

RICARDO SANTOS SILVA AMORIM

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA
USLE, RUSLE E WEPP PARA CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS
BRASILEIRAS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2004

RICARDO SANTOS SILVA AMORIM

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA
USLE, RUSLE E WEPP PARA CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS
BRASILEIRAS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

APROVADA: 16 de outubro de 2003.

Prof. Fernando Falco Pruski
(Conselheiro)

Prof. Antonio Teixeira de Matos
(Conselheiro)

Prof. Mauro Aparecido Martinez

Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

Prof. Demetrius David da Silva
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais Alice e Francisco.

A todos os meus irmãos e sobrinhos.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela vida e acolhida nos momentos difíceis.

Aos meus pais, pela minha formação nos princípios da verdade e pela compreensão da minha ausência nos momentos de alegrias e de tristezas.

Aos meus irmãos, pelo apoio e incentivo a mim dispensado durante os longos anos de estudos.

Aos meus sobrinhos, pelos momentos de alegrias, os quais, embora não tenham sido tão freqüentes, foram muito valiosos para que eu continuasse na busca dos meus ideais, procurando sempre poder ser algum dia referencial de alguém que lutou pelos seus anseios.

À Suzana Souza dos Santos, pelo carinho, pela compreensão, pelo estímulo e pelos incentivos para que eu superasse as barreiras encontradas e os diversos momentos de angústias.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos e pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo e pelo apoio financeiro do projeto.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela orientação valiosa, pelo incentivo, pela amizade sincera e pela confiança e dedicação demonstrados ao

longo da condução deste trabalho, além do excelente convívio durante a minha permanência na Universidade Federal de Viçosa, não somente como um orientador, mas também com um amigo e conselheiro no âmbito profissional e pessoal.

Ao professor Fernando Falco Pruski, pelas idéias, sugestões e críticas oportunas durante a realização desta pesquisa, pelo imenso apoio e dedicação ao longo do trabalho e, principalmente, nos momentos mais decisivos do trabalho, além da valiosa relação de confiança e amizade tanto no âmbito profissional quanto no pessoal.

Ao professor Antonio Teixeira de Matos, pela amizade e pelas idéias, sugestões, críticas e valiosa ajuda durante a realização deste trabalho.

Aos professores Daniel Fonseca de Carvalho e Mauro Aparecido Martinez, pela participação no comitê de avaliação e pelas sugestões e críticas oportunas.

Aos meus demais professores, pelo estímulo e ensinamento transmitidos no decorrer do Curso.

Aos meus colegas Silvio Bueno Pereira, Viviane Brandão dos Santos, Edson Vieira de Oliveira, José Márcio Alves da Silva, Herony Ulisses Mehl, Flávio Aparecido Gonçalves e Luiz Gustavo Nascentes Baena e demais integrantes do GPRH, pelas valiosas ajudas e pela convivência durante a realização deste trabalho.

Ao Alessandro de Freitas Teixeira, pelo apoio na parte de informática.

Ao Técnico Marcelo do Carmo Freitas, do Laboratório de Mecanização Agrícola, pela dedicação e pelas sugestões e apoio durante a construção da estrutura necessária para a realização deste trabalho.

Aos estagiários e, ou, bolsistas Juliana Lobo Paes, Agnaldo Adriano Gonçalves Barbosa, Eduardo Oliveira da Silva e Sady, pela amizade, pelo apoio e pela dedicação durante a condução do experimento desta pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica Antônio Inácio e Francisco, pela amizade e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos amigos e amigas de Teófilo Otoni, pelo incentivo e apoio na busca dos meus “ideais”.

Aos colegas de república, pelo convívio de amizade e compreensão, suprimindo de certa forma a ausência física da família.

Às demais pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu especial agradecimento.

BIOGRAFIA

RICARDO SANTOS SILVA AMORIM, filho de Francisco Alves Amorim e Alice Silva Amorim, nasceu em 15 de janeiro de 1971, em Caldeira - Porções, BA.

Em janeiro de 1989, iniciou o Curso Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica de São João Evangelista, concluindo-o em dezembro de 1991.

Em agosto de 1992, iniciou o Curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, concluindo-o em agosto de 1997.

Em agosto de 1997, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, concluindo-o em agosto de 1999.

Em setembro de 1999, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE TABELAS E QUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Processos de erosão do solo	4
2.2. Prospectos e problemas da erosão do solo	7
2.3. Avaliação quantitativa da erosão do solo	9
2.3.1. Histórico da predição da erosão	10
2.3.2. Tipos de modelos	12
2.4. Equação Universal de Perdas de Solo – USLE	14
2.4.1. Erosividade da chuva (R)	16
2.4.2. Erodibilidade do solo (K)	17
2.4.3. Comprimento de rampa e declividade do terreno (LS)	18
2.4.4. Uso e manejo do solo (C)	19

2.4.5. Práticas conservacionistas (P)	20
2.4.6. Aplicações e Limitações da USLE	20
2.5. Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE	22
2.5.1. Fator R	22
2.5.2. Fator K	23
2.5.3. Fator LS	23
2.5.4. Fator C	24
2.5.5. Fator P	24
2.5.6. Aplicações e Limitações da RUSLE	25
2.6. Water Erosion Prediction Project – WEPP	25
2.6.1. Componente erosão do solo	27
2.6.2. Componente hidrológico	29
2.6.3. Componente de crescimento de planta e de decomposição de resíduos	30
2.6.4. Componente de balanço hídrico	30
2.6.5. Componente hidráulica do escoamento superficial	31
2.6.6. Componente do solo	32
2.6.7. Aplicações e Limitações do WEPP	32
2.7. Avaliação dos modelos de predição da erosão	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1. Obtenção do banco de dados	37
3.2. Parcelas experimentais implantadas em Viçosa – MG	38
3.2.1. Descrição das parcelas experimentais	42
3.2.2. Caracterização do solo da Área Experimental	45
3.2.3. Determinação da precipitação, do escoamento superficial, do coeficiente de escoamento e das perdas de solo	45
3.3. Aplicação dos modelos para predição das perdas de água e solo	49
3.3.1. USLE	49
3.3.2. RUSLE	51
3.3.3. WEPP	53
3.4. Análise estatística para comparação dos modelos	55

3.5. Análise de sensibilidade	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1. Perdas de solo e água	60
4.2. Avaliação do desempenho dos modelos USLE, RUSLE e WEPP	62
4.3. Análise de sensibilidade do modelo WEPP	72
4.3.1. Parâmetros do banco de dados referentes às características do solo	72
4.3.2. Parâmetros do banco de dados referentes ao uso e manejo do solo	74
4.3.3. Parâmetros do banco de dados referentes às características do perfil topográfico da encosta	76
4.3.4. Parâmetros do banco de dados referentes às características da chuva	77
4.3.5. Análise comparativa dos índices de sensibilidade	79
5. RESUMO E CONCLUSÕES	86
6. RECOMENCAÇÕES	89
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
8. APÊNDICES	100
APÊNDICE A	101
APÊNDICE B	102
APÊNDICE C	103
APÊNDICE D	108
APÊNDICE E	109
APÊNDICE F	111
APÊNDICE G	117
APÊNDICE H	118

LISTA DE TABELAS E QUADROS

	Página
Tabela 1 – Extensão do Globo terrestre afetada pela erosão hídrica.	8
Tabela 2 – Valores de P para algumas práticas conservacionistas.	21
Quadro 1 – Características de solo, manejo, declividade (S) e dimensões (DP) das parcelas experimentais nos locais utilizados para realização do estudo.	39
Quadro 2 – Propriedades básicas da camada superficial do solo (0 – 20 cm) para cada local estudado.	41
Quadro 3 – Características físicas do solo da área experimental.	46
Quadro 4 – Características químicas do solo da área experimental.	46
Quadro 5 – Valores do fator de erosividade da chuva (R), $\text{MJ mm}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$, para cada local em estudo.	50
Quadro 6 – Parâmetros do modelo WEPP e seus respectivos valores de base e faixa de valores utilizados para a análise de sensibilidade.	58
Quadro 7 – Perdas de solo (PS), perdas de água (PA) e coeficientes de escoamento (Cesc) observados nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG, durante o período de 12/11/2002 a 22/03/2003.	61
Quadro 8 – Parâmetros estatísticos associados à estimativa das perdas de solo pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP considerando todas as localidades estudadas.	68
Quadro 9 – Valores das perdas de solo (PS) médias anuais estimadas e da magnitude do desvio (Desvio) das estimativas dos modelos	

USLE, RUSLE e WEPP em relação aos dados observados para as nove localidades e diferentes condições de uso e manejo solo.	70
Quadro 10 – Erro médio absoluto (Erro), raiz do quadrado médio do erro (RMSE) e eficiência (e_{95}) dos modelos USLE, RUSLE e WEPP nas estimativas das perdas de solo médias anuais para as localidades estudadas.	72
Quadro 11 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e água (PA), estimadas utilizando-se o modelo WEPP, aos parâmetros erodibilidade entressulcos (K_i), erodibilidade no sulco (K_r), tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) e condutividade hidráulica (K_o) para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta.	73
Quadro 12 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros de textura (argila e areia), matéria orgânica, albedo e nível de saturação.	74
Quadro 13 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros de cobertura do solo pelas copas das plantas (CC), altura da copa das plantas (AC) e adição de resíduos (AD) para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta.	75
Quadro 14 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros de cobertura do sulco (CR), cobertura entressulcos (CI), altura dos sulcos após o preparo do solo (AS) e rugosidade randômica do solo (RR) para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta.	75
Quadro 15 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros comprimento (L) e declividade (S) para encosta com perfil topográfico uniforme e desuniforme.	77
Quadro 17 – Valores médios dos índices de sensibilidade do modelo WEPP obtidos para os diferentes parâmetros de entrada referentes aos bancos de dados de clima, de solo, topográfico e de manejo e uso do solo.	80
Quadro 1A – Valores da classe de estrutura (s) e de permeabilidade (p) do solo para as diferentes localidades estudadas.	101
Quadro 1B – Valores dos fatores de práticas conservacionistas (P) e de uso e manejo do solo (C), utilizados para as estimativas das perdas de solo pela USLE nas diversas condições	

adotadas nas parcelas experimentais das diferentes localidades estudadas.	102
Quadro 1C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Alagoinha – PB.	103
Quadro 2C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Campinas – SP.	104
Quadro 3C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Dourados – MS.	104
Quadro 4C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Goiânia – GO.	105
Quadro 5C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Guaíba – RS.	105
Quadro 6C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Pindorama – SP.	106
Quadro 7C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Planaltina – DF.	106
Quadro 8C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Santa Maria – RS.	107
Quadro 9C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Viçosa – MG.	107
Quadro 1D – Banco de dados CROP DATABASE do modelo RUSLE referente à cultura do milho utilizada nas parcelas experimentais instaladas na cidade de Viçosa – MG.	108
Quadro 1E – Características físicas e químicas do perfil do solo, para cada local estudado, necessárias para aplicação do modelo WEPP.	109
Quadro 1F – Dados de lâmina total precipitada (L_{Ppt}), lâmina total acumulada, intensidades de precipitação média ($I_{\text{méd}}$) e máxima ($I_{\text{máx}}$), duração da chuva (D) e tempo para ocorrência da $I_{\text{máx}}$ para cada chuva ocorrida durante o período de 12/11/2002 a 22/03/2003.	111

Quadro 2F – Dados de perdas de solo (PS) e de água (PA) referentes a cada evento de chuva ocorrido durante o período de 12/11/2002 a 23/03/2003 obtidos nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG.	113
Quadro 1H – Valores discretizados dos parâmetros utilizados na avaliação do efeito da variação dos parâmetros de entrada sobre as estimativas das perdas de solo (PS) e de água (PA) pelo modelo WEPP.	118

LISTA DE FIGURAS

1. Parcela experimental utilizada para coleta de dados de perdas de solo e água em Viçosa-MG.	43
2. Estrutura de coleta das perdas de solo e de água (a), detalhes dos sistemas de filtragem (b) e de monitoramento do escoamento superficial (c).	44
3. Sistema de calhas divisorias do tipo Geib para fração de 1/9.	44
4. Curva característica de retenção de água no solo, na profundidade de 0 - 20 cm.	46
5. Pluviógrafo do tipo pulso (a) utilizado na aquisição de dados de precipitação conectado ao “Datalogger” (b).	47
6. Manta de bidim que possibilitou a retenção e coleta das partículas de solo transportadas pelo escoamento superficial.	49
7. Fluxograma para cálculo das perdas de solo pelo modelo RUSLE.	52
8. Perdas de solo (PS) médias anuais estimadas utilizando-se os modelos USLE (a), RUSLE (b) e WEPP (c) versus as obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo nas nove localidades estudadas.	65
9. Erro das estimativas das perdas de solo (PS) utilizando-se os modelos USLE (a), RUSLE (b) e WEPP (c) versus as perdas de solo obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo nas nove localidades estudadas.	66
10. Perdas de solo (PS) médias anuais estimadas pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP versus as obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo para as nove localidades estudadas.	68

11. Variação percentual nas estimativas das perdas de solo (PS) e de água (PA) pelo modelo WEPP em função da variação percentual dos parâmetros de entrada referentes às características do solo (a), às características topográficas do perfil da encosta (b) e às características de uso e manejo do solo (c).	84
1F. Lâmina de escoamento superficial (ES) e de precipitação (Ppt) para os eventos de chuva ocorridos durante o período de novembro/2002 a dezembro/2003 nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG: SDMA (a), SDEN (b), MCMA (c) e MCEN (d).	115
2F. Perdas de solo (PS) e lâmina de precipitação (Ppt) para os eventos de chuva ocorridos durante o período de novembro/2002 a dezembro/2003 nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG: SDMA (a), SDEN (b), MCMA (c) e MCEN (d).	116
1G. Dados de perdas de solo estimadas pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP e observados experimentalmente para as condições de uso e manejo do solo adotadas nas diferentes localidades.	117

LISTA DE SIMBOLOS

- τ = tensão cisalhante do escoamento superficial sobre as partículas de solo, Pa.
- β = coeficiente de turbulência induzida pelo impacto das gotas da chuva (No modelo WEPP assume igual a 0,5).
- θ = Conteúdo de água do solo na zona radicular em dado dia, m.
- δ = declinação solar, rad.
- τ_c = tensão cisalhante necessária para a ocorrência da liberação de partículas, Pa.
- θ_{in} = Conteúdo inicial de água do solo na zona radicular, m.
- A = Área da parcela experimental, m².
- a_s = fração da radiação no topo da atmosfera para dias nublados.
- b_s = fração da radiação no topo da atmosfera para dias claros.
- C = fator de uso e manejo do solo, adimensional.
- CC = cobertura do solo pela copa da cultura.
- C_i = parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão entressulcos, adimensional.
- D = perda acumulada de água por percolação abaixo da zona radicular, m.
- D_i = taxa de liberação de sedimentos nas áreas entressulcos, kg s⁻¹ m⁻².
- D_r = taxa de liberação de sedimentos em sulcos, kg s⁻¹ m⁻².
- ET = evapotranspiração acumulada, m.

- G = carga de sedimentos, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$.
- G_e = parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo na erosão entressulcos, adimensional.
- h = lâmina de escoamento, m.
- I = interceptação da precipitação pela vegetação, m.
- I_1 = mínimo valor de entrada.
- I_{12} = valor médio de I_1 e I_2 .
- I_2 = máximo valor de entrada.
- i_i = intensidade instantânea de precipitação, m s^{-1} .
- I_p = intensidade de precipitação, m s^{-1} .
- J = número do dia Juliano.
- K = fator de erodibilidade do solo, $\text{t ha h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$.
- K_i = parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo entressulcos, $\text{kg m}^{-4} \text{s}$.
- K_r = parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo no sulco, $\text{m}^{-1} \text{s}$.
- L = comprimento da rampa (encosta), m.
- L_{esc} = Lâmina total de escoamento superficial, mm.
- L_{ppt} = Lâmina precipitada, mm.
- LS = fator de comprimento e declividade de rampa, adimensional.
- m = parâmetro de ajuste que varia em função da declividade da rampa, assumindo valor de 0,5 para declividades maior ou igual a 5%, 0,4 para declividades de 3,5 a 4,5%, 0,3 para declividades de 1 a 3% e 0,2 para declividades menores que 1%.
- M = parâmetro que representa a textura do solo.
- M = valor de perda de solo medido.
- n = número de horas de brilho solar por dia, h.
- N = número máximo de horas de brilho solar do dia, h.
- N = número total de pares de valores observados e estimados.
- ND = número de dias sem chuva, dias.
- NW = número de dias chuvosos, dias.
- NWD = número de dias chuvosos após dia sem chuva, dias.
- NWW = número de dias chuvosos após dia com chuva, dias.
- O_1 = valor de saída do modelo associado a I_1 .
- O_{12} = valor médio de O_1 e O_2 .

- O_2 = valor de saída do modelo associado a I_2 .
- O_i = valor observado para o i ésimo evento.
- OM = Conteúdo de matéria orgânica, dag kg^{-1} .
- P = fator de práticas conservacionistas, adimensional.
- P = precipitação acumulada, m.
- p = permeabilidade do perfil, adimensional.
- P(W/D) = probabilidade mensal da ocorrência de dia com chuva após dias sem chuva, decimal.
- P(W/W) = probabilidade mensal da ocorrência de dia com chuva após dias com chuva, decimal.
- P_i = valor estimado para o i ésimo evento.
- PLU = uso prévio do solo.
- PS = perda de solo média anual, $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$.
- q = vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$).
- Q = escoamento superficial acumulado, m.
- Q = escoamento lateral sub-superficial, m.
- R = fator de erosividade da chuva, $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$.
- R_a = Radiação no topo da atmosfera, Langley.
- R_s = radiação solar incidente na superfície terrestre, Langley.
- S = Conteúdo de água em forma de neve, m.
- s = classe de estrutura do solo, adimensional.
- S = valor de perda de solo estimado.
- SC = cobertura da superfície do solo por resíduos.
- S_f = fator de ajuste relativo à declividade, adimensional.
- SM = Umidade do solo.
- SR = rugosidade da superfície do solo.
- t = tempo, s.
- T_c = capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$.
- T_i = taxa de infiltração da água no solo, mm h^{-1} .
- V_{esc} = Volume total de escoamento superficial, L.
- V_f = velocidade efetiva de queda (deposição) para o sedimento, m s^{-1} .
- X = Distância percorrida pelo escoamento superficial, m.
- = ângulo de declive da rampa, graus.

RESUMO

AMORIM, Ricardo Santos Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2003. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras.** Orientador: Demetrius David da Silva. Conselheiros: Fernando Falco Pruski e Antonio Teixeira de Matos.

Os modelos de predição da erosão hídrica devem ser avaliados e, ou, calibrados antes de serem extensivamente utilizados para uma dada condição edafoclimática, principalmente quando se trata de condições diferentes daquelas para as quais o modelo foi desenvolvido. Desta forma, torna-se fundamental a avaliação destes modelos para as condições edafoclimáticas brasileiras, uma vez que o desenvolvimento de um modelo é bastante oneroso em termos de tempo e de recursos necessários. Desta forma, objetivou-se com este trabalho determinar as perdas de solo e de água em parcelas experimentais sob condições de chuvas naturais na cidade de Viçosa – MG; avaliar o comportamento dos modelos de predição das perdas de solo USLE, RUSLE e WEPP quando aplicados a nove localidades do Brasil; e realizar uma análise de sensibilidade do modelo WEPP, de forma a caracterizar os parâmetros críticos quando aplicado às condições brasileiras. Para alcançar os objetivos propostos foram implantadas quatro

parcelas experimentais para o monitoramento das perdas de solo e de água sob condições de chuva natural. As perdas de solo estimadas pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP para nove cidades do Brasil foram comparadas às perdas obtidas experimentalmente, por meio do coeficiente de correlação, da raiz do quadrado médio do erro (RMSE) e da eficiência dos modelos. A análise de sensibilidade do WEPP foi realizada para 22 parâmetros de entrada do modelo. Os resultados obtidos permitiram concluir que: a presença da cobertura vegetal da cultura do milho reduziu expressivamente as perdas de solo, sendo esta redução mais efetiva quando associada ao preparo do solo em nível; a presença da cobertura vegetal e a realização do preparo do solo em nível foram mais eficientes na redução das perdas de solo comparativamente às perdas de água; o modelo WEPP apresentou melhor comportamento quanto aos desvios obtidos entre os dados experimentais e os dados estimados; a lâmina total precipitada foi o parâmetro ao qual o WEPP apresentou maior sensibilidade; 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, a condutividade hidráulica e as erodibilidades no sulco e entressulcos; e a rugosidade randômica, a adição de resíduos e a cobertura do solo pela copa das plantas foram os parâmetros aos quais o modelo WEPP apresentou maior sensibilidade dentre aqueles referentes ao banco de dados de uso e manejo do solo.

ABSTRACT

AMORIM, Ricardo Santos Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, October of 2003. **Evaluation of the water erosion prediction models USLE, RUSLE and WEPP for conditions Brazilian.** Adviser: Demetrius David da Silva. Committee Members: Fernando Falco Pruski and Antonio Teixeira de Matos.

The water erosion prediction models should be evaluated and, or, calibrated before they be extensively used for a given condition edaphoclimatic, mainly when it is conditions different from those for which the model was developed. This way, becomes fundamental the evaluation of these models for the conditions Brazilian, once the models development is quite onerous in terms of time and of necessary resources. It was objectified with this work to determine the soil and water loss natural rainfall erosion plots in the city of Viçosa - MG; to evaluate the soil loss prediction models USLE, RUSLE and WEPP when applied to nine locality of Brazil; and to accomplish sensitivity analysis of the model WEPP, seeking to characterize the critical parameters when applied to the Brazilian conditions. To reach the proposed objectives four plots were implanted for the accompaniment of the soil and water loss under conditions of natural rain. The soil losses estimated for the models USLE,

RUSLE and WEPP for nine cities of Brazil were compared to the losses measured, by means of the correlation coefficient, of the root mean square error (RMSE) and of the models efficiency. The sensitivity analysis of WEPP was accomplished for 22 model input parameters. The obtained results allowed to conclude that: the presence of the canopy cover of the corn reduced the soil losses, being this more effective reduction when associated to the preparation of the soil in contour; the presence of the canopy cover and the contour soil prepare was more efficient in to reduction of the soil losses comparatively to the water losses; the model WEPP presented better behavior with relationship to the deviations obtained between the experimental data and the estimated data; the precipitated total depth was the parameter to which WEPP presented greater sensibility; the model WEPP presented a sensibility elevated to the parameters soil characteristics database, being detached as the more critics the critical shear, the Saturated hydraulic conductivity and the erodibility interrill and rill; and the random roughness, the residue addition and the canopy cover were the parameters to the which the model WEPP presented greater sensibility among those of the management database.

1. INTRODUÇÃO

A erosão consiste no processo de desprendimento e transporte das partículas do solo, constituindo fenômeno de grande importância em razão da rapidez com que se processa e por acarretar grandes prejuízos não só para a exploração agropecuária, mas também para diversas atividades econômicas e ao próprio meio ambiente. O controle da erosão hídrica torna-se necessário quando a quantidade de solo removida atinge valores acima de um nível considerado aceitável. Dentre os prejuízos causados pela erosão, provavelmente o mais maléfico seja o da própria perda de solo, uma vez que a natureza leva cerca de 100 anos para formar uma camada de solo de 1 cm de espessura (BENNETT, 1955), a qual, muitas vezes, poderá ser perdida com uma única chuva.

Segundo o United Nations Environmental Program (1991), grandes áreas de terras cultivadas podem se tornar improdutivas, ou pelo menos economicamente inviáveis, se a erosão não se mantiver em níveis toleráveis (HIGGITT, 1991). De acordo com ROSA (2000), cerca de 1,5 bilhões de hectares, ou seja, aproximadamente 10% da superfície terrestre, já foram irreversivelmente degradados pelo processo de erosão, o qual é geralmente ativado e acelerado pelo uso e manejo inadequados do solo.

Um manejo agrícola efetivo, visando o controle do processo erosivo, requer o entendimento das interações complexas entre os processos químicos,

físicos, hidrológicos e meteorológicos. A análise destas importantes interações dificilmente pode ser feita experimentalmente e, em função disso, a simulação computacional torna-se uma forma prática de investigar os impactos provenientes da adoção de diferentes práticas agrícolas (WALKER et al., 2000).

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. Os modelos de predição de erosão do solo evoluíram de modelos empíricos, tais como a Universal Soil Loss Equation (USLE) e a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), para modelos baseados em princípios teóricos, como o Water Erosion Prediction Project (WEPP).

A USLE, desenvolvida por WISCHMEIER e SMITH (1965), tem sido um dos modelos de erosão empíricos mais utilizados, permitindo estimar a perda média anual de solo com base em dados de precipitação, características do solo e do terreno e uso e manejo do solo. Este modelo foi desenvolvido a partir de ensaios de perdas de solo utilizando-se parcelas unitárias padrão com comprimento de rampa de 22 m e declividade de 9%.

A RUSLE foi originada de uma grande revisão feita no modelo USLE, permitindo estimar a perda de solo média anual causada pela precipitação e o escoamento associado à mesma. Embora a estrutura da equação seja a mesma da USLE, vários conceitos da modelagem da erosão baseada na descrição do processo físico foram incorporados na RUSLE para melhorar as predições de erosão.

O WEPP é um modelo computacional de simulação contínua que permite a estimativa da perda e da deposição de solo e não apenas da perda média de solo (FLANAGAN e NEARING, 1995). Este modelo é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo (física do solo, crescimento de plantas, infiltração e hidráulica do escoamento), apresentando várias vantagens sobre os modelos empíricos, pois considera os efeitos das mudanças de uso do solo e também modela a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam os processos hidrológicos e erosivos que ocorrem em uma encosta.

Os modelos de simulação, tais como os de predição de erosão, são ferramentas poderosas na pesquisa e nas práticas agrícolas, pois, quando aplicados em situações de campo, auxiliam na determinação das práticas conservacionistas e dos manejos mais indicados. No entanto, tanto os modelos empíricos quanto aqueles baseados em princípios físicos necessitam serem avaliados e, ou, calibrados para uma determinada condição edafoclimática, antes de serem extensivamente utilizados para a predição da erosão. Tendo em vista que os modelos de predição de erosão existentes foram desenvolvidos e os seus parâmetros ajustados para condições de clima temperado, condições estas bem diferentes do clima tropical, torna-se de fundamental importância uma verificação da aplicabilidade destes modelos para as condições edafoclimáticas brasileiras, uma vez que o desenvolvimento de um modelo é bastante oneroso em termos de tempo e de recursos necessários, tanto do ponto de vista de coleta de dados quanto dos diversos níveis do conhecimento que envolve o processo erosivo.

Em função do exposto, este trabalho teve como objetivos: determinar as perdas de solo e de água em parcelas experimentais submetidas à condição de chuva natural na cidade de Viçosa – MG; avaliar o comportamento dos modelos de predição das perdas de solo USLE, RUSLE e WEPP, quando aplicados a nove localidades do Brasil; e realizar análise de sensibilidade para o modelo WEPP, de forma a caracterizar os parâmetros críticos quando aplicado às condições brasileiras.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O processo de erosão do solo

A erosão consiste no processo natural de desprendimento e transporte das partículas do solo, inerente à própria formação do solo. Entretanto, a ação do homem, por meio da utilização de práticas que destroem o equilíbrio das condições naturais, provoca o surgimento da erosão acelerada, caracterizada comumente como erosão.

