

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSÃO HÍDRICA  
EM BACIA RURAL EM ARVOREZINHA, RS, UTILIZANDO O *WEPP***

**Flávio Pereira de Oliveira  
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSÃO HÍDRICA  
EM BACIA RURAL EM ARVOREZINHA, RS, UTILIZANDO O *WEPP***

FLÁVIO PEREIRA DE OLIVEIRA  
Engenheiro-Agrônomo (UFPB)  
Mestre em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas (UFLA)

Tese apresentada como  
um dos requisitos à obtenção do  
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Outubro de 2010

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO  
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

O48m Oliveira, Flávio Pereira de  
Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica em bacia rural em Arvorezinha, RS, utilizando WEPP / Flávio Pereira de Oliveira. — Porto Alegre : F.P. de Oliveira, 2010.

xxi, 151f, Il.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

1.Solo : Bacia rural : Arvorezinha, RS. I.Título.

CDD: 631.4

FLÁVIO PEREIRA DE OLIVEIRA  
Engenheiro Agrônomo - UFPB  
Mestre em Ciências - UFLA

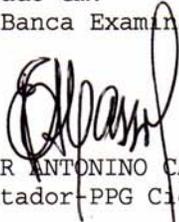
## TESE

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

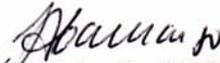
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 26.10.2010  
Pela Banca Examinadora

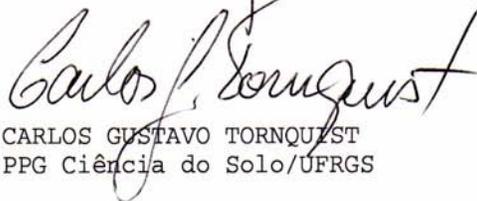


ELEMAR ANTONINO CASSOL  
Orientador-PPG Ciência do Solo

Homologado em: 23.11.2010  
Por



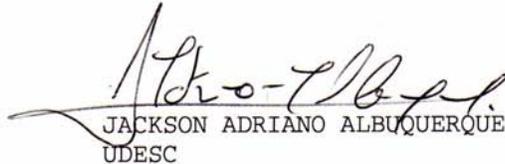
FLÁVIO A. O. CAMARGO  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST  
PPG Ciência do Solo/UFRGS



ISABELLA CLERICI DE MARIA  
Instituto Agrônomo de Campinas



JACKSON ADRIANO ALBUQUERQUE  
UDESC



JEAN PAOLO GOMES MINELLA  
UFSM



PEDRO ALBERTO SELBACH  
Diretor da Faculdade de  
Agronomia

*Toda Sabedoria vem do Senhor Deus e com ele esteve sempre.*

*... Antes de todas as coisas foi criada a Sabedoria, a Inteligência prudente existe desde a eternidade...*

*... Ele a derramou sobre todas as suas obras e sobre cada ser humano, segundo a sua bondade. Ele a concede àqueles que o amam...*

*... Deus a viu, enumerou e mediu a Sabedoria, fazendo chover a ciência e a inteligência prudente, e aumentando a glória dos que a possuem...*

*... A raiz da Sabedoria é temer o Senhor, e seus ramos são vida longa.*

*ECLESIÁSTICO 1:1*

*Aos meus Pais, Plínio e Porcina  
Pela educação e por todo o amor e sacrifício dedicado a minha vida*

*Aos meus irmãos  
Companheiros em todos os momentos da vida*

*Minhas sobrinhas  
Pelas alegrias e descontrações proporcionadas*

**Dedicatória**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo Dom da vida e pelas oportunidades de desenvolvimento concedidas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de estudo e taxa de bancada indispensável para a realização dos trabalhos de campo e laboratório.

Ao professor Elemar Antonino Cassol pela orientação, apoio, experiência compartilhada, amizade, e pela valiosa contribuição profissional prestada durante essa etapa acadêmica.

Aos membros da Comissão Examinadora de Qualificação para Doutorado, Gustavo Henrique Merten, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Élvio Giasson, do Departamento de Solos – UFRGS e José Miguel Reichert, do Departamento de Solos – CCR/UFSM, pelas valiosas contribuições sugeridas visando à melhoria deste trabalho.

Aos professores Gustavo Henrique Merten (IPH/UFRGS) e Jean Paolo Gomes Minella (CCR/UFSM) pela co-orientação e contribuições, principalmente no compartilhamento de informações necessárias para aplicação do modelo *WEPP*.

Aos membros da Banca Examinadora de Defesa de Tese, Jean Paolo Gomes Minella, do Departamento de Solos - CCR/UFSM; Carlos Gustavo Tornquist, do Departamento de Solos – UFRGS; Isabella Clerici De Maria, do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC; e Jackson Adriano Albuquerque, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

À minha família, especialmente meus pais e irmãos pelo apoio em todos os momentos e compreensão na ausência.

A Adriana Ferreira Martins, pelo amor, compreensão e incentivos indispensáveis, bem como a sua família.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas que proporcionaram uma boa formação acadêmica.

Ao secretário Jader Amaro sempre paciente, atencioso, dedicado e disponível em todos os momentos.

Aos bolsistas de graduação Paulo Bussanelo e Daniel Soares e aos técnicos Ademir Giongo e Sandro pelo auxílio nos trabalhos realizados em campo.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, André Amaral, Ândrea Franco, Alexandra Lemos, Douglas Vicente, Luiz de França, Osmar Conte, Jonatan Muller, Michael Mazurana, Letícia Sequinatto, Tatiane Bagatine, Sidinei Sturmer, Diane Barbosa, Dione Roehrs, Marquel Jonas, Sérgio Ely, Clamarion Maier, pelo convívio, apoio, amizade e pela agradável troca de experiência.

Aos funcionários do Departamento de Solos, Luiz Antonio, Adão dos Santos e Paulo Ricardo.

Aos agricultores da bacia hidrográfica do Lajeado Ferreira, pelas áreas agrícolas cedidas, pelo auxílio e disponibilidade na realização dos estudos de campo.

A todos que colaboraram no desenvolvimento deste trabalho, meu muito obrigado.

# MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSÃO HÍDRICA EM BACIA RURAL EM ARVOREZINHA, RS, UTILIZANDO O *WEPP*<sup>1/</sup>

Autor: Flávio Pereira de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Elemar Antonino Cassol

## RESUMO

Os modelos de predição da erosão hídrica do solo são utilizados para melhor compreender os processos erosivos, analisar o desempenho de práticas de manejo e avaliar os riscos e os benefícios de diferentes usos do solo. Para tanto, antes de serem utilizados para uma dada condição edafoclimática, devem ser avaliados e, ou, calibrados, principalmente quando se trata de condições diferentes daquelas para as quais o modelo foi desenvolvido. Dentre os inúmeros modelos existentes, o modelo de base física *WEPP* é um dos mais relevantes na predição da erosão hídrica, pois incorpora os conhecimentos da mecânica de erosão que tem sido gerado nos últimos anos. Este trabalho foi realizado com objetivo de avaliar o desempenho do modelo *WEPP* em duas vertentes geomorfologicamente distintas localizadas na bacia hidrográfica da comunidade de Cândido Brum, município de Arvorezinha, na região das encostas basálticas do Estado do Rio Grande do Sul. O modelo foi utilizado sem calibração onde os parâmetros de entrada (erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos, tensão crítica de cisalhamento do solo, condutividade hidráulica saturada) foram obtidos experimentalmente e estimados por equações da rotina interna do modelo. Para fins de avaliação dos valores sedimentológicos simulados esses foram comparados com valores de erosão estimados com a utilização do método de redistribuição do “fallout”<sup>137</sup>Césio e com valores hidrossedimentológicos medidos no exutório da bacia que contem as vertentes utilizadas na simulação. Os resultados mostraram que as diferenças entre os valores sedimentológicos simulados pelo modelo e os medidos foram menores quando os parâmetros de entrada foram obtidos experimentalmente ao invés daqueles estimados por equações da rotina interna do modelo. Os valores de coeficientes de escoamento simulados pelo modelo com dados do componente solo obtidos sob condição experimental de campo, nas duas vertentes estudadas, se assemelharam em relação aos valores observados por meio de monitoramento da bacia. Já os resultados da distribuição espacial dos processos desagregação e deposição simulada pelo *WEPP* e comparados com resultados da atividade do <sup>137</sup>Cs mostraram alguma discrepância em relação à desagregação e uma tendência similar relacionado à deposição de sedimentos. O modelo *WEPP* apresenta boas condições para ser aplicado nas condições edafoclimáticas da região sul do Brasil, especialmente quando seus principais parâmetros são determinados nas condições locais.

---

<sup>1/</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (151 p.) Outubro, 2010. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

# USE OF THE *WEPP* MODEL TO PREDICT SURFACE RUNOFF AND WATER EROSION <sup>1/</sup>

Author: Flávio Pereira de Oliveira  
Adviser: Prof. Dr. Elemar Antonino Cassol

## ABSTRACT

Erosion models have been used to better understand erosive processes, analyze soil conservation practices, and evaluate the risks and benefits of different soil uses. However, before a model can be used for a given soil and climatic situation, it must be validated and/or calibrated, especially if it is to be used in conditions other than those for which it was developed. Among the many erosion prediction models which exist, the *WEPP* model is one of the most relevant because it incorporates the current understanding of erosion mechanics. This study seeks to evaluate the *WEPP* model in two hillslopes with different shapes (concave and convex) in a catchment on the basalt scarp of Rio Grande do Sul, in southern Brazil. The model was run without calibration with starting parameters (rill and interrill erodibility, critical shear stress, saturated hydraulic conductivity) determined experimentally and through the model's standard equations. To evaluate the simulated hydrologic and sedimentologic values, these were compared with erosion values measured using the <sup>137</sup>cesium "fallout" method and also with hydrosedimentologic measures from the outflow of the experimental watershed. Results show that differences between the simulated and measured values were smaller when initial parameters were obtained experimentally rather than estimated by the model's standard equations. The overland flow coefficients simulated by the model in the two hillslopes studied were similar to those observed through monitoring, especially when the initial soil parameters were experimentally determined. The spatial distribution of detachment and deposition processes simulated by *WEPP* and those obtained via the cesium method show some discrepancies for detachment and a similar trend for deposition. The *WEPP* model has a good condition to be applied at southern conditions of Brazil since its major components being experimentally evaluated at local conditions.

---

<sup>1/</sup> Doctoral thesis in Soil Science, Graduate Program in Soil Science, Agronomy School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil. 151 pages. October 2010. This study was financed with a grant from the National Research Council (CNPq).

# SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hipóteses .....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Geral .....	4
1.2.2 Específicos.....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Problemas consequentes da erosão do solo.....	5
2.2 Processo de erosão hídrica do solo .....	7
2.3 Avaliação quantitativa da erosão do solo .....	9
2.3.1 Modelos matemáticos para a predição da erosão hídrica do solo.....	9
2.4 Modelo WEPP – <i>Water Erosion Prediction Project</i> .....	13
2.4.1. Metodologia numérica do modelo .....	15
2.4.1.1 Componente solo.....	15
2.4.1.2 Componente Climático.....	19
2.4.1.2.1 Clima – Gerador Climático (CLIGEN).....	19
2.4.1.2.2 Precipitação total .....	19
2.4.1.2.3 Duração das Precipitações.....	20
2.4.1.2.4 Intensidade máxima da precipitação .....	20
2.4.1.3 Componente Hidrológico .....	21
2.4.1.3.1 Hidrologia de superfície e subsuperfície.....	21
2.4.1.3.2 Balanço de água e percolação .....	21
2.4.1.4 Componente de crescimento de planta e de decomposição de resíduos .....	22
2.5 Estudos com aplicação do modelo <i>WEPP</i> .....	22
2.6 Taxas de erosão estimadas pelo método da redistribuição do “fallout” do <sup>137</sup> Cs.....	26

<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 Localização da área de estudo.....	29
3.2 Caracterização dos solos das vertentes estudadas .....	33
3.2.1 Granulometria, distribuição de diâmetro e estabilidade de agregados e algumas características químicas dos solos das vertentes estudadas.....	33
3.3 Experimentos para determinação de parâmetros de entrada da componente solo do modelo WEPP .....	35
3.3.1 Componente solo do modelo <i>WEPP</i> .....	36
3.3.1.1 Erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ).....	36
3.3.1.1.1 Instalação e realização dos experimentos .....	37
3.3.1.1.2 Aplicação das chuvas simuladas .....	38
3.3.1.1.3 Determinação das perdas de solo e água.....	39
3.3.1.1.4 Cálculo da taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos.....	40
3.3.1.1.5 Estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos por equação da rotina interna do modelo <i>WEPP</i> .....	41
3.3.1.1.6 Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos .....	42
3.3.1.2 Erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ) do escoamento .....	44
3.3.1.2.1 Instalação e realização do experimento.....	44
3.3.1.2.2 Aplicação de chuva simulada e fluxo extra .....	45
3.3.1.2.3 Determinação das taxas de desagregação e da erodibilidade do solo em sulcos .....	46
3.3.1.2.4 Estimativa do fator de erodibilidade do solo em sulcos e da tensão crítica de cisalhamento pelas equações da rotina interna do modelo <i>WEPP</i> .....	47
3.3.1.2.5 Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos.....	48
3.3.1.3 Albedo .....	50
3.3.1.4 Condutividade hidráulica saturada do solo.....	51

3.3.1.4.1	Condutividade hidráulica saturada determinada a campo com simulador de chuvas .....	52
3.3.1.4.2	Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) determinada com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente .....	52
3.3.1.4.3	Estimativa do parâmetro de condutividade hidráulica do solo por equação da rotina interna do modelo <i>WEPP</i> .....	53
3.3.2	Parâmetros climáticos do modelo <i>WEPP</i> .....	54
3.3.3	Parâmetros topográficos das vertentes .....	55
3.3.4	Parâmetros de uso e manejo do solo .....	56
3.4	Simulações da dinâmica de desagregação e deposição de sedimentos pelo modelo <i>WEPP</i> .....	58
3.5	Comparação dos resultados simulados pelo modelo <i>WEPP</i> com os estimados pelo método da redistribuição do “fallout” <sup>137</sup> Césio .....	59
3.6	Análise estatística dos dados .....	61
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>62</b>
4.1	Parâmetros de entrada do componente solo ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) do modelo <i>WEPP</i> .....	62
4.1.1	Características hidráulicas do escoamento superficial .....	62
4.1.1.1	Escoamento em entressulcos.....	62
4.1.1.2	Escoamento em sulcos.....	66
4.1.2	Fator de erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos e tensão crítica de cisalhamento .....	69
4.1.2.1	Taxa de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ ) .....	69
4.1.2.2	Erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) .....	71
4.1.2.3	Taxas de desagregação e caracterização da erodibilidade do solo em sulcos .....	74
4.1.3	Condutividade hidráulica saturada do solo .....	77
4.1.3.1	Condutividade hidráulica do solo obtida com simulador de chuvas .....	78
4.1.3.2	Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) obtida com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente .....	80

4.2	Simulações da dinâmica de desagregação e deposição de sedimentos pelo modelo <i>WEPP</i> e estimados pelo método de redistribuição do “fallout” <sup>137</sup> Césio .....	83
4.2.1	Simulações realizadas com dados do componente solo ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo .....	83
4.2.2	Simulações realizadas com dados do componente solo ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo <i>WEPP</i> ...	94
4.2.3	Outras formas de simulação realizadas utilizando diferentes dados de entrada no modelo <i>WEPP</i> .....	99
4.2.4	Distribuição espacializada dos inventários de <sup>137</sup> Césio nas vertentes estudadas .....	103
4.3	Comparação da dinâmica de desagregação e deposição de sedimentos simulados pelo modelo <i>WEPP</i> e estimados pelo método de redistribuição do “fallout” <sup>137</sup> Césio de forma espacializada ao longo das vertentes estudadas .....	105
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>111</b>
<b>7.</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>135</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
<b>01</b> Estimativas da extensão global de degradação de terra, conforme Oldeman (1994).....	6
<b>02</b> Extensão do Globo terrestre afetada pela erosão hídrica, conforme Oldeman (1992).....	7
<b>03</b> Avaliação de aproximações de modelo tradicionais com alguns exemplos de modelo e os conceitos básicos usado na predição de erosão e transporte de sedimento (Adaptado de Vente & Poensen, 2005). ....	12
<b>04</b> Caracterização granulométrica dos solos na profundidade de 0 a 20 cm das vertentes estudadas.....	34
<b>05</b> Caracterização química dos solos na profundidade de 0 a 20 cm das vertentes estudadas. ....	34
<b>06</b> Diâmetro médio ponderado de agregados do solo a úmido e a seco e índice de estabilidade de agregados dos solos nas vertentes estudadas.....	35
<b>07</b> Albedo médio para radiação solar global de algumas superfícies (Reichardt & Timm, 2004).....	51
<b>08</b> Calendário anual com informações de uso do solo e práticas de manejo adotadas. ....	57
<b>09</b> Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos, obtidas sob condições experimentais de campo e laboratório. ....	62
<b>10</b> Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos.....	67

<b>11</b>	Valores médios do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), para os testes realizados sob condições de campo e de laboratório e estimado por equação da rotina interna do modelo <i>WEPP</i> . .....	72
<b>12</b>	Valores de descarga líquida ( $Q$ ), concentração média de sedimentos na enxurrada ( $C$ ), tensão cisalhante do escoamento ( $\tau$ ) e taxa de desagregação ( $D_r$ ), para vazões aplicadas em sulcos pré-formados com declividade de $0,14 \text{ m m}^{-1}$ . .....	74
<b>13</b>	Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo. ....	84
<b>14</b>	Médias dos valores anuais de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo. ....	86
<b>15</b>	Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de desagregação nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo. ....	89
<b>16</b>	Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de deposição de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo. ....	89
<b>17</b>	Resultados da produção de sedimentos anual medidas na bacia de Arvorezinha (Uzeika, 2009). ....	90
<b>18</b>	Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do <i>WEPP</i> ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo. ....	95

<b>19</b>	Médias dos valores anuais de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do <i>WEPP</i> ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo. ...	96
<b>20</b>	Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de desagregação nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do <i>WEPP</i> ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo.....	98
<b>21</b>	Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de deposição de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do <i>WEPP</i> ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo. ....	98
<b>22</b>	Médias dos valores anuais de produção de sedimentos nas vertentes estudadas, para diferentes formas de simulações realizadas com o modelo <i>WEPP</i> .....	100

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
<b>01</b> Fluxograma de predição de erosão pelo modelo <i>WEPP</i> (Flanagan et al., 1995). ....	14
<b>02</b> Localização da bacia hidrográfica do Lajeado Ferreira, Arvorezinha (RS) (Minella et al., 2007). ....	29
<b>03</b> Localização das vertentes na área da bacia hidrográfica e os respectivos perfis topográficos. ....	30
<b>04</b> Aspectos gerais da paisagem das áreas agrícolas estudadas, compostas pelas vertentes (a) e (b), inseridas na bacia de Arvorezinha (Fotos: Minella, J.P.G.). ....	31
<b>05</b> Representação do layout do programa computacional para o componente solo do modelo <i>WEPP</i> . ....	36
<b>06</b> Parcelas de erosão do solo em entressulcos, sob condições experimentais de campo (a) e laboratório (b). ....	38
<b>07</b> Aplicação de chuva simulada em parcelas de erosão do solo em entressulcos sob condição experimental de campo, utilizando um simulador de chuva. ....	39
<b>08</b> Medição da velocidade superficial do escoamento. ....	42
<b>09</b> Parcelas de erosão do solo em sulcos sob condição experimental de campo. ....	45
<b>10</b> Aplicação de chuva simulada (a) e fluxos extras (b) em parcelas de erosão do solo em sulcos. ....	46
<b>11</b> Medições das dimensões da seção transversal do sulco (a) e da velocidade do escoamento (b) em parcelas de erosão do solo em sulcos. ....	48

<b>12</b>	Representação do layout do programa computacional para o gerador de dados climáticos CLIGEN no modelo <i>WEPP</i> .....	54
<b>13</b>	Perfil representativo da primeira (a) e da segunda (b) vertente utilizada nas simulações realizadas com o modelo <i>WEPP</i> .....	55
<b>14</b>	Representação do layout do programa computacional para o componente de uso e manejo do solo do modelo <i>WEPP</i> .....	56
<b>15</b>	Sistema de preparo do solo em cultivo convencional (a) e cultivo mínimo com mobilização somente na linha de semeadura (b).....	58
<b>16</b>	Distribuição espacial de vertentes na área da bacia (a) com estudo da determinação da atividade do <sup>137</sup> Césio utilizando o método de redistribuição do “fallout” do <sup>137</sup> Césio e vertentes selecionadas (b) e (c) para simulações do processo erosivo com o modelo <i>WEPP</i> (Fotos: Minella, J.P.G.). .....	60
<b>17</b>	Descarga líquida unitária do escoamento superficial ( $q_i$ ), sob chuva simulada de intensidade média de $1,944 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ( $70 \text{ mm h}^{-1}$ ) na condição experimental de campo (a) e de $2,361 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ( $85 \text{ mm h}^{-1}$ ) na condição experimental de laboratório (b).....	64
<b>18</b>	Relação entre velocidade média do escoamento em entressulcos e tempo de aplicação da chuva simulada nas condições experimentais de campo (a) e laboratório (b).....	65
<b>19</b>	Relação entre velocidade média do escoamento e vazão gerada pela chuva e fluxo extra aplicados nos sulcos de erosão para os teste realizados sob condição experimental de campo. ....	67
<b>20</b>	Taxas médias de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ ), para os testes realizados sob condições experimentais de campo (a) e laboratório (b).....	69

<b>21</b> Erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ), obtidas a partir do ajuste da equação de regressão das taxas de desagregação do solo ( $D_r$ ) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento ( $\tau$ ), observadas com a aplicação dos fluxos extras no escoamento superficial gerado pela chuva simulada, em sulcos pré-formados e recém-preparado. ....	76
<b>22</b> Taxa de infiltração de água e escoamento superficial sob chuva simulada em parcelas de erosão do solo em entressulcos (a) e em sulcos (b) sob condição experimental de campo.....	79
<b>23</b> Mapa da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ , $\text{mm h}^{-1}$ ) (Dalbianco, 2009). ....	81
<b>24</b> Distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos na primeira vertente para 1 (a), 50 (b) e 100 (c) anos de simulação realizadas com dados do componente solo do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo. ....	91
<b>25</b> Distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos na segunda vertente para 1 (a), 50 (b) e 100 (c) anos de simulação realizadas com dados do componente solo do modelo <i>WEPP</i> obtidos sob condição experimental de campo. ....	92
<b>26</b> Distribuição dos inventários de $^{137}\text{Cs}$ na primeira (a) e segunda (b) vertente estudada (informações cedidas pelos professores Gustavo Henrique Merten – IPH/UFRGS e Jean Paolo Gomes Minella – CCR/UFSM). ....	103

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
<b>01</b> Distribuição e unidades dos solos da bacia de Arvorezinha e caracterização granulométrica de solo da camada superficial de perfil descrito no terço superior da bacia (EMATER, 2002). ....	136
<b>02</b> Parâmetros do arquivo de uso e manejo na base de dados internos disponíveis no modelo <i>WEPP</i> com algumas modificações de acordo com informações locais. ....	137
<b>03</b> Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos, obtidas em condições de campo e laboratório. ....	139
<b>04</b> Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos, obtidas sob condição de campo em recém-preparado. ....	140
<b>05</b> Seção transversal média do sulco de erosão. ....	143
<b>06</b> Valores médios de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), para os testes realizados sob condições de campo, laboratório e estimado por equação da rotina interna do modelo. ....	146
<b>07</b> Valores de descarga líquida ( $Q$ ), concentração média de sedimentos na enxurrada ( $C$ ), declive, tensão cisalhante do escoamento ( $\tau$ ) e taxa de desagregação ( $D_r$ ) para vazões aplicadas em sulcos pré-formados. ....	147
<b>08</b> Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimento na primeira vertente estudada, para simulações realizadas. ....	148
<b>09</b> Médias dos valores anuais de desagregação, e deposição de sedimentos com respectivo comprimento na primeira vertente estudada, para simulações realizadas. ....	149
<b>10</b> Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimento na segunda vertente estudada, para simulações realizadas. ....	150

<b>11</b>	Médias dos valores anuais de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento na segunda vertente estudada, para simulações realizadas. ....	151
-----------	---	-----

## 1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas são naturalmente bem estruturados funcionalmente e apresentam forte resiliência. Entretanto, por não serem infalíveis, estão sempre sujeitos à degradação. Neste caso, alguma interferência sobre a vegetação ou que cause alterações que modifiquem as propriedades do solo pode comprometer a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas, levando-os a um estado inicial de disfunção que pode atingir um processo degenerativo de suas funções que culmina com a degradação.

O solo é um recurso natural que tem papel destacado dentro dos ecossistemas e, estando nesta posição, recaem sobre ele as mais variadas formas de degradação. Assim, dependendo do tipo de manejo agrícola adotado, o mesmo poderá influenciar em maior ou menor grau de ruptura do equilíbrio natural. Desta forma, alterando atributos físicos, químicos e biológicos, bem como a produtividade das culturas.

Dentre as causas de redução da capacidade produtiva dos solos e da degradação do meio ambiente, a erosão hídrica é uma das formas mais intensas de degradação do solo, uma vez que reduz a capacidade produtiva das culturas, além de causar sérios danos ambientais. Este fenômeno varia com as características edafoclimáticas locais, sofrendo assim grande variação em diferentes condições ambientais.

Questões relacionadas aos processos erosivos são motivos de preocupação em todo mundo. O uso indiscriminado do solo, associado à agricultura, desmatamentos, expansão urbana, construção e uso de estradas, dentre outros fins, são os principais agentes antrópicos causadores de grandes perdas de solo por erosão dentro dos ecossistemas.

Diversas são as consequências decorrentes do processo erosivo, podendo-se destacar a perda de terras cultiváveis pela redução da área de produção e da fertilidade do solo, a degradação física da estrutura do solo, o assoreamento de reservatórios de água reduzindo sua capacidade e transporte de nutrientes para corpos d'água em áreas susceptíveis a tal fenômeno.

Segundo o United Nations Environmental Program (1991) e Higgitt (1991), grandes áreas de terras cultiváveis podem se tornar improdutivas, ou pelo menos economicamente inviáveis, se a erosão não se mantiver em níveis toleráveis. Fontes da FAO (2001) estimam que no Brasil, por ano, são perdidos aproximadamente 500 milhões de toneladas de solos através da erosão, e que juntos, Argentina, Bolívia, Brasil, Chile e Paraguai, apresentam 200 milhões de hectares de terras degradadas.

Visando o controle do processo erosivo, um manejo agrícola efetivo requer o entendimento das interações complexas entre os processos químicos, físicos, hidrológicos e meteorológicos. Por esse motivo, para identificar áreas com problemas erosivos em bacias hidrográficas, modelos vêm sendo utilizados com mais frequência, já que estes permitem descrever matematicamente os processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo.

Diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados, desde a década de 50, com o intuito de prever a magnitude das perdas de solo por erosão. Entre esses modelos podemos citar os modelos empíricos como a "*Universal Soil Loss Equation*" (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), a "*Revised Universal Soil Loss Equation*" (RUSLE) (Renard et al., 1997) e o "*Soil and Water Assessment Tool*" (SWAT) (Arnold et al., 1998) e os modelos baseados em princípios físicos, como o "*Water Erosion Prediction Project*" (WEPP) (Lane et al., 1987; Laflen et al., 1991; United State Department of Agricultural, USDA, 1995; Flanagan & Nearing, 1995).

Tais modelos de simulação são ferramentas poderosas na pesquisa e nas práticas agrícolas. Estes, quando aplicados em situações de campo, auxiliam na determinação das práticas conservacionistas e dos manejos mais indicados. No entanto, antes de serem extensivamente utilizados para a predição da erosão, os modelos necessitam ser avaliados e calibrados. Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este deve ser validado em situações

semelhantes onde se quer aplicá-lo. Somente depois de devidamente validado, o modelo poderá ser empregado com segurança na previsão da erosão.

A modelagem da erosão do solo constitui-se numa ferramenta eficaz para avaliar a eficiência das estratégias de ação a serem adotadas visando um manejo agrícola efetivo e um controle do processo erosivo e conseqüente degradação dos solos.

Dentre os modelos de predição de erosão existente, o modelo *WEPP* foi desenvolvido e os seus parâmetros ajustados para condições de clima temperado. Em razão disso, torna-se fundamental importância uma verificação da aplicabilidade para condições edafoclimáticas brasileiras, uma vez que o desenvolvimento de um modelo torna-se oneroso em termos de tempo e recursos necessários, tanto do ponto de vista de coleta de dados quanto dos diversos níveis do conhecimento que envolve o processo erosivo.

### **1.1 Hipóteses**

As simulações de erosão e de escoamento superficial realizadas com a utilização do modelo *WEPP* conduzem a resultados mais próximos da realidade quando são aplicados valores dos parâmetros do componente solo determinados experimentalmente nas condições locais em comparação com a aplicação de valores dados pelas equações da rotina interna do modelo, especialmente quando as condições edafoclimáticas forem diferentes daqueles onde o modelo foi desenvolvido e de onde foram geradas as equações da rotina interna para quantificar os referidos parâmetros.

A dinâmica do processo erosivo simulado pelo modelo *WEPP* e observado pela atividade de  $^{137}\text{Césio}$  avaliado pelo método de redistribuição do “fallout”  $^{137}\text{Césio}$  apresentam a mesma tendência em termos de erosão e deposição de sedimentos em uma vertente.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

Simular e analisar os processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos de forma espacializada ao longo de vertentes de bacia rural utilizando o modelo de predição de perdas de solo *WEPP* versão vertente para condição edafoclimática do sul do Brasil.

### 1.2.2 Específicos

Determinar as taxas de desagregação do solo em entressulcos e em sulcos sob condições de campo e de laboratório para obter os valores dos fatores de erodibilidade do solo em entressulcos, fator de erodibilidade do solo em sulcos e tensão crítica de cisalhamento do solo, visando à aplicação do modelo *WEPP*.

Caracterizar as variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos sob chuva simulada, tais como, descarga líquida unitária e velocidade superficial do escoamento sob solo descoberto, que são determinantes das relações de desagregação de solo nas áreas de erosão em entressulcos.

Avaliar as condições hidráulicas do escoamento em sulcos e caracterizar o regime de escoamento sob condições de sulcos pré-formados sobre solo recém preparado.

Aplicar o modelo *WEPP* em vertentes de bacia rural e analisar as áreas de erosão e deposição de sedimentos de forma espacializada ao longo das vertentes.

Realizar comparação entre padrão espacial das taxas de desagregação e deposição simuladas pelo o modelo *WEPP* com os resultados observados da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  avaliado pelo método de redistribuição do “fallout”  $^{137}\text{Césio}$ , em pontos amostrais ao longo das encostas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Problemas consequentes da erosão do solo**

A erosão do solo afeta a qualidade do solo, da água e do ar. A aceleração do processo de erosão do solo e o conseqüente aumento na taxa de erosão devido às perturbações antropogênicas no equilíbrio solo-vegetação-clima, têm influenciado na qualidade do solo e no cenário ambiental.

Essas perturbações ocasionadas devido a mudanças no uso da terra e nas práticas de manejo empregadas têm provocado a transformação de grande parte da superfície do planeta (Foley et al., 2005). O desmatamento, a agricultura intensiva e de subsistência, a expansão da urbanização, a mineração e a construção civil são as principais atividades causadoras de mudanças que têm como conseqüências grandes impactos ambientais locais e globais. Entre essas conseqüências, destacam-se: I) mudanças na cobertura vegetal da terra que causam perdas de biodiversidade, alterações climáticas regionais decorrentes, de modificações no fluxo energético entre a atmosfera e sistema solo-vegetação e o balanço hídrico do ecossistema; II) mudanças na capacidade do ecossistema garantir serviços ecológicos essenciais (Tilman et al., 2001). Essas modificações são conseqüências da apropriação dos recursos naturais pelo homem para atender suas necessidades, provocando assim, intensa degradação ambiental.

A agricultura, embora tenha tido muito sucesso na produção em virtude da sua vasta extensão, é a grande causadora da degradação das terras (biodiversidade, solo e recursos hídricos). O manejo e o uso agrícola do solo são responsáveis por cerca de um quarto da extensão de solos degradados no mundo, enquanto o desmatamento, que, geralmente, tem como objetivo a exploração agrícola da terra, é responsável por outros 40% da degradação (Asner et al., 2004), provocando enorme perda da biodiversidade e grande impacto nos ecossistemas (Sala et al., 2000).

O processo erosivo remove a camada superficial do solo, reduzindo

os teores de matéria orgânica e a atividade biológica a eles associada, reduzindo a disponibilidade de nutrientes, além de contribuir para a degradação física do solo. Em solos que apresentam restrições ao crescimento radicular, a erosão diminui a profundidade de enraizamento, o que reduz quantidades de água, ar e nutrientes disponíveis para as plantas (Ribeiro et al. 2009).

Segundo Vente et al. (2008), Guerra (1995) e Foster (1982) a erosão dos solos não causa problemas apenas nas áreas onde ocorre (“*in site*”), mas fora do local (“*off site*”). Dentre os impactos ocasionados pela erosão “*in site*”, destaca-se: perda da camada fértil do solo, e conseqüente perda da fertilidade, decréscimo de produtividade, prejuízo ao crescimento das plantas e diminuição da capacidade de retenção de água no solo. Os principais impactos do efeito “*off site*” são: problemas de sedimentação causando danos relacionados a enchentes; assoreamento de rios, lagos e reservatórios; além da poluição dos corpos d’água. A erosão causa, quase sempre, uma série de problemas ambientais. Esses problemas podem ocorrer em pequena escala, em nível de área agrícola; ou até mesmo em grande escala, em nível de bacia hidrográfica. Como conseqüência, o material erodido pode causar o assoreamento de rios e reservatórios. Outra conseqüência preocupante é que, os sedimentos transportados pelo escoamento em uma área agrícola, podem estar adsorvidos com agroquímicos e contaminar água dos rios e mananciais.

É consenso mundial que a erosão acelerada é um sério problema global, sendo difícil avaliar precisamente a sua extensão, a sua magnitude e a sua taxa, bem como as conseqüências econômicas e ambientais. Segundo Oldeman (1994), a erosão hídrica é a principal forma de degradação do solo (Tabela 1).

**Tabela 1.** Estimativas da extensão global de degradação de terra, conforme Oldeman (1994).

Tipo de degradação	Área degradada	
	Milhões de ha	%
Erosão hídrica	1094	56
Erosão eólica	549	28
Degradação química	239	12
Degradação física	83	4
Total	1965	100

Oldeman (1992), em outra exposição, menciona que grandes áreas da superfície do globo são afetadas pela erosão hídrica (Tabela 2). Da área terrestre habitada 24% já foram atingidas pela degradação do solo induzida por ação antrópica. Os valores para cada continente são pouco significantes na América Central, 12% da área da América do Norte, 18% da América do Sul, 19% da Oceania, 26% da Europa, 27% da África e 31% da Ásia.

**Tabela 2.** Extensão do Globo terrestre afetada pela erosão hídrica, conforme Oldeman (1992).

Continente	Áreas afetadas	
	Milhões de ha	%
Ásia	441	31
África	227	27
Europa	114	26
Oceania	83	19
América do Sul	123	18
América do Norte	60	12
América Central	46	-
Mundial	1094	

Para conduzir explorações agrícolas com bases conservacionistas, sem descuidar dos interesses financeiros dos agricultores, é necessária a planificação racional do uso do solo a ser dados a cada gleba de terra, considerando o conjunto das suas principais características físicas, ecológicas e econômicas (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

## 2.2 Processo de erosão hídrica do solo

O processo de erosão hídrica envolve a desagregação de partículas do solo da sua massa original, o transporte dessas partículas (primárias ou agregados) e eventual deposição. Esse processo ocorre pela ação dos agentes erosivos, que são as gotas da chuva e o escoamento superficial da água sobre o solo (Ellison, 1946, 1947a, 1947b, 1947c, 1947d, 1947e; Ellison & Ellison, 1947a, 1947b).

Meyer et al. (1975) sugeriram separar o processo de erosão hídrica em entressulcos e em sulcos. A erosão em entressulcos é aquela cujo agente erosivo responsável pela desagregação é a precipitação pluvial através da energia cinética do impacto das gotas de chuva sobre o solo e o transporte ocorre por uma ação combinada do efeito salpicamento (“*rain splash*”) e do escoamento difuso. A fonte de sedimentos no processo em entressulcos é constituída basicamente por materiais da superfície do solo. Já na erosão em sulcos, o agente erosivo responsável pela desagregação e pelo transporte é o escoamento concentrado, sendo que a fonte de sedimentos são os horizontes superficiais e subsuperficiais (Bryan, 1987). Esse escoamento concentrado é profundo o suficiente para proteger a superfície do solo contra o impacto das gotas de chuva.

Na erosão em entressulcos, a maior parte do material desagregado é transferido para os sulcos através do escoamento difuso (Young & Wiersma, 1973; Meyer et al., 1975). O escoamento difuso, devido a sua condição hidráulica de pouca espessura de lâmina de água em relação ao elemento rugoso, tem parte de sua tensão cisalhante total dissipada em função da resistência de forma (Rauws & Govers, 1988). Com isso a tensão cisalhante relacionada com o transporte de sedimentos e a desagregação do solo (tensão efetiva) são reduzidas (Abrahams & Person, 1991). Por outro lado, o escoamento difuso sob ação da precipitação pode se tornar turbulento e ter sua capacidade de transporte aumentada quando algumas condições referentes à relação entre a altura de lâmina de água e o tamanho de gotas forem satisfeitas (Kinnell, 1991; 2003, 2005; 2006).

A transferência de sedimentos da região onde esse foi desagregado para a região dos sulcos é um processo governado pelo princípio de que a carga de sedimentos a ser transportada é limitada ou pela disponibilidade de sedimentos ou pela capacidade de transporte do escoamento difuso (Foster, 1982). Na maioria das vezes o que limita este processo é a disponibilidade de sedimentos a ser transportado, que por sua vez, é função das taxas de destacamento dos sedimentos da massa do solo (Toy et al., 2002). Desta forma, é importante considerar que a erosão em entressulcos é um processo dependente não apenas das condições envolvidas na fase de desagregação, mas também pela capacidade de transporte do escoamento difuso.

## **2.3 Avaliação quantitativa da erosão do solo**

As estimativas das taxas de erosão e sedimentação, associadas a diferentes usos e manejos do solo, são escassas e os métodos comumente empregados nas suas determinações são onerosos e demorados. A maioria dos estudos de erosão do solo são oriundos de trabalhos empíricos, baseados numa vasta gama de dados coletados sobre perdas de solo e agentes controladores do processo erosivo. Apartir desses resultados são realizadas análises estatísticas e, em função disso, uma grande quantidade de variáveis tem sido apontada, em diversas partes do mundo, como sendo as mais significativas para explicar e prever a erosão (Guerra, 1998).

A estimativa da erosão é essencial para a adoção de um programa de manejo e conservação do solo e extremamente útil para prever os impactos antes mesmo de uma determinada cultura ou prática agrícola ser implementada. Constitui-se, desta forma, numa ferramenta de grande importância como suporte as tomadas de decisão, uma vez que as alternativas de manejo são numerosas, apresentando alto custo. Conseqüentemente, os resultados de uma prática conservacionista podem levar anos ou décadas para exercer influência sobre erosão (Lane et al., 1992; Chaves, 1996).

### **2.3.1 Modelos matemáticos para a predição da erosão hídrica do solo**

Modelos podem ser descritos como uma proposição simplificada da natureza com o propósito de conhecer um fenômeno (Batchelor, 1994). Eles integram o conhecimento existente dentro de princípios lógicos de procedimentos e relações e podem ser usados para estabelecer mais conhecimentos sobre os sistemas ambientais, visando prever melhores manejos desses ecossistemas, bem como de cenários futuros (Grayson et al., 1992; Moore & Gallant, 1991).

Os modelos de predição da erosão hídrica do solo são importantes ferramentas de análise, os quais podem ser usados para melhor compreender os processos erosivos, analisar o desempenho das práticas de manejo e avaliar os riscos e os benefícios advindos de diferentes tipos de uso do solo (Marchi et al., 2006, Chaves, 1996).

Apesar da descrição do processo erosivo ter sido feita de forma empírica há meio século, somente nos últimos 20 anos houve descrição mais física do fenômeno, por meio de equações e modelos baseados em processos. A principal vantagem é a representação mais detalhada do processo, permitindo melhor entendimento dos diferentes subprocessos envolvidos e sua inter-relação, bem como a descrição quantitativa em níveis espacial e temporal (Foster & Lane, 1987).

De acordo com Tucci (1998) os modelos matemáticos podem ser agrupados de acordo com suas características em: a) Modelos discretos ou contínuos; b) Modelos concentrados ou distribuídos; c) Modelos conceituais ou empíricos e d) Modelos estocásticos ou determinísticos.

