

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRÊS MODELOS DE  
BASE FÍSICA NA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA  
EM MICROBACIAS NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA PARAIBANA**

**Fernanda Maria de Lima Paiva**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**  
**ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRÊS MODELOS DE**  
**BASE FÍSICA NA MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA**  
**EM MICROBACIAS NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA PARAIBANA**

**FERNANDA MARIA DE LIMA PAIVA**  
**ORIENTADOR: VAJAPÉYAM S. SRINIVASAN**  
**CO-ORIENTADOR: CELSO AUGUSTO G. SANTOS**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**Fevereiro – 2008**

**FERNANDA MARIA DE LIMA PAIVA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRÊS MODELOS DE  
BASE FÍSICA NA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA  
EM MICROBACIAS NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA PARAIBANA**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em

Paiva, Fernanda Maria de

Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana / Fernanda Maria de Lima Paiva – Campina Grande: UFCG, 2008.

175p.

Dissertação (Mestrado) – UFCG / CTRN

Inclui Bibliografia.

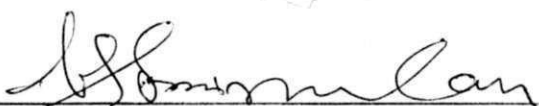
1. escoamento; 2. produção de sedimentos e Hidrossedimentológica; 3. modelos hidrológicos.

**FERNANDA MARIA DE LIMA PAIVA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRÊS MODELOS DE  
BASE FÍSICA NA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA  
EM MICROBACIAS NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA PARAIBANA**

**APROVADA EM:** 25/02/2008.


**BANCA EXAMINADORA:**



---

Vajapeyam S. Srinivasan - UFCG

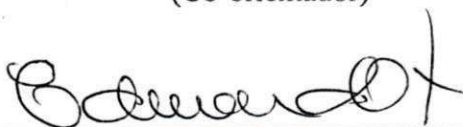
(Orientador)



---

Celso Augusto Guimarães Santos - UFPB

(Co-orientador)



---

Eduardo Enéas de Figueiredo - UFCG

(Examinador Interno)



---

Ricardo de Aragão - UFS

(Examinador Externo)

**CAMPINA GRANDE, Fevereiro de 2008.**

## EPÍGRAFE

“O saber é saber que nada se sabe e sempre se está em eterno aprendizado.

Esta é a definição do verdadeiro conhecimento.”

Confúncio

## DEDICATÓRIA

A Deus, pela presença constante em todos os momentos da minha vida, aos meus amados Pais, Ana e Fernando Paiva, ao meu amor George, aos meus irmãos Fernando e Flávio pelo amor, dedicação, apoio e companheirismo, e ao Prof. Srinivasan pelo total apoio e amizade.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter permitido mais esta vitória em minha vida, que fecha mais uma etapa. Por sempre ter me mostrado o caminho da luz nos momentos de dúvida e angústia. E por ter me dado força para prosseguir mesmo nos momentos que pensei em desistir ou fraquejar.

Aos meus amados pais, Ana Maria de Lima Paiva e Fernando Paiva, principais responsáveis por toda minha formação, pois sem eles não teria conseguido trilhar este caminho árduo de forma reta, sempre me apoiando e orientando no caminho do bem. Pessoas que sempre foram e serão exemplos de união, força, honestidade e principalmente de muito amor. Os quais sempre me disseram que: “a pessoa só é o que quer ser não importa sua condição, sua origem e nem o seu passado”, “e que tudo que podem me deixar como herança é a educação”. E aos meus irmãos, Flávio José de Lima Paiva e Fernando Paiva Jr., pelo companheirismo e compartilhamento de tristezas e alegrias.

Ao meu amor, George Carlos Pereira, pelo amor, carinho, dedicação e apoio incondicionais, durante o curso, compreendendo meus muitos momentos de ausência e solidão, nos inúmeros dias que lhe privei da minha companhia em prol de desenvolver um trabalho de qualidade. Saiba que tudo é em prol do nosso futuro.

A todos meus amigos e familiares, os quais não citarei nomes para não cometer injustiça, os quais o apoio e amizade foram cruciais durante este difícil período.

Ao professor orientador Vajapeyam S. Srinivasan, por usufruir de sua vasta experiência e sabedoria, numa orientação segura e precisa, em todos os momentos e por sua total paciência e compreensão das minhas inúmeras limitações durante a nossa jornada rumo à conclusão deste trabalho. Professor este que me transmitiu valiosos ensinamentos que levarei comigo durante toda minha vida. E eu me sinto muito honrada de dizer que ele foi e sempre será meu orientador.

Ao professor co-orientador e amigo Celso Augusto G. Santos pela ajuda e apoio, durante estes mais de cinco anos de trabalho em conjunto. E aos professores e amigos Carlos de Oliveira Galvão e Márcia M. Rios Ribeiro pelos conselhos, força e norteamento em momentos de incerteza e insegurança.

Aos professores da Área de Recursos Hídricos que contribuíram na minha formação e sempre estiveram prontos a ajudar no que fosse necessário: Anne Marie Könnig, , Beatriz Susana



Ovruski de Ceballos, Carlos de Oliveira Galvão, Eduardo Enéas de Figueiredo, Janiro Costa Rêgo, Márcia Maria Rios Ribeiro, Rosires Catão Curi, Hans Dieter Max Schuster, Vajapeyam S. Srinivasan e Wilson Fadlo Curi pelos conhecimentos adquiridos, dedicação e total disponibilidade em todos os momentos durante o curso.

Aos funcionários da AERH, Aurezinha, Ismael, Haroldo, Lindimar, Raul, Ronaldo, Valdomiro e Vera pela sempre cordial atenção e ajuda. Em especial a Aurezinha pessoa que dividiu meus muitos momentos, durante a longa jornada no laboratório de recursos hídricos e sempre teve paciência e um ombro amigo. E a secretária do curso de pós-graduação de Engenharia Civil e Ambiental, Josete, que buscou sempre ajudar em todos os momentos.

Aos colegas de mestrado e integrantes do Projeto em qual era inserida, Hugo de Alcântara Guimarães e Laércio Leal dos Santos pelos trabalhos em parcerias realizados. E aos alunos de iniciação científica, Itamara Mary L. de M. Taveira e Philippe Jarryer de Miranda pela ajuda e disponibilidade durante a pesquisa.

Ao amigo Ricardo de Aragão pelas sugestões que ajudaram a compor este trabalho. E aos amigos Richarde Marques da Silva e Leonardo Pereira e Silva pelo apoio e amizade no desenvolvimento deste trabalho.

A todos meus colegas de turma de mestrado pelos momentos de aprendizado que tivemos juntos e em especial a Francisco Fonseca, Maria Isabel C. da Mota e Roberta Lima, amigos que guardarei para sempre no meu coração, que me ajudaram a superar os momentos difíceis dentro destes dois anos, os quais compartilhei alegrias e tristezas.

Aos avaliadores, Vajapeyam S. Srinivasan, Celso A. G. Santos, Eduardo Eneas de Figueiredo e Ricardo de Aragão pelas contribuições para a melhoria deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado, dando o apoio financeiro, o qual possibilitou a conclusão desta dissertação.

Por fim, agradeço a todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

## RESUMO

Pesquisas com modelos hidrossedimentológicos de simulação em bacias experimentais são muito importantes, devido ao fato que os seus resultados podem ser estendidos para regiões hidrologicamente semelhantes. Portanto a escolha de um modelo de simulação mais apropriado para uma região se torna fundamental. Dessa forma, uma análise do comportamento da geração do escoamento e erosão do solo, em diferentes modelos de base física, trará subsídios valiosos para sua aplicação. Nesta pesquisa, foram escolhidos três modelos hidrossedimentológicos: WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*), KINEROS2 (*Kinematic Runoff Erosion Model*) e WEPP (*Water Erosion Prediction Project*). Os modelos foram aplicados em parcelas e microbacias da Bacia Experimental de São João do Cariri e Bacia Experimental de Sumé. O trabalho foi desenvolvido em três partes: parametrização dos modelos, comparações entre os modelos e a verificação do efeito de escala. Os resultados mostraram que os modelos KINEROS2 e WESP são bastante confiáveis com resultados robustos. O modelo WEPP representou bem o escoamento e apenas razoavelmente bem a produção de sedimentos nas parcelas, porém nas microbacias enquanto simulou razoavelmente bem o escoamento, a simulação da produção de sedimento apresentou grandes discrepâncias. Ambos os modelos KINEROS2 e WESP apresentaram parâmetros estáveis e representativos para a região conforme as simulações em duas bacias bastante distantes entre si, porém na mesma região. Foi constatado que o efeito de escala não era detectável com clareza nas unidades da modelagem.

**Palavras chave:** escoamento, produção de sedimentos e modelos hidrológicos.

## ABSTRACT

Investigations hydro-sedimentological models in experimental models in experimental basins are of great importance, as the results may be extended to other basins that are hydrologically similar. However, the chance of an appropriate model for the basin and the region as very important. In this, study three hydro-sedimentological models- WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*), KINEROS2 (*Kinematic Runoff Erosion Model*) e WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) were chosen for comparative evaluation. The models were applied to the erosion plots and micro-basins of the experimental basins of São João de Cariri and Sumé. The study involving three steps, namely, parameterization, model comparison and scale effects were caned and with the models and the results show that KINEROS2 and WESP are not only result but turning similar results. WEPP was efficient in simulating the runoff fairly well, but was pas on simulating the erosion values particularly in microbasin SJC. The models KINEROS2 and WESP swarmed that the parameters were refinally stable and could be applied to neighboring basing with on the same hydrologically, homogeneous region.