A erosão acelerada é classificada, quanto ao agente causador, em eólica ou hídrica. No primeiro tipo, o agente responsável pelo desprendimento e transporte das partículas do solo é o vento e, no segundo tipo, a água. No Brasil, indiscutivelmente, a erosão hídrica é a mais importante, motivo pelo qual a presente abordagem será direcionada a essa forma de erosão.

O processo de erosão hídrica pode ser descrito em três estágios: desprendimento, transporte e deposição. No processo erosivo, o desprendimento das partículas de solo é definido como a liberação de partículas dos agregados presentes na superfície do solo. O desprendimento dos sedimentos da superfície do solo foi originalmente considerado como sendo resultado exclusivamente do impacto das gotas da chuva (HUDSON, 1975). No entanto, atualmente também é reconhecida a importância do escoamento superficial como agente erosivo. O

desprendimento das partículas de solo é causado pela energia de impacto das gotas da chuva sobre a superfície do solo e pela tensão cisalhante do escoamento superficial, quando a mesma excede as forças coesivas do solo, comumente chamada de tensão de cisalhamento crítica do solo (LOCH e SILBURN, 1996).

Os sedimentos desprendidos são geralmente carregados pela água, por salpico ou por escoamento superficial, e estes movimentos definem o processo de transporte. Durante o processo de transporte alguns desses sedimentos podem ser depositados, dependendo de fatores como a alteração da geometria da superfície do solo, da lâmina de escoamento e da declividade da superfície do solo, dentre outros. De forma semelhante ao desprendimento, o transporte de sedimentos é realizado por agentes erosivos, isto é, pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial. O domínio da energia de impacto das gotas de chuva ou do escoamento superficial no desprendimento e transporte de sedimentos depende do tipo de erosão (entressulcos, em sulco ou em voçoroca) que ocorre.

Quando a velocidade do escoamento superficial é reduzida devido à rugosidade da superfície do solo, aos caules de plantas, aos resíduos de culturas, ao decréscimo da declividade da encosta e à menor frequência do impacto das gotas da chuva, os sedimentos em suspensão transportados pelo escoamento podem ser depositados na superfície do solo. O processo de deposição é altamente seletivo, sendo dependente da profundidade do escoamento superficial e da turbulência do escoamento promovida pelo impacto das gotas da chuva (AGASSI, 1995). A velocidade de sedimentação de um agregado ou partícula primária é função do seu tamanho, forma e densidade. Para um dado tamanho de sedimento, a taxa de deposição é inversamente proporcional à velocidade do escoamento e diretamente proporcional à concentração de sedimentos no escoamento superficial e a sua densidade (HAIRSINE e ROSE, 1991).

Os principais tipos de erosão são erosão entressulcos, erosão em sulcos e erosão em voçorocas. A erosão entressulcos é, às vezes, referida como erosão laminar, consistindo no desprendimento e remoção de partículas da superfície do solo pelo escoamento superficial e, ou, impacto das gotas da chuva, sendo

caracterizada por ocorrer uniformemente distribuída ao longo de uma encosta (HAIRSINE e ROSE, 1992).

A erosão em sulcos resulta da concentração do escoamento superficial em caminhos preferenciais, quando são formados pequenos canais. Esses canais são geralmente característicos de erosão de pequena intensidade, sendo facilmente desfeitos pelas práticas de cultivo (LOCH e SILBURN, 1996). Segundo FOSTER (1982), a erosão em sulco é caracterizada quando a profundidade do sulco formado não ultrapassa 300 mm. A formação do sulco é controlada pelas forças coesivas do solo e pelas forças cisalhantes do escoamento superficial exercidas sobre solo. O escoamento no sulco atua como um agente de transporte dos sedimentos desprendidos no sulco e daqueles advindos das áreas entressulcos, entretanto, se a tensão de cisalhamento do escoamento no sulco for muito elevada, o escoamento pode também desprender quantidades expressivas de partículas de solo (NEARING et al., 1994). Visando a simplificação, esses dois processos de erosão são freqüentemente considerados conjuntamente na modelagem da erosão.

Erosão em voçorocas, ao contrário da erosão em sulcos, forma canais de escoamento concentrado que são muito profundos para serem desfeitos pelas práticas de cultivo (LOCH e SILBURN, 1996). O escoamento em voçorocas difere do escoamento nas áreas entressulcos e nos sulcos pelo fato de que o impacto das gotas da chuva não é um importante fator em termos de turbulência do escoamento ou no desprendimento de partículas de solo (LOCH e SILBURN, 1996; MERRITT et al., 2003).

Esses tipos de erosão não ocorrem necessariamente de forma isolada, sendo influenciados por fatores relacionados com a encosta (uso e manejo do solo, cultura, etc), bem como pelas características das precipitações. Segundo LOCH e SILBURN (1996), para o desenvolvimento da erosão em sulcos e em voçorocas é necessário que ocorra a concentração do escoamento e que a tensão de cisalhamento do escoamento exceda a tensão crítica do solo. O processo de erosão dominante apresenta a seguinte ordem de sucessão: salpico – erosão entressulcos – erosão em sulco – erosão em voçoroca. A maioria dos modelos

tende a prever a erosão para um desses tipos de erosão ou, no máximo, para dois tipos.

2.2. Problemas conseqüentes da erosão do solo

É consenso mundial que a erosão acelerada do solo é um sério problema global, sendo difícil avaliar precisamente a sua extensão, a sua magnitude e a sua taxa, bem como suas conseqüências econômicas e ambientais. As informações disponíveis na literatura são freqüentemente baseadas na extrapolação dos resultados de pesquisas.

Segundo OLDEMAN (1992), grandes áreas da superfície do globo são afetadas pela erosão hídrica (Tabela 1), sendo que 24% da área terrestre habitada já foi atingida pela degradação do solo induzida pelo homem. Os valores para cada continente variam de 12% na América do Norte, 18% na América do Sul, 19% na Oceania, 26% na Europa, 27% na África e 31% na Ásia.

De acordo com United Nations Environmental Program (1991), a produtividade agrícola em aproximadamente 20 milhões de hectares é reduzida, a cada ano, a zero ou pelo menos tem a sua exploração agrícola tornada economicamente inviável devido à erosão do solo e à degradação induzida pela erosão. Desde o início da agricultura colonial até o início da década de 80, a erosão destruiu cerca de 430 milhões de hectares. Do total de sedimentos transportados pelos rios dos Estados Unidos (um bilhão toneladas), cerca de 60% advém de terras cultivadas, promovendo prejuízos da ordem de 6 bilhões de dólares anualmente, incluindo 570 milhões de dólares para a dragagem de vários milhões de metros cúbicos de sedimentos dos rios, portos e reservatórios americanos (PIMENTA et al., 1987).

No Brasil, os prejuízos devido à erosão hídrica têm alcançado proporções alarmantes. Segundo BAHIA et al. (1992) são perdidas, a cada ano, 600 milhões de toneladas de solo agrícola por causa da erosão. Com base em parâmetros obtidos na literatura, a estas perdas de solo estão associadas perdas de nutrientes da ordem de 4 bilhões de dólares.

Tabela 1 – Extensão do Globo terrestre afetada pela erosão hídrica

Região	Áreas afetadas (10 ⁴ Km ²)
África	227
Ásia	441
América do Sul	123
América Central	46
América do Norte	60
Europa	114
Oceania	83
Mundial	1.094

Fonte: OLDEMAN (1992)

Segundo CORREA (2003), a estimativa do carreamento de solo pela enxurrada é de cerca de 800 milhões de toneladas de solo por ano, levando em consideração uma produção de grãos no Brasil em torno de 80 milhões de toneladas e adotando uma perda média de 10 toneladas de solo para cada tonelada de grãos produzida. Este mesmo autor afirma que este carreamento de solo representaria um prejuízo de sete bilhões de reais por ano para o setor agrícola brasileiro (considerando preços para o ano de 2000).

No Estado do Paraná, pesquisas evidenciaram que de 15 a 20 t ha⁻¹ de solo são perdidos, por ano, em áreas intensivamente mecanizadas (PARANÁ, 1989). Já no Estado de São Paulo, a perda anual devido à erosão é de aproximadamente 194 milhões de toneladas de terras férteis, dos quais 48,5 milhões de toneladas chegam aos mananciais em forma de sedimentos transportados, causando seu assoreamento e poluição (TAPIA-VARGAS et al., 2001). Segundo BERTOLINI e LOMBARDI NETO (1993), são perdidas em torno de 10 kg de solo para cada kg de soja produzido e 12 kg de solo para cada kg de algodão produzido no Estado de São Paulo, devido ao uso e manejo inadequados do solo.

DERPSCH et al (1990) afirmam que somente no Estado do Paraná, com seis milhões de hectares de área agrícola, o valor dos principais nutrientes perdidos por erosão é de 121 milhões de dólares por ano. A erosão em áreas

agrícolas provoca danos econômicos em outros locais, como por exemplo no ano de 1982, no qual aproximadamente 12,5 milhões de toneladas de sedimentos foram arrastados pelo sistema fluvial e depositados no reservatório de Itaipu. Destes, cerca de 4,8 milhões de toneladas são originários do próprio Estado. A análise da concentração de sedimentos, assim como de fósforo e nitrogênio na água de Itaipu mostrou claramente que os valores mais altos são encontrados durante o período de preparo do solo e plantio.

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. A partir 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).

Um manejo agrícola efetivo, visando o controle do processo erosivo, requer o entendimento das interações complexas entre os processos químicos, físicos, hidrológicos e meteorológicos. A análise destas importantes interações dificilmente pode ser feita experimentalmente e, em função disso, a simulação computacional torna-se uma forma prática de investigar os impactos provenientes da adoção de diferentes práticas agrícolas. A modelagem da erosão do solo é uma forma de descrever matematicamente o processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas na superfície do solo e o uso de ferramentas de modelagem constitui-se numa forma eficaz para avaliar a eficiência das estratégias de ação a serem adotadas visando o controle da degradação dos solos (WALKER et al., 2000).

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

2.3.1. Histórico da predição da erosão

Em sua fase inicial, entre 1890 e 1947, os estudos relacionados à erosão se limitavam ao entendimento e à descrição qualitativa dos principais fatores que afetavam o processo erosivo. Exemplos desse período são o trabalho descritivo de COOK (1936) e os trabalhos sobre erosão por salpico de LAWS (1940) e ELLISON (1947).

COOK (1936) já havia reconhecido, naquela época, a complexidade do fenômeno erosivo, inclusive a independência de escala dos processos hidrológico e sedimentológico dentro de uma bacia hidrográfica. Além disso, este autor foi o pioneiro na definição dos principais fatores que afetam o processo erosivo, tais como erodibilidade do solo, erosividade da chuva e da enxurrada e proteção da cobertura vegetal. ELLISON e ELLISON (1947) foram os primeiros a separar o termo “erosividade” em termos de capacidade de desprendimento e de transporte, propondo, inclusive, funções para cada um deles.

Trabalhos experimentais desenvolvidos no Meio-Oeste dos EUA, durante o período de 1940 a 1954, resultaram na obtenção de equações de perda de solo que incluíam os efeitos do comprimento e da declividade da rampa, das características do solo, das práticas conservacionistas e das condições de uso e manejo do solo. Em 1946, um comitê dos EUA reuniu-se com a finalidade de revisar os fatores da última equação gerada e os dados existentes no país e, após incluir o fator chuva, deu origem a uma nova equação de perda de solo, conhecida como equação de MUSGRAVE (1947). Anos mais tarde (1954-1965),

num esforço de agências de pesquisa e extensão dos EUA, para revisão das equações, foi proposto um novo modelo empírico denominado Equação Universal de Perdas de Solo – USLE (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Essa equação, de base empírica, não leva em consideração, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e transporte de partículas de solo. Na USLE são apenas discriminadas as significâncias dos diferentes fatores que regem o processo erosivo, dentre os quais estão incluídos a precipitação, o comprimento da encosta, a declividade da encosta, a erodibilidade do solo, o cultivo (uso do solo) e as práticas agrícolas.

Apesar da existência de um consenso geral entre os pesquisadores de que a USLE forneça boa estimativa da erosão para um período de tempo pré-estabelecido, ela não é capaz de satisfazer os crescentes desafios impostos pelos problemas de erosão (WILLIAMS, 1975; FOSTER, 1982). WILLIAMS (1975), por exemplo, verificou que utilizando-se a USLE não se consegue uma estimativa da perda de solo em fases mais avançadas da erosão por sulcos e FOSTER (1982) relatou que com a utilização da USLE não é possível obter informação das variabilidades temporal e espacial da erosão durante uma chuva. Porém, isso não quer dizer que modelos empíricos como a USLE não tenham valor, pelo contrário, projetos práticos serão por muito tempo baseados nesses modelos empíricos até que o processo físico da erosão seja bem entendido.

Subseqüentemente à publicação do “Agriculture Handbook 537” (WISHMEIER e SMITH, 1978), novas pesquisas e experiências continuaram sendo realizadas no intuito de melhorar as estimativas das perdas de solo pela utilização da USLE, e após uma grande revisão destas pesquisas, foi desenvolvido o novo modelo de predição da erosão denominado Equação Universal de Perdas de Solo Revisada - RUSLE (RENARD et al., 1997). Na RUSLE manteve-se a mesma estrutura da equação da USLE, no entanto, as formas de determinação dos fatores mudaram expressivamente. Além disto, devido a complexidade das equações usadas para quantificar os fatores da

equação principal, foi desenvolvido um programa computacional para facilitar a estimativa da perda de solo.

Diante das limitações dos modelos de base empírica, buscou-se um modelo alternativo para estimar as perdas de solo baseado nos fundamentos dos processos de erosão e hidrológicos que regem o desprendimento, o transporte e a deposição das partículas de solo. Essa modelagem foi iniciada na metade da década de 1980, quando o Departamento de Agricultura do Estados Unidos (USDA) iniciou o Water Erosion Prediction Project – WEPP, visando desenvolver uma nova geração de modelos para predição da erosão hídrica.

Apesar de haver interesse crescente nos processos físicos envolvidos na erosão do solo, é importante ressaltar que o nível de conhecimento atual ainda é deficiente, fazendo com que as relações empíricas ainda sejam as mais usadas. Muitos dos melhores modelos de predição da erosão, como ANSWERS (BEASLEY e HUGGINS, 1981), KYERMO (HIRSCHI e BARFIEL, 1988) e WEPP (UNITED...– USDA, 1995), somente apresentam a interação ou relação entre os componentes individuais do processo de erosão baseados em princípios físicos. As equações usadas para quantificar alguns componentes desses modelos, como desprendimento e capacidade de transporte do solo, são ainda obtidas de forma empírica.

2.3.2. Tipos de modelos

Os modelos podem ser classificados, basicamente, em três categorias: empírico ou estatístico; conceitual; e baseado em processos físicos. O enquadramento de um modelo em uma dessas três categorias depende dos processos físicos simulados pelo modelo, de como o modelo descreve os processos e da dependência de dados do modelo.

A distinção entre os modelos não é muito rígida, podendo ser inclusive um pouco subjetiva. Um modelo pode possuir vários módulos, cada um pertencente à uma categoria específica. Por exemplo, o componente para determinação do escoamento superficial é de base física ou conceitual, enquanto

uma relação empírica pode ser usada para modelar a erosão ou transporte de sedimentos. Os modelos podem também ser considerados como híbridos entre duas dessas categorias.

Os modelos empíricos são os mais simples dos três tipos de modelos, sendo baseados primeiramente nas análises de observações, buscando representar as respostas dos dados observados. As exigências computacionais e de dados para esses modelos são menores que para os modelos conceituais e de base física. Segundo JAKEMAN et al. (1999), a principal característica deste tipo de modelo é seu elevado nível de agregação espacial e temporal e o pequeno número de variáveis incorporadas ao modelo.

Os modelos conceituais são tipicamente baseados na representação de uma bacia hidrográfica com uma série de compartimentos. Eles usualmente incorporam na sua estrutura um mecanismo de transferência do escoamento e de sedimentos gerados em um compartimento para os compartimentos subjacentes, representando caminhos de escoamentos na bacia hidrográfica como uma série de compartimentos, cada um apresentando uma caracterização da dinâmica do escoamento. Os modelos conceituais tendem a incluir uma descrição geral dos processos, sem incluir os detalhes específicos da interação dos mesmos, que exigiria informações mais detalhadas da bacia hidrográfica (MERRITT et al., 2003). Desta forma, estes modelos fornecem uma indicação dos efeitos qualitativos e quantitativos das mudanças no uso do solo, sem requerer grandes quantidades de dados de entrada distribuídos espacialmente e temporalmente.

Os modelos de base física são baseados na solução de equações físicas fundamentais que descrevem a geração de escoamento e sedimentos em uma bacia hidrográfica. As equações utilizadas em tais modelos são as equações de conservação da massa e momentum para o escoamento superficial e a equação de conservação da massa para a produção de sedimento (MERRITT et al., 2003).

Os modelos empíricos são freqüentemente criticados por adotarem suposições irreais sobre a física do sistema, ignorando a heterogeneidade das contribuições e das características da bacia hidrográfica, tais como precipitação e tipos de solo, e também por desconsiderar a não linearidade dos processos

envolvidos (MERRITT et al., 2003). Embora estas críticas sejam válidas, quando os dados meteorológicos e de discretização da heterogeneidade espacial do solo são insuficientes, os modelos mais complexos e dinâmicos não apresentam melhor desempenho que os modelos empíricos. Os modelos empíricos são, geralmente, baseados na suposição de estacionaridade, isto é, assumem que dada condição permanece imutável para a duração do período de estudo. Esta suposição limita o uso destes modelos para prever o efeito de mudanças nas características da bacia hidrográfica.

Cada tipo de modelo serve a um propósito e, desta forma não existe um único modelo que pode categoricamente ser indicado como mais apropriado que os demais para todas as situações. A escolha do modelo satisfatório para uma dada situação deve levar em consideração o que o modelo precisa em termos de dados (parâmetros) e o que se tem disponível no local que se deseja aplicar o modelo.

Na literatura, a preferência dos pesquisadores por certo tipo de modelo comparado a outros está baseada em dois pontos de vista: ênfase no processo modelado ou ênfase nos resultados dos modelos. Por exemplo, TORSÉN et al. (2001) afirmam que a capacidade de predição dos modelos empíricos e conceituais para avaliar os impactos das práticas agrícolas alternativas é questionável, devido à natureza semi-empírica da descrição dos processos. No entanto, outros autores argumentam que modelos conceituais simples e modelos empíricos, quando utilizados para as condições nas quais foram desenvolvidos, podem ser mais precisos do que modelos com níveis maiores de complexidade (PERIN et al., 2001).

2.4. Equação Universal de Perdas de Solo – USLE

A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) é um dos modelos de predição da erosão mais conhecido e utilizado até os dias de hoje. Foi desenvolvido, a partir de 1950, por W. H. WISCHMEIER, D. D. SMITH e outros pesquisadores do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

(USDA), do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS), do Serviço de Conservação do Solo (SCS) e da Universidade de Purdue. Sua aplicação em nível de campo iniciou por volta de 1960. Em 1965 foi publicado o “Agriculture Handbook 282”, que serviu como manual de referência da USLE até a revisão feita em 1978, resultando na publicação do “Agriculture Handbook 537” (ELLIOT et al., 1989).

A USLE é uma equação empírica utilizada para estimar a erosão entressulcos e no sulco em função de fatores que representam o clima, o solo, a topografia e o uso e manejo do solo (NEARING et al., 1990; LANE et al., 1992). Originalmente, a USLE foi projetada de forma a servir como ferramenta de trabalho para conservacionistas americanos, com a seguinte filosofia para cada fator: (i) fosse representado por um número apenas; (ii) pudesse ser calculado a partir de dados meteorológicos, pedológicos e de parcelas de erosão em níveis regional e local; e (iii) fosse livre de qualquer base geográfica. Após anos de evolução, WISCHMEIER e SMITH (1978) desenvolveram o modelo USLE (Equação 1) para estimativa da perda média anual de solo. Este modelo foi obtido a partir de observações de perda de solo em mais de 10.000 parcelas padrão com 0,008 ha (3,5 m de largura e 22,1 m de comprimento) e 9% de declividade, distribuídas em todas as regiões dos Estados Unidos.

$$PS = R K L S C P \quad (1)$$

em que

PS = perda de solo média anual, $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;
R = fator de erosividade da chuva, $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$;
K = fator de erodibilidade do solo, $t \text{ ha h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$;
L = fator de comprimento de rampa, adimensional;
S = fator de declividade de rampa, adimensional;
C = fator de uso e manejo do solo, adimensional; e
P = fator de práticas conservacionistas, adimensional.

Cada fator foi introduzido ao modelo para representar os processos críticos que podem afetar a perda de solo numa determinada encosta. Os fatores R, K, L e S são dependentes das condições naturais e os fatores C e P são relacionados às formas de ocupação e uso dos solos (fatores antrópicos). Na seqüência, é feita uma apresentação dos fatores que compõem a USLE.

2.4.1. Erosividade da chuva (R)

A erosividade da chuva é representada por um índice numérico que expressa a capacidade da chuva, esperada em dada localidade, de causar erosão em uma área sem proteção. Entre os fatores da USLE, apenas o fator R é calculado diretamente, a partir de registros pluviográficos, enquanto os demais são relativos à parcela-padrão. Segundo PEDROSO et al. (2003), pesquisas têm indicado que, quando todos os fatores da USLE, com exceção da erosividade, são mantidos constantes, as perdas de solo causadas por uma chuva qualquer são diretamente proporcionais à erosividade da chuva.

WISCHMEIER e SMITH (1958), pesquisando a relação entre as diferentes características físicas da chuva e as perdas de solo evidenciadas nos Estados Unidos, com o objetivo de estabelecer um índice de erosividade que melhor estimasse a capacidade da chuva em provocar erosão, verificaram que a perda de solo provocada pelas chuvas em áreas cultivadas apresentou elevada correlação com o produto entre duas características das chuvas: energia cinética total e intensidade máxima em 30 minutos. Esse produto foi denominado índice EI_{30} , que foi capaz de explicar de 72 a 97% das perdas de solo causadas pelas chuvas.

Segundo WISCHMEIER e SMITH (1958), o EI_{30} é o índice que melhor expressa o potencial da chuva em causar erosão, considerando as fases de impacto das gotas da chuva, a desagregação do solo, a turbulência do escoamento e o transporte das partículas de solo. Entretanto, segundo LAL (1976), o EI_{30} subestima a erosividade das chuvas nas regiões tropicais, o que tem contribuído para o desenvolvimento de outros índices de erosão. Assim, para as condições tropicais da África, HUDSON (1965) encontrou melhor correlação das perdas de solo com o índice $KE > 25$, que considera a energia cinética total das chuvas com intensidade superior a 25 mm h^{-1} (HUDSON, 1981).

Segundo WAGNER e MASSAMBANI (1988), a energia cinética da chuva pode também ser calculada diretamente a partir da distribuição do tamanho

e da velocidade terminal das gotas. No entanto, estudos detalhados sobre estes parâmetros são raros no Brasil.

2.4.2. Erodibilidade do solo (K)

A erodibilidade expressa a resistência do solo à erosão hídrica, sendo dependente, entre outros fatores, dos atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos do solo. O fator K na USLE é um valor quantitativo determinado em parcelas experimentais de perdas de solo padronizadas, nas quais os demais fatores são mantidos iguais a 1, sendo o fator K dado pela inclinação da curva ajustada entre o índice de erosão e a perda de solo.

Em termos de utilização da USLE, a erodibilidade do solo constitui-se no fator de maior custo e morosidade para determinação, notadamente no Brasil, em face da extensão territorial e da diversidade edáfica. Outro aspecto está relacionado ao método empregado para determinação da erodibilidade, pois a determinação direta, por meio da instalação de parcelas de perdas de solo no campo, seja sob chuva natural ou simulada, envolve altos custos, além de demandar vários anos de coleta de dados. Por esses motivos, vários autores têm desenvolvido modelos visando à estimativa da erodibilidade de maneira indireta.

O primeiro método para estimativa da erodibilidade do solo foi desenvolvido por WISCHMEIER et al. (1971), o qual consiste em uma representação gráfica (nomograma) que se baseia na combinação das propriedades físicas dos solos (percentagem de silte e areia muito fina; percentagem de areia, compreendida entre 2 e 0,1 mm; estrutura e classe de permeabilidade) e na percentagem de matéria orgânica.

A obtenção indireta da erodibilidade a partir do nomograma e de modelos matemáticos que empregam atributos do solo tem sido usada com sucesso nos EUA. Entretanto, os métodos existentes para determinação indireta da erodibilidade desenvolvidos por WISCHMEIER e MANNERING (1969), WISCHMEIER et al. (1971) e RÖMKENS et al. (1977) não têm apresentado bons resultados quando aplicados aos solos tropicais. Essa inadequação tem sido

atribuída às diferenças texturais, particularmente no tocante aos latossolos brasileiros. Isto também tem ocorrido mesmo para os métodos desenvolvidos ou adaptados para as regiões tropicais. Uma das causas dessa inadequação é a grande heterogeneidade de comportamento dos solos tropicais em face do processo erosivo. Sendo assim, diversos autores têm sugerido o desenvolvimento de modelos para estimativa da erodibilidade específicos para cada grupamento de solos.

2.4.3. Comprimento de rampa e declividade do terreno (LS)

A intensidade da erosão hídrica é afetada tanto pela distância ao longo da qual se processa o escoamento superficial quanto pela declividade do terreno, representadas na USLE pelos fatores L e S, respectivamente. Na prática, estes dois efeitos são considerados conjuntamente na USLE por meio de um termo designado fator topográfico LS, o qual representa a relação entre as perdas de solo em uma área com um declive e comprimento de rampa quaisquer e as perdas que ocorrem em uma parcela unitária padrão, com 25 m de comprimento e 9% de declividade (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Este fator pode ser determinado experimentalmente ou estimado por meio da equação (2), proposta no “Agriculture Handbook 537”.

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m \left(65,41 \text{ sen}^2 \acute{\alpha} + 4,56 \text{ sen } \acute{\alpha} + 0,065 \right) \quad (2)$$

em que

- L = Comprimento da rampa (encosta), m;
- = ângulo de declive da rampa, graus; e
- m = parâmetro de ajuste que varia em função da declividade da rampa, assumindo valor de 0,5 para declividades maior ou igual a 5%, 0,4 para declividades de 3,5 a 4,5%, 0,3 para declividades de 1 a 3% e 0,2 para declividades menores que 1%.

No Brasil, para cálculo do fator topográfico LS, BERTONI e LOMBARDI NETO (1990) ajustaram uma equação utilizando dados de perdas de solo por erosão obtidos nos principais tipos de solo do Estado de São Paulo,

com base numa média de 10 anos de observações em talhões de diferentes comprimentos de rampa e graus de declividade, a qual apresenta a seguinte forma:

$$LS = 0,00984 L^{0,63} S^{1,18} \quad (3)$$

em que S é igual a declividade da rampa, em percentagem.