Contínuos quando os fenômenos são contínuos no tempo. Discretos quando se dão em intervalos determinados.

Concentrados são os modelos em que os parâmetros variam somente em função do tempo e são representados por equações diferenciais ordinárias com uma variável independente. Distribuídos são aqueles que variam também, segundo espaço geográfico, utilizando-se para representá-los equações diferenciais parciais com mais de uma variável independente.

Modelo conceitual é aquele em que as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Empíricos são os que ajustam os dados calculados aos observados através de funções empíricas, mas que estão relacionadas com a física do sistema.

Quando o conceito de probabilidade é considerado na formulação do modelo, este é denominado estocástico, sendo aqueles em que o relacionamento entre entrada e saída é estatístico. Os determinísticos são baseados em soluções de equações que descrevem os processos físicos. Equações padrões utilizadas em tais modelos são: a equação de conservação de massas e a equação de conservação das massas para sedimentos (Merrit et al., 2003).

Geralmente os modelos de erosão do solo são baseados em técnicas empíricas ou em processos. Nos modelos empíricos, como a USLE e RUSLE, os fatores que influenciam a erosão do solo são medidos e, então, derivados de equações de regressão matemática. São modelos que requerem medições prévias dos locais de interesse ou locais similares. Em contraste, os modelos baseados em processos descrevem a física do processo erosivo que podem ser estendidos para locais sem medições com maior segurança (Elliot et al., 1997).

Existem inúmeros modelos para a estimativa de perdas de solo e produção de sedimentos. Na Tabela 3 são listados modelos que se distinguem em termos de complexidade, processos e parâmetros considerados (hidrológicos, sedimentos, nutrientes e/ou pesticidas), e dados requeridos para o uso, calibração e validação do modelo.

Num contexto mais amplo, não existe um modelo propenso para executar todas as aplicações. O modelo mais adequado dependerá da finalidade e características da área de estudo (Merritt et al., 2003).

A maior limitação ao uso desses modelos é a dificuldade em trabalhar uma grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Pesquisadores têm reconhecido que a variabilidade espaço-temporal nas características da paisagem, incluído solo, uso da terra, relevo e clima, afeta a resposta hidrológica do sistema físico, implicando em limitações na aplicação de modelos.

Na metade da década de 1980, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (United States Department of Agriculture - USDA) iniciou o desenvolvimento do Projeto de Predição de Erosão Hídrica (*Water Erosion Prediction Project - WEPP*) visando desenvolver uma nova geração de tecnologias para a predição da erosão hídrica. O *WEPP* é um modelo baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo de simulação contínua que permite a estimativa da perda e da deposição de solo e não apenas da perda média do solo (Flanagan & Nearing, 1995).

**Tabela 3.** Avaliação de aproximações de modelo tradicionais com alguns exemplos de modelo e os conceitos básicos usado na predição de erosão e transporte de sedimento (Adaptado de Vente & Poensen, 2005).

Base conceitual	Modelo	Fundamentação	Referência
Empírico / Regressão	Fournier	Chuva anual e chuva máxima mensal.	(Fournier, 1960)
	Dendy and Bolton	Area de drenagem e quantia de escoamento	(Dendy and Bolton, 1976)
Conceitual	USLE / RUSLE	R: erosividade da chuva, K: erodibilidade do solo, LS: comprimento de declive e declividade, C: Manejo e cobertura do solo, P: práticas conservacionistas.	(Wischmeier & Smith, 1978) (Renard et al., 1994, 1997)
	AGNPS	Predição de escoamento por meio da curva número (SCS); RUSLE - fatores para predição de perda de solo.	(Young et al., 1989)
	SWAT	Predição de escoamento por meio da curva número (SCS); MUSLE - fatores para predição de perda de solo.	(Arnold et al., 1990, 1998)
Físico	NMF	Desagregação do solo é descrita pela intensidade da chuva; fatores da USLE.	(Morgan, 2001)
	EUROSEM	Cálculo de escoamento é baseado no balanço de água e taxa de infiltração do solo.	(Morgan et al., 1998)
	WEPP	Cálculo do escoamento com a curva número (SCS) ou Green-Ampt; desagregação do solo e transporte baseado no declive, % de vegetação, tensão crítica, rugosidade, matéria orgânica e massa de raízes.	(Flanagan et al., 2001)
	CREAMS	Cálculo do escoamento com a curva número (SCS) ou Green-Ampt; cálculo da desagregação do solo baseado em fatores da USLE (R, K, C).	(Knisel, 1980)
	EPIC	Determina o efeito de estratégias de manejo agrícolas em recursos hídricos e produtividades de solos	Sharpley & Williams (1990)

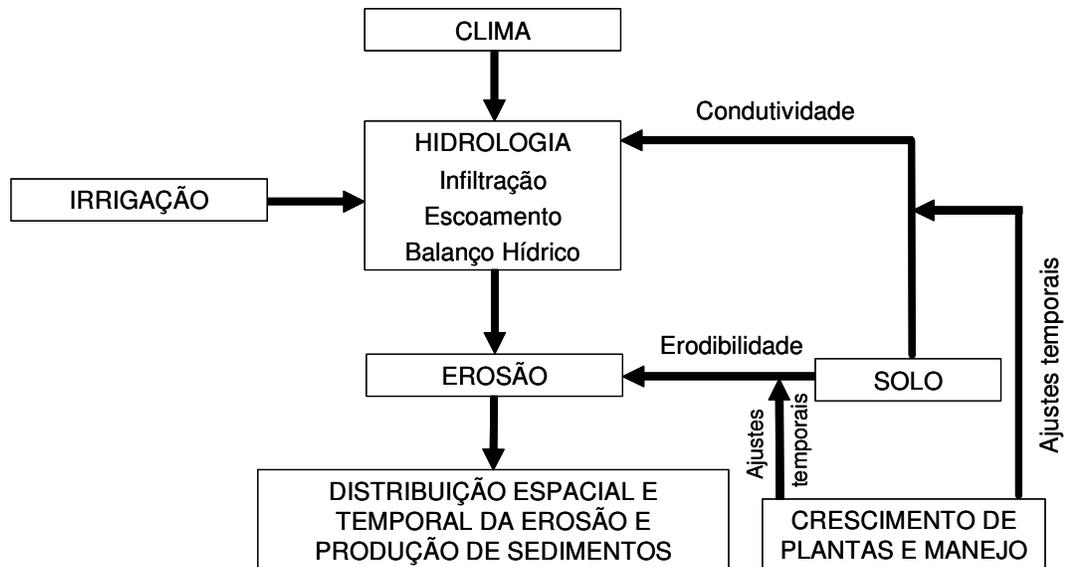
## **2.4 Modelo WEPP – Water Erosion Prediction Project**

Dentre os modelos existentes para a modelagem do escoamento superficial (Aksoy & Kavvas, 2005; Merritt et al. 2003), o *WEPP - Water Erosion Prediction Project* (USDA, 1995) representa a última geração de modelos baseados em processos físicos, incorporando os desenvolvimentos anteriores de Meyer & Wischmeier (1969), Foster & Meyer (1972) e Meyer et al. (1975). Este modelo constitui-se em um pacote tecnológico desenvolvido por um programa interinstitucional envolvendo as instituições norte-americanas: USDA – *Natural Resources Conservation Service, Agricultural Research Service*, USDA – *Forest Service*, USDI – *Bureau of Land Management*, dentre outras agências envolvidas na conservação de água e solo. Este modelo teve como objetivo elaborar uma tecnologia para a conservação da água e do solo, a fim de permitir a predição dos impactos resultantes de práticas de manejo de terras para produção agrícola, pastagens e áreas florestais.

O *WEPP* consiste em um modelo dinâmico de simulação que considera os processos de erosão em entressulcos e em sulcos separadamente. Com sua utilização, os processos que ocorrem em uma determinada área em função do solo, da cobertura vegetal, dos restos culturais e da umidade do solo podem ser simulados. Para cada dia, as características do solo, da cobertura vegetal e da umidade do solo são atualizadas. Quando ocorre uma chuva, baseando-se nas condições do terreno, se prevê ou estima a produção de escoamento. Se houver, o modelo estima a desagregação, transporte e a deposição de partículas ao longo da encosta (Lane et al., 1992).

O *WEPP* inclui os processos hidrológicos fundamentais de precipitação, infiltração e escoamento superficial, além dos processos erosivos básicos de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo (Flanagan et al., 1995).

O modelo, conceitualmente, é dividido em seis componentes (Figura 1): (i) climático; (ii) hidrológico baseado na equação de Green-Ampt; (iii) crescimento de plantas; (iv) solos; (v) erosão/deposição; e (vi) irrigação (Flanagan et al., 1995).



**Figura 1.** Fluxograma de predição de erosão pelo modelo *WEPP* (Flanagan et al., 1995).

O modelo é constituído de três versões básicas: uma versão para vertentes (“*hillslope*”), uma versão quadrículas (“*grid*”) e uma versão para bacias hidrográficas (“*watershed*”). A versão para vertente é uma substituição direta da USLE, acrescentando-se a capacidade de estimar a deposição de sedimentos ao longo da encosta. A versão quadrícula é aplicável para áreas nas quais os limites não coincidem com os limites da bacia. Já a versão para bacia hidrográfica estima o aporte de sedimentos não apenas em canais efêmeros, mas também em rios, e espacializa o processo de erosão e deposição de sedimentos ao longo das diversas vertentes. Nesta última, a análise da bacia hidrográfica é realizada dividindo-a em regiões homogêneas de geração de escoamento superficial, ditas elementos de escoamento superficial (“*Overland Flow Element*”) – OFE (Flanagan et al., 1995).

O *WEPP* permite determinar as distribuições espacial e temporal da perda de solo e deposição de sedimentos, além de fornecer estimativas de quando e onde, em determinada vertente ou bacia hidrográfica, esta ocorrendo erosão, possibilitando, assim a adoção de medidas de conservação para controlar a perda de solo e a produção de sedimentos (Flanagan et al., 1995; Chaves, 1994). Além de ser de domínio público, o modelo *WEPP*, sendo um algoritmo baseado em processos, oferece outra grande vantagem que é a de ser aplicável em países tropicais como o Brasil (Chaves, 1994).

Desenvolvimentos adicionais têm sido realizados no *WEPP* para permitir a utilização de informações digitais pela ligação com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (Baigorria & Romero, 2007; Van Lier et al., 2005; Flanagan et al., 2004; Ranieri et al., 2002). A interface Geo-Spatial para o *WEPP* (*GeoWEPP*) utiliza informações digitais geo-referenciadas como o modelo digital de elevação (MDE) e mapas topográficos para derivar e preparar parâmetros de entrada utilizados pelo *WEPP* para iniciar uma simulação, a fim de realizar estimativas das perdas de água e de solo em uma pequena bacia com um único uso e tipo do solo. A meta do projeto *GeoWEPP* é gerar uma série de interfaces para os usuários com diferentes níveis de conhecimento de SIG que sejam capazes de utilizar as diferentes fontes de dados (Renschler, 2007; Flanagan et al., 2004).

O modelo *WEPP* apresenta algumas limitações, entre as quais podem-se citar: grande número de parâmetros de entrada necessários para aplicação do modelo, podendo limitar sua utilização em situações onde existam poucos dados disponíveis; e não pode ser aplicado para prever a erosão em voçorocas (Laflen et al., 1991; Merritt et al., 2003).

#### **2.4.1. Metodologia numérica do modelo**

##### **2.4.1.1 Componente solo**

Propriedades do solo como infiltração, escoamento superficial, desprendimento e transporte de sedimentos influenciam os processos erosivos. No componente solo são consideradas as mudanças temporais em propriedades do solo (rugosidade, densidade do solo, condutividade hidráulica, tensão crítica de cisalhamento e fatores de erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos) decorrentes de práticas de manejo do solo, consolidação e precipitação (Laflen et al., 1991).

No componente solo ocorre a quantificação dos processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas. Para essa quantificação é utilizada a equação da continuidade, com o propósito de descrever o movimento de partículas em uma vertente, considerando-se condições de regime permanente (Foster et al., 1995) que é dada por:

$$\frac{dG}{dx} = D_l + D_r \quad (1)$$

onde  $G$  é a carga de sedimentos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ),  $x$  é a distância percorrida pelo escoamento superficial (m),  $D_l$  é a taxa de aporte lateral de sedimentos das áreas em entressulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) e  $D_r$  é a taxa de desagregação do solo em sulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

O sedimento advindo da erosão em entressulcos ( $D_l$ ) é considerado independente de  $x$  e é sempre positivo. No caso da erosão em sulcos,  $D_r$  pode ser positivo se houver desagregação ou negativo se houver deposição.

A taxa de aporte lateral de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos é calculada pela seguinte equação (Alberts et al., 1995):

$$D_l = D_i S_f C_i F_{sc} F_{gd} \quad (2)$$

onde  $D_l$  é a taxa de aporte de sedimentos da erosão do solo em entressulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $D_i$  é a taxa de desagregação em entressulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $S_f$  é o fator declividade do solo (adimensional),  $C_i$  é o fator de cobertura e de raízes,  $F_{sc}$  é o fator selo e crosta, e  $F_{gd}$  é o fator de gelo e degelo. Para condições tropicais e subtropicais esse último fator pode ser desconsiderado.

Considerando condições tropicais, com solo descoberto, preparado convencionalmente, logo sem efeito de cobertura, crostamento e selamento e gelo e degelo, pode ser desconsiderado o efeito dos fatores  $C_i$ ,  $F_{sc}$  e  $F_{gd}$ . Nesse caso, a taxa de aporte de sedimentos, dada pela equação (2), pode ser considerada como sendo igual à taxa de desagregação do solo em entressulcos, ajustada pela condição do declive.

A taxa de desagregação em entressulcos, em condições de solo descoberto, preparado convencionalmente, sem efeito de crosta, selamento, gelo e degelo, pode ser expressa por uma das seguintes equações:

$$D_i = K_i I^2 S_f \quad (3)$$

$$D_i = K_i I q_i S_f \quad (4)$$

Onde  $D_i$  é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para sulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $K_i$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $\text{kg s m}^{-4}$ ),  $I$  é a intensidade da chuva ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $q_i$  é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e  $S_f$  é o fator declividade do solo (adimensional). A equação (3) representa melhor as taxas de desagregação de solo em entressulcos em condições de solos com baixa permeabilidade e a equação (4) em condições de altas taxas de infiltração de água no solo.

Em condições experimentais, determinando-se as taxas de aporte de sedimentos em entressulcos e conhecendo-se a intensidade da chuva, a taxa máxima de escoamento superficial e a declividade da área, e a declividade do solo as equações (3 e 4) podem ser rearranjadas para determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos, da seguinte forma:

$$K_i = \frac{D_i}{I q_i S_f} \quad (5)$$

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad (6)$$

onde  $K_i$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $\text{kg s m}^{-4}$ );  $D_i$  é a taxa máxima de desagregação do solo nos entressulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $I$  é a intensidade da chuva ( $\text{m s}^{-1}$ );  $q_i$  é a descarga líquida do escoamento superficial ( $\text{m s}^{-1}$ ), e  $S_f$  o fator de ajuste para o declive (adimensional).

A taxa de desagregação de sedimentos nos sulcos ( $D_r$ ) é calculada para os casos em que a tensão cisalhante do escoamento excede a tensão crítica de cisalhamento do solo e quando a carga de sedimentos transportada for menor que a capacidade de transporte do escoamento. A equação da continuidade de transporte de massa representa todo o processo, a qual é básica para a definição da erosão em sulcos, sendo caracterizada pela seguinte expressão (Foster & Meyer, 1972):

$$\frac{D_r}{D_c} + \frac{G}{T_c} = 1 \quad (7)$$

onde  $D_r$  é a taxa de desagregação em sulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $D_c$  é a capacidade de desagregação do fluxo do sulco ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $G$  é a carga de sedimentos no escoamento ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) e  $T_c$  é a capacidade de transporte do fluxo do sulco ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

A equação (7) pode ser utilizada para representar a taxa de desagregação do escoamento concentrado em sulcos ( $D_r$ ) da seguinte forma:

$$D_r = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (8)$$

onde  $D_c$  é a capacidade de desagregação do escoamento superficial concentrado em sulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $G$  é a carga de sedimentos no escoamento ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) e  $T_c$  é a capacidade de transporte de sedimento ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ).

A taxa de desagregação pelo escoamento superficial concentrado em sulcos é proporcional à diferença entre a tensão de cisalhamento do

escoamento e a tensão crítica de cisalhamento do solo, com a constante de proporcionalidade representando o efeito das características do solo e expressa como fator de erodibilidade do solo em sulcos. Essa relação é dada por:

$$D_r = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (9)$$

onde  $D_r$  é a taxa de desagregação em sulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $K_r$  é o parâmetro de erodibilidade do solo em sulcos ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $\tau_c$  é o parâmetro de início de desagregação, ou tensão crítica de cisalhamento, do solo (Pa), e  $\tau_f$  é a tensão de cisalhamento do escoamento agindo nas partículas de solo (Pa) que é dada pela expressão:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (10)$$

onde  $\gamma$  é o peso específico da água ( $\text{N m}^{-3}$ );  $R_h$  é o raio hidráulico do escoamento em sulco (m); e  $S$  a declividade do sulco ( $\text{m m}^{-1}$ ).

Quando a carga de sedimentos a ser transportada é maior que a capacidade de transporte do escoamento, ocorre a deposição, a qual é quantificada utilizando-se a equação (Foster et al., 1995):

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (11)$$

onde  $\beta$  é o coeficiente de turbulência induzida pelo impacto das gotas de chuva (o modelo *WEPP* admite  $\beta$  igual a 0,5);  $V_f$  é a velocidade efetiva de queda (deposição) das partículas do sedimento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $q$  é a vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ( $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $T_c$  é a capacidade de transporte de sedimento ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ), e  $G$  é a carga de sedimento ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ).

A capacidade de transporte de sedimento, como também a carga de sedimento é calculado em uma unidade de largura base do sulco. A capacidade de transporte,  $T_c$ , é uma função da tensão de cisalhamento do escoamento e é calculada usando a equação de transporte simplificada (Foster et al., 1995) desta forma:

$$T_c = K_t \tau_f^{3/2} \quad (12)$$

onde  $K_t$  é um coeficiente de transporte ( $\text{m}^{0,5} \text{s}^2 \text{kg}^{-0,5}$ ) e  $\tau_f$  é tensão hidráulica agindo no solo (Pa). A capacidade de transporte no final do declive é computada usando uma modificação da equação de Yalin (1963). A equação de Yalin para sedimento não uniforme foi descrita por Foster (1982). Estas

equações têm sido modificadas, com o objetivo de melhor representar as diferenças na capacidade de transporte como uma função de características do tamanho da partícula de solo. Para a aplicação da equação de Yalin como descrito por Foster (1982), soma-se à capacidade de transporte de sedimento para cada uma das classes de tamanho de partícula de solo para obter a capacidade total de transporte de sedimento.

#### **2.4.1.2 Componente Climático**

##### **2.4.1.2.1 Clima – Gerador Climático (CLIGEN)**

O gerador climático (CLIGEN) é um modelo capaz de gerar séries sintéticas de dados climáticos para uma localidade específica, usando como base dados históricos (Nicks et al., 1995).

O CLIGEN é baseado em princípios estocásticos, que gera valores diários de variáveis como a precipitação (quantidade, intensidade, tempo para atingir a intensidade máxima e duração), temperatura máxima e mínima, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, e radiação solar - para uma dada estação - com base nos valores estatísticos para cada mês do ano, tais como, a média, desvio padrão e o coeficiente de assimetria dos dados diários - referentes a um longo período de registro (30 anos). Cada uma das variáveis supracitadas é estimada de modo independente das outras.

Os métodos de geração do clima usados no CLIGEN estão baseados nos geradores usados nos modelos *EPIC* (*Erosion Prediction Impact Calculator*) e *SWRRB* (*Simulator for water resources in rural basins*) (Nicks et al., 1995). Os métodos usados nos modelos precedentes foram modificados de modo a incluir os requisitos adicionais para distribuição da intensidade de precipitação.

##### **2.4.1.2.2 Precipitação total**

Uma distribuição normal é usada para representar a quantidade de precipitação diária para cada mês. A forma desta equação é (Nicks et al., 1995):

$$z_i = \frac{6}{g_i} \left\{ \left[ \frac{g_i \left( \frac{x_i - u_j}{s_j} \right)}{2} + 1 \right] - 1 \right\} + \frac{g_i}{6} \quad (13)$$

onde  $z_i$  é a variável reduzida para o dia  $i$  [-],  $x_i$  é a precipitação diária (mm),  $u_j$  é a precipitação média no mês  $j$  (mm),  $s_j$  é o desvio padrão da precipitação diária (mm) e  $g_i$  é o coeficiente de assimetria da precipitação diária [-].

#### 2.4.1.2.3 Duração das Precipitações

O método usado para estimar a duração de acontecimentos de precipitação gerados é igual àquele que é usado no modelo *SWRRB* (Arnold et al., 1990). Assume-se que existe uma relação exponencial entre a duração do acontecimento de precipitação e a duração média mensal dos acontecimentos, sendo expressa por (Nicks et al., 1995):

$$D = \frac{9.210}{-2 \ln(1 - rl)} \quad (14)$$

onde  $D$  é a duração do evento (h) e  $rl$  é um parâmetro dimensional de uma distribuição gamma de 30 minutos médio mensal da quantidade de precipitação.

#### 2.4.1.2.4 Intensidade máxima da precipitação

A intensidade máxima de precipitação é estimada pelo método proposto por Arnold & Williams (1989), expressa por:

$$r_p = 2P \ln(1 - rl) \quad (15)$$

onde  $r_p$  é a intensidade máxima da precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e  $P$  é a quantidade total da precipitação correspondente ao acontecimento chuvoso (mm) e  $rl$  é um parâmetro dimensional de uma distribuição gamma de 30 minutos médio mensal da quantidade de precipitação.

### 2.4.1.3 Componente Hidrológico

#### 2.4.1.3.1 Hidrologia de superfície e subsuperfície

Possui uma sequência de cálculos que incluem infiltração, excesso de precipitação, acúmulo de água em depressões e pico de descarga. A infiltração é determinada a partir da equação de Green-Ampt, modificada por Mein-Larson (GAML).

O modelo de Green-Ampt foi derivado da equação de Darcy, sendo desenvolvido para estimar a infiltração de água em solos homogêneos submetidos a uma carga hidráulica constante, isto é, em condição de empoçamento. Mein & Larson (1973) modificaram o modelo de Green-Ampt de modo que este pudesse ser aplicado também no período de tempo durante o qual não ocorra o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

A diferença entre intensidade de precipitação, a taxa de infiltração e o volume de armazenamento superficial é considerada escoamento superficial. A taxa de pico do escoamento superficial é determinada utilizando-se a equação de ondas cinéticas (Stone et al., 1995):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad (16)$$

onde  $h$  é a lâmina de escoamento (m),  $t$  é o tempo (s),  $q$  é a descarga por unidade de largura de superfície ( $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $x$  é a distância em nível plano,  $v = i_i - T_i$ , sendo  $i_i$  a intensidade instantânea de precipitação ( $\text{m s}^{-1}$ ) e  $T_i$  a taxa constante de infiltração da água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Wang et al. (2003) mencionam algumas limitações para a utilização dos modelos Green-Ampt e GAML: os parâmetros de entrada do modelo não representam efetivamente as condições reais de ocorrência da infiltração; dificuldade e pouca confiabilidade nos métodos de obtenção dos parâmetros; e a sua incapacidade de estimar a distribuição temporal das umidades no perfil do solo.

#### 2.4.1.3.2 Balanço de água e percolação

O balanço de água no solo é crucial para a estimativa da infiltração, escoamento superficial e tensão cisalhante do escoamento superficial. Esse

componente utiliza informações dos componentes de clima, crescimento da planta e infiltração para a estimativa da evapotranspiração potencial e da evaporação da água do solo. A partir destas informações, no componente de balanço hídrico do *WEPP* é realizado o balanço diário da água no solo, utilizando-se a seguinte equação (Savabi & Williams, 1995):

$$\theta = \theta_{in} + (P - I) \pm S - Q - ET - D - Q_d \quad (17)$$

sendo  $\theta$  o conteúdo de água do solo na zona radicular em um dado dia (m),  $\theta_{in}$  o conteúdo inicial de água do solo na zona radicular (m), P a precipitação acumulada (m), I a interceptação da precipitação pela vegetação (m), S o conteúdo de água em forma de neve (m) ((+) neve derretida, (-) neve acumulada), onde para condições tropicais e subtropicais esse fator pode ser desconsiderado, Q o escoamento superficial acumulado (m), ET a evapotranspiração acumulada (m), D a perda acumulada de água por percolação abaixo da zona radicular (m) e  $Q_d$  o escoamento lateral sub-superficial (m).

#### **2.4.1.4 Componente de crescimento de planta e de decomposição de resíduos**

O *WEPP* estima, diariamente, o crescimento de plantas de maneira similar ao modelo *EPIC* (*Erosion Prediction Impact Calculator*), acrescentando, nesse cálculo, a acumulação e a decomposição dos resíduos. Diversos são os parâmetros de entrada na determinação desse componente, dentre os quais: altura e cobertura da copa, biomassa de material vegetal vivo e morto acima e abaixo da superfície do solo, índice de área foliar (IAF), área basal da planta, práticas de manejo e uso do solo, bem como a data em que essas foram realizadas, entre outras (Flanagan et al., 1995; Stott et al., 1995).

### **2.5 Estudos com aplicação do modelo *WEPP***

Nos últimos anos diversos grupos de pesquisa têm desenvolvido trabalhos visando à aplicação do modelo *WEPP*. Dentre esses pode-se destacar os trabalhos realizados por Shen et al. (2010) que efetuaram análises de medidas de conservação do solo em três áreas de reservatório na China simulando erosão anual e eventos de chuva, tanto em bacia como para

pequenas parcelas. Dun et al. (2009) desenvolveram trabalho adaptando o *WEPP* para aplicações em bacia com floresta. Pandey et al. (2008) estudaram a modelagem do escoamento e produção de sedimento de uma pequena bacia agricultável na Índia. Pieri et al. (2007) usaram o modelo *WEPP* para simular escoamento e erosão a campo na cadeia montanhosa de Apennines na Itália. Li et al. (2007) estudaram cultivo e a erosão hídrica em diferentes paisagens em grandes planícies Norte Americanas usando técnica do  $^{137}\text{Cs}$  e modelos de erosão solo (*WEPP*, *WaTEM* e *TillEM*). Baigorria & Romero (2007) avaliaram “hotspots” de erosão em uma bacia integrando o modelo *WEPP* e GIS em um caso de estudo no Andes Peruano. Licciardello et al. (2006) avaliaram o desempenho da aplicação do modelo *WEPP* em condições mediterrâneas, em programa de monitoramento de 7 anos de pequena bacia na Sicília oriental (Itália). Gronsten & Lundekvam (2006) avaliaram a predição do escoamento superficial e perda de solo no Sudoeste da Noruega usando o modelo *WEPP* versão vertente. Raclot & Albergel (2006) modelaram o escoamento e erosão hídrica usando o *WEPP* em uma bacia cultivada no Mediterrâneo. Amore et al. (2004) estudaram efeito escala em aplicações com *USLE* e *WEPP* para computação da erosão do solo em três bacias da Sicília, Itália. Bhuyan et al. (2002) avaliaram predições de perda de solo com três modelos de simulação de erosão (*WEPP*, *EPIC* e *ANSWERS*) em experimentos de campo no estado do Kansas, Estados Unidos.

Nos diversos trabalhos referenciados relacionados à aplicação do *WEPP*, em algumas condições, é mencionado um satisfatório de desempenho do modelo na predição do escoamento superficial e produção de sedimentos. No entanto, entre os trabalhos algumas considerações é mencionado: aliado à aplicação do modelo o monitoramento de unidades (parcelas experimentais) podem ajudar na seleção de práticas de conservação; a produção de sedimentos simulada é bastante sensível, em determinadas condições, aos parâmetros de erodibilidade do solo em entressulcos em sulcos e a condutividade hidráulica efetiva, porém a calibração desses parâmetros é fundamental visando à melhoria da predição da erosão; resultados do modelo *WEPP* com uso das versões v2004.7 e v2008.9 mostraram uma melhoria da modificação do modelo em simular o fluxo lateral de subsuperfície e vazões diárias e anuais de encostas; a modelagem da erosão do solo ainda requer

pesquisas sobre processos hidrológicos e da erosão do solo.

No Brasil, na linha de pesquisa com *WEPP* alguns trabalhos foram desenvolvidos por Cecílio et al. (2009) com aplicação dos modelos *RUSLE* e *WEPP* para estimativa da erosão hídrica em microbacia hidrográfica de Viçosa (MG), onde os autores concluíram que tanto a *RUSLE* quanto o *WEPP* estimaram bem a perda de solo ocorrida na bacia, sendo que o valor simulado pela *RUSLE* foi mais próximo ao valor medido, porém as perdas anuais de solo e água estimadas pelo modelo *WEPP*, na condição que utiliza os procedimentos internos de cálculo do modelo mostraram que este deve ser usado com extremo cuidado e rigor em condições edafoclimáticas diferentes daquelas para as quais suas equações foram desenvolvidas. Van Lier et al. (2005) espacializaram o escoamento por meio de uso do *WEPP* e ferramentas de GIS e concluíram que os valores preditos de escoamento superficial e erosão do solo não se correlacionaram e que estudos de escoamento superficial georreferenciados são especialmente importantes quando o objetivo é analisar o escoamento superficial relacionadas a questões de perspectiva de sistemas de manejo agrícola. Amorim (2004) em estudo realizado avaliando os modelos de predição da erosão hídrica *USLE*, *RUSLE* e *WEPP* para condições edafoclimáticas brasileiras, concluiu, de forma específica, que o modelo *WEPP* apresentou uma sensibilidade elevada aos parâmetros do banco de dados referentes às características de solo, destacando-se como os mais críticos a tensão crítica de cisalhamento do solo, a condutividade hidráulica do solo, os fatores de erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos. Machado et al. (2003) testaram o modelo *WEPP*, através de comparações entre volume de enxurrada e perda de solo observados experimentalmente, provenientes dos segmentos de estradas florestais submetidas à chuva natural e concluíram que o modelo não se encontra devidamente calibrado para as nossas condições.

Vários outros trabalhos foram desenvolvidos visando à determinação parâmetros passíveis de entrada no modelo. O fator de erodibilidade do solo em entressulcos foi obtido por diversos autores em diferentes solos e condições de determinação. Nunes & Cassol (2008) determinaram o fator de erodibilidade do solo em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul, sob condição de laboratório, obtiveram valores de  $0,76 \times 10^6$  (Latossolo Vermelho aluminoférrico);  $0,97 \times 10^6$  (Latossolo Vermelho distroférrico) e

$1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  (Latossolo Vermelho distrófico). Esses autores também concluíram que o uso dos teores de areia muito fina (AMF) e de argila, conforme sugerido pelo modelo *WEPP*, não foi adequado para prever a erodibilidade em entressulcos dos Latossolos do Rio Grande do Sul estudados, uma vez que superestimou os dados obtidos experimentalmente. Gonçalves (2008) em um Argissolo Vermelho Amarelo e um Cambissolo Háptico Tb distrófico latossólico, sob condição de campo, obteve valores de  $3,06 \times 10^6$  e  $1,26 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , respectivamente. Bezerra & Cantalice (2006) em Argissolo Vermelho-Amarelo Tb distrófico, sob condição de campo, obtiveram valor de  $K_i$  de  $1,87 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ . Cassol et al. (2004) avaliaram as condições hidráulicas e as relações de desagregação do solo e de resistência ao escoamento com a presença de resíduos vegetais na erosão em entressulcos e observaram que a hidráulica do escoamento em entressulcos foi afetada pela presença de resíduos vegetais na superfície do solo, causando redução da velocidade e aumento da resistência e da altura da lâmina do escoamento. Cassol & Lima (2003) obtiveram valor do fator  $K_i$  de  $2,83 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , em Argissolo Vermelho distrófico típico, sob condição de campo. Cantalice (2002) em um Argissolo Vermelho distrófico típico, sob condições de campo e laboratório, obteve valores do fator  $K_i$  de  $2,09 \times 10^6$  e  $2,78 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , respectivamente. Schäffer et al. (2001) estudaram a erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo, em Argissolo Vermelho distrófico arênico, obtiveram valor do fator  $K_i$  de  $1,77 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ . Lima & Andrade (2001) determinaram o fator  $K_i$  de três solos de textura argilosa: Podzólico Vermelho-Escuro (PE) e Vermelho Amarelo (PV) e um Latossolo Roxo (LR), visando obter subsídios para a aplicação no modelo *WEPP* na região de Lavras (MG) e obtiveram valores de  $4,67 \times 10^5 \text{ kg s m}^{-4}$ , para o PE;  $6,85 \times 10^5 \text{ kg s m}^{-4}$ , para o PV, e  $3,38 \times 10^5 \text{ kg s m}^{-4}$ , para o LR. Albuquerque et al. (2000) obtiveram, em condição de laboratório e para sete solos, valores de  $K_i$  que variaram de 0,17 a  $1,96 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ . Braida & Cassol (1999) determinaram relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo e observaram que a erosão em entressulcos decresceu exponencialmente com o aumento da cobertura do solo por resíduos vegetais. Nas parcelas com cerca de 100% de cobertura, a erosão em entressulcos foi reduzida em 92% em relação ao solo descoberto. Braida &

Cassol (1996) obtiveram um valor de  $K_i$  de  $5,10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico. Martins Filho et al. (2003) estudaram a validação de alguns modelos, propostos na literatura, para a estimativa da erosão entressulcos de três Latossolos (dois Latossolos Vermelhos com textura argilosa, LVd1 e LVd2, e um Latossolo Vermelho muito argiloso, LVeF) da região de Jaboticabal - SP.

Valores dos fatores de erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) foram obtidos por diversos autores em estudos relacionados. Gonçalves (2008) realizou determinação dos fatores  $K_r$  e  $\tau_c$  e obteve valores de  $0,0268$  e  $0,0108 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  e  $0,495$  e  $3,841 \text{ Pa}$ , em um Argissolo Vermelho Amarelo e um Cambissolo Háplico Tb distrófico latossólico, respectivamente. Cantalice et al. (2005) obtiveram valores de  $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  para  $K_r$  e  $\tau_c$  de  $2,75 \text{ Pa}$ , em um Argissolo Vermelho distrófico típico. Schäffer et al. (2001) obtiveram valores de  $K_r$  de  $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  e  $\tau_c$  de  $2,61 \text{ Pa}$ , em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. Giasson & Cassol (1996) obtiveram valores de  $0,0077 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  para  $K_r$  e  $1,13 \text{ Pa}$  para  $\tau_c$ , em um Plintossolo franco-argilo-arenoso. Braida & Cassol (1996) obtiveram valores de  $0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  para  $K_r$  e  $4,81 \text{ Pa}$  para  $\tau_c$  em um Argissolo Vermelho Amarelo típico.

## **2.6 Taxas de erosão estimadas pelo método da redistribuição do “fallout” do $^{137}\text{Cs}$**

Este método de estimativa das taxas de erosão tem como base a análise da redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Cs}$ . A medição da radioatividade do  $^{137}\text{Cs}$  no solo, introduzido no meio ambiente pela queda de partículas (“fallout”) radioativas de explosões e acidentes nucleares, pode gerar informações relacionadas com a redistribuição (erosão e deposição) de sedimentos na paisagem.

O  $^{137}\text{Cs}$  é um radionuclídeo artificial introduzido no ambiente, principalmente pelos testes termonucleares de superfície realizados entre o início da década de 1950 até final da década de 1970. A aplicação do método de quantificação de perdas e deposição de sedimentos através da análise da redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Cs}$ , iniciada por Ritchie et al. (1974) vem sendo intensificada e aperfeiçoada nos últimos 10 anos.

As possíveis origens do  $^{137}\text{Cs}$  presente no ambiente são as seguintes: testes de bombas nucleares ocorridos entre 1950 e 1970 e o acidente ocorrido em Chernobyl em 1986. O  $^{137}\text{Cs}$  originado dos testes nucleares foi transportado para atmosfera, distribuído globalmente e posteriormente depositado na superfície através da precipitação pluvial (“fallout”). A variação temporal do “fallout” reflete a variação do  $^{137}\text{Cs}$  na atmosfera que, por sua vez, reflete a seqüência de testes nucleares.

Na maioria dos ambientes em que o  $^{137}\text{Cs}$  alcança o solo é fortemente adsorvido pelas argilas, tendo sua subsequente redistribuição lateral associada à erosão, transporte e deposição do solo devido à chuva e ao vento. Por outro lado, apresenta uma baixa taxa de migração vertical em solos não perturbados após o “fallout”. O  $^{137}\text{Cs}$  depositado por “fallout” encontra-se, principalmente, nas camadas superficiais do solo (Andrello et al., 2006; Gerzabek, 1990).

A avaliação das perdas e ganhos de solo pelo método do  $^{137}\text{Cs}$  é comumente baseada na comparação com área de referência (inventários). Inventário é a determinação do total de  $^{137}\text{Cs}$  em um perfil de solo. Pontos individuais amostrados em um dado local e comparados com pontos de referência (áreas planas, cobertas por vegetação rasteira, não perturbadas).

Por ter a meia-vida relativamente longa por ser fortemente adsorvido pelas argilas e matéria orgânica quando em contato com o solo (Tamura, 1964), o  $^{137}\text{Cs}$  pode funcionar como marcador. O solo “marcado” com  $^{137}\text{Cs}$  quando é erodido caracteriza uma relação unívoca entre a perda (ou ganho) e a concentração de  $^{137}\text{Cs}$  presente nesse solo. A deposição de solo é caracterizada quando a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  de uma amostra é maior do que a atividade de referência de  $^{137}\text{Cs}$  e, quando essa atividade é menor, caracteriza-se a perda de solo. A atividade de referência do  $^{137}\text{Cs}$  é igual ao total de  $^{137}\text{Cs}$  depositado pelas precipitações radioativas, determinadas por meio de análise de uma amostra de solo coletada em área não perturbada, sem históricos de perda e/ou deposição de solo (Branca & Voltaggio, 1993; Lobb et al., 1995; Andrello et al., 2002).

Vários modelos empíricos e teóricos foram desenvolvidos, correlacionando a redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  na paisagem com a taxa de perda ou

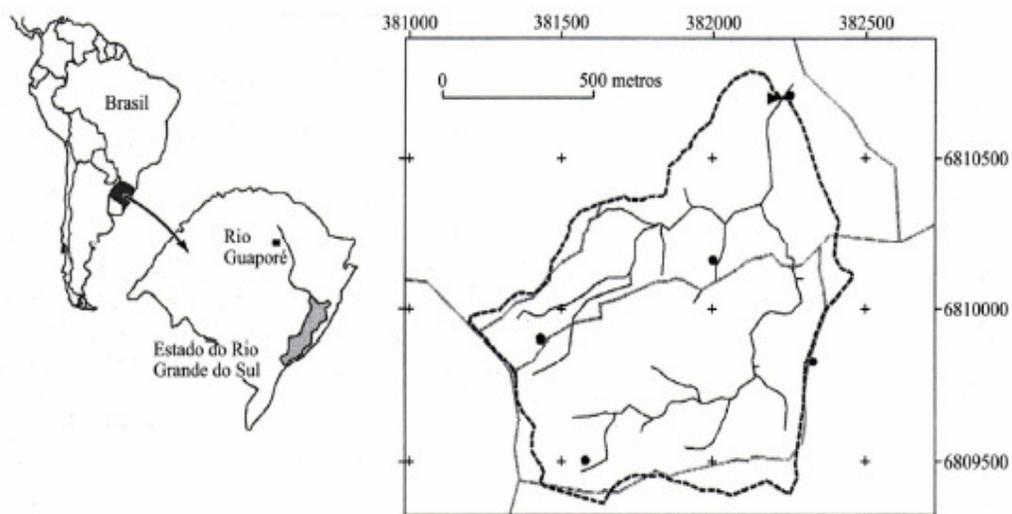
ganho de solo, para as condições edafoclimáticas e de teores de  $^{137}\text{Cs}$  do hemisfério norte, podem ser encontrados em Walling & Quine (1990).