**Key-words:** drainage, sediment at the quotas, hydrologics model.

## LISTAS DE TABELAS DOS CAPÍTULOS

Tabela 4.1. Características das parcelas utilizadas de 100 m <sup>2</sup> .	44
Tabela 4.2. Características das microbacias utilizadas (Cadier et al., 1983).	45
Tabela 4.3. Dados selecionados da parcela 1 da BES.	47
Tabela 4.4. Dados selecionados da parcela 4 da BES.	48
Tabela 4.5. Dados de eventos selecionados da microbacia 3 da BES.	49
Tabela 4.6. Dados de eventos selecionados da microbacia 4 da BES.	50
Tabela 4.7. Características das parcelas de 100 m <sup>2</sup> .	53
Tabela 4.8. Características das microbacias estudadas da BESJC.	53
Tabela 4.9. Dados dos eventos utilizados das parcelas da BESJC.	54
Tabela 4.9. Continuação dos dados dos eventos utilizados das parcelas da BESJC.	55
Tabela 4.9. Continuação dos dados dos eventos utilizados das parcelas da BESJC.	56
Tabela 4.9. Continuação dos dados dos eventos utilizados das parcelas da BESJC.	57
Tabela 4.9. Continuação dos dados dos eventos utilizados das parcelas da BESJC.	58
Tabela 4.10. Dados dos eventos utilizados da microbacia 1 da BESJC.	58
Tabela 4.10. Continuação dos dados dos eventos utilizados da microbacia 1 da BESJC.	59
Tabela 4.10. Continuação dos dados dos eventos utilizados da microbacia 1 da BESJC.	60
Tabela 4.10. Continuação dos dados dos eventos utilizados da microbacia 1 da BESJC.	61
Tabela 4.10. Continuação dos dados dos eventos utilizados da microbacia 1 da BESJC.	62
Tabela 4.11. Dados dos eventos utilizados das microbacias 2 e 3 da BESJC.	62
Tabela 4.11. Continuação dos dados dos eventos utilizados das microbacias 2 e 3 da BESJC.	63
Tabela 4.11. Continuação dos dados dos eventos utilizados das microbacias 2 e 3 da BESJC.	64
Tabela 4.11. Continuação dos dados dos eventos utilizados das microbacias 2 e 3 da BESJC.	65
Tabela 4.12. Valores das declividades para as parcelas de São João do Cariri.	66

Tabela 5.1. Parâmetros do KINEROS2 $S_i$ e $cf$ – Calibrados na parcela 1 a BESJC.	74
Tabela 5.2. Parâmetros do WESP $N_s$ e $K_r$ - Calibrados Parcela 1 a BESJC.	76
Tabela 5.3. Parâmetros do WEPP $S_i$ , $K_i$ e $K_r$ - Calibrados parcela 1 a BESJC.	78
Tabela 5.4. Parâmetros do KINEROS 2 $S_i$ e $cf$ – Calibrados na microbacia 1 a BESJC.	82
Tabela 5.5. Teste de consistência com os novos eventos da microbacia 1 do KINEROS2.	86
Tabela 5.6. Parâmetros do WESP $N_s$ e $K_r$ – Calibrados na microbacia 1 a BESJC.	87
Tabela 5.7. Teste de consistência com os novos eventos da microbacia 1 do WESP.	90
Tabela 5.8. Parâmetros calibrados do WEPP $S_i$ , $K_i$ e $K_e$ – Microbacia 1 a BESJC.	91
Tabela 5.8. Continuação dos parâmetros calibrados do WEPP $S_i$ , $K_i$ e $K_e$ – Microbacia 1 de SJC.	92
Tabela 5.8 Continuação dos parâmetros calibrados do WEPP $S_i$ , $K_i$ e $K_e$ – Microbacia 1 de SJC.	93
Tabela 5.9. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 1 de SJC com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	97
Tabela 5.10. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de SJC com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	98
Tabela 5.10. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de SJC com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	99
Tabela 5.11. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de Sumé com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	100
Tabela 5.11. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de Sumé com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	101
Tabela 5.11. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de Sumé com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	102

Tabela 5.12. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 4 de Sumé com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	103
Tabela 5.12. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 4 de Sumé com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	104
Tabela 5.12. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 4 de Sumé com a calculada com o KINEROS2 com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	105
Tabela 5.13. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 1 de SJC com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de Sumé.	107
Tabela 5.13. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 1 de SJC com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de Sumé.	108
Tabela 5.14. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de SJC com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de Sumé.	109
Tabela 5.14. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de SJC com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de Sumé.	111
Tabela 5.15 Comparação da produção de sedimentos observada na parcela 1 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	112
Tabela 5.15 Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na parcela 1 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	113
Tabela 5.15. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na parcela 1 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	113
Tabela 5.16. Comparação da produção de sedimentos observada na parcela 6 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	113

Tabela 5.16. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na parcela 4 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	114
Tabela 5.16 Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na parcela 6 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	115
Tabela 5.17. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de SJC.	116
Tabela 5.17. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de SJC.	117
Tabela 5.17. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 3 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de SJC.	118
Tabela 5.18. Comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 4 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de SJC.	118
Tabela 5.18. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 4 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de SJC.	119
Tabela 5.18. Continuação da comparação da produção de sedimentos observada na microbacia 4 de Sumé com a calculada com o WESP com os parâmetros microbacia 3 de SJC.	120
Tabela 5.19. Parâmetros médios da calibração com o modelo KINEROS2.	120
Tabela 5.20. Parâmetros médios da calibração com o modelo WESP.	120

*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 1*

Tabela 1. Parâmetros do KINEROS2 $S_i$ e $cf$ – Calibrados para a Parcela 2 de SJC	144
Tabela 2. Parâmetros do KINEROS2 $S_i$ e $cf$ – Calibrados para a Microbacia 2 de SJC.	145
Tabela 3. Parâmetros do KINEROS2 $S_i$ e $cf$ – Calibrados para a Microbacia 3 de SJC.	146

*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 2*

Tabela 1. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Parcela 1 de SJC.	147
Tabela 1. Continuação da comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Parcela 1 de SJC.	148
Tabela 2. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Parcela 2 de SJC.	148
Tabela 2. Continuação da comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Parcela 2 de SJC.	149
Tabela 3. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2 - Microbacia 1 de SJC.	149
Tabela 3. Continuação da comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Microbacia 1 de SJC.	150
Tabela 4. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Microbacia 2 de SJC.	151
Tabela 5. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com KINEROS2- Microbacia 3 de SJC.	152



*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 3*

Tabela 1. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com parâmetros do KINEROS2 calibrados para da microbacia 1 com os dados da microbacia 2.	153
Tabela 2. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com parâmetros do KINEROS2 calibrados para da microbacia 2 com os dados da microbacia 1.	154

*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 4*

Tabela 1. Parâmetros do WESP $N_s$ e $K_r$ – Calibrados na Parcela 2 de SJC.	155
Tabela 2. Parâmetros do WESP $N_s$ e $K_r$ - Calibrados na Microbacia 2 de SJC.	156
Tabela 3. Parâmetros do WESP $N_s$ e $K_r$ - calibrados na Microbacia 3 de SJC.	157

*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 5*

Tabela 1. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Parcela 1 de SJC.	158
Tabela 1. Continuação da comparação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Parcela 1 de SJC.	159
Tabela 2. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Parcela 2 de SJC.	159
Tabela 2. Continuação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Parcela 2 de SJC.	160
Tabela 3. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Microbacia 1 de SJC.	161

Tabela 4. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Microbacia 2 de SJC. \_\_\_\_\_ 162

Tabela 5. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada com WESP - Microbacia 3 de SJC. \_\_\_\_\_ 163

#### LISTA DE TABELAS DO ANEXO 6

Tabela 1. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada dos parâmetros do WESP calibrados para a microbacia 1 com os dados da microbacia 2. \_\_\_\_\_ 164

Tabela 1. Continuação da comparação da produção de sedimento observada com a calculada dos parâmetros do WESP da microbacia 1 com os dados da microbacia 2. \_\_\_\_\_ 165

Tabela 2. Comparação da produção de sedimento observada com a calculada dos parâmetros do WESP da microbacia 2 com os dados da microbacia 1. \_\_\_\_\_ 165

Tabela 2. Continuação da comparação da produção de sedimento observada com a calculada dos parâmetros do WESP da microbacia 2 com os dados da microbacia 1. \_\_\_\_\_ 166

#### LISTA DE TABELAS DO ANEXO 7

Tabela 1. Parâmetros do WEPP  $S_i$ ,  $K_e$  e  $K_r$ - Calibrados para a Parcela 2 de SJC. \_\_\_\_\_ 167

Tabela 2. Parâmetros do WEPP  $S_i$ ,  $K_e$  e  $K_r$ - Calibrados para a Microbacia 2 de SJC. \_\_\_\_\_ 168

Tabela 2. Continuação dos parâmetros do WEPP  $S_i$ ,  $K_e$  e  $K_r$ - Calibrados para a Microbacia 2 de SJC \_\_\_\_\_ 169

