-1}T^{-1}$.

3.1.3 - O MODELO KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model)

O modelo utilizado nesta pesquisa foi o KINEROS2, uma versão modificada do modelo Kineros (Woolhiser et al., 1990). O KINEROS2 é um modelo hidrológico semi-conceitual, orientado a evento, descreve os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em pequenas bacias urbanas e rurais. A bacia é representada por uma cascata de planos e de canais; as equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo nos planos, o fluxo nos canais, a erosão e o transporte do sedimento são resolvidas pelo método das diferenças finitas. A variação espacial da precipitação, da infiltração, do escoamento, e dos parâmetros da erosão pode ser considerada. Este modelo pode ser usado para determinar os efeitos, no hidrograma e no sedigrama de uma seção qualquer, de possíveis mudanças nas características da bacia, tais como: urbanização de uma área, construção de reservatórios, desmatamento, etc (Lopes, 2003)

Um modelo hidrológico é uma ferramenta que pode ser utilizada para monitorar 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; o impacto da urbanização de uma bacia, etc. As limitações básicas

desses modelos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos (Tucci, 1998 citado por Lopes 2003).

3.1.3.1 - Modelo de Infiltração

O modelo de infiltração permite uma redistribuição de água no solo, incluindo a recuperação da capacidade de infiltração durante os intervalos entre as chuvas, determinando as taxas de infiltração durante e após esse intervalo sem chuva. A taxa de infiltração f_c é função da lâmina acumulada de infiltração I e de alguns parâmetros básicos que descrevem as propriedades de infiltração no solo: condutividade hidráulica saturada efetiva K_s (m/s), valor efetivo do potencial de capilaridade G (m), porosidade do solo ϕ , e índice de distribuição dos tamanhos dos poros λ . Há também um parâmetro opcional (C_v), que descreve a variação aleatória espacial da condutividade hidráulica saturada do solo, assim como um parâmetro que representa a porcentagem de rochas, *ROCK*. Existe também uma variável que depende do evento de precipitação, a saturação relativa inicial do solo S_i (m^3/m^3), cujo valor é dado por θ_i/ϕ , onde θ_i é o índice de umidade inicial do solo. O cálculo da taxa de infiltração f_c (m/s) é feito pela seguinte equação (Smith e Parlange, 1978):

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha I/B} - 1} \right] \quad (4.1)$$

onde $B = (G + h)(\theta_s - \theta_i)$, combinando os efeitos do potencial efetivo de capilaridade, G , profundidade do fluxo, h (m), e da capacidade de armazenamento de água do solo, $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i)$, onde θ_s é o umidade de saturação do solo (m^3/m^3). O parâmetro α representa o tipo de solo; α se aproxima de 0 para uma areia, e neste caso, a Eq. (4.1) aproximase à equação de GreenAmpt; α se aproxima de 1 para um solo franco bem uniforme, neste caso a Eq. (4.1) representa a equação de infiltração de SmithParlange (Smith e Parlange, 1978). A maioria dos tipos de solo é melhor representada por um valor de α igual a 0,85, sendo este o valor adotado no modelo (Smith et al., 1993).

O valor efetivo do potencial de capilaridade G é dado pela seguinte expressão:

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad (4.2)$$

onde Ψ é o potencial mátrico do solo (m).

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:

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[r - K_i - \left(K(\theta_0) + \frac{\beta p K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right] \quad (4.3a)$$

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 $r < 0$) e $G(\theta_i, \theta_0)$ é o valor efetivo do potencial de capilaridade na frente de redistribuição de água (m).

Nestes 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):

$$K(\theta) = K \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2/\lambda} \quad (4.3b)$$

onde θ é a umidade do solo no período de redistribuição de água, K_s é a permeabilidade efetiva do solo (m/s), θ_r é a umidade residual do solo, θ_s é a umidade do solo na saturação, λ é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros (parâmetro de Brooks e Corey).

Maiores detalhes sobre o modelo de redistribuição de água no solo, utilizado no modelo Kineros2, pode ser obtida em Smith et al. (1993) e Corradini et al. (1994).

3.1.3.2 - Fluxo nos Planos

Visto em uma escala muito pequena, o fluxo nos planos é um processo tridimensional extremamente complexo. Numa escala maior, entretanto, pode ser visto como um processo unidimensional onde se pode aplicar a seguinte equação:

$$Q = ah^m \quad (4.4)$$

onde Q é a descarga por unidade de largura (m^2/s) e h é o volume de água armazenado por unidade da área (m). Os parâmetros a e m são dados 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 Eq. (4.4) é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad (4.5)$$

onde t é o tempo (s), x é a distância ao longo do sentido da declividade, e $q(x,t)$ é o excesso de precipitação (m/s).

Para o modelamento do fluxo nos planos, a Eq. (4.4) é substituída na Eq. (4.5), onde se obtém:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x,t) \quad (4.6)$$

As equações de onda cinemática, que são simplificações das equações de Saint Venant, não preservam todas as suas propriedades, tais como as utilizadas em modelos difusos, os quais consideram os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, e como nos modelos hidrodinâmicos, onde se consideram as equações de Saint Venant em sua forma geral, ou seja, incluindo os termos que representam a gravidade, o atrito, a pressão e a inércia do fluxo (Woolhiser et al., 1990).

As equações de onda cinemática são resolvidas no modelo usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos, em relação à distância e ao tempo.

3.1.3.3 - Condições de Fronteira

A profundidade de fluxo na fronteira à montante dos elementos deve ser especificada para solucionar a Eq. (4.6). Se essa fronteira fizer parte do divisor de águas da bacia, a condição de fronteira será:

$$h(0,t) = 0 \quad (4.7a)$$

Se um plano estiver contribuindo à montante para outro plano, a condição de fronteira será:

$$h(0,t) = \left[\frac{a_u h_u(L,t)^{m_u} W_u}{aW} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.7b)$$

onde $h_u(L,t)$ é a profundidade na fronteira inferior do plano contribuinte no tempo t , L é o comprimento e W_u é a largura do plano contribuinte, a_u é o parâmetro declividade/rugosidade do plano contribuinte, m_u é um expoente referente ao plano contribuinte, e a , m e W são referentes ao plano à jusante.

3.1.3.4 - Recessão e Microtopografia

A microtopografia do relevo pode ter grande importância na forma do hidrograma (Woolhiser et al., 1996). O efeito é mais pronunciado durante a recessão, quando a parte do solo coberta pelo fluxo de água determina a oportunidade para a perda de água pela infiltração. O modelo trata este relevo supondo que na sua geometria existe uma elevação máxima, e que a área coberta por água varia linearmente com a diferença entre este valor e o nível de água. A geometria da microtopografia é determinada especificando dois parâmetros que representam o espaçamento médio (parâmetro *spacing*, m) entre os picos e o valor médio (parâmetro *relief*, m) desses picos nessa microtopografia.

3.1.3.5 - Fluxo nos Canais

A equação da continuidade para um canal com entrada lateral de fluxo é:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad (4.8)$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), Q é a vazão no canal (m^3/s), e o $q(x,t)$ é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s). A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção transversal é dada por:

$$Q = aR^{m-1}A \quad (4.9)$$

onde R é o raio hidráulico (m), $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

As equações cinemáticas de fluxo para os canais são resolvidas por uma técnica implícita definida em quatro pontos similar àquela para o fluxo nos planos, com a diferença que a incógnita agora é a área A e não a profundidade do fluxo h , e que as mudanças geométricas devido à variação da profundidade devem ser consideradas.

3.1.3.6 - Modelagem da Erosão nos Planos e Canais

A equação geral que descreve a dinâmica dos sedimentos dentro do fluxo é a equação de balanço de massa, similar àquela para o fluxo de água (Bennett, 1974):

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t) \quad (4.10)$$

onde C_s é a concentração de sedimento no fluxo (m^3/m^3), Q é a vazão hidráulica (m^3/s), A é 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 ($m^3/s/m$).

Nos planos, a erosão é modelada como sendo composta por dois componentes principais: a erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo, e pela erosão (ou deposição) hidráulica, resultado da interação entre a força de cisalhamento do fluxo e a tendência das partículas de solo no fluxo se depositarem sob efeito da força da gravidade. A erosão resultante é o somatório da taxa da erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva e_s e da erosão hidráulica e_h :

$$e = e_s + e_h \quad (4.11)$$

A erosão por impacto das gotas de chuva é estimada pela seguinte expressão (Meyer e Wischmeier, 1969):

$$e_s = c_f e^{-c_h h} i^2 \quad (4.12)$$

na qual i é a intensidade da precipitação (m/s), o c_f é um coeficiente a ser determinado experimentalmente ou por calibração, que está relacionado às propriedades do solo e da superfície, e $e^{-c_h h}$ é um fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas de chuva devido ao aumento da lâmina d'água. O parâmetro c_h representa a efetividade do amortecimento da superfície da água, fixado no modelo como sendo igual a 656. A erosão hidráulica (e_h) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a capacidade de transporte do fluxo (concentração de equilíbrio) e a concentração real de sedimento, e é dada pela equação:

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (4.13)$$

onde 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, e c_g é um coeficiente da taxa de transferência de sedimentos (s^{-1}), e é calculado por:

$$\begin{aligned} c_g &= c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s \leq C_m \text{ (erosão) ou} \\ c_g &= \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s > C_m \text{ (deposição)} \end{aligned} \quad (4.14)$$

onde c_o é um coeficiente que reflete à coesão do solo e v_s é a velocidade de queda da partícula (m/s).

O modelo utiliza a fórmula de capacidade de transporte de Engelund e Hansen (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 (m/s) e S é a declividade, para estender a sua aplicabilidade a fluxos rasos. A equação para o cálculo da concentração de sedimentos na capacidade de transporte é a seguinte (Engelund e Hansen, 1967):

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - 0,004) \quad (4.15)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S_s é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65, d é o diâmetro do sedimento (m), h é a profundidade do fluxo (m) e as outras variáveis já foram definidas anteriormente.

A velocidade de queda da partícula é calculada pela seguinte equação:

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(S_s - 1)d}{C_D} \quad (4.16)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto da partícula, que é uma função do número de Reynolds, e é calculado pela seguinte expressão:

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34 \quad (4.17)$$

onde R_n é o número de Reynolds, calculado como $R_n = v_s d / \nu$, onde ν é a viscosidade cinemática da água. A velocidade de queda da partícula é encontrada resolvendo simultaneamente as equações (4.16) e (4.17).

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 tornase importante na representação da entrada de fluxo lateral.