No Brasil, dentre os trabalhos desenvolvidos podem-se destacar os realizados por Arthur (2010) que estudou a análise de redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Cs}$  na avaliação da erosão e deposição de sedimentos em sistemas de manejo de solo do cerrado e concluiu que os resultados obtidos através da técnica do  $^{137}\text{Cs}$  e da *EUPS* mostraram-se discrepantes em relação às taxas de erosão estimadas, que estão associados às diferentes limitações e características dos dois métodos. Andrello et al (2006) estudaram perfis de  $^{137}\text{Cs}$  em parcelas de erosão com diferentes cultivos e concluíram que o uso do  $^{137}\text{Cs}$  distribuído em profundidade e a redistribuição do  $^{137}\text{Cs}$  mostraram que o processo erosivo não tem ocorrência homogênea nas parcelas, com maior perda de solo ocorrendo no nível médio ou baixo dependendo do uso do solo. Correchel et al. (2005) estudaram a variabilidade espacial randômica e sistemática dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  de áreas de referência no sudoeste do Brasil e concluíram que houve algumas diferenças importantes no padrão da distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  em profundidade nos perfis de solo dos diferentes locais que, provavelmente, estão associadas às diferenças químicas, físicas, mineralógicas e biológicas dos solos estudados. Santos et al. (2005) estudaram modelos semi-empíricos para o método do  $^{137}\text{Cs}$  na determinação da erosão de um Latossolo Vermelho distroférrico e concluíram as taxas de erosão medidas para as parcelas do IAPAR pelo método convencional são maiores que as estimadas pelas duas equações parametrizadas para a bacia do rio Unida (de mesma classe de solo), pelo fato deste solo ser um local com vários tipos de culturas e, portanto, esta menos sujeito à erosão do que as parcelas (solo nu) com índices de erosão maiores. Andrello et al. (2004) determinaram a erosão do solo em uma bacia no norte do Paraná usando o  $^{137}\text{Cs}$  e concluíram que os pontos amostrados em pastagem e em cultura de soja apresentaram perdas de solo, e os pontos amostrados em plantação de café não apresentaram nem perda nem ganho de solo. Andrello et al. (2003) estudaram o uso do  $^{137}\text{Cs}$  para avaliar taxas de erosão em cultura de soja, café e pastagem concluíram que o uso do  $^{137}\text{Cs}$  apresenta-se como um método viável para a determinação de taxas de perdas e ganhos de solo por erosão hídrica.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

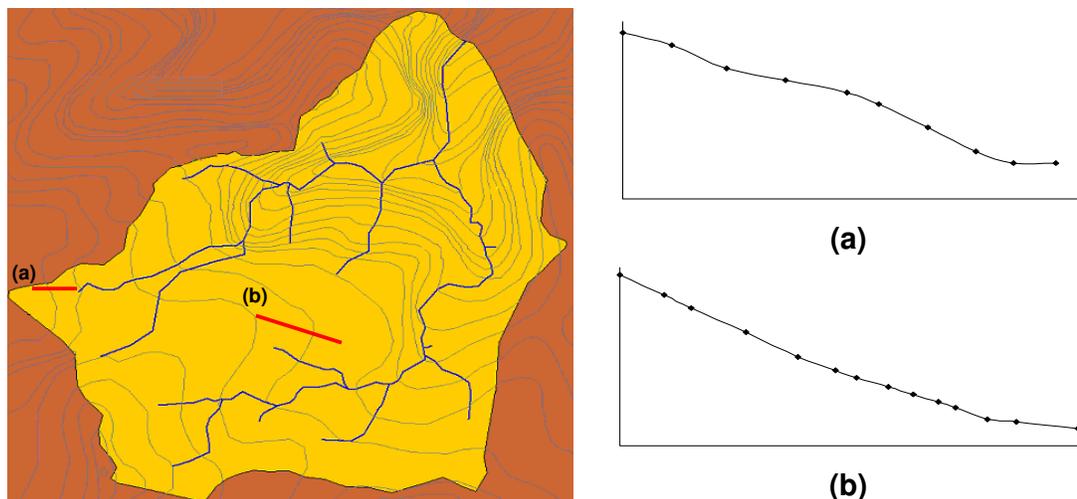
#### 3.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado em duas vertentes da bacia hidrográfica rural do Lajeado Ferreira, localizada na comunidade de Cândido Brum, município de Arvorezinha, região centro-norte do Estado do Rio Grande do Sul ( $28^{\circ} 52' S$  e  $52^{\circ} 05' W$ ), a cerca de 240 km de Porto Alegre-RS (Figura 2).



**Figura 2.** Localização da bacia hidrográfica do Lajeado Ferreira, Arvorezinha (RS) (Minella et al., 2007).

A localização das vertentes estudadas dentro da área da bacia e o perfil topográfico das mesmas são apresentadas na Figura 3.



**Figura 3.** Localização das vertentes na área da bacia hidrográfica e os respectivos perfis topográficos.

Aspectos gerais da paisagem onde se situam as vertentes são observados nas Figuras 4a e 4b.

As vertentes estudadas estão inseridas na bacia hidrográfica rural que possui área total de, aproximadamente, 1,19 km<sup>2</sup>, sendo instrumentada espacialmente por pluviômetros e pluviógrafo, calha *Parshall* de concreto (1,829 m na menor seção), linígrafo de pressão e amostradores de sedimentos (USDH48 e amostrador de nível ascendente). No ano de 2002 iniciou-se o monitoramento hidrossedimentológico na bacia de Arvorezinha. Desde então foram monitorados, intensivamente, os principais eventos de cheia, concentração de sedimentos em suspensão, bem como a variabilidade espacial e temporal do uso e manejo dos solos (Minella et al., 2009; Minella, 2007).

O clima da área onde se localiza a bacia, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical úmido com verões quentes, inverno com geadas freqüentes e precipitação média de 1600 mm, bem distribuída ao ano (Minella et al., 2007).

A geologia da região onde se localiza a bacia é caracterizada por derramamento basáltico, presença de diques de diabásio da Era Mesozóica, Períodos Cretáceo, Jurássico e Triássico, compondo o Grupo São Bento da Formação Serra Geral (UFRGS, 1980).



(a)



(b)

**Figura 4.** Aspectos gerais da paisagem das áreas agrícolas estudadas, compostas pelas vertentes (a) e (b), inseridas na bacia de Arvorezinha (Fotos: Minella, J.P.G.).

A área da bacia apresenta topografia acidentada, com riachos e rios de grande energia e pouca sinuosidade. O relevo é suave ondulado, com declividade média de  $0,07 \text{ m m}^{-1}$ , vertentes curtas e vales encaixados (Minella et al., 2008; Minella et al., 2007). A densidade de drenagem na bacia é de, aproximadamente,  $2,395 \text{ km km}^{-2}$ . Segundo classificação de Strahler, a bacia tem hierarquia de segunda ordem e suas águas drenam para o Lajeado Ferreira, afluente do Rio Guaporé que compõe o sistema Taquari-Antas, sendo que este é afluente do rio Jacuí, principal rio da bacia da Região Hidrográfica do Atlântico Sul (Brasil, 2003).

O solo é utilizado para atividades agrícolas, entre as quais se destaca o cultivo do fumo (*Nicotiana tabacum*). O sistema de cultivo consistia de cultivo tradicional com utilização de áreas para o plantio do fumo durante o verão e abandono durante o inverno, surgindo então vegetação espontânea sobre as áreas. A partir de 1998, o Serviço de Extensão Rural do Rio Grande do Sul – EMATER/RS iniciou na bacia um intenso programa de divulgação da utilização de plantas de cobertura no inverno. Sendo assim, as áreas passaram a receber planta de cobertura no inverno como aveia, aveia + ervilhaca ou aveia + nabo forrageiro (Mello, 2006).

Além das áreas de cultivo a bacia apresenta áreas de pastagem natural, pousio e floresta Ombrófila Mista (*Araucária angustifolia* e arbustos arborescentes) (Fundação, 2008).

Os usos atuais encontrados na área da bacia compõem-se de áreas agrícolas: lavouras anuais em sistema de cultivo mínimo, agrícolas com lavouras anuais em sistema tradicional, pastagem perene, mata, capoeira, reflorestamento com eucalipto e estradas.

O levantamento dos tipos de solo na bacia de Arvorezinha foi realizado pela EMATER de Porto Alegre (EMATER, 2002). O tipo de levantamento foi semidetalhado, as unidades de mapeamento foram associações e unidades simples constituídas de classes de solos.

Os solos presentes foram classificados como Argissolos, Cambissolos e Neossolos (EMBRAPA, 2006). No terço superior da bacia, a área apresenta topografia plana, pedregosidade moderada e solos com perfis profundos com presença de horizonte B textural, classificados como Argissolos Vermelhos. No restante da área, a topografia é acidentada, com pedregosidade

moderada a forte e solo pouco profundo, ocorrendo no terço inferior associações entre Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos. Na transição entre o terço superior e inferior da bacia, encontram-se associações entre Argissolos, Neossolos e Cambissolos.

### **3.2 Caracterização dos solos das vertentes estudadas**

Nas vertentes selecionadas, o solo predominante é classificado como Argissolo, conforme distribuição e unidades dos solos da bacia de Arvorezinha (Apêndice 1).

Inicialmente realizou-se uma caracterização do solo das vertentes do estudo. Foram realizadas análises granulométrica, química e de distribuição de diâmetro e estabilidade de agregados. Posteriormente, foram realizados trabalhos experimentais sob condições de campo e laboratório para obtenção dos dados requeridos pelo componente solo do modelo *WEPP*.

#### **3.2.1 Granulometria, distribuição de diâmetro e estabilidade de agregados e algumas características químicas dos solos das vertentes estudadas**

Foram coletadas amostras simples de solo distribuídos nas áreas selecionadas, as quais foram colocadas em recipientes plásticos, homogeneizadas e separadas amostras composta de solo representativa de cada vertente. A profundidade de coleta em cada ponto de amostragem foi de 0 a 20 cm. Posteriormente as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm, para caracterização granulométrica e química dos solos (Tabelas 4 e 5).

A análise granulométrica do solo foi realizada pela distribuição de diâmetro de partículas primárias, conforme o método da pipeta (EMBRAPA, 1997), usando hidróxido de sódio (NaOH – 1N) como agente dispersante mais agitação mecânica (Tabela 4). Para a determinação da argila dispersa em água foi utilizado o mesmo procedimento da determinação da argila total, porém, sem o uso do dispersante químico. A partir dos dados foi possível calcular o grau de floculação, obtido da seguinte forma:

$$GF = \frac{Arg - Arg_{H_2O}}{Arg} \times 100 \quad (18)$$

onde GF é o grau de floculação (%), Arg é a fração de argila dispersa em hidróxido de sódio – NaOH ( $g\ kg^{-1}$ ), e  $Arg_{H_2O}$  é a fração da argila dispersa em água ( $g\ kg^{-1}$ ).

**Tabela 4.** Caracterização granulométrica dos solos na profundidade de 0 a 20 cm das vertentes estudadas

Vertente	Distribuição de Tamanho de Partícula <sup>(1)</sup>								ADA <sup>(2)</sup>	GF <sup>(3)</sup>
	AMG	AG	AM	AF	AMF	AT	Silte	Argila		
	----- g kg <sup>-1</sup> -----								g kg <sup>-1</sup>	%
V-01	48	33	19	34	38	172	465	363	227	37
V-02	15	17	27	128	105	292	418	290	141	51

<sup>(1)</sup> Distribuição de partícula obtida por meio de dispersão química (NaOH) 1N e agitação mecânica; <sup>(2)</sup> Frações granulométricas incluindo a areia muito grossa (AMG : 2-1 mm), grossa (AG : 1-0,5 mm), média (AM : 0,5-0,25 mm), fina (AF : 0,25-0,10 mm), muito fina (AMF : 0,10-0,05 mm), total (AT : 2-0,05 mm), silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm), conforme Sistema de Classificação Norte-Americano (USDA); <sup>(3)</sup> Argila dispersa em água; <sup>(3)</sup> Grau de Floculação.

Para caracterização química do solo (Tabela 5) foram determinados pH (H<sub>2</sub>O); índice SMP; P; K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> trocáveis; M.O.; CTC; porcentagem de saturação da CTC e algumas relações que foram estabelecidas, conforme Tedesco et al. (1995).

**Tabela 5.** Caracterização química dos solos na profundidade de 0 a 20 cm das vertentes estudadas.

Vertente	pH	Índice	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup>	M.O.
	H <sub>2</sub> O	SMP	mg kg <sup>-1</sup>		----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----				g kg <sup>-1</sup>
V-01	5,6	6,0	5,4	277	10,2	3,4	0,0	4,4	50
V-02	5,5	5,9	3,6	290	5,4	2,5	0,0	4,9	23
	CTC <sup>(1)</sup>		% Sat da CTC <sup>(1)</sup>		Relações				
	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		Bases	Al	Ca/Mg		Ca/K	Mg/K	
V-01	18,8		76	0,0	3,0		14,0	4,8	
V-02	13,6		64	0,0	2,2		7,0	3,4	

<sup>(1)</sup> Capacidade de troca de cátions.

Adicionalmente foram coletadas amostras de solo, a uma profundidade de 0-20 cm. Após secagem ao ar, foram destorroadas e peneiradas em malha de 10 mm de diâmetro, a fim de determinar a estabilidade de agregados.

A classificação por tamanho e a estabilidade dos agregados a úmido foi determinada com base na metodologia descrita por Kemper & Chepil (1965) e, posteriormente, modificada por Tisdall & Oades (1979). Utilizando um aparelho de oscilação vertical semelhante ao de Yoder (1936), os agregados foram separados nas seguintes classes, com base no seu diâmetro: 10,0-4,76; 4,76-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,50 e 0,50-0,25; 0,25-0,105; 0,105-0,053 e <0,053 mm. O mesmo procedimento e os mesmos tamanhos de peneira foram usados na análise da distribuição de tamanho de agregados do solo a seco, realizado utilizando o aparelho Produtest (Soil Test) com tempo de oscilação do conjunto de peneiras de 1 minuto.

Com os valores de DMP a úmido e a seco, foi calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA) (Tabela 6).

**Tabela 6.** Diâmetro médio ponderado de agregados do solo a úmido e a seco e índice de estabilidade de agregados dos solos nas vertentes estudadas.

Vertente	DMP <sub>u</sub> <sup>(1)</sup>	DMP <sub>s</sub> <sup>(2)</sup>	IEA <sup>(3)</sup>
	----- mm -----		
V-01	4,9	5,4	0,9
V-02	5,4	6,0	0,9

<sup>(1)</sup> Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo a úmido; <sup>(2)</sup> Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo a seco; <sup>(3)</sup> Índice de estabilidade de agregados.

### 3.3 Experimentos para determinação de parâmetros de entrada da componente solo do modelo WEPP

Simulações realizadas com o modelo *WEPP* necessitam da elaboração de arquivos de entrada de dados para as componentes de solo, clima, topográfico, uso e manejo do solo. Esses arquivos foram montados por meio de informações locais e por meio da realização de estudos visando à determinação dos principais parâmetros de entrada no modelo.

### 3.3.1 Componente solo do modelo *WEPP*

Trabalhos experimentais sob condição de campo e laboratório foram realizados para obtenção dos dados requeridos pelo arquivo de solos do modelo *WEPP*. Os parâmetros de erodibilidade do solo em entressulcos (fator  $K_i$ ), erodibilidade do solo em sulcos (fator  $K_r$ ), tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) foram determinados sob condição experimental de campo e de laboratório. Albedo, bem como informações processadas em laboratório referente à porcentagem de argila e areia, percentual de matéria orgânica e capacidade de troca de cátions também foram determinadas. Na Figura 5 encontra-se uma representação de como tais informações são organizadas no arquivo da componente solo para realizar as simulações com o modelo *WEPP*.

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/10)	Rock(%)
1	254	27.4	11.5	3.000	9.9	2.5
2	1143	34.7	17.0	1.000	6.8	2.9
3	1727	39.8	17.0	0.330	6.8	34.1
4						
5						
6						
7						
8						
9						

**Figura 5.** Representação do layout do programa computacional para o componente solo do modelo *WEPP*.

#### 3.3.1.1 Erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ )

O estudo sobre erosão do solo em entressulcos foi realizado em condições experimentais de campo e de laboratório. A primeira parte do estudo foi realizada na bacia rural instrumentada de Arvorezinha. Enquanto a segunda

parte foi realizada no Laboratório de Erosão do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A determinação da erodibilidade do solo em entressulcos sob condição de campo com aplicação de chuva simulada pode se tornar dispendiosa e demandar tempo e recurso e no laboratório as dificuldades são menores, razão da realização nas duas condições determinadas, principalmente visando futuros trabalhos de pesquisa.

### **3.3.1.1.1 Instalação e realização dos experimentos**

Em ambas as condições, os experimentos foram conduzidos com solo descoberto. No de campo o solo foi mobilizado manualmente simulando uma condição de preparo convencional. Para o experimento de laboratório, amostras de solo foram coletadas a campo na camada superficial de 0-20 cm de profundidade. As amostras de solo foram destorroadas e passadas em peneiras com malha de 10 mm de diâmetro e, posteriormente secas ao ar.

As parcelas de erosão, na condição campo, foram delimitadas por chapas metálicas galvanizadas cravadas ao solo nas laterais e na parte superior. Na parte inferior da parcela era acoplada uma calha coletora para a amostragem da enxurrada (Figura 6a). As dimensões da parcela foram de 0,50 m de largura por 0,75 m de comprimento, com a maior dimensão no sentido do declive (Elliot et al., 1989). A declividade média das parcelas era de  $0,13 \text{ m m}^{-1}$ .

No laboratório, as parcelas experimentais foram construídas com acrílico (policarbonato) e montadas sobre uma estrutura metálica. Possuem área útil de  $0,3481 \text{ m}^2$ , com dimensões de 0,59 m por 0,59 m e profundidade de 10 cm, havendo uma bordadura lateral de 20 cm de largura. O volume da parcela experimental foi preenchido com uma camada de 3 cm de espessura de brita, sobre a qual foi colocada uma camada de 1 cm de areia de diâmetro de 0,105 mm e, sobre essas duas, uma tela de plástico com malha de 1 mm, sobre a qual colocou-se uma camada de solo com 6 cm de espessura, para uma densidade de empacotamento (Dep) de  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  (Figura 6b). Posteriormente, já nas parcelas, foram saturadas com antecedência de 24 horas, mediante um conjunto de mangueiras acopladas no fundo da parcela e conectadas a um

reservatório de água posicionado a uma altura levemente superior ao topo da parcela experimental. Ao iniciar os testes com chuva, aplicou-se uma tensão de água equivalente a 15 cm de coluna d'água (centímetros de coluna d'água - cca), a qual foi mantida ao longo do experimento. A declividade das parcelas experimentais foi de  $0,10 \text{ m m}^{-1}$ .



**Figura 6.** Parcelas de erosão do solo em entressulcos, sob condições experimentais de campo (a) e laboratório (b).

#### **3.3.1.1.2 Aplicação das chuvas simuladas**

O teste a campo consistiu da aplicação de chuva simulada com duração de 150 minutos, utilizando um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes, modelo desenvolvido no National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS, West Lafayette, IN, USA (Norton & Brown, 1992) e pertencente ao Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (RS). O simulador foi instalado a uma altura de 2,40 m da superfície do solo e a pressão de saída da água dos bicos aspersor tipo *Vee-Jet* 80100 foi mantida em 41 kPa (Figura 7). A intensidade média da chuva aplicada foi programada para  $70 \text{ mm h}^{-1}$ , ajustada por um programa computacional de controle de simulação denominado Simula (USDA-NSERL, v. 95.4). A campo foram realizadas três repetições experimentais.



**Figura 7.** Aplicação de chuva simulada em parcelas de erosão do solo em entressulcos sob condição experimental de campo, utilizando um simulador de chuva.

As chuvas simuladas em laboratório foram efetuadas utilizando-se simulador de chuvas construído por Souza (1985), semelhante ao descrito por Meyer & Harmon (1979), com um bico aspersor tipo *Vee-Jet* 80150 e diâmetro interno de 12,7 mm situado a 3,1 m acima da superfície do solo, operando com uma pressão constante de 41 kPa na saída de água do bico. Os testes consistiram de aplicação de chuva simulada com intensidade média ajustada em  $85 \text{ mm h}^{-1}$  durante 75 minutos. Em laboratório foram realizadas quatro repetições experimentais.

### 3.3.1.1.3 Determinação das perdas de solo e água

Amostras do escoamento superficial eram coletadas durante um minuto a cada três minutos de chuva, tanto a campo quanto em laboratório. As taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos foram obtidas pela pesagem do material coletado nos potes plásticos com capacidade de 920 mL, colocados na extremidade da calha coletora.

As amostras de enxurrada coletadas nas duas condições foram levadas ao laboratório, onde os potes com solo e água foram pesados. Em seguida, foram adicionados 5 mL de sulfato de alumínio e potássio dodeca hidratado  $[\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$  a 5% para acelerar o processo de sedimentação. Os potes permaneceram em repouso por 24 horas e com auxílio de uma

mangueira plástica, retirou-se por sifonamento o máximo possível de água sobrenadante. Posteriormente, os potes foram secos em estufa a uma temperatura média de 50 a 60 °C até peso constante. Em seguida os potes foram pesados com e sem o solo seco. A massa de água foi calculada, subtraindo-se a massa de solo perdida da massa total da enxurrada. A relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água-sedimento expressa a concentração de sedimentos em peso ( $\text{kg kg}^{-1}$ ). A relação entre a massa de água e a massa da mistura água-sedimento expressa a concentração de água na amostra, em  $\text{kg kg}^{-1}$ , tendo-se admitido a mesma expressa com base em volume, dado por  $\text{L L}^{-1}$ .

#### **3.3.1.1.4 Cálculo da taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos**

As taxas de desagregação do solo em entressulcos foram determinadas para cada intervalo de amostragem através da divisão da massa de solo desagregado na unidade de tempo, pela área da parcela, sendo, portanto, expressa em  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

As perdas totais de solo em entressulcos foram obtidas pela expressão:

$$PSi = \frac{\Sigma(Q C t)}{A} \quad (19)$$

onde PSi é a perda total de solo em entressulcos ( $\text{kg m}^{-2}$ ); Q é a descarga total ( $\text{L s}^{-1}$ ); C é a concentração de sedimentos na enxurrada ( $\text{kg L}^{-1}$ ); t é o intervalo de tempo entre duas amostragens (s); A é a área da parcela ( $\text{m}^2$ ).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos foram determinadas conforme a expressão a seguir:

$$D_i = \frac{M_{ss}}{A d_c} \quad (20)$$

onde  $D_i$  é a taxa de desagregação do solo em entressulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $M_{ss}$  é a massa do solo seco desagregado (kg); A é a área da parcela ( $\text{m}^2$ );  $d_c$  é a duração da coleta (s).

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos, para cada condição, cujo já expressa nas equações 5 e 6, foi calculado pelas equações (Elliot et al., 1989):

$$K_i = \frac{D_i}{I q_i S_f} \quad (\text{Campo}) \quad (21)$$

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad (\text{Laboratório}) \quad (22)$$

onde  $K_i$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $\text{kg s m}^{-4}$ );  $D_i$  é a taxa máxima de desagregação do solo nos entressulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), considerado o valor médio dos cinco últimos pontos de amostragem;  $I$  é a intensidade da chuva ( $\text{m s}^{-1}$ );  $q_i$  é a descarga líquida do escoamento superficial ( $\text{m s}^{-1}$ ), e  $S_f$ , o fator de ajuste para o declive.

No presente estudo foi utilizada a equação (21), condição de campo, para determinação do fator  $K_i$ , devido à elevada taxa de infiltração e pouco escoamento superficial, com tendência de uma taxa constante de escoamento superficial bem inferior à taxa da chuva.

Para condições de solos com baixa taxa de infiltração e alta susceptibilidade à formação de escoamento superficial, a determinação do fator  $K_i$  leva em conta a intensidade da chuva ao quadrado, tendo em vista que a descarga unitária do escoamento superficial alcança valores muito próximos à taxa de precipitação. Nesta situação foi utilizada a equação (22) para determinação do fator  $K_i$  condição de laboratório.

O fator de ajuste para o declive é dado pela equação (Liebenow et al., 1990):

$$S_f = 1,05 - 0,85 \exp^{-4\text{sen}(\theta)} \quad (23)$$

onde  $\theta$  é o ângulo do declive (graus) e  $e$  é a base dos logaritmos neperianos. Este fator  $S_f$  é 0,2 para declive plano e 1 para declive de  $45^\circ$ .

### **3.3.1.1.5 Estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos por equação da rotina interna do modelo WEPP**

A estimativa do valor do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) foi também realizada utilizando equação de regressão da rotina interna do modelo *WEPP* (Flanagan & Nearing, 1995), considerando superfícies de solos cultivados contendo menos de 30 % de areia (Tabela 4). A equação base usada para estimativa do  $K_i$  é dada por (Alberts et al., 1995):

$$K_{ib} = 6054000 - 5513000 \text{ arg} \quad (24)$$

onde  $\text{arg}$  é a fração de argila do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

Essa expressão é componente da rotina interna do modelo *WEPP* e empregada nas simulações sempre que o usuário não informa o valor do fator  $K_i$  para o solo do local.

### 3.3.1.1.6 Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos

A descarga líquida ( $q_i$ ), em  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ , foi determinada a partir das coletas de enxurrada em potes plásticos, colocados na extremidade da calha de descarga, durante o tempo cronometrado, e dividido pela largura da parcela.

A velocidade superficial do escoamento ( $V_s$ ), foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para que um corante, azul de metileno, percorresse a distância entre dois pontos fixos na parcela (Figura 8). Essas determinações foram realizadas em intervalos de cinco minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento. As velocidades médias do escoamento ( $V_m$ ) foram determinadas pelo produto das velocidades superficiais do escoamento e um fator de correção  $\alpha = 2/3$ , tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade (Katz et al., 1995).



**Figura 8.** Medição da velocidade superficial do escoamento.

Com base na determinação da descarga líquida ( $q_i$ ) e da velocidade média do escoamento ( $V_m$ ) foram estimadas outras características hidráulicas.

A altura da lâmina do escoamento foi estimada através da equação derivada por Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para fluxo em um plano sob chuva de duração finita e dada pela seguinte expressão:

$$h = \frac{q_i}{V_m} \quad (25)$$

onde  $h$  é a altura da lâmina de escoamento (m);  $q_i$  é a descarga líquida total por unidade de largura ( $m^2 s^{-1}$ ) e  $V_m$  é a velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ ).

O número de Reynolds foi obtido por meio da equação de Simons & Senturk (1992) e dada por:

$$Re = \frac{V_m h}{\nu} \quad (26)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds, adimensional;  $V_m$  é a velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ );  $h$  é a altura da lâmina de escoamento (m) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água ( $m^2 s^{-1}$ ). A viscosidade cinemática do escoamento varia em função da temperatura. O valor foi obtido com a utilização da equação de Julien (1995), que é expressa conforme a temperatura da água, dada por:

$$\nu = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \cdot 10^{-6} \quad (27)$$

onde  $T$  é a temperatura da água em  $^{\circ}C$ .

O número de Froude foi obtido por meio da equação apresentada por Simons & Senturk (1992) e expressa por:

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g h}} \quad (28)$$

onde  $Fr$  é o número de Froude, adimensional;  $V_m$  é a velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ ); e  $h$  é a altura da lâmina de escoamento (m).

A resistência ao escoamento foi determinada pelo fator de perda de carga de Darcy-Weisbach (Chow, 1959) e dada pela expressão:

$$f = \frac{8 g h S}{V_m^2} \quad (29)$$

onde  $f$  é o fator de perda de carga, adimensional;  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ );  $h$  é a altura da lâmina do escoamento (m);  $S$  é a inclinação do declive ( $m m^{-1}$ ); e  $V_m$  é a velocidade do escoamento ( $m s^{-1}$ ).

A rugosidade superficial foi determinada pelo coeficiente de Manning (n) o qual, conforme Braida & Cassol (1999), pode ser expresso por:

$$n = \frac{h^{5/3} S^{1/2}}{q_i} \quad (30)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning ( $s \text{ m}^{-1/3}$ ); h é a altura da lâmina de escoamento (m);  $q_i$  é a descarga líquida ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ); S é o declive da parcela ( $\text{m m}^{-1}$ ).

A tensão cisalhante do escoamento em entressulcos foi obtida por meio da equação dada por Chow (1959):

$$\tau = \gamma h S \quad (31)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento do escoamento (Pa);  $\gamma$  é o peso específico da água ( $\text{N m}^{-3}$ ); h é a altura da lâmina de escoamento (m); e S é a declividade da parcela ( $\text{m m}^{-1}$ ).

### **3.3.1.2 Erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ) do escoamento**

O experimento de erosão do solo em sulcos foi realizado em condição de campo na bacia rural de Arvorezinha.

#### **3.3.1.2.1 Instalação e realização do experimento**

Parcelas experimentais de 0,7 m de largura e 7 m de comprimento foram instaladas, com seção transversal triangular com 0,04 m de altura, tendo inclinação lateral de aproximadamente 9:1. A maior dimensão da parcela esteve orientada no sentido do declive do terreno que era de  $0,14 \text{ m m}^{-1}$ . As parcelas foram delimitadas superior e lateralmente pela colocação de chapas metálicas e, na parte inferior, uma calha coletora foi acoplada para a amostragem da enxurrada (Figura 9). À calha coletora era ajustado um cano de PVC de 1,5 m de comprimento que conduzia a descarga até o ponto de coleta.



**Figura 9.** Parcelas de erosão do solo em sulcos sob condição experimental de campo.

#### 3.3.1.2.2 Aplicação de chuva simulada e fluxo extra

Os testes consistiram da aplicação de chuva simulada com intensidade programada de  $70 \text{ mm h}^{-1}$ , com duração de 75 minutos sendo que nos últimos 15 minutos também foram aplicados fluxos extras aos sulcos. Utilizou-se um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes, o qual foi instalado a uma altura de 2,40 m da superfície do solo e a pressão de saída da água dos bicos *Vee-Jet* 80100 foi mantida em 41 kPa (Figura 10a) (Norton & Brown, 1992) e pertencente ao Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (RS). A intensidade média da chuva aplicada foi ajustada por um programa computacional de controle de simulação denominado Simula (USDA-NSERL, v. 95.4)

Os tratamentos de fluxo extras foram aplicados nos 15 minutos finais, ainda sob a chuva, sendo feitos em seqüência crescente aplicados num mesmo sulco, cada vazão com duração de 3 minutos. Foram adicionados vazões de 10, 20, 30, 40 e  $50 \text{ L min}^{-1}$  nos sulcos pré-formados com solo recém preparado. Medidores de fluxo (fluxômetros) calibrados foram utilizados para aplicação dos fluxos extras (Figura 10b). Durante a fase de aplicação de fluxo extras, cada sulco recebeu a vazão adicionada de fluxo extra mais  $6 \text{ L min}^{-1}$ , vazão essa originada da chuva simulada.



**Figura 10.** Aplicação de chuva simulada (a) e fluxos extras (b) em parcelas de erosão do solo em sulcos.

### 3.3.1.2.3 Determinação das taxas de desagregação e da erodibilidade do solo em sulcos

As taxas de desagregação do solo nos sulcos foram obtidas a partir da coleta da enxurrada em potes de 920 mL colocados na extremidade final do tubo de PVC conectado a calha de descarga. As coletas eram efetuadas em intervalos de 3 em 3 minutos até os 60 minutos de teste e de 1 em 1 minuto dos 60 aos 75 minutos de teste. Aos potes plásticos, após pesagem, foram adicionados 5 mL de sulfato de alumínio e potássio dodeca hidratado  $[KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O]$  a 5% para acelerar o processo de sedimentação. Após 24 horas, o sobrenadante foi succionado e os potes foram secos em estufa a uma temperatura média de 50 a 60°C, até peso constante. Em seguida, os potes foram pesados com e sem o solo seco. A partir da massa de solo seco e da duração das coletas foram determinadas às taxas de descarga sólida, em  $kg\ s^{-1}$ . Com base nessas amostras também se determinava a descarga total e a concentração de solo e água em cada ponto de coleta.

As taxas de desagregação de solo nos sulcos foram obtidas pela seguinte relação:

$$D_r = \frac{Q C}{L P_m} \quad (32)$$

onde  $D_r$  é a taxa de desagregação do solo em sulcos ( $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ );  $Q$  é a descarga total com base em massa ( $kg\ s^{-1}$ );  $C$  é a concentração de sedimento

na amostra ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $L$  é o comprimento do sulco (m); e  $P_m$  é o perímetro molhado (m), obtido por meio de um perfilômetro de varetas.

A erodibilidade do solo em sulcos foi determinada através da análise de regressão linear com os valores médios de tensão cisalhante ( $\tau$ ) e de desagregação do solo ( $D_r$ ) obtidos para cada vazão aplicada, conforme o modelo de predição de erosão *WEPP* (Flanagan & Nearing, 1995), cuja relação já expressa na equação 9, é a seguinte:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (33)$$

onde  $D_r$  é a taxa de desagregação de solo pelo escoamento concentrado em sulcos ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $K_r$  é o fator de erodibilidade do solo em sulcos ( $\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $\tau_c$  é a tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa);  $\tau$  é a tensão cisalhante média do escoamento (Pa), que é dada pela expressão:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (34)$$

onde  $\gamma$  é o peso específico da água ( $\text{N m}^{-3}$ );  $R_h$  é o raio hidráulico do escoamento em sulco (m); e  $S$  a declividade do sulco ( $\text{m m}^{-1}$ ).

O fator de erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) consiste no coeficiente angular  $b$  da reta de ajuste das relações entre  $\tau$  (tensão de cisalhamento do escoamento) e  $D_r$  (taxas de desagregação em sulcos). A tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) corresponde ao valor do intercepto de  $\tau$ , quando  $D_r = 0$ , ou a partir da relação dos coeficientes da reta:  $\tau_c = -a/b$  (Lafren & Thomas, 1987), obtida por meio de regressão com ajuste linear.

### **3.3.1.2.4 Estimativa do fator de erodibilidade do solo em sulcos e da tensão crítica de cisalhamento pelas equações da rotina interna do modelo *WEPP***

A estimativa dos valores de  $K_r$  e  $\tau_c$  foi também realizada utilizando as equações de regressão do modelo *WEPP* (Flanagan & Nearing, 1995), considerando superfícies de solos cultivados contendo menos de 30 % de areia (Tabela 4). As equações base usadas para estimativa da erodibilidade em sulcos e tensão crítica de cisalhamento são dadas, segundo Alberts et al. (1995), da seguinte forma:

$$K_{rb} = 0,0069 + 0,134 e^{-20 \text{ arg}} \quad (35)$$

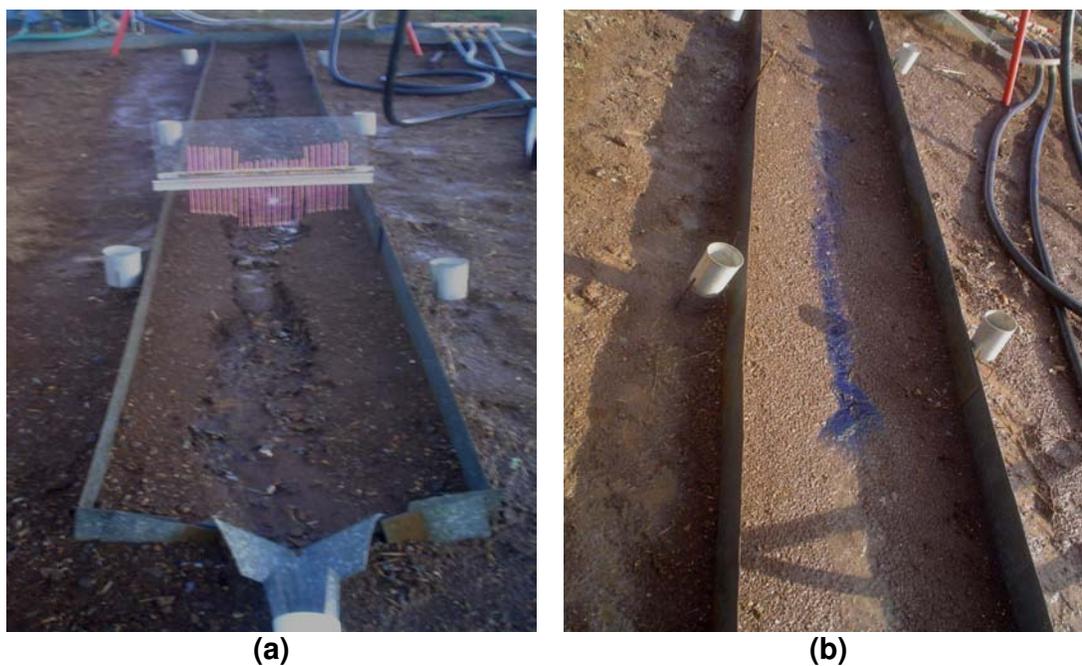
$$\tau_{cb} = 3,5 \quad (36)$$

onde  $\text{arg}$  é a fração de argila do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

Essas expressões fazem parte da rotina interna do modelo *WEPP* e são utilizadas nas simulações sempre que o usuário não fornece os valores obtidos experimentalmente no local.

### 3.3.1.2.5 Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos

As dimensões das seções transversais do fluxo nos sulcos foram realizadas objetivando-se a determinação da área, perímetro molhado, raio hidráulico e altura da lâmina de escoamento. Para tanto foi utilizado um perfilômetro com base em acrílico e varetas de agulha de tricot (Figura 11a).



**Figura 11.** Medições das dimensões da seção transversal do sulco (a) e da velocidade do escoamento (b) em parcelas de erosão do solo em sulcos.

As medições foram realizadas em três momentos: a) antes da realização do teste, de forma a obter uma caracterização inicial do sulco; b) aos 55 min do início da chuva, com o escoamento ocasionado pela chuva já estabilizado; e c) a cada fluxo extra adicionado. As medidas foram realizadas a distância de 1,5 e 5,5 m da cabeceira dos sulcos. A cada medição, as formas da seção transversal dos sulcos foram retratadas em folhas de cartolinas colocadas entre

as hastes e a lâmina de acrílico do perfilômetro. A partir da conformação dos sulcos nas cartolinas, foi utilizado planímetro e curvímetro para determinar a área e perímetro molhado do escoamento. Desta forma, foi determinado o raio hidráulico dos sulcos pela seguinte relação:

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (37)$$

onde  $R_h$  é o raio hidráulico da seção transversal (m),  $A$  é a área da seção transversal ( $m^2$ ) e  $P_m$  é o perímetro molhado da seção transversal (m).

A declividade dos sulcos foi considerada o declive referente ao fundo do sulco e expressa em  $m\ m^{-1}$ . Para o tipo de escoamento em pequenos sulcos, admite-se que a declividade da linha d'água não difere da declividade do fundo do sulco.

A velocidade superficial do escoamento ( $V_s$ ) foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para que um corante, azul de metileno, percorresse a distância dos 4 m centrais dos sulcos (Figura 11b). Esses valores de velocidade superficial medidos foram multiplicados por um fator de ajuste ( $\alpha = 2/3$ ), tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade nos sulcos e com isso obter a velocidade média do escoamento ( $V_m$ ) (Katz et al., 1995).

Com as características hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados que foram medidas foi possível determinar algumas outras características hidráulicas. Assim foi avaliado o número de Reynolds ( $Re$ ), número de Froude ( $Fr$ ), rugosidade hidráulica ( $n$ ) e a velocidade de cisalhamento ( $u_*$ ).

O número de Reynolds foi determinado de acordo com a relação dada por Simons & Senturk (1992) pela expressão:

$$Re = \frac{V_m R_h}{\nu} \quad (38)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds (adimensional);  $V_m$  é a velocidade média do escoamento ( $m\ s^{-1}$ );  $R_h$  é o raio hidráulico (m); e  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água ( $m^2\ s^{-1}$ ). Como a viscosidade cinemática varia conforme a temperatura, determinou-se a temperatura da água em  $^{\circ}C$  em cada teste. A viscosidade cinemática ( $\nu$ ) da água foi determinada de acordo com a temperatura ( $T$ , em  $^{\circ}C$ ), conforme a expressão de Julien (1995) já apresentada na equação (27) e dada por:

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \cdot 10^{-6} \quad (39)$$

O número de Froude foi obtido pela expressão de Simons & Senturk (1992) dada por:

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g R_h}} \quad (40)$$

onde Fr é o número de Froude, adimensional;  $V_m$  é a velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ ) e  $R_h$  é o raio hidráulico (m).

A rugosidade hidráulica da superfície foi determinada pelo coeficiente de Manning (n) conforme apresentado por Cantalice et al. (2005) e dada pela expressão:

$$n = \frac{R_h^{2/3} S^{1/2}}{V_m} \quad (41)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning ( $s m^{-1/3}$ );  $R_h$  é o raio hidráulico (m); S é a declividade do sulco ( $m m^{-1}$ );  $V_m$  é a velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ ).

A velocidade de cisalhamento ( $u_*$ ) foi determinada de acordo com Simons & Senturk (1992) pela expressão:

$$u_* = \sqrt{g R_h S} \quad (42)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ );  $R_h$  é o raio hidráulico (m); S é a declividade do sulco ( $m m^{-1}$ ).