Tabela 3. Parâmetros do WEPP  $S_i$ ,  $K_e$  e  $K_r$ - Calibrados para a Microbacia 3 de SJC. \_\_\_\_\_ 169

Tabela 3. Continuação dos parâmetros do WEPP  $S_i$ ,  $K_e$  e  $K_r$ - Calibrados para a Microbacia 3 de SJC. \_\_\_\_\_ 170

*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 8*

Tabela 1. Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacia 1 da Bacia Experimental de São João do Cariri.	171
Tabela 2. Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacia 2 da Bacia Experimental de São João do Cariri.	172
Tabela 3. Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacia 3 da Bacia Experimental de São João do Cariri.	172
Tabela 3. Continuação das características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacia 3 da Bacia Experimental de São João do Cariri.	173

*LISTA DE TABELAS DO ANEXO 9*

Tabela 1. Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacia 3.	174
Tabela 2. Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacia 4.	175

## *LISTA DE FIGURAS*

Figura 2.1. Variação do parâmetro CN com a escala da bacia hidrográfica (Simanton et al., 1996).	13
Figura 2.2. Variação do coeficiente de rugosidade de Manning com a área da bacia hidrográfica (Figueiredo, 1998a).	14
Figura 2.3. Produção de sedimentos versus área da bacia hidrográfica (Figueiredo, 1998a).	14
Figura 2.4. Taxa de entrega de sedimentos versus área da bacia hidrográfica para várias partes do mundo (Walling, 1983).	15
Figura 2.5. Valores da produção de sedimentos em suspensão em função da área da bacia para várias partes do mundo (Walling, 1983).	16
Figura 4.1. Localização das bacias experimentais de Sumé e de São João do Cariri.	41
Figura 4.2. Área hidrologicamente semelhante à Bacia Representativa de Sumé (Cadier e Freitas, 1982).	42
Figura 4.3. Parcela de Erosão e Tanques Coletores.	44
Figura 4.4. Fossa de sedimentos das microbacias.	45
Figura 5.1. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no KINEROS2- Parcela 1 de BESJC.	75
Figura 5.2. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no KINEROS2- Parcela 2 de BESJC.	75
Figura 5.3. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WESP- Parcela 1 de SJC.	77
Figura 5.4. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WESP - Parcela 2 de SJC.	77
Figura 5.5. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WEPP - Parcela 1 de SJC.	79

Figura 5.6. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WEPP - Parcela 2 de SJC.	79
Figura 5.7 Definição dos planos e canais para a Microbacia 1 de SJC.	80
Figura 5.8 Definição dos planos e canais para a Microbacia 2 de SJC.	81
Figura 5.9 Definição dos planos e canais para a Microbacia 3 de SJC.	81
Figura 5.10. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 - Microbacia 1 de SJC.	83
Figura 5.11. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 - Microbacia 2 de SJC.	83
Figura 5.12. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 - Microbacia 3 de SJC.	84
Figura 5.13. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 para a microbacia 1 com os parâmetros da microbacia 2 de SJC.	85
Figura 5.14. Comparação cruzada da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 para a microbacia 2 com os parâmetros da microbacia 1 de SJC.	85
Figura 5.15. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP - Microbacia 1 de SJC.	88
Figura 5.16. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP - Microbacia 2 de SJC.	88
Figura 5.17. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP - Microbacia 3 de SJC.	89
Figura 5.18. Comparação cruzada da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a microbacia 1 com os dados da microbacia 2.	89
Figura 5.19. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a microbacia 2 com os dados da microbacia 1.	90
Figura 5.20 Definição dos planos e canais para a microbacia 3 de Sumé.	93
Figura 5.21 Definição dos planos e canais para a microbacia 3 de Sumé.	94
Figura 5.22 Definição dos planos e canais para a microbacia 4 de Sumé.	94
Figura 5.23 Definição dos planos e canais para a microbacia 4 de Sumé.	95

Figura 5.24. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 para a microbacia 1 da SJC com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	96
Figura 5.25. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 para a microbacia 3 de SJC com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	96
Figura 5.26. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 para a microbacia 3 de Sumé com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	97
Figura 5.27. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o KINEROS2 para a microbacia 4 de Sumé com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	98
Figura 5.28. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a microbacia 1 de SJC com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	98
Figura 5.29. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a microbacia 3 de SJC com os parâmetros da microbacia 3 de Sumé.	101
Figura 5.30. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a parcela 1 de Sumé com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	102
Figura 5.31. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a parcela 4 de Sumé com os parâmetros médios das parcelas de SJC.	108
Figura 5.32. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a microbacia 3 de sumé com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	117
Figura 5.33. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada com o WESP para a microbacia 4 de Sumé com os parâmetros da microbacia 3 de SJC.	118

*LISTA DE SÍMBOLOS*

<i>A</i>	Perda do solo por unidade de área
<i>A</i>	Perda média de solo
<i>A</i>	Área de seção transversal do fluxo
<i>a</i>	Coefficiente na relação entre vazão e profundidade do fluxo ou entre vazão e área da seção transversal do canal
<i>a</i>	Fator de erodibilidade do solo nos canais
<i>B</i>	Combinado dos efeitos do potencial efetivo de capilaridade, profundidade do fluxo e armazenamento de água do solo
<i>C</i>	Fator de erodibilidade do solo
<i>C</i>	Fator cobertura ou controle
<i>C</i>	Fator de uso e manejo do solo
<i>C<sub>D</sub></i>	Coefficiente de arrasto
<i>C<sub>r</sub></i>	fator que considera a cobertura existente no plano
<i>C<sub>u</sub></i>	Indicador do ponto de empoçamento
<i>c<sub>f</sub></i>	Coefficiente na equação de erosão devido ao impacto das gotas de chuva
<i>c<sub>g</sub></i>	Coefficiente da taxa de transferência na erosão/deposição hidráulica
<i>ch</i>	Coefficiente de amortecimento devido à lâmina d'água na equação de erosão por impacto das gotas de chuva
<i>C<sub>m</sub></i>	Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte de sedimentos
<i>c<sub>o</sub></i>	Coefficiente relacionado à coesão do solo
<i>C<sub>S</sub></i>	Concentração de sedimentos
<i>C<sub>s</sub></i>	Concentração de sedimentos no fluxo
<i>C<sub>v</sub></i>	Coefficiente de variação da condutividade hidráulica efetiva do solo
<i>d</i>	Tamanho característico dos sedimentos
<i>d<sub>i</sub></i>	Diâmetro efetivo da gota

$D_i$	Taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas
$D_r$	Taxa de erosão de sedimentos nos canais
$D_{50}$	Diâmetro volumétrico médio de gotas
$d_{50}$	Diâmetro médio dos sedimentos
$e$	Erosão calculada
$e_h$	Erosão devido ao arrasto pelo fluxo superficial
$e_o$	Erosão observada
$e_s$	Erosão devido ao impacto das gotas de chuva
$Ec$	Produção de sedimento calculada
$Eo$	Produção de sedimento observada
$EC$	Energia Cinética
$E_c$	Erosão calculada
$E_{c/a}$	Energia cinética por unidade de área
$E_{c/v}$	Energia cinética por unidade de volume
$e$	Erosão calculada
$e_h$	Erosão devido ao arrasto pelo fluxo superficial
$e_o$	Erosão observada
$e_s$	Erosão devido ao impacto das gotas de chuva
$F$	Profundidade acumulada de infiltração
$f_c$	Taxa de infiltração
$f_i$	Índice médio de infiltração
$f_c$	Taxa de infiltração
$g$	Aceleração da gravidade
$G$	Valor efetivo do potencial de capilaridade
$G$	Carga de Sedimento
$G_e$	Parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo para erosão
$H$	Profundidade do fluxo



$h$	Volume de água armazenado por unidade de área
$I$	Infiltração acumulada
$I$	Intensidade média de precipitação dos bocais
$i$	Intensidade de precipitação
$i$	Intervalo corrente de tempo
$I_p$	Intensidade de precipitação
$i-l$	Intervalo prévio de tempo
$K$	Condutividade hidráulica do solo
$K_i$	Parâmetro de erodibilidade do solo pelo impacto das gotas de chuva
$K_r$	Parâmetro de erodibilidade do solo pelo fluxo superficial
$K_r$	Parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos canais
$K_s$	Condutividade hidráulica saturada efetiva
$L$	Comprimento do plano
$L$	Lâmina média de água aplicada pelos bocais
$L_c$	Lâmina calculada
$L_o$	Lâmina observada
$m$	Expoente na relação entre vazão e profundidade do fluxo ou entre vazão e área da secção transversal do canal
$n$	Coefficiente de rugosidade de Manning
$N_s$	Parâmetro de sucção/umidade do solo
$n$	Número de intervalos de diâmetro de gota
$N_i$	Número de gotas ou fração de chuva no intervalo de diâmetro de gotas $d_i$ e caracterizada por um diâmetro efetivo $d_i$
$P$	Fator efetivo de profundidade
$\phi$	Porosidade
$q$	Fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento do canal ou excesso de precipitação nos planos