3.1.3.7 - Parâmetros de Entrada do Modelo Kineros2

- **Parâmetros Globais**

1. **Units:** sistema de unidades utilizado para todos os parâmetros (métrico ou inglês);
2. **Clen:** comprimento característico, cujo valor é dado pelo comprimento do maior canal ou da maior cascata de planos.
3. **Temperature:** temperatura em graus Celsius ou Fahrenheit
4. **Diameters:** diâmetros representativos das partículas do solo, em milímetros ou polegadas. Limite máximo de cinco classes;
5. **Densities:** valores das massas específicas dos diâmetros das classes acima determinadas;

- **Parâmetros dos Planos**

1. **Identifier:** número de identificação do plano;
2. **Upstream:** número de identificação do plano à montante (se houver);
3. **Length:** comprimento (metros ou pés);
4. **Width:** largura (metros ou pés);
5. **Slope:** declividade;
6. **Manning:** coeficiente de rugosidade de Manning;
7. **Chezy:** coeficiente de Chezy;
8. **Relief:** altura média do relevo da microtopografia (milímetros ou polegadas)
9. **Spacing:** distância média do relevo da microtopografia (metros ou pés)
10. **Interception:** interceptação vegetal (milímetros ou polegadas)
11. **Canopy Cover:** fração da superfície ocupada por vegetação
12. **Saturation:** saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e porosidade do solo;
13. C_v : coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;
14. K_s : condutividade hidráulica saturada efetiva (mm/h ou polegadas/h);
15. G : valor efetivo do potencial de capilaridade dado pela Equação 4.2 (mm ou polegadas);

16. **Distribution** (λ): índice de distribuição do tamanho dos poros (índice de Brooks e Corey);

17. **Porosity**: porosidade do solo;

18. **Rock**: fração volumétrica de rochas. Se a permeabilidade é estimada com base na textura do solo, ela deve ser multiplicada por “1 Rock”, para considerar esse volume de rochas;

19. **Splash** (c_f): parâmetro da Equação 4.12, a qual representa a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva;

20. **Cohesion** (c_o): coeficiente de coesão do solo, Equação 4.14;

21. **Fractions**: fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

• **Parâmetros dos Canais**

1. **Upstream**: número de identificação do elemento (plano ou canal) à montante;

2. **Lateral**: número de identificação dos planos que contribuem lateralmente para o canal;

3. **Length**: comprimento (metros ou pés);

4. **Width**: largura da base (metros ou pés);

5. **Slope**: declividade;

6. **Manning**: coeficiente de Manning;

7. **Chezy**: coeficiente de Chezy;

8. **SS1, SS2**: declividades laterais;

9. **Saturation**: saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e porosidade do solo;

10. C_v : coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;

11. K_s : condutividade hidráulica saturada efetiva (mm/h ou polegadas/h);

12. G : valor efetivo do potencial de capilaridade dado pela Equação 4.2 (mm ou polegadas);

13. **Distribution** (λ): índice de distribuição do tamanho dos poros (índice de Brooks e Corey);

14. **Porosity**: porosidade do solo;

15. **Rock**: fração volumétrica de rochas. Se a permeabilidade é estimada com base na textura do solo, ela deve ser multiplicada por “1 Rock”, para considerar esse volume de rochas;

16. **Cohesion** (c_o): coeficiente de coesão do solo, Equação 4.14;

17. **Fractions:** fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

3.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

Modelo é a representação de algum objeto ou sistema numa forma ou linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (Cadier et al. 1987). A modelagem hidrológica consiste de descrição, através de métodos matemáticos, dos processos de chuva, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração e escoamento superficial. Os modelos de erosão consistem na descrição, através de modelos matemáticos, dos processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos (Figueiredo, 1998b). Segundo Beven (1989) os modelos, após a calibragem, permitem explorar as implicações de fazer certas hipóteses sobre a natureza do sistema real, e prever o seu comportamento sob circunstâncias que realmente poderiam ocorrer. Para que um modelo seja utilizado adequadamente, se faz necessário a compreensão da estrutura do modelo e suas limitações.

De acordo com Tucci (1998) os modelos classificam-se em: contínuos e discretos; concentrados e distribuídos; estocásticos e determinísticos; conceitual e empírico. Para Fleming & Al Kadhimi (1982) citado por (Galvão, 1990) os modelos matemáticos de simulação hidrológica podem ser classificados como determinísticos e estocásticos. Estas definições levam a crer que existe um consenso entre os autores nessas últimas classificações ou seja, sendo o modelo estocástico ou determinístico ele poderá ser também concentrado ou distribuído, conceitual ou empírico.

Um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo e discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. Um modelo é concentrado quando não se leva em conta a variabilidade espacial, e distribuído quando as variáveis e os parâmetros do modelo variam com o espaço e/ou o tempo. Segundo Dooge (1973) citado por Tucci (1987) um modelo é determinístico quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída (devendo as condições iniciais serem exatamente as mesmas para certos sistemas), enquanto que o modelo é estocástico quando o relacionamento entre a entrada e a saída é estatístico. Os modelos são ditos conceituais quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os resultados dos processos físicos.

Os modelos conceituais ainda podem ser classificados em semiconceituais (relacionam características do processo, embora mantenham um razoável empirismo nos parâmetros da

equação envolvida) e físicos (representam o mecanismo essencial que controlam o processo, incluindo variabilidades espaciais e temporais e podem identificar qual a parte do sistema que mais afeta o resultado). Por outro lado os modelos empíricos são aqueles que são gerados a partir dos dados observados, através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. São estatísticos por natureza e são aplicáveis apenas para as condições para as quais foram obtidos.

3.2.1 - MODELOS CHUVA-VAZÃO

Modelos do tipo chuva-vazão são modelos que procuram simular a vazão em uma dada seção, a partir da precipitação conhecida na bacia hidrográfica. Eles foram criados com as seguintes finalidades: melhor entendimento do fenômeno hidrológico na bacia, análise de consistência e preenchimento de falhas, dimensionamento de obras hidráulicas; previsão de cheias e análise das mudanças na resposta da bacia devido as modificações do uso da terra, entre outras. Segundo Tucci (1998) estes modelos surgiram com a necessidade de se obter séries hidrológicas de vazões mais longas e representativas, para diferentes projetos de recursos hídricos.

3.2.2 - MODELOS EMPÍRICOS

Os modelos empíricos são baseados em dados observados e fornecem sempre a mesma resposta para a mesma entrada. São obtidos a partir de métodos estatísticos de regressão, análise de correlação e métodos baseados em funções estatísticas. Eles possuem limitações no que diz respeito às mudanças efetuadas na bacia justamente pela falta de significado físico dos seus parâmetros conforme Bathurst and O'Connel (1992) citado por Figueiredo (1998).

3.2.3 - MODELOS CONCEITUAIS CONCENTRADOS

Muitos modelos hidrológicos são baseados na representação conceitual dos processos físicos que governam o fluxo de água através do meio poroso do solo e sobre ele. Tais modelos possuem dois tipos de parâmetros: parâmetros ligados às características da bacia (representam propriedades mensuráveis de uma bacia) e parâmetros de processo (representam propriedades que não são diretamente mensuráveis) (Sorooshian & Gupta, 1995).

Devido ao fato de poder incorporar conceitos ligados diretamente aos processos físicos os modelos chuva-vazão do tipo conceitual determinístico são os mais difundidos e utilizados.

Apesar de ter sido dito que estes modelos baseiam-se nos conceitos sobre os processos hidrológicos eles possuem internamente um conjunto de funções empíricas fazendo com que os mesmos produzam bons resultados para alguns casos não sendo, no entanto, bons modelos para os processos físicos envolvidos, de um modo geral.

Com o advento dos computadores e o desenvolvimento de máquinas cada vez mais velozes foram desenvolvidos inúmeros modelos matemáticos dentre os quais Galvão (1990) cita: SSARR, do US Army Corps of Engineers, o Stanford Watershed Model, da Universidade de Stanford, o de Boughton, Austrália, o Mero Model, o Institute of Hydrology Model, da Grã-Bretanha, entre outros (Clarke, 1973; Fleming, 1977). Segundo Galvão (1990) no Brasil são bastante utilizados o SMAP (Lopes et al., 1981), o IPH II (Tucci et al., 1987), e o MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989).

Abbott et al. (Beven, 1989) apontam como desvantagem ou limitação dos modelos conceituais concentrados, os seguintes pontos: eles necessitam de observações meteorológicas e hidrológicas relativamente longas para a sua calibração, a previsão dos efeitos das mudanças de uso do solo através da mudança no valor dos parâmetros não poderá ser efetuada com confiança, os modelos não utilizam informações relacionadas a topografia, tipo de solo e variações no tipo da vegetação.

3.2.4 - MODELOS FUNDAMENTAIS

Os modelos conceituais retratam as condições médias da bacia, sendo as variáveis envolvidas analisadas segundo uma ótica global. Como consequência os fenômenos são retratados segundo formulações baseadas em parâmetros empíricos (Tucci, 1987). Durante muitos anos os hidrólogos têm adotado vários modelos concentrados e baseados nas médias sobre a bacia porém, com pouca compreensão dos seus efeitos.

O desenvolvimento de pesquisas que se preocupam com os processos físicos que ocorrem nas bacias fez com que os modeladores procurassem aproximar os modelos da realidade física, o que permitiria uma análise da influência das modificações causadas pela ação antrópica e natural sobre o meio ambiente. Os processos desenvolvidos nas bacias seriam retratados através de equacionamento físico.

Nos modelos conceituais concentrados os parâmetros são comuns a toda a bacia perdendo-se com isto características individuais e próprias de cada parte da bacia. Os modelos físicos que consideram a variação espacial dos parâmetros são denominados de físico-distribuídos. Apesar de representar um grande avanço na modelagem hidrológica este tipo de

modelo requer uma quantidade muito grande de informação a respeito da bacia, o que limita a sua aplicação para algumas regiões.

3.2.5 - MODELOS DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Produção de sedimento diz respeito ao valor total de sedimento que sai de uma bacia hidrográfica ou de uma bacia de drenagem, medido numa seção de referência em um intervalo de tempo específico (Singh, 1989). O processo de produção de sedimento pode ser dividido em duas grandes categorias: a fase que ocorre nos planos e a fase que ocorre nos canais (Bennet, 1974).

Modelos de produção de sedimentos são representações hipotéticas dos processos físicos que ocorrem durante a erosão e o transporte de sedimentos de uma bacia (Bennet, 1974). Eles podem ser simples como uma equação de regressão ou complexos como os modelos que calculam a produção de água e sedimento nos planos e nos canais.

A modelagem da produção de sedimento é bem mais complexa do que os outros tipos de modelagens hidrológicas (chuva, vazão, evaporação, etc). Em se tratando dos processos de erosão existe uma dependência do modelo de erosão na resposta fornecida pelo modelo hidrológico. Deve-se observar que os processos de erosão compreendem as fases de desagregação das partículas, transporte e sedimentação. O resultado final depende de cada uma destas fases e do que acontece em cada um dos elementos da bacia. Por sua vez, essas fases dependem de como a chuva age sobre o solo e também do desenvolvimento do hidrograma gerado. Caso o modelo hidrológico não consiga reproduzir corretamente o hidrograma observado o modelo de erosão irá fornecer um resultado diferente do observado em campo.

A idéia principal para a modelagem de erosão nos planos é que a carga de sedimento é controlada pelos seguintes fatores: pela quantidade de sedimento disponível para transporte, pelo processo de desagregação ou pela capacidade de transporte do meio que transportará o material sólido. Assim como os modelos chuva-vazão eles também poderão ser divididos em empíricos, conceituais e fundamentais ou de base física.

Alguns modelos de erosão foram citados por Lopes (1987) tendo o mesmo os dividido em classe: modelos baseados na USLE (*Universal Soil Loss Equation*) ou MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) e modelos baseados nos processos físicos. Para o primeiro caso tem-se: PTR (*Pesticide Transport and Runoff*) Crawford e Donigian (1973), ACTMO (*Agricultural Chemical Transport Model*) Frere et al., (1975), ANSWERS (Beasley et al,

1980). Para o segundo caso tem-se os trabalhos de Bennett (1974), Simons et al. (1975), Smith (1976), Li (1979), Borah et al. (1981), Smith et al. (1981) e Alonso e Decoursey (1983).

4.0 - APLICAÇÃO DOS MODELOS

Verificando-se o solo da região encontra-se o solo predominante que é do tipo Bruno não Calcico Vertico, poderia estabelecer, a priori, alguns dos parâmetros do modelo como: $\alpha = 0,23$, a massa específica de sedimentos e o tamanho médio de sedimentos em cada unidade.