A resistência ao escoamento foi determinada pelo fator de perda de carga de Darcy-Weisbach (Chow, 1959) e dada pela expressão:

$$f = \frac{8 g R_h S}{V_m^2} \quad (43)$$

onde  $f$  é o fator de perda de carga, adimensional;  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ );  $R_h$  é o raio hidráulico (m); S é a inclinação do declive ( $m m^{-1}$ ); e  $V_m$  é a velocidade do escoamento ( $m s^{-1}$ ).

### 3.3.1.3 Albedo

Denomina-se albedo o poder refletor de uma superfície e é definido como a fração de energia solar refletida pela superfície, em relação à recebida.

O albedo depende do tipo de superfície (topografia, coloração, rugosidade etc.). Para a superfície da Terra, o albedo médio apresenta os seguintes valores (Tabela 7):

**Tabela 7.** Albedo médio para radiação solar global de algumas superfícies (Reichardt & Timm, 2004).

Material	Albedo
Pedras	0,15-0,25
Solo cultivado	0,07-0,14
Florestas	0,06-0,20
Areia clara	0,25-0,45
Cultura	0,12-0,25

Este parâmetro foi estimado com base na equação apresentada no National Soil Survey Handbook (NSSH) do United States Department of Agriculture (USDA), a qual considera a cor do solo (Carta de Munsell) determinante na definição do albedo, podendo assim, se observar:

$$\text{Albedo} = 0,069 \times (\text{valor da cor}) - 0,114 \quad (44)$$

onde o valor da cor corresponde ao parâmetro de luminosidade no código de cor proposto por Munsell.

### 3.3.1.4 Condutividade hidráulica saturada do solo

Essa propriedade representa o volume de um fluido que passa por um corpo sólido em um determinado tempo (Libardi, 2000). No caso do sistema solo, o fluido é a solução – tratada aqui simplesmente como água do solo – e o corpo sólido são as partículas minerais e orgânicas. Neste sentido, uma vez alterada a distribuição e o arranjo dos poros do solo, as propriedades de condutividade hidráulica também variam (Bagarello, 1997).

A infiltração de água no solo deve ser determinada por métodos simples e capazes de representar, adequadamente, as condições em que se encontra o solo. Para tanto, torna-se necessário adotar métodos cuja

determinação se baseia em condições semelhantes às observadas durante o processo ao qual o solo é submetido (Brandão et al., 2006).

Três formas de determinação da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) do solo foram realizadas. Determinou-se  $K_{sat}$  nos experimentos a campo com simulador de chuvas, pelos resultados de trabalho realizado por Dalbianco (2009) com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente, em amostras de solo coletadas na mesma área e por estimativas utilizando equação da rotina interna do modelo.

#### **3.3.1.4.1 Condutividade hidráulica saturada determinada a campo com simulador de chuvas**

Os simuladores de chuva são equipamentos no qual a água é aplicada por aspersão com uma intensidade de aplicação superior a capacidade de infiltração do solo, exceto para um curto intervalo de tempo, logo após o início da precipitação (Brandão et al., 2006).

A condutividade hidráulica do solo foi determinada por ocasião das determinações dos fatores de erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos em parcelas experimentais sob condição de campo. As precipitações, com intensidade de  $70 \text{ mm h}^{-1}$ , com duração de 150 minutos para entressulcos e 75 minutos em sulcos, foram aplicadas com simulador de chuvas, conforme descrito anteriormente.

A taxa de infiltração de água no solo foi determinada pela diferença entre a intensidade de precipitação da chuva simulada e a taxa de escoamento superficial. A condutividade hidráulica saturada do solo foi considerada quando a taxa de infiltração atingiu um valor constante ao longo do tempo de chuva.

#### **3.3.1.4.2 Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) determinada com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente**

Em trabalho realizado por Dalbianco (2009), objetivando uma caracterização físico-hídrica da bacia de Arvorezinha, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada na camada 0-5 cm, em uma malha irregular com pontos de coleta distribuídos por toda a área da bacia. Nas amostras com estrutura preservada, foram determinadas a

condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar, as porosidades (total, macro e microporosidade), a densidade do solo e a umidade volumétrica nas tensões de 1, 6 e 10 kPa.

A determinação da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) foi feito com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente, conforme descrito em Hartge & Horn (1992).

Para cada amostra foram realizadas três leituras. Já a tomada de dados foi realizada por meio do programa computacional *KSAT* (Gubiani et al., 2010), com a qual se utiliza a equação proposta por Hillel (1998):

$$K_{sat} = 2,3 \frac{a L}{A \Delta t} (\log H_n - \log H_{n+1}) \quad (45)$$

onde  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm h}^{-1}$ ); “ $a$ ” corresponde a área da seção transversal do tubo contendo a coluna de água ( $\text{cm}^2$ );  $A$  é a área de seção transversal da amostra de solo ( $\text{cm}^2$ );  $L$  é o comprimento da amostra de solo ( $\text{cm}$ );  $\Delta t$  é o intervalo de tempo de deslocamento da coluna ( $\text{h}$ );  $H_n$ : carga hidráulica inicial ( $\text{cm}$ );  $H_{n+1}$ : carga hidráulica final ( $\text{cm}$ ).

#### **3.3.1.4.3 Estimativa do parâmetro de condutividade hidráulica do solo por equação da rotina interna do modelo *WEPP***

A estimativa do valor do parâmetro de condutividade hidráulica do solo ( $K_b$ ) foi também realizada utilizando equação de regressão da rotina interna do modelo *WEPP* (Flanagan & Nearing, 1995), considerando superfícies de solos cultivados contendo 40 % ou menos de conteúdo de argila (Tabela 4). A equação base usada para estimativa do  $K_b$  é dada por (Alberts et al., 1995):

$$K_b = -0,265 + 0,0086 (100 \text{ sand})^{1,8} + 11,46 \text{ CEC}^{-0,75} \quad (46)$$

onde  $\text{sand}$  é a fração de areia do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e  $\text{CEC}$  é a capacidade de troca de cátions ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ).

Essa expressão é componente da rotina interna do modelo *WEPP* e empregada nas simulações sempre que o usuário não informa o valor do parâmetro de condutividade hidráulica efetiva ( $K_e$ ) para o solo do local.

### 3.3.2 Parâmetros climáticos do modelo *WEPP*

Os dados climáticos necessários para entrada no gerador de dados climáticos CLIGEN do modelo *WEPP* foram obtidos da estação climatológica mais próxima da área da bacia estudada. Utilizaram-se as observações da estação localizada no município de Veranópolis (28° 58' S e 51° 33' W), Estado do Rio Grande do Sul. Utilizou-se para composição do arquivo de dados climáticos de uma série histórica de 43 anos obtidas na estação agrometeorológica da FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária) em Veranópolis, RS.

Os dados climáticos diários para entrada no modelo foram gerados com auxílio do gerador climático CLIGEN, versão 4.3, conforme modelo apresentado na Figura 12. As informações iniciais de entrada no gerador foram dados diários de precipitação total, temperaturas máximas e mínimas, além de informações referentes à estação climatológica (latitude, longitude e elevação).

Demais informações referentes à média e desvio padrão da precipitação, coeficiente de assimetria da precipitação, média e desvio padrão das temperaturas máxima e mínima mensal, média e desvio padrão da radiação solar mensal e média da temperatura do ponto de orvalho, foram conferidos e ajustados a partir da série histórica gerada pelo CLIGEN.

Verify Parameter File

Name: WEST LAFAYETTE 6 NW Data File: C:\Arquivos de

Latitude: 40.47 Longitude: -87 Elevation(m): 216.408 Max 30 minute rate(mm): 56.642 Max 6 hour rate(mm): 111.76

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average Monthly Precip(mm)	54.86	40.89	68.58	86.61	97.79	99.06	89.41	81.28	79.25	67.06	66.29	57.15
Number of Wet Days	9	7	10	11	11	10	8	8	8	8	9	9
Average Monthly Max Temp(C)	0.92	2.72	9.24	16.18	22.39	27.59	30.04	28.82	25.42	18.72	10.26	2.95
Average Monthly Min Temp(C)	-8.02	-6.78	-1.09	4.63	10.47	15.49	17.67	16.49	12.69	6.37	0.44	-5.41
Average Precip on Wet Days(mm)	6.10	5.84	6.86	7.87	8.89	9.91	11.18	10.16	9.91	8.38	7.37	6.35
Probability of wet day following wet day	0.42	0.39	0.43	0.51	0.52	0.47	0.39	0.41	0.43	0.45	0.45	0.45
Probability of wet day following dry day	0.25	0.24	0.30	0.31	0.29	0.27	0.24	0.23	0.22	0.21	0.25	0.25
Solar Radiation (Langley/Day)*	129.00	196.00	291.00	379.00	471.00	520.00	523.00	466.00	379.00	269.00	163.00	118.00
Maximum 30 minute Intensity(mm/hr)*	11.18	13.21	13.21	26.92	18.29	53.85	42.67	44.45	27.94	14.73	12.70	9.40

Monthly Averages PAR File

English Units Refresh Predicted Values Undo All Changes Predicted Yearly Precip(mm) 888.24

Change values to match local conditions. Time to Peak Intensity values represent a cumulative distribution of Tp values based on 15 minute rainfall data. See cligen parameter documentation for more information.

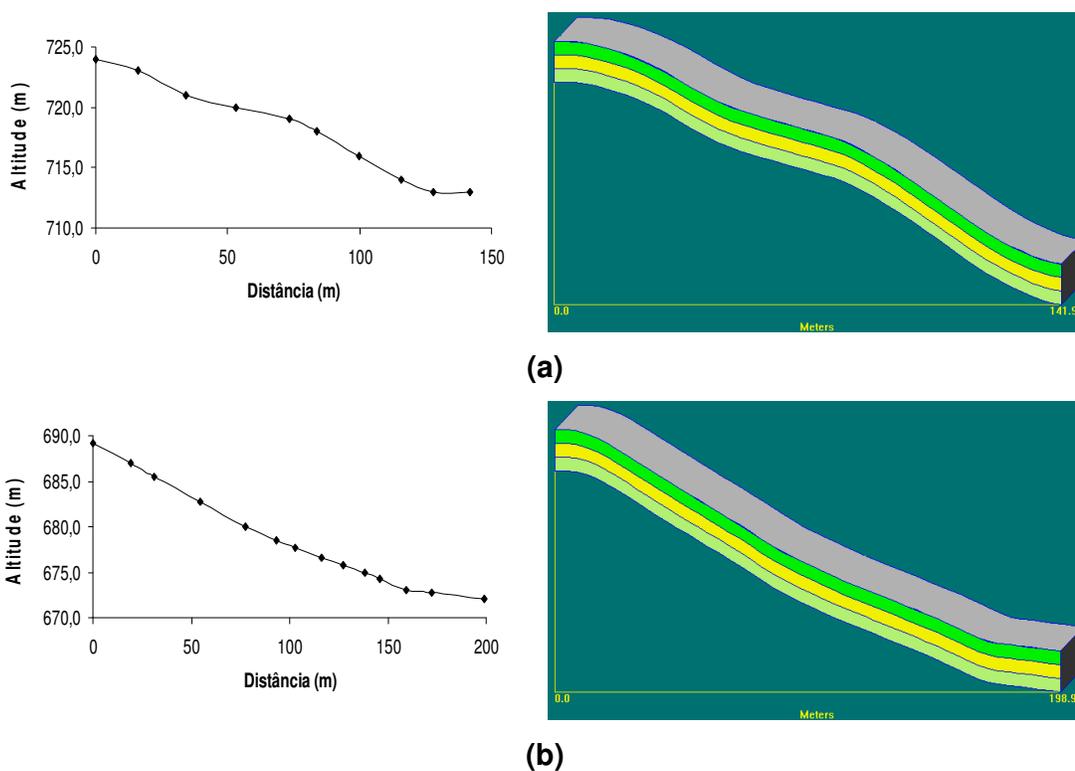
The average monthly precipitation and number of wet days are calculated from the probabilities for a wet day following a wet day and for a wet day following a dry day. To adjust approximate average monthly precipitation change the probabilities fields and click the Refresh button.

**Figura 12.** Representação do layout do programa computacional para o gerador de dados climáticos CLIGEN no modelo *WEPP*.

### 3.3.3 Parâmetros topográficos das vertentes

Para criação dos perfis representativos para cada vertente, o comprimento e as altitudes foram obtidos em diversos pontos ao longo de cada vertente. Assim foi possível representar bidimensionalmente as condições de cada vertente (Figuras 13a e 13b).

Entre condições estudadas, as características de relevo foram diferenciadas, com a primeira vertente possuindo comprimento de 142 m e declividade média de  $0,085 \text{ m m}^{-1}$  e a segunda vertente com 199 m de comprimento e declividade média de  $0,086 \text{ m m}^{-1}$ . No entanto, diferença principal está no formato diferenciado, onde a primeira vertente apresentou um perfil de encosta convexo e a segunda vertente um perfil de encosta côncavo.

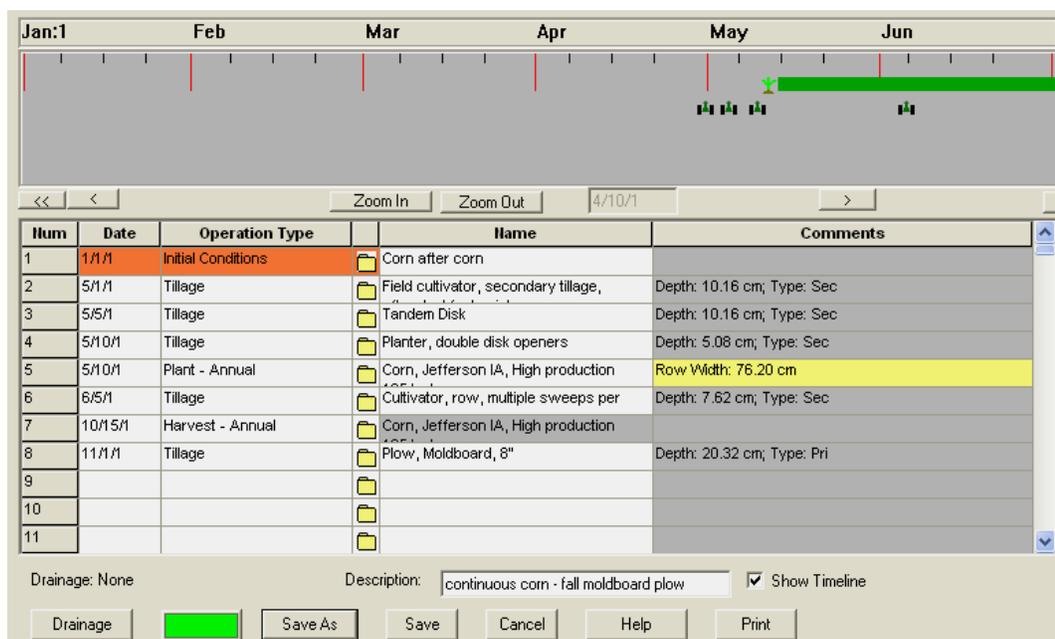


**Figura 13.** Perfil representativo da primeira (a) e da segunda (b) vertente utilizada nas simulações realizadas com o modelo *WEPP*.

### 3.3.4 Parâmetros de uso e manejo do solo

O arquivo de uso e manejo do solo é o que requer a maior quantidade de dados. Uma representação do tipo de arquivo requerido encontra-se na Figura 14.

Juntamente com os dados de clima e solo, o modelo automaticamente simula a proteção oferecida ao solo pelas partes aéreas das plantas (cobertura vegetal) ao longo do ano e, depois de colhida à cultura, a decomposição dos restos culturais.



**Figura 14.** Representação do layout do programa computacional para o componente de uso e manejo do solo do modelo *WEPP*.

O arquivo foi montado com base em informações da base de dados internos disponível no modelo *WEPP* e em informações locais disponíveis em cada condição. Informações de altura, índice de área foliar, área basal da planta, cobertura de copa, biomassa de material vegetal vivo e morto acima e abaixo da superfície do solo, foram montados com base nas informações internas disponíveis na base de dados do *WEPP*. Informações referentes ao uso do solo e práticas de manejo adotadas foram inseridas com base nas informações locais disponíveis em cada condição. Desta forma, foi possível a elaboração de um calendário anual, conforme descrito na Tabela 8.

Algumas modificações, conforme Apêndice 2, foram realizadas nos valores de alguns parâmetros: preparo primário do solo (aração) e secundário (gradagem), número de filas de implementos de cultivos, altura de camalhão após preparo primário do solo, espaçamento entre camalhão, rugosidade randômica, porcentagem de área mobilizada e profundidade média de cultivo.

**Tabela 8.** Calendário anual com informações de uso do solo e práticas de manejo adotadas.

Meses	Atividades
Janeiro	Início colheita da cultura do fumo
Fevereiro	Etapa de colheita da cultura do fumo
Março	Final colheita da cultura do fumo
Abril	Montagem do camalhão para cultivo mínimo, utilizando arado
Maio	Semeadura da cobertura inverno (aveia) ou pousio
Junho	Desenvolvimento da cobertura inverno
Julho	Desenvolvimento da cobertura inverno
Agosto	Abertura da linha de plantio no sistema de cultivo mínimo ou aração e montagem do camalhão no preparo convencional
Setembro	Início do plantio da cultura do fumo
Outubro	Fase de desenvolvimento da cultura do fumo
Novembro	Fase de desenvolvimento da cultura do fumo
Dezembro	Fase de desenvolvimento da cultura do fumo

Na bacia de Arvorezinha, o sistema de preparo do solo para plantio, em função do grau de revolvimento do solo, consiste em cultivo convencional e cultivo mínimo com mobilização somente na linha de semeadura (Figuras 15a 15b).



**Figura 15.** Sistema de preparo do solo em cultivo convencional (a) e cultivo mínimo com mobilização somente na linha de semeadura (b).

O sistema de preparo em cultivo convencional consiste na aração (arado de aiveca), seguida de gradagem (grade de dente), sendo realizadas duas vezes ao ano. Já o sistema de preparo em cultivo mínimo consiste na mobilização do solo somente na linha de plantio, onde é introduzida a adubação e as mudas de fumo, permanecendo sobre a superfície do solo os resíduos vegetais da cultura anterior.

Para o plantio do fumo, é aberta uma verga no solo, na qual é aplicada a adubação de base e em seguida a verga é fechada e remontada, construindo-se assim um camalhão, sobre o qual são plantadas as mudas de fumo, com espaçamento de 0,40 m entre mudas. O camalhão é feito em desnível, com um espaçamento de 1,20 m entre camalhões, e apresenta uma base de 0,30 m e altura de 0,30 m. No cultivo mínimo, os camalhões são construídos antes ou após a implantação da cultura de inverno.

Em ambos os casos, parte da superfície do solo é exposta, pois há revolvimento do solo nas linhas dos camalhões (Dalbianco, 2009).

### **3.4 Simulações da dinâmica de desagregação e deposição de sedimentos pelo modelo *WEPP***

Para realização de simulações com *WEPP*, associados aos dados do componente solo, foi necessária a elaboração de arquivos de clima, obtidos da estação climatológica mais próxima do local. Também foram levantados

dados topográficos, com informações de comprimento e altitudes obtidas em diversos pontos ao longo de cada vertente. Com referência ao uso e manejo do solo foi elaborado um calendário anual formulado por meio de informações locais considerando o uso atual da área.

As simulações foram realizadas utilizando o modelo *WEPP* vertente versão 2008.9 desenvolvido pelas instituições norte-americanas: Departamento de Agricultura do Estados Unidos (United States Department of Agriculture – USDA - ARS), Laboratório Nacional de Pesquisa em Erosão do Solo (National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL) e a Universidade de Purdue (Purdue University).

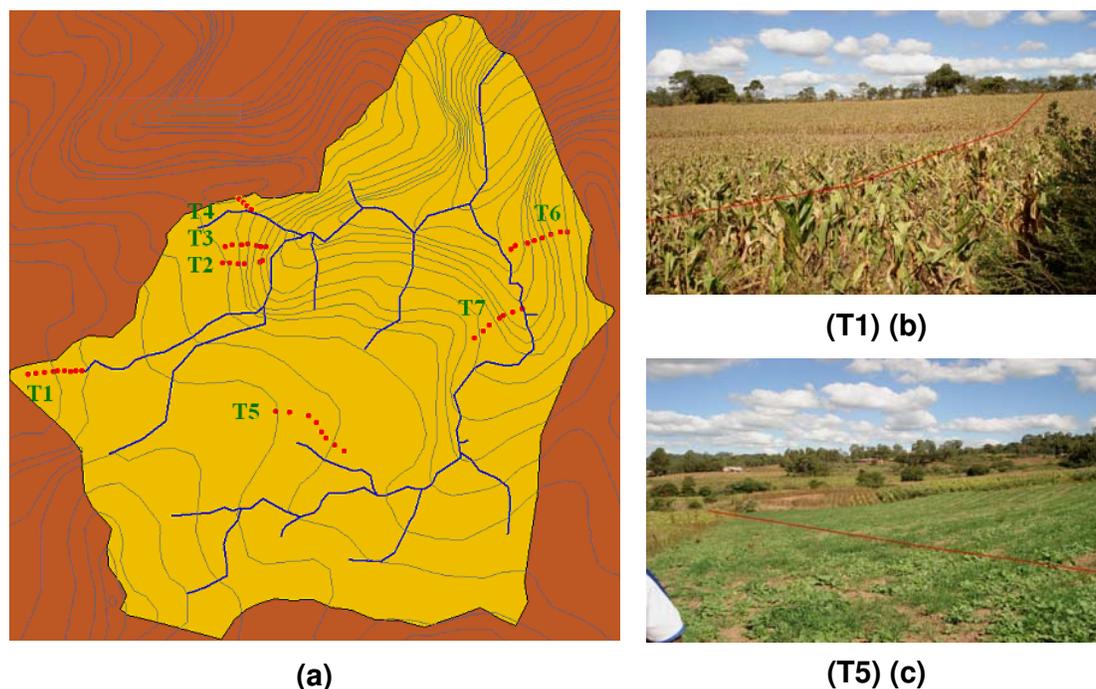
Diferentes formas e períodos de simulações foram realizados utilizando o modelo *WEPP*, visando avaliar a produção de sedimentos em cada vertente. Realizaram-se simulações utilizando dados do componente solo do modelo *WEPP* ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $\tau_c$  e  $K_{sat}$ ) obtidos sob condição experimental de campo e estimados por equações da rotina interna do modelo. Simulações com dados do fator de erodibilidade do solo em entressulcos do modelo *WEPP* ( $K_i$ ) obtido sob condição experimental de laboratório e estimado por equação da rotina interna do modelo. Simulações com dados dos fatores de erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo *WEPP*. Simulações com dado do fator de condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ), determinado a campo com auxílio do simulador de chuvas, estimado por equação da rotina interna do modelo *WEPP* e com dados obtidos por Dalbianco (2009) em amostras de solo coletadas na mesma área.

### **3.5 Comparação dos resultados simulados pelo modelo *WEPP* com os estimados pelo método da redistribuição do “fallout” $^{137}\text{Césio}$**

Associado ao monitoramento na bacia, outro estudo que está em andamento refere-se à determinação da atividade do  $^{137}\text{Césio}$  tendo como base o método de redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Césio}$  em algumas vertentes de áreas agrícolas. Este estudo vem sendo realizado pelos professores Gustavo Henrique Merten, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Jean Paolo Gomes Minella, do Departamento de Solos

– Universidade Federal de Santa Maria. As informações obtidas até o momento no referido trabalho ainda não foram publicadas. Mesmo assim, foram disponibilizadas pelos referidos pesquisadores para comparar com o padrão espacial das taxas de erosão e deposição simuladas pelo modelo *WEPP* obtidas no presente trabalho.

Em sete vertentes representativas (solo, relevo) da bacia, foi realizado estudo para determinação da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  utilizando o método de redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Césio}$  (Figura 16a). Dentre essas vertentes, foram selecionadas duas vertentes (Figuras 16b e 16c) onde foram simulados os processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos utilizando o modelo *WEPP* de predição de perdas de solo. Com isso pode-se realizar a comparação entre as áreas de desagregação e deposição de sedimentos simulados pelo o modelo *WEPP* com os resultados de atividade de  $^{137}\text{Césio}$  em pontos amostrais ao longo das vertentes realizados pelo método de redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Césio}$ .



**Figura 16.** Distribuição espacial de vertentes na área da bacia (a) com estudo da determinação da atividade do  $^{137}\text{Césio}$  utilizando o método de redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Césio}$  e vertentes selecionadas (b) e (c) para simulações do processo erosivo com o modelo *WEPP* (Fotos: Minella, J.P.G.).

Os procedimentos experimentais para análise da atividade do  $^{137}\text{Cs}$ , conforme descrito em Zapata (2002), foram conduzidos pelo Professor Jean Paolo Gomes Minella, da Universidade Federal de Santa Maria. Consistiram inicialmente de coletas de amostras de solo em pontos amostrais ao longo das vertentes, de forma a contemplar as posições superior, mediana e inferior das encostas. As amostras de solo foram coletadas a uma profundidade de 0-20 cm, sendo cada ponto amostral constituído de três repetições. Após o procedimento de coleta as amostras foram secas ao ar por 48 h, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm e colocadas dentro de um Becker para determinação da atividade de  $^{137}\text{Cs}$ . A atividade do  $^{137}\text{Cs}$  foi determinada por espectrometria de raio gamma usando um detector HPGe. O sistema de espectrometria de raio gamma foi calibrado para geometria do Becker com duas amostras de solo certificada pela Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency – IAEA, 1996). As análises da atividade de  $^{137}\text{Cs}$  nas amostras coletadas foram realizadas na Universidade de Exeter, no Reino Unido, sob responsabilidade do professor Des E. Walling, do departamento de Geografia.

A partir do estudo utilizando o método da redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Cs}$ , foi possível então visualizar o padrão espacial da atividade do  $^{137}\text{Cs}$ , em pontos amostrais ao longo das encostas em relação à concentração observada na área de referência. Com isso foi possível comparar a atividade do  $^{137}\text{Cs}$  com o padrão espacial das taxas de desagregação e deposição simuladas pelo o modelo *WEPP*.

### **3.6 Análise estatística dos dados**

Os resultados obtidos na caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento e do fator de erodibilidade do solo em entressulcos, obtidas sob condições experimentais de campo e laboratório foram avaliados por meio de análise de variância. Comparações de médias foram efetuadas com aplicação do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, com o auxílio do *software* SISVAR (Ferreira, 2000).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Parâmetros de entrada do componente solo ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) do modelo *WEPP*

#### 4.1.1 Características hidráulicas do escoamento superficial

##### 4.1.1.1 Escoamento em entressulcos

Os valores médios referentes às variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos obtidos nos experimentos a campo e em laboratório são mostrados na Tabela 9. No apêndice 3 são apresentados os dados de cada repetição deste parâmetro para as duas condições determinadas.

Observou-se que houve diferenças significativas da descarga líquida entre as duas condições de determinação, tendo a condição de laboratório apresentado o maior valor de  $q_i$  ( $1,50 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

**Tabela 9.** Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos, obtidas sob condições experimentais de campo e laboratório.

Variáveis	Unidade	Condições		Média	C.V (%)
		Campo	Laboratório		
$q_i$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$1,00 \times 10^{-5} \text{ b}$	$1,50 \times 10^{-5} \text{ a}$	$1,25 \times 10^{-5}$	6,74
$V_m$	$\text{m s}^{-1}$	0,0174 a	0,0162 a	0,0168	10,92
$h$	m	0,00058 b	0,00094 a	0,00076	13,85
$\nu$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$0,90 \times 10^{-6} \text{ b}$	$1,14 \times 10^{-6} \text{ a}$	$1,02 \times 10^{-6}$	1,83
Re	adimensional	11,1 b	13,2 a	12,2	6,04
Fr	adimensional	0,23 a	0,17 a	0,20	16,46
$f$	adimensional	1,94 a	2,69 a	2,32	10,23
$n$	$\text{s m}^{-1/3}$	0,148 a	0,189 a	0,169	17,86
$\tau$	Pa	0,76 a	0,92 a	0,84	14,10

$q_i$  = descarga líquida unitária do escoamento,  $V_m$  = velocidade média,  $h$  = altura da lâmina de escoamento,  $\nu$  = viscosidade cinemática, Re = número de Reynolds, Fr = número de Froude,  $f$  = fator de perda de carga,  $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning,  $\tau$  = tensão cisalhante do escoamento. Médias seguidas de mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Não ocorreu diferença significativa na velocidade média do escoamento superficial entre as condições de campo e de laboratório. Como ocorreu maior descarga líquida unitária do escoamento sem diferença na velocidade média, isso acarretou maior altura da lâmina de escoamento, na condição de laboratório (Tabela 9). Verificaram-se diferenças significativas na altura da lâmina do escoamento ( $h$ ) entre as condições determinadas, com valores respectivos de 0,00058 e 0,00094 m para condições de campo e laboratório (Tabela 9). Isso também pode estar relacionado à menor rugosidade superficial e menor fator de perda de carga nessa condição, mesmo que em ambas as características não se tenha observado diferença significativa entre as condições de campo e laboratório (Tabela 9). A perda de carga ( $f$ ) em termos da hidráulica do escoamento representa a parcela da energia relacionada com as forças de resistência ao deslocamento do escoamento superficial, representadas pela rugosidade superficial.

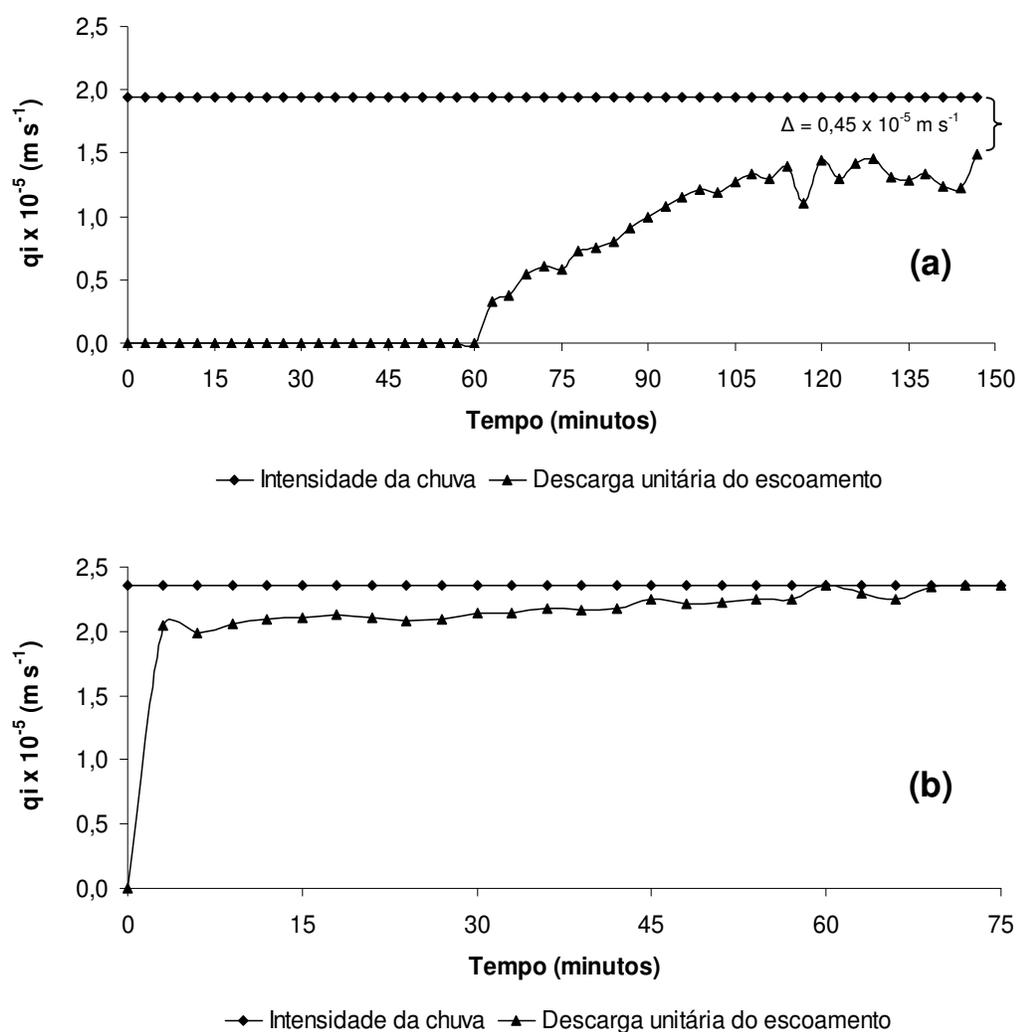
Na condição experimental de campo, a descarga líquida unitária do escoamento ao longo do tempo não se aproximou da intensidade da chuva (Figura 17a), ao contrário do que ocorreu na condição experimental de laboratório (Figura 17b).

A menor taxa de escoamento superficial na condição experimental de campo (Figura 17a) indica que o solo apresentou alta taxa de infiltração. Nesta condição, o coeficiente de escoamento superficial foi de 31 %, obtidos por meio da relação entre a lâmina de escoamento superficial, considerando o valor médio de descarga líquida unitária do escoamento superficial ao longo do período de teste e a lâmina precipitada. Assim, do total de chuva precipitado, 69 % infiltrou no solo e 31 % resultou-se em escoamento superficial. Provavelmente, isso tenha sido decorrência da quantidade de argila do solo (Tabela 4), do elevado teor de matéria orgânica (Tabela 5) e da alta estabilidade dos agregados atestados pelo elevado índice de estabilidade (Tabela 6).

A textura e a estrutura, que são determinantes da quantidade, forma e continuidade dos macroporos, são as características físicas que influenciam mais expressivamente a infiltração de água no solo. Segundo Hillel (2003) uma característica importante que condiciona o comportamento físico-hídrico do solo é a distribuição do diâmetro dos poros. A matéria orgânica presente no

solo, por sua vez, possui papel fundamental na estabilidade de agregados.

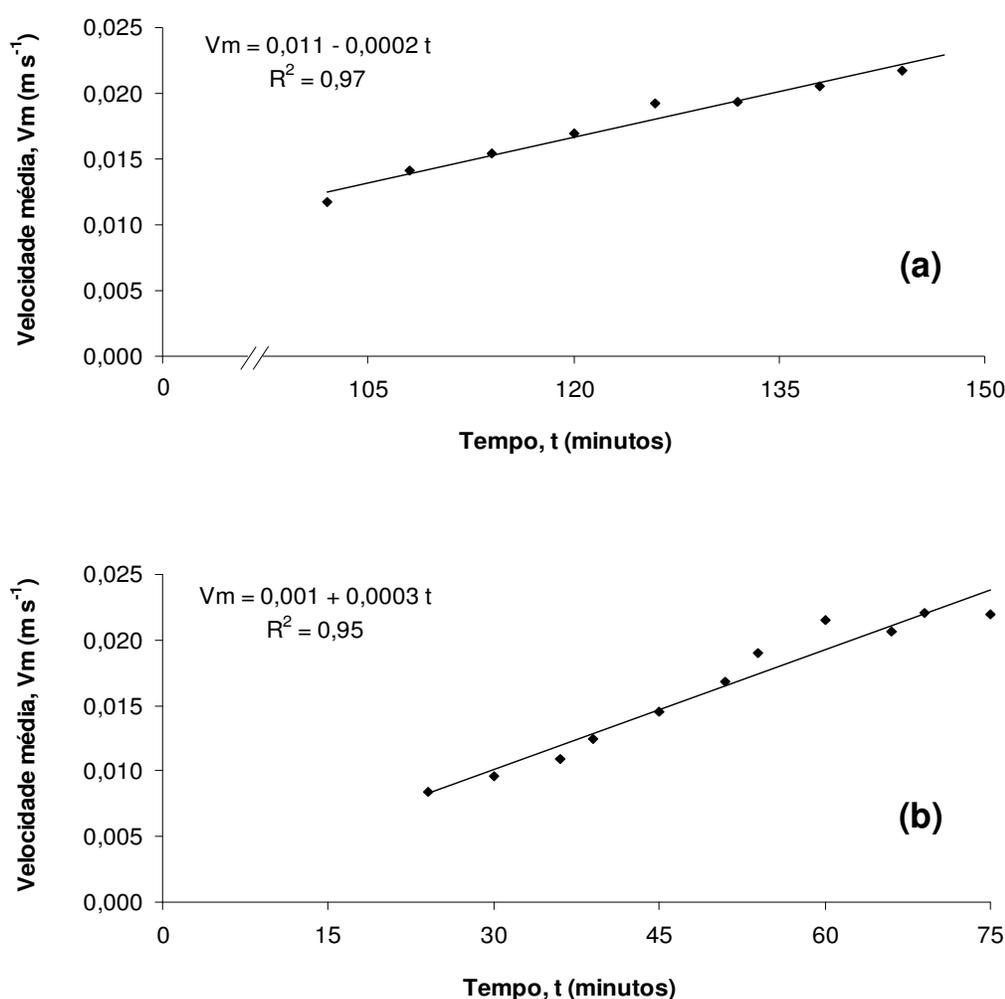
Na Figura 17b, observa-se que a descarga líquida unitária do escoamento na condição de laboratório se aproxima da intensidade da chuva logo na fase inicial do teste, assim permanecendo ao longo de todo o evento. Este comportamento indica uma baixa taxa de infiltração. Isto ocorreu devido às parcelas experimentais terem sido saturadas com antecedência de 24 horas antes de iniciar os testes com chuva. Ao iniciar os testes, uma tensão de água equivalente a 15 cm de coluna d'água (cca) foi aplicada e a drenagem foi suprimida.



**Figura 17.** Descarga líquida unitária do escoamento superficial ( $q_i$ ), sob chuva simulada de intensidade média de  $1,944 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  ( $70 \text{ mm h}^{-1}$ ) na condição experimental de campo (a) e de  $2,361 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  ( $85 \text{ mm h}^{-1}$ ) na condição experimental de laboratório (b).

Nas Figuras 18a e 18b, estão apresentadas as relações entre a velocidade média do escoamento superficial e o tempo de aplicação da chuva, para as condições experimentais de campo e laboratório, respectivamente.

Em ambas as condições, as velocidades do escoamento apresentaram tendência crescente com tempo de aplicação da chuva simulada. O ajuste dos dados observados ao modelo linear de regressão apresentou coeficientes de determinação de 0,97 e 0,95, sob condições experimentais de campo e laboratório, respectivamente.



**Figura 18.** Relação entre velocidade média do escoamento em entressulcos e tempo de aplicação da chuva simulada nas condições experimentais de campo (a) e laboratório (b).

Os regimes de escoamento nas condições determinadas foram laminar lento subcrítico, indicados pelo número de Reynolds ( $Re$ )  $< 500$  e Froude ( $Fr$ )  $< 1$  (Simons & Sentuk, 1992), permitindo inferir que ocorreu um escoamento laminar característico da erosão em entressulcos. Apesar do de um baixo valor de  $Re$  nas duas condições determinadas, na condição de campo o valor de  $Re$  foi de 11,1 significativamente diferente do valor de 13,2 obtido em laboratório. Já o valor de  $Fr$  ficou entre 0,23 e 0,17, para as condições de campo e de laboratório, respectivamente, não diferindo estatisticamente (Tabela 9).

O escoamento difuso apresenta, normalmente, características hidráulicas do tipo laminar subcrítico, conforme se constata pelos números de Reynolds e Froude na Tabela 9. Porém, dependendo da relação entre a altura da lâmina de água e o diâmetro das gotas da chuva, esse tipo de escoamento pode atenuar as taxas de desagregação provocadas pelo impacto das gotas da chuva e, ao mesmo tempo, aumentar a capacidade de transporte do escoamento devido a um aumento de momento causado pela turbulência (Savat, 1979). Esse efeito não aconteceu nos experimentos, visto que as gotas produzidas pelos bicos aspersores utilizados nos simuladores são de diâmetro maior que a altura da lâmina de escoamento (Meyer, 1958).

#### **4.1.1.2 Escoamento em sulcos**

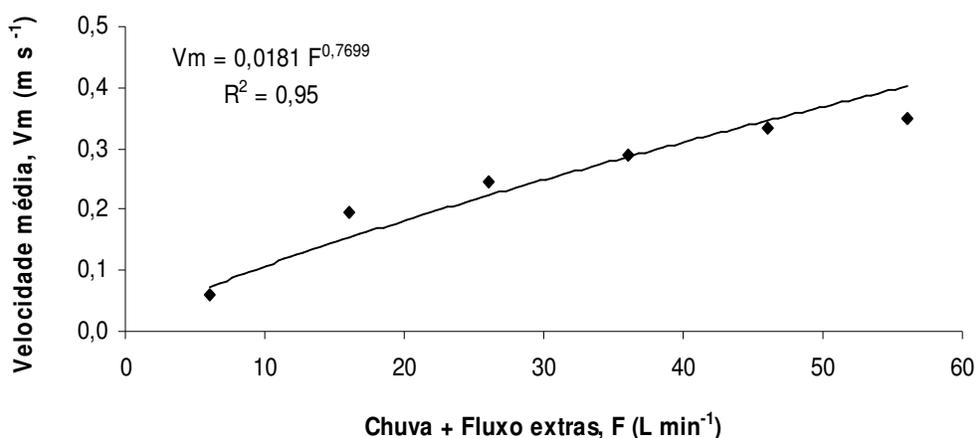
Os valores médios das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos obtidos no experimento a campo são mostrados na Tabela 10. Nos apêndices 4 e 5 são apresentados os dados de cada repetição, para as variáveis hidráulicas e seção transversal média dos sulcos de erosão, respectivamente.