As equações 2 e 3 pressupõem declives essencialmente uniformes, ou seja, não consideram se eles são côncavos ou convexos, constituindo numa das grandes limitações do uso da USLE.

2.4.4. Uso e manejo do solo (C)

De acordo com CHAVES (1994a), o fator uso e manejo do solo na equação da USLE é, normalmente, obtido em parcelas experimentais e representa o grau de proteção média à erosão fornecida pelo uso (lavoura, pastagem, bosque, etc) e manejo do solo (preparo convencional, cultivo mínimo, etc). De acordo com LANE et al. (1992), o fator C advém da taxa de perda de solo durante um determinado estágio de desenvolvimento da cultura comparada à perda de solo na parcela padrão. Para a determinação deste fator, são considerados estágios definidos de desenvolvimento das culturas e suas influências na erosão do solo. Os principais estágios considerados são: (a) período D – preparo do solo: desde o preparo até o plantio; (b) período 1 – plantio: do plantio a um mês após plantio; (c) período 2 – estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio; (d) período 3 – crescimento e maturação: de dois meses após o plantio até a colheita; (e) período 4 – resíduo: da colheita até o preparo do solo. No “Agriculture Handbook 537” os valores do fator C estão apresentados em várias tabelas para diferentes cultivos e períodos de crescimento das culturas.

Valores do fator C para diferentes culturas e tipos de manejo no Estado de São Paulo foram obtidos por BERTONI e LOMBARDI NETO (1990) em

parcelas de perdas de solo. No entanto, dada a sua complexidade, poucos são os trabalhos no país com determinação deste fator para as diferentes culturas.

2.4.5. Práticas conservacionistas (P)

O fator de práticas conservacionistas (P) representa o efeito de práticas conservacionistas como plantio em nível, terraceamento e plantio em faixas na erosão do solo, expressando a relação entre a perda de solo com determinada prática conservacionista e a correspondente perda quando a cultura está implantada no sentido do declive (morro abaixo). Na Tabela 2 estão apresentados alguns valores de P para as práticas conservacionistas mais utilizadas para controlar a erosão, obtidas pela Seção de Conservação do Solo do Instituto Agronômico de Campinas.

2.4.6. Aplicações e Limitações da USLE

A USLE permite estimar a perda média anual de solo provocada pelas erosões laminar e em sulcos, para as condições em que foram obtidos os valores de seus componentes. Esta equação foi desenvolvida para as condições existentes nos EUA, onde há um expressivo banco de dados disponível, facilitando a sua ampla utilização. Tornou-se, na década de 1970, uma importante ferramenta para auxiliar os conservacionistas de solo no planejamento agrícola, sendo usada como um guia pelos conservacionistas e agricultores na escolha das práticas mais eficientes no controle da erosão do solo, principalmente em locais onde as perdas de solo eram superiores aos limites toleráveis.

No entanto, devido à base totalmente empírica, a sua aplicação em situações diferentes daquelas para as quais foi desenvolvida requer a realização de pesquisas para obtenção dos termos componentes do modelo (LOCH e ROSEWELL, 1992; FERNANDES, 1997). Devido a esse fato, a maior crítica a este modelo tem sido a sua ineficiência em aplicações fora das condições para as quais ela foi desenvolvida. A montagem de um banco de dados para garantir sua

Tabela 2- Valores de P para algumas práticas conservacionistas

Práticas conservacionistas	Valor de P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: BERTONI e LOMBARDI NETO (1990)

utilização de forma generalizada exige grande investimento de tempo e recursos (NEARING et al., 1994). Desta forma, a adaptação da USLE para as condições do Brasil ficaria condicionada ao desenvolvimento de uma base de dados específica para as condições edafoclimáticas brasileiras.

É importante salientar também que, mesmo nas regiões em que existem bancos de dados suficientes para dar suporte à utilização da USLE, seu emprego está condicionado a algumas limitações implícitas na própria concepção do modelo e dos fatores do modelo. Embora seja uma equação de predição de erosão, a USLE não contempla o processo de deposição de sedimentos, não estima a erosão em sulcos em fase mais avançada, nem as perdas de solo no caso de chuvas isoladas, não sendo possível identificar aqueles eventos prováveis de causar grandes perdas de solo.

Outra grande limitação da USLE se refere à concepção dos fatores do modelo, os quais são uma representação média da área em estudo, não levando em consideração a variabilidade espacial e temporal dos fatores, que juntamente ao fato da USLE não considerar o processo de deposição de sedimentos, torna a sua aplicação em nível de bacias hidrográficas muito limitada. Por exemplo, o uso de declividade média pode subestimar as perdas de solo em declives convexos e superestimar em declives côncavos. Diversos pesquisadores têm apontado os cálculos do fator LS como o principal problema para o uso da USLE em bacias hidrográficas, uma vez que, pela própria conceituação deste fator, quanto maior o comprimento de rampa maior será a perda de solo, entretanto, quando se considera rampas desuniformes pode ocorrer o inverso, isto é, quanto

maior o comprimento de rampa maior a possibilidade de haver deposição de sedimentos ao longo da rampa (CASTRO, 1992; RANIERI 2000).

Apesar destas limitações, a USLE é considerada um bom instrumento para previsão das perdas de solo por erosão laminar, por exigir um número de informações relativamente pequeno quando comparado aos modelos mais complexos e por ser uma equação bastante conhecida e estudada. Embora não tenha sido concebida para a utilização em bacias hidrográficas, diversos autores têm aplicado a USLE associada a sistemas de informações geográficas (SIG) para a estimativa das perdas de solo em bacias hidrográficas (CASTRO, 1992; HAMLETT et al., 1992; MELLEROWICZ et al., 1994; RANIERI 1996, RANIERI 2000).

2.5. Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE

Dentre as diversas modificações realizadas na USLE, visando a melhoria nas estimativas das perdas de solo, destaca-se a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE), a qual também é um modelo empírico, originado de uma grande revisão do modelo USLE e de sua base de dados, com o qual pode-se estimar a perda de solo média anual causada pela precipitação e pelo escoamento associado à mesma (RENARD e FERREIRA, 1993). Embora a estrutura da equação seja a mesma da USLE, vários conceitos da modelagem da erosão, baseados na descrição do processo físico, foram incorporados na RUSLE para melhorar as predições de erosão (RENARD et al., 1997; NAYAKATAWA et al., 2001). A seguir é apresentado uma breve descrição das principais modificações em cada fator deste modelo em relação à USLE.

2.5.1. Fator R

Na RUSLE foi feita uma ampliação do banco de dados para produção de novos mapas de isoerodentes, incluindo valores do fator R para áreas com relevo suave (menores declividades) em regiões de elevado índice pluviométrico. Fez-se

também o ajustamento do fator R, levando-se em consideração a redução da erosividade decorrente do impacto das gotas da chuva devido ao alagamento da superfície do solo. Na RUSLE, a distribuição sazonal do índice de erosividade - EI (como um percentual do valor anual) é usada para 24 períodos, correspondentes ao 1º e 16º dia de cada mês.

2.5.2. Fator K

A adaptação do fator K para a RUSLE envolveu o desenvolvimento de métodos alternativos, de forma que o usuário possa estimar o fator para solos que não estão contemplados no nomograma do “Agriculture Handbook 537” (solos tropicais de origem vulcânica e com alto teor de matéria orgânica). Para isto, dados de erodibilidade de toda parte do mundo foram revisados e equações de regressão foram desenvolvidas para estimar K como uma função das características físicas e químicas do solo. Na RUSLE também é considerado o efeito de fragmentos de rocha na superfície e no perfil do solo. Os fragmentos de rocha na superfície do solo são tratados como cobertura do solo no fator C, enquanto o fator K é ajustado para incorporar o efeito da presença de fragmentos de rocha no perfil do solo na permeabilidade do solo e, conseqüentemente, no escoamento. Outra grande mudança deste fator está relacionada à consideração da variabilidade sazonal de K, incorporada na RUSLE por meio de estimativas instantâneas de K em função da erosividade quinzenal proporcional à erosividade anual. Estas estimativas instantâneas de K são obtidas de equações relacionando K e o fator R anual.

2.5.3. Fator LS

Na RUSLE, ao contrário da USLE, pode-se seccionar a encosta, de modo a possibilitar sua representatividade com declividades irregulares, as quais podem ser côncava, convexa ou complexa. Na maioria das aplicações, isto possibilita uma melhor estimativa do efeito topográfico sobre as perdas de solo

do que quando se considera um único plano, tal como é feito no caso da USLE, fornecendo, conseqüentemente, valores de perdas de solo mais precisos.

2.5.4. Fator C

A forma de determinação do fator C na RUSLE é bastante diferente daquela da USLE, sendo definido como a média da razão das perdas de solo (SLRs), que representa a relação entre a perda de solo ocorrida, em uma dada condição de uso e manejo do solo e aquela ocorrida numa parcela padrão, em um dado tempo. Para determinação do SLR é utilizado o método de subfatores, conforme apresentado na Equação 4.

$$SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM \quad (4)$$

em que

- PLU = uso prévio do solo;
- CC = cobertura do solo pela copa da cultura;
- SC = cobertura da superfície do solo por resíduos;
- SR = rugosidade da superfície do solo; e
- SM = umidade do solo

Este método possibilita a aplicação do modelo em locais e, ou, situações não contempladas no “Agriculture Handbook 537” e também onde não existem dados experimentais para determinação do valor C. Permite também expressar a variabilidade temporal do fator C em função do uso do solo.

2.5.5. Fator P

No desenvolvimento da RUSLE, dados experimentais relativos ao cultivo em contorno foram analisados objetivando determinar os valores do fator de cultivo em contorno como uma função da altura dos camalhões, do número de sulcos e da erosividade das chuvas. Novos valores do fator P foram desenvolvidos, para levar em consideração o efeito dos terraços em causar deposição dentro dos canais e de uma grande variedade de condições de cultivo

em faixas foram consideradas na RUSLE, além de valores do fator P refletirem as práticas de conservação em florestas.

Todos os aperfeiçoamentos na determinação do fator P foram fundamentados na teoria do desprendimento e transporte, baseados na hidráulica de escoamento e transporte de sedimentos.

2.5.6. Aplicações e Limitações da RUSLE

Na RUSLE, semelhantemente ao que ocorre com a utilização da USLE, pode-se estimar a perda média anual de solo provocada pelas erosões laminar e em sulcos, para as condições em que foram obtidos os valores de seus componentes. No entanto, com a RUSLE pode-se estimar as perdas de solo para situações onde não é possível aplicar a USLE, assim como em locais onde não se tenham dados de perdas de solo para determinação dos componentes do modelo.

A implementação computacional da RUSLE possibilitou a incorporação de conceitos de base física para determinação de alguns dos seus componentes, favorecendo, desta forma, uma reprodução mais real do sistema. Além disso, tornou mais simples e rápido o processo de estimativa das perdas de solo, constituindo-se, desta forma, numa ferramenta útil para o planejamento de uso e conservação do solo.

Embora a RUSLE tenha sofrido consideráveis melhorias em relação à USLE, esta tecnologia apresenta, ainda, grandes limitações, tais como: a sua base empírica, que limita muito sua aplicação para outras condições edafoclimáticas, e a não consideração do processo de deposição, que limita a sua aplicação para grandes áreas, onde o processo de deposição tem importância expressiva.

2.6. Water Erosion Prediction Project – WEPP

De acordo com LAFLEN et al. (1991), a necessidade do desenvolvimento de nova tecnologia para a estimativa das perdas de solo por erosão surgiu para suplantiar o grande número de limitações apresentadas pelos

modelos USLE e RUSLE, principalmente referentes à impossibilidade de aplicação dos modelos de forma satisfatória em situações fora daquelas nas quais foram desenvolvidos.

Na metade da década de 1980, o USDA iniciou o Water Erosion Prediction Project – WEPP visando desenvolver uma nova geração de tecnologias para predição da erosão hídrica. O WEPP é um pacote tecnológico para estimativas das perdas de solo baseado nos princípios físicos do processo de erosão, desenvolvido nos Estados Unidos numa iniciativa interinstitucional, envolvendo as seguintes instituições: Agricultural Research Service, Soil Conservation Service, Forest Service in the Department of Agriculture e Bureau of Land Management in the US Department of the Interior (LAFLEN et al., 1991; UNITED...– USDA, 1995). Tal pacote teve como objetivo elaborar uma tecnologia para o planejamento ambiental e a conservação da água e do solo, a fim de permitir a predição dos impactos resultantes de práticas de manejo de terras usadas para produção agrícola, pastagens e áreas florestais na erosão.

O WEPP consiste em um modelo dinâmico de simulação que incorpora conceitos de erosão entressulcos e nos sulcos. Com sua utilização, pode-se simular os processos que ocorrem em uma determinada área em função do estado atual do solo, cobertura vegetal, restos culturais e umidade do solo. Para cada dia, as características do solo e da cobertura vegetal são atualizadas. Quando ocorre uma chuva, baseando-se nas características atuais do terreno, determina-se se haverá produção de escoamento superficial. Se houver, o modelo estima o desprendimento, o transporte e a deposição de partículas ao longo da encosta, porém não contempla a erosão em grandes voçorocas e cursos d'água perenes (LANE et al., 1992).

O WEPP é apresentado em três versões: encosta, malha e bacia hidrográfica. A versão para encosta é uma substituição direta da USLE, acrescentando-se a capacidade de estimar a deposição de sedimentos ao longo do terreno. A versão para bacias hidrográficas possibilita a determinação do desprendimento, transporte e deposição de sedimentos ao longo das diversas

encostas até os cursos d'água. A versão malha é aplicável para áreas nas quais os limites não coincidem com os limites da bacia.

Para as três versões, o WEPP é dividido em diversos componentes que consistem na parametrização dos processos que regulam o fenômeno erosivo, descritos resumidamente a seguir.

2.6.1. Componente erosão do solo

No componente erosão do solo do WEPP, ocorre a quantificação dos processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas. Para essa quantificação é utilizada a equação da continuidade constante de sedimentos (Equação 5) para descrever o movimento das partículas em uma vertente, considerando-se condições de regime permanente (FLANAGAN et al. 1995).

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (5)$$

em que,

- G = carga de sedimentos, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$;
- x = distância percorrida pelo escoamento superficial, m;
- D_i = taxa de liberação de sedimentos nas áreas entressulcos, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$;
- e
- D_r = taxa de liberação de sedimentos em sulcos, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

O sedimento advindo da erosão entressulcos (D_i) é considerado independente de x e é sempre positivo. No caso da erosão em sulcos (D_r), pode ser positivo se houver desprendimento e negativo se houver deposição. A taxa de liberação de sedimentos em áreas entressulcos (D_i) é calculada pela equação 6, proposta por FLANAGAN et al. (1995).

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (6)$$

em que,

- C_i = parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão entressulcos, adimensional;
- K_i = parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo entressulcos, $\text{kg m}^{-4} \text{s}$;
- S_f = fator de ajuste relativo à declividade, adimensional;

I_p = intensidade de precipitação, $m s^{-1}$; e
 G_e = parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo na erosão entressulcos, adimensional.

A taxa de liberação de sedimentos nos sulcos (D_r) é calculada para os casos em que a tensão cisalhante do escoamento excede a tensão cisalhante crítica do solo e quando a carga de sedimentos for menor que a capacidade de transporte do escoamento. O valor de D_r é obtido com base na equação 7, apresentada por FLANAGAN et al. (1995):

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (7)$$

em que,

K_r = parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo no sulco, $m^{-1} s$;
 τ = tensão cisalhante do escoamento superficial sobre as partículas de solo, Pa;
 τ_c = tensão cisalhante necessária para a ocorrência da liberação de partículas, Pa; e
 T_c = capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento, $kg s^{-1} m^{-1}$.

K_i , K_r e τ_c são parâmetros de entrada exigidos pelo WEPP, obtidos com base em atributos do solo como granulometria e conteúdo de matéria orgânica.

Quando a carga de sedimentos a ser carregada é maior que a capacidade de transporte do escoamento ocorre a deposição, quantificada utilizando-se a seguinte equação:

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (8)$$

em que,

β = coeficiente de turbulência induzida pelo impacto das gotas da chuva (No modelo WEPP assume igual a 0,5);
 V_f = velocidade efetiva de queda (deposição) para o sedimento, $m s^{-1}$; e
 q = vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ($m^3 m^{-1} s^{-1}$).

2.6.2. Componente hidrológico

O processo de erosão é resultado direto das forças e energias envolvidas nos processos hidrológicos. O impacto e a magnitude destas forças são afetados pelas características da cultura acima e abaixo da superfície do solo, pelas condições do solo em superfície e subsuperfície e pela topografia do terreno. O componente hidrológico do WEPP é composto de três outros componentes, sendo eles: clima, inverno e hidrologia de superfície e subsuperfície.

Para aplicação do componente clima do WEPP é necessário o uso de dados climáticos diários, os quais normalmente não são facilmente disponíveis. Em função disto, no WEPP utiliza-se o programa CLIGEN (gerador climático estocástico) para geração dos dados climáticos necessários. Para executar o programa CLIGEN é necessário conhecer 14 parâmetros que descrevem as condições climáticas locais, incluindo: média e desvio padrão da precipitação, coeficiente de assimetria da precipitação total diária, probabilidades mensais de ocorrência de dias com chuva após dias com chuva e de ocorrência de dias sem chuva após dias com chuva, média e desvio padrão das temperaturas máxima e mínima mensal, média e desvio padrão da radiação solar mensal, média mensal da intensidade de precipitação máxima em 30 minutos, média mensal da temperatura do ponto de orvalho e a distribuição estatística do tempo decorrido do início do evento ao pico de intensidade máxima. Esses parâmetros de entrada do CLIGEN são utilizados para estimar, diariamente, a duração e a quantidade precipitada, o tempo de pico em relação à duração da precipitação, a intensidade de pico, as temperaturas mínima e máxima, a temperatura do ponto de orvalho, a direção e a velocidade do vento.

O componente de hidrologia de superfície e subsuperfície possui uma seqüência 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). A diferença entre a 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 (9) de ondas cinemáticas (STONE et al., 1995):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_i - T_i \quad (9)$$

em que,

- h = lâmina de escoamento, m;
- t = tempo, s;
- i_i = intensidade instantânea de precipitação, $m s^{-1}$; e
- T_i = taxa de infiltração da água no solo, $mm h^{-1}$.

O componente de hidrologia de inverno engloba o congelamento do solo, a acumulação e o derretimento de neve. Como para as condições brasileiras não se tem nenhum destes três fatores, os mesmos não serão levados em consideração no presente trabalho.

2.6.3. Componente de crescimento de planta e de decomposição de resíduos

As condições de cobertura vegetal e de resíduos culturais abaixo e acima da superfície do solo são “vitais” para a estimativa do desprendimento e transporte de partículas do solo. O WEPP estima, diariamente, o crescimento de plantas de maneira similar ao modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), acrescentado neste cálculo a acumulação e a decomposição dos resíduos. Diversos são os parâmetros de entrada exigidos pelo WEPP na determinação deste 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 as mesmas foram executadas, entre outras.

2.6.4. Componente de balanço hídrico

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

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

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_{in} + (P - I) \pm S - Q - ET - D - Q_d \quad (10)$$

em que,

- θ = conteúdo de água do solo na zona radicular em dado dia, m;
- θ_{in} = conteúdo inicial de água do solo na zona radicular, m;
- P = precipitação acumulada, m;
- I = interceptação da precipitação pela vegetação, m;
- S = conteúdo de água em forma de neve, m;
- Q = escoamento superficial acumulado, m;
- ET = evapotranspiração acumulada, m;
- D = perda acumulada de água por percolação abaixo da zona radicular, m; e
- Q_d = escoamento lateral sub-superficial, m.

2.6.5. Componente hidráulica do escoamento superficial

Neste componente é calculada a tensão de cisalhamento do escoamento superficial. Uma parte da energia da tensão de cisalhamento do escoamento age no solo podendo causar o desprendimento de partículas e a outra parte atua nos resíduos expostos na superfície, não sendo ativa no desprendimento de partículas. A porção da tensão de cisalhamento que age no solo e pode causar erosão é proporcional à taxa do coeficiente de atrito para o solo em relação ao coeficiente total de atrito (solo mais cobertura) (GILLEY e WELTZ, 1995).

De acordo com LAFLEN et al. (1991), um problema particular da aplicação deste componente é a representação de diferentes tipos de solo e faixas de cobertura do solo ao longo da encosta e seus efeitos. Os parâmetros relativos a resíduos das culturas assumem grande importância neste componente, influenciando diretamente no coeficiente de rugosidade, promovendo, desta forma, redução da energia do escoamento superficial e conseqüentemente da taxa de desprendimento no sulco e da capacidade de transporte do escoamento.

2.6.6. Componente do solo

As propriedades do solo influenciam nos processos envolvidos na erosão hídrica do solo, tais como: infiltração, escoamento superficial, desprendimento e transporte de sedimentos. Neste componente são consideradas as mudanças temporais nas propriedades do solo (rugosidade randômica, densidade do solo, condutividade hidráulica, tensão crítica de cisalhamento e fatores de erodibilidade no sulco e entressulcos) decorrentes do efeito das práticas de manejo do solo, consolidação, precipitação e variáveis de superfície (LAFLEN et al., 1991).

2.6.7. Aplicações e Limitações do WEPP

Com o modelo de erosão WEPP pode-se estimar a perda de solo e a deposição de sedimentos do escoamento superficial em encostas, do escoamento concentrado em pequenos canais, bem como a deposição de sedimentos em reservatórios. O WEPP permite determinar as distribuições espacial e temporal da perda de solo e sua deposição, além de fornecer estimativas explícitas de quando e onde, em determinada encosta ou bacia hidrográfica, está ocorrendo erosão, de forma a possibilitar a adoção de medidas de conservação para controlar a perda de solo e a produção de sedimentos (CHAVES, 1994b). Segundo LAFLEN e FLANAGAN (1992), com o auxílio do WEPP é possível responder, de forma mais precisa, a diversas questões, dentre elas: qual o melhor manejo do solo para o controle eficiente da erosão; em que local da encosta devem ser realizadas práticas de controle da erosão para uma determinada condição de clima, solo e topografia; e qual seria o impacto da conservação do solo fora da propriedade agrícola, isto é, impactos ambientais (como perda de solo dos sistemas agrícolas para cursos d'água e reservatórios). Esta talvez seja a nova visão com relação aos objetivos da conservação do solo, ou seja, nas tomadas de decisão do planejamento quanto ao uso e manejo do solo deverão ser

levados em consideração não somente os efeitos da erosão na produção agrícola, mas também na quantidade e qualidade da água superficial.

Sendo um algoritmo baseado em processos, o WEPP oferece a vantagem de ser aplicado para outras localidades. Esse fato, aliado à rapidez da calibração dos parâmetros específicos, torna-o um modelo com grande potencial de aplicação para as condições brasileiras.

O WEPP apresenta algumas limitações, entre as quais pode-se citar: o grande número de parâmetros de entrada necessário para aplicação do modelo, podendo limitar sua utilização em situações onde existam poucos dados; a necessidade de treinamento intensivo de pessoal para a efetiva implementação do modelo; e não poder ser aplicado para prever a erosão em voçorocas. Embora seja considerado um modelo de base física, o WEPP ainda contém um certo grau de empirismo, necessitando serem tomados alguns cuidados quando da aplicação do modelo para novos locais (LAFLEN et al., 1991; MERRITT et al., 2003).

2.7. Avaliação dos modelos de predição da erosão

A avaliação de um modelo de erosão é uma etapa de suma importância para a consolidação de uma ferramenta para predição da erosão. No entanto, não se tem dado muita atenção a essa etapa no processo de desenvolvimento dos modelos.

A avaliação é de fundamental importância para a realização do refinamento do modelo e para a identificação de pontos que necessitam de modificações e, ou, maior cuidado na obtenção dos parâmetros de entrada, principalmente quando pretende-se aplicá-los para localidades diferentes das quais foram desenvolvidos.

O processo de avaliação de um modelo pode conter três passos: a) teste do modelo pela comparação dos resultados estimados com os dados medidos; b) análise de sensibilidade da resposta do modelo aos parâmetros de entrada; e c) avaliação do limite de confiança para aplicação do modelo.

Para testar o modelo não é possível a utilização dos dados que foram utilizados para desenvolver a base de parâmetros do modelo. Tendo em vista a alta variabilidade do processo de erosão e considerando que esta variabilidade é refletida nos dados de campo, deve-se tomar cuidado para não se fazer afirmações sobre a validade de um modelo baseado em um ou dois conjunto de dados. Um grande número de dados devem ser avaliados para decidir quando e como o modelo deve ser ajustado para fornecer previsões de erosão mais precisas.

A análise de sensibilidade é uma avaliação das magnitudes relativas nas respostas do modelo em função de mudanças relativas nos valores dos parâmetros de entrada do modelo (NEARING et al., 1990). Uma avaliação detalhada da sensibilidade das respostas de um modelo à variação nos dados de entrada pode ser usada para indicar a importância relativa dos vários tipos de parâmetros de entrada, podendo desta forma dar uma ênfase maior na aquisição e refinamento dos dados que têm maior influência na resposta do modelo.

A análise de sensibilidade deve ser planejada de forma que a faixa de valores para cada parâmetro contenha os dados de campo relativos a diferentes condições, consistindo desta forma num método eficiente para avaliar a resposta do modelo de forma a eliminar a influência do erro relacionado à variação natural dos parâmetros de entrada do modelo. Com isto, é possível avaliar, de maneira objetiva, a racionalidade do modelo, bem como o efeito dos erros nos parâmetros de entrada do modelo na eficiência ou no desempenho do modelo (McCUEN e SNYDER, 1986; NEARING et al., 1990).

Vários trabalhos tem sido conduzidos para avaliar o desempenho dos modelos de predição de erosão pela comparação dos dados estimados pelos modelos com os dados medidos, bem como a validação destes modelos para diferentes condições de manejo e uso do solo. RISSE et al. (1993) aplicaram o modelo USLE à parcelas experimentais, observando um erro médio de aproximadamente 60% em relação aos dados de perdas de solo medidos. ZANG et al. (1996) aplicaram o modelo WEPP a 34 cenários diferentes, em oito localidades nos Estados Unidos, e verificaram um erro médio de

aproximadamente 61% nas perdas de solo. Para ambos os trabalhos o erro relativo foi maior para maiores valores de perdas de solo.

No trabalho realizado por TIWARI et al. (2000), valores de perdas de solo estimados utilizando-se os modelos WEPP, USLE e RUSLE foram comparados aos valores medidos em parcelas experimentais, sob condições de chuva natural, em 20 locais diferentes. Os autores verificaram que utilizando o modelo WEPP apresentou erro médio de 2,01 kg m⁻² e de 2,73 kg m⁻² nas estimativas das perdas de solo quando se considera a média anual dos dados experimentais e os dados anuais isoladamente, respectivamente. Os três modelos superestimaram os baixos valores de perdas de solo e subestimaram os altos valores de perdas. Em geral, as eficiências dos modelos foram baixas em locais com baixos valores de perdas de solo, enquanto que, em locais com elevadas perdas de solo, ocorreram melhores predições, sendo que os desempenhos dos modelos USLE e WEPP foram mais satisfatórios. As estimativas das perdas de solo médias anuais obtidas utilizando-se o WEPP foram melhores em 40% dos locais estudados quando comparadas com as estimativas obtidas com a USLE.