De acordo com a granulometria de amostras de solo coletadas na Bacia Experimental, o diâmetro mediano encontrado foi de 0,50 mm, na micro-bacia 1, 0,50 mm na micro-bacia 2, 0,85 mm na parcela 1 e 0,89 mm na parcela 2 e estes valores foram utilizados para calibração e validação do modelo. Os parâmetros de planos foram determinadas com os dados das parcelas 1 e 2. Os parâmetros de erosão nos canais foram obtidos com os dados de micro-bacia 3 e a validação foi realizada através da simulação de eventos na micro-bacia 1 e 2.

Para simular o volume total ou a lâmina do escoamento superficial, necessita-se a umidade inicial do solo, porosidade e o potencial mátrico do solo bem como a condutividade hidráulica saturada. Para um dado tipo do solo, com exceção da umidade inicial, os outros fatores podem ser considerados como fixos. Em vez de considerar a variabilidade desta umidade inicial e otimizá-la, decidiu-se fixar no valor médio a umidade inicial do solo em 75% (Cruz, 2004). Em consequência, o valor da condutividade hidráulica efetiva seria um variável entre eventos e decidiu-se calibrá-la em cada evento por tentativas de modo a aproximar o melhor possível o escoamento calculado e observado.

Os outros parâmetros a serem calibrados são K_i (erodibilidade do solo em planos em kg/s/m^4) e K_r (erodibilidade de solo em canais s/m). Estes se mostraram bastante sensíveis nos modelos. O parâmetro K_i foi calibrado utilizando os dados das parcelas de erosão 1 e 2 enquanto, o parâmetro K_r foi calibrado com os dados da micro-bacia 3 na qual para os elementos planos o valor médio de K_i obtido nas parcelas foi utilizado. A validade destes parâmetros foi testada com os dados de micro-bacia 3.

Para criar um banco de dados para que os modelos reconhecessem a região em estudo foi necessário discretizar as micro-bacias em planos e canais. A micro-bacia M3 foi

discretizada em 23 elementos, com 16 planos e 7 canais e a micro-bacia M4 em 16 planos e 4 canais por Lopes (2003) e o mesmo esquema foi utilizado neste trabalho. As discretizações se encontram em **ANEXO**.

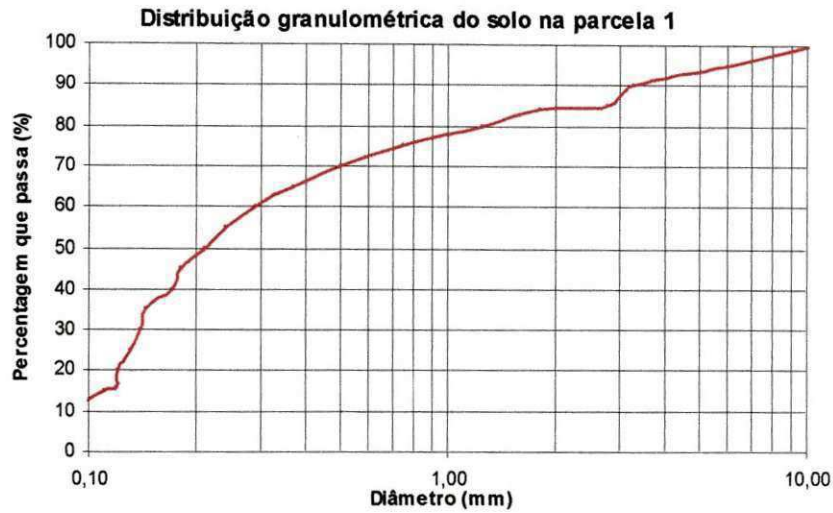
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - APLICAÇÃO DO MODELO WEPP à Bacia Experimental de São João do Cariri

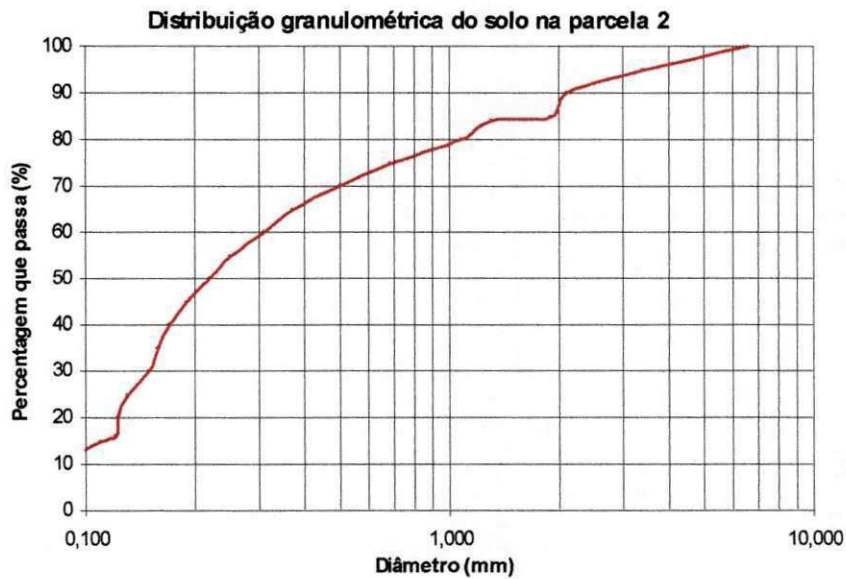
O solo foi classificado de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) que é a classificação padrão para os parâmetros do modelo. Segundo o triângulo de classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o solo da parcela 1 é uma areia argilosa (loamy sand), disposto nas seguintes frações mostrada na Tabela 2.0:

Tabela 2 - Composição granulométrica do solo da parcela 1

Tipo de solo	Fração (%)
Areia fina	50
Areia média	16
Areia grossa	18
Pedregulho	11
Silte e argila	5



Curva da granulometria do solo da parcela 1



Curva da granulometria do solo da parcela 2

Como o solo predominante da Bacia experimental de São João do Cariri é do tipo Bruno não Calcico, poderia estabelecer, a priori, alguns dos parâmetros do modelo como: albedo = 0,23, a massa específica de sedimentos e o tamanho médio de sedimentos em cada unidade.

De acordo com a mesma classificação da parcela 1, o solo da parcela 2 é uma areia (send), disposto nas seguintes frações mostrada na Tabela 3.0:

Tabela 3 - Composição granulométrica do solo da parcela 2

Tipo de solo	Fração (%)
Areia fina	50
Areia média	20
Areia grossa	22
Pedregulho	3
Silte e argila	5

Estes valores foram utilizados para calibração e validação do modelo. Os parâmetros de planos foram determinadas com os dados das parcelas 1 e 2. Os parâmetros de erosão nos canais foram obtidos com os dados das micro-bacias e a validação foi realizada através da simulação de eventos na micro-bacia 3.

Para simular o volume total ou a lâmina do escoamento superficial, necessita-se a umidade inicial do solo, porosidade e o potencial mátrico do solo bem como a condutividade hidráulica saturada. Para um dado tipo do solo, com exceção da umidade inicial, os outros fatores podem ser considerados como fixos. Em vez de considerar a variabilidade desta umidade inicial e otimizá-la, decidiu-se fixar no valor médio a umidade inicial do solo em 75%, Cruz, E. S. (2004).

Em consequência, o valor da condutividade hidráulica efetiva seria um variável entre eventos e decidiu-se calibrá-la em cada evento por tentativas de modo a aproximar o melhor possível o escoamento calculado e observado. Os outros parâmetros a serem calibrados são K_i (erodibilidade do solo em planos em kg/s/m^4) e K_r (erodibilidade de solo em canais s/m). Estes se mostraram bastante sensíveis no modelo. O parâmetro K_i foi calibrado utilizando os dados das parcelas de erosão 1 e 2 enquanto, o parâmetro K_r foi calibrado com os dados da micro-bacia 3 na qual para os elementos planos o valor médio de K_i obtido nas parcelas foi utilizado.

A validade destes parâmetros foi testada com os dados de micro-bacia 3. A micro-bacia (M01) foi discretizada em 62 elementos, com 38 planos e 24 canais (Figura 6 - em

ANEXO), a micro-bacia (M02) em 27 planos e 13 canais (Figura 7- em **ANEXO**) e a micro-bacia (M03) em 67 planos e 32 canais (Figura 8 - em **ANEXO**), por Lopes (2003).

As tabelas 4, 5 e 6 (**ANEXO**) para as microbacias 1, 2 e 3 respectivamente, mostram os resultados finais da calibração dos parâmetros K_e e K_i . As tabelas 7, 8.1 e 8.2 mostram os resultados para as parcelas. A calibragem foi bastante satisfatória, tendo em vista que o escoamento e a erosão calculados quase igualaram os observados sem provocar uma variação muito grande entre os valores máximos e mínimos encontrados.

Utilizando o valor médio de $4,385 \times 10^6$ kg.s/m⁴ do parâmetro K_i das parcelas o valor de K_r para cada evento foi otimizado. Considerando que a faixa da variação deste parâmetro não é muito grande, os resultados podem ser considerados satisfatórios.

O coeficiente da determinação para os valores simulados de escoamento foi superior a 96% enquanto para erosão o mesmo foi superior a 97% indicando um excelente desempenho.

5.2 - Aplicação do Modelo KINEROS à Bacia Experimental de São João do Cariri

Inicialmente foi feito um estudo minucioso do modelo KINEROS2 para uma melhor compreensão do seu funcionamento, aplicação e análise dos resultados obtidos, objetivando a sua utilização para simular o escoamento e a erosão (produção de sedimentos) nos experimentos.

De acordo com os conhecimentos adquiridos neste estudo, verificou-se que nas equações mostradas na seção anterior, os parâmetros calibráveis do modelo são: Saturação Inicial Relativa do solo (Sat) para o escoamento superficial e o parâmetro c_f , coeficiente da eq. (4.10), a qual representa a erosão por impacto das gotas de chuva no solo. Existe também o parâmetro c_o , parâmetro que reflete à coesão do solo (eq. 4.12), mas mostra-se pouco sensível no cálculo da erosão total.

Aqui serão feitas simulações para calibrar também a Condutividade Hidráulica de Saturação do solo (K_s) e verificar qual o valor de K_s mais adequado para este tipo de solo e a influência da cobertura vegetal sobre ele, já que esse parâmetro é bastante sensível à calibração do modelo.

Para as simulações feitas, foram usados dados de 93 cheias coletados no período de 14/03/1999 a 26/07/2002. Dados complementares tais como levantamento topográfico e pedológico também foram coletados neste mesmo período.

Para título de ilustração de como se procederão as simulações, será feita, uma simulação com dados de um evento ocorrido no dia 06/03/2002 na região e medidas no pluviógrafo da Estação Meteorológica da Bacia Experimental de São João do Cariri, onde será mostrado os arquivos de parâmetros, de tempo e de saída do KINEROS2, programa que será usado na pesquisa.

Para a densidade relativa dos grãos de solo foi adotado 2,65 que corresponde à densidade específica dos grãos de quartzo.

A temperatura da água foi adotada como sendo 25°C que é o valor médio da temperatura da região onde se localiza a Bacia Escola.

O coeficiente de rugosidade de Manning foi adotado de acordo com as características das parcelas, onde adotou-se o valor de 0,02.