**Tabela 10.** Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos.

Variável	Unidade	Fluxo extra aplicado ( $L \text{ min}^{-1}$ ) <sup>(1)</sup>					
		6 + 0	6 + 10	6 + 20	6 + 30	6 + 40	6 + 50
$V_m$	$m \text{ s}^{-1}$	0,061	0,195	0,244	0,289	0,333	0,349
$A$	$m^2$	0,00053	0,00151	0,00270	0,00546	0,01003	0,01289
$P_m$	$m$	0,0860	0,1448	0,1725	0,2210	0,2938	0,3187
$R_h$	$m$	0,0062	0,0104	0,0157	0,0247	0,0341	0,0404
$Re$	adimensional	455	2236	4430	8155	12441	15151
$Fr$	adimensional	0,25	0,66	0,63	0,61	0,64	0,58
$n$	$s \text{ m}^{-1/3}$	0,230	0,087	0,096	0,108	0,113	0,123
$u_*$	$m \text{ s}^{-1}$	0,088	0,115	0,147	0,181	0,208	0,229
$f$	adimensional	26,26	2,63	2,69	2,98	2,96	3,35

<sup>(1)</sup> A chuva simulada de  $70 \text{ mm h}^{-1}$ , simultaneamente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente  $6 \text{ L min}^{-1}$ .  $V_m$  = Velocidade média do escoamento,  $A$  = área,  $P_m$  = perímetro molhado,  $R_h$  = raio hidráulico,  $Re$  = número de Reynolds,  $Fr$  = número de Froude,  $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning,  $u_*$  = velocidade de cisalhamento,  $f$  = fator de perda de carga.

Os resultados obtidos mostraram que houve aumento da velocidade média do escoamento nos sulcos com o aumento dos fluxos extras aplicados (Tabela 10). Essa relação está apresentada na Figura 19 onde se observa um ajuste para o modelo de potência, com alto coeficiente de determinação, entre o aumento dos fluxos adicionados (chuva + fluxo extras) e a velocidade do escoamento. Esse aumento na velocidade decorre do aumento do volume do escoamento com o aumento do fluxo extra adicionado.



**Figura 19.** Relação entre velocidade média do escoamento e vazão gerada pela chuva e fluxo extra aplicados nos sulcos de erosão para os teste realizados sob condição experimental de campo.

Essa relação do aumento da velocidade média do fluxo, em condições de preparo convencional e solo descoberto, com o aumento da vazão aplicada no sulco, também foi observada por Giasson & Cassol (1996), Braida & Cassol (1996) e Cantalice et al. (2005).

O regime de escoamento na condição estudada foi turbulento subcrítico ou lento, segundo a classificação para escoamentos em superfícies livres, com número de Reynolds ( $Re$ ) variando entre 455 a 15151 e Froude ( $Fr$ ) entre 0,25 a 0,58 (Tabela 10). Desta forma, comprova-se que ocorreu um escoamento característico de erosão em sulcos, indicados pelos valores de  $500 \leq Re < 2500$  e  $Fr < 1$  (Simons & Senturk, 1992).

Na condição inicial, apenas com a vazão da água produzida pela chuva simulada ( $6 \text{ L m}^{-1}$ ), o regime de escoamento foi laminar subcrítico, com o número de Reynolds de 455 e o de Froude  $< 1$ . No primeiro fluxo extra adicionado  $10 \text{ L min}^{-1}$ , o regime de escoamento passou para transicional subcrítico. Nos demais fluxos extras os regimes de escoamento foram turbulentos subcríticos. Cantalice et al. (2005) encontraram regimes de escoamento variando de transição subcrítico, para os sulcos sem adição de fluxo extra, apenas com a vazão da água produzida pela chuva simulada ( $5 \text{ L m}^{-1}$ ) a turbulentos subcríticos, para os tratamentos com fluxos extras de 10 a  $50 \text{ L m}^{-1}$ .

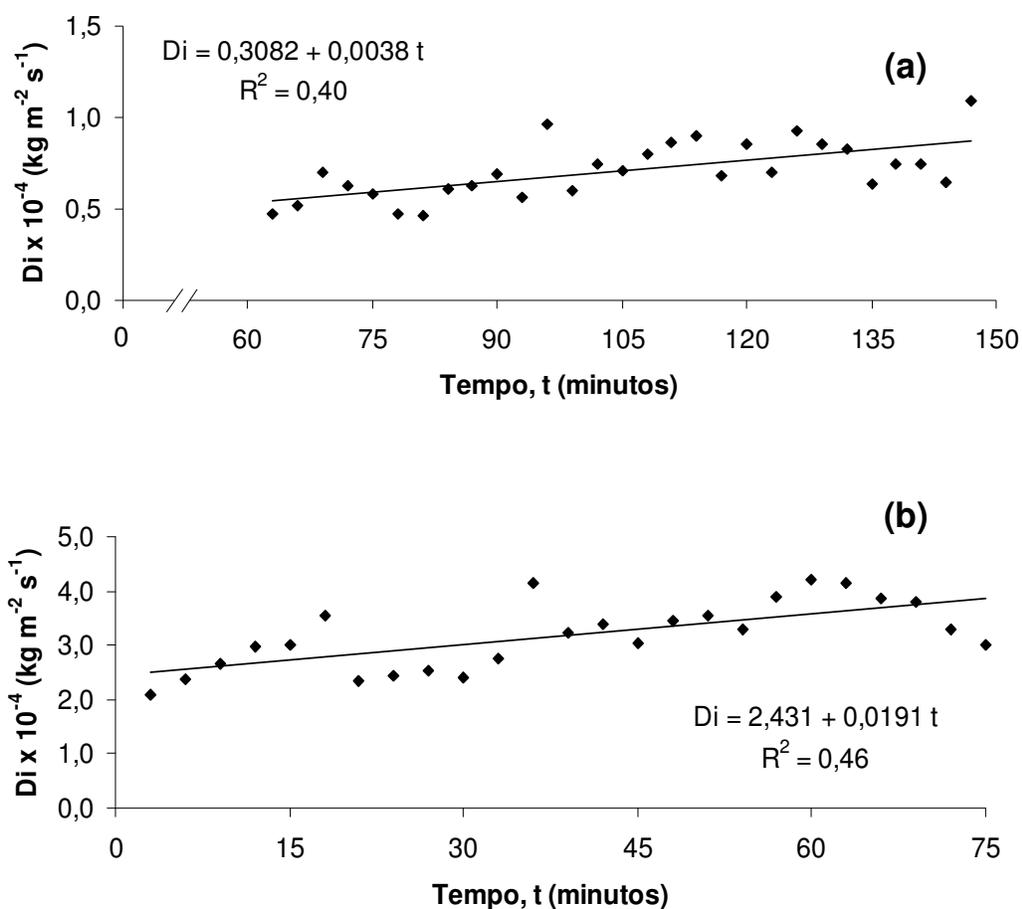
Ainda na Tabela 10, observam-se os valores absolutos de raio hidráulico ( $R_h$ ). O aumento da vazão no sulco de erosão proporcionada pela chuva mais fluxo extra adicionado ocasionou deformações na secção transversal dos sulcos, observado pelo aumento da área e perímetro molhado (Tabela 10), acarretando em aumentos do raio hidráulico, que diferiram para os incrementos de fluxos aplicados.

O coeficiente de rugosidade apresentou valores médios distintos entre os fluxos aplicados, observando um valor superior na primeira etapa do teste, apenas sob chuva simulada. Apesar de valores crescentes na etapa com fluxo extra adicionado, todos os valores de rugosidade foram inferiores comparados à primeira etapa. À medida que aumenta a tensão cisalhante do escoamento, pelo aumento da vazão líquida, e as camadas não erodíveis vão sendo alcançadas há uma redução da rugosidade das paredes do sulco.

#### 4.1.2 Fator de erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos e tensão crítica de cisalhamento

##### 4.1.2.1 Taxa de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ )

Na Figura 20, são apresentados os valores das taxas médias de desagregação ao longo do tempo de aplicação da chuva para as condições de campo (a) e laboratório (b). Observa-se que a taxa de desagregação variou durante o período de chuva, com tendência crescente, especialmente na condição de laboratório. Na condição de campo as taxas de desagregação foram menores e apresentaram pequena variação, mantendo-se quase estáveis durante o período de aplicação da chuva, como demonstra o pequeno valor do coeficiente angular da reta ajustada aos dados observados.



**Figura 20.** Taxas médias de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ ), para os testes realizados sob condições experimentais de campo (a) e laboratório (b).

As taxas de desagregação de solo em entressulcos foram ajustadas ao modelo linear de regressão, com coeficientes de determinação de 0,40 e 0,65, nas condições de campo e laboratório, respectivamente. Para o cálculo do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), foi utilizada a média das taxas de desagregação dos últimos cinco pontos observados conforme proposto por Elliot et al. (1989) e adotado pelo modelo *WEPP*.

Na condição de campo (Figura 20a), as taxas de desagregação do solo em entressulcos foram baixas e apresentaram pequena variação sendo quase estáveis. Nesta condição, quando os agregados superficiais resistem à desagregação é criada uma condição de rugosidade superficial que, associado à elevada taxa de infiltração de água no solo, altera a hidráulica do escoamento no sentido de diminuir a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento.

É muito provável que, na condição de laboratório (Figura 20b), os maiores valores de desagregação nos 15 minutos iniciais da chuva, estejam relacionados com a pronta disponibilidade de materiais facilmente destacáveis pelo impacto das gotas de chuva e transportáveis pela lâmina de escoamento logo na fase inicial do teste, conforme observado a dinâmica da descarga líquida unitária do escoamento (Figura 17b) ao longo de todo o evento. No instante seguinte houve decréscimo nas taxas de desagregação, mas a seguir o  $D_i$  voltou a ter tendência crescente até em torno de 60-65 minutos, tornando-se mais ou menos estável desse momento até o final da chuva.

Na modelagem da erosão em entressulcos, é necessário que se considere o efeito da chuva sobre as taxas de desagregação ao longo do tempo. De acordo com Nunes (2006) o tempo de aplicação da chuva deve ser suficiente para que seja alcançados a taxa máxima de desagregação e esse tempo, irá depender do tipo de solo.

Nunes (2006) estudando Latossolos do Rio Grande do Sul, sob uso natural, observou que as taxas de desagregação para os Latossolos Vermelho aluminoférrico e distroférico foram praticamente constantes ao longo do tempo de duração da chuva. Enquanto que para o Latossolo Vermelho distrófico, aproximadamente 75 minutos de chuva simulada foram necessários para que atingisse a taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos. Braida & Cassol (1996) verificaram em um Argissolo Vermelho distrófico que as taxas de desagregação foram crescentes com o tempo de chuva, até atingir um valor máximo, tornando-se, então, decrescentes.

A fase de transporte de sedimentos na erosão em entressulcos ocorre não apenas pela ação de salpicamento da gota da chuva (efeito “*splash*”), mas principalmente pelo escoamento superficial difuso que ocorre na região do entressulcos (Meyer et al., 1975). Dependendo da relação entre a altura da lâmina de água e o diâmetro das gotas da chuva, o tipo de escoamento pode atenuar as taxas de desagregação provocadas pelo impacto das gotas da chuva e, ao mesmo tempo, aumentar a capacidade de transporte do escoamento devido a um aumento de momento causado pela turbulência (Savat, 1979). Desta maneira, quando se analisa a taxa de desagregação ( $D_i$ ) é importante considerar que essa é governada tanto pela disponibilidade de sedimentos desagregados como pela capacidade do escoamento de transportar os sedimentos desagregados (Toy et al., 2002).

#### **4.1.2.2 Erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ )**

Os valores médios das cinco últimas observações da taxa de desagregação do solo em entressulcos, intensidade da chuva aplicada, descarga unitária do escoamento superficial, fator de ajuste da declividade e fator de erodibilidade do solo em entressulcos, são mostrados na Tabela 11. No apêndice 6 são apresentados os dados de cada repetição para as duas condições determinadas.

**Tabela 11.** Valores médios do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), para os testes realizados sob condições de campo e de laboratório e estimado por equação da rotina interna do modelo *WEPP*.

Condição	$D_i$	$I$	$q_i$	$S_r$	$K_i$	
					Observado	Estimado <sup>(1)</sup>
	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{m s}^{-1}$	$\text{m s}^{-1}$		$\text{kg s m}^{-4}$	
Campo	$0,773 \times 10^{-4}$ b	$1,944 \times 10^{-5}$ b	$1,095 \times 10^{-5}$	0,5425 a	$0,64 \times 10^6$ b	$4,25 \times 10^6$
Laboratório	$4,478 \times 10^{-4}$ a	$2,361 \times 10^{-5}$ a	-	0,4791 b	$1,68 \times 10^6$ a	
Média	$2,626 \times 10^{-4}$	$2,153 \times 10^{-5}$	$1,095 \times 10^{-5}$	0,5108	$1,16 \times 10^6$	
C.V. (%)	48,46	1,60	-	2,15	43,52	

$D_i$  = taxa de desagregação do solo em entressulcos,  $I$  = intensidade da chuva,  $q_i$  = descarga unitária do escoamento superficial,  $S_r$  = fator de ajuste da declividade (campo:  $0,13 \text{ m m}^{-1}$  e laboratório:  $0,10 \text{ m m}^{-1}$ ),  $K_i$  = erodibilidade do solo em entressulcos observado nos experimentos de campo e laboratório e estimado por equação da rotina interna do modelo *WEPP*. Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

<sup>(1)</sup> Estimativa pela equação (24) da rotina interna do modelo *WEPP*. Utilizou-se o teor médio da fração da argila obtido de caracterização granulométrica nas vertentes para estimativa do fator  $K_i$ .

O valor do fator  $K_i$  estimado utilizando equação da rotina interna do modelo *WEPP* (Alberts et al., 1995), foi de  $4,25 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ . Já o valor obtido sob condição de campo foi de  $0,64 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , enquanto sob condição de laboratório foi de  $1,68 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  (Tabela 11).

Observa-se que o fator  $K_i$  estimado por meio de equação da rotina interna do modelo *WEPP* (Alberts et al., 1995) apresenta o valor mais elevado do que os valores do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), obtidos em condições campo e de laboratório, os quais diferiram significativamente.

No modelo *WEPP*, a erodibilidade básica do solo em entressulcos, isto é, em solos recentemente preparados, sem resíduos, coberturas, ou raízes, e na condição padrão de declividade, apresenta uma amplitude de variação entre  $0,5 \times 10^6$  e  $12 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  (Alberts et al., 1995), obtido em estudos realizados em 33 solos dos Estados Unidos (Elliot et al., 1989). Resultados obtidos sob condições campo e de laboratório (Tabela 11) e estimados por meio de equação da rotina interna do modelo *WEPP* indicam que os valores de  $K_i$  estão dentro da faixa de valores determinados no modelo *WEPP* de predição de perdas de solo. Observou-se que os valores estimados

por meio de equação da rotina interna do modelo *WEPP* (Alberts et al., 1995), nas duas vertentes estudadas, foram superestimados quando comparados as demais condições. Isto indica que a determinação do fator  $K_i$  por meio de equações da rotina interna do *WEPP* precisa ser avaliada antes de uma aplicação modelo na predição de perdas de solo, tendo em vista que essas equações foram desenvolvidas e os seus parâmetros ajustados para condições de solos de clima temperado.

Para estimar o valor do fator  $K_i$  pela rotina interna do *WEPP*, as equações consideram somente a composição granulométrica do solo, relacionada às quantidades de areia muito fina e argila. O que determina o emprego de uma equação é o percentual de areia na superfície do solo, maior ou menor que 30% (Flanagan & Nearing, 1995). Para solos com 30 % ou mais de areia utiliza-se a equação:  $K_{ib} = 2728000 + 19210000 \cdot amf$  (fração de areia muito fina -  $kg\ kg^{-1}$ ). Já para solos com menos de 30 % de areia utiliza-se a equação:  $K_{ib} = 6054000 - 5513000 \cdot arg$  (argila -  $kg\ kg^{-1}$ ). No entanto, a erodibilidade do solo em entressulcos é influenciada por propriedades como textura do solo (Meyer & Harmon, 1984; Arshad et al., 1996), teor e mineralogia da argila (Albuquerque, 1998), distribuição, tipo e quantidade de matéria orgânica (Meyer & Harmon, 1984; Lima & Andrade, 2001), teor e tipo de óxidos (Kampf & Curi, 2003, Reichert et al., 1992; Veiga et al., 1993). De acordo com Kampf & Curi (2003) o tipo e o teor de óxidos, conferem alta estabilidade de agregados, principalmente devido à quantidade de óxidos de Fe e Al. Albuquerque (1998) estudando a suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos concluiu que a presença de óxidos nos solos mais intemperizados, juntamente com a matéria orgânica formam agregados mais estáveis, favorecendo a infiltração de água no solo, refletindo-se em menores valores de erodibilidade em entressulcos. Veiga et al. (1993) verificaram que os solos com menor erodibilidade em entressulcos foram os de maior teor de argila e que apresentavam elevado teor de óxidos de ferro e alumínio e menor grau de dispersão em água da fração argila mais silte.

Observa-se que os valores do fator de erodibilidade do solo em entressulcos obtidos, nas condições de campo e laboratório, estão na ordem de grandeza de  $10^6$ , semelhantes aos valores por diversos autores para diferentes solos. No entanto, três solos, Latossolo Bruno Câmbico ( $0,17 \times 10^6$

kg s m<sup>-4</sup>) (Albuquerque et al., 2000), Podzólico Vermelho-Escuro (4,67 x 10<sup>5</sup> kg s m<sup>-4</sup>) e Latossolo Roxo (3,38 x 10<sup>5</sup> kg s m<sup>-4</sup>) (Lima & Andrade, 2001), apresentaram valores de erodibilidade em entressulcos fora da amplitude de variação entre 0,5 x 10<sup>6</sup> e 12 x 10<sup>6</sup> kg s m<sup>-4</sup> do modelo *WEPP* (Alberts et al., 1995). A estimativa do fator K<sub>i</sub> por equação da rotina interna do modelo *WEPP* (Equação 24) superestimou em 6,6 a 2,5 vezes os valores obtidos experimentalmente sob condições de campo e laboratório, respectivamente. Nunes & Cassol (2008) realizaram estimativa do fator K<sub>i</sub> pelas equações do *WEPP* e obtiveram valores superestimados em 2,4 a 3,6 vezes em relação aos valores obtidos experimentalmente. Esses autores também concluíram que o uso dos teores de areia muito fina (AMF) e de argila, conforme sugerido pelo modelo *WEPP*, não foi adequado para prever a erodibilidade em entressulcos dos Latossolos do Rio Grande do Sul estudados, uma vez que superestimou os dados obtidos experimentalmente.

#### 4.1.2.3 Taxas de desagregação e caracterização da erodibilidade do solo em sulcos

Os valores médios de descarga líquida, concentração de sedimentos na enxurrada, tensão cisalhante do escoamento e taxas de desagregação em sulcos são mostrados na Tabela 12. No apêndice 7 são apresentados os dados de cada repetição referente a esta caracterização.

**Tabela 12.** Valores de descarga líquida (Q), concentração média de sedimentos na enxurrada (C), tensão cisalhante do escoamento ( $\tau$ ) e taxa de desagregação (D<sub>r</sub>), para vazões aplicadas em sulcos pré-formados com declividade de 0,14 m m<sup>-1</sup>.

Variável	Unidade	Fluxo extra aplicado (L min <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>					
		6 + 0	6 + 10	6 + 20	6 + 30	6 + 40	6 + 50
Q	L s <sup>-1</sup>	0,0306	0,2307	0,4078	0,5787	0,7853	0,9312
C	kg L <sup>-1</sup>	0,0413	0,2030	0,1948	0,1592	0,0814	0,0748
$\tau$	Pa	8,02	14,15	21,65	33,60	44,85	53,19
D <sub>r</sub>	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,00194	0,04286	0,06939	0,06271	0,04288	0,03886

<sup>(1)</sup> A chuva simulada de 70 mm h<sup>-1</sup>, simultaneamente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente 6 L min<sup>-1</sup>.

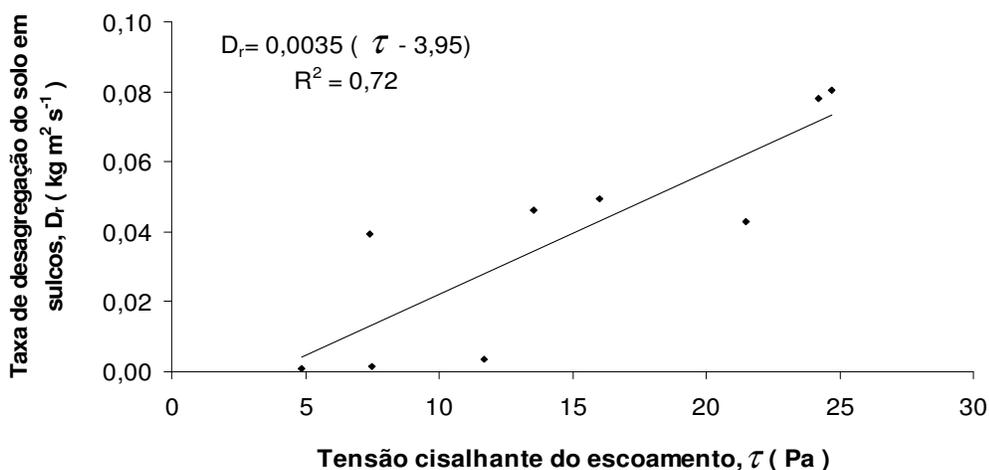
As descargas líquidas ( $Q$ ) obtidas diferiram para os incrementos de fluxos aplicados, variando entre 0,0360 e 0,9312 L s<sup>-1</sup>. A concentração de sedimentos na enxurrada ( $C$ ), foi maior até o fluxo extra de 6+20 L min<sup>-1</sup> e a partir desse ponto decresceu com acréscimos de fluxo extra. Nos fluxos iniciais, as forças de cisalhamento do escoamento superaram as forças coesivas do solo, ocasionando uma maior concentração de sedimento desagregado e transportado. Porém, nos fluxos subseqüentes à capacidade do solo em resistir a estas forças de desagregação e transporte pela água foram bem superiores.

Na Tabela 12 observa-se que a descarga líquida foi sempre crescente, o que é reflexo dos crescentes fluxos extras adicionados aos sulcos. No entanto, a concentração de sedimentos tornou-se decrescente a partir do fluxo extra de 20 L min<sup>-1</sup>. Esses fatos, aliados ao sempre crescente perímetro molhado do escoamento (Tabela 10), reduziu as taxas de desagregação a partir do fluxo extra de 20 L min<sup>-1</sup>. Possivelmente isso tenha ocorrido pelo fato de que com fluxos extras iguais ou maiores que 30 L min<sup>-1</sup> o escoamento tenha atingido uma camada de solo menos erodível. Nessa condição, altera-se a dinâmica da formação do sulco, o qual deixa de se aprofundar e tende a se alargar.

Apartir da relação entre as taxas médias de desagregação de solo ( $D_r$ ) obtidas com a aplicação dos fluxos extra, com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento ( $\tau$ ) (Tabela 12), foi determinada a erodibilidade em sulcos ( $K_r$ ) e a tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) (Figura 21). A erodibilidade em sulcos ( $K_r$ ) consiste no coeficiente angular  $b$  da reta obtida e a tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) corresponde ao valor do intercepto de  $\tau$ , quando  $D_r = 0$ , ou a partir da relação dos coeficientes da reta:  $\tau_c = -a/b$  (Lafren & Thomas, 1987).

Para a determinação do fator de erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e da tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ), foram considerados as taxas médias de desagregação do solo em sulcos ( $D_r$ ) relacionadas com respectivas tensões de cisalhamento do escoamento ( $\tau$ ) entre 6+0 e 6+20 L min<sup>-1</sup> de fluxo extra. Apesar de ser observado um aumento da tensão de cisalhamento do escoamento ( $\tau$ ) com o aumento da vazão, observou-se redução nas taxas médias de desagregação do solo em sulcos ( $D_r$ ) com aumento das vazões

adicionadas, a partir do fluxo de  $6+30 \text{ L min}^{-1}$  (Tabela 12). Neste momento, o fluxo concentrado atingiu a camada de solo não preparada e, conseqüentemente, menos erodível, o que proporcionou menores taxas de erosão e perdas totais de solo com a aplicação de maiores vazões. Portanto, o solo estudado pode ser considerado bastante susceptível ao sulcamento, de forma que com adição de fluxo extra de  $6+30 \text{ L min}^{-1}$ , atingiu a camada não erodível, observando redução nas taxas médias de desagregação do solo em sulcos ( $D_r$ ).



**Figura 21.** Erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) e tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ), obtidas a partir do ajuste da equação de regressão das taxas de desagregação do solo ( $D_r$ ) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento ( $\tau$ ), observadas com a aplicação dos fluxos extras no escoamento superficial gerado pela chuva simulada, em sulcos pré-formados e recém-preparado.

O valor do fator de erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) obtido em condição de campo foi de  $0,0035 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  enquanto a tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ) foi de  $3,95 \text{ Pa}$  (Figura 21). Os valores de  $K_{rb}$  e  $\tau_{cb}$ , estimado por meio de equações de regressão do modelo *WEPP* (Equações 35 e 36) foram, respectivamente, de  $0,0071 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  e  $3,50 \text{ Pa}$ .

Observou-se que os valores obtidos, sob condição de campo, comparado aos valores estimado por meio de equações do modelo *WEPP*, para o parâmetro  $K_r$ , a diferença entre ambos foi elevada, porém para o

parâmetro  $\tau_c$  essa diferença foi bem menor. Isto demonstra que equações para estimativas de parâmetros usadas no modelo de predição da erosão hídrica *WEPP* devem ser avaliadas e, ou, calibradas antes de serem extensivamente utilizadas para dada condição edafoclimática, tendo em vista que estas equações foram ajustadas com informações diferentes daquelas para as quais o modelo está sendo aplicado. Portanto, a determinação destes parâmetros para dada condição em estudo, ou o ajuste de equações que contemple informações locais, é de fundamental importância para realizar simulações significativas.

Os valores dos fatores  $K_r$  e  $\tau_c$  obtidos no presente estudo, sob condição de campo, apresentaram diferença quando comparados aos valores obtidos por diversos autores para diferentes solos. Cantalice et al. (2005) obtiveram valores de  $K_r$  e  $\tau_c$  inferiores aos valores obtidos no presente estudo para as condições de campo e estimado por meio de equações de regressão do modelo. Já os valores de  $K_r$  e  $\tau_c$  obtidos por Gonçalves (2008) foram expressivamente superior e inferior.

A diferença dos resultados encontrados principalmente entre os diferentes solos pode ser explicada pela diferença de gênese e pelo comportamento de cada de solo. No entanto, esses valores de  $K_r$  e  $\tau_c$  podem ser utilizados em modelos físicos que separam a erosão em sulcos e em entressulcos.

A estimativa dos fatores  $K_r$  e  $\tau_c$  por equações da rotina interna do modelo *WEPP* (Equações 35 e 36) superestimou em 2,0 vezes o fator  $K_r$  e subestimou o fator  $\tau_c$ .

#### **4.1.3 Condutividade hidráulica saturada do solo**

A condutividade hidráulica é o parâmetro fundamental na determinação da taxa de infiltração no modelo *WEPP*, sendo utilizada para tal determinação a equação de Green-Ampt. Este parâmetro é calculado internamente no *WEPP* como uma função do tipo de solo e do teor de umidade (Alberts et al. 1995).

Em estudo realizado por Tiscareno-Lopez et al. (1993) por meio de análises de sensibilidade do modelo *WEPP*, foram observados que as previsões hidrológicas e de erosão do modelo são muito sensíveis para atributos que definem um evento e para o parâmetro de condutividade hidráulica saturada. Algum decréscimo em condutividade hidráulica saturada ou aumento em conteúdo de água no solo aumentam o potencial de desagregação de partículas do solo pelo escoamento superficial.

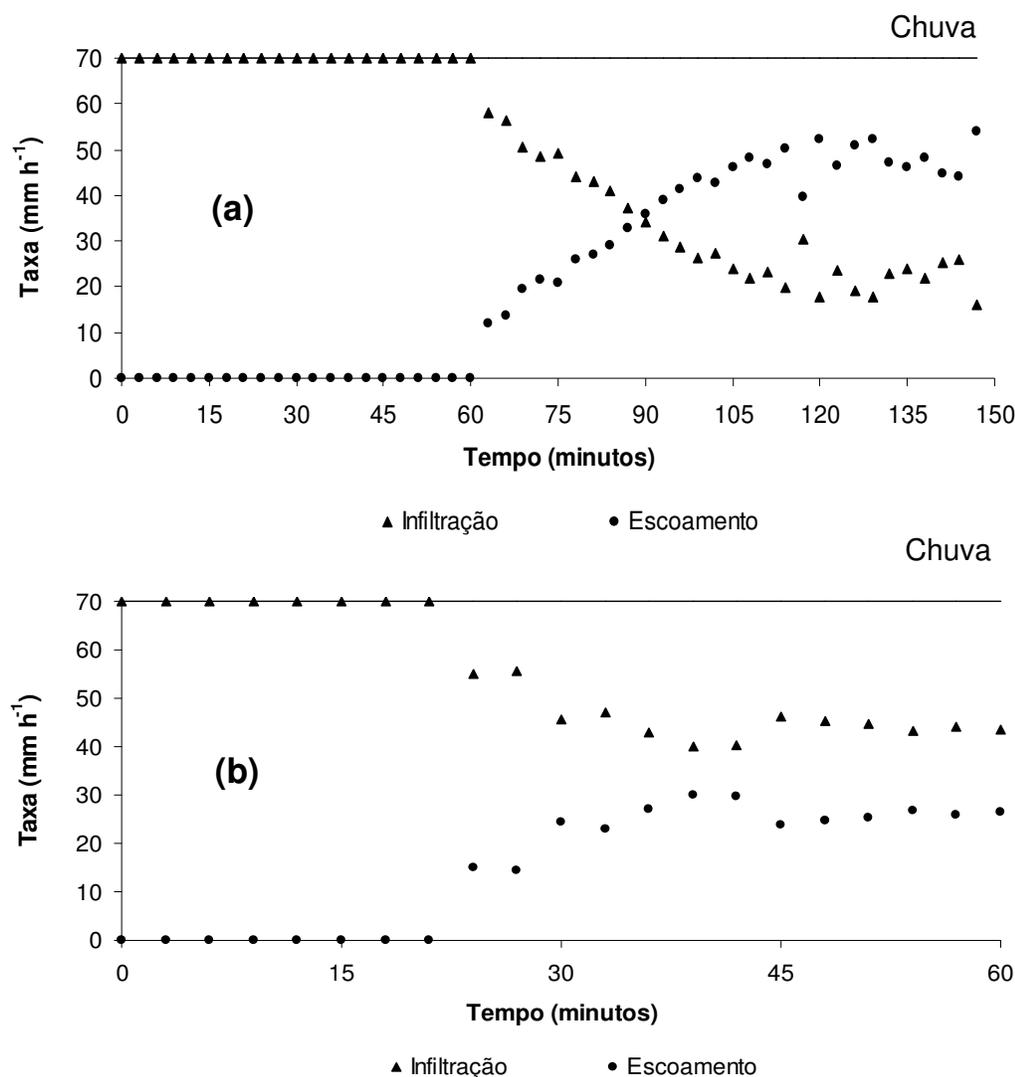
#### **4.1.3.1 Condutividade hidráulica do solo obtida com simulador de chuvas**

A condutividade hidráulica saturada foi avaliada na condição de campo quando da aplicação de chuva simulada nos experimentos para avaliação da erosão do solo em entressulcos e da erosão do solo em sulcos. A aplicação de chuva, com intensidade de  $70 \text{ mm h}^{-1}$ , nas parcelas de erosão em entressulcos, permaneceu até o momento em que o volume de escoamento se manteve constante, o que ocorreu entre 120 e 150 minutos. Nas parcelas de erosão em sulcos, a aplicação de chuva com  $70 \text{ mm h}^{-1}$  de intensidade ocasionou que o escoamento superficial se mantivesse relativamente estável entre 45 e 60 minutos de chuva. Durante o período em que o escoamento permaneceu constante, a condutividade hidráulica saturada foi admitida como sendo, a taxa de infiltração constante estimada pela diferença entre a taxa de chuva e a taxa de escoamento.

Nas determinações experimentais, observaram-se três fases relacionadas à dinâmica do processo de infiltração de água no solo e escoamento superficial (Figura 22a e 22b). Em uma fase inicial, verificou-se uma elevada taxa de infiltração de água no solo, principalmente nas parcelas de erosão em entressulcos. Nesta condição, observou-se início do escoamento superficial depois de transcorrido um período de 60 minutos de realização do teste (Figura 22a). Nas parcelas de erosão em sulcos esse tempo foi bem inferior, iniciando o escoamento superficial depois de transcorridos 15 minutos de aplicação da chuva simulada (Figura 22b).

Após iniciar o escoamento superficial, verificou-se uma tendência crescente, até aproximadamente 120 minutos de teste nas parcelas de erosão em entressulcos e 45 minutos nas parcelas de erosão em sulcos.

Na última fase, observou-se uma tendência de equilíbrio entre a taxa de infiltração e escoamento superficial, principalmente nas parcelas de erosão em entressulcos. Essa tendência de equilíbrio ocorreu por volta de 120 minutos de realização do teste. Considerando a média dos últimos pontos amostrais, o valor da condutividade hidráulica do solo nesta condição foi de  $22 \text{ mm h}^{-1}$ .



**Figura 22.** Taxa de infiltração de água e escoamento superficial sob chuva simulada em parcelas de erosão do solo em entressulcos (a) e em sulcos (b) sob condição experimental de campo.

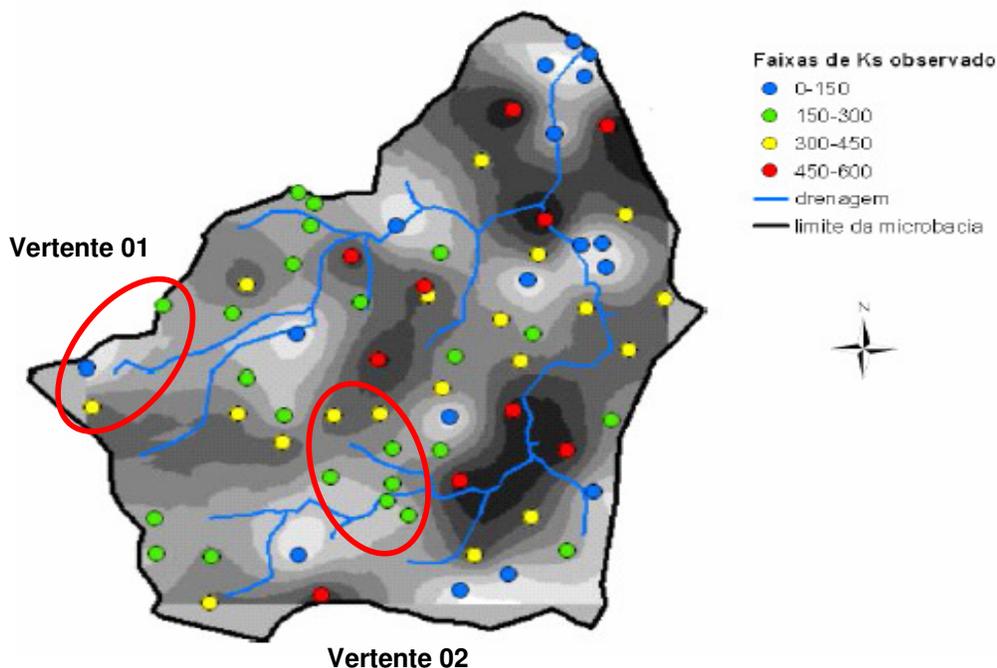
Nas parcelas de erosão em entressulcos nas condições de campo, a umidade gravimétrica inicial do solo era de  $0,13$  e  $0,18 \text{ kg kg}^{-1}$ , referente às camadas de  $0-10$  e  $10-20$  cm de profundidade, respectivamente (Apêndice 3).

Nessas parcelas a capacidade de infiltração foi elevada, permanecendo por um longo período de aplicação da chuva simulada, até atingir uma tendência de estabilização que ocorreu após um período 120 minutos do início do teste. Nas parcelas de erosão em sulcos, a umidade variou entre 0,20 e 0,30 kg kg<sup>-1</sup>, na camada de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, respectivamente (Apêndice 4). Nessas parcelas as taxas de infiltração foram maiores atingindo valores constantes entre 45 e 60 minutos, com a taxa ao redor de 45 mm h<sup>-1</sup> (Figura 22b).

Deve-se considerar que a dinâmica de infiltração de água no solo e escoamento superficial foi diferenciada entre ambas as determinações. Nas parcelas de erosão em entressulcos, observou-se uma tendência de equilíbrio entre a taxa de infiltração e escoamento superficial. Na condição de sulcos pré-formados no sentido do declive, a alteração na superfície do solo pode ter alterado a dinâmica do processo de infiltração de água no solo. Dessa forma, para as simulações com o modelo *WEPP* foi utilizado o valor da taxa constante de infiltração de 22 mm h<sup>-1</sup> determinada nas condições experimentais de erosão em entressulcos, como valor da condutividade hidráulica saturada do solo. Esse valor é uma média dos últimos pontos amostrais (Figura 22a).

#### **4.1.3.2 Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) obtida com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente**

Valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) foram determinados por Dalbianco (2009) em amostras de solo coletadas na mesma área com auxílio de um permeâmetro de carga decrescente. As determinações foram efetuadas em amostras de solo coletadas com estrutura preservada na camada 0-5 cm em uma malha irregular distribuídos nas vertentes em estudo, como pode ser visualizado em regiões de destaque circular na Figura 23. Com os valores de Ksat em cada ponto amostrado foi possível a obtenção de valores médios representativos da para cada vertente simulada. Nas condições estudadas por Dalbianco (2009), os valores de Ksat foram 230 e 378 mm h<sup>-1</sup>, para a primeira e segunda vertente, respectivamente.



**Figura 23.** Mapa da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ,  $\text{mm h}^{-1}$ ) (Dalbianco, 2009).

Conforme valores médios obtidos e faixas de  $K_{sat}$  observados (Figura 23) nas duas vertentes, verificou-se ser um atributo de grande variabilidade amostral. Essa variabilidade refletiu-se nos valores observados entre diferentes sistemas de manejo analisados no estudo, onde nos sistemas de manejo com vegetação permanente, os valores médios obtidos variaram entre 128 e 410  $\text{mm h}^{-1}$ , para campo nativo e mata nativa, respectivamente. Entre os sistemas de manejo com cultivo, os valores médios obtidos na bacia foram de 263, 274 e 301  $\text{mm h}^{-1}$ , para as condições de plantio direto, preparo mínimo e convencional, respectivamente (Dalbianco, 2009). O mesmo autor menciona que a variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado neste estudo, avaliada pelo coeficiente de variação, foi alta (53%). Além da elevada variabilidade espacial é importante considerar que de acordo com classes de condutividade hidráulica descrito segundo Cauduro & Dorfman (1990), os valores obtidos deste parâmetro foram considerados de rápida a muito rápida. O que não condiz com a classe textural dos solos (franco argilo siltosa e franco argilosa). Entretanto a presença de rochas e fragmentos de rochas podem contribuir significativamente para o aumento da condutividade hidráulica.

Comparando os resultados de condutividade hidráulica do solo saturado obtida em amostras de solo e feita com o auxílio de permeâmetro em relação aos resultados obtidos em parcelas experimentais sob chuva simulada por ocasião da determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos (Figuras 22a e 22b), pode-se verificar elevada diferença entre métodos de determinação. Klein (2008) menciona que os equipamentos simuladores de chuva são uma excelente opção para a determinação real da infiltração da água no solo, pois simulam o tamanho e a velocidade das gotas da chuva, obtendo o real efeito do selamento e desagregação que excede sobre a superfície do solo, diminuindo a infiltração.

A textura e a estrutura são as características que mais influenciam a movimentação de água no solo, uma vez que determinam a quantidade de macroporos, que é um fator determinante da condutividade hidráulica do solo. Também interferem expressivamente na infiltração a distribuição, a forma e a continuidade de poros.