Diversos pesquisadores têm conduzido análises de sensibilidades nos modelos RUSLE e WEPP em diversas partes do mundo (NEARING et al., 1990; TISCARENO et al., 1993; RENARD e FERREIRA, 1993; GHIDEY et al., 1996; KRAMER e ALBERTS, 1995; ZANG et al., 1996; TIWARI et al., 2000). No entanto, todos afirmam que os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outras condições edafoclimáticas, tendo em vista a interação entre as variáveis, isto é, uma variável que apresenta baixa sensibilidade para uma dada condição pode ser bastante sensível para outras condições, mudando desta forma a interpretação dos resultados.

Uma vez que os modelos de erosão existentes, tanto empíricos quanto aqueles baseados em princípios físicos, foram desenvolvidos e os seus parâmetros ajustados para condições de clima temperado, condições estas bem diferentes do clima tropical, torna-se de fundamental importância a realização de uma avaliação do desempenho destes modelos quando aplicados às condições

edafoclimáticas brasileiras antes que possam ser extensivamente utilizados para a predição das perdas de solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação dos modelos de predição da erosão (USLE, RUSLE e WEPP) consistiu da comparação dos dados de perdas de solo obtidos experimentalmente em nove localidades do Brasil com dados estimados pelos modelos. Os modelos USLE e RUSLE, embora sejam de base empírica, foram selecionados devido à sua simplicidade, bem como pelo fato de já existirem estudos no Brasil relativos ao levantamento dos dados necessários para a aplicação dos mesmos. Já o modelo WEPP foi escolhido por ser baseado nos princípios físicos do processo erosivo, apresentando aplicabilidade na simulação do processo erosivo para diversas condições edafoclimáticas. Além disso, a escolha deveu-se aos poucos estudos referentes à aplicação deste modelo para as condições brasileiras.

3.1 - Obtenção do banco de dados

A aplicação dos modelos USLE, RUSLE e WEPP depende da obtenção de parâmetros ou dados relativos às características de clima, solo, topografia e manejo do solo do local a ser estudado.

Na avaliação desses modelos foram utilizados dados de perdas de água e solo obtidos em parcelas experimentais submetidas a chuvas naturais,

implantadas na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV; bem como dados de perdas de água e solo já publicados, para outras oito localidades do Brasil (Quadro 1). Foram utilizadas, portanto, informações advindas de nove localidades do Brasil para a avaliação dos modelos de predição da erosão.

Os parâmetros necessários para aplicação dos modelos foram levantados para cada um dos locais estudados. A escolha das localidades foi realizada com base na disponibilidade de registros de dados de perdas de água e de solo em estudos prévios, sendo escolhidas nove localidades, as quais contemplaram uma grande heterogeneidade de condições climáticas, tipos e texturas de solo, comprimento e declividade das encostas, práticas de uso e manejo do solo; de forma a possibilitar a verificação do desempenho dos modelos para diversas condições edafoclimáticas existentes no Brasil. No Quadro 1 estão apresentadas as informações relativas aos locais utilizados para a realização do estudo com suas respectivas características quanto ao tipo de solo, manejo e uso do solo, dimensões e declividade das parcelas experimentais. As informações relativas às características do solo na profundidade de 0 a 20 cm da superfície para cada localidade estão apresentadas no Quadro 2. Os dados de perdas de solo e de água para todas as localidades foram obtidos em parcelas experimentais as quais apresentavam apenas uma direção predominante do escoamento superficial, sendo esta no sentido do comprimento da parcela.

3.2. Parcelas experimentais implantadas em Viçosa - MG

Foram implantadas quatro parcelas experimentais para o monitoramento do escoamento superficial e das perdas de solo sob condições de chuva natural na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada na cidade de Viçosa – MG (20° 45' de latitude Sul, 42°51' de longitude Oeste e altitude média de 651 m acima do nível do mar). As parcelas apresentavam tratamentos diferenciados, correspondentes a situações distintas de preparo e cobertura do solo: SDMA - solo descoberto

Quadro 1 – Características de solo, manejo, declividade (S) e dimensões (DP) das parcelas experimentais nos locais utilizados para realização do estudo

Localidade	Solo	Manejo	S (%)	DP (m x m)
Alagoinha (PB) ¹	Terra Roxa Estruturada eutrófica	Algodão morro abaixo (AMA) Algodão em nível (AEN) Milho em nível (MEN) Cana-de-açúcar em sulco e em nível (CEN) Solo descoberto (SD)	12	20 x 5
Campinas (SP) ²	Latossolo Roxo distrófico	Milho plantado no sentido do declive para os seguintes preparos do solo Preparo convencional – arado de disco e duas gradagens niveladoras (MC-PC) Preparo reduzido 1 – duas gradagens niveladoras (MC-PR1) Preparo reduzido 2 - escarificador de cinco dentes e duas gradagens niveladoras (MC-PR2) Preparo reduzido 3 - escarificador de três dentes e duas gradagens niveladoras (MC-PR3)	6,5	25 x 75
Dourados (MS) ³	Latossolo Roxo epieutrófico	Plantio de soja e trigo cultivados em sucessão com os seguintes tipos de preparo do solo: Escarificação + gradagem niveladora (ST-ES) Gradagem pesada + niveladora (ST-GP) Plantio direto (ST-PD) Sistema convencional, sem cobertura vegetal (ST-SD)	3	22 x 3,5
Goiânia (GO) ⁴	Latossolo Vermelho-Escuro	Solo descoberto (SD)	4	22,1 x 3,5

Continua.....

1 - Estação Experimental do Município de Alagoinha – Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba - EMEPA-PB (SILVA et al., 1986)

3 – Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste (HERNANI et al., 1997)

4 - Estação experimental Filostro M. Carneiro da Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária (SILVA et al., 1997)

5 - Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ELTZ et al., 1977)

Quadro 1 – Cont...

Localidade	Solo	Manejo	S (%)	DP (m x m)
Guaíba (RS) ⁵	Laterítico Bruno	Sucessão de culturas de trigo em cultivo convencional e de soja em cultivo mínimo (TCSM)	12	22 x 3
	Avermelhado Distrófico	Solo descoberto em cultivo convencional (SD)		
Pindorama (SP) ⁶	Podzólico Vermelho-Amarelo	Sucessão de culturas de trigo e soja em cultivo convencional (TCSC)	10,8	16 x 40
		Milho plantado em contorno para os seguintes preparos do solo: Preparo convencional – arado de disco e duas gradagens niveladoras (MC-PC)		
		Preparo com grade pesada - grade pesada e duas gradagens niveladoras (MC-GP)		
		Preparo reduzido 1 - duas gradagens niveladoras (MC-PR1)		
		Preparo reduzido 2 – escarificador de cinco dentes e duas gradagens niveladoras (MC-PR2)		
Preparo reduzido 3 – escarificador de três dentes e duas gradagens niveladoras (MC-PR3)				
Planaltina (DF) ⁷	Latosolo Vermelho-Escuro Álico	Solo descoberto (SD)	5,5	22 x 3,5
		Milho convencional (MC)		
		Soja convencional (SC)		
		Soja sem palha (SSP)		
Santa Maria (RS) ⁸	Podzólico Vermelho-Amarelo	Soja plantio direto (SPD)	5,5	22 x 3,5
		Solo descoberto (SD)		
Viçosa (MG)	Cambissolo Hálico Tb distrófico Podzólico	Solo descoberto (SD)	15,3	11 x 3,5
		Solo com preparo convencional no sentido do declive e mantido descoberto (SDMA)		
		Solo com preparo convencional no sentido transversal ao declive e mantido descoberto (SDEN)		
		Solo com preparo convencional e plantio de milho no sentido do declive (MCMA)		
		Solo com preparo convencional e plantio de milho no sentido transversal ao declive (MCEN)	16,3	
			19,2	

6 - Estação Experimental de Pindorama e Centro Experimental de Campinas (CASTRO et al., 1986)

7 - Centro de Pesquisas Agropecuárias dos Cerrados da EMBRAPA (DEDECEK et al., 1986)

8 - Área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (SEGANFREDO et al., 1997)

Quadro 2 – Propriedades básicas da camada superficial do solo (0 – 20 cm) para cada local estudado

Localidade	Tipo de solo	Classe textural	—dag kg ⁻¹ —						CTC
			A.G. ¹	A.F. ²	Arg. ³	Silte	M.O. ⁴	Rocha	
Alagoinha – PB	Terra Roxa Estruturada Eutrófica	Franco-Argilo-Arenosa	23	24	36	17	1,83	2	9,7
Campinas – SP	Latossolo Roxo Distrófico	Muito Argilosa	10	20	62	8	2,24	0	8,9
Dourados – MS	Latossolo Roxo Epieutrófico	Muito Argilosa	6	5	74	14	4,60	0	17,25
Goiânia – GO	Latossolo Vermelho-Escuro	Argilosa	7	5	72	16	3,78	0	10,5
Guaíba – RS	Laterítico Bruno Avermelhado Distrófico	Argilosa	35	12	31	22	2,00	12	8,5
Pindorama – SP	Podzólico Vermelho-Amarelo	Arenosa	25	64	9	2	1,55	0	4,1
Planaltina – DF	Latossolo Vermelho-Escuro Álico	Argilosa	8	7	70	16	6,09	1	14,25
Santa Maria – RS	Podzólico Vermelho-Amarelo	Média	43	30	15	12	1,19	0	5,4
Viçosa – MG	Cambissolo Hálico Tb distrófico	Média	29	30	18	23	2,44	0	4,13
	Podzólico								

1 - Areia Grossa; 2 - Areia Fina; 3 - Argila determinada conforme o Método da Pipeta (EMBRAPA, 1997); 4 - Determinado pelo método Walkley-Black (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981)

preparado de forma convencional (uma aração e duas gradagens) no sentido do declive; SDEN - solo descoberto preparado de forma convencional no sentido transversal ao declive; MCMA - solo preparado de forma convencional no sentido do declive e cultivado com milho plantado em fileiras dispostas morro abaixo; e MCEN - solo preparado de forma convencional no sentido transversal ao declive e cultivado com milho plantado em fileiras dispostas em nível. A cultura do milho foi plantada no espaçamento de 0,8 m x 0,2 m, totalizando uma população de 62.500 plantas ha⁻¹. A adubação do milho foi realizada para a obtenção de produtividade de 6 a 8 t ha⁻¹, segundo recomendação da quinta aproximação do manual de Adubação para Minas Gerais (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 1999).

3.2.1. Descrição das parcelas experimentais

As parcelas experimentais foram compostas das seguintes partes:

a) Área de captação da chuva, com dimensão de 3,5m de largura e 11 m de comprimento, delimitada com chapas galvanizadas de 25 cm de altura, com aproximadamente 10 cm enterrados no solo (Figura 1);

b) Calha coletora e tubo de PVC instalados na parte inferior da parcela para condução do escoamento superficial para a estrutura de coleta das perdas de solo e água (Figura 1);

c) Estrutura de coleta posicionada na extremidade inferior da área experimental (Figura 2a), composta por um sistema de filtragem (Figura 2b), no qual os sedimentos transportados pelo escoamento superficial eram retidos no filtro (Bidim) e o escoamento superficial era conduzido para uma caixa retangular, construída de chapa de aço galvanizada (Figura 2c). Esta caixa apresentava na sua extremidade final um vertedor triangular, utilizado para a medição da vazão de escoamento superficial, sendo a altura de lâmina vertente registrada por meio de linígrafo com sensor de pressão, conectado a um “Datalogger”, instalado na própria caixa a uma distância de aproximadamente 0,42 m a montante do vertedor; e



Figura 1 – Parcela experimental utilizada para coleta de dados de perdas de solo e água em Viçosa-MG.

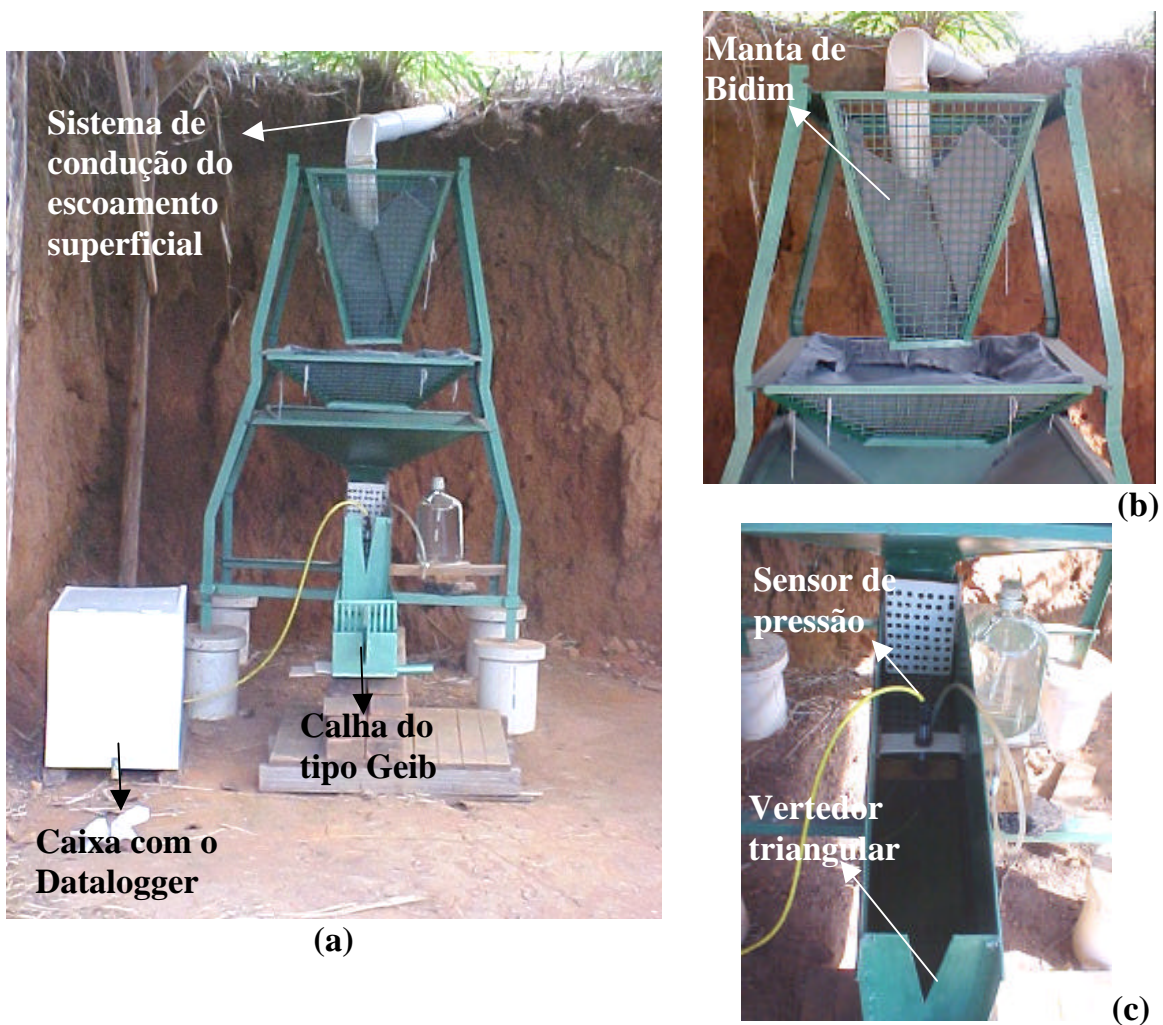


Figura 2 – Estrutura de coleta das perdas de solo e de água (a), detalhes dos sistemas de filtragem (b) e de monitoramento do escoamento superficial (c).

d) Caixa com sistema de calhas divisoras do tipo Geib para a fração de 1/9 (Figura 3), para a qual o escoamento era direcionado após passar pelo vertedor triangular. A calha Geib foi utilizada para a determinação do volume total de escoamento após cada chuva. Na extremidade final desta calha do tipo Geib existia nove aberturas, sendo armazenado apenas o volume de escoamento que passava na abertura central, de posse desse volume e da razão de coleta da abertura central foi possível determinar o volume total do escoamento superficial.

3.2.2. Caracterização do solo da Área Experimental

O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Hálico Tb distrófico Podzólico.

Simultaneamente à montagem e a instalação das parcelas experimentais foram realizadas amostragens de solo para a determinação de algumas características necessárias para a aplicação dos modelos de predição da erosão, tais como: curva de retenção de água no solo, condutividade hidráulica, densidade, estrutura e textura. Nos Quadros 3 e 4 estão apresentadas as características físicas e químicas do solo, respectivamente.

Para obtenção da curva de retenção de água no solo foram retiradas amostras na profundidade de 0-20 cm, as quais foram submetidas às tensões de 10, 30, 100, 500, 1.000 e 1.500 kPa. Os conteúdos de água retidos nas amostras de solo submetidas às referidas tensões estão apresentados na Figura 4.

3.2.3. Determinação da precipitação, do escoamento superficial, do coeficiente de escoamento e das perdas de solo

A precipitação total, bem como sua distribuição temporal, foi registrada em pluviógrafo do tipo pulso (Figura 5a) instalado na área experimental, o qual estava conectado a um “Datalogger” (Figura 5b) que armazenava o número de pulsos no coletor a cada 2 minutos, permitindo assim a avaliação das perdas de solo e água em função de diferentes durações e intensidades de precipitação.



Figura 3 – Sistema de calhas divisorias do tipo Geib para fração de 1/9.

Quadro 3 – Características físicas do solo da área experimental

Horizontes	Profundidade (cm)	Arg. ¹	A.F. ²	A.G. ³	Silte	ρ^4	Classe textural
A	0-13	26	25	32	16	1,32	Média
AB	13-26	10	34	26	30	1,33	Arenosa
BA	26-48	24	36	24	16	1,32	Média
B-1	48-75	32	27	19	22	1,35	Média
B-2	75-100	22	42	16	20	1,38	Média
B-3	>100	10	63	19	8		Arenosa

1 - Argila determinada conforme o Método da pipeta (EMBRAPA, 1997); 2 Areia Fina; 3 Areia Grossa; 4 Massa específica do solo determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Quadro 4 – Características químicas do solo da área experimental

Horizonte	pH ¹	P ²	K ²	Ca ³	Mg ³	Al ³	SB	CTC Total	Saturação de Al	M.O. ⁴
A	5,0	4,3	27	0,7	0,3	1,1	1,07	4,13	50,7	2,64
AB	5,0	1,6	9	0,4	0,2	1,0	0,62	3,22	61,7	2,24
BA	5,0	2,9	12	0,4	0,2	0,8	0,63	2,68	55,9	2,12
B-1	5,3	1,6	5	0,7	0,3	0,6	1,01	2,67	37,3	1,77
B-2	4,9	1,9	5	0,4	0,2	0,5	0,61	2,27	45,0	1,66
B-3	4,9	1,6	8	0,4	0,2	0,1	0,62	1,95	13,9	1,55

1 - pH em água - Relação 1:2,5; 2 - P e K = fósforo disponível e potássio trocável, respectivamente, extraídos com Mehlich 1 e determinados conforme o método definido por DEFELIPO e RIBEIRO (1981); 3 - Ca, Mg, e Al = cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, respectivamente, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados conforme DEFELIPO e RIBEIRO (1981); e 4 - Determinado pelo método Walkley-Black (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981).

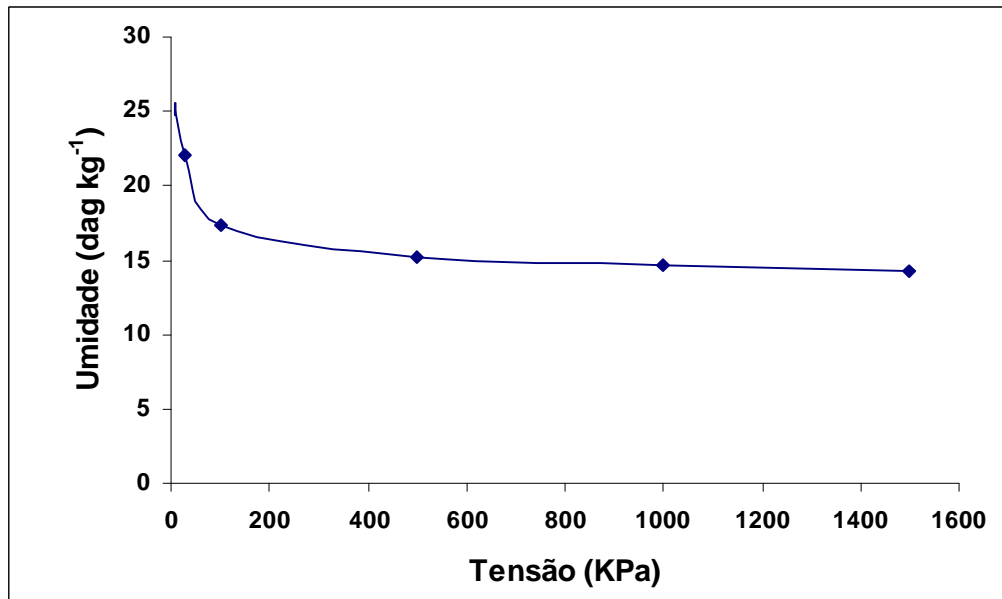


Figura 4 – Curva característica de retenção de água no solo, na profundidade de 0 - 20 cm.

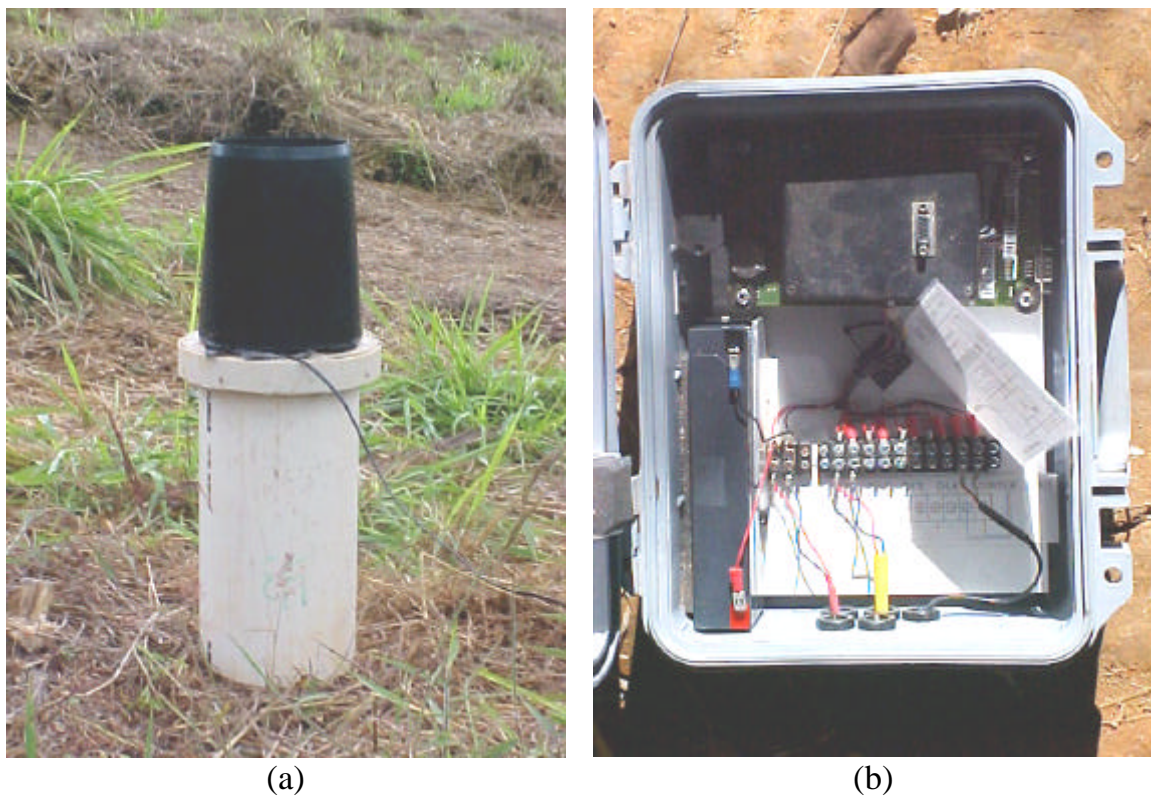


Figura 5 – Pluviógrafo do tipo pulso (a) utilizado na aquisição de dados de precipitação conectado ao “Datalogger” (b)

Antes do início da coleta de dados foi realizada a calibração de cada linígrafo com sensor de pressão instalado na caixa após o sistema de filtragem do escoamento superficial (Figura 2c), de maneira que se tinha a vazão de escoamento em função da leitura no linígrafo de pressão, a qual era registrada no “Datalogger” a cada 2 minutos. No entanto, devido à falta de sensibilidade dos linígrafos para as variações de níveis muito pequenas ocorridas durante as chuvas menos intensas, as quais geravam pequenas vazões de escoamento, não foi possível utilizar os dados coletados pelo linígrafo com sensor de pressão. Desta forma, para determinação do volume de escoamento superficial em cada parcela experimental foi realizada a calibração do sistema coletor do tipo Geib para obtenção da razão de coleta do sistema. Com esta razão de coleta e medindo-se, com o auxílio de uma proveta de 2 L, o volume que passou pela janela central do sistema divisor do tipo Geib, foi possível determinar o volume de escoamento superficial gerado em cada evento de chuva.

A lâmina de escoamento superficial foi obtida pela relação entre o volume total escoado e a área da parcela experimental.

$$L_{esc} = \frac{V_{esc}}{A} \quad (11)$$

em que,

$$\begin{aligned} L_{esc} &= \text{lâmina total de escoamento superficial, mm;} \\ V_{esc} &= \text{volume total de escoamento superficial, L; e} \\ A &= \text{Área da parcela experimental, m}^2. \end{aligned}$$

De posse dos dados de lâmina de escoamento superficial e da lâmina precipitada em cada evento de chuva, obteve-se o coeficiente de escoamento superficial utilizando-se a seguinte equação:

$$C_{esc} = \frac{L_{esc}}{L_{Ppt}} \quad (12)$$

em que L_{Ppt} é igual à lâmina precipitada, mm.

As perdas de solo foram quantificadas pelo método direto (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990), por meio da coleta dos sedimentos transportados juntamente com o escoamento superficial até a estrutura de coleta, localizada a jusante de cada parcela experimental. Nesta estrutura de coleta, colocou-se uma manta de bidim (Bidim OP 30), previamente pesada, para possibilitar a coleta das partículas de solo transportadas pelo escoamento superficial durante a ocorrência das chuvas (Figura 6).

Cessada a chuva, o bidim com solo era retirado da estrutura de coleta e colocado para secar ao ar, por um período de 4 a 5 dias, para posterior determinação da sua massa seca. No ato da pesagem do solo, o mesmo era homogeneizado e retiradas amostras para determinar a umidade residual do solo e, com isso, possibilitar a determinação do peso do solo seco. O restante do solo que ficava no bidim era levado, juntamente com o bidim, para uma estufa de circulação de ar à temperatura de 65 ° C, por um período de 72 horas, para posterior determinação da massa seca. A quantificação dos sólidos em suspensão que passaram pelo material filtrante foi realizada a partir de uma correlação entre os dados de quantidade de sedimentos retidos e de sedimentos em suspensão obtidos por PEREIRA (1999), utilizando-se o mesmo material filtrante e o mesmo tipo de solo. A massa total de solo seco foi obtida por meio do somatório do solo retido no material filtrante e do solo em suspensão que passou pelo filtro.