A condutividade hidráulica saturada efetiva K_s foi calibrada para as duas parcelas. O valor de 5,0 mm/h é mais freqüentemente encontrado na região (Galvão, 1990, citado por Lopes, 2003). No entanto, apenas a parcela 1 apresentou um valor consideravelmente aproximado deste valor. O valor melhor calibrado de K_s para a parcela 1 foi $K_s = 3$ mm/h. Para a parcela 2 o valor de K_s que melhor ajustou a lâmina escoada foi $K_s = 5$ mm/h. As Tabelas 9 e 10 que se encontram em **ANEXO** mostram as simulações feitas para cada parcela com $K_s = 3$ mm/h e $K_s = 15$ mm/h, respectivamente. As tabelas 11, 12 e 13 mostram os resultados da simulação feitas para as microbacias.

A inclinação das parcelas foram determinadas através de levantamento topográfico, sendo 3,4% para a parcela 1 e 3,6% para a parcela 2.

Os parâmetros relacionados à microtopografia (relief e spacing) não alteram muito o resultado do escoamento superficial e foram assumidos como sendo igual a 2,0 mm 0,3 m respectivamente para as duas parcelas.

O valor efetivo do potencial de capilaridade (G), da porosidade (Φ) e do índice de distribuição dos tamanhos dos poros (λ) variam de acordo com o tipo de solo. De acordo com as tabelas que a literatura do Programa KINEROS2 apresenta para a classificação desses parâmetros temos:

Para a parcela 1: $G = 70$, $\Phi = 0,437$ e $\lambda = 0,55$.

Para a parcela 2: $G = 50$, $\Phi = 0,437$ e $\lambda = 0,69$.

O parâmetro relacionado à coesão do solo, C_o , é um parâmetro pouco sensível e pode ser adotado qualquer valor entre 0 e 1, no caso foi adotado 0,01.

A saturação inicial relativa do solo varia de evento para evento e foi determinado por calibração, ajustando-se até que o volume escoado calculado se iguale ao volume escoado observado. O parâmetro c_f é o parâmetro que mede a erosão por impacto das gotas de chuva e é calibrado para cada evento da mesma forma que a saturação inicial relativa do solo, sendo que agora é a produção de sedimentos calculada que deve ser igualada à produção de sedimentos observada.

Essas tabelas contem o resultado das simulações para o valor de K_s de melhor calibração para as Parcelas 1 e 2 ($K_s = 3$ mm/h para P1 e $K_s = 15$ mm/h para P2).

5.3 - Análise de dados em relação à precipitação, escoamento e produção de sedimentos para o modelo WEPP

As tabelas 4, 5 e 6 mostram os eventos simulados para valores médios de $K_e = 3,6$ mm/h ; $K_i = 4,385 \times 10^6$ kg.s/m⁴ e $K_r = 0,0052$ s/m. Os 27 eventos simulados na micro-bacia 1 com apenas valores médios dos três parâmetros das micro-bacias 3 estão mostrados na tabela 1. Os eventos incluem desde valores próximos a zero de escoamento e erosão, até valores bastante elevados. Observa-se na tabela que apesar da utilização de valores únicos de parâmetros para todas as condições dos eventos, os valores simulados apresentam a mesma ordem da grandeza dos observados. Uma indicação do desempenho pode ser visto pelos valores dos coeficientes da determinação do escoamento e erosão simulados. Os valores calculados e observados para as três micro-bacias e parcelas estão nas tabelas em ANEXO.

No caso do escoamento superficial o coeficiente da determinação foi 0,6316 que indica um coeficiente de correlação de quase 80% enquanto no caso de erosão, o coeficiente da determinação foi de 0,4352 correspondendo a um coeficiente de correlação de mais de 65%. Estes números proporcionam um grau de confiança bastante razoável para aplicar os parâmetros calibrados em outras bacias com solo e clima semelhantes. Tanto os dados observados, quanto os resultados da simulação, mostram a grande influência protetiva da vegetação do semi árido apesar da sua fragilidade. Em comparação com parcelas com a cobertura vegetal natural, tanto o escoamento superficial quanto a erosão foram várias vezes superiores nas parcelas desmatadas. O efeito ficou ainda mais evidente nas micro-bacias desmatadas quando comparado com às com caatinga nativa.

5.4 - Análise de dados em relação à precipitação, escoamento e produção de sedimentos para o modelo KINEROS

A calibração dos parâmetros citados anteriormente foram feitas de acordo com o tipo de solo especificado. Analisando as cheias calibradas (Tabelas 9 e 10, para as parcelas e 11,12 e 13 para as microbacias, em ANEXO) .

Apesar da notável diferença do número de cheias calibradas entre as parcelas (P1 simulou 48 cheias enquanto que P2 simulou apenas 19 cheias), pode-se verificar a evidência de resultados importantes. Nos primeiros dois anos a parcela 1 permaneceu desmatada e cultivada em contorno de acordo com as normas de Wischmeier, enquanto a parcela 2, permaneceu em pousio, tendo sido observado a reconstituição da cobertura vegetal em toda a sua área.

A partir de agosto de 2001 as duas parcelas permaneceram desmatadas, data a partir da qual nota-se perfeitamente a influência da cobertura vegetal na produção de sedimentos e na lâmina escoada. A vegetação faz com que a água da chuva entre em contato com o solo com menos intensidade, diminuindo o desprendimento das partículas da superfície do solo, conseqüentemente diminuindo a erosão, e também faz com que haja o aumento de infiltração e o baixo escoamento. É importante observar a grande diferença da produção de sedimentos na parcela 2 nos períodos antes e depois do pousio. Das cheias que foram simuladas a partir da cheia 65 a parcela 2 já encontrava-se sem cobertura vegetal, sendo perceptível o aumento da produção de sedimentos. A superfície do solo é constituída de partículas de fácil desprendimento, que na presença de chuva são transportadas

O escoamento é a parte da água de chuva que não infiltra e não evapora. Tendo este conhecimento nota-se que o valor de precipitação registrada sempre será igual ou maior do que o valor registrado de escoamento. Os estudos dos efeitos de escala nos processos de escoamento superficial e erosão do solo são de grande relevância devido ao fato que, geralmente os modelos hidrológicos, juntamente com seus parâmetros, são utilizados na simulação do escoamento superficial e da erosão do solo de uma maneira global, tanto para bacias hidrográficas pequenas quanto para bacias hidrográficas médias. Em bacias maiores, os processos hidrológicos são afetados tanto pelas variações dentro da bacia (clima, solo, vegetação, relevo, hidrografia), quanto pelas não linearidades destes processos (Lopes, 2003).

Alguns estudos realizados demonstraram que a escala da bacia hidrográfica realmente afeta os parâmetros relativos aos processos hidrológicos. Lopes (2003) constatou que existe

efeito de escala sobre o parâmetro c_f do KINEROS2, esse parâmetro mede a erosão por impacto das gotas de chuva. Nas simulações feitas para microbacias de áreas crescentes foi constatado o aumento do parâmetro c_f com o aumento da área. Sendo assim, concluiu Lopes (2003), percebe-se claramente que o parâmetro que reflete a erosão do solo por impacto das gotas de chuva sofre efeito de escala, aumentando das escalas menores para as escalas maiores.

6 - CONCLUSÃO

Os modelos hidrossedimentológicos WEPP e KINEROS2, foram aplicados as três microbacias e as duas parcelas da região semi-árida da Paraíba, quantificando o escoamento superficial e a erosão do solo, bem como avaliando a potencialidade dos modelos em simular estes dois fenômenos hidrológicos. Os parâmetros calibrados desses modelos, para uma microbacia, servem como referência para validação em áreas hidraulicamente semelhantes. Os resultados mostram um bom desempenho dos modelos, através da robustez dos parâmetros.

As calibrações e simulações nas parcelas 1 e 2 de São João do Cariri, evidencia que a lâmina escoada e a erosão da parcela desmatada (Parcela 1) é superior a não desmatada (Parcela 2), mostrando assim o papel da vegetação sobre o escoamento e erosão, já que as mesmas possuem praticamente a mesma declividade, em torno de 3,4 e 3,6%, respectivamente. A declividade seria um fator que explicaria a diferença nos resultados, mas como as declividades são praticamente idênticas não podemos admitir esse fator para explicação. Esses resultados permitiram quantificar a influência da vegetação sobre o escoamento e erosão.

Para a simulação com os dois modelos temos que levar em consideração que a superfície do solo é constituída de partículas de fácil desprendimento, que na presença de chuva são transportadas juntamente com o escoamento. Com a presença da vegetação esse desprendimento é dificultado diminuindo assim, a erosão e o conseqüente transporte de sedimento.

O valor de 5,0 mm/h para o K_e , é mais freqüentemente encontrado na região (Galvão, 1990, citado por Lopes, 2003). No entanto, para a simulação com o WEPP, apenas a Parcela 1 apresentou um valor consideravelmente aproximado, $K_e = 3,86$ mm/h. Para a parcela 2, $K_e = 4,34$ e $K_e = 3,44$ mm/h para a parcela, com e sem vegetação, respectivamente. Essa diferença no K_e ocorre devido a presença de vegetação.

As simulações com o modelo KINEROS2 mostraram que o mesmo pode ser usados na modelagem do processo de erosão e vazão nos experimentos da Bacia Experimental de São João do Cariri. Nas simulações realizadas com este modelo nas parcelas, obteve-se um resultado para o K_S mais aproximado para esta região. Na parcela 1 temos o valor de $K_S = 3,83$ e na parcela 2 o valor de $K_S = 5,23$. Com as simulações realizadas para as microbacias, foram encontrados os seguintes valores de K_S , 9,22, 5,47 e 5,89 para as microbacias 01, 02 e 03

respectivamente, onde esses valores são considerados altos. É necessário levar em consideração que o valor médio de K_S foi obtido com os eventos que simularam adequadamente.

Modelos deste tipo são ferramentas que podem ser utilizadas para monitorar 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; o impacto da urbanização de uma bacia, etc.

Quanto a produção de sedimento, através das tabelas e dos gráficos em ANEXO, podemos observar que o maior volume de sedimento produzido, ocorre quando o solo se encontra previamente saturado, ou seja, no evento em que, anteriormente ocorre uma determinada precipitação deixando o solo em uma condição favorável ao escoamento superficial.

Fica evidente o efeito de escala na utilização dos dois modelos em estudo, ou seja, os valores de K_e e K_S para as parcelas são menores do que os calculados para as microbacias nos dois modelos. O efeito protetivo da caatinga nativa contra a erosão é fundamental para evitar a erosão do solo e eliminação dos nutrientes. No entanto, este estudo foi feito em bacias com áreas muito pequenas (microbacia) e ressalta-se que à medida que se aumenta a área, aumentam também as heterogeneidades, os efeitos de escala e outros aspectos que precisam ser analisados.

Devemos salientar que, todos os dias surgem modelos diferentes, com capacidades de cálculos diferentes. Logo os resultados por eles fornecidos devem ser observados com uma visão crítica e bem detalhada, comparando-se com a região em estudo.