$q$	Descarga por unidade de largura
$q$	Vazão no canal
$Q$	Descarga por unidade de largura
$Q$	Vazão
$Q$	Fluxo lateral por unidade de comprimento do canal
$Q_p$	Vazão de Pico
$q_p$	Taxa de escoamento de pico em
$q_s$	Entrada lateral de sedimentos no canal
$R$	Raio hidráulico
$r$	Taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água
$r_e$	Excesso de precipitação
$R$	Altura de chuva acumulada
$R$	Fator de Cobertura do Solo
$R$	Fator de erosividade da chuva
$R_n$	Número de Reynolds da partícula
$r_b$	Taxa de chuva média
$r_e$	Excesso de precipitação
$S$	Declividade
$Sat$	Saturação
$S_f$	Declividade da linha de energia
$S_i$	Saturação inicial relativa do solo
$S_o$	Declividade do plano ou do fundo do canal
$S_s$	Densidade relativa do sedimento
$T_c$	Capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento
$t$	Tempo de precipitação
$t$	Tempo
$t_p$	Tempo de empoçamento

$T_w$	Largura de topo do fluxo
$u$	Velocidade média do fluxo
$V$	Volume de escoamento
$V$	Volume de escoamento de superfície
$v$	Velocidade média de impacto da gota de chuva
$V_f$	Velocidade de queda
$v_i$	Velocidade de impacto da gota de chuva
$V_i$	Excesso de chuva acumulado
$v_s$	Velocidade de queda das partículas
$W$	Largura do plano
$x$	Distância na direção do fluxo
$x$	Comprimento da encosta
$y$	profundidade do fluxo
$Y$	Produção de Sedimento
$Z$	Profundidade da frente de molhamento a partir da superfície
$\alpha$	Coefficiente da equação de Smith e Parlange
$\alpha$	Tipo do solo
$\beta$	Fator de forma
$\delta$	Coefficiente para a tensão de cisalhamento crítico
$\Delta\theta$	Armazenamento de água no solo
$\Delta\theta_{10}$	Diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento
$\Delta S$	Umidade de saturação do solo
$\gamma_s$	Peso específico da água
$\gamma_s$	Peso específico dos sedimentos
$\lambda$	Índice de distribuição dos tamanhos dos poros
$\eta_e$	Porosidade efetiva

$\tau$	Tensão de cisalhamento média
$\nu$	Viscosidade cinemática da água
$\Omega$	Potência unitária do fluxo
$\delta$	Coefficiente para cálculo da tensão de cisalhamento crítica
$\phi$	Porosidade efetiva
$\psi$	Potencial mátrico do solo
$\Psi$	Potencial capilar médio
$\tau$	Tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento
$\tau_c$	Tensão de cisalhamento crítica
$\tau_c$	Tensão de cisalhamento crítica média
$\varepsilon_c$	Coefficiente de deposição nos canais
$\varepsilon_p$	Coefficiente de deposição nos planos
$\theta$	Umidade do solo no período de redistribuição de água
$\theta_d$	Déficit de umidade do solo na mistura do solo
$\theta_t$	Umidade do solo abaixo da frente de molhamento
$\theta_o$	Umidade do solo acima da frente de molhamento
$\theta_r$	Umidade residual do solo
$\theta_s$	Umidade do solo na saturação
$\theta_v$	Conteúdo volumétrico inicial da água por unidade de área
$\theta_i$	Umidade inicial do solo
$\rho_w$	Massa específica da água

*ÍNDICE*

EPÍGRAFE	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
LISTAS DE TABELAS DOS CAPÍTULOS	vi
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 1	vii
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 2	xi
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 3	xii
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 4	xii
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 5	xii
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 6	xiii
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 7	xiii
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 8	xiv
LISTA DE TABELAS DO ANEXO 9	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
1.0. UMA BREVE INTRODUÇÃO	1
2.0. CONSIDERAÇÕES GERAIS	4
<b>2.1. Modelagem hidrológica</b>	<b>5</b>
2.1.1. Classificação dos Modelos hidrológicos	6
<b>2.2. Um breve histórico dos modelos</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Modelos de base física distribuídos</b>	<b>9</b>
<b>2.5. Os modelos hidrológicos utilizados neste trabalho</b>	<b>10</b>

<b>2.6. Estudo do efeito de escala</b>	<b>11</b>
<b>2.7. Considerações finais</b>	<b>16</b>
<b>3.0. OS MODELOS APLICADOS</b>	<b>17</b>
<b>3.1.O Modelo KINEROS2</b>	<b>17</b>
3.1.1 Uma descrição geral sobre o KINEROS2	17
3.1.2. Componente de Infiltração	18
3.1.3. Fluxo nos Planos	19
3.1.4. Condições de Fronteira	20
3.1.4. Recessão e Microtopografia	21
3.1.5. Fluxo nos Canais	21
3.1.6. Modelagem da Erosão nos Planos e Canais	21
<b>3.2. Parâmetros de Entrada do Modelo KINEROS2</b>	<b>22</b>
3.2.1 Parâmetros Globais	24
3.2.2 Parâmetros dos Planos	24
3.2.3 Parâmetros dos Canais	25
<b>3.3. Uma breve conclusão sobre o KINEROS2</b>	<b>26</b>
<b>3.4. O modelo WESP</b>	<b>26</b>
3.4.1 Uma descrição geral do WESP	26
3.4.2. Componente de Infiltração	26

3.4.3	Escoamento Superficial	28
3.4.3.1.	Escoamento nos Planos e nos Canais	28
3.4.4	Componente Erosão-Deposição	29
3.4.4.1	Erosão nos planos	29
3.4.4.2	Erosão nos Canais	30
<b>3.5.</b>	<b>Parâmetros de Entrada do Modelo WESP</b>	<b>31</b>
3.5.1.	Utilitário para cálculo do intervalo de tempo de simulação	33
<b>3.6.</b>	<b>Seqüência Computacional</b>	<b>33</b>
<b>3.7</b>	<b>Uma breve conclusão sobre o WESP</b>	<b>33</b>
<b>3.8.</b>	<b>O Modelo WEPP</b>	<b>34</b>
3.8.1	Uma descrição geral do WESP	34
3.8.2.	Cálculo de Infiltração no modelo	35
3.8.3.	Escoamento sobre os Planos e canais	35
3.8.4.	Erosão nos Planos e Canais	35
<b>3.9.</b>	<b>Parâmetros de Entrada do Modelo WEPP</b>	<b>38</b>
3.9.1.	Parâmetros Globais	38
3.9.2	Parâmetros dos Planos	38
3.9.3.	Parâmetros dos Canais	39
<b>3.10.</b>	<b>Uma breve conclusão sobre o WEPP</b>	<b>39</b>
<b>4.0.</b>	<b>ÁREAS UTILIZADAS</b>	<b>41</b>
<b>4.1.</b>	<b>Bacia Experimental de Sumé (BES)</b>	<b>41</b>
<b>4.2.</b>	<b>A bacia experimental de Sumé</b>	<b>43</b>
4.2.1.	Parcelas de Erosão	43
4.2.2.	Microbacias	45

4.2.3. Dados Coletados	46
<b>4.3. A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC)</b>	<b>52</b>
4.3.1. Parcelas de Erosão	52
4.3.2. Microbacias	53
4.3.3. Dados coletados	53
<b>4.4. Metodologia do estudo</b>	<b>65</b>
4.4.1 Parametrização dos modelos	65
4.4.1.1. Calibração dos parâmetros físicos da bacia	68
4.4.1.2 Validação do modelo parametrizado	70
4.4.1.3 Simulação dos eventos mais recentes da microbacia 1	71
4.4.1.4 Validação cruzada	71
4.4.2. Comparações entre os modelos	71
4.4.3. Efeito de escala	71
<b>5.0. APLICAÇÃO DOS MODELOS</b>	<b>73</b>
<b>5.1. As Parcelas de erosão</b>	<b>73</b>
5.1.1 Modelo KINEROS2	73
5.1.1.1. Calibração do KINEROS2 nas parcelas	73
5.1.1.2. Validação do KINEROS2 nas parcelas	74
5.1.2 Modelo WESP	75
5.1.2.1. Calibração do WESP nas parcelas	75
5.1.2.2. Validação do WESP nas parcelas	77
5.1.3 Modelo WEPP	78
5.1.3.1. Calibração do WEPP nas parcelas	78
5.1.3.2. Validação do WEPP nas parcelas	79
<b>5.2. Modelagem do Escoamento Superficial e Erosão do Solo nas Microbacias.</b>	<b>80</b>
5.2.1 Discretização das microbacias da BESJC	80



5.2.2. Modelo KINEROS2	81
5.2.2.1. Calibração do KINEROS2 nas microbacias da BESJC	81
5.2.2.2. Validação do KINEROS2 nas microbacias da BESJC	82
5.2.2.3. Validação cruzada dos parâmetros do KINEROS2 nas microbacias da BESJC	83
5.2.2.3. Teste de consistência dos parâmetros do KINEROS2 na microbacia 1 da BESJC	85
5.2.3. Modelo WESP	86
5.2.3.1. Calibração do WESP nas microbacias da BESJC	86
5.2.3.2. Validação do WESP nas microbacias da BESJC	87
5.2.3.3. Validação cruzada dos parâmetros do KINEROS2 nas microbacias da BESJC	89
5.2.3.4. Teste de consistência dos parâmetros do WESP na microbacia 1 de BESJC	90
5.2.4. Modelo WEPP	91
5.2.4.1. Calibração do WEPP nas microbacias da BESJC	91
<b>5.3. Testes de Aplicação</b>	<b>93</b>
5.3.1. Discretização das microbacias da BES	93
5.3.2. Modelo KINEROS2	95
5.3.2.1. Validação do KINEROS2 numa bacia alheia	95
5.3.2.1.1. Aplicação na BESJC	95
5.3.2.1.2. Aplicação na BES	99
5.3.3. Modelo WESP	105
5.3.3.1. Validação do WESP numa bacia alheia	105
5.3.3.1.1. Aplicação na BESJC	105
5.3.3.1.2. Aplicação na BESJC	110
<b>5.4. Efeito de escala</b>	<b>120</b>