3.3. Aplicação dos modelos para predição das perdas de água e solo

3.3.1. USLE

As estimativas das perdas de solo com base no modelo USLE foram obtidas pela aplicação da equação 1.

Na seqüência está apresentada uma descrição dos procedimentos utilizados para a obtenção dos seis fatores da USLE, quando os mesmos não foram determinados nos estudos de perdas de solo.



Figura 6 - Manta de bidim que possibilitou a retenção e coleta das partículas de solo transportadas pelo escoamento superficial.

O fator de erosividade das chuvas (R) foi obtido de levantamento de dados já publicados, uma vez que para todas as localidades estudadas este fator já havia sido determinado (Quadro 5).

O fator erodibilidade do solo (K) para cada local foi determinado pela Equação 13, usada na construção do nomograma de WISCHMEIER e SMITH (1978).

$$K = \left\{ \frac{[2,1 \cdot 10^{-4} (12 - OM) M^{1,14} + 3,25 (s - 2) + 2,5 (p - 3)]}{100} \right\} 0,1318 \quad (13)$$

em que,

- OM = conteúdo de matéria orgânica, dag kg⁻¹;
- M = parâmetro que representa a textura do solo;
- s = classe de estrutura do solo, adimensional; e
- p = permeabilidade do perfil, adimensional.

O valor de M é calculado com uso da equação:

$$M = (\% \text{ silte} + \% \text{ areia fina}) \cdot (100 - \% \text{ argila}) \quad (14)$$

Os valores de s para os solos com estrutura granular muito fina, granular fina, granular média ou grossa e em blocos, laminar ou massiva, são 1, 2, 3 e 4, respectivamente (WISCHMEIER et al., 1971).

Quadro 5 – Valores do fator de erosividade da chuva (R), MJ mm⁻¹ ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, para cada local em estudo

Localidade	R	Fonte
Alagoinha – PB	3.205	CHAVES e NASCIMENTO (1994)
Campinas – SP	6.835	CARVALHO et al. (1993)
Dourados – MS	6.411	HERNANI et al. (1997)
Goiânia – GO	8.353	SILVA et al. (1997)
Guaíba – RS	6.522	MORAIS et al. (1988)
Pindorama – SP	7.124	CARVALHO et al. (1994)
Planaltina – DF	8.319	DEDECEK (1988)
Viçosa – MG	4.695	SOUZA et al. (1996)
Santa Maria – RS	9.641	PEDROSO et al. (2003)

Os valores de p para solos com permeabilidade rápida, moderada a rápida, moderada, lenta a moderada, lenta e muita lenta são 1, 2, 3, 4, 5, e 6, respectivamente (WISCHMEIER et al., 1971).

Os valores referentes a classe de estrutura e de permeabilidade do solo das diferentes localidades estudadas estão apresentados no Apêndice A.

O fator topográfico (LS) foi determinado utilizando-se a Equação 15, a qual tem a finalidade de corrigir o comprimento e a declividade da encosta para as condições existentes nas parcelas experimentais padrão utilizadas para o desenvolvimento da USLE (WISCHMEIER e SMITH, 1978), isto é, para as condições topográficas em que o comprimento e a declividade da encosta são de 22 e 9%, respectivamente, condição em que o fator LS assume valor igual a 1,0.

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m (65,41 \text{ sen}^2 \acute{\alpha} + 4,56 \text{ sen} \acute{\alpha} + 0,065) \quad (15)$$

em que,

L = comprimento do declive, m;

= ângulo do declive, graus; e

m = coeficiente de ajuste dependente da declividade do terreno (S); sendo 0,5 para S > 5%, 0,4 para 3,5 ≤ S ≤ 5%, 0,3 para 1,0 ≤ S ≤ 3,5% e 0,2 para áreas planas.

Os fatores de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas (P) para as diferentes condições foram baseados em dados apresentados na

literatura (MERTEN et al., 1995, BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990 e WISCHMEIER e SMITH, 1978). Os valores dos fatores P e C adotados para cada condição de uso e manejo do solo nas diferentes localidades estão apresentados no Apêndice B.

3.3.2. RUSLE

As perdas de solo estimadas utilizando o modelo RUSLE foram obtidas por meio do programa RUSLE, versão 1.06 (RENARD et al., 1997). Na Figura 7 está apresentado o fluxograma geral usado nas rotinas de cálculos do programa para determinação das perdas de solo. Para executar o programa foi necessário definir três arquivos de bancos de dados: um contendo informações referentes às características climáticas locais, tais como, precipitação média mensal, erosividade da chuva, fração acumulada da erosividade da chuva a cada 15 dias e temperatura média mensal (CITY DATABASE); outro contendo informações referentes às características da cultura (CROP DATABASE); e outro contendo informações de uso e manejo do solo (OPERATION DATABASE), tais como porcentagem da área revolvida, quantidade de resíduos, profundidade do preparo do solo, etc. Esses arquivos foram adaptados às condições edafoclimáticas de cada local estudado, a partir das informações de solo, clima, manejo e uso do solo em cada local específico.

Os parâmetros de entrada para montagem do banco de dados CITY DATABASE para as diferentes localidades estão apresentados no Apêndice C.

O banco de dados CROP DATABASE foi montado com base nas informações de crescimento de plantas, decomposição de resíduos, entre outras, disponíveis no banco de dados da RUSLE, sendo realizado ajuste apenas nos parâmetros de espaçamento da cultura, densidade de plantio e incorporação de resíduos, com base nas informações disponíveis em cada local estudado. No Apêndice D é apresentado um exemplo dos dados referentes à cultura do milho utilizada nas parcelas experimentais instaladas na cidade de Viçosa – MG.

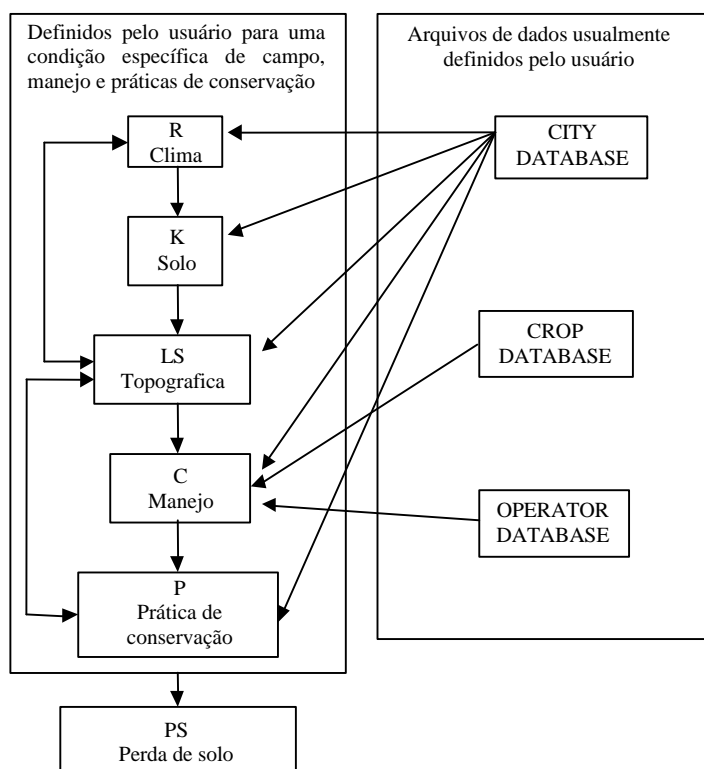


Figura 7 – Fluxograma para cálculo das perdas de solo pelo modelo RUSLE.

O banco de dados OPERATOR DATABASE, de forma semelhante ao CROP DATABASE, foi montado com base nas informações disponíveis no banco de dados da RUSLE.

Os parâmetros de solo utilizados para a determinação do fator de erodibilidade do solo foram aqueles apresentados no Quadro 2. Para a determinação do fator C as informações referentes às datas, às seqüências e aos tipos de cultivos realizados nas parcelas experimentais foram obtidas na descrição apresentada nos trabalhos de perdas de solo.

3.3.3. WEPP

Para aplicação do WEPP é necessária a elaboração de arquivos de clima, de solo, de manejo e uso do solo e topográfico, os quais são baseados em registros de dados locais. Todos esses arquivos foram colocados no formato específico do software WEPP for Windows versão 95/98/NT Beta 3.0.

As informações necessárias para construção do arquivo de solo utilizado no WEPP foram também obtidas de dados medidos em cada local em estudo. Em todos os locais e parcelas experimentais, os dados referentes a conteúdo de areia, silte, argila, rocha, matéria orgânica, classe textural e CTC do perfil de solo foram obtidos de trabalhos de levantamento de solos (Quadro 2 e Apêndice E). Outros parâmetros ainda referentes ao arquivo de solo, tais como: erodibilidade entressulcos e do sulco, condutividade hidráulica do solo e tensão crítica de cisalhamento do solo foram estimados por equações inclusas no modelo WEPP (FLANAGAN e NEARING, 1995).

Os arquivos de uso e manejo do solo com as informações referentes ao crescimento de plantas, condições iniciais, decomposição de resíduos e práticas de manejo do solo foram montados com base nas informações disponíveis em cada local e na base de dados disponível no WEPP. As informações referentes às datas, às seqüências e aos tipos de cultivos realizados nas parcelas experimentais foram obtidas na descrição apresentada nos trabalhos de perdas de solo. A base de dados de cultivo e manejo do solo, inclusa no WEPP, foi selecionada de maneira que melhor representasse as práticas de cultivo e manejo adotadas nas parcelas experimentais de cada local estudado.

O arquivo de dados climáticos diários para entrada no modelo WEPP foi gerado com auxílio do programa CLIGEN, versão 4.3. Os parâmetros estatísticos média e desvio padrão da precipitação, coeficiente de assimetria da precipitação total diária, probabilidades mensais de ocorrência de dias com chuva após dias com chuva e de ocorrência de dias sem chuva após dias com chuva, média e desvio padrão das temperaturas máxima e mínima mensal, média e desvio padrão da radiação solar mensal e média mensal da temperatura do ponto de orvalho foram obtidos a partir de dados climáticos coletados em estações climatológicas existentes em cada localidade em estudo.

As probabilidades de ocorrência de dias com chuva seguidos de dia com chuva e de dias com chuva seguidos de dia sem chuva para cada mês foram estimadas a partir do número de dias chuvosos (NW) e sem chuva (ND) do mês, do número de dias chuvosos após dias sem chuva (NWD) e do número de dias

chuvosos após dia com chuva (NWW), utilizando-se as equações 16 e 17 propostas por NICKS et al. (1995).

$$P(W/W) = \frac{NWW}{NW} \quad (16)$$

$$P(W/D) = \frac{NWD}{ND} \quad (17)$$

em que,

- $P(W/W)$ = probabilidade mensal da ocorrência de dia com chuva após dias com chuva, decimal;
 NWW = número de dias chuvosos após dia com chuva, dias;
 NW = número de dias chuvosos, dias;
 $P(W/D)$ = probabilidade mensal da ocorrência de dia com chuva após dias sem chuva, decimal;
 NWD = número de dias chuvosos após dia sem chuva, dias; e
 ND = número de dias sem chuva, dias.

Para a estimativa da radiação solar utilizou-se a metodologia recomendada pela FAO para estimativa do saldo de radiação, sendo utilizadas as equações 18 e 19 para estimativa da declinação solar e da radiação solar incidente, respectivamente. A temperatura no ponto de orvalho foi calculada utilizando os dados de temperatura e umidade relativa.

$$\ddot{a} = 0,4093 \operatorname{sen} \left(\frac{2 \ddot{\delta}}{365} J - 1,405 \right) \quad (18)$$

em que

- δ = declinação solar, rad; e
 J = Número do dia Juliano.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (19)$$

em que

- R_s = Radiação solar incidente na superfície terrestre, Langleys;
 a_s = fração da radiação no topo da atmosfera para dias nublados;
 b_s = fração da radiação no topo da atmosfera para dias claros;
 n = número de horas de brilho solar por dia, h;
 N = número máximo de horas de brilho solar do dia, h; e
 R_a = radiação no topo da atmosfera, Langleys.

Com relação aos dados referentes à média mensal da intensidade de precipitação máxima em 30 minutos, ao tempo decorrido entre o início do evento até o momento em que ocorreu a intensidade máxima, à precipitação máxima em 30 minutos e à precipitação máxima em seis horas, os mesmos não foram obtidos para sete das nove localidades em estudo, devido à indisponibilidade de dados pluviográficos. Tais dados foram obtidos apenas para a cidade de Viçosa – MG em estudo realizado por EVANGELISTA (2003) e para Campinas – SP em estudo realizado por DeMARIA et al. (2001). Para as demais localidades foram realizadas simulações utilizando os dados referentes às cidades de Campinas e Viçosa. No entanto, em função da pequena variação entre os dados estimados para as duas condições, em média 1,36% ($0,054 \text{ kg m}^{-2}$), adotou-se os dados de Viçosa para as demais localidades.

3.4. Análise estatística para comparação dos modelos

A validação estatística foi realizada comparando-se os resultados estimados pelos modelos e os resultados observados nos trabalhos de perdas de solo, por meio de correlação, da raiz do quadrado médio do erro (RMSE) e da eficiência dos modelos.

O RMSE foi obtido com base na Equação 20, proposta por THOMAN (1982).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (20)$$

em que,

O_i = valor observado para o i ésimo evento;

P_i = valor estimado para o i ésimo evento; e

N = número total de pares de valores observados e estimados.

Baixos valores de RMSE significam que os valores estimados utilizando-se os modelos estão mais próximos dos valores observados experimentalmente.

Tendo em vista a grande variabilidade dos dados de perdas de solo, a avaliação do desempenho dos modelos de erosão por meio de uma simples comparação dos valores estimados e observados torna-se muitas vezes inadequada, motivo pelo qual adotou-se a metodologia para determinação da eficiência dos modelos proposta por NEARING (2000), a qual considera a variabilidade dos dados de perda de solo medidos. A aplicação desta metodologia consiste nos seguintes procedimentos:

a) calcular a diferença relativa entre os dados de perdas de solo medidos e estimados (R_{diffs}) a partir da Equação 21:

$$R_{diff_s} = \frac{S - M}{S + M} \quad (21)$$

em que,

S = valor de perda de solo estimado; e

M = valor de perda de solo medido.

b) calcular o intervalo de ocorrência para cada valor de perda de solo medido ($R_{diffocc}$), a partir da Equação 22, que representa o intervalo de ocorrência com frequência de 90 e 95% por meio de uma relação linear com o logaritmo dos dados de perdas de solo medidos.

$$R_{diff_{occ}} = m \log(M) + b \quad (22)$$

em que m e b são parâmetros de ajuste da equação apresentando os seguintes valores:

m = + 0,236 e b = - 0,641 para o limite inferior do intervalo de 95%;

m = - 0,179 e b = + 0,416 para o limite superior do intervalo de 95%;

m = + 0,225 e b = - 0,524 para o limite inferior do intervalo de 90%;

m = - 0,155 e b = + 0,338 para o limite superior do intervalo de 90%;

c) determinar o número de estimativas em que o valor de R_{diffs} fica dentro do intervalo de $R_{diffocc}$ (simulações aceitas); e

d) calcular o coeficiente de eficiência (e) do modelo, obtido a partir da relação entre o número de simulações aceitas e o número de simulações realizadas, que representa qual a fração das estimativas realizadas estão dentro do intervalo de ocorrência da perda de solo medida em função da sua variabilidade.

3.5. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade, realizada apenas para o modelo WEPP, foi conduzida para alguns parâmetros relacionados ao solo, à hidráulica do escoamento superficial e ao manejo do solo, os quais estão apresentados no Quadro 6 com seus respectivos valores de base e a faixa de valores utilizados na análise de sensibilidade.

Para quantificar o impacto de uma faixa de valores de um parâmetro de entrada no modelo sobre os resultados obtidos foi utilizado um índice de sensibilidade relativa (s), utilizando-se a Equação 23, conforme McCUEN e SNYDER (1986), o qual representa uma mudança normalizada no valor de saída do modelo em função de uma mudança normalizada nos parâmetros de entrada do modelo.

$$s = \frac{\frac{O_1 - O_2}{O_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (23)$$

em que

- O_1 = valor de saída do modelo associado a I_1 ;
- O_2 = valor de saída do modelo associado a I_2 ; e
- O_{12} = valor médio de O_1 e O_2 .
- I_1 = mínimo valor de entrada;
- I_2 = máximo valor de entrada; e
- I_{12} = valor médio de I_1 e I_2 .

Para os parâmetros referentes ao banco de dados de uso e manejo do solo, das características da chuva e das características do solo (erodibilidade, condutividade hidráulica e tensão crítica de cisalhamento), o índice de sensibilidade foi determinado para oito condições diferentes de perfil topográfico da encosta, sendo quatro comprimentos (11, 22, 50 e 100) e duas declividades (5 e 9%).

Este método de análise de sensibilidade considera linear a variação da resposta do modelo para a faixa de valores dos parâmetros de entrada. Desta forma, realizou-se uma discretização da faixa de valores apresentados no Quadro

Quadro 6 – Parâmetros do modelo WEPP e seus respectivos valores de base e faixa de valores utilizados para a análise de sensibilidade

Parâmetros de entrada	Ud ¹	Valor de base	Intervalo
Lâmina total precipitada	Mm	100	20 – 200
Duração da precipitação	h	1	0,5 – 10
Intensidade máxima de precipitação	mm h ⁻¹	60	20 – 200
Tempo para ocorrência da Ip _{Max}	%	50	1 – 100
Comprimento de encosta	m	22,13	11 – 100,0
Declividade da encosta	%	9,0	0,25 – 20,0
Cobertura do sulco	%	0	0 – 100
Cobertura entressulcos	%	0	0 – 100
Cobertura do solo pelas copas das plantas	%	0	0 – 100
Altura da copa das plantas	m	0	0 – 3
Altura das leiras após o preparo do solo	cm	5	2,5 – 10
Rugosidade randômica da superfície do solo	cm	2	1,3 – 5,2
Adição de resíduos	t ha ⁻¹	0	0,0 – 10
Erodibilidade entressulcos	kg s m ⁻⁴	EM ²	0,5 x 10 ⁶ - 5,2 x 10 ⁶
Erodibilidade no sulco	s m ⁻¹	EM ²	0,002 – 0,03
Tensão crítica de cisalhamento	Pa	EM ²	1 – 10
Condutividade hidráulica	mm h ⁻¹	EM ²	2,5 – 60
Conteúdo de argila	%	40	9 – 74
Conteúdo de areia	%	45	12 – 89
Conteúdo de matéria orgânica	%	0,5	0,2 – 6
Umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação	%	70	50 – 90
Albedo da superfície do solo	%	23	5 – 30

1- Unidade dos parâmetros; 2 - Estimado pelo modelo WEPP

6 para aqueles parâmetros que apresentaram maiores índices de sensibilidade, objetivando verificar se o modelo é igualmente sensível para toda a faixa de valores escolhida para os parâmetros de entrada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Perdas de solo e água

No Quadro 7 estão apresentados os dados de perdas de solo, perdas de água e coeficientes de escoamento médio observados durante o período de 11 de novembro de 2002 a 22 de março de 2003 nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa-MG. No Apêndice F estão apresentados os dados de perdas de solo e de água referentes a cada evento de chuva ocorrido durante o período avaliado.

Observa-se no Quadro 7 que as perdas de solo e de água nas parcelas em que o solo foi mantido descoberto foram expressivamente superiores às das parcelas cultivadas com milho. A parcela em que o solo foi preparado no sentido do declive e mantido descoberto apresentou as maiores perdas de solo e de água em relação às demais parcelas. Analisando as parcelas nas quais o solo foi mantido descoberto, aquela na qual o preparo foi realizado no sentido transversal ao declive (em nível) as perdas de solo e de água foram, respectivamente, cerca de 37% e 24,5% menores que as perdas observadas nas parcelas em que o solo foi preparado no sentido do declive (morro abaixo). Esta redução se deve ao fato do preparo em nível propiciar menor velocidade e tensão cisalhante do escoamento superficial, reduzindo sua capacidade de transporte e de

Quadro 7 – Perdas de solo (PS), perdas de água (PA) e coeficientes de escoamento (C_{esc}) observados nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG, durante o período de 12/11/2002 a 22/03/2003

Tratamentos		PS (t ha ⁻¹)	PA (mm)	C_{esc}
Cobertura do solo	Preparo do solo			
Descoberto	Morro abaixo (SDMA ¹)	57,35	107,33	0,110
	Em nível (SDEN ²)	36,14	81,04	0,078
Cultivado com Milho	Morro abaixo (MCMA ³)	2,70	33,92	0,032
	Em nível (MCEN ⁴)	0,53	13,45	0,013

1 - Solo com preparo convencional no sentido do declive e mantido descoberto; 2 - solo com preparo convencional no sentido transversal ao declive e mantido descoberto; 3 - solo com preparo convencional e plantio de milho no sentido do declive; e 4 - solo com preparo convencional e plantio de milho no sentido transversal ao declive.

desprendimento das partículas de solo. Segundo BERTONI e LOMBARDI NETO (1990), o cultivo em nível pode reduzir, em até 50%, as perdas de solo em relação ao cultivo morro abaixo.

A presença de cobertura vegetal reduziu expressivamente as perdas de solo e de água, chegando esta redução a, aproximadamente, 95% e 68%, respectivamente, quando se compara as perdas de solo e de água observadas nas parcelas com cultivo de milho morro abaixo e a parcela padrão (solo descoberto e preparo morro abaixo). A eficiência da cobertura vegetal na redução das perdas de solo e de água é aumentada quando a mesma é associada ao preparo do solo em nível, atingindo valores de aproximadamente 99% e 87% de redução das perdas de solo e de água, respectivamente, em comparação à parcela padrão. Esses resultados são coerentes com aqueles obtidos por ELTZ et al. (1977), AMADO et al. (1989), CARVALHO et al. (1990), DEBARBA (1993) e SEGANFREDO et al. (1997), que observaram grande redução nas perdas de solo com a presença da cobertura vegetal.

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 baixa

concentração de sedimentos no escoamento superficial. Além disto, com a presença de plantas, grandes quantidades de água são transpiradas, reduzindo a umidade do solo, aumentando com isso a taxa de infiltração de água no solo e reduzindo o volume de escoamento superficial; ocorre aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo, reduzindo a tendência ao encrostamento do solo; e aumento da rugosidade superficial, reduzindo a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, sua erosividade (DEDECEK et al., 1986; SEGANFREDO et al., 1997).

Pode-se observar que a eficiência, tanto do preparo do solo em nível quanto da presença de plantas, em reduzir as perdas de solo é superior comparativamente às perdas de água, confirmando o fato de que o efeito da cobertura do solo é mais relacionado ao processo de impacto das gotas da chuva no solo e a conseqüente desagregação, deslocamento e arraste das partículas de solo.

Nas parcelas cultivadas com o milho, observou-se que 95% e 97% das perdas totais de solo obtidas nas parcelas com plantio morro abaixo e em nível, respectivamente, ocorreram até o 54º dia após o plantio, período em que a cultura do milho estava em fase de desenvolvimento. Esta observação associada ao fato de que, aproximadamente, 48% dos eventos de chuvas e 59% da lâmina total precipitada durante o período experimental ocorreram até 54º dia após o plantio, evidenciam a eficiência da cobertura vegetal na redução das perdas de solo. No Apêndice F estão apresentadas as características das chuvas e os dados de perdas de solo e de água referentes a cada evento ocorrido durante o período experimental.

4.2. Avaliação do desempenho dos modelos USLE, RUSLE e WEPP

No Quadro 8 estão apresentados os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para a avaliação do desempenho geral dos modelos USLE, RUSLE e WEPP para as estimativas das perdas de solo considerando todas as nove localidades estudadas. Pode-se observar neste quadro que todos os modelos de

Quadro 8 – Parâmetros estatísticos associados à estimativa das perdas de solo pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP considerando todas as localidades estudadas

Parâmetros estatísticos	PS estimada			PS experimental
	USLE	RUSLE	WEPP	
Média das PS (kg m^{-2})	8,53	5,87	5,22	2,79
Média da magnitude do erro (kg m^{-2})	5,97	3,09	2,85	-
Coefficiente de correlação	0,60	0,73	0,86	-
RMSE	8,53	5,53	3,55	-
Eficiência (e_{95}) ¹	0,27	0,50	0,46	-

1 - representa a fração das estimativas realizadas que estão dentro do intervalo de ocorrência da perda de solo medida em função da sua variabilidade, sendo que este intervalo engloba a variabilidade dos dados medidos com 95% de probabilidade.

predição da erosão apresentam média das estimativas de perdas de solo superiores à média da perda de solo obtida experimentalmente, indicando uma tendência de superestimativa das perdas de solo. O WEPP foi o modelo que apresentou menor média da magnitude do erro comparativamente aos modelos RUSLE e USLE, indicando, desta forma, que o modelo apresenta estimativas mais precisas quando comparadas às dos outros dois modelos estudados. Este indicativo foi confirmado pelos valores do RMSE, o qual apresenta menor valor para o modelo WEPP, seguido pelos modelos RUSLE e USLE. Vale ressaltar que quanto menor o valor de RMSE, mais próximos dos valores observados experimentalmente estão os valores estimados utilizando-se o modelo.

Esses resultados discordam das observações feitas em estudos realizados nos EUA, nos quais os modelos USLE e RUSLE apresentaram menores erros nas estimativas das perdas de solo comparativamente ao modelo WEPP (RISSE et al., 1993; ZANG et al., 1996; TIWARI et al., 2000). Esta discordância se deve à ampla base de dados existente naquele país para a aplicação da USLE e RUSLE, bem como pelo fato de se tratar de modelos empíricos que foram desenvolvidos para as condições edafoclimáticas dos EUA, o que vem a corroborar com a afirmativa de que os modelos empíricos, quando utilizados para as condições nas quais foram desenvolvidos, podem ser mais precisos do que os modelos com maiores níveis de complexidade (PERIN et al., 2001).

Pode-se observar ainda, com relação à eficiência dos modelos, que o modelo RUSLE apresenta uma eficiência relativamente superior à dos modelos WEPP e USLE, verificando-se, desta forma, uma inversão dos resultados em relação ao coeficiente de correlação e RMSE. Esta inversão pode ser explicada pelo fato das estimativas da RUSLE, embora estejam em maior número dentro do intervalo de ocorrência da variação esperada para os dados de perdas de solo medidas, apresentam maiores desvios em relação aos dados observados experimentalmente, quando comparado com o modelo WEPP, contribuindo assim para um pior desempenho na precisão das estimativas, o que reflete em piores resultados de coeficiente de correlação, RMSE e média da magnitude do erro.

Nas Figuras 8a, 8b e 8c estão apresentadas, respectivamente, as perdas de solo estimadas utilizando-se os modelos USLE, RUSLE e WEPP versus as perdas de solo obtidas experimentalmente para as nove localidades estudadas. Pode-se observar nestas figuras que a maioria dos pontos localiza-se acima da linha de ajuste perfeito, evidenciando a tendência de superestimativa das perdas de solo estimadas pelos três modelos para as condições estudadas de uso e manejo do solo.