Na caracterização granulométrica do solo (Tabela 4), observou-se que em média  $442 \text{ g kg}^{-1}$  da fração granulométrica é formado por silte, que é justamente uma fração considerada facilmente erodível devido a pouca coesividade e facilidade de transporte. Uma vez desagregadas estas partículas preenchem os vazios do solo, dificultando a passagem de água.

Segundo Rawls et al. (1996) e Reichert et al. (1992), outros fatores que afetam a capacidade de infiltração de água estão relacionados: às características do solo, como tamanho dos agregados, propriedades químicas, retenção de água no solo e umidade; à superfície, tais como cobertura vegetal, profundidade do sistema radicular, resíduos culturais, atividade biológica, declividade, rugosidade, histórico de uso e manejo; a processos relacionados ao clima, impacto das gotas de chuva, mudança de temperatura e umidade; e às características da água, tais como viscosidade e a presença de carga hidráulica na superfície do solo.

Solos arenosos possuem, em geral, maior quantidade de macroporos do que solos siltosos e argilosos, e conseqüentemente, apresentam maior condutividade hidráulica e maior taxa de infiltração. Todavia, deve-se ressaltar que solos argilosos bem estruturados podem possuir condutividade hidráulica que os solos com estrutura instável, apresentando,

assim, maior taxa de infiltração. Esta maior estabilidade dos agregados de solos argilosos é causada pela presença de agentes cimentantes, que são representados principalmente pela matéria orgânica e pelos óxidos de Fe e Al (Kampf & Curi, 2003; Silva & Kato, 1997). Soma-se a este o fato de que quanto maior a resistência dos agregados à desestruturação, tanto menor será a formação do encrostamento superficial, uma vez que uma das principais etapas de sua formação consiste na quebra dos agregados pelo impacto das gotas de chuva (Hillel, 1980; Brandão et al., 2006).

#### **4.2 Simulações da dinâmica de desagregação e deposição de sedimentos pelo modelo *WEPP* e estimados pelo método de redistribuição do “fallout” <sup>137</sup>Césio**

##### **4.2.1 Simulações realizadas com dados do componente solo ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo**

As médias dos valores anuais para diferentes períodos de simulação pelo modelo *WEPP* referentes à precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos foi efetuado utilizando-se os valores de  $0,64 \times 10^{-6} \text{ kg s m}^{-4}$  para erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) (Tabela 11),  $0,0035 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  e  $3,95 \text{ Pa}$  para erodibilidade do solo em sulcos e tensão crítica de cisalhamento ( $K_r$  e  $\tau_c$ ), respectivamente (Figura 21) e  $22 \text{ mm h}^{-1}$  para condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ) (Figura 22a) obtidos sob condição experimental de campo encontram-se na Tabela 13. Observou-se que, entre as vertentes estudadas, as médias dos valores anuais entre os períodos simulados para precipitação apresentaram amplitude de variação entre 1751 e 1790 mm. Em relação aos valores obtidos de escoamento superficial, a primeira vertente apresentou volume de escoamento variando 333 a 386 mm, enquanto na segunda essa variação foi de 334 a 381 mm.

**Tabela 13.** Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo.

Simulação	Segmento	Precipitação	Escoamento	Produção de sedimentos
ano	m	mm	mm	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
<u>Vertente 01</u>				
1	142	1751	333	10,83
25	142	1790	386	10,07
50	142	1778	373	5,05
100	142	1761	366	2,38
----- <u>Vertente 02</u>				
1	199	1751	334	6,39
25	199	1790	381	8,69
50	199	1778	368	4,78
100	199	1761	361	2,26

Nas duas condições, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos, os coeficientes de escoamento superficial foram de 19 e 21 % na primeira vertente e 19 e 20 % na segunda vertente, obtidos por meio da relação entre a lâmina de escoamento superficial e a lâmina precipitada. Assim, do total de chuva precipitado, 81 e 79 % infiltraram no solo e 19 e 21 % resultaram em escoamento superficial, na primeira vertente. Na segunda vertente, do total de chuva precipitado, 81 e 80 % infiltraram no solo e 19 e 20 % resultaram em escoamento superficial.

Minella et al. (2009) verificaram trabalhando em uma escala de pequena bacia (1 km<sup>2</sup>), onde situam-se as duas vertentes, valores de coeficientes de escoamento de 16 e 35 % obtidos de valores médios de eventos monitorados durante o período de maio de 2002 a março de 2006 e de evento extremo ocorrido em 25/10/2003, respectivamente. Nesta comparação entre os valores simulados pelo modelo *WEPP* e observados por meio de monitoramento da bacia, observa-se que os valores de coeficientes de escoamento simulados, nas duas vertentes estudadas, se assemelharam aos valores médios obtidos na bacia.

Associado ao volume de escoamento superficial, as médias dos valores anuais entre os períodos simulados para produção de sedimentos na primeira vertente foi maior, principalmente no período de 1 ano de simulação, com valor de  $10,83 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Comparando esse mesmo período, com o valor de  $6,39 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  da segunda vertente, observa-se uma variação de 61 % na produção de sedimentos obtido entre as duas condições (Tabela 13).

As atividades relacionadas a operações de preparo solo, montagem de camalhão, abertura de linha de plantio, implantação de cultura anual (fumo) e planta de cobertura de inverno (aveia) foram iguais entre as duas condições. No entanto, as características de relevo foram diferenciadas, com a primeira vertente possuindo comprimento de 142 m e declividade média de  $0,085 \text{ m m}^{-1}$  e a segunda vertente com 199 m de comprimento e declividade média de  $0,086 \text{ m m}^{-1}$ . A Diferença principal entre as vertentes está no formato diferenciado, onde na primeira vertente tem um perfil de encosta convexo e na segunda vertente um perfil de encosta côncavo (Figuras 13a e 13b).

Entre anos de simulação realizados observou-se uma ampla variação na produção de sedimentos. Na primeira vertente os valores variaram entre  $10,83$  e  $2,38 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e na segunda vertente os valores variaram entre  $8,69$  e  $2,26 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Tabela 13). Porém, observa-se que à medida que aumenta o número de anos de simulação, a produção de sedimentos diminui. Provavelmente isso esteja relacionado com a estabilidade do modelo. Baffaut et al. (1996) conduziram um estudo de simulação usando o modelo *WEPP* visando determinar quantos anos de simulação seriam necessários para obter uma estimativa estável de erosão a longo prazo. Os resultados indicaram uma necessidade por períodos de simulação que chega 150 anos para alcançar estabilidade. Em geral, o tempo de simulação tendeu para decrescer como uma função da magnitude de perda de solo medida. No entanto, a relação entre o número de anos necessário de simulação e a média anual de perdas de solo foi considerada baixa.

Na Tabela 14 estão apresentados às médias dos valores anuais simulados de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento de cada fase do processo erosivo nas duas vertentes estudadas.

**Tabela 14.** Médias dos valores anuais de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo.

Simulação	Segmento	Desagregação		Deposição	
		Média	Comp. <sup>(1)</sup>	Média	Comp. <sup>(1)</sup>
ano	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m
<u>Vertente 01</u>					
1	142	10,83	142,0	0,00	0,0
25	142	10,26	140,5	0,19	1,5
50	142	5,13	140,5	0,08	1,5
100	142	2,47	140,5	0,09	1,5
<u>Vertente 02</u>					
1	199	6,39	199,0	0,00	0,0
25	199	10,78	191,0	1,24	8,0
50	199	5,37	191,0	0,59	8,0
100	199	2,58	191,0	0,32	8,0

<sup>(1)</sup> Comprimento de cada segmento (desagregação e deposição de sedimento) ao longo de cada vertente.

Entre os valores obtidos nessas fases do processo erosivo, verificou-se uma maior taxa de desagregação na primeira vertente, principalmente no período de 1 ano de simulação. Nos demais períodos de simulação, as taxas de desagregação são inferiores, porém próximos aos valores obtidos na segunda vertente. No entanto, as unidades de comprimento na primeira vertente foram inferiores.

A fase de deposição ocorre quando a carga de sedimentos a ser transportada é maior que a capacidade de transporte do escoamento (Huang & Norton, 2000; Foster et al., 1995). A primeira vertente apresentou menor taxa de deposição, com maior valor de 0,19 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no período de 25 anos de simulação e uma menor unidade de comprimento de 1,5 m. Na segunda vertente, nesse mesmo período de simulação, a taxa de deposição foi de 1,24 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em uma unidade de comprimento superior (Tabela 14). O valor da taxa de deposição obtido na segunda vertente foi 6 vezes superior ao obtido na primeira vertente.

Entre as condições estudadas, observaram-se longos comprimentos de rampa e principalmente, morfologia das encostas com diferentes formas que conferiram produção de sedimentos diferenciada (Tabela 13). Devido a um perfil de encosta convexo, verificou-se que a primeira vertente apresentou uma considerada taxa de desagregação e menor deposição, conseqüentemente maior produção de sedimentos. A segunda vertente apresentou um perfil de encosta côncavo, assim a dinâmica do processo erosivo foi diferente. Apesar de uma considerada taxa de desagregação, observou-se uma maior deposição de sedimentos.

Em estudos realizados por Golosov & Litvin (2005) verificaram que a quantidade de sedimentos depositados no terço inferior de encostas côncavas variou de 60 a 62 % em declividade até 5 % e de 20 a 22 % em declividades de 12 a 15 %.

Após ser desagregado pelo impacto da gota de chuva ou pela tensão cisalhante do escoamento concentrado, o sedimento passa a interagir com a forma do relevo. Essa interação pode ocorrer pela tensão cisalhante do escoamento, conferida pela declividade, comprimento e forma da encosta ou pela possibilidade de transporte ou deposição, conferida pela forma da curvatura e pelo microrelevo (Golosov & Litvin, 2005; Walling & Quine, 1991).

Sabe-se que, em geral, somente uma fração do total de sedimentos erodidos em uma vertente alcança a rede de drenagem, assim como em uma bacia hidrográfica alcança o exutório ou seção de medição. A essa fração denomina-se de produção de sedimentos – PS (Sediment yield – SY) (Walling, 1983). Termo este que se refere à diferença entre a erosão bruta e a quantidade de sedimentos que não foi removida, ou seja, depositada, em uma vertente ou bacia hidrográfica. A razão entre a produção de sedimentos e o total erodido denomina-se taxa de entrega de sedimentos – TES (*sediment delivery ratio* – SDR).

As médias dos valores de produção de sedimentos, considerando período de simulação 100 anos, foram de 2,38 e 2,26 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 13) e as taxas de desagregação foram de 2,47 e 2,58 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 14), na primeira e segunda vertente, respectivamente. Considerando-se a razão entre a produção de sedimentos e o total erodido nas condições estudadas, os valores percentuais da taxa de entrega de sedimentos nas vertentes foram de

96,4 % na primeira e 87,6 % na segunda.

De acordo com Walling (1983) o valor percentual da taxa de entrega de sedimentos em uma bacia hidrográfica é influenciado por vários fatores geomorfológicos e ambientais. Isto inclui a natureza, extensão e localização das fontes de sedimentos, relevo, hidrografia, condições dos canais, vegetação e do uso e tipo de solo.

Vente & Poensen (2007) e Vente & Poensen (2005) mencionam que em geral é assumido que, à medida que aumenta o tamanho de uma bacia aumenta-se a chance de deposição. Com isso menor será a taxa de transferência de sedimentos. Isto porque, com o aumento de área da bacia ocorre uma redução da declividade das áreas de jusante. Assim mais sedimento fica retido nas bases das encostas (*“footslopes”*), concavidades, planícies aluviais e outras áreas (*“sinks”*). No entanto, algumas incertezas são atribuídas à utilização de métodos, pois além da área de drenagem, outros fatores como morfologia das vertentes, tipo de vegetação, condições do canal aluvial, presença de mata ciliar entre outros, influenciam na transferência de sedimentos da bacia vertente para a calha fluvial. Para bacia até quarta ordem de magnitude, com a mesma área, há uma elevada variação na área específica de produção de sedimentos.

As médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de desagregação e deposição de sedimentos obtidos nas simulações realizadas para cada vertente são mostrados nas Tabelas 15 e 16.

Na primeira vertente o valor máximo de desagregação foi de  $50,87 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , no período de simulação de 1 ano, porém nesse período não observou-se deposição de sedimentos. Comparando ao período de simulação de 100 anos, o valor de desagregação foi em média 7 vezes inferior (Tabela 15). O valor de deposição nesse período foi de  $0,09 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Tabela 16). Na segunda vertente, observaram-se valores inferiores de desagregação, porém maior deposição de sedimentos.

Já as médias dos valores mínimos anuais obtidos referentes à desagregação foram similares entre as duas condições e a deposição de sedimentos, foi superior na segunda vertente, respectivamente (Tabelas 15 e 16).

**Tabela 15.** Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de desagregação nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo.

Simulação	Vertente	Desagregação		
		Mínimo	Médio	Máximo
ano	m	----- t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----		
<u>Vertente 01</u>				
1	142	0,27	10,83	50,87
25	142	0,23	10,26	27,04
50	142	0,12	5,13	13,53
100	142	0,06	2,47	6,56
<u>Vertente 02</u>				
1	199	0,27	6,39	37,06
25	199	0,21	10,78	23,43
50	199	0,11	5,37	11,69
100	199	0,06	2,58	5,67

**Tabela 16.** Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de deposição de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo.

Simulação	Vertente	Deposição		
		Mínimo	Médio	Máximo
ano	m	----- t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----		
<u>Vertente 01</u>				
1	142	0,00	0,00	0,00
25	142	0,19	0,19	0,19
50	142	0,08	0,08	0,08
100	142	0,09	0,09	0,09
----- <u>Vertente 02</u>				
1	199	0,00	0,00	0,00
25	199	0,29	1,24	1,86
50	199	0,08	0,59	0,93
100	199	0,04	0,32	0,51

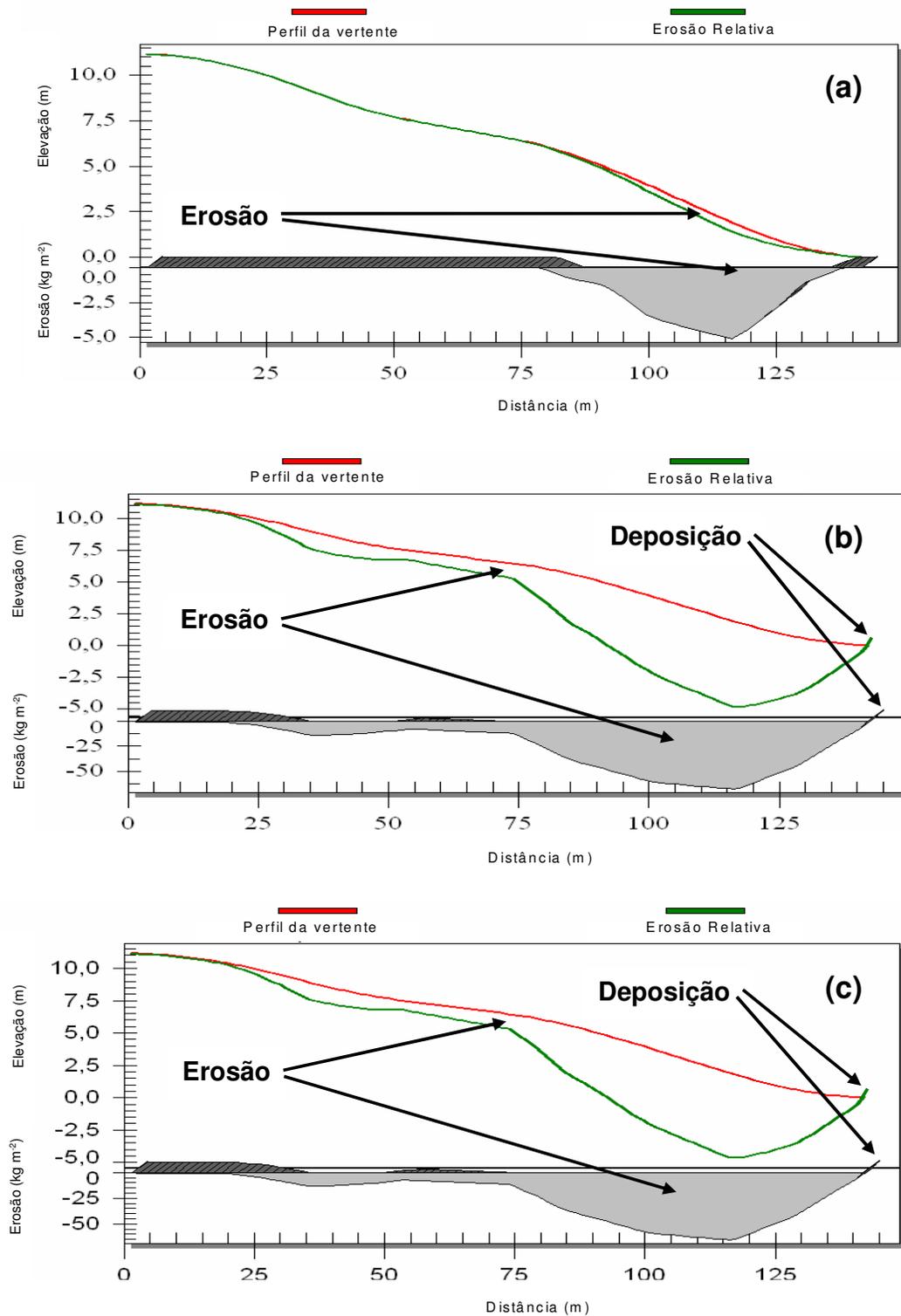
As médias dos valores anuais de produção de sedimentos nas vertentes simuladas pelo *WEPP* com dados do componente solo obtidos sob condição experimental de campo, na primeira vertente variaram entre 10,83 e 2,38 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e na segunda vertente variaram entre 8,69 e 2,26 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos (Tabela 13). À média anual da produção de sedimentos observada em cinco anos de monitoramento hidrossedimentológico na bacia de Arvorezinha foi de 1,23 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 17). Observaram-se valores simulados superiores nas condições estudadas, principalmente na primeira vertente. Os valores de produção de sedimentos simulados, na primeira vertente foram 8,8 e 1,9 vezes e na segunda vertente foram 7,1 e 1,8 vezes superiores na observado na bacia, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos.

**Tabela 17.** Resultados da produção de sedimentos anual medidas na bacia de Arvorezinha (Uzeika, 2009).

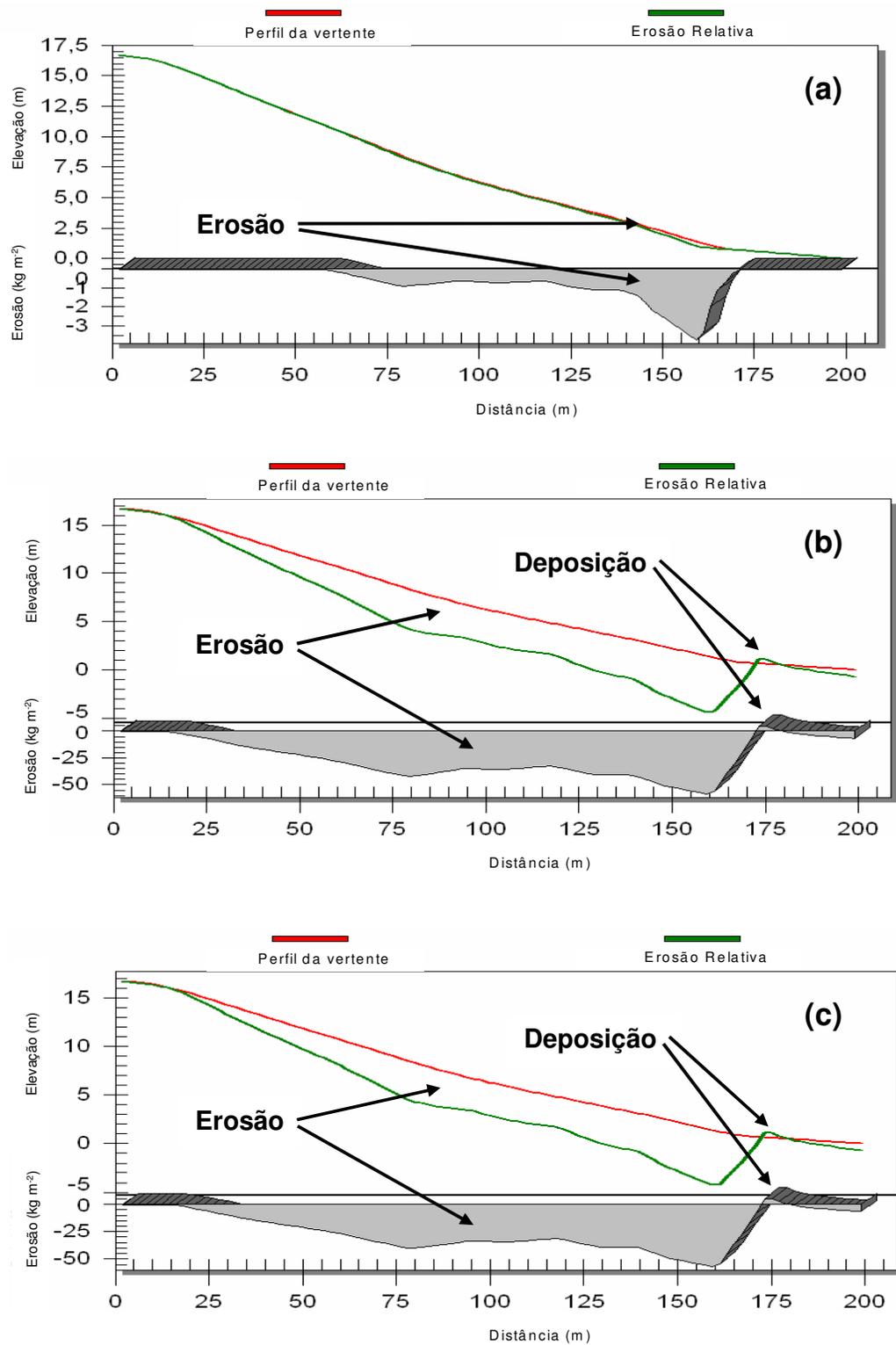
Ano	Produção de sedimentos observada
	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
2002	1,84
2003	1,94
2004	0,61
2005	1,19
2006	0,58
Média	1,23

A variação percentual na taxa de entrega de sedimentos pode ser afetada por diversos fatores. Isto inclui a textura dos solos, declividade e comprimento das vertentes, tamanho e densidade de drenagem, uso e manejo do solo e fatores climáticos como intensidade, energia e distribuição das precipitações ao longo do ano (Walling, 1994).

A distribuição espacial do processo erosivo ao longo das vertentes estudadas em diferentes anos de simulação realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo podem ser observadas nas Figuras 24 e 25.



**Figura 24.** Distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos na primeira vertente para 1 (a), 50 (b) e 100 (c) anos de simulação realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo.



**Figura 25.** Distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos na segunda vertente para 1 (a), 50 (b) e 100 (c) anos de simulação realizadas com dados do componente solo do modelo *WEPP* obtidos sob condição experimental de campo.

Observa-se que, para 1 ano de simulação, o processo erosivo foi pouco acentuado nas duas condições estudadas (Figura 24a e 25a). Alterações nas condições de superfície do solo e áreas de desagregação e deposição ao longo da encosta, pouco foram constatadas. Neste período, verificou-se apenas erosão do solo, concentrado na parte inferior da encosta e neste caso, o aporte de sedimentos foi igual às perdas de solo, não havendo deposição de sedimentos.

A dinâmica do processo erosivo em um longo período de tempo, nas duas condições estudadas, realizadas para 50 (Figuras 24b e 25b) e 100 (Figuras 24c e 25c) anos de simulação já foram bem acentuadas. O processo erosivo abrangeu praticamente toda a encosta, principalmente a primeira. Neste processo, parte do material de solo desagregado ao longo da encosta foi depositado na base da encosta.

Esta deposição observada, principalmente na segunda vertente, ocasionou menor produção de sedimentos. A carga de sedimentos desagregado na parte superior da vertente e a menor capacidade de transporte do escoamento resultaram em parte do material depositado na parte inferior da vertente. Esse fato pode estar relacionado ao formato diferenciado entre vertentes, especificamente na segunda que apresentou um perfil de encosta côncavo, o qual conferiu uma dinâmica e magnitude diferente do processo de erosão.

Encostas convexas tendem a ter um padrão de distribuição de sedimentos difuso, ou seja, a rede de entrega de sedimentos é mais ampla, removendo o sedimento e gerando poluição em áreas maiores. Nas encostas côncavas, embora os processos de remoção sejam mais intensos, há uma tendência dos sedimentos serem depositados na parte inferior da encosta, a não ser que a bacia em questão seja muito compacta e com densidade de drenagem elevada (Renschler et al. 1999).

Observações diretas realizadas por alguns autores demonstraram que o escoamento superficial, transporte e deposição de sedimentos sofrem influência do formato da vertente de maneira diferenciada em vertentes com o mesmo comprimento e declividade (Golosov & Litvin, 2005; Guerra, 2003; Bloom, 1972). Isto ocorre por que as vertentes apresentam diferentes curvaturas, dando origem a diversas combinações que podem condicionar

diferentes processos hidrológicos numa mesma declividade e comprimento de rampa.

Outro fator pode estar relacionado é a cobertura do solo, oferecida tanto pela cultura do fumo como por plantas de cobertura de inverno, reduzindo a capacidade de transporte e desprendimento de partículas. A eficiência da cobertura vegetal em reduzir as perdas de solo pode ser atribuída, principalmente, à proteção da superfície do solo proporcionada pelas copas das plantas, impedindo o impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície, diminuindo a desagregação do solo e resultando em menor produção de sedimentos. Além disso, a influência do sistema de manejo adotado, do sistema radicular das culturas e do aumento do conteúdo de carbono do solo favorece o aumento das taxas de infiltração de água no solo, como também aumentam a rugosidade superficial do solo e reduzem a tendência de encrostamento superficial, com conseqüente redução na velocidade do escoamento superficial.

#### **4.2.2 Simulações realizadas com dados do componente solo ( $K_i$ , $K_r$ , $\tau_c$ e $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo *WEPP***

Uma segunda simulação foi realizada utilizando dados do componente solo do *WEPP* estimados por equações da rotina interna do modelo. As médias dos valores anuais referentes à precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos, efetuado utilizando-se os valores de  $4,25 \times 10^{-6} \text{ kg s m}^{-4}$  para erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_{rb}$ ) estimado por meio da equação 24 e apresentado na Tabela 11,  $0,0071 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$  e  $3,50 \text{ Pa}$  para erodibilidade do solo em sulcos e tensão crítica de cisalhamento ( $K_{rb}$  e  $\tau_{cb}$ ), estimados por meio das equações 35 e 36, respectivamente, e  $3,6 \text{ mm h}^{-1}$  para condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_b$ ), estimada por meio das equação 46 são mostrados na Tabela 18.

**Tabela 18.** Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do *WEPP* ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $\tau_c$  e  $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo.

Simulação	Segmento	Precipitação	Escoamento	Produção de sedimentos
ano	m	mm	mm	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
<u>Vertente 01</u>				
1	142	1751	402	26,85
25	142	1790	685	21,36
50	142	1778	689	11,33
100	142	1761	683	5,33
<u>Vertente 02</u>				
1	199	1751	393	14,19
25	199	1790	671	12,59
50	199	1778	675	6,61
100	199	1761	669	3,28

Os valores médios de precipitação foram semelhantes entre as vertentes estudadas assim como na primeira simulação realizada utilizando dados do componente solo do modelo obtidos sob condição experimental de campo. Em relação aos valores obtidos de escoamento superficial, a primeira vertente apresentou volume de escoamento variando 402 a 689 mm, enquanto na segunda essa variação foi de 393 a 675 mm (Tabela 18). Ambas as condições apresentaram valores superiores comparadas à primeira de simulação.

Nas duas condições, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos, os coeficientes de escoamento superficial foram de 23 e 39 % na primeira vertente e 22 e 38 % na segunda vertente. Comparados a primeira simulação realizada e ao observado por meio de monitoramento da bacia, os valores dos coeficientes de escoamento superficial foram superiores.

As médias dos valores anuais entre os períodos simulados para produção de sedimentos na primeira vertente foi maior, principalmente no período de 1 ano de simulação, com valor de 26,85 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Comparando esse mesmo período, com o valor de 14,19 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> da segunda vertente, observa-se uma variação de 89 % na produção de sedimentos obtidos entre as duas condições. Ao comparar os valores obtidos no período de 100 anos, a

produção de sedimentos obtida na primeira vertente foi 1,6 vezes superior a segunda vertente (Tabela 18).

Na Tabela 19 são mostradas as médias dos valores anuais simulados de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento de cada fase do processo erosivo nas vertentes estudadas.

**Tabela 19.** Médias dos valores anuais de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do *WEPP* ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $\tau_c$  e  $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo.

Simulação	Segmento	Desagregação		Deposição	
		Média	Comp. <sup>(1)</sup>	Média	Comp. <sup>(1)</sup>
ano	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m
<u>Vertente 01</u>					
1	142	26,85	142,0	0,00	0,0
25	142	28,46	139,1	7,10	2,9
50	142	14,87	139,1	3,54	2,9
100	142	7,41	139,1	2,08	2,9
<u>Vertente 02</u>					
1	199	14,19	199,0	0,00	0,0
25	199	30,31	181,0	17,72	18,0
50	199	15,83	181,0	9,22	18,0
100	199	7,89	181,0	4,61	18,0

<sup>(1)</sup> Comprimento de cada segmento (desagregação e deposição de sedimento) ao longo de cada vertente.

Entre os valores obtidos nessas fases do processo erosivo, verificou-se uma maior taxa de desagregação na primeira vertente, principalmente no período de 1 ano de simulação. Nos demais períodos de simulação, as taxas de desagregação são inferiores, porém similares aos valores obtidos na segunda vertente. No entanto, as unidades de comprimento na primeira vertente foram inferiores.

A primeira vertente apresentou menor taxa média de deposição, com valor médio de 7,10 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no período de 25 anos de simulação e uma menor unidade de comprimento de 2,9 m. Na segunda vertente, nesse mesmo

período de simulação, a taxa média de deposição foi de  $17,72 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em uma unidade de comprimento superior (Tabela 19). A taxa média de deposição obtido na segunda vertente foi 2,5 vezes superior ao obtido na primeira vertente.

Observou-se que os valores médios obtidos de desagregação e deposição de sedimentos nessa simulação foram superestimados comparados aos valores obtidos na primeira simulação, com dados do componente solo do modelo obtidos sob condição experimental de campo (Tabelas 14).

A utilização de dados da componente solo do *WEPP* ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $\tau_c$  e  $K_{sat}$ ) obtidos sob condição experimental de campo comparados à utilização de dados estimados por equações da rotina interna do modelo nas simulações realizadas, especificamente para os períodos de simulação de 1 e 100 anos, promoveu uma redução na média dos valores anuais simulados de produção de sedimentos em 148 e 124 % na primeira vertente e 122 e 45 % na segunda vertente, respectivamente. Em relação ao escoamento superficial, a utilização da condutividade hidráulica obtida sob condição experimental de campo melhorou as médias dos valores simulados em 21 e 87 % na primeira e 18 e 85 % na segunda vertente.

Isto demonstra que as equações de regressão da rotina interna para estimativas de parâmetros usadas no modelo *WEPP* superestimaram os valores simulados. Deve-se ressaltar que nesta condição de simulação apenas dados do componente solo foram estimados por equações da rotina interna do modelo, mesmo assim apresentou influência nos resultados simulados de produção de sedimentos e escoamento superficial.

Desta forma, mesmo com a obtenção de parâmetros experimentalmente, o ajuste ou calibração dessas equações contemplando informações de determinada condição local antes de sua aplicação é de fundamental importância. Isso permite a realização de melhores simulações dos processos de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos.

Em relação às médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de desagregação de solo e deposição de sedimentos obtidos nas simulações realizadas em cada vertente podem ser visualizados nas Tabelas 20 e 21.

**Tabela 20.** Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de desagregação nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do *WEPP* ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $\tau_c$  e  $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo.

Simulação	Vertente	Desagregação		
		Mínimo	Médio	Máximo
ano	m	----- t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----		
<u>Vertente 01</u>				
1	142	2,26	26,85	114,94
25	142	1,58	28,46	68,70
50	142	0,85	14,87	35,69
100	142	0,42	7,41	17,83
-----				
<u>Vertente 02</u>				
1	199	2,13	14,19	83,53
25	199	1,62	30,31	57,84
50	199	0,87	15,83	30,07
100	199	0,43	7,89	15,02

**Tabela 21.** Médias dos valores mínimos, médios e máximos anuais de deposição de sedimentos nas vertentes estudadas, para simulações realizadas com dados do componente solo do *WEPP* ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $\tau_c$  e  $K_{sat}$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo.

Simulação	Vertente	Deposição		
		Mínimo	Médio	Máximo
ano	m	----- t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----		
<u>Vertente 01</u>				
1	142	0,00	0,00	0,00
25	142	0,10	7,10	14,10
50	142	0,01	3,54	7,07
100	142	0,28	2,08	3,88
-----				
<u>Vertente 02</u>				
1	199	0,00	0,00	0,00
25	199	0,98	17,72	46,52
50	199	0,49	9,22	23,72
100	199	0,16	4,61	12,13

As médias dos valores anuais de produção de sedimentos nas vertentes simuladas pelo *WEPP* com dados do componente solo estimados por equações da rotina interna do modelo, na primeira vertente variaram entre 26,85 e 5,33 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e na segunda vertente variaram entre 14,19 e 3,28 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos (Tabela 18). À média anual da produção de sedimentos observada em cinco anos de monitoramento hidrossedimentológico na bacia de Arvorezinha foi de 1,23 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 17). Observaram-se valores obtidos nessa forma de simulação bem superiores nas condições estudadas, principalmente na primeira vertente. Os valores de produção de sedimentos simulados, na primeira vertente foram 21,8 e 4,3 vezes e na segunda vertente foram 11,5 e 2,7 vezes superiores na observado na bacia, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos.

Nessa forma de simulação realizada utilizando dados do componente solo estimados por equações da rotina interna do modelo, os valores médios da produção de sedimentos obtidos, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos, na primeira vertente foram 2,5 e 2,2 vezes e na segunda vertente foram 2,2 e 1,5 vezes superiores comparados aos valores médios de produção de sedimentos obtidos na primeira simulação realizada, que utilizaram dados do componente solo obtidos sob condição experimental de campo.

#### **4.2.3 Outras formas de simulação realizadas utilizando diferentes dados de entrada no modelo *WEPP***

Outras formas de simulação utilizando o modelo *WEPP* foram realizadas, com dado de entrada no modelo obtido experimentalmente sob condições de campo e laboratório e estimados por equações da rotina interna do modelo, visando à avaliação da produção de sedimentos em cada vertente estudada, conforme apresentados na Tabela 22. Nos apêndices 8 e 10 são apresentados os dados de precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos para simulações realizadas na primeira e segunda vertente, respectivamente. As taxas de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento para simulações realizadas na primeira e segunda vertente, são apresentados nos apêndices 9 e 11, respectivamente.

**Tabela 22.** Médias dos valores anuais de produção de sedimentos nas vertentes estudadas, para diferentes formas de simulações realizadas com o modelo *WEPP*.

Simulação	Produção de Sedimentos ( $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ )				
	S_III <sup>(1)</sup>	S_IV <sup>(2)</sup>	S_V <sup>(3)</sup>	S_VI <sup>(4)</sup>	S_VII <sup>(5)</sup>
ano	Vertente_01				
1	11,10	11,50	22,65	11,62	3,33
25	10,01	10,27	8,71	21,92	7,74
50	5,00	5,11	4,19	11,47	3,98
100	2,34	2,42	1,74	5,65	1,86
Ano	Vertente_02				
1	6,66	7,07	14,42	5,04	2,09
25	9,53	9,63	6,08	14,44	6,23
50	4,78	4,81	2,90	7,53	3,28
100	2,27	2,29	1,35	3,75	1,56

<sup>(1)</sup> Simulações realizadas com dado do fator de erodibilidade do solo em entressulcos do modelo *WEPP* ( $K_i$ ) obtido sob condição experimental de laboratório.

<sup>(2)</sup> Simulações realizadas com dado do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) estimado por equação da rotina interna do modelo *WEPP*.

<sup>(3)</sup> Simulações realizadas com dados dos fatores de erodibilidade do solo em sulcos e tensão crítica de cisalhamento ( $K_r$  e  $\tau_c$ ) estimados por equações da rotina interna do modelo *WEPP*.

<sup>(4)</sup> Simulações realizadas com dado do fator de condutividade hidráulica ( $K_{sat}$ ) estimado por equação da rotina interna do modelo *WEPP*.

<sup>(5)</sup> Simulações realizadas com dado do fator de condutividade hidráulica ( $K_{sat}$ ) realizado com amostras com estrutura preservada feito com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente (Dalbianco, 2009).

As simulações realizadas utilizando dado do fator  $K_i$  obtido sob condição experimental de laboratório (Tabela 22), apresentou valores médios anuais de produção de sedimentos em cada vertente praticamente semelhante aos valores obtidos nas simulações utilizando dado do fator  $K_i$  sob condição experimental de campo (Tabela 13), apesar dos valores do fator  $K_i$  nas duas condições, terem diferido significativamente. Nesta simulação, considerando períodos de simulação de 1 e 100 anos, os valores médios de produção de sedimentos obtidos na primeira vertente foram 11,10 e 2,34  $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$  e na segunda vertente foram de 6,66 e 2,27  $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$  (Tabela 22). Na primeira simulação realizada utilizando o valor do fator  $K_i$  obtido sob condição experimental de campo, os valores de produção de sedimentos foram de 10,83

e  $2,38 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na primeira vertente e  $6,39$  e  $2,26 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na segunda vertente (Tabela 13). Porém, nas simulações utilizando dado do fator  $K_i$  estimado por equação da rotina interna do modelo *WEPP*, os valores médios anuais de produção de sedimentos foram superiores comparados às simulações realizadas utilizando dados do fator  $K_i$  obtido sob condições experimentais de campo e laboratório. Nesta condição o dado do fator  $K_i$  foi superestimado comparado às condições experimentais de campo e laboratório (Tabela 11) e devido à sensibilidade do modelo *WEPP* a este parâmetro como entrada, os valores médios anuais de produção de sedimentos foram superiores.

Ao simular a produção de sedimentos utilizando valores dos fatores de  $K_r$  e  $\tau_c$  estimados por equações da rotina interna do modelo, considerando os mesmos períodos de simulação reportados anteriormente (1 e 100 anos), as médias dos valores simulados foram superestimados e subestimados em 109,1 e 36,8 % referente à primeira vertente e 125,7 e 67,4 % na segunda vertente, respectivamente, comparados aos valores médios de produção de sedimentos obtidos nas simulações realizadas com dados dos fatores  $K_r$  e  $\tau_c$  obtidos sob condição experimental de campo (Tabela 13).

Nas simulações utilizando o  $K_{sat}$  estimado por equação da rotina interna do modelo, a produção média de sedimentos simulada nas duas vertentes foram superestimados em 7,3 e 137,4 % na primeira e 26,8 e 65,9 % na segunda, comparados aos valores médios de produção de sedimentos obtidos nas simulações realizadas com dado obtido sob condição experimental de campo (Tabela 13).

Alberts et al. (1995) mencionam que o modelo *WEPP* é muito sensível a valores de entrada para parâmetros de erodibilidade do solo em entressulcos, erodibilidade do solo em sulcos e tensão crítica de cisalhamento. Os valores médios de produção de sedimentos diferenciada entre as formas de simulação realizadas, provavelmente sejam devido à considerada sensibilidade destes parâmetros.

Na última simulação realizada utilizaram-se valores de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) obtidos por Dalbianco (2009) em amostras de solo coletadas na mesma área e feito com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente. Os valores médios da produção de sedimentos obtidos nas

duas vertentes foram subestimados nessa simulação comparados aos valores de produção de sedimentos obtidos na primeira simulação realizada, que utilizou dado de Ksat obtido por meio de simulador de chuva.

Nearing et al. (1990) realizaram análises de sensibilidade no modelo de erosão *WEPP* versão vertente e concluíram que a erodibilidade do solo em sulcos, a superfície coberta em sulcos e os fatores de fricção hidráulica nos sulcos são os fatores mais importantes em termos de resposta do modelo. Textura também é uma importante propriedade no modelo. Condutividade hidráulica saturada e erodibilidade do solo em entressulcos apresentaram sensibilidade moderada na série de parâmetros. Porém, a influência destes fatores em predições depende das condições específicas. Erodibilidade do solo em entressulcos é mais importante em declives curtos e planos. Condutividade saturada é mais importante para eventos curtos e menor intensidade e menos importante para largos eventos. Cobertura em entressulcos é importante quando a erosão em entressulcos é grande.