7 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aragão, R., Srinivasan V. S., , Lopes W.T.A . e Silva, A. F.(2002). *Avaliação do Modelo CHDM utilizando dados de uma bacia experimental no semi-árido nordestino*. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió – AL.
- Bennett. J.P.(1974). *Concepts of mathematical modeling of sediment yield*. Water Resources Research, 10(3): 485-492.
- Bennett, J. P. (1974). *Concepts of mathematical modeling of sediment yield*. Water Resources Research, 10(3): 485-492.
- Brooks, R. H. e Corey, A. T. (1964). *Hydraulic Properties of Porous Media*. *Hydrol. Paper* nº 3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- Burman, R. D., and Black, R. D. (1970), *“The Inference of Intake and Hydraulic Roughness Parameters from Plot Runoff Using Kinematic Wave Theory,”*. Transactions, ASAE, Vol. 13, nº 4, 1970 pp.479 – 481.
- Bruijnzeel, L.A. (1990). *Hydrology of Moist Tropical Forest and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review.IHP*. IAHS. UNESCO. 224p.
- Bruijnzeel, L.A. (1996). *Predicting the hydrological impacts of tropical Forest conversion: The need for integrated research. Capítulo 2 de “Amazonian Deforestation and Climate”* Eds: Gash J H C, Nobre C A, Roberts J M e Victoria R L John Wiley & Co: Chichester, Inglaterra.
- Cadier, E. & Freitas,B.J. (1982). *Bacia Representativa de Sumé; primeira estimativa dos recursos de água*.Recife, SUDENE, 195 p.
- Cadier, E.; Freitas, B. J. de e Leprun J. C. *Bacia Experimental de Sumé; instalação e primeiros resultados*. Recife, SUDENE, 87 pp., 1983.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. Tokyo, McGraw-Hill, New York, 680p.
- Chow, V. T., Maidment. D. R. e Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill *Series in Water Resources and Environmental Engineering*, Singapore, 572p.
- Cruz, E. S. (2004). *Estudos dos Impactos do Uso do Solo Atravéz da Modelagem da Geração do Escoamento Superficial e Erosão do Solo na Região do Cariri Paraibano*.Universidade Federal de Campina Grande.
- Corradini, C., Melone, F. e Smith, R. E. (1994). *Modeling infiltration during complex rainfall sequences*. Water Resources Research, 30(10), 2777-2784.

- Engman, E.T. (1986). *Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.112, N°1. p- 39-53.
- Engelund, F. e Hansen, E. (1967). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Foster, G. R., Huggins, L. F., and Meyer, L. D.(1968), “*Simulation of Overland Flow on Short Field Plots*,”. *Water Resources Research*, Vol. 4, N° 4, N°6, 1968, pp 1179 – 1187.
- Foster, G. R. (1982). *Modelling the erosion process*. In: *Haan, C. T.; Johnson, H. P. e Brakensiek, D. L., Ed. Hydrologic modeling of small watersheds*, St. Joseph, American Society Agricultural Engineers, p. 297-380.
- Galvão, C. O. (1990). *Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias*. Dissertação de mestrado, DEC/CCT/UFPB.
- Huggins, L. F. e Monke, E. J.(1966), “*The Mathematical Simulation of the Hydrology of small Watersheds*,” Technical Report N° 1, Purdue University Water Resources Research Center, West Lafayette, IN, 1966, 130 pp.
- Hsia e Koh (1983). *Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan*. In; *Hydrology of humid Tropical Regions*, Keller, R. (ed.) IAHS publication n. 140, p215 – 220.
- Lopes, W. T. A. (2003). *Efeitos de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida da Paraíba*. Dissertação de mestrado DEC/CCT/UFPB.
- Meyer, L. D. e Wischmeier, W. H. (1969). *Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water*. *Trans. of the ASAE* 12(6): 754-758, 762.
- McCuen, R. H. (1982). *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*. *University of Maryland, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey*. USA.
- McCulloch, J. S. G., Robinson, M. (1993). *History of Forest Hydrology*. *Journal of Hydrology*. v. 150. p. 189-216.
- Pritchett (1979), *W. L. Properties and Management of Forest Soils*. John Wiley, New York, 500p.
- Pickels(1931) G. W.; *Run – off Investigation in Central Illionois, University of Illionois Engineering Experiment Station*, Bulletin 232, Vol.32, n°3.Sentember (1931).

- Smith, R. E. e Parlange, J. Y. (1978). *A Parameter Efficient Hydrologic Infiltration Model*. Water Res. Res., 14(3): 533-538.
- Smith, R. E., Corradini, C. e Melone, F. (1993). *Modeling Infiltration for Multistorm Runoff Events*. Water Resources Research, 29(1): 133-144.
- Shih, S. F. e Rahi, G, S (1982). *Seasonal Variations of Mannig's Roughness Coefficient in a Subtropical Marsh*. Transactions of the ASAE, pp. 116 – 119.
- Srinivasan, V. S. e Galvão, C. O. (1994). *Previsão do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo através do Modelo Hidrodinâmico WESP*. In: Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, ABRH, Vol 1. pp. 231-240.
- Srinivasan, V. S. e Galvão, C. O. (1995). *Evaluation of Runoff and Erosion Loss in Microbasins utilizing the Hydrodynamic Model WESP*. Advances in Engineering Software. Elsevier Applied Science. Vol. 22, no 2, pp. 79-85.
- Srinivasan, V. S. e Galvão, C. O. (2003). *Bacia Experimental de Sumé: Descrição e dados coletados*. Campina Grande-PB: UFCG/CNPq, vol. 1, p.129.
- Srinivasan, V. S., Gomes, H. P.; Leprun, J. C. e Silva, I. G. (1988). *Erosion studies in Sumé, a Semi-arid Region in Northeast of Brazil*. In: *Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium)*, Porto Alegre, LAHS. Publ. no 174.
- Tucci, C. E. M. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Organizado por Carlos, E. M. Tucci. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH/EDUSP, Porto Alegre, 943p.
- Tucci, C. E. M. e Clarke R.T.(1997). *Impacto da Mudança da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão*.
- Tucci, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. Ed. da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 668p.
- Tucci, C. E. M. (2001). *Modelos hidrológicos*. Ed. da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 677p.
- Tucci, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. Ed. da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 668p.
- 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.
- Woolhiser, D. A., Smith, R.E. e Giraldez, J. V. (1996). *Effects of Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity on Hortonian Overland Flow*. Water. Res., Vol. 32, nº. 3, pp 671-678.

- Woolhiser, D. A. (1975). "*Simulation of Unsteady Overland Flow,*" *Ch. 12, Unsteady Flow in Open Channels*, Vol. II, K. Mahmood and V. Yevjevich, Eds., Ater Resources Publication, Fort Collins, CO, 1975.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E. 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, 130 pp.
- Woolhiser, D. A., Smith, R.E. e Giraldez, J. -V. (1996). *Effects of Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity on Hortonian Overland Flow*. *Water Res. Res.*, Vol. 32, nº. 3, pp 671-678.

ANEXOS

TABELA 4Calibração dos Parâmetros Ke e Kr da Microbacia 01 para um valor médio de $KI = 6,00 \times 10^5 (Kgs/m^4)$

Eventos	Chuva (mm)	Esc. Obser.	Esc. Calc.	Erosão Obser.	Erosão Calc.	Ke (mm/h)	Kr(s/m)x10 ⁻³
11	5,3	-	-	-	-	-	-
12	10,0	-	-	-	-	-	-
13	11,0	-	-	-	-	-	-
14	4,3	-	-	-	-	-	-
15	6,8	-	-	-	-	-	-
16	9,4	-	-	-	-	-	-
17	17,8	0,18	0,18	0,004	0,004	3,85	1,0785
18	28,2	0,74	0,74	0,003	0,003	4,31	1,0744
19	40,0	1,29	1,29	0,007	0,007	3,09	1,0846
20	10,5	0,63	0,62	0,003	0,003	4,01	1,0714
21	7,2	0,16	0,16	0,000	0,001	3,88	1,0734
22	4,7	0,67	0,66	0,007	0,005	4,54	1,0712
23	4,3	0,06	0,06	0,002	0,001	4,66	1,0724
24	72,0	16,08	16,08	0,030	0,030	4,89	1,1005
25	5,4	0,03	0,03	0,000	0,002	3,91	1,0744
26	12,2	1,68	1,69	0,011	0,010	2,33	1,0734
27	31,0	8,48	8,48	0,074	0,075	2,50	1,0994
28	6,0	0,05	0,05	0,001	0,002	2,97	1,0714
29	66,0	21,91	21,90	0,206	0,205	1,26	1,1069
30	17,0	0,10	0,10	0,001	0,003	3,11	1,0879
31	52,0	22,78	22,79	0,150	0,150	3,74	1,1112
32	4,0	0,09	0,10	0,003	0,002	3,88	1,0711
33	7,0	0,04	0,04	0,001	0,003	4,60	1,0724
34	80,0	3,98	3,98	0,009	0,010	8,33	1,0978
35	3,0	-	-	-	-	-	-
36	7,6	-	-	-	-	-	-
37	12,0	-	-	-	-	-	-
					Média	3,88	1,0829

37 eventos mb01

37 eventos mb02

37 eventos mb03

12 eventos parcela 02 vegetada

24 eventos parcela 02 desmatada

37 eventos parcela 01

TABELA 5Calibração dos Parâmetros Ke e Kr da Microbacia 02 para um valor médio de $KI = 6,00 \times 10^5 \text{ (Kgs/m}^4\text{)}$

Eventos	Chuva (mm)	Esc. Obser.	Esc. Calc.	Erosão Obser.	Erosão Calc.	Ke (médio)	Kr(s/m)x10 ⁻³
11	5,3	-	-	-	-	-	-
12	10,0	-	-	-	-	-	-
13	11,0	-	-	-	-	-	-
14	4,3	-	-	-	-	-	-
15	6,8	-	-	-	-	-	-
16	9,4	-	-	-	-	-	-
17	17,8	0,002	0,035	0,005	0,005	3,81	1,0765
18	28,2	0,110	1,045	0,014	0,013	4,30	1,0744
19	40,0	0,112	0,112	0,032	0,031	3,85	1,0815
20	10,5	0,098	0,098	0,003	0,003	4,00	1,0736
21	7,2	0,028	0,028	0,000	0,004	3,83	1,0766
22	4,7	0,019	0,019	0,000	0,002	4,52	1,0733
23	4,3	-	-	-	-	-	-
24	72,0	0,827	0,825	0,065	0,065	4,85	1,1023
25	5,4	0,018	0,019	0,000	0,008	3,91	1,0788
26	12,2	0,184	0,185	0,050	0,048	2,31	1,0722
27	31,0	0,216	0,215	0,005	0,005	2,45	1,1002
28	6,0	0,009	0,010	0,000	0,006	2,95	1,0714
29	66,0	2,307	2,308	0,090	0,090	1,24	1,1077
30	17,0	0,002	0,002	0,000	0,003	3,09	1,0880
31	52,0	1,943	1,945	0,015	0,015	3,70	1,1130
32	4,0	0,006	0,005	0,000	0,002	3,84	1,0711
33	7,0	-	-	-	-	-	-
34	80,0	1,024	1,025	0,012	0,012	8,29	1,0995
35	3,0	-	-	-	-	-	-
36	7,6	-	-	-	-	-	-
37	12,0	-	-	-	-	-	-
					Média	3,81	1,0850

TABELA 6Calibração dos Parâmetros Ke e Kr da Microbacia 03 para um valor médio de KI = $6,00 \times 10^5$ (Kgs/m⁴)