Nas Figuras 9a, 9b e 9c pode-se confirmar o indicativo de melhores estimativas das perdas de solo utilizando-se o modelo WEPP comparativamente aos modelos RUSLE e USLE, como observado no Quadro 8, uma vez que as menores magnitudes dos desvios entre os valores estimados e observados experimentalmente foram obtidas com uso deste modelo. Os maiores desvios observados nas estimativas obtidas pelos modelos USLE e RUSLE podem ser explicados, em parte, pelo caráter empírico destes modelos, os quais não consideram a distribuição temporal das chuvas ao longo do ano e, principalmente, no caso da USLE, devido à falta de base de dados para a determinação precisa dos fatores C e P para as condições de uso e manejo do solo nas quais os modelos foram aplicados.

Na Figura 9 também fica claro que todos os modelos tendem a superestimar as perdas de solo, independentemente da faixa de perdas de solo

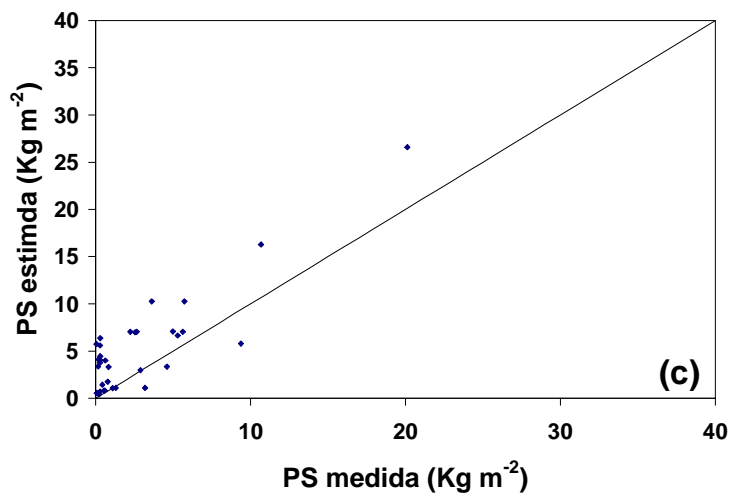
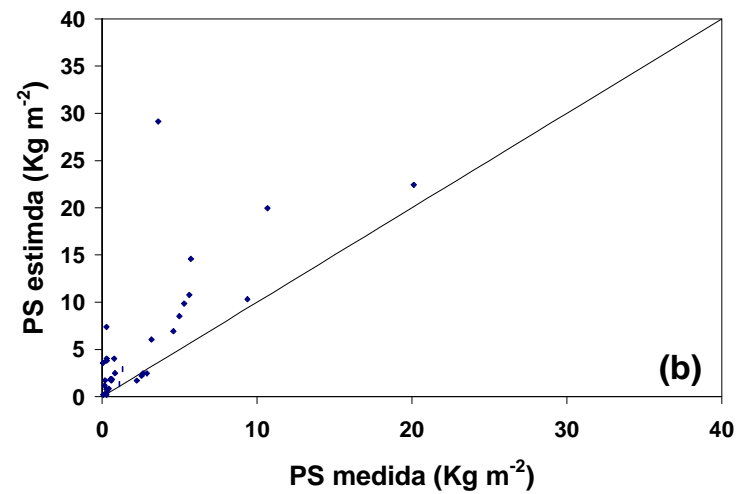
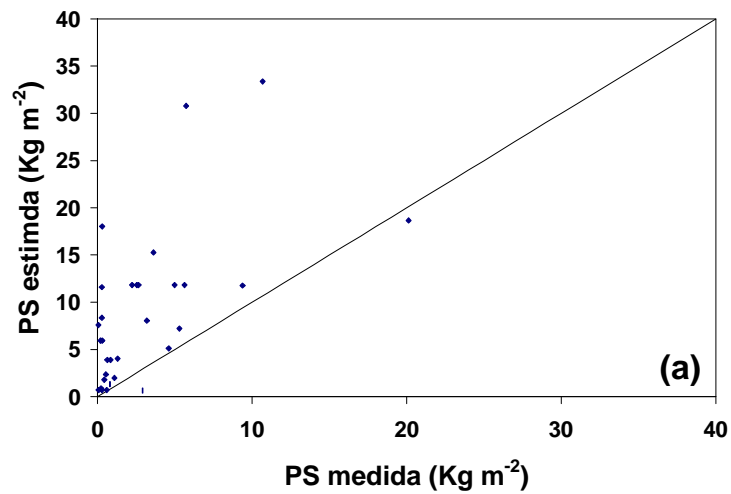


Figura 8 - Perdas de solo (PS) médias anuais estimadas utilizando-se os modelos USLE (a), RUSLE (b) e WEPP (c) versus as obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo nas nove localidades estudadas.

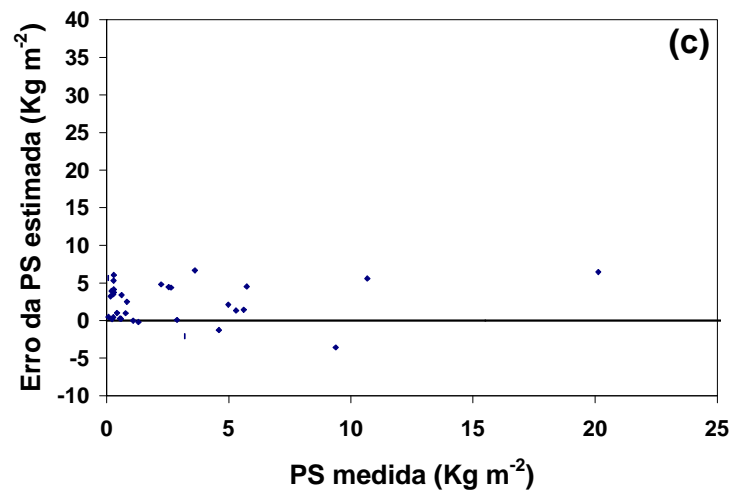
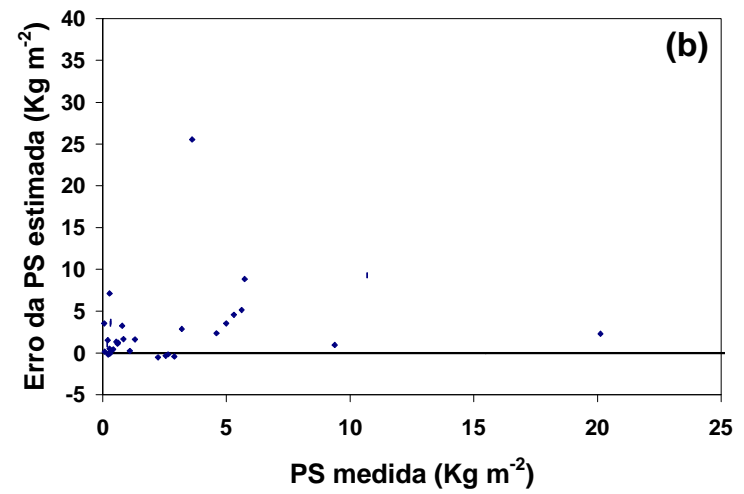
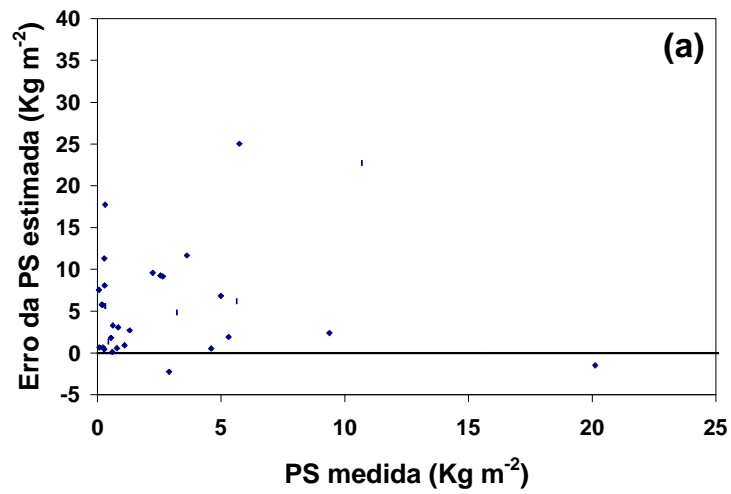


Figura 9 – Erro das estimativas das perdas de solo (PS) utilizando-se os modelos USLE (a), RUSLE (b) e WEPP (c) versus as perdas de solo obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo nas nove localidades estudadas.

observadas experimentalmente. Esta tendência de superestimativa, independentemente da faixa de perda de solo observada, discorda dos resultados obtidos por RISSE et al. (1993), NEARING (1998), ZHANG et al. (1996) e TIWARI et al. (2000), os quais verificaram que utilizando-se os modelos USLE e RUSLE tende-se a superestimar as perdas de solo de pequenas magnitudes e subestimar as de grandes magnitudes. Já com relação ao modelo WEPP, o comportamento de superestimativa das perdas de solo corrobora os resultados obtidos por TIWARI et al. (2000) para condições em que não foi realizado nenhum tipo de calibração dos parâmetros de entrada do modelo.

Na Figura 10 estão apresentadas as perdas de solo (PS) médias anuais estimadas utilizando-se os modelos USLE, RUSLE e WEPP, com suas respectivas linhas de tendência, versus as obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo para as nove localidades estudadas. Pode-se observar, nesta figura, que as linhas de tendências para os modelos WEPP e RUSLE estão mais próximas da linha de ajuste perfeito que a do modelo USLE, mostrando que esses modelos apresentam, em média, estimativas mais precisas. As linhas de tendência permitem verificar que não existem diferenças expressivas entre as estimativas obtidas utilizando-se os modelos RUSLE e WEPP para as condições em que ocorrem menores perdas de solo. No entanto, para elevados valores de perdas de solo verifica-se que as estimativas são bastante diferentes, sendo verificado que o modelo WEPP foi o que menos se distanciou da linha de ajuste perfeito. Portanto, o modelo RUSLE, apesar de apresentar valor de eficiência superior ao WEPP, não produz melhores estimativas para elevadas perdas de solo.

Fica visível na Figura 10 a tendência de superestimativa das perdas de solo utilizando-se os três modelos. Para os modelos USLE e RUSLE, esta superestimativa deve-se, principalmente, à superestimativa dos fatores K, C e P. Observou-se que os valores do fator K estimados utilizando-se a Equação 13 foram superiores aos valores determinados experimentalmente em oito das nove localidades estudadas, sendo esta superioridade variável de 26 a 116 % dos valores de K observados em Campinas e Pindorama, respectivamente. Com

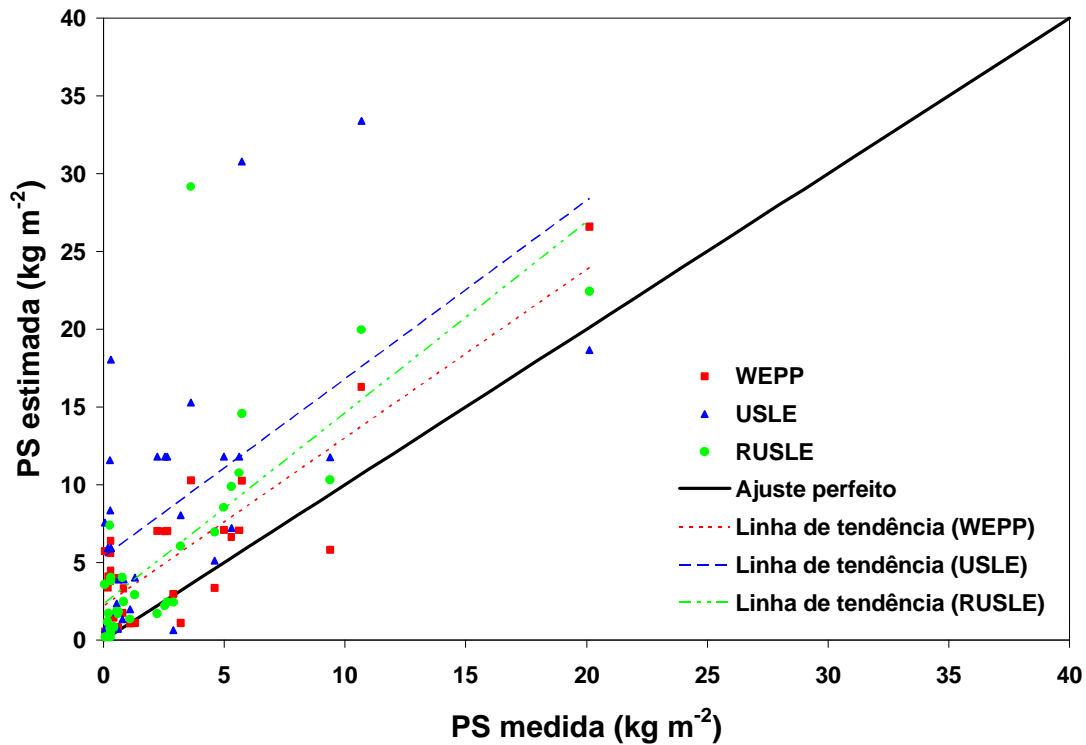


Figura 10 - Perdas de solo (PS) médias anuais estimadas pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP versus as obtidas experimentalmente para as diferentes condições de uso e manejo do solo para as nove localidades estudadas.

relação aos fatores C e P, os mesmos podem ser considerados os principais responsáveis pela superestimativa, principalmente para o modelo USLE, tendo em vista que são bastante influenciados pelas condições edafoclimáticas locais e, não se tinham os valores desses fatores disponíveis para todas as localidades estudadas, sendo usados dados obtidos para as condições edafoclimáticas de Campinas. Também existiram algumas condições nas quais estes fatores ainda não foram determinados.

Para o modelo WEPP, a superestimativa das perdas de solo deveu-se provavelmente à inadequação para as condições estudadas das equações utilizadas pelo modelo para estimar alguns parâmetros, principalmente, a erodibilidade do solo, a tensão crítica de cisalhamento e a condutividade hidráulica do solo. Foi observada subestimativa da condutividade hidráulica para todas as localidades estudadas tendo como referência a característica de permeabilidade

dos solos. Esta subestimativa da condutividade hidráulica proporciona elevados valores de escoamento superficial e, conseqüentemente, maiores valores de perdas de solo. Este tipo de comportamento também foi observado por DeMARIA et al. (2001). Quanto à erodibilidade no sulco (K_r) e à tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c), observou-se que para todas as localidades estudadas K_r tendeu a ser superestimado e τ_c tendeu a ser subestimado quando comparados aos valores encontrados por BRAIDA e CASSOL (1996), GIASSON e CASSOL (1996) e SCHÄFER et al. (2001) em solo Podzólico Vermelho Amarelo, Plintossolo franco-argilo-arenoso e Argissolo Vermelho Amarelo, respectivamente.

Observa-se também na Figura 10 que a linha de tendência do WEPP apresenta uma tendência de paralelismo à linha de ajuste perfeito. Isto, aparentemente, indica que um ajuste nos parâmetros do modelo, tais como, erodibilidade (entressulcos e no sulco), tensão crítica de cisalhamento e condutividade hidráulica poderia melhorar sensivelmente as estimativas do modelo.

No Quadro 9 estão apresentados os valores das perdas de solo estimadas utilizando-se os modelos USLE, RUSLE e WEPP e a magnitude do desvio das estimativas em relação aos dados observados para cada condição de uso e manejo do solo adotadas nas diferentes localidades em estudo. Nenhum dos modelos utilizados mostrou-se mais preciso para todas as condições estudadas de uso e manejo do solo, observando-se que as estimativas obtidas utilizando-se o modelo WEPP foram mais precisas em 45% das condições simuladas, seguidas pelas obtidas pelo modelo RUSLE com 42% e pelo modelo USLE com 12%. Com relação à magnitude do desvio, pode-se observar que para o modelo USLE ocorreu variação de -2,23 a 25,04 kg m⁻²; para a RUSLE o desvio ficou entre -0,53 e 25,53 kg m⁻²; e para o WEPP entre -3,57 e 6,66 kg m⁻². Estes resultados comprovam o indicativo de que o modelo WEPP apresentou melhor desempenho, em termos de precisão das estimativas, quando comparado aos modelos USLE e RUSLE.

Quadro 9 – Valores das perdas de solo (PS) médias anuais estimadas e da magnitude do desvio (Desvio) das estimativas dos modelos USLE, RUSLE e WEPP em relação aos dados observados para as nove localidades e diferentes condições de uso e manejo solo

Localidades	Uso e manejo do solo	USLE		RUSLE		WEPP	
		OS	Desvio	PS	Desvio	PS	Desvio
kg m ⁻²							
Alagoinha - PB	AMA	8,05	+4,86	6,05	+2,86	1,11	-2,08
	AEN	4,02	+2,72	2,91	+1,61	1,11	-0,20
	MEN	2,00	+0,91	1,35	+0,26	1,09	0,00
	CEN	0,88	+0,66	-	-	0,43	+0,22
	SD	11,76	+2,38	10,31	+0,93	5,81	-3,57
Campinas – SP	MC-PC	5,93	+5,63	4,04	+3,73	4,46	+4,16
	MC-PR1	5,93	+5,77	1,19	+1,02	3,38	+3,22
	MC-PR2	5,93	+5,73	1,73	+1,53	4,12	+3,92
	MC-PR3	5,93	+5,63	3,81	+3,51	4,04	+3,75
Dourados – MS	ST-ES	0,72	+0,45	0,79	+0,51	0,70	+0,43
	ST-GP	0,72	+0,13	1,70	+1,11	0,81	+0,22
	ST-PD	0,72	+0,65	0,21	+0,13	0,57	+0,50
	ST-SD	1,34	+0,56	4,04	+3,25	1,77	+0,98
Goiânia-GO	SD	5,12	+0,52	6,95	+2,35	3,35	-1,24
Guaíba – RS	TCSM	8,35	+8,07	0,21	+0,07	5,60	+5,32
	SD	33,39	+22,70	19,95	+9,28	16,29	+5,62
	TCSC	18,03	+17,70	0,49	+0,19	6,38	+6,08
Pindorama – SP	MC-PC	11,81	+6,83	8,52	+3,54	7,09	+2,11
	MC-GP	11,81	+6,20	10,76	+5,15	7,06	+1,45
	MC-PR1	11,81	+9,27	2,22	-0,32	7,00	+4,45
	MC-PR2	11,81	+9,58	1,70	-0,53	7,04	+4,81
	MC-PR3	11,81	+9,17	2,47	-0,17	7,04	+4,40
Planaltina-DF	SD	7,22	+1,92	9,86	+4,56	6,64	+1,34
	MC	0,65	+2,23	2,47	-0,42	2,97	+0,09
	SC	3,90	+3,06	2,49	+1,66	3,34	+2,51
	SSP	3,90	+3,28	1,84	+1,22	4,01	+3,40
	SPD	1,80	+1,38	0,85	+0,43	0,45	+0,03
Santa Maria – RS	SD	18,66	-1,47	22,42	+2,29	26,59	+6,46
	PIMV	2,35	+1,81	1,86	+1,32	0,82	+0,28
Viçosa – MG	SDMA	15,28	+11,70	29,15	+25,5	10,28	+6,66
	SDEN	30,78	+25,00	14,57	+8,84	10,27	+4,53
	MCMA	11,59	+11,32	7,40	+7,13	3,79	+3,52
	MCEN	7,58	+7,53	3,59	+3,53	5,74	+5,69

*valor em negrito indica o valor estimado mais próximo do valor observado experimentalmente.

Fazendo-se uma análise de tendência do comportamento para os diversos tratamentos adotados nas diferentes localidades, observa-se que, de maneira geral, as estimativas obtidas pelos modelos apresentam tendência de comportamento semelhante à dos dados observados, com exceção dos resultados obtidos para Campinas e Pindorama, para as quais os modelos USLE e WEPP não conseguiram representar o efeito dos diferentes tipos de preparo de solo adotados para estas localidades (Quadro 9 e Apêndice G). Para o modelo USLE isto ocorreu provavelmente devido ao fato de não existir valores dos fatores C e P para todos os tipos de preparo do solo, sendo assumido valor constante para os diferentes tipos de preparo do solo adotados em Campinas e Pindorama. Já para o modelo WEPP isto pode ter ocorrido devido à falta de informações na base de dados do WEPP referentes aos tipos de preparo e dos implementos utilizados em Campinas e Pindorama. Para estas duas localidades, as estimativas obtidas utilizando-se o modelo RUSLE além de apresentarem o comportamento semelhante aos dados observados para os diferentes preparos do solo, apresentou as melhores estimativas para todos os tipos de manejo do solo para Campinas e para os tipos de manejo do solo MC-PR1, MC-PR2 e MC-PR3 para Pindorama.

No Quadro 10 estão apresentados os valores do erro médio absoluto, da raiz do quadrado médio do erro e da eficiência dos modelos para as nove localidades estudadas. Verifica-se neste quadro que nas localidades Campinas (SP) e Viçosa (MG), os três modelos apresentaram eficiência igual a zero, ou seja, nenhuma das diferenças relativas entre os valores estimados utilizando-se os modelos e os observados ficou dentro do intervalo que contempla a variabilidade dos dados de perdas de solo obtidos experimentalmente. Para as demais localidades, não foi observada tendência de maior eficiência de um único modelo, existindo uma alternância entre os modelos estudados, sendo que o modelo USLE apresentou menores valores de eficiência, o que refletiu em pior comportamento na análise geral da eficiência dos modelos.

Tendo em vista que não foi realizado nenhum ajuste dos parâmetros dos modelos antes da aplicação dos mesmos, pode-se considerar que os modelos USLE, RUSLE e WEPP apresentaram uma eficiência satisfatória, considerando

Quadro 10 – Erro médio absoluto (Erro), raiz do quadrado médio do erro (RMSE) e eficiência (e_{95}) dos modelos USLE, RUSLE e WEPP nas estimativas das perdas de solo médias anuais para as localidades estudadas

Localidades	USLE			RUSLE			WEPP		
	Erro	RMSE	e_{95}	Erro	RMSE	e_{95}	Erro	RMSE	e_{95}
	—kg m ⁻² —			—kg m ⁻² —			—kg m ⁻² —		
Alagoinha – PB	2,31	2,75	0,40	1,42	1,54	0,80	1,21	1,85	1,00
Campinas – SP	5,69	5,69	0,00	2,45	2,72	0,00	3,76	3,78	0,00
Dourados – MS	0,45	0,49	0,75	1,25	1,74	0,50	0,53	0,60	0,75
Pindorama – SP	8,24	8,33	0,00	1,94	2,81	0,80	3,44	3,71	0,40
Planaltina-DF	2,37	2,48	0,20	1,66	2,26	0,40	1,67	2,03	0,40
Goiânia-GO	0,52	2,35	1,00	2,35	2,35	1,00	1,24	1,24	1,00
Guaíba – RS	16,17	17,28	0,00	3,18	5,36	0,67	5,67	5,68	0,33
Santa Maria – RS	1,64	1,65	1,00	1,81	1,87	0,50	3,37	4,57	0,50
Viçosa – MG	13,89	15,39	0,00	11,26	14,08	0,00	5,10	5,24	0,00

como referência o estudo realizado por NEARING (2000), usando o mesmo critério de avaliação adotado neste estudo, o qual revelou valores de e_{95} iguais a 0,56 e 0,66 para os modelos USLE e WEPP, respectivamente.

4.3. Análise de sensibilidade do modelo WEPP

4.3.1. Parâmetros do banco de dados referentes às características do solo

No Quadro 11 estão apresentados os índices de sensibilidades das perdas de solo e água estimadas utilizando-se o WEPP à variação dos seguintes parâmetros: erodibilidade entressulcos, erodibilidade no sulco, tensão crítica de cisalhamento do solo e condutividade hidráulica considerando quatro comprimentos e duas declividades da encosta. Observa-se neste quadro que os índices de sensibilidade das perdas de solo à erodibilidade entressulcos (K_i) são elevados para encosta com comprimento e declividade menores e pequenos para encostas com comprimento maiores, mostrando que K_i é um fator importante para as condições em que há predominância do processo de erosão entressulcos, comparativamente ao processo de erosão no sulco. Já para a erodibilidade no sulco (K_s) e a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c), observa-se um

Quadro 11 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e água (PA), estimadas utilizando-se o modelo WEPP, aos parâmetros erodibilidade entressulcos (K_i), erodibilidade no sulco (K_r), tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) e condutividade hidráulica (K_o) para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta

L (m)	S (%)	K_i		K_r		τ_c		K_o	
		s (PS)	s (PA)	s (PS)	s (PA)	s (PS)	s (PA)	s (PS)	s (PA)
11	5	0,802	0	0,002	0	-0,258	0	-0,636	-0,356
11	9	0,603	0	0,080	0	-0,590	0	-0,643	-0,347
22,13	5	0,738	0	0,037	0	-0,472	0	-0,638	-0,322
22,13	9	0,343	0	0,287	0	-0,811	0	-0,657	-0,342
50	5	0,479	0	0,183	0	-0,755	0	-0,638	-0,300
50	9	0,130	0	0,630	0	-0,970	0	-0,596	-0,328
100	5	0,253	0	0,441	0	-0,933	0	-0,548	-0,262
100	9	0,054	0	0,802	0	-0,999	0	-0,479	-0,298

comportamento inverso ao apresentado pelo K_i , uma vez que para encostas longas e declivosas tem-se um aumento da tensão de cisalhamento e da capacidade de transporte do escoamento superficial, ocorrendo um predomínio do processo de erosão no sulco, o qual é controlado pelos parâmetros K_r e τ_c . O sinal negativo do índice de sensibilidade da τ_c indica que a variação na perda de solo estimada é inversamente proporcional à mudança no parâmetro de entrada, ou seja, quando aumenta-se o valor de τ_c reduz-se a perda de solo. Com relação às perdas de água, verifica-se que K_i , K_r e τ_c não influenciam na estimativa do modelo.

A sensibilidade do modelo à condutividade hidráulica do solo apresentou pequena variação entre as diferentes condições de comprimento e de declividade da encosta, comparativamente aos parâmetros mencionados anteriormente, tanto para perda de solo como para perda de água. Pode-se observar também que o modelo apresenta maior sensibilidade à condutividade hidráulica nas estimativas das perdas de solo do que das perdas de água.

No Quadro 12 têm-se os índices de sensibilidade das perdas de solo e de água estimadas utilizando-se o modelo WEPP à variação da textura do solo (conteúdo de argila e areia), do conteúdo de matéria orgânica, do albedo da

Quadro 12 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros de textura (argila e areia), matéria orgânica, albedo e nível de saturação

Parâmetro	s (PS)	s (PA)
Argila	0,577	0,881
Areia	0,520	0,051
Matéria orgânica	-0,068	-0,070
Umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação	-0,001	0,002
Albedo da superfície do solo	-0,042	0,056

superfície do solo e da umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação.