<b>5.5. Análise e discussão dos resultados</b>	<b>121</b>
5.5.1 Análise e discussão dos resultados do modelo KINEROS2	121
5.5.2 Análise e discussão dos resultados do modelo WESP	123
5.5.3 Análise e discussão dos resultados do modelo WEPP	125
5.5.4 Comparações entre os resultados dos três modelos	127
5.5.5 Análise e discussões sobre o efeito de escala	128
<b>6.0. CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	<b>129</b>
<b>6.1. Conclusões</b>	<b>129</b>
<b>6.2. Recomendações</b>	<b>131</b>
<b>7.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>132</b>
<b>ANEXO 1 – Valores dos parâmetros do KINEROS2 <math>S_i</math> e <math>cf</math> para todos os eventos utilizados para parcelas e microbacias da bacia experimental de SJC</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO 2 – Comparação da produção de sedimento calculada com a observada do KINEROS2 para todos os eventos utilizados para parcelas e microbacias da bacia experimental de SJC</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO 3 – Comparação da produção de sedimento calculada com a observada dos parâmetros cruzados do KINEROS2 para todos os eventos utilizados nas microbacias 1 e 2 da bacia experimental de SJC</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO 4 – Valores dos parâmetros do WESP <math>N_s</math> e <math>K_r</math> para todos os eventos utilizados para parcelas e microbacias da bacia experimental de SJC</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO 5 – Comparação da produção de sedimento calculada com a observada do WESP para todos os eventos utilizados para parcelas e microbacias da bacia experimental de SJC</b>	<b>158</b>
<b>ANEXO 6 – Comparação da produção de sedimento calculada com a observada dos parâmetros cruzados do WESP para todos os eventos utilizados nas microbacias 1 e 2 da bacia experimental de SJC</b>	<b>164</b>

**ANEXO 7 – Valores dos parâmetros do WEPP  $S_i$ ,  $K_i$  e  $K_r$  para todos os eventos utilizados para parcelas e microbacias da bacia experimental de SJC \_\_\_\_\_ 167**

**ANEXO 8 – Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacias da bacia experimental de SJC \_\_\_\_\_ 171**

**ANEXO 9 – Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da microbacias da bacia experimental de Sumé \_\_\_\_\_ 174**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.0. UMA BREVE INTRODUÇÃO

A região semi-árida é marcada por condições da carência de recursos hídricos resultante de precipitações totais anuais baixas e irregulares. Caracteriza-se essa região por forte insolação, temperaturas relativamente altas e pelo regime de chuvas marcado pela concentração das precipitações num curto período do ano, e assim, influenciando diretamente no escoamento superficial e na produção de sedimentos. Com solos, em geral rasos, as chuvas causam erosão na camada superficial do solo e por conseqüência a perda dos nutrientes que pode resultar na desertificação das áreas afetadas.

A desertificação tem se tornado uma questão de suma importância para ambientalistas em todo mundo, a qual vem preocupando ambientalistas em todo mundo significa a perda da capacidade produtiva e a degradação das terras.

Nas últimas décadas, o interesse por estudos de impactos ambientais causados pelas atividades humanas tem levado um considerável número de pesquisadores a estudar novas ferramentas, inclusive aquelas que buscam simular as transformações ocorridas através das mudanças no uso indiscriminado da água e do solo, levando em consideração a questão da distribuição espacial dentro da bacia em estudo (Santos et al., 2005).

A distribuição espacial dos processos erosivos e de produção de sedimentos é de grande importância nos estudos das bacias hidrográficas, pois através desses é possível associar relações entre padrões geomorfológicos de bacias vertentes com a identificação de áreas de mobilização e deposição de sedimentos (Salviano et al., 1998). Para tal fim, as medições em campo são de fundamental importância para validar modelos de simulação de erosão e produção de sedimentos (Bandeira, 1998).

O uso de modelos permite que toda a área da bacia seja dividida em unidades regulares ou irregulares, assumidas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das características físicas e climáticas.

Existem, na literatura, diversos modelos hidrossedimentológicos e quase sempre estes modelos fornecem resultados diferentes quando aplicados a uma bacia específica. Portanto, a escolha de um modelo de simulação mais apropriado para uma região depende, não somente dos princípios conceituais do modelo, mas também da sua robustez, precisão, consistência e facilidade de parametrização. De acordo com os conceitos em que foram baseados os modelos poderão ser ou não robustos, precisos e consistentes. Dessa forma, uma análise do comportamento da geração do escoamento e erosão do solo, em diferentes modelos de base física hidrossedimentológicos distribuídos, trará subsídios valiosos para a análise do comportamento do modelo e seus parâmetros.

As melhores fontes de dados e informações para avaliar o modelo de simulação são as bacias experimentais em que os dados climatológicos e hidrossedimentológicos são coletados nas condições controladas e da forma sistemática.

No Estado da Paraíba, na região semi-árida, a primeira bacia experimental instalada foi à bacia experimental de Sumé, em 1982 (Srinivasan e Galvão, 2003), que se encontra desativada desde 1997. A Bacia Experimental de São João do Cariri foi instalada dentro da Bacia do riacho namorados, para dar continuidade aos trabalhos de coleta de dados hidrossedimentológicos, foram instalados instrumentos de coleta de dados nas dependências da BESJC a partir de 1998. Desde então, várias pesquisas já foram realizadas nestas bacias, tendo como objetivo principal a modelagem e análise dos processos físicos de geração do escoamento e produção de sedimentos.

De um modo geral, os modelos distribuídos requerem em primeiro lugar uma divisão da bacia em componentes homogêneos, seja em quadrículas, planos e canais ou em sub-bacias; e em segundo determinar os valores dos parâmetros, que pode ser feita através de medições, quando esses forem mensuráveis ou calibrados. Também é necessário saber como estes parâmetros, estimados ou calibrados, se comportam com o tamanho da bacia utilizada na modelagem. Para este fim o conhecimento das heterogeneidades da bacia em estudo é muito importante, pois têm a influência direta nos valores dos parâmetros e nos processos hidrológicos.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre três modelos hidrossedimentológicos de base física aplicados à áreas experimentais de diferentes escalas de produção, utilizando dados de vazão e erosão em duas regiões hidrográficas do semi-árido paraibano, hidrologicamente semelhantes, a bacia experimental de Sumé (BES) e a bacia experimental de São João do Cariri (BESJC).

Para essa finalidade, foram escolhidos os modelos hidrossedimentológicos WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*, Lopes, 1987), KINEROS2 (*Kinematic Runoff Erosion Model*, Woolhiser et al., 1990) e WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, Flanagan & Nearing, 1995). Os modelos foram calibrados, validados e testados utilizando os dados de parcelas de erosão e das microbacias da bacia experimental de Sumé e da bacia experimental de São João do Cariri.

Em consequência da grande quantidade de trabalhos já realizados nas bacias experimentais em estudo utilizando modelos, surgiu a necessidade de efetuar uma comparação entre os modelos previamente utilizados com finalidade de identificar o modelo mais adequado para as áreas em estudo. Fazer uma comparação dos três modelos WESP, KINEROS2 e WEPP, estudando suas diferenças e particularidades e discutir a aplicabilidade de cada um. Sendo aplicados a bacia experimental de São João do Cariri, local este que foi apenas iniciado os trabalhos e possuem ainda muito a ser estudado.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.0. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A produção de sedimentos compreende os processos de desagregação, transporte e deposição das partículas sólidas componentes da superfície do solo. A desagregação diz respeito ao desprendimento de partículas sólidas do meio de que fazem parte, devido principalmente ao impacto das gotas de chuva, além de outros fatores, tais como: reações químicas, flutuação de temperatura e ações mecânicas. O material erodido ficará exposto à ação do vento ou do escoamento superficial, ou mesmo a ação de outras chuvas, disponível para ser transportado. O impacto das gotas de chuva é, após a ação do homem, o fator que mais contribui para a erosão. O transporte através da água pode acontecer de várias maneiras, dependendo do fluxo e das características das partículas. Partículas pesadas são transportadas por deslizamento, rolamento ou saltos. Partículas muito leves são transportadas em suspensão no interior do fluxo e constituem a carga de lavagem. A deposição acontece quando a quantidade de partículas presente no fluxo é maior que a capacidade que o fluxo possui para transportar a massa sólida. Ela geralmente acontece em deltas de rios e em áreas onde a velocidade do fluxo é bastante reduzida. Essa concentração de sedimentos em equilíbrio no fluxo superficial é denominada de capacidade de transporte de sedimentos (Simons e Sentürk, 1992).

Os processos de desagregação, transporte e deposição ocorrem, basicamente, nas áreas planas. As gotas de chuva ao caírem atingem uma velocidade, cujo valor está associado a uma energia cinética. Esta energia será dissipada quando as gotas atingirem a superfície do solo. Dependendo das condições da cobertura superficial (com ou sem vegetação) este impacto provocará ou não a desagregação das partículas. Essas poderão ser transportadas pelas gotas, sendo arremessadas após o impacto, a uma curta distância. Isto faz com que algumas vezes o fluxo possa transportar mais material do que a sua capacidade de transporte (Foster, 1982).