Eventos	Chuva (mm)	Esc. Obser.	Esc. Calc.	Erosão Obser.	Erosão Calc.	Ke (mm/h)	Kr(s/m)x10 ³
11	5,3	-	-	-	-	-	-
12	10,0	-	-	-	-	-	-
13	11,0	-	-	-	-	-	-
14	4,3	-	-	-	-	-	-
15	6,8	-	-	-	-	-	-
16	9,4	-	-	-	-	-	-
17	17,8	-	-	-	-	-	-
18	28,2	0,090	0,091	0,002	0,001	6,20	1,1245
19	40,0	0,960	0,960	0,004	0,003	7,08	1,1165
20	10,5	0,060	0,060	0,000	0,001	7,65	1,1245
21	7,2	0,010	0,010	0,000	0,001	7,77	1,0979
22	4,7	-	-	-	-	-	-
23	4,3	-	-	-	-	-	-
24	72,0	0,260	0,260	0,005	0,002	11,13	1,0944
25	5,4	0,010	0,009	0,000	0,001	6,45	1,0976
26	12,2	0,270	0,271	0,005	0,003	4,71	1,0989
27	31,0	0,270	0,269	0,011	0,008	6,14	1,1246
28	6,0	-	-	-	-	-	-
29	66,0	2,460	2,465	0,023	0,023	10,17	1,1266
30	17,0	0,010	0,010	0,000	0,010	5,05	1,0954
31	52,0	2,490	2,500	0,007	0,008	6,31	1,1012
32	4,0	0,001	0,001	0,000	0,004	6,14	1,0875
33	7,0	-	-	-	-	-	-
34	80,0	1,190	1,200	0,003	0,003	11,20	1,1303
35	3,0	-	-	-	-	-	-
36	7,6	-	-	-	-	-	-
37	12,0	-	-	-	-	-	-
					Média	7,39	1,1092

TABELA 7

Calibração dos parâmetros Ke e Ki para Parcela 01						
Eventos	Esc. Obser.	Esc. Calc.	Erosão Obser.	Erosão Calc.	Ke (mm/h)	Ki*10 ³ (Kgs/m ³)
1	8,61	8,60	0,222	0,221	4,73	4,36
2	0,01	0,01	0,000	0,006	3,04	5,22
3	4,98	5,00	0,088	0,088	3,72	4,17
4	2,70	2,70	0,007	0,007	4,81	3,55
5	8,07	8,08	0,072	0,074	4,58	12,35
6	23,44	23,45	0,845	0,845	2,05	13,24
7	0,13	0,13	0,001	0,009	0,70	1,14
8	3,67	3,66	0,338	0,338	3,34	5,39
9	6,60	6,60	0,097	0,097	3,73	6,65
10	18,80	18,80	0,220	0,223	6,41	11,25
11	0,15	0,15	0,001	0,001	3,63	6,41
12	0,90	0,90	0,008	0,007	3,73	6,28
13	0,45	0,44	0,007	0,007	4,73	6,46
14	0,09	0,10	0,000	0,003	1,52	4,25
15	1,42	1,41	0,005	0,005	1,81	5,65
16	4,65	4,65	0,193	0,192	4,51	4,65
17	4,95	4,95	0,058	0,057	5,96	6,25
18	22,92	22,93	0,303	0,301	3,74	3,96
19	32,37	32,38	0,360	0,360	2,43	14,52
20	6,60	6,58	0,095	0,095	4,14	4,65
21	3,75	3,76	0,101	0,100	2,95	2,40
22	3,36	3,35	0,048	0,047	3,05	3,94
23	1,28	1,27	0,044	0,045	2,96	8,45
24	29,67	29,67	1,163	1,161	1,95	1,36
25	1,35	1,35	0,040	0,040	5,25	1,47
26	2,18	2,18	0,999	0,998	4,22	4,62
27	13,56	13,55	1,137	1,140	6,06	7,46
28	0,90	0,90	0,027	0,025	5,24	3,16
29	28,32	28,33	0,716	0,717	2,08	1,05
30	5,10	5,10	0,617	0,615	3,82	2,36
31	32,37	32,37	1,276	1,279	4,96	7,24
32	2,25	2,25	0,059	0,060	5,25	2,47
33	2,73	2,75	0,129	0,130	3,32	1,474
34	27,06	27,07	0,588	0,588	5,72	12,15
35	0,02	0,03	0,000	0,001	4,25	6,44
36	0,07	0,06	0,000	0,001	4,58	7,44
37	2,15	2,14	0,051	0,050	3,82	8,41
				Média	3,86	5,86

TABELA 8.1

Calibração dos parâmetros Ke e Ki para Parcela 02 com Vegetação

Eventos	Esc. Obser.	Esc. Calc.	Erosão Obser.	Erosão Calc.	Ke (mm/h)	Ki*10 ⁵ (Kgs/m4)
1	-	3,21	-	1,648	3,64	3,44
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	0,04	0,05	0,001	0,001	5,11	4,24
5	0,06	0,06	0,000	0,000	3,22	4,46
6	2,62	2,61	0,016	0,015	5,57	3,46
7	-	3,57	-	0,000	3,42	3,25
8	0,10	0,10	0,001	0,001	4,36	3,68
9	0,08	0,08	0,000	0,006	2,11	3,44
10	0,15	0,15	0,001	0,004	7,31	3,00
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
				Média	4,34	3,62

TABELA 8.2

Calibração dos parâmetros Ke e Ki para Parcela 02 sem Vegetação

Eventos	Esc. Obser.	Esc. Calc.	Erosão Obser.	Erosão Calc.	Ke (mm/h)	Ki*10 ⁵ (Kgs/m4)
13	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
15	0,13	0,13	0,005	0,005	3,63	4,25
16	2,84	2,85	0,020	0,020	3,47	4,44
17	1,95	1,94	0,041	0,041	3,53	5,14
18	8,10	8,10	0,090	0,090	3,14	4,67
19	31,05	31,00	0,078	0,078	1,78	11,39
20	0,90	0,90	0,038	0,038	3,54	4,54
21	3,08	3,10	0,015	0,015	2,47	4,15
22	3,29	3,30	0,035	0,035	3,44	4,15
23	0,75	0,75	0,016	0,016	4,45	6,41
24	28,35	28,35	0,535	0,535	2,64	5,47
25	1,24	1,25	0,022	0,020	3,46	5,69
26	20,25	20,25	0,439	0,440	3,89	4,35
27	13,47	13,46	0,246	0,245	3,78	4,24
28	0,83	0,84	0,017	0,015	3,47	6,14
29	27,00	27,00	0,106	0,105	2,77	3,98
30	3,60	3,60	0,233	0,233	3,85	3,20
31	28,13	28,12	0,737	0,738	4,23	6,23
32	2,10	2,10	0,023	0,022	4,21	6,47
33	2,32	2,31	0,036	0,035	3,68	5,46
34	15,24	15,25	0,080	0,080	5,82	12,36
35	0,02	0,02	0,000	0,009	1,67	11,25
36	0,02	0,03	0,000	0,008	3,64	8,17
37	1,25	1,24	0,008	0,008	2,46	9,17
				Média	3,44	6,14

O valor médio dos parâmetros Ke e Ki retirados da parcela 01 e da parcela 02 (sem

Tabela 9. Valor médio de Ks para a Parcela 01

Ch	Data	Chuva	Duração	Lo (mm)	Eo (ton/ha)	Eo (kg/ha)	L (mm)	Sat Calibrada	Erro % (Lo)	E (kg/ha)	cf	Erro % (Eo)	Ks (mm/h)
1	14/03/99	21,0	207	1,425	0,08561	85,61	1,424	0,211	0,09	85,697	1,05E+06	0,10	8,859
2	18/03/99	10,2	702	0,870	0,03405	34,05	0,878	0,600	0,93	34,114	2,12E+06	0,19	3,512
4	05/05/99	7,1	21	1,789	0,09084	90,84	1,707	0,200	4,58	90,733	3,45E+05	0,11	3,756
5	14/05/99	8,6	22	2,037	0,09837	98,37	2,052	0,400	0,71	98,367	1,55E+06	0,00	3,730
7	06/06/99	18,0	390	1,200	0,00923	9,23	1,216	0,600	1,34	9,214	1,24E+05	0,12	3,039
10	29/12/99	8,5	159	3,409	0,39300	393,00	3,401	0,600	0,23	393,048	2,93E+06	0,01	1,814
11	07/01/00	71,0	651	22,920	1,93700	1937,00	22,971	0,290	0,22	1937,474	2,08E+06	0,02	6,866
12	08/01/00	30,7	1155	6,600	0,31500	315,00	6,618	0,700	0,28	315,295	9,52E+05	0,09	8,700
13	14/01/00	32,0	483	6,600	0,65050	650,50	6,602	0,400	0,02	650,520	7,23E+06	0,00	3,905
16	16/02/00	29,6	618	9,060	0,51000	510,00	9,062	0,681	0,02	510,071	1,61E+06	0,01	6,439
17	17/02/00	13,1	228	8,440	0,41230	412,30	8,440	0,950	0,00	412,307	3,99E+07	0,00	0,860
19	21/02/00	17,3	318	6,610	0,10800	108,00	6,620	0,800	0,15	108,037	8,48E+05	0,03	2,073
21	01/03/00	13,4	192	8,070	0,29080	290,80	8,071	0,567	0,01	290,824	2,78E+05	0,01	3,500
22	02/03/00	7,9	24	3,150	0,20740	207,40	3,151	0,600	0,03	207,417	9,04E+05	0,01	6,000
23	18/03/00	38,6	618	12,030	0,73010	730,10	12,037	0,100	0,06	730,302	1,63E+06	0,03	7,131
24	28/03/00	23,2	173	12,180	0,88970	889,70	12,073	0,300	0,88	890,268	4,90E+04	0,06	3,510
25	29/03/00	19,7	315	10,560	0,89900	899,00	10,505	0,900	0,52	899,059	3,04E+06	0,01	3,150
26	30/03/00	35,6	207	18,350	0,74100	741,00	18,295	0,550	0,30	740,770	3,84E+05	0,03	7,544
27	01/04/00	17,0	120	7,368	0,29940	299,40	7,357	0,700	0,15	299,605	3,80E+05	0,07	8,500
28	08/04/00	20,6	54	11,870	0,63600	636,00	11,874	0,500	0,04	635,943	8,40E+05	0,01	4,871
29	11/04/00	16,7	45	8,646	0,84200	842,00	8,632	0,600	0,16	842,309	1,19E+06	0,04	5,578
31	16/04/00	21,0	470	11,750	0,11400	114,00	11,745	0,800	0,04	114,029	1,12E+06	0,03	2,670
32	17/04/00	9,0	183	1,425	0,06300	63,00	1,423	0,900	0,15	63,006	4,12E+06	0,01	3,230
33	25/04/00	5,6	75	1,350	0,03675	36,75	1,354	0,537	0,33	36,759	5,50E+05	0,03	3,010
34	28/04/00	2,9	19	0,095	0,00247	2,47	0,096	0,450	0,84	2,472	2,98E+05	0,06	2,910
35	05/05/00	21,7	125	10,642	0,10340	103,40	10,646	0,400	0,04	103,539	9,50E+04	0,13	4,255
36	17/05/00	15,2	90	6,720	0,07253	72,53	6,725	0,400	0,08	72,609	7,20E+04	0,11	5,070
37	23/05/00	7,9	465	0,534	0,07460	74,60	0,534	0,500	0,02	74,610	2,57E+06	0,01	4,540
39	26/06/00	12,3	335	6,683	0,14198	141,98	6,686	0,500	0,05	141,914	3,06E+05	0,05	2,400
40	11/07/00	16,4	490	6,683	0,05300	53,00	6,671	0,500	0,18	53,007	9,80E+04	0,01	2,850
41	15/07/00	5,8	160	1,950	0,06940	69,40	1,975	0,700	1,30	69,400	4,95E+06	0,00	2,242