O modelo WEPP apresentou índice de sensibilidade relativamente elevado para o conteúdo de argila e areia. Esta sensibilidade à textura do solo se deve ao fato que os conteúdos de argila e areia são utilizados no modelo para estimativa de alguns parâmetros de grande influência no processo de desprendimento e transporte das partículas de solo, tais como: erodibilidade do solo, largura dos sulcos, transportabilidade dos sedimentos, parâmetros de infiltração da água no solo e parâmetros da hidráulica do escoamento superficial. Grande parte desta elevada sensibilidade deve-se à estimativa do fator de atrito e da condutividade hidráulica do solo, uma vez que estes parâmetros são importantes na determinação da tensão de cisalhamento e da capacidade de transporte de sedimentos do escoamento superficial (NEARING et al., 1990). Com relação ao conteúdo de matéria orgânica, albedo da superfície do solo e da umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação, o modelo apresentou pequena sensibilidade tanto para a perda de solo quanto para a perda de água (Quadro 12).

4.3.2. Parâmetros do banco de dados referentes ao uso e manejo do solo

No Quadro 13 estão apresentados os índices de sensibilidade das perdas de solo e de água estimadas utilizando-se o modelo WEPP à variação dos

Quadro 13 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros de cobertura do solo pelas copas das plantas (CC), altura da copa das plantas (AC) e adição de resíduos (AD) para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta

L (m)	S (%)	CC		AC		AD	
		s (OS)	s (PA)	s (PS)	s (PA)	S (PS)	s (PA)
11	5	-0,116	-0,020	0,035	0,010	-0,2899	-0,0133
11	9	-0,159	-0,020	0,026	0,010	-0,3693	-0,0124
22	5	-0,148	-0,020	0,021	0,010	-0,3719	-0,0137
22	9	-0,147	-0,020	0,058	0,011	-0,3203	-0,0127
50	5	-0,122	-0,020	0,016	0,010	-0,3102	-0,0144
50	9	-0,108	-0,021	0,015	0,010	-0,2392	-0,0136
100	5	-0,084	-0,017	0,015	0,009	-0,2359	-0,0143
100	9	-0,078	-0,019	0,017	0,010	-0,1862	-0,0137

Quadro 14 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros de cobertura do sulco (CR), cobertura entressulcos (CI), altura dos sulcos após o preparo do solo (AS) e rugosidade randômica do solo (RR) para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta

L (m)	S (%)	CR		CI		AS		RR	
		s (OS)	s (PA)	s (OS)	s (PA)	s (PS)	s (PA)	s (OS)	S (PA)
11	5	-0,002	0,000	-0,005	-0,001	0,314	0,000	-0,511	-0,051
11	9	-0,006	0,000	-0,007	-0,001	0,074	0,000	-0,307	-0,043
22	5	-0,007	0,000	-0,007	-0,001	0,134	0,000	-0,328	-0,051
22	9	-0,011	0,000	-0,006	-0,001	0,024	0,000	-0,208	-0,044
50	5	-0,016	0,000	-0,010	-0,001	0,033	0,000	-0,197	-0,050
50	9	-0,014	0,000	-0,005	-0,001	0,007	0,000	-0,140	-0,043
100	5	-0,025	0,000	-0,009	-0,001	0,011	0,000	-0,130	-0,046
100	9	-0,015	0,000	-0,004	-0,001	0,002	0,000	-0,100	-0,041

parâmetros de cobertura do solo pelas copas das plantas, altura das copas das plantas e adição de resíduos para quatro comprimentos e duas declividades da encosta. No Quadro 14 estão apresentados os índices de sensibilidade referentes à cobertura do sulco, cobertura entressulcos, altura dos sulcos após o preparo do solo e rugosidade randômica do solo.

O índice de sensibilidade do modelo ao parâmetro de cobertura do sulco, para os diferentes comprimentos e declividades da encosta, apresentou comportamento similar ao observado para a erodibilidade no sulco, com relação ao comprimento da encosta, uma vez que este parâmetro influencia diretamente o processo de desprendimento de partículas de solo no sulco. No entanto, os índices de sensibilidade apresentaram magnitudes menores comparativamente aos índices para K_r e com efeito contrário, ou seja, aumentando o valor do parâmetro tem-se redução das perdas de solo.

Dentre os parâmetros de uso e manejo do solo, o modelo WEPP apresentou maior sensibilidade à rugosidade randômica do solo, à adição de resíduos ao solo e à cobertura do solo pela copa das plantas. Os dois primeiros parâmetros afetam as características do escoamento superficial, principalmente a tensão de cisalhamento associada ao escoamento, principal responsável pelo desprendimento e transporte das partículas de solo na erosão em sulco. A cobertura do solo pelas copas das plantas reduz o impacto das gotas da chuva sobre o solo, reduzindo conseqüentemente o desprendimento de partículas de solo. Com relação à estimativa das perdas de água, o modelo apresentou baixa sensibilidade aos parâmetros estudados referentes ao uso e manejo do solo (Quadro 13 e 14).

4.3.3. Parâmetros do banco de dados referentes às características do perfil topográfico da encosta

No Quadro 15 estão apresentados os valores dos índices de sensibilidade das perdas de solo e água estimadas utilizando-se o modelo WEPP ao comprimento e à declividade de encostas com perfis uniforme e desuniforme. Nota-se, neste quadro, um elevado índice de sensibilidade das estimativas das perdas de solo para ambos parâmetros de entrada, não sendo observadas diferenças expressivas entre as sensibilidades para condições de encosta com perfil uniforme e desuniforme. No entanto, devido à ocorrência do processo de deposição das partículas de solo, o qual é favorecido quando se tem uma redução

Quadro 15 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros comprimento (L) e declividade (S) para encosta com perfil topográfico uniforme e desuniforme

Perfil	L (m)		S (%)	
	s (PS)	s (PA)	s (PS)	s (PA)
Uniforme	0,869	-0,049	1,012	0,082
Desuniforme	0,807	-0,048	1,018	0,082

da capacidade de transporte do escoamento superficial conseqüente da desuniformidade da encosta, torna-se de fundamental importância uma descrição precisa do perfil topográfico da encosta.

O WEPP mostrou-se ligeiramente mais sensível à declividade do que ao comprimento da encosta, sendo esta diferença de sensibilidade superior para a encosta com perfil desuniforme, o que pode ser explicado pelo fato de que, para este tipo de perfil, o acréscimo no comprimento da encosta aumenta a possibilidade de haver deposição de sedimentos ao longo da mesma, reduzindo desta forma, as perdas de solo (CASTRO, 1992; RANIERI, 2000).

4.3.4. Parâmetros do banco de dados referentes às características da chuva

Os valores dos índices de sensibilidade do modelo WEPP à duração da chuva, à lâmina total precipitada, à intensidade máxima de precipitação e ao tempo para ocorrência da intensidade máxima proporcional à duração da chuva estão apresentados no Quadro 16. O modelo apresentou maior sensibilidade à lâmina total precipitada comparativamente às outras características da chuva, tanto para perda de solo quanto para perda de água, sendo o índice de sensibilidade para este parâmetro praticamente independente das características do perfil da encosta (comprimento e declividade).

A duração da precipitação apresenta, em termos de valores médios absolutos, importância ligeiramente superior à intensidade máxima da precipitação nas respostas do modelo, sendo as perdas de solo e de água afetadas

Quadro 16 – Índices de sensibilidade (s) das perdas de solo (PS) e de água (PA) estimadas utilizando-se o modelo WEPP aos parâmetros lâmina precipitada (L_{ppt}), duração (D) e intensidade máxima de precipitação (I_p) e tempo para ocorrência da intensidade máxima proporcional à duração da precipitação (TP), para quatro comprimentos (L) e duas declividades (S) da encosta

L (m)	S (%)	L_{ppt} (mm)		D (h)		I_{pMax}		TP (%)	
		s(PS)	s(PA)	s(PS)	s(PA)	s(PS)	s(PA)	S(PS)	S(PA)
11	5	1,073	1,066	-0,433	-0,211	0,470	0,007	0,003	0,000
11	9	1,062	1,055	-0,391	-0,208	0,499	0,007	0,003	0,000
22	5	1,074	1,066	-0,396	-0,211	0,601	0,007	0,004	0,000
22	9	1,060	1,055	-0,347	-0,209	0,275	0,007	0,002	0,000
50	5	1,071	1,066	-0,341	-0,211	0,321	0,007	0,002	0,000
50	9	1,056	1,055	-0,294	-0,209	0,049	0,007	0,000	0,000
100	5	1,117	1,107	-0,294	-0,211	0,099	0,007	0,001	0,000
100	9	1,086	1,088	-0,257	-0,209	-0,073	0,007	-0,001	0,000

de forma inversa, pela duração da precipitação, isto é, quanto maior a duração da chuva para uma mesma lâmina total precipitada, menores são as perdas de solo e de água. Já a intensidade máxima de precipitação afeta de forma direta as perdas de solo e de água. Os maiores índices de sensibilidade observados em condições de encosta com menores comprimentos e declividades, tanto para a duração como para a intensidade máxima de precipitação, indica que estas duas características apresentam maior importância para condições em que o processo de erosão entressulcos é predominante, uma vez que ambas estão relacionadas à energia cinética da chuva, principal agente erosivo responsável pelo desprendimento das partículas de solo no processo de erosão entressulcos. Com relação ao tempo para ocorrência da intensidade máxima proporcional à duração total, pode-se observar que o modelo apresentou sensibilidade muito pequena a esta característica.

4.3.5. Análise comparativa dos índices de sensibilidade

No Quadro 17 está apresentada uma síntese dos índices de sensibilidade para os diferentes parâmetros de entrada do modelo WEPP. Os índices obtidos mostram que o WEPP apresenta sensibilidade elevada a alguns dos parâmetros estudados, indicando que a determinação e utilização destes parâmetros deve ser criteriosa, de modo a tornar mais precisos os resultados estimados pelo modelo.

Pelos valores apresentados no Quadro 17, pode-se verificar que o WEPP apresentou maior sensibilidade à lâmina total precipitada, mostrando que este parâmetro é de grande importância na estimativa das perdas de solo e de água. Desta forma, especial atenção deve ser dada aos procedimentos para a obtenção desta característica, visando minimizar os erros das estimativas das perdas de solo e de água.

O segundo grupo de parâmetros aos quais o modelo apresentou-se bastante sensível foi o comprimento e a declividade da encosta. Estes parâmetros não apresentam grandes dificuldades para aplicação do WEPP para as condições brasileiras, em função da facilidade de obtenção dos mesmos em nível de campo, valendo ressaltar a importância de realizar um bom detalhamento do perfil topográfico da encosta, tendo em vista a expressiva influência da variabilidade espacial da topografia da encosta sobre o processo de deposição das partículas de solo e, conseqüentemente, sobre as perdas de solo e de água.

Os parâmetros referentes ao banco de dados de uso e manejo do solo, de maneira geral, foram aqueles aos quais o WEPP mostrou-se menos sensível, sendo observado que a cobertura do solo pela copa das plantas, a adição de resíduos e a rugosidade randômica da superfície do solo foram os parâmetros deste banco de dados que apresentaram maiores índices de sensibilidade. Isto indica que, para fins de aplicação do modelo WEPP para o Brasil estes parâmetros, dentre os diversos parâmetros de uso e manejo do solo, merecem maiores cuidados na obtenção dos seus valores, havendo necessidade, desta forma, de realizar uma aferição dos valores propostos para estes parâmetros no banco de dados do WEPP visando estimativas mais precisas.

Quadro 17 – Valores médios dos índices de sensibilidade do modelo WEPP obtidos para os diferentes parâmetros de entrada referentes aos bancos de dados de clima, de solo, topográfico e de manejo e uso do solo

Banco de dados	Parâmetros de entrada	s (PS)	s (PA)
Clima	Lâmina total precipitada	1,075	1,070
	Duração da precipitação	-0,344	-0,210
	Intensidade máxima de precipitação	0,298	0,007
	Tempo para ocorrência da $I_{p_{Max}}$	0,002	0,000
Topográfico	Comprimento de encosta	0,838	-0,049
	Declividade da encosta	1,015	0,082
Manejo e uso do solo	Cobertura do sulco	-0,012	0,000
	Cobertura entressulcos	-0,007	-0,001
	Cobertura do solo pelas copas das plantas	-0,120	-0,020
	Altura da copa das plantas	0,010	0,008
	Altura das leiras após o preparo do solo	0,075	0,000
	Rugosidade randômica da superfície do solo	-0,240	-0,046
	Adição de resíduos	-0,290	-0,014
Solo	Erodibilidade entressulcos	0,425	0,000
	Erodibilidade no sulco	0,308	0,000
	Tensão crítica de cisalhamento	-0,724	0,000
	Condutividade hidráulica	-0,604	-0,319
	Conteúdo de argila	0,577	0,881
	Conteúdo de areia	0,520	0,051
	Conteúdo de matéria orgânica	-0,068	-0,070
	Umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação	-0,001	0,002
Albedo da superfície do solo	-0,042	0,056	

O modelo WEPP mostrou-se pouco sensível ao conteúdo de matéria orgânica, umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação do solo e albedo da superfície do solo, mostrando que estes parâmetros, embora sejam importantes para o processo de erosão, não são parâmetros prioritários para serem ajustados visando obter boas estimativas pelo modelo quando aplicado para condições brasileiras.

Os conteúdos de argila e de areia apresentam índices de sensibilidade elevados, sendo que grande parte desta sensibilidade pode ser explicada pelo fato destes parâmetros serem utilizados na estimativa de outros parâmetros, principalmente condutividade hidráulica e tensão crítica de cisalhamento, aos quais o WEPP mostrou elevada sensibilidade. Apesar da elevada sensibilidade do modelo aos conteúdos de areia e argila, estes parâmetros não apresentam grandes problemas do ponto de vista de aplicação do modelo para o Brasil, uma vez que são dados obtidos com certa facilidade nos levantamentos de solos realizados por todo o Brasil.

Dentre os parâmetros de solo, os que se mostram mais problemáticos são a erodibilidade entressulcos, a erodibilidade no sulco, a tensão crítica de cisalhamento e a condutividade hidráulica, uma vez que o modelo WEPP apresentou sensibilidade relativamente elevada a estes parâmetros e os mesmos são determinados no modelo a partir de equações as quais não tem apresentado estimativas eficazes para as condições dos solos brasileiros. Ressalta-se, também, que estes parâmetros não estão facilmente disponíveis para as condições edáficas do Brasil, mostrando, desta forma, a necessidade da concentração de esforços visando uma determinação mais precisa dos mesmos, de maneira a melhorar as estimativas das perdas de solo e de água obtidas com o WEPP.

Fazendo uma comparação dos resultados da análise de sensibilidade para os parâmetros comuns utilizados neste trabalho e no estudo de sensibilidade realizado por NEARING et al. (1990) para condições edafoclimáticas dos Estados Unidos, observou-se que os índices de sensibilidade foram semelhantes para os parâmetros lâmina total precipitada, duração da precipitação e cobertura do solo pelas copas das plantas, sendo que em ambos estudos a lâmina total precipitada foi o parâmetro ao qual o modelo WEPP apresentou-se mais sensível. Em ambos trabalhos, os parâmetros tempo para ocorrência da intensidade máxima, altura da copa das plantas e umidade inicial do solo proporcional à umidade de saturação mostraram-se insignificantes, sendo que no presente trabalho estes parâmetros apresentaram valores menores que no trabalho de NEARING et al. (1990). Já para os parâmetros cobertura do sulco, cobertura

entressulcos e adição de resíduos observou-se que os índices de sensibilidade foram inferiores ao obtidos por NEARING et al. (1990), isto se deve, provavelmente, a uma maior taxa de decomposição do material orgânico sobre o solo para as condições brasileiras.

Com relação aos parâmetros referentes às características do solo pôde-se observar que os parâmetros conteúdo de areia e de argila, erodibilidade entressulcos (K_i), tensão crítica de cisalhamento (τ_c) e condutividade hidráulica (K_o) apresentaram, no presente trabalho, índices de sensibilidade superior àqueles obtidos por NEARING et al. (1990), sendo que esta superioridade foi da ordem de 1,69; 1,72 e 1,40 vezes respectivamente, enquanto a erodibilidade no sulco (K_r) apresentou índice de sensibilidade cerca de 1,62 vezes inferior ao obtido por NEARING et al. (1990). Pôde-se observar, para os parâmetros K_i , K_r , K_o e τ_c , que além da diferença da sensibilidade do modelo encontrada nos dois estudos, houve também mudanças na ordem de importância dos parâmetros sobre a estimativa do modelo, sendo que no presente trabalho a ordem de importância obtido foi $\tau_c > K_o > K_i > K_r$, enquanto que a obtida por de NEARING et al. (1990) foi $K_r > K_o > \tau_c > K_i$.

Na avaliação do efeito da variação dos parâmetros de entrada sobre a variação das perdas de solo e de água foram utilizados os seguintes parâmetros que apresentaram maiores índices de sensibilidade: erodibilidade entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r), condutividade hidráulica do solo (K_o), tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c), cobertura do solo pela copa das plantas (CC), rugosidade randômica (RR), adição de resíduos (AR), comprimento (L) e declividade (S) da encosta.

A faixa de valores apresentada no Quadro 6 foi dividida em 10 sub-faixas equidistantes e adotou-se como valores de base a média dos valores extremos da faixa de cada parâmetro (Apêndice H). As simulações foram realizadas para a cultura do milho para as condições climáticas e as características do solo de Viçosa (Apêndice E).

Nas Figuras 11a, 11b e 11c estão representados os efeitos da variação percentual dos parâmetros de entrada referentes às características do solo (K_i , K_r ,

K_o e ρ), da topografia do perfil da encosta (L e S) e de uso e manejo do solo (CC, RR e AR), respectivamente, sobre a variação percentual das estimativas das perdas de solo e de água pelo modelo WEPP. A variação percentual do parâmetro de entrada foi determinada em relação ao valor médio (valor de base) do mesmo e a variação da resposta do modelo à variação do parâmetro foi determinada em relação à estimativa obtida utilizando-se o valor médio dos parâmetros de entrada.

Na Figura 11a pode-se observar que os parâmetros K_i , K_r e τ_c não influenciaram nas estimativas das perdas de água, conforme já havia sido constatado por meio do índice de sensibilidade relativo. Já para as perdas de solo verifica-se que, para os valores de base utilizados nas simulações, o K_i apresentou pequena influência sobre as estimativas quando comparada às apresentadas pelos parâmetros K_r e τ_c , indicando que há uma predominância do processo de erosão no sulco para as condições simuladas. Para os parâmetros K_r e K_o observa-se uma tendência de comportamento não linear da variação das estimativas. No caso de K_o , observa-se que a declividade da curva de variação das estimativas das perdas de solo e de água é bastante reduzida para valores de variação de K_o superiores a aproximadamente -20 % (25 mm h^{-1}), indicando que, para as condições estudadas, o modelo WEPP apresenta-se muito sensível à valores de K_o inferiores a 25 mm h^{-1} . No entanto, para valores de K_o superiores a 25 mm h^{-1} esta sensibilidade é bastante reduzida. No que diz respeito ao parâmetro K_r , embora se tenha observado tendência de comportamento não linear da variação das estimativas, o modelo mostrou-se bastante sensível para toda a faixa de valores utilizada neste estudo.

Na Figura 11b pode-se observar que, para toda a faixa de valores estudada, a variação dos parâmetros L e S ocasiona pouco efeito sobre as estimativas das perdas de água. Já para as perdas de solo, observa-se que o modelo mostrou-se bastante sensível para toda a faixa de valores de L utilizada, apresentando uma tendência não linear da curva de variação das estimativas das perdas de solo. Com relação à variação de S, observa-se uma tendência de

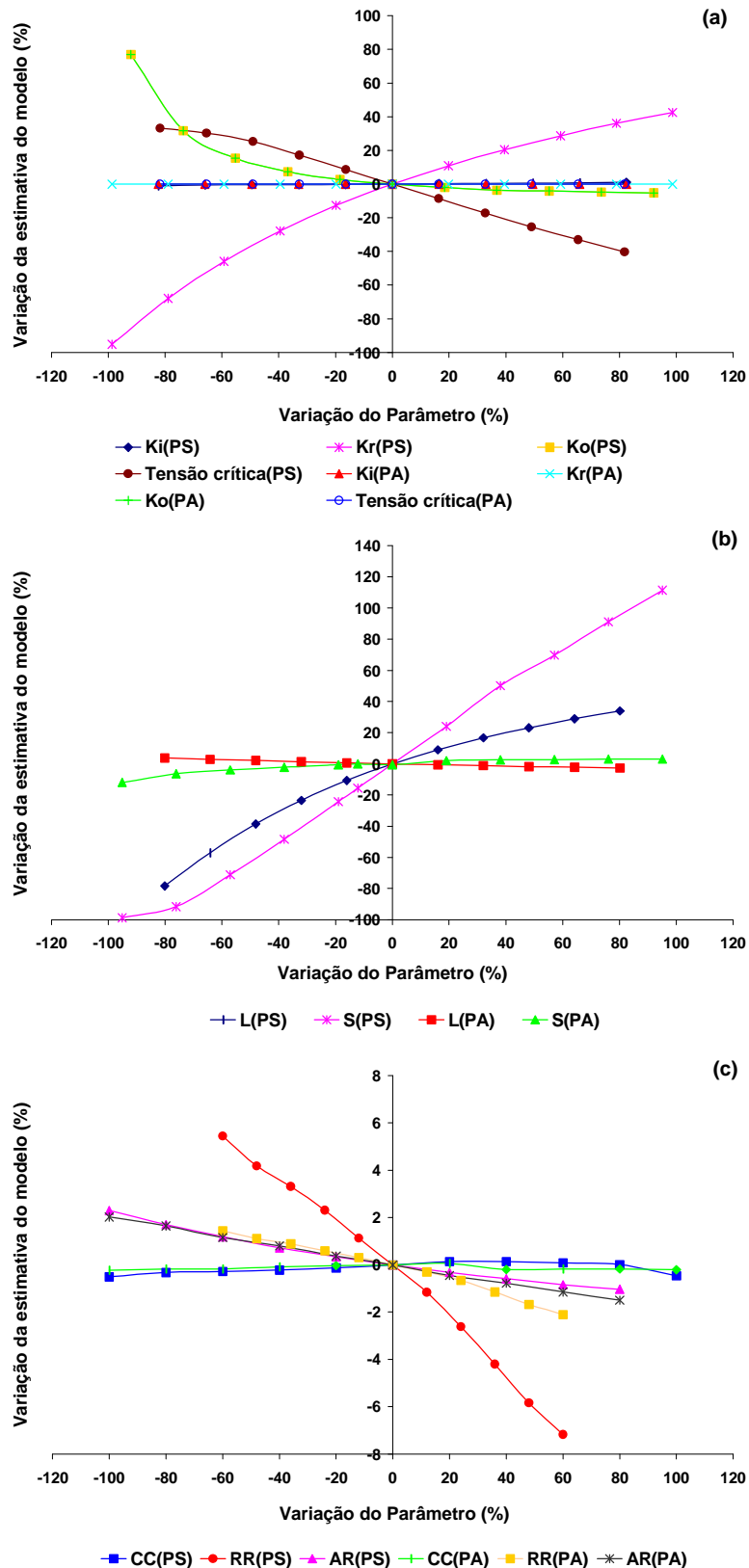


Figura 11 – Variação percentual nas estimativas das perdas de solo (PS) e de água (PA) pelo modelo WEPP em função da variação percentual dos parâmetros de entrada referentes às características do solo (a), às características topográficas do perfil da encosta (b) e às características de uso e manejo do solo (c).

linearidade da curva para valores de variação de S superiores a aproximadamente – 75% (declividade de 2,5%).

Pode-se observar na Figura 11c que as curvas de variação das estimativas das perdas de solo e de água apresentam-se bem próximo da linearidade para a faixa de valores adotada para os parâmetros cobertura do solo pela copa das plantas, rugosidade randômica do solo e adição de resíduos.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivos determinar as perdas de solo e de água, sob condições de chuva natural, em Viçosa-MG; avaliar o comportamento de três modelos de predição das perdas de solo (USLE, RUSLE e WEPP) quando aplicados a nove localidades do Brasil; e realizar uma análise de sensibilidade do modelo WEPP de forma a caracterizar os parâmetros críticos, quando aplicados às condições brasileiras.

O trabalho foi realizado, basicamente, em duas etapas: a primeira referente à montagem de parcelas experimentais em Viçosa – MG, visando o monitoramento das perdas de solo e de água, e a segunda referente à aquisição de dados de perdas de solo para outras localidades do Brasil, à aplicação dos modelos de predição da erosão hídrica para nove localidades do Brasil e à comparação das perdas de solo estimadas com as obtidas experimentalmente.

Para o cumprimento da primeira etapa foram implantadas quatro parcelas experimentais para o monitoramento das perdas de solo e de água, sob condições de chuva natural, na Área Experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. As parcelas apresentavam tratamentos diferenciados, correspondentes às situações distintas de preparo e cobertura do solo: solo com preparo convencional no sentido do declive e mantido descoberto (SDMA); solo com preparo convencional no sentido

transversal ao declive e mantido descoberto (SDEN); solo com preparo convencional e plantio de milho no sentido do declive (MCMA); e solo com preparo convencional e plantio de milho no sentido transversal ao declive (MCEN).

Para o cumprimento da segunda etapa dados de perdas de solo estimados pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP foram comparados aos dados de perdas de solo obtidos experimentalmente. Foram utilizados neste estudo dados obtidos nas parcelas experimentais implantadas na Área Experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV; bem como dados de perdas de solo já publicados, correspondentes aos estudos realizados em oito locais distribuídos em diferentes regiões do Brasil.

A avaliação dos modelos foi realizada comparando-se os valores das perdas de solo estimados com a utilização dos modelos e com aqueles observados experimentalmente, por meio do coeficiente de correlação, da raiz do quadrado médio do erro (RMSE) e da eficiência dos modelos. A análise de sensibilidade do WEPP foi realizada para 22 parâmetros de entrada do modelo, sendo utilizado para tal finalidade o índice de sensibilidade relativa proposto por McCUEN e SNYDER (1986).

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- a presença da cobertura vegetal com a cultura do milho reduziu expressivamente as perdas de solo, sendo esta redução mais eficiente quando associada ao preparo do solo em nível;

- a presença da cobertura vegetal, com a cultura do milho, e a realização do preparo do solo em nível foram mais eficientes na redução das perdas de solo comparativamente às perdas de água;

- o modelo WEPP apresentou melhor comportamento quanto aos desvios obtidos entre os dados experimentais e os dados estimados, apresentando estimativas mais precisas em 45% das condições simuladas, seguido pelo modelo RUSLE com 42% e modelo USLE com 12%;

- a lâmina total precipitada foi o parâmetro ao qual o modelo WEPP apresentou maior sensibilidade, dentre todos os parâmetros de entrada avaliados;

- 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, a condutividade hidráulica, as erodibilidades no sulco e entressulcos; e

- a rugosidade randômica da superfície do solo, a adição de resíduos e a cobertura do solo pela copa das plantas foram os parâmetros aos quais o modelo WEPP apresentou maior sensibilidade dentre aqueles referentes ao banco de dados referentes ao uso e manejo do solo.