A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende, fundamentalmente, da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do

estado da superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no interior do solo (Tucci, 1993).

À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima pra baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há entrada de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade. Normalmente as precipitações naturais não são capazes de saturar todo perfil, saturando em geral apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde a umidade do solo decresce com a profundidade (Santos, 1994).

Existem várias equações que descrevem a variação da infiltração de água no solo em relação ao tempo, dentre elas, têm-se as equações de Horton (1933), Phillip (1957, 1969), Green e Ampt (1911) e Smith e Parlange (1978).

A erosão nos canais acontece devido à força de cisalhamento que o fluxo superficial exerce nas laterais e no leito do canal. Parte do material que foi erodido nos planos é transportado juntamente com o fluxo para os canais. Dependendo da quantidade disponível para transporte e das características do solo que compõe o leito e as laterais do canal, poderá haver maior ou menor erosão. Conseqüentemente, a erosão irá resultar no aprofundamento e alargamento do canal (Santos, 1994).

## **2.1. Modelagem hidrológica**

A modelagem hidrológica consiste de representação, através de relações matemáticas, dos processos do ciclo hidrológico como: chuva, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração e escoamento superficial. Os modelos de erosão representam os processos de desagregação pelo impacto, erosão pelo cisalhamento, transporte e deposição dos sedimentos. Segundo Beven (1989), os modelos, após a calibragem, permitem explorar as implicações de fazer certas hipóteses sobre mudanças no sistema real, e prever as alternativas nas respostas do sistema que poderiam ocorrer. Para que um modelo seja utilizado adequadamente, se faz necessário a compreensão de sua estrutura e de suas limitações.

A modelagem hidrológica também permite verificar a consistência das informações disponíveis, que em muitos casos são curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias. Em geral, os modelos hidrológicos tentam gerar o hidrograma do escoamento superficial a partir dos dados hidro-climatológicos e características físicas da bacia. Os



modelos hidrossedimentológicos, porém, tentam gerar além dos hidrograma, o sedimentograma ou a quantidade de produção de sedimentos produzida na bacia.

A modelagem do escoamento superficial em bacias hidrográficas é baseada na resolução de equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo e a profundidade do nível de água como funções do tempo e do espaço. Estas equações são conhecidas como equações de Saint-Venant, as quais são formadas pela equação da continuidade e pela equação de quantidade de movimento (Chow et al., 1988).

Quando na modelagem do escoamento superficial consideram-se todos os termos da equação da quantidade de movimento, o modelo é classificado como hidrodinâmico. Quando os termos que representam as acelerações do fluido são desprezados, o modelo é dito de difusão. Os modelos são classificados como cinemáticos quando são desprezados os termos que representam as acelerações do fluido e a pressão, ou seja, assumem que a declividade da linha de energia é igual à declividade do fundo do canal, sendo assim, as forças devido ao cisalhamento no fluido e devido ao peso do fluido estão equilibradas (Lopes, 2003).

Atualmente existem diversas fórmulas para a modelagem do processo de erosão do solo, cada uma tendo sido desenvolvida em condições específicas de fluxo e de características dos sedimentos. As taxas de erosão calculadas utilizando essas diferentes fórmulas para prever a produção de sedimentos variam significativamente. Logo, a escolha correta de uma dessas fórmulas para prever a produção de sedimentos é uma tarefa bastante difícil (Alonso et al., 1981).

### **2.1.1. Classificação dos Modelos hidrológicos**

Vários modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos para representar as interações entre as entradas como a precipitação da bacia e respostas como o escoamento superficial e produção de sedimentos.

Classificações e conceituações sobre modelos matemáticos para hidrologia são exaustivamente discutidas na bibliografia (Claker, 1973; Overton e Meadows, 1976; Haan et al. 1982, Tucci 1987; Todini, 1988; Magalhães, 1989).

De uma forma geral, os modelos podem ser classificados, como:

(a) **Determinístico** – são aqueles modelos que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas. Mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório,

ainda assim o modelo pode ser determinístico, se para cada valor de entrada tiver um único valor de saída.

(b) **Estocástico** – são aqueles modelos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelagem tem um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade.

(c) **Empíricos** – são ditos empíricos quando sua formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia, podendo possuir uma característica regionalista.

(d) **Conceituais** – Os modelos conceituais são baseados nas equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético não sendo necessariamente baseado no processo real.

(e) **Fundamentais** – Estes modelos são baseados em conceitos físicos e teorias sobre a dinâmica dos processos de escoamento e erosão e fornecem maiores informações sobre a variação dos processos como de erosão e da carga de sedimentos, no espaço e no tempo, durante um evento, em relação aos outros tipos de modelos (Galvão, 1990).

(f) **Concentrados** – Nos modelos concentrados, a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea, não sendo possível a distribuição das características físicas relacionados ao solo, a vegetação e a chuva. No seu desenvolvimento são atribuídos valores médios representativos para toda a área de acordo com cada parâmetro do modelo.

(g) **Distribuídos** – Estes modelos permitem que toda a área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, consideradas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados. Este tipo de modelo permite a manipulação de dados de pluviometria levando em consideração sua variabilidade espacial, sendo assim, mais representativa do real.

(h) **Contínuos** – são aqueles que simulam os processos hidrológicos num longo período, sendo feita a simulação em todo o período, de forma contínua.

## 2.2. Um breve histórico dos modelos

Do ponto de vista conceitual, bem como a avaliação explícita de idéias e hipóteses correntes sobre processos hidrológicos e erosivos, tem-se verificado avanços notáveis na área de predição quantitativa da erosão do solo e escoamento através da utilização de modelos hidrológicos. Passou-se, nas últimas décadas, de uma abordagem essencialmente empírica, como no caso da “Universal Soil Loss Equation” (USLE), para a utilização de modelos numéricos cada vez mais complexos (Morgan e Quinton, 2001). Exemplos bastante

conhecidos destes últimos modelos são WESP (Lopes, 1987), EUROSEM (Morgan, et al. 1992), KINEROS (Smith et al., 1995), WEPP (Flanagan e Nearing, 1995) e LISEM (de Roo et al., 1996). Não obstante o desenvolvimento científico que estes modelos refletem e representa, um estudo comparativo recente mostrou que a predição numérica da erosão ainda envolve um grau de incerteza considerável e que depende em larga medida de uma calibração adequada dos modelos (Jetten et al., 1999).

Há muitas décadas hidrologistas vêm constantemente estudando modelos matemáticos de base física. Mas simulando o fluxo através de um modelo inteiramente dinâmico, bidimensional que esclarece características da microtopografia do fluxo (Zhang e Cundy, 1989), porém se torna impraticável quando se excede um determinado tamanho. Uma primeira técnica estudada para tentar solucionar este problema foi o uso da equação de conservação do solo, baseada na teoria da aproximação da onda cinemática (Lighthill and Whitham, 1955).

Alguns modelos de escoamento e erosão foram citados por Lopes (1987), sendo estes baseados na USLE (*Universal Soil Loss Equation*) ou MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) e modelos baseados nos processos físicos. Para o primeiro grupo pertencem: PTR (*Pesticide Transport and Runoff*), (Crawford e Donigian, 1973), ACTMO (*Agricultural Chemical Transport Model*), (Frere et al., 1975), ANSWERS (Beasley et al., 1977). No segundo grupo, têm-se os trabalhos de Bennett (1974), Simons et al. (1992), Smith (1978), Borah et al. (1981) e Smith et al. (1981).

No Brasil Bacchi et al (2000), realizaram comparações entre três métodos de predição de erosão são eles: o método utilizando o Césio137, predição através da USLE e através do modelo WEPP (Flanagan e Nearing, 1995). Onde eles concluíram que a técnica de uso da USLE não representou bem a variabilidade espacial, o método do Césio 137 mostrou resultados promissores pelo menos em nível de parcela, a escala de estudo, e com aplicação do modelo WEPP representou satisfatoriamente as heterogeneidades da bacia mostrando bons resultados. Do qual o modelo distribuído WEPP é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo (física do solo, crescimento de plantas, infiltração e hidráulica do escoamento), apresentando várias vantagens sobre os modelos empíricos. Modelo que considera os efeitos das mudanças de uso do solo e também modela a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam os processos hidrológicos e da erosão que ocorrem em uma encosta.

### 2.3. Modelos de base física distribuídos

O conhecimento da distribuição espacial dos processos erosivos e de produção de sedimentos é de grande importância nos estudos sedimentológicos, pois através desses é possível associar relações entre padrões geomorfológicos de bacias vertentes com a identificação de áreas de mobilização e deposição de sedimentos. Alguns dos processos que ocorrem nessas fases, como a propagação de ondas de cheias em rios e canais, são bem conhecidos em relação à física de seus processos e apresentam uma descrição matemática relativamente simples. Nesses casos, o escoamento pode ser simulado por modelos matemáticos hidrodinâmicos (Silva, 2004). Devido à representação física desses processos, esses modelos são classificados como modelos hidrológicos de base física (Collischonn, 2001).