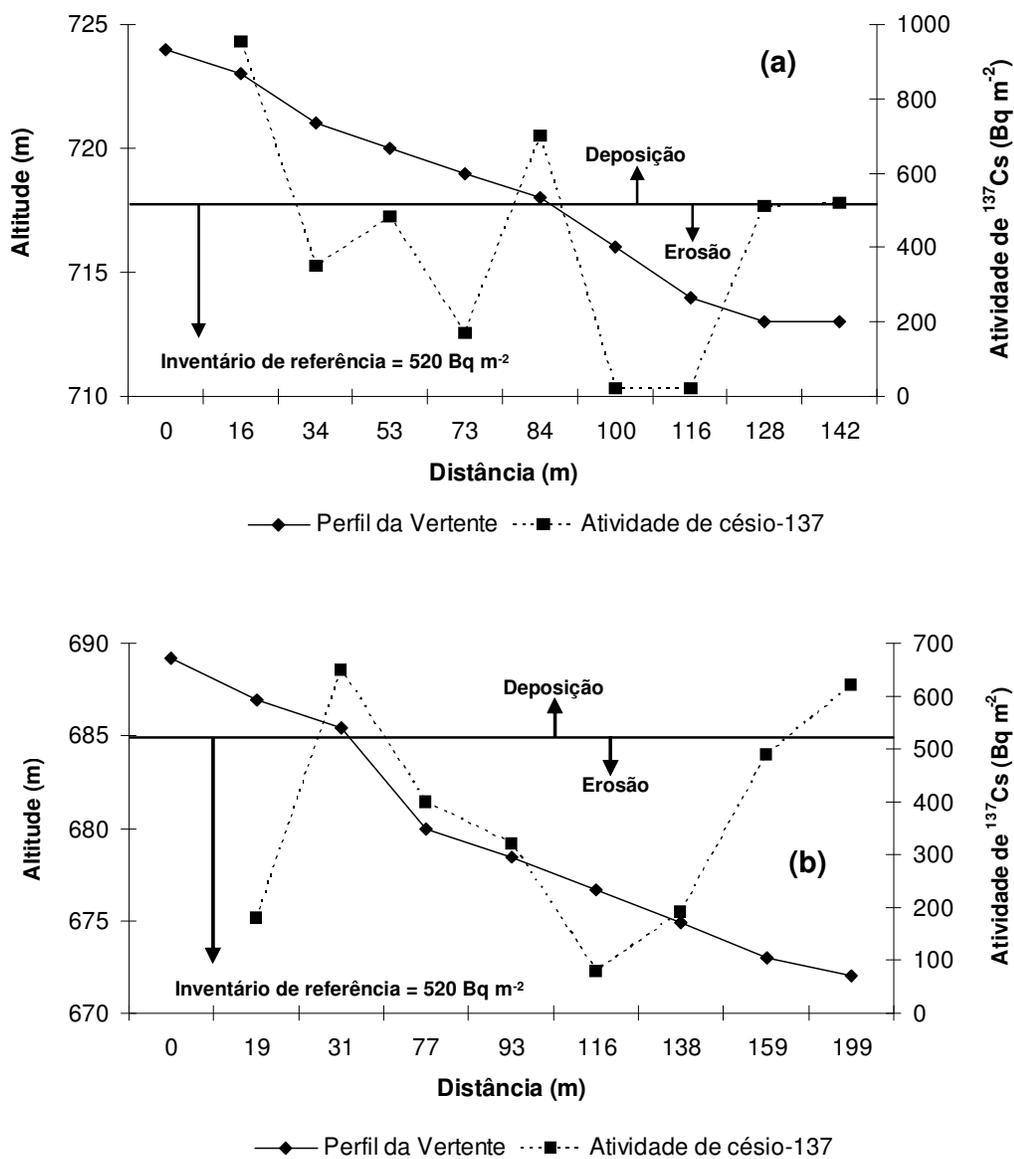
Em trabalho realizado com o modelo *WEPP*, Amorim (2004) concluiu que o modelo apresentou uma sensibilidade elevada aos parâmetros do banco de dados referentes às características de solo, destacando-se como os mais críticos a tensão crítica de cisalhamento, a condutividade hidráulica e os fatores de erodibilidade em entressulcos e em sulcos.

Gonçalves (2008) efetuando a validação do modelo *WEPP* para a condição edafoclimática da região de Viçosa – MG, concluiu que a utilização dos parâmetros de solo, obtidos experimentalmente, como dados de entrada no modelo melhorou em média 306% as estimativas de perdas de solo e em 135% as perdas de água.

Tiscareno-Lopez et al. (1993) em estudo realizado por meio de análises de sensibilidade do modelo *WEPP*, indicaram que os resultados de predições hidrológicas e erosão são muito sensíveis para atributos que define um evento (quantidade, duração e intensidade de pico) e para o parâmetro de condutividade hidráulica saturada.

#### 4.2.4 Distribuição espacializada dos inventários de $^{137}\text{Cs}$ nas vertentes estudadas

Na Figura 26 são apresentados a distribuição espacializada dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  nas duas vertentes estudadas (26a e 26b).



**Figura 26.** Distribuição dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  na primeira (a) e segunda (b) vertente estudada (informações cedidas pelos professores Gustavo Henrique Merten – IPH/UFRGS e Jean Paulo Gomes Minella – CCR/UFSM).

Através da Figura 26a pode-se observar que na primeira vertente a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  apresentou uma variação ao longo da vertente. Perfis de amostragem foram encontrados com atividade de  $^{137}\text{Cs}$  superiores e inferiores ao inventário de referência, indicando possíveis áreas de erosão e deposição de sedimentos ao longo da vertente em estudo. Na cota mais elevada, mediana e inferior da vertente observaram-se perfis com atividade de  $^{137}\text{Cs}$  superiores ao inventário de referência, indicando áreas de deposição de sedimentos.

A maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$  na posição mediana da primeira vertente, pode estar relacionado à visível elevação do relevo formando um terraço natural que favorece em parte a deposição de sedimentos e ao sistema de preparo do solo realizado por meio de aração que promove uma mobilização do solo. No entanto, parte da carga de sedimentos não depositada nesse ponto e associada com sedimentos desagregados no terço final da vertente, resultou em área de deposição, onde verificou-se atividade de  $^{137}\text{Cs}$  superior comparado ao inventário de referência no último perfil amostrado.

Na segunda vertente (Figura 26b), apesar uma variação na atividade de  $^{137}\text{Cs}$ , a dinâmica do processo foi diferente em relação ao observado na primeira vertente, principalmente na parte superior e mediana da vertente. Na posição superior observou-se menor atividade de  $^{137}\text{Cs}$  quando comparado ao inventário de referência, indicando intenso processo erosivo. Parte da carga de sedimentos desagregada nessa posição foi depositada na seguinte, onde no perfil de amostragem observou-se maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$ . Na posição mediana da vertente, menor atividade de  $^{137}\text{Cs}$  foi verificada, sendo caracterizada por um processo de desagregação, onde parte da carga de sedimentos foi depositada na parte inferior da vertente, verificado através da maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$  comparada ao inventário de referência.

Em ambas as condições, a maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$  na posição inicial e mediana pode estar diretamente relacionada ao formato das vertentes e, principalmente ao sistema de preparo do solo realizado por meio de aração com tração animal, que promove uma intensa mobilização do solo, necessário na formação de camalhões, caracterizando uma erosão por preparo (Tiessen et al. 2010). Esta prática promove o deslocamento de grande quantidade de solo favorecendo para que haja maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$  neste material de solo mobilizado.

### **4.3 Comparação da dinâmica de desagregação e deposição de sedimentos simulados pelo modelo *WEPP* e estimados pelo método de redistribuição do “fallout” $^{137}\text{Césio}$ de forma espacializada ao longo das vertentes estudadas**

No item 4.2.1 foram apresentados a distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos ao longo das vertentes estudadas (Figuras 24 e 25) para os períodos de simulação de 1, 50 e 100 anos simulados pelo modelo *WEPP* com dados do componente solo obtidos sob condição experimental de campo. No item 4.2.4 foram apresentados os dados de atividade do  $^{137}\text{Césio}$  em pontos amostrais ao longo das encostas (Figuras 26a e 26b) estimados pelo método de redistribuição do “fallout”  $^{137}\text{Cs}$ . Algumas relações referentes à dinâmica do processo erosivo nas duas condições entre os dois métodos são discutidas a seguir.

A distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos ao longo das encostas, para o período de 1 ano de simulação, nas duas condições estudadas, podem ser observados nas Figuras 24a e 25a. Ao comparar a distribuição espacial do processo erosivo realizado pelo modelo *WEPP* em relação à distribuição espacializada dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  (Figuras 26a e 26b), observa-se não apresentar a mesma tendência entre os métodos de determinação. Na simulação pelo *WEPP* para esse período observou-se apenas desagregação, enquanto na distribuição espacializada dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  observou-se uma variação ao longo da vertente, indicando possíveis áreas de desagregação e deposição de sedimentos. Conforme evidenciado por Baffaut et al. (1996) para que o modelo *WEPP* represente satisfatoriamente o processo erosivo, o período de simulação é fundamental para que haja uma estabilidade do modelo.

Na primeira vertente, quando simulados pelo modelo *WEPP* para os períodos de 50 e 100 anos (Figuras 24b e 24c), áreas de desagregação e deposição de sedimentos foram observadas. Na distribuição espacializada pelo modelo *WEPP* em relação aos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  (Figura 26a), embora na posição inferior da vertente tenha apresentado a mesma tendência de deposição de sedimentos, nas posições superior e mediana da vertente não foram observados, por sua vez verificado na distribuição espacializada dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$ .

Nas simulações realizadas na segunda vertente para os períodos de 50 e 100 anos utilizando o modelo *WEPP* (Figuras 25b e 25c) em relação à distribuição observada nos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  (Figura 26b) o que diferiu entre ambos os métodos foi maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$  no segundo perfil amostral observado na parte superior da encosta indicando área de deposição de sedimentos. Nesta simulação, áreas de desagregação no terço mediano e deposição no terço inferior apresentaram a mesma tendência entre as duas formas de determinação.

Ao comparar as possíveis áreas de deposição de sedimentos na posição inicial e mediana das vertentes indicados pela distribuição espacial da atividade do  $^{137}\text{Césio}$  com as simuladas pelo modelo *WEPP*, observa-se que o *WEPP* não conseguiu reproduzir essa dinâmica. Essa deposição de sedimentos indicados pela distribuição espacial da atividade do  $^{137}\text{Césio}$  provavelmente esteja relacionada ao sistema de preparo do solo realizado por meio de aração com tração animal, ocasionando a chamada erosão por preparo influenciada pela intensa mobilização do solo.

Tiessen et al. (2010) mencionam que uma das principais ameaças para a sustentabilidade da agricultura dentro das Américas é afetada pela erosão do solo devido às ações de chuva, vento, e preparo do solo. A degradação do solo por erosão devido ao preparo do solo é de grande preocupação em regiões onde culturas são intensivamente cultivadas e em áreas altamente susceptíveis. Os mesmos autores mencionam que o movimento de solo para partes mais baixas por arado de disco foi aproximadamente duas vezes maior que ao movimento para partes mais altas. Uma relação altamente significativa foi observada entre ambas as distâncias de deslocamento na camada de solo preparada e na massa de solo translocada quando cultivado para parte mais alta e mais baixa. Quando o dado foi separado e somente as áreas cultivadas para as partes mais baixas foram analisadas, o potencial de erosão por preparo dobrou. Também foi inferido que não somente o arado de disco é um implemento erosivo, mas aquele cultivado em único sentido abaixo é uma prática de grande potencial erosivo.

Na posição inferior das vertentes, as simulações envolvendo longos períodos, observou-se comportamento semelhante entre distribuição espacial da desagregação e deposição de sedimentos simulados pelo modelo *WEPP* e

as observadas pela atividade de  $^{137}\text{Cs}$ . Foram observadas áreas de desagregação e deposição de sedimentos no terço final dessas vertentes.

Em estudo, Bacchi et al. (2003) compararam a distribuição espacial de sedimentos avaliada por três métodos (*USLE*, *WEPP* e o método do  $^{137}\text{Cs}$ ) e sua relação com algumas propriedades do solo em uma área da Bacia do Ceveiro em Piracicaba (SP) manejada com cana-de-açúcar e pastagem. Os autores concluíram que taxas de erosão e sedimentação e sua distribuição espacial estimada foram diferentes. O padrão de distribuição de sedimentos estimado pelo  $^{137}\text{Cs}$  não seguiu uma tendência da erosão hídrica observada pelos modelos *USLE* e *WEPP*. Era esperado que ocorresse um aumento da taxa de erosão na parte superior e deposição na parte inferior da vertente devido ao menor declive na posição, conforme observado nas simulações realizadas pelos os dois modelos. Esta não tendência do processo erosivo entre o método de  $^{137}\text{Cs}$  e os modelos, é mencionado pelos autores que embora não esperada, por sua vez outros processos de transporte de sedimentos podem explicar as diferenças nesta distribuição. Um reconhecimento envolvendo outras áreas de cana-de-açúcar da região, estradas e construção de terraços ou manutenção, nivelamentos de superfície após formação de voçorocas e operações de aração que acontecem na região são considerados procedimentos rotineiros associados ao movimento intenso do solo.

Correchel et al. (2005) abordaram que a precisão da técnica de análise da redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Cs}$  nas avaliações das taxas de erosão são fortemente dependentes da qualidade de um inventário médio tomado em uma área de referência. Neste mesmo estudo, onde avaliaram a variabilidade espacial randômica e sistemática dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  de áreas de referência no sudeste do Brasil, os autores concluíram que houve algumas diferenças importantes no padrão da distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  em profundidade nos perfis de solo dos diferentes locais que, provavelmente, estão associadas às diferenças químicas, físicas, mineralógicas e biológicas dos solos estudados. Muitas questões ainda permaneceram abertas para futuras investigações, principalmente em relação à adsorção e à dinâmica do  $^{137}\text{Cs}$  no perfil dos solos tropicais. A variabilidade espacial randômica (dentro de cada local de referência) foi maior do que a variabilidade espacial sistemática (entre

áreas de referência), porém as causas disto não foram claramente identificadas, talvez em consequência da variabilidade química, física e/ou mineralógica bem como da precipitação.

Owens e Walling (1996) mencionam que o valor médio dos inventários de  $^{137}\text{Cs}$  atribuído a um local de referência desempenha um papel fundamental na conversão das medidas de  $^{137}\text{Cs}$  para estimar as taxas de erosão do solo. O uso de inventários referência com altos coeficientes de variação resulta em estimativas de taxas de erosão imprecisas e pouco confiáveis.

Outro fator importante no entendimento do processo erosivo é a questão de escala, ou seja, a estrutura, funcionamento e respostas temporais de uma encosta a determinado evento são sempre dependentes da escala de observação (Renschler & Harbor, 2002). Na paisagem ocorrem diversos tipos de vertentes, em muitas são sucessões de dois ou mais formatos até chegarem ao canal de drenagem, ou seja, processos de remoção e deposição podem ocorrer simultaneamente numa mesma unidade de paisagem (Mudd & Fursbush, 2003).

Dependendo da escala pode apresentar maior ou menor sensibilidade. No caso de microbacias são mais sensíveis oferecendo respostas rápidas a processos como mudanças no uso do solo, eventos de precipitação, redução da cobertura do solo, tornando mais fácil a identificação da causa de determinado processo e mitigá-lo de forma mais rápida e eficaz. Em grandes bacias hidrográficas estas respostas podem ocorrer em longos intervalos de tempo, o que dificulta a compreensão dos processos (Leonardo, 2003; ANA, 2001).

Por outro lado, nem todo o sedimento produzido numa bacia durante um evento é imediatamente transportado. A observação destes fluxos em escala real mostra que apenas uma parte chega aos corpos hídricos de superfície, e a outra parte fica depositada em diversos pontos da vertente, de onde podem ser remobilizados por um novo evento de maior energia (Golosov & Litvin, 2005; Walling, 1990) ou ainda ficarem permanentemente depositados em locais com a base de vertentes, em planícies de inundação, nas áreas de mata ripária ou ainda em banco no próprio canal de drenagem (Kobyama, 2003).

## 5. CONCLUSÕES

As equações de regressão da rotina interna do modelo para estimativas de parâmetros da componente solo usadas no modelo *WEPP* superestimaram os valores de erodibilidade do solo em entressulcos e sulcos e subestimaram a tensão crítica de cisalhamento e a condutividade hidráulica do solo.

A simulação utilizando dado do fator  $K_i$  sob condição de campo apresentou produção de sedimentos semelhante ao obtido sob condição de laboratório, porém inferior a simulação com dado estimado pelas equações da rotina interna do modelo.

Os coeficientes de escoamento simulados pelo modelo *WEPP* com dados obtidos sob condição experimental, nas duas vertentes estudadas, se assemelharam em relação aos valores observados por meio de dados obtidos em cinco anos de monitoramento hidrossedimentológico da bacia.

A produção de sedimentos nas simulações com o modelo *WEPP* foram superestimadas comparadas ao observado nos cinco anos de monitoramento sedimentológico da bacia, principalmente nas simulações de curto período.

Os resultados mostraram que as diferenças entre os valores sedimentológicos obtidos nas diferentes formas de simulação pelo modelo e os medidos foram menores quando os parâmetros de entrada foram obtidos experimentalmente ao invés daqueles estimados por equações da rotina interna do modelo.

A distribuição espacial dos processos desagregação e deposição de sedimentos nas vertentes simuladas pelo modelo *WEPP* com dados da componente solo obtidos sob condição de campo e comparados com resultados da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  mostraram algumas discrepâncias em relação à desagregação e uma tendência similar relacionado à deposição de sedimentos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMS, A.; PERSONS, A.J. Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling. **Water Resources Research**, Washington, v.27, n. 8, p.1827-1836, 1991.

ALBERTS, E.E.; NEARING, M.A.; WELTZ, M.A.; RISSE, L.M.; PIERSON, F.B.; ZHANG, X.C.; LAFLÉN, J.M.; SIMANTON, J.R. Soil component. In: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Lafayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 7, p. 7.1-7.47. (Technical documentation. NSERL Report, 10).

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, Amsterdam, v. 64, p. 247-271, 2005.

ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 141-151, 2000.

ALBUQUERQUE, J.A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. 1998. 154 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AMORE, E.; MODICA, C.; NEARING, M.A.; SANTORO, V.C. Scale effect in USLE and *WEPP* application for soil erosion computation from three Sicilian basins. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 293, p. 100-114, 2004.

AMORIM, R.S.S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras.** 2004. 143f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2004.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Bacias brasileiras do rio da Prata: Avaliações e propostas.** Brasília, 2001. 102p.

ANDRELLO, A.C.; APPOLONI, C.R.; CASSOL, E.A.; MELQUIADES, F.L.  $^{137}\text{Cs}$  profiles in erosion plots with different soil cultivation. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest, v. 269, n. 3, p. 761-765, 2006.

ANDRELLO, A.C.; APPOLONI, C.R.; GUIMARÃES, M. F. Soil erosion determination in a watershed from northern Paraná (Brazil) using  $^{137}\text{Cs}$ . **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, p. 659-667, 2004.

ANDRELLO, A.C.; APPOLONI, C.R.; GUIMARÃES, M.F. Uso do cézio-137 para avaliar taxas de erosão em cultura de soja, café e pastagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 223-229, 2003.

ANDRELLO, A.C.; APPOLONI, C.R.; NASCIMENTO FILHO, V.F. Distribuição vertical de  $^{137}\text{Cs}$  em solos de mata virgem da região de Londrina (Paraná). **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 1546-1549, 2002.

ARNOLD, J G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modelling and assessment: Part I. Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 34, n. 1, p. 73– 89, 1998.

ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., NICKS, A.D.; SAMMONS, N.B. **SWRRB - A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management.** College Station, Texas : Texas A&M University Press, 1990. 255p.

ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. Stochastic Generation of Internal Storm Structure. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 32, p. 161-166, 1989.

ARTHUR, R.C.J. **Análise de redistribuição do “fallout” do  $^{137}\text{Cs}$  na avaliação da erosão e deposição de sedimentos em sistemas de manejo de solo sob cerrado**. 2010. 126 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science of America, 1996. p. 123-141.

ASNER, G.P.; ELMORE, A.J.; OLANDER, L.P.; MARTIN, R.E.; HARRIS, A.T. Grazing systems, ecosystem responses, and global change. **Annual Review Environmental and Resources**. Palo Alto, v. 29, p. 261-299, 2004.

BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; SPAROVEK, G. Sediment spatial distribution evaluated by three methods and its relation to some soil properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 69, p. 117-125, 2003.

BAFFAUT, C.; NEARING, M.A.; NICKS, A.D. Impact of climate parameters on soil erosion using CLIGEN and *WEPP*. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph v. 39, p. 447-457, 1996.

BAGARELLO, V. Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph permeameter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 169-180, 1997.

BAIGORRIA, G.A.; ROMERO, C.C. Assessment of erosion hotspots in a watershed: integrating the *WEPP* model and GIS in a case study in the Peruvian Andes. **Environmental Modelling & Software**, Australia, v. 22, p. 1175-1183, 2007.

BATCHELOR, P. Models as metaphors: The role of modeling in pollution prevention. **Waste Management**, Padova, v. 14, n. 3, p. 243-251, 1994.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo : Ícone, 1990. 355 p. (Coleção Brasil Agrícola)

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 565-573, 2006.

BHUYAN, S.J.; KALITA, P.K.; JANSSEN, K.A.; BARNES, P.L. Soil loss predictions with three erosion simulation models. **Environmental Modelling & Software**, Canberra, v. 17, p. 137-146, 2002.

BLOOM, A.L. **Superfície da terra**. São Paulo, SP: E. Blucher, 1972.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 711-721, 1999.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 127-134, 1996.

BRANCA, M.; VOLTAGGIO, M. Erosion rate in badlands of central Italy – estimation by radiocaesium isotope ratio from Chernobyl nuclear accident. **Applied Geochemistry**, Aberystwyth, n. 8, p. 437-445, 1993.

BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. Métodos de determinação da infiltração. In: BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração de água no solo**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. p. 33-43.

BRYAN, R.B. Processes and significance of rill development. **Catena Supplement**, Cremlingem, v. 8, p. 1-15, 1987.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003**: institui a Divisão Hidrográfica Nacional. Brasília, 2003.

CANTALICE, J.R.B.; CASSOL, E.A.; REICHERT, J.M.; BORGES, A.L. O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 597-607, 2005.

CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2002. 140 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CASSOL, E.A.; CANTALICE, J.R.B.; REICHERT, J.M. MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 685-690, 2004.

CASSOL, E.A.; LIMA, V.S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 117-124, 2003.

CAUDURO, F.A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para Irrigação e Drenagem**. Brasília: PRONI, 1990. 216 p.

CECÍLIO, R.A.; RODRIGUEZ, R. del G.; BAENA, L.G.N.; OLIVEIRA, F.G.; PRUSKI, F.F. Aplicação dos modelos RUSLE e *WEPP* para a estimativa da erosão hídrica em microbacia hidrográfica de Viçosa (MG). **Revista Verde**, Mossoró, v. 4, n. 2, p. 39-45, 2009.

CHAVES, H.M.L. Modelagem matemática da erosão hídrica: passado, presente e futuro. In: ALVAREZ V.H.; FONTES, L.E.; FONTES, M.P.F. (Eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS : UFV. DPS, 1996. p.731-750.

CHAVES, H.M.L. **Novidades sobre o Water Erosion Prediction Project-WEPP**. In: PEREIRA, V.P.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.). Solos altamente suscetíveis à erosão. Jaboticabal: SBCS – UNESP. 1994. p.207-212.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. New York, NY : McGraw-Hill, 1959. 680 p.,

CORRECHEL, V.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; DE MARIA, I.C. Random and systematic spatial variability of  $^{137}\text{Cs}$  inventories at reference sites in south-central Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 2, p. 173-178, 2005.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. 2009. 115f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DENDY, F.E.; BOLTON, G.C. Sediment yield-runoff-drainage area relationships in the United States. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 31, p. 264–266, 1976.

DUN, S.; WU, J.Q.; ELLIOT, W.J.; ROBICHAUD, P.R.; FLANAGAN, D.C.; FRANKENBERGER, J.R.; BROWN, R.E.; XU, A.C. Adapting the Water Erosion Prediction Project (*WEPP*) model for forest applications. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 366, p. 46-54, 2009.

ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. **A compendium of soil erodibility data from *WEPP* cropland soil field erodibility experiments 1987-88**. Washington : The Ohio State University : USDA. Agricultural Research Service, 1989. p.A2-A25. (NSERL. Report, 3)

ELLIOT, W.J.; FOLTZ, R.B.; LUCE, C.H. Predicting the impacts of forest roads on the environment. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 3., 1997, Vitória, ES. **Anais...** Viçosa, 1997. p. 99-119.

ELLISON, W.D. Soil detachment and transportation. **Soil Conservation**, Washington, v. 11, p. 179-190, 1946.

ELLISON, W.D. Soil erosion studies - part I. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 145-146, 1947a.

ELLISON, W.D. Soil erosion studies - part II: soil detachment hazard by raindrop splash. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 197-201, 1947b.

ELLISON, W.D. Soil erosion studies - part III: effects of soil erosion on infiltration and surface runoff. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 245-248, 1947c.

ELLISON, W.D. Soil erosion studies - part IV: soil erosion, soil loss, and some effects of soil erosion. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 297-300, 1947d.

ELLISON, W.D. Soil erosion studies - part V: soil transportation in the splash process. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 349-351, 353, 1947e.

ELLISON, W.D.; ELLISON, O.T. Soil erosion studies - part VI: soil detachment by surface flow. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 402-405, 408, 1947a.

ELLISON, W.D.; ELLISON, O.T. Soil erosion studies - part VII: soil transportation by surface flow. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p.442-444, 450, 1947b.

EMATER. **Levantamento de Solos da MBH Lajeado Ferreira, Município de Arvorezinha (RS)**. Porto Alegre, 2002. 39 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (RJ). **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 2006. 306p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

FAO. Conventional Ploughing Erodes The Soil-Zero-Tillage Is An Environmentally-Friendly Alternative. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSERVATION AGRICULTURE, Madrid, 2001. [**Proceedings...**] [Madrid], 2001. p. 1-5.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos, SP. **Programa e Resumo...** São Carlos, 2000. p.235.

FLANAGAN, D.C.; FRANKENBERGER, J.R.; RENSCHLER, C.S.; ENGEL, B.A. Development of web-based GIS interfaces for application of the *WEPP* model. In: 13<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization Conference - ISCO, 2004. **Anais...** Brisbane: Conserving Soil and Water for Society – Sharing Solutions, 2004.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. The water erosion prediction project (*WEPP*) model. In: HARMON, R. S.; DOE III, W. W. (Eds.). **Landscape Erosion and Evolution Modelling**. New York : Kluwer Academic, 2001. p.145–199.

FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. United States Department of Agriculture–USDA: **Water erosion prediction project**. West Lafayette : National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL, 1995. (Technical Documentation, 10).

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH, J.C.; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. Overview of the *WEPP* Erosions Prediction Model. IN: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 1, p. 1.1-1.12. (Technical documentation. NSERL, Report, 10).

FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; STUART, F. Global consequences of land use. **Science**, Washington, v. 309, p. 570-574, 2005.

FOSTER, G.R.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A.; LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C.. Hillslope erosion component. IN: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 11, p. 11.1-11.12. (Technical documentation. NSERL, Report, 10).

FOSTER, G.R.; LANE, L.J. Beyond the USLE: Advancements in soil erosion prediction, In: BOERSMA, L.L. (Ed.). **Future developments in soil science research**. Madison,: Soil Science American Society, 1987. p. 315-326.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D.L. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p. 297-380. (Monograph, 5).

FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: USDA-ARS (Ed.) **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Washington, 1972. p.190-207 (ARS-S, 40).

FOURNIER, F. **Climat et érosion**: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. [S.l.] : Presses Universitaires de France, 1960. 203p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER. **Biodiversidade do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br>. Acesso em 2008.

GERZABEK, M.H. **Consequences of the Chernobyl accident**. Seibersdorf: Österreichisches Forschungszentrum, 1990. 75 p.

GIASSON, E.; CASSOL, E.A. Relações da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um plintossolo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 117-125, 1996.

GOLOSOV, V.; LITVIN, L. The sediment budgets of cultivated slopes and slope catchments: an evaluation of the influence of slope morphology. In: WALLING, D.E.; HOROWITZ, A.J. (Eds). **Sediment Budgets**. Wallingford: IAHS Press, 2005. v.1. (IAHS publication, 2091).

GONÇALVES, F.A. **Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa - MG.** 2008. 130f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2008.

GRAYSON, R.B.; MOORE, I.D.; McMAHON, T.A. Physically-based hydrologic modeling: II. Is the concept realistic?. **Water Resources Research**, Washington, v. 26, n. 10, p. 2659-2666, 1992.

GRONSTEN, H.A.; LUNDEKVEM, H. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the *WEPP* Hillslope model. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, p. 186-199, 2006.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GELAIN, N.S.; MINELLA, J.P.G. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 993-997, 2010.

GUERRA, A.J.T. Encostas e a questão ambiental. In: CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. (Org). **A questão ambiental: diferentes abordagens.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** Rio de Janeiro : Bertrand Brasil, 1998. p. 149-210.

GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. 472 p.

HARTGE, K.H.; HORN, R. **Die Physikalische Untersuchung Von Böden.** Stuttgart, Bodenkunde : Universität Kiel, 1992. 177 p.

HIGGITT, D.L. Soil erosion and soil problems. **Progress in Physical Geography**, Thousand Oaks, CA, v. 1, p. 91-100, 1991.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 2003. 364p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. California: Academic Press, 1980. 385 p.

HUANG, C.; NORTON, L.D. Soil erosion process research: recent progress and potential impacts on prediction model development. In: OLIVEIRA, T.S.; ASSIS JR, R.N.; ROMERO, R.E.; SILVA, J.R.C. (Ed.). **Agricultura, sustentabilidade no semi-árido**. Fortaleza: UFC-SBCS, 2000. p. 297-321.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **Report on the First Research Coordination Meeting on the Assessment of soil Erosion Through the Use of <sup>137</sup>Cs and Related Techniques**. Vienna, 1996.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Melbourne : Cambridge University Press, 280p. 1995.

KATZ, D.M. ; WATTS, F.J.; BURROUGHS, E.R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **Journal Hydrology Division**, New York, v. 121, p. 546-553, 1995.

KAMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. ; ALVAREZ, V.H. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3. p.1-54.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.(Ed.) **Methods of soil analysis, physical and mineralogical properties, including statistics, measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KINNELL, P.I.A. Simulations demonstrating interaction between coarse and fine sediment loads in rain-impacted flow. **Earth Surface Processes**, New York, v. 31. p. 355-367, 2006.

KINNELL, P.I.A. Sediment transport by medium to large raindrops impacting flows and subterminal velocity. **Soil Science Society of America**. Madison, v. 69, p. 902-905, 2005.

KINNELL, P.I.A. Particle travel distances and bed sediment compositions associated with rain-impacted flows. **Earth Surface Processes and Landform**, New York, v. 26, p. 749-758, 2003.

KINNELL, P.I.A. The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 34, p. 161-168, 1991.

KLEIN, V.A. Infiltração de água no solo. In: KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. p. 164-182.

KNISEL, W.G. **CREAMS**: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. [Washington] : USDA, 1980.

KOBYAMA, M. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. In: SEMINÁRIO DE HIDROLOGIA FLORESTAL ZONAS RIPÁRIAS, 2003, Alfredo Wagner – SC. **Anais...** Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

LAFLEN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. The water erosion prediction project – a new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 46, p. 34-38, 1991.

LAFLEN, J. M. ; THOMAS, A. W. Cropland experiments for the *WEPP* project. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1987, Illinois. **Papers**. St. Joseph : American Society of Agricultural Engineers, 1987. 14p.

LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M. Development and application of modern soil erosion prediction technology. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, p. 893-912, 1992.

LANE, L.J.; FOSTER, G.R.; NICKS, A.D. **Use of fundamental erosion mechanics in erosion prediction**. St. Joseph, ASAE, 1987.

LEONARDO, H.C.L. **Indicadores de qualidade de solo e água para avaliação do uso sustentável da microbacia do Rio Passo Cue, Região oeste do estado do Paraná**. 2003. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

LI, S.; LOBB, D.A.; LINDSTROM, M.J.; FARENHORST, A. Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using  $^{137}\text{Cs}$  technique and soil erosion models. **Catena**, Amsterdam, v. 70, p. 493-505, 2007.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba : [Cargil], 2000. 509 p.

LIEBENOW, A.M.; ELLIOT, W.J.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.O. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 33, p. 1882-1888, 1990.

LICCIARDELLO, F.; AMORE, E.; NEARING, M.A.; ZIMBONE, S.M. Runoff and erosion modeling by *WEPP* in an experimental Mediterranean watershed. IN: OWENS, P. N.; COLLIN, A. J. (Ed.). **Soil erosion and sediment redistribution in river catchments: measurement, modelling and management**. [S.l. : s.n.], 2006. Cap. 18, p. 186-194.

LIMA, P.M.P.; ANDRADE, H. Erodibilidade entressulcos e atributos de solos com B textural e B latossólico do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 463-474, 2001.

LOBB, D.A.; KACHANOSKI, R.G.; MILLER, M.H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using  $^{137}\text{Cs}$  as a tracer. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 211-218, 1995.

MACHADO, C.C.; GARCIA, A.R.; SILVA, E.; FONTES, A.M. Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo *WEPP* (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 295-300, 2003.

MARCHI, O.A.; CALIJURI, M.L.; LELIS, T.A. Proposta de modelagem ambiental integrada de processos hidrossedimentológicos e hidrológicos e avaliação de cenários de desenvolvimento em bacias hidrográficas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7., 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2006. CD-Rom.

MARTINS FILHO, M.V.; ANDRADE, H.; DIAS JÚNIOR, M.S.; PEREIRA, V.P. Modelagem do processo de erosão entressulcos para Latossolos de Jaboticabal – SP. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, p. 9-20, 2003.

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Washington, v. 9, p. 384-394, 1973.

MELLO, N.A. **Efeito do sistema de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo**. 2006. 248 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 18, p. 761-799, 2003.

MEYER, L.D. **An investigation of methods for simulating rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity, and kinetic energy of selected spray nozzles**. West Lafayette, IN : Purdue University, 1958. 43 p. (Special Report, 81).

MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 48, p. 1152-1157, 1984.

MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 22, p. 100- 103, 1979.

MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; ROMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: USDA-ARS (Ed.) **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Washington : USDA-Agricultural Research, 1975.

MEYER, L.D.; WISCHMEIER, W.H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. **Transaction American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 12, p. 754-758, 1969.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; WALLING, D.E.; REICHERT, J.M. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 79, p. 228-236, 2009.

MINELLA, J.P.G.; WALLING, D.E.; MERTEN, G.H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hidrology**, Amsterdam, v. 348, p. 546-563, 2008.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; SANTOS, D.R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1637-1646, 2007.

MINELLA, J.P.G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul.bacias hidrográficas**. 2007. 162 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MORGAN, R.P.C. Simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. **Catena**, Amsterdam, v. 44, p. 305– 322, 2001.

MORGAN, R.P.C.; QUINTON, J.N.; SMITH, R.E.; GOVERS, G.; POESEN, J.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M.E. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 23, p. 527–544, 1998.

MOORE, I. D.; GALLANT, J.C. Overview of hydrologic and water quality modeling. In: MOORE, I.D. (Ed.) **Modeling the fate of chemicals in the environment**. Canberra: Australian National University, 1991. cap. 1. p. 1-9.

MUDD, S.M.; FURBISH, D.J. Influence of chemical denudation on hillslope morphology. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 109, p. 1010-1023, 2004.

NEARING, M.A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J.M. Sensitivity analysis of the *WEPP* hillslope profile erosion model. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 33, n. 3, p. 839-849, 1990.

NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; FINKNER, S.C. A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project Technology. **Transaction American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 32, n. 5, p. 1587-1593, 1989.

NICKS, A.D.; LANE, L.J.; GANDER, G.A. Weather generation. IN: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 2, p. 2.1-2.20. (Technical documentation, NSERL Report, 10).

NORTON, L.D.; BROWN, L.C. Time-effect on water erosion for ridge tillage. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 35, p. 473-478, 1992.

NUNES, M.C.M.; CASSOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2839-2845, 2008.

NUNES, M.C.M. **Erosão hídrica em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul**. 2006 160f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

OLDEMAN, L.R. The global extent of land degradation. In: GREENLAND, D.J. ; SZABOLCS, I. **Land Resilience and Sustainable Land Use**. Wallingford: CABI, 1994. p. 99–118.

OLDEMAN, L.R. **Global extent of soil degradation**. Wageningen, The Netherlands : International Soil Reference and Information Center, 1992. p. 19-36. Bi-annual report,

OWENS, P.N.; WALLING, D.E. Spatial variability of caesium-137 inventories at reference sites: an example from two contrasting sites in England and Zimbabwe. **Applied Radiation and Isotopes**, Swansea, v. 47, p. 699-707, 1996.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V.M.; MAL, B.C.; BILLIB, M. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the *WEPP* model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 348, p. 305-319, 2008.

PIERI, L.; BITTELLI, M.; WU, J. Q.; DUN, S.; FLANAGAN, D.C.; PISA, P.R.; VENTURA, F.; SALVATORELLI, F. Using the Water Erosion Prediction Project (*WEPP*) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 336, p. 84-97, 2007.

RACLOT, D.; ALBERGEL, J. Runoff and water erosion modelling using *WEPP* on a Mediterranean cultivated catchment. **Physics and Chemistry of Earth**, Reno, v. 31, p. 1038-1047, 2006.

RANIERI, S.B.L.; VAN LIER, Q.J.; SPAROVEK, G.; FLANAGAN, D.C. Erosion database interface (EDI): a computer program for georeferenced application of erosion prediction models. **Computers & Geosciences**, Elmsford, v. 28, p. 661-668, 2002.

RAWLS, W.L.; DAVID, G.; van MULLEN, J.A.; WARD, T.J. Infiltration. In: ASCE. **Hydrology handbook**. 2 ed. New York: [s.n.], 1996. p. 75-124. (ASCE – Manuals and Report on Engineering Practice, 28).

RAUWS, G.; GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal of Soil Science**, London,. v. 39, p. 111-124. 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração da água em solo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 289-298, 1992.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington DC : US Department of Agriculture, 1997. 384 p. (Agriculture Handbook, 703).

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; YODER, D.C.; MCCOOL, D.K. RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 49, n. 3, 213–220, 1994.

RENSCHLER, C.S. **GeoWEPP** - The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project (*WEPP*). Renschler's homepage. Research. 2007. Disponível em: < <http://www.geog.buffalo.edu/~rensch/>>. Acesso em: 20 nov. 2009.

RENSCHLER, C.S.; HARBOR, J. Soil erosion assessment tools from point to regional scales – the role of geomorphologists in land management research and implementation. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 47, p. 189-209, 2002.

RENSCHLER, C.S.; MANNAERTS, C.; DIEKKRUGER, B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk, rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 34, p. 209-255, 1999.

RIBEIRO, M.R.; SAMPAIO, E.V.S.B.; GALINDO, I.C.L. Os solos e o processo de desertificação no semi-árido brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.v. 6, p. 413-460.

RITCHIE, J.C.; SPRABERRY, J.A.; McHENRY, J.R. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout of  $^{137}\text{Cs}$ . **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 38, p. 137-139, 1974.

SALA, O.E.; CHAPIN, F.S.; CHAPIN, M. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**, [Washington], v. 287, p. 1770-1774, 2000.

SANTOS, E.A.; APPOLONI, C.R.; ANDRELLO, A.C.; RUFINO, R.L.; BISCAIA, R.C.M. Modelos semi-empíricos para o método do  $^{137}\text{Cs}$  na determinação da erosão de um solo LRd. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 7, p. 209-220, 2005.

SAVABI, M.R.; WILLIAMS, J.R. Water balance and percolation. IN: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 5, p. 5.1-5.14. (Technical documentation. NSERL Report, 10).

SAVAT, J. Laboratory experiments on erosion and deposition of loess by laminar sheet flow and turbulent rill flow. In: COLLOQUE sur l'erosion agricole des sols en milieu tempere nom Mediterranéen. Strasbourg : l' Université Louis Pasteur, 1979. p.139-143.

SCHÄFFER, M.J.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F.; REINERT, D.J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 419-430, 2001.

SCHÄFFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 431-441, 2001.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. **Erosion/Productivity Impact Calculator. Model Documentation.** USDA-ARS Technical Bulletin 1768, 235 p. 1990.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 213-220, 1997.

SIMONS, D.B.; SENTURK, F. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. In: WATER resources publications. [Colorado] : [s.n.], 1992. 897p.

SINGH, V.P. Analytical solutions of cinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Advanced Water Research**, Brisbane, v. 6, p. 88-95, 1983.