Continuação Parcela 01

Ch	Data	Chuva	Duração	Lo (mm)	Eo (ton/ha)	Eo (kg/ha)	L (mm)	Sat Calibrada	Erro % (Lo)	E (kg/ha)	cf	Erro % (Eo)	Ks (mm/h)
42	22/07/00	6,1	565	2,483	0,24590	245,90	2,454	0,700	1,16	245,943	1,39E+06	0,02	0,591
43	26/07/00	15,4	7	7,530	0,23841	238,41	7,530	0,500	0,00	238,627	1,41E+05	0,09	8,390
44	01/08/00	14,2	765	4,800	0,08137	81,37	4,848	0,700	0,99	81,329	4,98E+05	0,05	0,500
49	08/03/01	25,0	150	8,610	0,22236	222,36	8,611	0,300	0,01	222,398	7,89E+05	0,02	8,796
51	11/03/01	9,0	104	4,977	0,08787	87,87	4,988	0,850	0,21	87,823	7,24E+05	0,05	3,512
54	27/03/01	39,0	256	23,440	0,84524	845,24	23,442	0,400	0,01	845,835	3,14E+05	0,07	9,450
57	02/04/01	7,0	66	3,663	0,33847	338,47	3,667	0,800	0,12	338,961	1,57E+04	0,15	1,490
59	14/06/01	15,4	726	6,600	0,09700	97,00	6,627	0,900	0,40	97,228	1,88E+06	0,24	2,160
60	26/06/01	32,6	882	18,800	0,21977	219,77	18,810	0,400	0,06	219,792	3,89E+05	0,01	0,640
61	02/07/01	5,3	346	0,148	0,00074	0,74	0,149	0,600	0,54	0,741	1,13E+06	0,12	1,586
62	20/07/01	10,0	1009	0,900	0,00802	8,02	0,901	0,400	0,07	8,021	3,45E+06	0,01	0,773
63	03/08/01	11,0	555	0,450	0,00660	6,60	0,450	0,400	0,03	6,607	7,10E+06	0,11	0,885
64	12/08/01	4,3	459	0,090	0,00025	0,25	0,089	0,550	0,94	0,251	3,00E+03	0,35	2,350
65	22/08/01	6,8	195	1,413	0,00465	4,65	1,409	0,500	0,28	4,603	1,35E+04	1,01	1,600
68	29/12/01	9,4	117	4,650	0,19283	192,83	4,663	0,350	0,29	193,180	7,75E+05	0,18	3,010
69	01/01/02	17,8	1638	4,950	0,05792	57,92	4,953	0,700	0,06	57,920	1,34E+06	0,00	1,890
70	02/01/02	28,2	402	22,920	0,30262	302,62	22,936	0,900	0,07	302,688	9,32E+05	0,02	0,490
71	04/01/02	40,0	360	32,370	0,35969	359,69	32,375	0,900	0,01	359,690	7,18E+05	0,00	0,810
72	06/01/02	10,5	1002	6,600	0,09520	95,20	6,613	0,900	0,19	95,166	1,71E+06	0,04	1,150
73	10/01/02	7,2	153	3,750	0,10118	101,18	3,750	0,700	0,01	101,126	3,66E+05	0,05	3,489
74	11/01/02	4,7	1035	3,355	0,04793	47,93	3,346	0,950	0,28	47,956	2,95E+05	0,05	0,070
75	22/01/02	4,3	15	1,280	0,04420	44,20	1,275	0,460	0,39	44,204	4,07E+05	0,01	2,956
77	05/02/02	5,4	90	1,350	0,03996	39,96	1,350	0,900	0,03	39,938	9,21E+05	0,06	7,665
81	13/02/02	6,0	297	0,900	0,02700	27,00	0,907	0,900	0,80	27,041	4,70E+05	0,15	6,350
83	04/03/02	17,0	415	5,100	0,61695	616,95	5,103	0,400	0,06	616,966	1,37E+06	0,00	4,350
84	05/03/02	52,0	170	32,370	1,27600	1276,00	32,324	0,600	0,14	1276,257	1,11E+06	0,02	7,520
85	08/03/02	4,0	60	2,250	0,05903	59,03	2,254	0,900	0,16	59,028	1,75E+06	0,00	2,350
86	18/03/02	7,0	300	2,732	0,12947	129,47	2,733	0,300	0,03	129,429	7,82E+05	0,03	2,900
88	07/05/02	80,0	1296	27,060	0,58788	587,88	27,080	0,200	0,07	587,851	2,59E+05	0,00	7,605
92	07/06/02	12,0	164	2,150	0,05113	51,13	2,165	0,400	0,69	51,151	1,39E+06	0,04	1,590
Média												3,83	

Tabela 10. Valor médio de Ks para a Parcela 02

Ch	Data	Chuva	Duração	Lo (mm)	Eo (ton/ha)	Eo (kg/ha)	L (mm)	Sat Calibrada	Erro % (Lo)	E (kg/ha)	cf	Erro % (Eo)	Ks (mm/h)
2	18/03/99	10,2	702	0,464	0,015047	15,05	0,462	0,698	0,42	15,047	1,58E+06	0,00	6,00
3	30/04/99	11,4	30	1,570	0,042290	42,29	1,564	0,280	0,39	42,303	4,90E+05	0,03	8,80
4	05/05/99	7,1	21	1,607	0,035670	35,67	1,583	0,422	1,52	35,372	1,22E+05	0,84	7,10
7	06/06/99	18,0	390	1,163	0,008281	8,28	1,163	0,250	0,00	8,267	1,26E+05	0,17	2,29
9	24/12/99	26,0	349	5,400	0,077000	77,00	5,360	0,000	0,74	76,940	4,20E+02	0,08	2,30
10	29/12/99	8,5	159	2,158	0,048100	48,10	2,160	0,400	0,09	48,319	3,60E+05	0,46	2,35
11	07/01/00	71,0	651	19,460	0,246000	246,00	19,579	0,300	0,61	246,319	1,53E+05	0,13	9,93
16	16/02/00	29,6	618	7,810	0,193000	193,00	7,813	0,500	0,04	193,277	5,22E+05	0,14	6,85
17	17/02/00	13,1	228	2,659	0,216620	216,62	2,651	0,800	0,30	215,582	1,75E+07	0,48	2,52
21	01/03/00	13,4	192	7,650	0,100720	100,72	7,641	0,700	0,12	100,379	3,60E+04	0,34	7,40
52	14/03/01	5,0	120	0,040	0,000720	0,72	0,040	0,500	0,50	0,722	5,75E+04	0,26	3,12
57	02/04/01	7,0	66	0,100	0,000600	0,60	0,101	0,500	0,80	0,602	3,70E+03	0,41	8,78
68	29/12/01	9,4	117	2,840	0,019830	19,83	2,834	0,300	0,22	19,783	2,30E+04	0,24	7,50
69	01/01/02	17,8	1638	1,950	0,040839	40,84	1,933	0,500	0,87	40,583	1,95E+06	0,63	2,83
70	02/01/02	28,2	402	8,100	0,090300	90,30	8,178	0,700	0,97	90,945	7,30E+03	0,71	3,90
75	22/01/02	4,3	15	0,750	0,016425	16,43	0,756	0,500	0,86	16,581	2,70E+05	0,95	6,56
77	05/02/02	5,4	90	1,240	0,021670	21,67	1,238	0,700	0,20	21,524	1,06E+06	0,67	4,10
85	08/03/02	4,0	60	2,1	0,023220	23,22	2,100	0,900	0,02	23,167	6,00E+05	0,23	3,15
86	18/03/02	7,0	300	2,3125	0,035813	35,81	2,294	0,600	0,80	35,745	1,25E+05	0,19	7,31
92	07/06/02	12,0	164	1,25	0,008315	8,32	1,257	0,200	0,60	8,388	8,20E+04	0,88	1,81
											Média	5,23	

Ch	Data	Chuva	Duração	Lo (mm)	Eo (ton/ha)	Eo (kg/ha)	L (mm)	Sat Calibrada	Erro % (Lo)	E (kg/ha)	cf	Erro % (Eo)	Ks (mm/h)
22	2/3/2000	7,9	24	1,671	0,019824	19,824	1,672	0,500	-0,03	19,997	5,80E+04	-0,87	15,00
24	29/3/2000	23,2	173	4,385	0,062140	62,14	4,369	0,300	0,36	61,782	1,35E+05	0,58	10,20
25	30/3/2000	19,7	315	4,295	0,035814	35,814	4,256	0,600	0,92	35,544	7,20E+04	0,76	7,40
32	17/4/2000	9,0	183	0,186	0,003779	3,77945	0,185	0,700	0,39	3,792	1,50E+07	-0,34	3,94
33	25/4/2000	5,6	75	0,024	0,000053	0,05273	0,024	0,500	0,10	0,052	7,55E+05	0,94	9,13
44	2/8/2000	14,2	765	0,210	0,005187	5,1869	0,208	0,400	0,96	5,159	5,50E+06	0,54	3,08
51	11/3/2001	9,0	104	0,283	0,001543	1,5433	0,285	0,700	-0,67	1,551	3,75E+05	-0,48	10,65
57	2/4/2001	7,0	66	0,018	0,000120	0,1197	0,018	0,600	1,98	0,119	4,50E+00	0,60	9,70
59	13/6/2001	15,4	726	0,082	0,000163	0,163	0,082	0,700	0,13	0,163	3,50E+04	-0,30	11,24
72	6/1/2002	10,5	1002	0,3125	0,003728	3,728	0,313	0,800	-0,18	3,707	2,75E+06	0,55	9,60
75	22/1/2002	4,3	15	0,0287	0,00357	3,565	0,029	0,500	-0,20	3,559	2,97E+07	0,18	11,49
Média												9,22	

Ch	Data	Chuva	Duração	Lo (mm)	Eo (ton/ha)	Eo (kg/ha)	L (mm)	Sat Calibrada	Erro % (Lo)	E (kg/ha)	cf	Erro % (Eo)	Ks (mm/h)
69	01/01/02	17,8	1638	0,0012	2,1E-05	0,02	0,0012	0,619	0,83	0,021	8,90E+05	0,42	7,50
74	11/01/02	4,7	1035	0,0094	0,00015	0,15	0,0096	0,600	1,96	0,149	1,46E+09	0,17	5,25
77	05/02/02	5,4	90	0,0088	0,00011	0,11	0,0087	0,556	1,51	0,112	3,40E+04	1,32	5,00
80	12/02/02	31,0	260	0,1080168	0,00083	0,83	0,1109	0,800	2,63	0,838	5,35E+06	0,51	3,46
81	13/02/02	6,0	297	0,00442	3,1E-05	0,03	0,0045	0,800	0,72	0,031	3,15E+05	0,16	6,95
85	08/03/02	4,0	60	0,0031578	3,3E-05	0,03	0,0030	0,700	4,40	0,033	1,77E+05	0,17	4,69
Média												5,47	

Ch	Data	Chuva	Duração	Lo (mm)	Eo (ton/ha)	Eo (kg/ha)	L (mm)	Sat Calibrada	Erro % (Lo)	E (kg/ha)	cf	Erro % (Eo)	Ks (mm/h)
69	1/1/2002	17,8	1638	0,002100	1,30E-04	0,1303	0,0021	0,5	0,95	0,1303851	5,27E+04	-0,065	5,788
72	6/1/2002	10,5	1002	0,0303	2,11E-04	0,2112	0,031	0,5	-0,87	0,211	2,40E+06	0,278	4,712
80	12/2/2002	31,0	260	0,13636	5,58E-03	5,576	0,136	0,9	0,16	5,564	2,45E+04	0,220	7,17
Média												5,89	