Essa representação pode ser feita, ainda, considerando a variabilidade espacial dos eventos de precipitação e das características da bacia. Nesses casos, os modelos são classificados como modelos distribuídos. Para justificar a consideração de características distribuídas, é necessário certo embasamento físico. Assim, dissociar os modelos distribuídos dos modelos hidrológicos de base física não seria justificável (Collischonn, 2001).

Entre os modelos hidrológicos de base física mais citados na literatura, se encontram o modelo SHE - Sistema Hidrológico Europeu (Bathurst et al., 1995) e o modelo TOPMODEL (Beven et al., 1995). O modelo SHE foi inicialmente desenvolvido em 1976, como resultado da cooperação de alguns centros de pesquisa europeus. Atualmente, têm sido desenvolvidos pelos seus iniciadores de modo independente. Apesar de representar todos os processos por equações com embasamento físico, o modelo SHE apresenta a desvantagem de necessitar de uma grande quantidade de dados que, teoricamente, podem ser medidos em laboratório ou em experimentos na bacia, embora a altos custos. Em cada célula e em cada nível da discretização vertical é necessário conhecer o valor da condutividade hidráulica e a capacidade do solo de reter a umidade. Uma estimativa de um coeficiente de Manning é necessário para cada célula, tanto para o escoamento superficial como o escoamento em canal. A vegetação deve ser representada por dois parâmetros de resistência à evapotranspiração, um relativo a atmosfera e outro relativo a planta em si (Oliveira, 2006).

O modelo TOPMODEL é baseado fundamentalmente nas características topográficas da bacia hidrográfica, buscando reproduzir o comportamento hidrológico considerando as variáveis condicionantes de forma distribuída. Seu uso tem sido bastante difundido, principalmente devido a sua habilidade de considerar informação distribuída na bacia em uma

estrutura relativamente simples, além da utilização de poucos parâmetros de calibração (Oliveira, 2006). Esse modelo tem mostrado resultados consistentes em diversas bacias onde foi aplicado (Zhang e Montgomery, 1994; Kuo et al., 1999; Scanlon et al., 2000).

Os trabalhos de modelagem realizados dentro de bacias experimentais no semi-árido paraibano foram iniciados na bacia experimental de Sumé por Galvão (1990), que aplicou o modelo WESP (Lopes, 1987), às parcelas e microbacias, Santos (1997) aplicou o modelo WESP a uma microbacia desmatada da bacia experimental de Sumé e para otimizar os coeficientes do modelo utilizou o método *Standardized Powell*, Aragão (2000) utilizou o modelo WESP com uma maior base de dados da BES em parcelas e microbacias. Lopes (2003) utilizou o modelo KINEROS2 nas parcelas, microbacias e subbacias de BES e bacia representativa de Sumé e aplicou o modelo WESP às sub-bacias e em toda a bacia representativa complementando o trabalho de Aragão (2000) e comparou os resultados dos dois modelos. Cruz (2004) iniciou os trabalhos de modelagem na bacia experimental de São João do Cariri aplicando o modelo WEPP, às parcelas e microbacias, numa primeira tentativa de fazer a quantificação do escoamento e da produção de sedimento utilizando o modelo WEPP na região do semi-árido nordestino. Todos os trabalhos obtiveram resultados promissores e demonstraram a necessidade do avanço dos trabalhos nesta temática.

#### **2.4. Os modelos hidrológicos utilizados neste trabalho**

(a) O modelo KINEROS (*Kinematic Runoff Erosion Mode*, Woolhiser et al., 1990):

É um modelo físico, 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 canais; as equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo nos planos e canais, a erosão e o transporte de sedimento são resolvidos 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 sedimentograma de uma seção qualquer, de possíveis mudanças nas características da bacia, tais como: urbanização de uma área, construção de reservatórios, desmatamento, dentre outros.

(b) O modelo WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*, Lopes, 1987):

É um modelo distribuído, físico, orientado a evento, desenvolvido para ser utilizado na simulação do escoamento e da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas, onde o fluxo superficial é predominantemente Hortoniano. A bacia é representada por um conjunto de planos e canais, com os planos contribuindo com o fluxo lateral para os canais. A

definição dos planos deve ser baseada nas características de solo, declividade e cobertura vegetal. Os limites dos planos devem ser linhas de fluxo ou linhas de contorno. As equações de continuidade para o escoamento superficial e para o transporte de sedimentos são resolvidas numericamente usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos.

(c) O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, Flanagan e Nearing, 1995):

É um modelo também distribuído, que simula um evento individual ou vários eventos de forma contínua, capaz de estimar a erosão ou a deposição de solo numa bacia. Este modelo é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo (física do solo, crescimento de plantas, infiltração e hidráulica do escoamento). Este modelo também considera os efeitos das mudanças de uso do solo e também modela a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam os processos hidrológicos e da erosão que ocorrem em uma encosta.

Modelos que possuem características semelhantes são considerados distribuídos e de base física, escolhidos para se verificar como representam as heterogeneidades da bacia em estudo.

## **2.5. Estudo do efeito de escala**

Uma questão também muito discutida pelos pesquisadores da área da hidrossedimentologia, em todo mundo, que utilizam modelos distribuídos de base física onde a escala das bacias exageram sobre a influência do efeito na modelagem dos processos físicos. Dessa forma, uma análise do comportamento da geração do escoamento e erosão do solo, em diferentes escalas, pode permitir um estudo do comportamento ou a variabilidade dos parâmetros entre as escalas. Portanto, para uma análise adequada do efeito de escala, torna-se necessária a utilização de ferramentas de simulação que considerem as heterogeneidades das bacias. Modelos de simulação baseados nos processos físicos e distribuídos, como o WESP (Lopes, 1987), CHDM (Lopes, 1995), KINEROS (Woolhiser et al., 1990), WEPP (Nearing et al., 1995) e outros seriam bastante apropriados para este tipo de investigação.

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, 2002). Dessa forma, uma análise do comportamento da geração do escoamento e erosão do solo, em diferentes escalas, trará subsídios valiosos para a parametrização dos modelos conforme a escala da bacia.

A escala dos modelos é uma questão muito discutida, pois pesquisas revelam que os parâmetros dos modelos sofrem influência do fator de escala e que escalas menores representam melhor as características da área de estudo em questão. Muitos estudos foram desenvolvidos através dos modelos RDI e MEDRUSH (Kirkby et al., 1995) combinados com os modelos MEDALUS (Kirby et al., 1997). Outros modelos muito utilizados também são KINEROS (Woolhiser e Smith, 1990), WESP (Lopes, 1987), WEEP (Lane e Nearing, 1989), EUROSEM (Morgan et al., 1992), LISEM (de Roo et al., 1996) e WATEM (Govers et. al 1994), onde se observou, com os estudos, o efeito de escala.

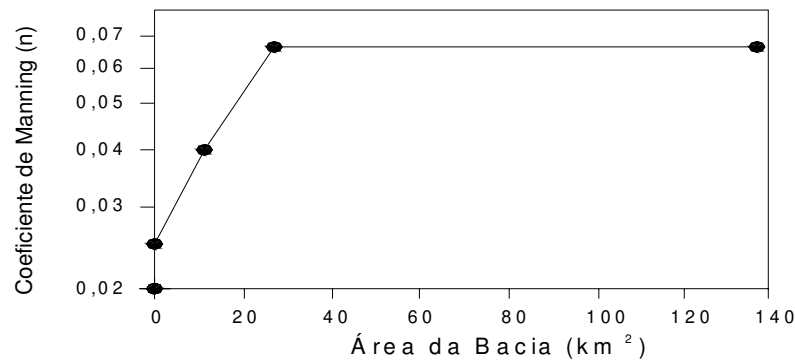
Vale salientar que modelos como LISEM e WATEM são modelos com uma base física e que foram desenvolvidos para avaliar estudos do efeito do manejo do solo sobre a produção de sedimentos. O modelo LISEM possui uma base física forte, exige um bom conhecimento de física de solo, tendo como entrada o mapa de solos e o MNT. As saídas são em forma de mapa e o modelo trabalha com um GIS acoplado de forma que as saídas são mapas e representa bem os padrões espaciais da bacia em estudo.

O estudo de processos em diferentes escalas pode ser feito através de uma abordagem estocástica ou de forma determinística. A abordagem estocástica é mais direta e envolve o uso de funções de distribuição de probabilidades. Já a abordagem determinística é mais complexa. Neste caso, tem-se a desagregação da informação, o que significa que a partir da informação conhecida para um determinado nível, identificam-se os fatores relacionados às escalas inferiores que podem ter levado àqueles valores no nível mais alto. Já no sentido inverso, tem-se a agregação da informação, ou seja, a combinação de informações e teorias que ocorrem no nível mais baixo para determinação do processo associado no nível mais alto da escala (Pimentel da Silva, 2000).