SHEN, Z.; GONG, Y.; LI, Y.; LIU, R. Analysis and modeling of soil conservation measures in the Three Gorges Reservoir Area in China. **Catena**, Amsterdam, v. 81, p. 104-112, 2010.

SOUZA, M.D. de. **Infiltração de água em Latossolo Roxo distrófico submetido a diferentes manejos.** 1985. 131f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

STONE, J.J.; LANE, L.J.; SHIRLEY, E.D.; HERNANDEZ, M. Hillslope surface hydrology. IN: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP.** West Lafayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 4, p. 4.1-4.20. (Technical documentation. NSERL. Report, 10).

STOTT, D.E.; ALBERTS, E.E.; WELTZ, M.A Residue Decomposition and Management. IN: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP.** West Lafayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 9, p. 9.1-9.16. (Technical documentation. NSERL. Report, 10).

TAMURA, T. Selective sorption reactions of cesium with soil minerals. **Nuclear Safety**, Oak Ridge, v.5, p.262-268, 1964.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C. BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p.

TIESSSEN, K.H.D.; SANCHO, F.M.; LOBB, D.A.; MEHUYS, G.R. Assessment of tillage translocation and erosion by the disk plow on steepland Andisols in Costa Rica. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 65, n. 5, p. 316-328, 2010.

TILMAN, D.; FARGIONE, J. WOLFF, B.; DOBSON, A.; HOWARTH, R. Forestcasting agriculturally driven global environmental change. **Science**, [Washington], 2001. p. 292-281.

TISCARENO-LOPEZ, M.; LOPES, V.L.; STONE, J.J.; LANE, L.J. Sensitivity analysis of the *WEPP* watershed model for rangeland applications I: Hillslope processes. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 36, n. 6, p. 1659-1672, 1993.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregate by the root systems of ryegrass. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v.17, p. 429-441, 1979.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. **Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control**. New York : John Wiley & Sons, 2002. 337 p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre : Ed. UFRGS : ABRH, 1998. 669 p.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM. **Status de desertification and implementation of the UN plan of action to combat desertification**. Nairobi, Kenya, 1991.

USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. United State Department of Agricultural, West Laffayette, 1995 (Technical documentation, NSERL, Report, n. 10).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Instituto de Geociências. **Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1980. 1 mapa, color.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. 132f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VAN LIER, Q.J.; SPAROVEK, G.; FLANAGAN, D.C.; BLOEM, E.M.; SCHUNUG, E. Runoff mapping using *WEPP* erosion model and GIS tools. **Computers & Geosciences**, Elmsford, v. 31, p. 1270-1276, 2005.

VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V.; REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 289-298, 1993.

VENTE, J.; POESEN, J.; ARABKHEDRI, M.; VERSTRAETEN, G. The sediment delivery problem revisited. **Progress in Physical Geography**, Iowa, v. 31, n. 2, p. 155-178, 2007.

VENTE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 71, p. 95–125, 2005.

WALLING, D.E. Measuring sediment yields from river basins. In: LAL, R. **Soil erosion research methods**. 2. ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994. p. 39-80.

WALLING, D.E. Linking the field to the river: Sediment delivery from agricultural land. In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I.D.I.; DEARING, J.A. **Soil Erosion on Agricultural Land**. New York: John Willey & Sons, 1990. p. 129-151.

WALLING, D.E.; QUINE, T.A. Recent rates of soil loss from areas of arable cultivation in the UK. In: PETERS, N.E.; WALLING, D.E. (Eds). **Sediment and stream water quality in a changing environment: Trends and explanations**. Wallingford, UK: IAHS Press, 1991. (IAHS Public, 203).

WALLING, D.E.; QUINE, T.A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. **Land Degradation Rehabilitation**, Exeter, v. 2, p. 161-175, 1990.

WALLING, D.E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 65, p. 209-237, 1983.

WANG, Q.; HORTON, R.; SHAO, M. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution. **Soil Science**, Madison, v. 168, p. 671-676, 2003.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning**. Washington : USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537).

WOOLHISER, D.A.; LIGGETT, J.A. Unsteady onedimensional flow over a plane – The rising hydrograph. **Water Resources Research**, Washington, v. 3, p. 753-771, 1967.

YALIN, M.S. An expression for bed-load transportation. **Journal of Hydraulics Division**, New. York, v. 98, p. 221-250, 1963.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, p. 337-357, 1936.

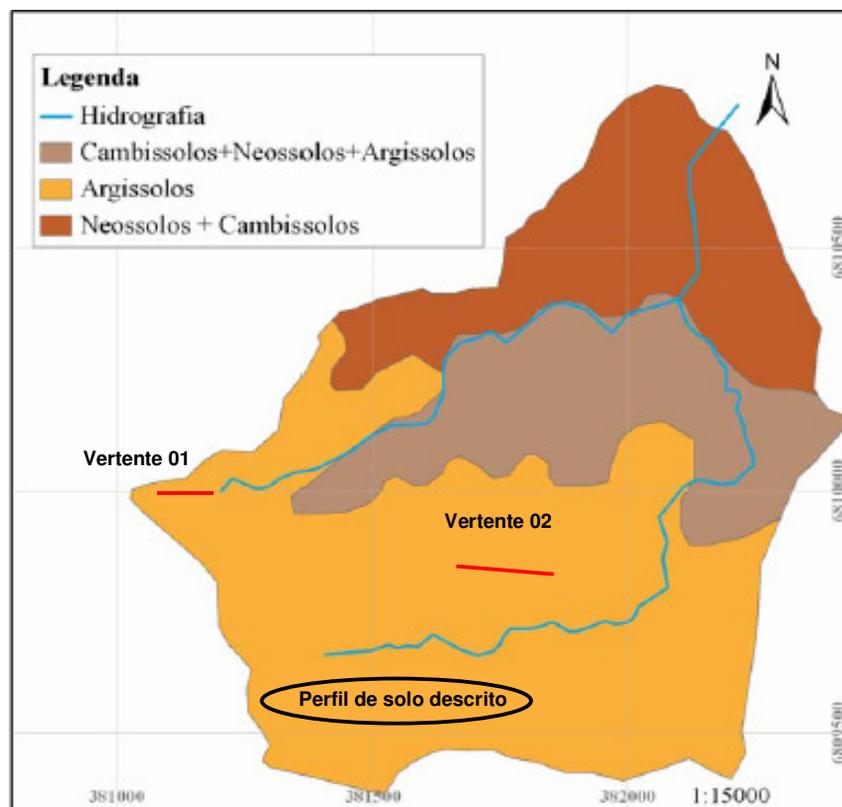
YOUNG, R.A.; ONSTAD, C.A.; BOSCH, D.D.; ANDERSON, W.P. AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 44, n. 2, p. 168–173, 1989.

YOUNG, R.A.; WIERSMA J.L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. **Water Resources Research**, Washington, v. 9, p. 1629-1639, 1973.

ZAPATA, F. **Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides.** Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic, 2002. 221 p.

## 7. APÊNDICES

**Apêndice 1.** Distribuição e unidades dos solos da bacia de Arvorezinha e caracterização granulométrica de solo da camada superficial de perfil descrito no terço superior da bacia (EMATER, 2002).



Distribuição e unidades dos solos da bacia de Arvorezinha (EMATER, 2002).

Caracterização granulométrica de solo da camada superficial (0 a 25 cm) de solo de perfil descrito no terço superior da bacia de Arvorezinha <sup>(1)</sup> (EMATER, 2002).

Fração da amostra total	Composição granulométrica da terra fina <sup>(2)</sup>				ADA <sup>(3)</sup>	GF <sup>(4)</sup>	S/A <sup>(5)</sup>
Cascalho	AG	AF	Silte	Argila			
----- g kg <sup>-1</sup> -----					g kg <sup>-1</sup>	%	
155,0	127,0	83,0	500,0	290,0	100,0	65	1,7

<sup>(1)</sup> Perfil de solo descrito na mesma área das vertentes estudadas.

Fração grosseira: cascalho (20-2 mm); <sup>(2)</sup> Frações granulométricas incluindo areia grossa (AG : 2-0,2 mm), areia fina (AF : 0,2-0,05 mm), silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm); <sup>(3)</sup> Argila dispersa em água; <sup>(4)</sup> Grau de Flocculação; <sup>(5)</sup> Relação silte / argila.

**Apêndice 2.** Parâmetros do arquivo de uso e manejo na base de dados internos disponíveis no modelo *WEPP* com algumas modificações de acordo com informações locais.

Tillage – Aração

Parameter	Units	Value
Percent residue buried on interrill areas for fragile crops	%	0
Percent residue buried on interrill areas for non-fragile crops	%	0
Number of rows of tillage implement		0
Implement Code		Other
Cultivator Position		Rear mounted
Ridge height value after tillage	cm	15
Ridge interval	cm	100
Percent residue buried on rill areas for fragile crops	%	0
Percent residue buried on rill areas for non-fragile crops	%	0
Random roughness value after tillage	cm	15
Surface area disturbed (0-100%)	%	100
Mean tillage depth	cm	15

Tillage – Gradagem

Parameter	Units	Value
Percent residue buried on interrill areas for fragile crops	%	0
Percent residue buried on interrill areas for non-fragile crops	%	0
Number of rows of tillage implement		1
Implement Code		Other
Cultivator Position		Rear mounted
Ridge height value after tillage	cm	15
Ridge interval	cm	100
Percent residue buried on rill areas for fragile crops	%	0
Percent residue buried on rill areas for non-fragile crops	%	0
Random roughness value after tillage	cm	2.5
Surface area disturbed (0-100%)	%	50
Mean tillage depth	cm	15

Tillage – Camalhão

Parameter	Units	Value
Percent residue buried on interrill areas for fragile crops	%	0
Percent residue buried on interrill areas for non-fragile crops	%	0
Number of rows of tillage implement		1
Implement Code		Other
Cultivator Position		Rear mounted
Ridge height value after tillage	cm	25
Ridge interval	cm	100
Percent residue buried on rill areas for fragile crops	%	0
Percent residue buried on rill areas for non-fragile crops	%	0
Random roughness value after tillage	cm	4
Surface area disturbed (0-100%)	%	75
Mean tillage depth	cm	15

## Continuação do apêndice 2

### Plant – Annual - Tobacco

Parameter	Value	Units
Plant Growth and Harvest Parameters		
Biomass energy ratio	kg/MJ	25
Growing degree days to emergence	Degrees C.days	60
Growing degree days for growing season	Degrees C.days	1500
In-row plant spacing	cm	22
Plant stem diameter at maturity	cm	5.1
Height of post-harvest standing residue; cutting height	cm	0
Harvest index (dry crop yield/total above ground dry biomass)	%	90
Temperature and Radiation Parameters		
Base daily air temperature	Degrees C	10
Optimal temperature for plant growth	Degrees C	25
Maximum temperature that stops the growth of a perennial crop	Degrees C	0
Critical freezing temperature for a perennial crop	Degrees C	0
Radiation extinction coefficient		0.9
Canopy, LAI and Root Parameters		
Canopy cover coefficient		6.6
Parameter value for canopy height equation		7
Maximum canopy height	cm	106
Maximum leaf area index		3.4
Maximum root depth	cm	76
Root to shoot ratio (% root growth/% above ground growth)	%	33
Maximum root mass for a perennial crop	kg/sq.m	0
Senescence Parameters		
Percent of growing season when leaf area index starts to decline (0-100%)	%	70
Period over which senescence occurs	days	14
Percent canopy remaining after senescence (0-100%)	%	75
Percent of biomass remaining after senescence (0-100%)	%	70
Residue Parameters		
Parameter for flat residue cover equation	sq.m/kg	2.5
Standing to flat residue adjustment factor (wind, snow, etc.)	%	99
Decomposition constant to calculate mass change of above-ground biomass		0.0065
Decomposition constant to calculate mass change of root-biomass		0.0074
Use fragile or non-fragile mfo values		Non-Fragile
Other Parameters		
Plant specific drought tolerance (% of soil porosity)	%	0
Critical live biomass value below which grazing is not allowed	kg/sq.m	0
Maximum Darcy Weisbach friction factor for living plant		0
Harvest Units		WEPPWillSet
Optimum yield under no stress conditions	kg/sq.m	0

**Apêndice 3.** Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos, obtidas em condições de campo e laboratório.

Repetição	UG	$q_i$	$V_m$	h	v	Re	Fr	f	n	$\tau$	
	0-10 cm kg kg <sup>-1</sup>	10-20 cm m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	m s <sup>-1</sup>	m	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	-----	adimensional	-----	s m <sup>-1/3</sup>	Pa	
<u>Condição de Campo</u>											
1	0,13	0,18	0,98x10 <sup>-5</sup>	0,0198	0,00049	0,90x10 <sup>-6</sup>	10,88	0,28	1,29	0,118	0,68
2	0,13	0,17	0,90x10 <sup>-5</sup>	0,0157	0,00057	0,90x10 <sup>-6</sup>	9,97	0,21	2,11	0,155	0,70
3	0,14	0,18	1,11x10 <sup>-5</sup>	0,0168	0,00067	0,90x10 <sup>-6</sup>	12,41	0,21	2,41	0,170	0,91
Média	0,13	0,18	1,00x10 <sup>-5</sup>	0,0174	0,00058	0,90x10 <sup>-6</sup>	11,09	0,23	1,94	0,148	0,76
<u>Condição de Laboratório</u>											
1	-	-	1,59x.10 <sup>-5</sup>	0,0158	0,00101	1,11x10 <sup>-6</sup>	14,35	0,16	2,93	0,201	0,99
2	-	-	1,44x10 <sup>-5</sup>	0,0164	0,00088	1,14x10 <sup>-6</sup>	12,64	0,18	2,38	0,177	0,86
3	-	-	1,45x10 <sup>-5</sup>	0,0181	0,00080	1,14x10 <sup>-6</sup>	12,73	0,20	1,74	0,151	0,79
4	-	-	1,53x10 <sup>-5</sup>	0,0144	0,00106	1,17x10 <sup>-6</sup>	13,05	0,14	3,70	0,228	1,04
Média	-	-	1,50x10 <sup>-5</sup>	0,0162	0,00094	1,14x10 <sup>-6</sup>	13,19	0,17	2,69	0,189	0,92

UG = umidade gravimétrica inicial do solo,  $q_i$  = Descarga líquida total,  $V_m$  = velocidade média, h = altura da lâmina de escoamento, v = viscosidade cinemática, Re = número de Reynolds, Fr = número de Froude, f = fator de perda de carga de Darcy-Weisbach, n = coeficiente de rugosidade de Manning,  $\tau$  = tensão cisalhante do escoamento.

**Apêndice 4.** Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos, obtidas sob condição de campo em recém-preparado.

Variável hidráulica	Sulco	Posição	Unidade	Fluxo extra aplicado (L min <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>					
				6 + 0	6 + 10	6 + 20	6 + 30	6 + 40	6 + 50
<b>V<sub>m</sub></b>	1	-		0,092	0,205	0,267	0,333	0,333	0,333
	2	-	m s <sup>-1</sup>	0,026	0,190	0,242	0,267	0,333	0,333
	3	-		0,064	0,190	0,222	0,267	0,333	0,381
<b>Média</b>				<b>0,061</b>	<b>0,195</b>	<b>0,244</b>	<b>0,289</b>	<b>0,333</b>	<b>0,349</b>
<b>A</b>	1	PI		0,00090	0,00245	0,00320	0,00718	0,01166	0,01657
	2	PI		0,00028	0,00078	0,00286	0,00598	0,01402	0,01575
		PI	m <sup>2</sup>	0,00028	0,00055	0,00206	0,00405	0,00274	0,00616
	3	PS		0,00051	0,00206	0,00200	0,00238	0,00606	0,00653
		Média		0,00040	0,00131	0,00203	0,00322	0,00440	0,00635
<b>Média</b>			<b>0,00053</b>	<b>0,00151</b>	<b>0,00270</b>	<b>0,00546</b>	<b>0,01003</b>	<b>0,01289</b>	
<b>P<sub>m</sub></b>	1	PI		0,1063	0,1573	0,1823	0,2440	0,2960	0,3608
	2	PI		0,0748	0,1368	0,1508	0,2010	0,3333	0,3578
		PI	m	0,0750	0,0753	0,2018	0,2535	0,2515	0,2250
	3	PS		0,0785	0,2055	0,1670	0,1825	0,2525	0,2498
		Média		0,0768	0,1404	0,1844	0,2180	0,2520	0,2374
<b>Média</b>			<b>0,0860</b>	<b>0,1448</b>	<b>0,1725</b>	<b>0,2210</b>	<b>0,2938</b>	<b>0,3187</b>	
<b>R<sub>h</sub></b>	1	PI		0,0085	0,0156	0,0176	0,0294	0,0394	0,0459
	2	PI		0,0037	0,0057	0,0190	0,0298	0,0421	0,0440
		PI	m	0,0037	0,0073	0,0102	0,0160	0,0109	0,0274
	3	PS		0,0065	0,0100	0,0120	0,0130	0,0240	0,0261
		Média		0,0051	0,0093	0,0110	0,0147	0,0175	0,0267
<b>Média</b>			<b>0,0058</b>	<b>0,0102</b>	<b>0,0159</b>	<b>0,0246</b>	<b>0,0330</b>	<b>0,0389</b>	

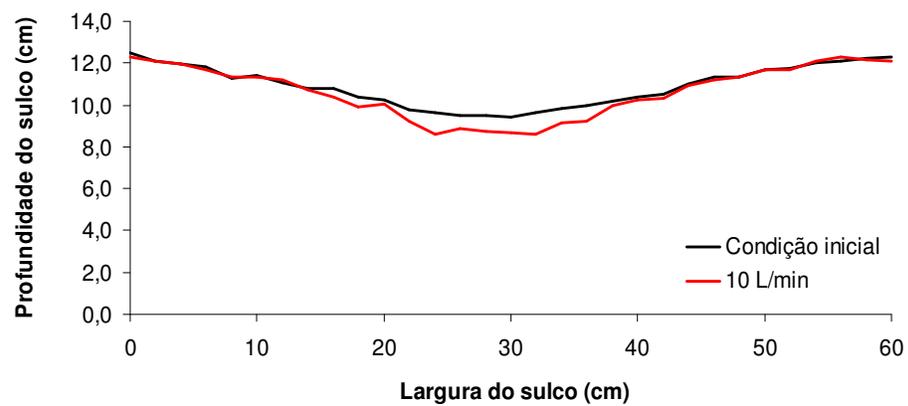
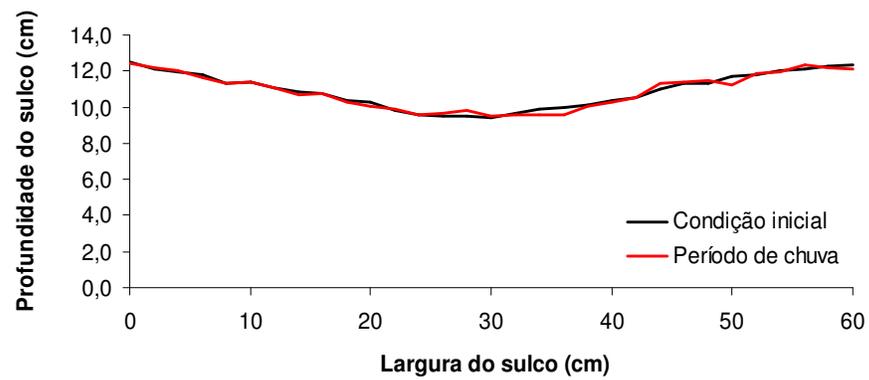
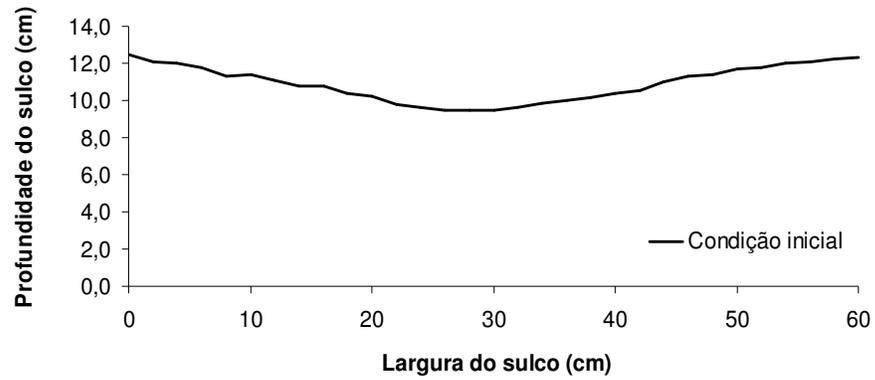
## Continuação do apêndice 4

	1	PI	886	3,623	5,307	11,122	14,888	17,357
<b>R<sub>e</sub></b>	2	PI	109	1,231	5,213	8,995	15,898	16,637
	3	PI	269	1,564	2,550	4,789	4,082	11,723
		PS	468	2,146	2,991	3,909	8,992	11,194
		Média	369	1,855	2,771	4,349	6,537	11,459
		<b>Média</b>	<b>455</b>	<b>2236</b>	<b>4430</b>	<b>8155</b>	<b>12,441</b>	<b>15,151</b>
<b>F<sub>r</sub></b>	1	PI	0,32	0,52	0,64	0,62	0,54	0,50
	2	PI	0,13	0,81	0,56	0,49	0,52	0,51
	3	PI	0,34	0,71	0,70	0,67	1,02	0,74
		PS	0,25	0,61	0,65	0,75	0,69	0,75
		Média	0,29	0,66	0,68	0,71	0,85	0,74
		<b>Média</b>	<b>0,25</b>	<b>0,66</b>	<b>0,63</b>	<b>0,61</b>	<b>0,64</b>	<b>0,58</b>
<b>n</b>	1	PI	0,169	0,114	0,095	0,107	0,130	0,144
	2	PI	0,343	0,061	0,107	0,131	0,132	0,136
	3	PI	0,145	0,076	0,082	0,092	0,057	0,092
		PS	0,209	0,094	0,091	0,080	0,096	0,089
		Média	0,177	0,085	0,086	0,086	0,076	0,090
		<b>Média</b>	<b>0,230</b>	<b>0,087</b>	<b>0,096</b>	<b>0,108</b>	<b>0,113</b>	<b>0,123</b>
<b>U*</b>	1	PI	0,108	0,147	0,156	0,201	0,233	0,252
	2	PI	0,070	0,086	0,157	0,197	0,234	0,239
	3	PI	0,074	0,103	0,122	0,153	0,126	0,200
		PS	0,097	0,121	0,132	0,138	0,187	0,195
		Média	0,085	0,112	0,127	0,145	0,156	0,197
		<b>Média</b>	<b>0,088</b>	<b>0,115</b>	<b>0,147</b>	<b>0,181</b>	<b>0,208</b>	<b>0,229</b>

**Continuação do apêndice 4**

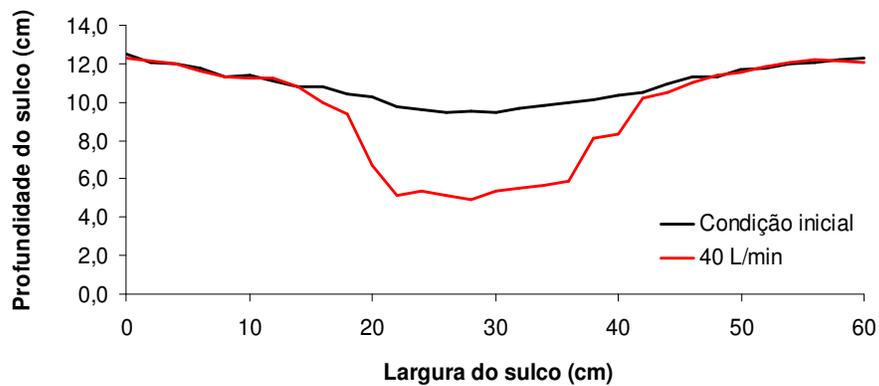
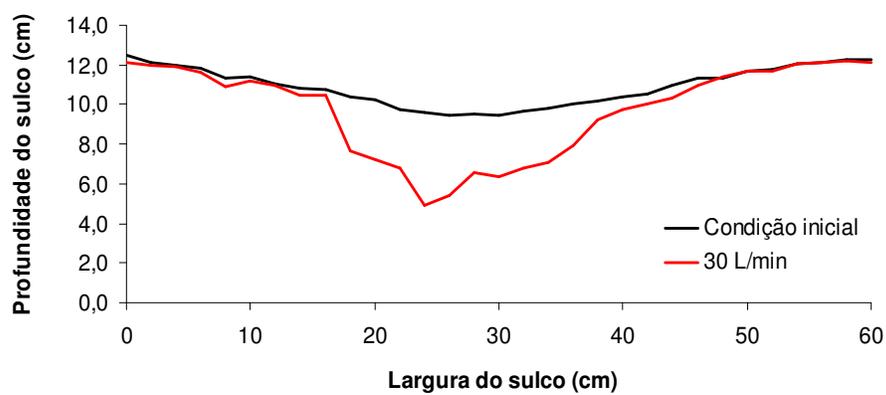
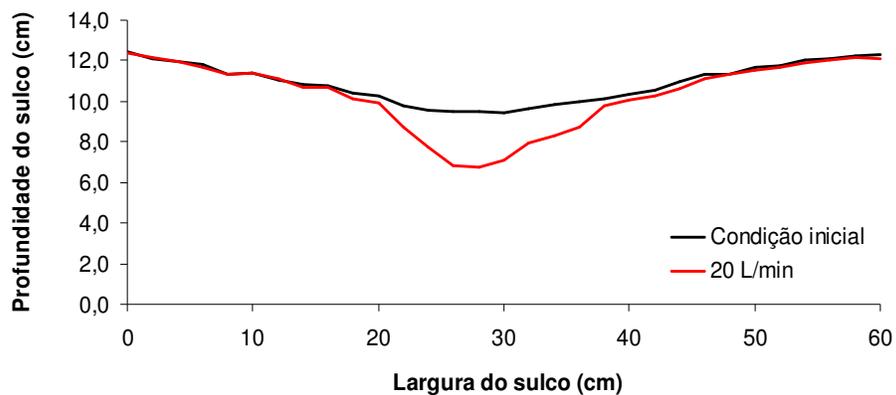
	1	PI	10,17	3,78	2,52	2,71	3,62	4,23
	2	PI	55,18	1,52	3,12	4,04	3,66	4,83
<i>f</i>	3	PI	17,05	2,98	2,62	1,98	2,14	1,94
		PS	9,80	2,17	2,23	2,42	1,06	2,04
		Média	13,42	2,58	2,42	2,20	1,60	1,99
		<b>Média</b>	<b>26,26</b>	<b>2,63</b>	<b>2,69</b>	<b>2,98</b>	<b>2,96</b>	<b>3,35</b>
	1	0-10 cm	0,20					
		10-20 cm	0,36					
	2	0-10 cm	0,07					
		10-20 cm	0,15					
	3	0-10 cm	0,32					
		10-20 cm	0,40					
		<b>UG (kg kg<sup>-1</sup>)</b>						

$V_m$  = velocidade média, A = Área, Pm = perímetro molhado,  $R_h$  = raio hidráulico, Re = número de Reynolds, Fr = número de Froude,  $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning,  $U^*$  = velocidade de cisalhamento,  $f$  = fator de perda de carga de Darcy-Weisbach, UG = unidade gravimétrica inicial do solo, PI = segmento inferior do sulco, PS = segmento superior do sulco.

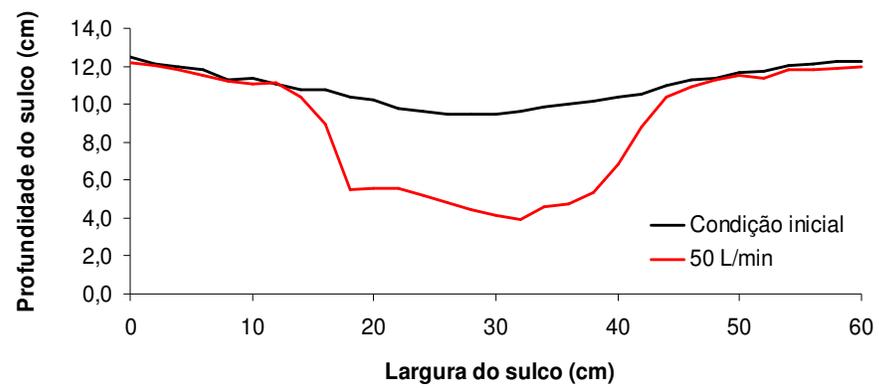


**Apêndice 5.** Seção transversal média do sulco de erosão.

## Continuação do apêndice 5



## Continuação do apêndice 5



**Apêndice 6.** Valores médios de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), para os testes realizados sob condições de campo, laboratório e estimado por equação da rotina interna do modelo.

Teste	$D_i$ kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	I m s <sup>-1</sup>	q <sub>i</sub> m s <sup>-1</sup>	$S_f$	$K_i$	
					Observado	Estimado
					kg s m <sup>-4</sup>	
		<u>Condição de Campo</u>				
1	0,920x10 <sup>-4</sup>	1,944x10 <sup>-5</sup>	1,161x10 <sup>-5</sup>	0,5618	0,72x10 <sup>6</sup>	
2	0,497x10 <sup>-4</sup>	1,944x10 <sup>-5</sup>	0,895x10 <sup>-5</sup>	0,5304	0,54x10 <sup>6</sup>	4,25x10 <sup>6</sup>
3	0,901x10 <sup>-4</sup>	1,944x10 <sup>-5</sup>	1,229x10 <sup>-5</sup>	0,5618	0,67x10 <sup>6</sup>	
Média	0,773x10 <sup>-4</sup>	1,944x10 <sup>-5</sup>	1,095x10 <sup>-5</sup>	0,5513	0,64x10 <sup>6</sup>	
		<u>Condição de Laboratório</u>				
1	7,052x10 <sup>-4</sup>	2,361x10 <sup>-5</sup>	-	0,4791	2,64x10 <sup>6</sup>	
2	3,088x10 <sup>-4</sup>	2,361x10 <sup>-5</sup>	-	0,4791	1,16x10 <sup>6</sup>	
3	4,472x10 <sup>-4</sup>	2,361x10 <sup>-5</sup>	-	0,4791	1,67x10 <sup>6</sup>	4,25x10 <sup>6</sup>
4	3,300x10 <sup>-4</sup>	2,361x10 <sup>-5</sup>	-	0,4791	1,24x10 <sup>6</sup>	
Média	4,478x10 <sup>-4</sup>	2,361x10 <sup>-5</sup>	-	0,4791	1,68x10 <sup>6</sup>	

$D_i$  = taxa de desagregação do solo em entressulcos, I = intensidade da chuva, q<sub>i</sub> = descarga líquida do escoamento superficial,  $S_f$  = fator de ajuste da declividade,  $K_i$  = erodibilidade do solo em entressulcos observado e estimado.

**Apêndice 7.** Valores de descarga líquida (Q), concentração média de sedimentos na enxurrada (C), declive, tensão cisalhante do escoamento ( $\tau$ ) e taxa de desagregação ( $D_r$ ) para vazões aplicadas em sulcos pré-formados.

Variável	Sulco	Posição	Unidade	Fluxo extra aplicado ( $L \cdot min^{-1}$ ) <sup>(1)</sup>					
				6 + 0	6 + 10	6 + 20	6 + 30	6 + 40	6 + 50
<b>Q</b>	1	-		0,0456	0,2507	0,4173	0,5507	0,7540	0,7855
	2	-	L s <sup>-1</sup>	0,0167	0,2093	0,4393	0,6067	0,7447	1,0020
	3	-		0,0295	0,2320	0,3667	0,5787	0,8573	1,0060
<b>Média</b>				<b>0,0306</b>	<b>0,2307</b>	<b>0,4078</b>	<b>0,5787</b>	<b>0,7853</b>	<b>0,9312</b>
<b>C</b>	1	-		0,0686	0,1987	0,2069	0,1430	0,0557	0,0396
	2	-	kg L <sup>-1</sup>	0,0185	0,2342	0,2196	0,1829	0,0575	0,0811
	3	-		0,0370	0,1762	0,1578	0,1518	0,1310	0,1037
<b>Média</b>				<b>0,0413</b>	<b>0,2030</b>	<b>0,1948</b>	<b>0,1592</b>	<b>0,0814</b>	<b>0,0748</b>
<b>Declive</b>	1	-		0,1406	0,1406	0,1406	0,1406	0,1406	0,1406
	2	-	m m <sup>-1</sup>	0,1328	0,1328	0,1328	0,1328	0,1328	0,1328
	3	-		0,1484	0,1484	0,1484	0,1484	0,1484	0,1484
<b>Média</b>				<b>0,1406</b>	<b>0,1406</b>	<b>0,1406</b>	<b>0,1406</b>	<b>0,1406</b>	<b>0,1406</b>
<b><math>\tau</math></b>	1	PI		11,68	21,48	24,21	40,58	54,33	63,34
	2	PI		4,88	7,43	24,70	38,75	54,79	57,33
	PI		5,43	10,63	14,86	23,26	15,86	39,85	
	PS		9,46	14,59	17,43	18,98	34,94	38,05	
	PSI		7,49	13,53	16,03	21,47	25,42	38,91	
	<b>Média</b>			<b>8,02</b>	<b>14,15</b>	<b>21,65</b>	<b>33,60</b>	<b>44,85</b>	<b>53,19</b>
<b><math>D_r</math></b>	1	-		0,00346	0,04303	0,07806	0,05370	0,02042	0,00909
	2	-	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,00097	0,03943	0,08062	0,07140	0,03487	0,03677
	3	-		0,00138	0,04611	0,04949	0,06302	0,07336	0,07071
<b>Média</b>			<b>0,00194</b>	<b>0,04286</b>	<b>0,06939</b>	<b>0,06271</b>	<b>0,04288</b>	<b>0,03886</b>	

<sup>(1)</sup> A chuva simulada de 70 mm h<sup>-1</sup>, simultaneamente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente 6 L min<sup>-1</sup>. PI = segmento inferior do sulco, PS = segmento superior do sulco, PSI = segmento superior e inferior no sulco.

**Apêndice 8.** Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimento na primeira vertente estudada, para simulações realizadas.

Simulação	Segmento	Precipitação	Escoamento	Produção de sedimento
ano	m	mm	mm	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
<b>Simulação III</b> – ( $K_i$ = condição de Laboratório)				
1	142	1751	333	11,10
25	142	1790	386	10,01
50	142	1778	373	5,00
100	142	1761	366	2,34
----- <b>Simulação IV</b> – ( $K_i$ = estimado por equação da rotina interna do modelo)				
1	142	1751	333	11,50
25	142	1790	386	10,27
50	142	1778	373	5,11
100	142	1761	366	2,42
----- <b>Simulação V</b> - ( $K_i$ e $\tau_c$ = estimado por equações da rotina interna do modelo)				
1	142	1751	333	22,65
25	142	1790	386	8,71
50	142	1778	373	4,19
100	142	1761	366	1,74
----- <b>Simulação VI</b> – ( $K_{sat}$ = estimado por equação da rotina interna do modelo)				
1	142	1751	402	11,62
25	142	1790	685	21,92
50	142	1778	688	11,47
100	142	1761	683	5,65
----- <b>Simulação VII</b> - ( $K_{sat}$ = amostras com estrutura preservada feito com o auxílio de um permeâmetro)				
1	142	1751	305	3,33
25	142	1790	355	7,74
50	142	1778	341	3,98
100	142	1761	335	1,86

**Apêndice 9.** Médias dos valores anuais de desagregação, e deposição de sedimentos com respectivo comprimento na primeira vertente estudada, para simulações realizadas.

Simulação	Segmento	Desagregação		Deposição	
		Média	Comp. <sup>(1)</sup>	Média	Comp. <sup>(1)</sup>
ano	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m
<b>Simulação III – (K<sub>i</sub> = condição de Laboratório)</b>					
1	142,0	11,10	142,0	0,00	0,00
25	142,0	10,44	140,5	0,43	1,5
50	142,0	5,22	140,5	0,22	1,5
100	142,0	2,51	140,5	0,17	1,5
<b>Simulação IV – (K<sub>i</sub> = estimado por equação da rotina interna do modelo)</b>					
1	142,0	11,50	142,0	0,00	0,00
25	142,0	10,49	140,5	0,22	1,5
50	142,0	5,26	140,5	0,11	1,5
100	142,0	2,53	140,5	0,11	1,5
<b>Simulação V - (K<sub>i</sub> e τ<sub>c</sub> = estimado por equações da rotina interna do modelo)</b>					
1	142,0	22,65	142,0	0,00	0,00
25	142,0	13,19	139,1	4,48	2,9
50	142,0	6,64	139,1	2,45	2,9
100	142,0	3,19	139,1	1,45	2,9
<b>Simulação VI – (K<sub>sat</sub> = estimado por equação da rotina interna do modelo)</b>					
1	142,0	11,62	142,0	0,00	0,00
25	142,0	22,10	140,5	0,18	1,5
50	142,0	11,53	140,5	0,06	1,5
100	142,0	5,75	140,5	0,10	1,5
<b>Simulação VII - (K<sub>sat</sub> = amostras com estrutura preservada feito com o auxílio de um permeâmetro)</b>					
1	142,0	3,33	142,0	0,00	0,00
25	142,0	8,33	140,5	0,59	1,5
50	142,0	4,13	140,5	0,15	1,5
100	142,0	2,00	140,5	0,14	1,5

<sup>(1)</sup> Comprimento de cada segmento (desagregação e deposição de sedimento) ao longo de cada vertente.

**Apêndice 10.** Médias dos valores anuais de precipitação, escoamento e produção de sedimento na segunda vertente estudada, para simulações realizadas.

Simulação	Segmento	Precipitação	Escoamento	Produção de sedimento
ano	m	mm	mm	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
<b>Simulação III</b> – ( $K_i$ = condição de Laboratório)				
1	199	1751	334	6,66
25	199	1790	381	9,53
50	199	1778	368	4,78
100	199	1761	361	2,27
----- <b>Simulação IV</b> – ( $K_i$ = estimado por equação da rotina interna do modelo)				
1	199	1751	334	7,07
25	199	1790	381	9,63
50	199	1778	368	4,81
100	199	1761	361	2,29
----- <b>Simulação V</b> - ( $K_i$ e $\tau_c$ = estimado por equações da rotina interna do modelo)				
1	199	1751	334	14,42
25	199	1790	381	6,08
50	199	1778	368	2,90
100	199	1761	361	1,35
----- <b>Simulação VI</b> – ( $K_{sat}$ = estimado por equação da rotina interna do modelo)				
1	199	1751	393	5,04
25	199	1790	671	14,44
50	199	1778	675	7,53
100	199	1761	669	3,75
----- <b>Simulação VII</b> - ( $K_{sat}$ = amostras com estrutura preservada feito com o auxílio de um permeâmetro)				
1	199	1751	285	2,09
25	199	1790	342	6,23
50	199	1778	329	3,28
100	199	1761	324	1,56

**Apêndice 11.** Médias dos valores anuais de desagregação e deposição de sedimentos com respectivo comprimento na segunda vertente estudada, para simulações realizadas.

Simulação	Segmento	Desagregação		Deposição	
		Média	Comp. <sup>(1)</sup>	Média	Comp. <sup>(1)</sup>
ano	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m
<b>Simulação III – (K<sub>i</sub> = condição de Laboratório)</b>					
1	199,0	6,66	199,0	0,00	0,00
25	199,0	10,91	191,0	1,38	8,0
50	199,0	5,44	191,0	0,66	8,0
100	199,0	2,62	191,0	0,35	8,0
<b>Simulação IV – (K<sub>i</sub> = estimado por equação da rotina interna do modelo)</b>					
1	199,0	7,07	199,0	0,00	0,00
25	199,0	10,98	191,0	1,35	8,0
50	199,0	5,46	191,0	0,65	8,0
100	199,0	2,63	191,0	0,34	8,0
<b>Simulação V - (K<sub>i</sub> e τ<sub>c</sub> = estimado por equações da rotina interna do modelo)</b>					
1	199,0	14,42	199,0	0,00	0,00
25	199,0	14,10	179,0	8,02	20,0
50	199,0	7,07	179,0	4,17	20,0
100	199,0	3,40	179,0	2,05	20,0
<b>Simulação VI – (K<sub>sat</sub> = estimado por equação da rotina interna do modelo)</b>					
1	199,0	5,04	199,0	0,00	0,00
25	199,0	23,58	187,0	9,14	12,0
50	199,0	12,30	187,0	4,77	12,0
100	199,0	6,13	187,0	2,38	12,0
<b>Simulação VII - (K<sub>sat</sub> = amostras com estrutura preservada feito com o auxílio de um permeâmetro)</b>					
1	199,0	2,09	199,0	0,00	0,00
25	199,0	7,78	191,0	1,55	8,0
50	199,0	3,83	191,0	0,55	8,0
100	199,0	1,84	193,0	0,28	6,0

<sup>(1)</sup> Comprimento de cada segmento (desagregação e deposição de sedimento) ao longo de cada vertente.