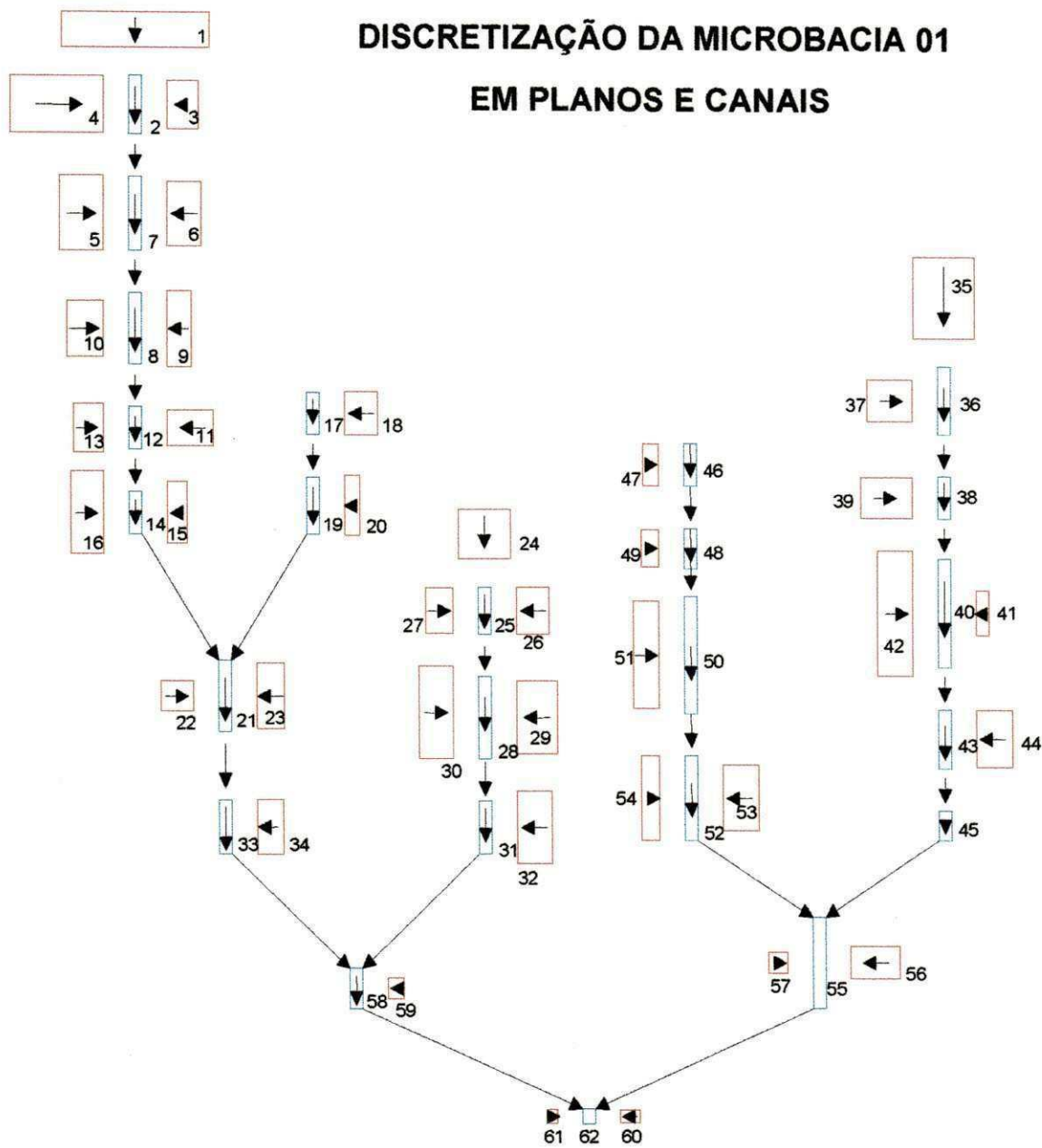


Figura 6. Discretização da Micro-Bacia 01

DISCRETIZAÇÃO DA MICROBACIA 02 EM PLANOS E CANAIS

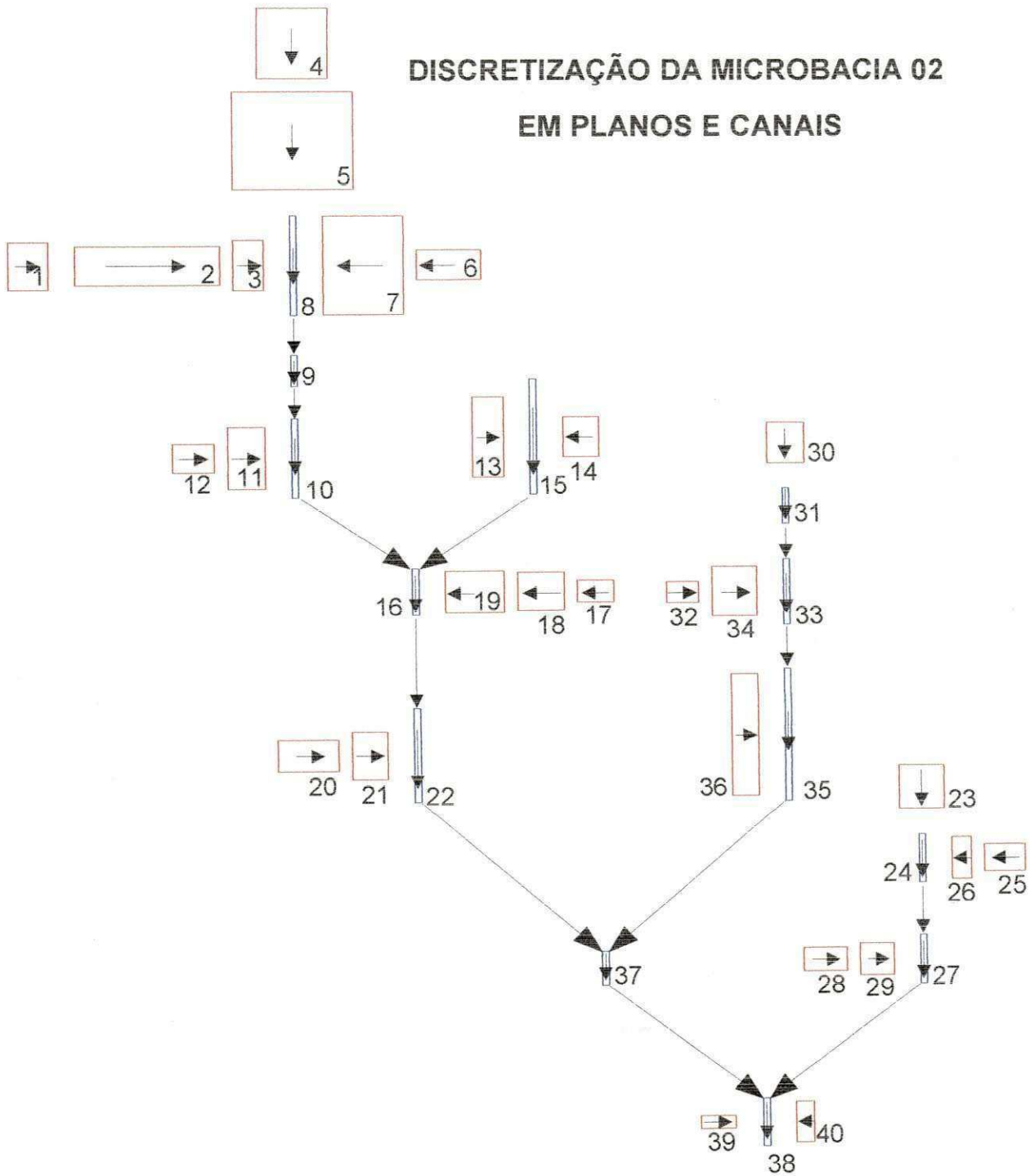


Figura 7. Discretização da Micro-Bacia 02

DISCRETIZAÇÃO DA MICROBACIA 03 EM PLANOS E CANAIS

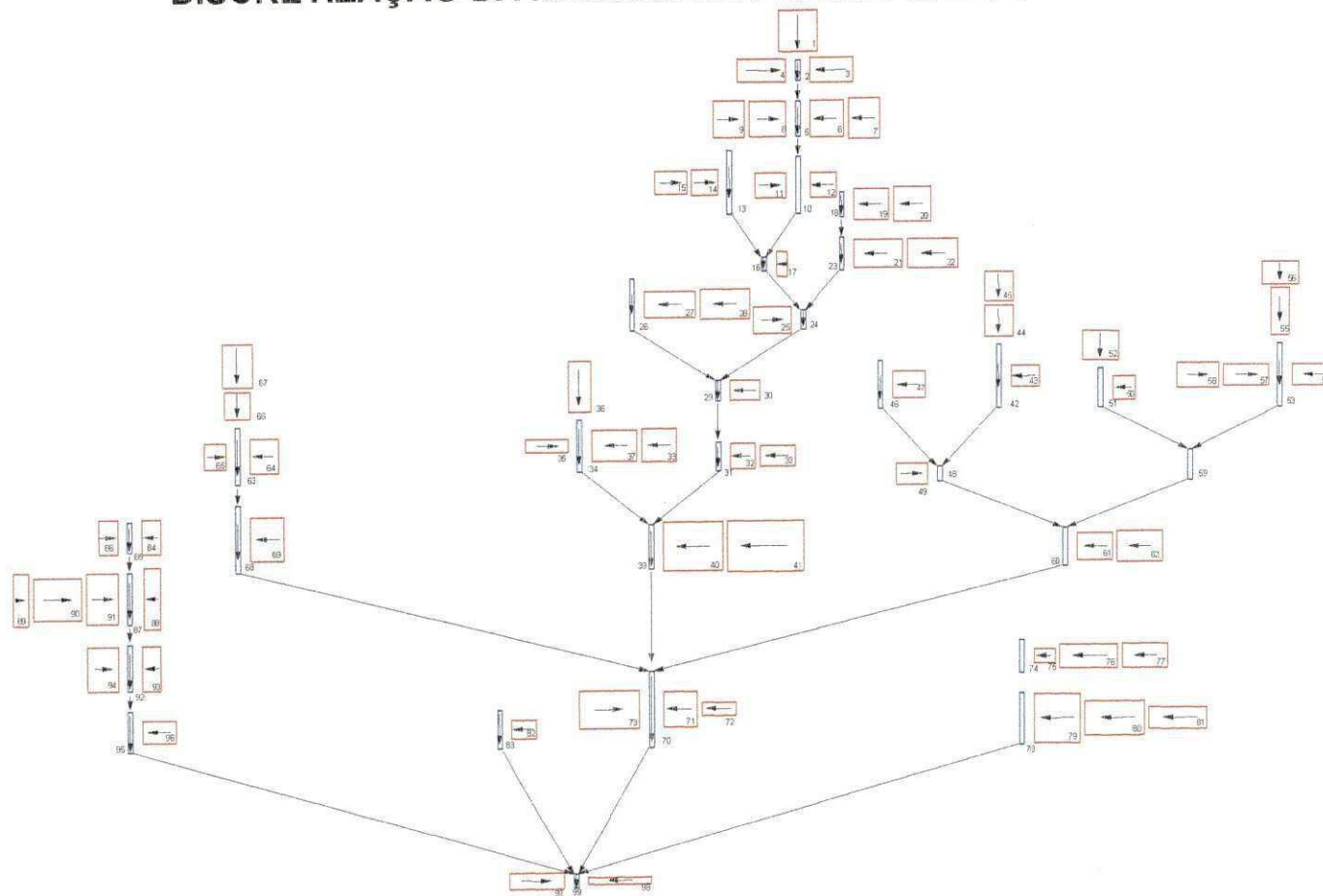


Figura 8 : Discretização da Micro-Bacia 03