Em razão da crescente melhoria de desempenho computacional vem sendo empreendido um grande esforço para o estudo de modelos matemáticos que lidam com os fenômenos de variabilidade espacial, no fluxo superficial assim como o transporte de sedimentos usando uma aproximação bidimensional inteiramente dinâmica. Existe uma tendência à utilização de modelos matemáticos baseados em equações físicas de forma distribuída tentando representar a variabilidade espaço-temporal dos processos na área em estudo e abordando a questão do efeito escala na modelagem. (Abbott et al., 1986a, e 1986b;

Bathurst, 1986; Lane e Nearing, 1989; Nearing et al., 1989). Estas pesquisas concluíram que, na prática, é necessário determinar parâmetros físicos que aplicados nas equações de base físicas gerem resultados coerentes, que dete

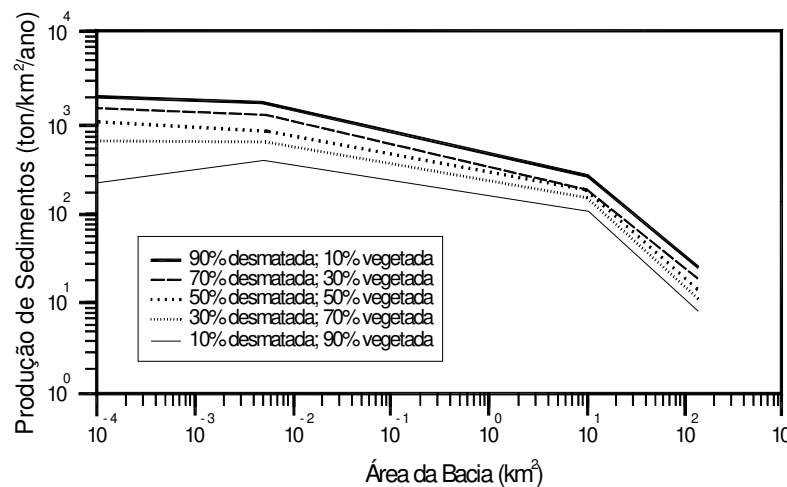




**Figura 2.2. Variação do coeficiente de rugosidade de Manning com a área da bacia hidrográfica (Figueiredo, 1998a).**

Júnior (2002) realizou um estudo sobre efeito de escala sobre alguns parâmetros do modelo NAVMO (Kleberg et al., 1989), utilizando dados da bacia representativa de Sumé e da bacia experimental de Sumé. Foi encontrado que o parâmetro relacionado ao escoamento superficial, parâmetro alfa, e o parâmetro *CN* do Método Curva Número do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos, sofrem efeito de escala, diminuindo com o aumento da área da bacia hidrográfica. Já o coeficiente de rugosidade de Manning também sofreu alterações, aumentando com a escala da bacia (Cruz, 2004).

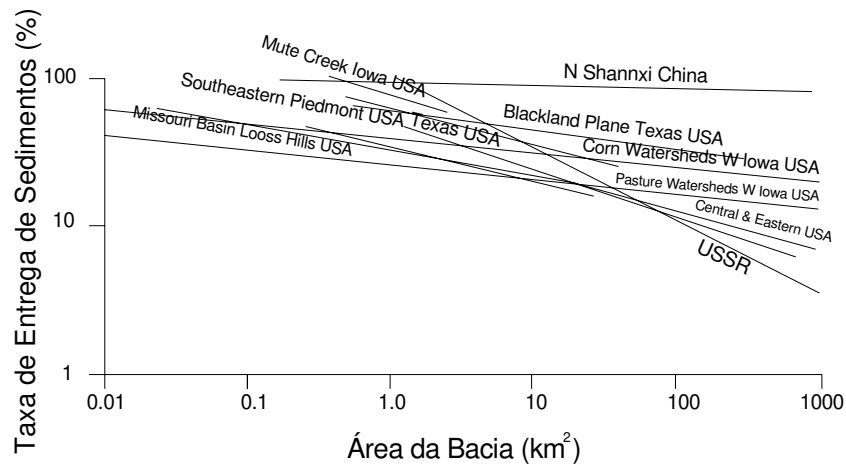
Figueiredo (1998a) também realizou uma pesquisa em relação ao efeito de escala sobre a produção de sedimentos total anual, utilizando dados de parcelas e microbacias da Bacia Experimental de Sumé, e de sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé. Ele observou que a produção de sedimentos diminuía com o aumento da área da bacia hidrográfica (Figura 2.3).



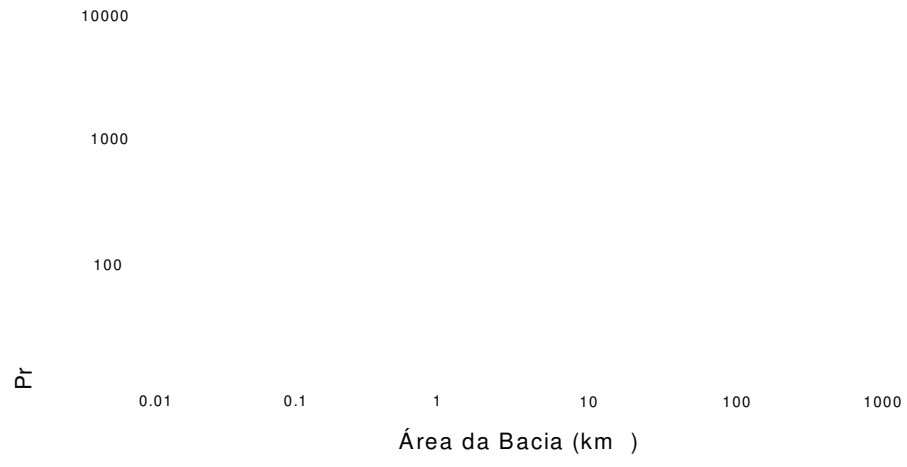
**Figura 2.3. Produção de sedimentos versus área da bacia hidrográfica (Figueiredo, 1998a).**

Sabe-se que, em geral, somente uma fração do total de sedimentos erodidos em uma bacia hidrográfica alcança a foz da bacia. A essa fração denomina-se de produção de sedimentos (*Sediment yield*). A razão entre a produção de sedimentos de uma bacia e o total erodido chama-se taxa de entrega de sedimentos (*sediment delivery ratio*). citado por Walling (1983), frequentemente utiliza valores da taxa de entrega de sedimentos entre 0,1% a 37,8%.

O valor da taxa de entrega de sedimentos de uma bacia particular será influenciado por vários fatores geomorfológicos e ambientais, incluindo a natureza, extensão e localização das fontes de sedimentos, relevo, hidrografia, condições dos canais, vegetação e do uso e tipo de solo. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram várias curvas da taxa de entrega de sedimentos para várias partes do mundo (Walling, 1983).



**Figura 2.4. Taxa de entrega de sedimentos versus área da bacia hidrográfica para várias partes do mundo (Walling, 1983).**



## **CAPÍTULO 3**

### **MODELOS APLICADOS**

#### **3.0. OS MODELOS APLICADOS**

Apresenta-se neste capítulo uma descrição sucinta dos modelos aplicados e validados neste estudo.

Os modelos aplicados foram KINEROS2 (Woolhiser et al., 1990), WESP (Lopes, 1987) e WEPP (Flanagan e Nearing, 1995), modelos hidrossedimentológicos, físicos, distribuídos, orientados a evento, que simulam os processos de infiltração, escoamento superficial e erosão do solo. A bacia é representada em todos estes modelos como uma cascata de planos e canais.

#### **3.1. O Modelo KINEROS2**

##### **3.1.1 Uma descrição geral sobre o KINEROS2**

Este modelo inicialmente incorporou ao modelo hidrológico de Rovey et al. (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. Este modelo usou um outro processo de infiltração para simular a vazão, e era usado para estudos de vazão rural ou urbanas usando chuva de projeto. Desde então o modelo vem sendo modificado, com inclusão de novos componentes, e.g., simulação da erosão e transporte de sedimentos, revisão do componente de infiltração e inclusão de um elemento de empoçamento; e assim, o modelo foi chamado KINEROS. Atualmente, este modelo é chamado KINEROS2 e de acordo com Santos et al. (2000) o qual incluiu novas características, tais como: (a) o algoritmo de infiltração abrange o perfil do solo com duas camadas e incorpora um novo método baseado nas características físicas do solo, com a finalidade de redistribuir a água no solo durante os períodos sem chuva; e (b) o solo e os sedimentos são caracterizados por uma distribuição de até cinco classes de tamanho de sedimento.

### 3.1.2 Componente de Infiltração

O componente de infiltração utilizado no KINEROS2 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 uma função da lâmina acumulada de infiltração  $I$  e de alguns outros parâmetros que descrevem as propriedades de infiltração no solo como: condutividade hidráulica saturada efetiva  $K_s$  (m/s), valor efetivo do potencial de capilaridade  $G$  (m), porosidade do solo  $\phi$ , e índice de distribuição dos tamanhos dos poros  $\lambda$ . 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*. O modelo utiliza também uma variável da saturação relativa inicial do solo  $S_i$  ( $m^3/m^3$ ), cujo valor é dado por  $\theta_i/\phi$ , onde  $\theta_i$  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):

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha/B} - 1} \right] \quad (3.1)$$

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  $\theta_s$  é o umidade de saturação do solo ( $m^3/m^3$ ). O parâmetro  $\alpha$  representa o tipo de solo;  $\alpha$  se aproxima de 0 para areia, e neste caso, a Eq. (3.1) aproxima-se à equação de Green-Ampt;  $\alpha$  se aproxima de 1 para um solo franco bem uniforme, neste caso a Eq. (3.1) representa a equação de infiltração de Smith-Parlange (Smith e Parlange, 1978). Sugere-se que a maioria dos tipos de solo é melhor representada por um valor de  $\alpha$  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:

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad (3.2)$$

onde  $\Psi$  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