6. RECOMENDAÇÕES

Embora os resultados tenham mostrado que o modelo WEPP apresentou melhor desempenho comparativamente aos modelos RUSLE e USLE, do ponto de vista de aplicação prática, nenhum dos três modelos pode ser utilizado, sendo necessária uma calibração minuciosa dos parâmetros de entrada para obtenção de melhores estimativas das perdas de solo. No entanto, devido ao fato do modelo WEPP ser baseado nos processos físicos que regem a erosão hídrica do solo, o quê reduz em muito o tempo para calibração dos parâmetros, aliado ao fato do seu melhor desempenho para as condições brasileiras estudadas neste trabalho, o mesmo é o que apresenta maior perspectiva de fornecer estimativas mais precisas do ponto de vista prático, desta forma, dentre os três modelos estudados, o WEPP é o que merece maiores investimentos, em termos de pesquisa, para que o mesmo se torne apto de aplicação do ponto de vista prático.

Dentre os diferentes parâmetros de entrada do modelo WEPP, os que merecem maiores investigações, após a análise dos resultados obtidos neste trabalho, são:

- as erodibilidades entressulcosos (K_i) e no sulco (K_r), condutividade hidráulica (K_o) e tensão crítica de cisalhamento (τ_c), tendo em vista que os equacionamentos utilizados para estimativas desses parâmetros não se mostraram adequados para condições de solos brasileiros;

- os parâmetros referentes ao manejo e uso do solo, tais como, cobertura do sulco, cobertura entressulcos e cobertura do solo pelas copas das plantas, os quais tem importância fundamental no processo de erosão, e para as condições estudadas o modelo não se mostrou sensível a tais parâmetros; e

- os parâmetros referentes ao componente hidrológico do modelo, tendo em vista que o modelo não apresentou boa estimativa dos volumes de escoamento superficial (resultados não apresentados).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI, M. (ed.). **Soil erosion, conservation and rehabilitation**. New York: Marcel Dekker, 1996, 402 p.
- AMADO, T. J. C., COGO, N. P., ÇLEVIEN, R. Eficácia relativa do manejo do resíduo cultural de soja na redução das perdas de solo por erosão hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, n. 13, p. 251 – 257, 1989.
- BAHIA, V.G.; CURI, N.; CARMO, D.N. Fundamentos de erosão do solo (tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle). *Informe Agropecuário*, v. 176, n. 16, p. 25-31, 1992.
- BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F. **Answers: user's manual**. Chicago: United States Environmental Protection Agency, 1981. 51p.
- BENNETT, H. H. **Elements of soil conservation**. 2. ed. Tokyo: Kogakusha, 1955. 358p.
- BERTOLINI, D., LOMBARDI NETO, F., DRUGOWICH, M.I., **Programa Estadual de Bacias Hidrográficas. Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo**. Campinas:CATI (impresso especial), 1993, 17p.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres. 1990.392p.
- 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**, Campinas-SP, n.20, p. 127-134, 1996.
- CARVALHO, F. L. C., COGO, N. P., LEVIEN, R. Eficácia relativa de doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo na redução da erosão hídrica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas-SP, n. 13, p. 251 - 257, 1990.

- CARVALHO, M. P., CATANEO, A., LOMBARDI NETO, F. Fator erosividade da chuva e enxurrada para chuvas individuais de Pindorama (SP). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 10., Florianópolis, 1994. **Resumos**. Florianópolis, SBCS, 1994, p. 150 - 151.
- CARVALHO, M. P., CATANEO, A., LOMBARDI NETO, F. Índices de erosividade da chuva e enxurrada correlacionados com as perdas de solo e determinação da erodibilidade de um latossolo roxo distrófico de Campinas (SP). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas-SP, n.17, p. 445-450, 1993.
- CASTRO, A. G. de. **Técnicas de sensoriamento remoto e Sistemas Geográficos de Informações no estudo integrado de bacias hidrográficas**. São José dos Campos, 1992. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- CASTRO, O.M., LOMBARDI NETO, F., VIEIRA, S.R., DECHEN, S.C.F. Sistemas Convencionais e reduzidos de preparo do solo e as perdas por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, n. 10, p. 167 – 171, 1986.
- CHAVES, H.M.L. **Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do Rio São Francisco**. Relatório final de consultoria, FAO TCP/BRA/2257, Brasília, 34p. 1994a.
- 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. In: PEREIRA, V.P., FERREIRA, M.E., CRUZ, M.C.P. (eds). **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: FCAV/UNESP/SBCS, 1994b, p.207-212.
- CHAVES, I. B., NASCIMENTO, C. W. A. Características da chuva e relação com perdas de solo em Alagoinha – PB. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 10., Florianópolis, 1994. **Resumos**. Florianópolis, SBCS, 1994, p. 166 - 167.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ V., V. H. (eds.), Viçosa (MG), 1999, 359 p.
- COOK, H.L. The nature and controlling variables of the water erosion process. **Soil Science Society Proceedings**. Madison, p.487-494, 1936.
- DEBARBA, L. **Sistemas de produção de milho adaptados à conservação do solo**. Santa Maria, 1993, 150 p., Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria.

- DEDECEK, R. A. Fatores de erosividade da chuva, enxurrada e perdas de solo sob condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 12, p. 1431 – 1438, 1988.
- DEDECEK, R.A., RESCK, D.V.S., FREITAS JR, E. Perdas de solo e nutrientes por erosão em latossolo vermelho-escuro dos cerrados em diferentes cultivos sob chuva e natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 10, p. 265 – 272, 1986.
- DELFELIPO, B. V., RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa, MG: UFV, Imp. Univ., 1981. 17p. (Boletim de Extensão, 29).
- DeMARIA, I.C., CHAVES, M.O., DECHEN, S.C.F. Comparação dos resultados do modelo WEPP com os obtidos em condições de chuva natural, durante sete anos, em um latossolo vermelho distroférico típico em Campinas, SP. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia-GO, 2001.
- DERPSCH, Rolf et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo - Convênio IAPAR e GTZ**, Londrina, PR. 1990. 272 p.
- ELLIOT, W. J., LIEBENOW, A. M., LAFLIN, J. M., KOHL, K. D. 1989. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988**. NSERL Report N° 3. Ohio State University and USDA Agricultural Research Service. Available from USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, In., 316 p.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies – Part I. **Agriculture Engineering**, St. Joseph, p.145-146, 1947.
- ELLISON, W.D., ELLISON, O.T. Soil erosion studies – Part VII. **Agriculture Engineering**, St. Joseph, p.442-450, 1947.
- ELTZ, F. L. F., et. alii. Erosion losses under different management systems and crop covering in a reddish brown dystrophic lateritic (São Jerônimo). I – First year results. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, n. 1, p. 123 – 127, 1977.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLO. – EMBRAPA – CNPS. **Manual de método de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.
- EVANGELISTA, A. W. P. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. Viçosa, MG, UFV, 2003. 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- FERNANDES, E.N. **Sistema inteligente de apoio ao processo de avaliação de impactos ambientais de atividade agropecuárias.** Viçosa, MG: UFV, 1997. 122p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- FLANAGAN, D. C., ASCOGH II, J. C., NICKS, A. D., NEARING, M. A., LAFLIN, J. M. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Lafayette: : USDA-ARS-

- MWA-SWCS, 1995. Cap. 1, p. 1.1 – 1.12. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).
- FLANAGAN, D. C., NEARING, M. A. (eds.). USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Paginação irregular. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).
- FOSTER, G. R. Modelling the erosion process. In: HAAN, C. T., JOHNSON, H. P., BRAKENSIEK, D. L. (eds.). **Hydrologic modelling of small watersheds**. Michigan: ASAE, 1982. p. 296-380. (ASAE Monograph, 5).
- GHIDEY, F., ALBERTS, E. E., KRAMER, L. A. Comparison of measured and WEPP predicted runoff and soil loss for Midwest Claypan Soil. **Transactions of the ASAE**. N. 39, v. 4, p 1395 – 1402, 1996.
- GIASSON, E., CASSOL, E. A. Relações da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um plintossolo franco-argiloarenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, n.20, p. 117-125, 1996.
- GILLEY, J. E., WETLZ, M. A. Hydraulics of Overland Flow. In: FLANAGAN, D. C., NEARING, M. A. (eds.). USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 10, p 10.1 – 10.7. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).
- 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.
- HAIRSINE, P. B., ROSE, C. W. Modelling Water erosion due to overland flow using physical principles: 12. Rill flow. **Water Resources Research**, n.28, v. 1, p. 245– 250, 1992.
- HAIRSINE, P. B., ROSE, C. W. Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes. **Soil Science Society of America Journal**, n. 55, v. 2, p. 320 – 324, 1991.
- HAMLETT, J. M., MILLER, D. A., DAY, R. L., PETERSON, G. W., BAUMER, G. M., RUSSO, J. Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution prevention. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 47, n. 5, p. 399 – 404, 1992.
- HERNANI, L. C., SALTON, J. C., FABRÍCIO, A. C., DEDECEK, R. ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados – MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, n.21, p. 667-676, 1997.
- HIGGITT, D.L. Soil erosion and soil problems. **Progress in Physical Geography**, v.1, n.15, p.91-100, 1991.
- HIRSCHI, M. C., BARFIELD, B. J. KYERMO – A physically based research erosion model. Part I: Model development. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.3, p.804-813, 1988.

- HUDSON, N. W. The factors determining the extent of soil erosion. In: Gremland, R. (ed.). **Soil Conservation and Management in the Humid Tropics**. John Wiley and Sons, 1975.
- HUDSON, N.W. **Soil Conservation**. 2.ed. New York: Cornell Univ. Press, 1981. 324p.
- HUDSON, N.W. **The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to northern Rhodesia**. Cape Town: University of Cape Town, 1965. M.Sc. Thesis.
- JAKEMAN, A. J., GREEN, T. R., BEAVIS, S. G., ZHANG, L., DIETRICH, C. R., CRAPPER, P. F. Modelling upland and in-stream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment. **Hydrological processes**, n. 13, v. 5, p. 745 – 752, 1999.
- KRAMER, L. A., ALBERTS, E. E. 1995. Validation of WEPP 95.1 daily erosion simulation. **ASAE Paper N° 95-2384**. ASAE, St. Joseph, MI.
- LAFLEN, J. M., FLANAGAN, D. C. A powerful tool. **Agricultural Engineering**, v. 73m n. 4, p. 18 – 19, 1992.
- 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**, v.46, n.1, p.34-38, 1991.
- LAL, R. Soil erosion on alfisols in western Nigeria. III. Effects of rainfall characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, v.16, p.389-401, 1976.
- 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**, v. 30, n. 6, p. 893 – 912, 1992.
- LAWS, J.O. Recent studies in raindrops and erosion. **Agriculture Engineering**, St. Joseph, v.21, p.431-433, 1940.
- LOCH, R. J., SILBURN, D. M. 1996. Constraints to sustainability – soil erosion. In: CLARKE, I., WYLIE, P. B. (eds.) **Sustainable crop production in the subtropics: an Australian Perspective**. QDPI.
- LOCH, R., ROSEWELL, C. 1992. Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K factors) for the universal soil loss equation. **Australian Journal of Soil Research**, n. 30, p. 233 – 248, 1992.
- McCUEN, R. H., SNYDER, W. M. **Hydrologic modelling: Statistical methods and applications**. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall. 1986
- MELLEROWICZ, K. T., REES, H. W., CHOW, T. L.,GHANEM, I. Soil conservation planning at watershed level using the Universal Soil Loss Equation with GIS and microcomputer technologies: A case study. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 49, n. 2, p. 194 – 199, 1994.
- MERRITT, W. S., LETCHER, R. A., JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Enviromental Modelling & Softwate**, (in review), 2003.

- MERTEN, G.H.; et al. El uso del modelo USLE para determinar mapas de erosión potencial y actual en las Microcuencas pilotos de Agua Grande y Córrego do Pensamento, Mamborê, Paraná, Brasil. Santiago, **IAPAR/EMBRAPA/FAO**, 1995. 43p. (Documento de Campo 6).
- MORAIS, L. F. B., MUTTI, L. S. M., ELTZ, F. L. Relações entre características físicas da chuva e perdas de solo no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, n.12, p. 285-288, 1988.
- MUSGRAVE, C.W. The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.2, p.133-138, 1947.
- NAYAKATAWA, E. Z., DEFFY, K. C. e LEMUNYION, J. L. Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production systems using the revised universal soil loss equation (RUSLE). **Soil & Tillage Research**, n. 57, p. 213-224, 2001.
- NEARING MARK, A. Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surf. Process. Landforms*, n.25, p.1035-1043, 2000.
- NEARING, M. A. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. **Catena**, n. 32, v. 3, p. 15 – 22, 1998.
- NEARING, M. A., LANE, I. J., LOPES, V. I. Modelling soil erosion. In Lal, R. (ed.), **Soil erosion: Research Methods**. P. 127 – 156, 1994
- NEARING, M.A., DEER-ASCOUGH, L., LAFLEN, J.M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. **American Society of Agricultural Engineers**, v.3, n.33, p.839-849, 1990.
- NICKS, A. D., LANE, L. J. e GANDER, G. A. Weather generator. In: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Lafayette, 1995. Paginação irregular. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).
- OLDEMAN, L. R. Global extent of soil degradation. 1992. **Bi-annual report, International Soil Reference and Information Center**, Wageningen, The Netherlands, p. 19 – 36.
- PARANÁ. Secretaria de estado da agricultura e do abastecimento. Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo. Curitiba, 1989. 306 p.
- PEDROSO, R. F., ELTZ, F. L. F., RONCATO, M. L., GRAMINHO, D. H., DOS SANTOS, M. V. C. Perdas de água e solo no período 1996 a 2002 em Argissolo Vermelho Distrófico Arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, (in review)
- PEREIRA, S. B. **Desprendimento e arraste de solo em decorrência do escoamento superficial**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 81p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa.

- PERIN, C., MICHEL, C., ANDREASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. **Journal of Hydrological**, n. 242, p. 275 – 301, 2001.
- PIMENTEL, D., ALLEN, J., BEERS, A., GUIRAND, L., LINDER, R., McLAUGHLIN, P., MEER, B., MUSSONDS, D., PERDUE, D., POISSON, S., SIEBERT, S., STONER, K., SALAZAR, R., HAWKINS, A. World agriculture and soil erosion: Erosion threatens world food production. *BioScience*, n. 37, v. 4, 1987, p. 277-283.
- RANIEREI, S. B. L. **Avaliação de métodos e escalas de trabalho para determinação de risco de erosão em bacia hidrográfica utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. São Carlos, 1996. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RANIERI, S. B. L. **Estimativa da erosão do solo em uma bacia hidrográfica no município de Piracicaba (SP) utilizando os modelos USLE e WEPP**. Piracicaba, 2000, 95 p. Dissertação (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- RENARD, K. G. e FERREIRA, V. A. RUSLE model description and database sensitivity. **Journal Environment quality**, v. 22, p. 458-466, 1993.
- 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)**. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 1997, 404 pp.
- RISSE, L.M., NEARING, M.A, NICKS, A. D., LAFLÉN, J.M. Assessment of error in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, n.57, p.825-833, 1993.
- RÖMKENS, M.J.M., ROTH, C.B., NELSON, D.W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.5, p.954-960, Sept./Oct. 1977.
- 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 n. 10).
- SEGANFREDO, M. L., ELTZ, F. L. F., BRUM, A. C. R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, n. 21, p. 287 - 291, 1997.
- SHÄFER, 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-MG, n. 25, p. 419 -430, 2001.
- SILVA, I. F., ANDRADE, A. P., CAMPOS FILHO, O. R., OLIVEIRA, F. A. P. Efeito de diferentes cobertura vegetais e de práticas conservacionistas no

- controle da erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, n.10, p. 289- 292, 1986.
- SILVA, M.L.N., FREITAS, P.L., BLANCANEUX , P., CURI, N. Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia, GO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.10, p., 1997.
- SOUZA, C. M., BOARETTI, W. A., WRUCK, F. J. **Índice de erosividade das chuvas para Viçosa/MG**. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Fitotecnia. 1996.
- STONE, J. L., LANE, L. J., SHIRLEY, E. D., HERNANDEZ, M. Hillslope surface hydrology. In: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: : USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap.4, p.4.1 –4.20. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).
- TAPIA-VARGAS, M., TISCAREÑO-LÓPEZ, M., STONE, J.J., OROPEZA-MOTA, J.L., VELAÂZQUEZ-VALLE, M. Tillage system effects on runoff and sediment yield in hillslope agriculture. **Field Crops Research**. 2001. v.69, p.173-182.
- THOMANN, R. V. Verification of water quality models. **Journal of Environmental Engineering Division**, m. 108, v. 5, p. 923 – 940, 1982.
- 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**, n. 36, v. 6, p. 1659 – 1672, 1993.
- TIWARI, A. K., RISSE, L. M. e NEARING, M. A. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, n. 43, v. 5, p. 1129-1135, 2000.
- TORSEN, M., REFSGAARD, J. C., HANSEN, S., PEBESMA, E., JENSEN, J. B., KLEESCHULTE, S. Assessment of uncertainty in simulation of nitrate leaching to aquifers at catchment scale. **Journal of Hydrology**, n. 242, p. 210 – 227, 2001.
- United Nations Environmental Program. Status of desertification and implementation of the UN plan of action to combat desertification. UNEP, Nairobi, Kenya, 1991.
- UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURAL – USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette, 1995. Paginação irregular. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).
- WAGNER, C.S., MASSAMBANI, O. Análise da relação intensidade de chuva: energia de Wischmeier e Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.197-203, 1988.
- WALKER, S.E., MITCHELL, M.C., HIRSCHI, M.C., JOHNSEN, K.E. Sensitivity analysis of the root zone water quality model. **Transactions of the ASAE**. v.43, n.4, p.841-846, 2000.

- WILLIAMS, J.R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: USDA-ARS (ed.). **Present and prospective technology for prediction sediment yields and sources**, Washington, Handbook S-40, 1975. p.244-252.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. **Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation**. Agricultural Research Service - USDA, 1965. (Handbook n. 537)
- WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B., CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.26, n.5, p.189-193, Sept./Oct. 1971.
- WISCHMEIER, W.H., MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.33, n.1, p.131-137, Jan./Feb. 1969.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Washington, DC., USDA, 1978, 58p. (Handbook, 537).
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v.39, n.2, p.285-291, 1958.
- ZHANG, X.C., NEARING, M.A., RISSE, L.M., MCGREGOR, K.C. Evaluation of runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.3, n.39, p.855-863, 1996.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A – Valores da classe de estrutura (s) e de permeabilidade (p) do solo para as diferentes localidades estudadas

Localidade	Classe textural do solo	s¹	p²
Alagoinha – PB	Franco-Argilo-Arenosa	2	4
Campinas – SP	Muito Argilosa	3	6
Dourados – MS	Muito Argilosa	1	6
Goiânia – GO	Argilosa	3	6
Guaíba – RS	Argilosa	3	6
Pindorama – SP	Arenosa	2	2
Planaltina – DF	Argilosa	3	6
Santa Maria – RS	Média	3	3
Viçosa – MG	Média	3	3

1 – obtidos com base nas informações de estrutura do solo contidas nos trabalhos de levantamento de solo para cada localidade; 2 – obtidos com base na classificação da permeabilidade do solo em função da classe textural do solo segundo National Soils Handbook N^o 430 (USDA, 1983)

APÊNDICE B

Quadro 1B – Valores dos fatores de práticas conservacionistas (P) e de uso e manejo do solo (C) utilizados para as estimativas das perdas de solo pela USLE nas diversas condições adotadas nas parcelas experimentais das diferentes localidades estudadas

Localidade	Uso e manejo do solo	P	C
Alagoinha - PB	AMA	1	0,6846
	AEN	0,5	0,6846
	MEN	0,5	0,34
	CEN	0,5	0,15
	SD	1	1
Campinas – SP	MC-PC	1	0,34
	MC-PR1	1	0,34
	MC-PR2	1	0,34
	MC-PR3	1	0,34
Dourados – MS	ST-ES	1	0,54
	ST-GP	1	0,54
	ST-PD	1	0,54
	ST-SD	1	1
Goiânia-GO	SD	1	1
Guaíba	TCSM	1	0,25
	SD	1	1
	TCSC	1	0,54
Pindorama – SP	MC-PC	0,5	0,34
	MC-GP	0,5	0,34
	MC-PR1	0,5	0,34
	MC-PR2	0,5	0,34
	MCPR3	0,5	0,34
Planaltina-DF	SD	1	1
	MC	1	0,09
	SC	1	0,54
	SSP	1	0,54
	SPD	1	0,25
Santa Maria – RS	SD	1	1
	PIMV	0,5	0,252
Viçosa – MG	SDMA	0,5	1
	SDEN	1	1
	MCMA	1	0,34
	MCEN	0,5	0,34

APÊNDICE C

Quadro 1C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Alagoinha - PB

Alagoinha – PB			
Elevação (ft): 154		Fator R ¹ : 188	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
* 1: 1,74	* 1: 75,52	0,00	0,51
* 2: 2,81	* 2: 74,51	1,53	2,82
* 3: 5,08	* 3: 73,97	4,96	7,93
* 4: 5,82	* 4: 73,73	14,51	21,07
* 5: 6,63	* 5: 73,12	26,20	33,11
* 6: 8,26	* 6: 71,09	40,73	52,33
* 7: 9,03	* 7: 69,58	61,90	72,64
* 8: 4,52	* 8: 69,98	86,57	89,41
* 9: 2,27	* 9: 71,57	94,27	95,96
* 10: 1,44	* 10: 73,87	96,70	97,12
* 11: 1,49	* 11: 75,39	97,79	98,45
* 12: 1,36	* 12: 75,70	98,95	99,20

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 2C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Campinas - SP

Campinas – SP			
Elevação (ft): 2.175		Fator R ¹ : 402	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
*1: 9,44	*1: 70,16	0,00	12,88
*2: 7,61	*2: 70,15	22,62	32,33
*3: 7,04	*3: 69,99	38,41	44,95
*4: 3,27	*4: 67,89	52,10	54,16
*5: 3,56	*5: 61,64	55,82	57,44
*6: 1,92	*6: 58,05	60,19	61,08
*7: 1,11	*7: 57,79	61,71	61,82
*8: 1,32	*8: 59,94	62,36	62,49
*9: 2,92	*9: 61,06	63,27	64,46
*10: 4,2	*10: 63,28	66,37	69,00
*11: 5,22	*11: 64,23	72,07	75,28
*12: 8,70	*12: 64,47	80,39	90,04

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 3C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Dourados - MS

Dourados – MS			
Elevação (ft): 1.482		Fator R ¹ : 376	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
*1: 4,24	*1: 77,84	0,00	4,83
*2: 4,15	*2: 77,74	8,46	11,90
*3: 4,59	*3: 76,98	16,63	21,70
*4: 3,26	*4: 73,43	26,27	28,89
*5: 2,94	*5: 68,14	31,67	32,81
*6: 3,08	*6: 67,31	36,49	40,66
*7: 1,20	*7: 65,58	41,78	42,17
*8: 1,70	*8: 68,27	42,77	43,44
*9: 3,75	*9: 71,68	44,57	49,17
*10: 5,84	*10: 72,94	51,56	58,91
*11: 5,82	*11: 74,77	66,05	73,06
*12: 6,93	*12: 77,20	80,50	91,78

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 4C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Goiânia – GO

Goiânia – GO			
Elevação (ft): 2.461		Fator R ¹ : 491	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
*1: 8,63	*1: 75,08	0,00	8,56
*2: 7,15	*2: 75,35	17,36	25,27
*3: 7,46	*3: 75,23	30,14	38,01
*4: 4,38	*4: 74,27	43,78	48,72
*5: 1,09	*5: 70,76	49,83	50,13
*6: 0,43	*6: 67,50	50,35	50,44
*7: 0,26	*7: 67,41	50,47	50,47
*8: 0,78	*8: 70,47	50,52	50,54
*9: 2,04	*9: 74,59	50,91	51,19
*10: 5,88	*10: 76,01	52,57	55,98
*11: 8,46	*11: 75,39	61,73	68,14
*12: 9,71	*12: 74,92	78,76	89,05

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 5C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Guaíba - RS

Guaíba – RS			
Elevação (ft): 328		Fator R ¹ : 383	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
*1: 3,27	*1: 77,67	0,00	2,11
*2: 3,63	*2: 77,53	5,79	10,54
*3: 3,06	*3: 74,75	12,80	14,90
*4: 4,32	*4: 68,85	17,93	23,10
*5: 2,95	*5: 63,90	27,12	28,82
*6: 4,79	*6: 60,01	32,00	37,55
*7: 5,44	*7: 60,14	42,89	49,21
*8: 3,84	*8: 60,51	56,46	62,42
*9: 4,39	*9: 64,55	64,38	69,01
*10: 4,81	*10: 67,62	73,78	79,68
*11: 3,82	*11: 71,52	84,76	89,23
*12: 3,92	*12: 75,33	92,25	96,12

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 6C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Pindorama - SP

Pindorama – SP			
Elevação (ft): 1.844		Fator R ¹ : 419	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
*1: 10,89	*1: 76,36	0,00	17,16
*2: 8,67	*2: 76,29	26,07	39,57
*3: 6,69	*3: 75,69	44,29	51,01
*4: 3,69	*4: 73,26	55,51	58,13
*5: 2,86	*5: 68,62	59,63	60,77
*6: 1,22	*6: 67,94	62,28	62,76
*7: 0,77	*7: 65,30	62,93	62,99
*8: 1,14	*8: 70,10	63,24	63,38
*9: 2,70	*9: 71,87	63,82	64,82
*10: 4,26	*10: 76,83	66,21	68,15
*11: 6,28	*11: 75,57	71,47	76,01
*12: 8,97	*12: 75,37	81,50	88,89

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 7C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Planaltina - DF

Planaltina – DF			
Elevação (ft): 3.609		Fator R ¹ : 489	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁵
*1: 14,73	*1: 71,08	0,00	15,04
*2: 10,15	*2: 69,85	27,26	36,20
*3: 9,66	*3: 71,29	41,84	48,62
*4: 4,23	*4: 70,76	55,11	57,57
*5: 0,98	*5: 67,91	58,51	58,61
*6: 0,41	*6: 66,60	58,79	58,83
*7: 0,30	*7: 66,25	58,85	58,87
*8: 0,57	*8: 69,87	58,89	58,89
*9: 2,19	*9: 72,22	59,05	59,23
*10: 6,33	*10: 72,34	60,25	62,57
*11: 7,79	*11: 71,00	66,84	72,08
*12: 13,62	*12: 71,34	76,09	86,20

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 8C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Santa Maria - RS

Santa Maria – RS			
Elevação (ft): 314		Fator R ¹ : 566	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁴
*1: 5,35	*1: 76,14	0,00	1,67
*2: 6,31	*2: 74,32	7,33	11,36
*3: 4,68	*3: 72,49	16,42	18,97
*4: 6,41	*4: 66,90	21,87	26,67
*5: 5,83	*5: 62,53	31,17	35,24
*6: 6,23	*6: 58,25	39,08	43,89
*7: 6,55	*7: 58,76	47,96	53,12
*8: 5,39	*8: 69,14	57,62	61,96
*9: 6,95	*9: 62,98	64,63	68,05
*10: 6,73	*10: 67,03	75,65	79,76
*11: 6,3	*11: 70,74	85,82	92,02
*12: 4,4	*12: 72,21	95,07	97,25

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

Quadro 9C – Parâmetros utilizados para montagem do banco de dados CITY DATABASE do modelo RUSLE para a cidade de Viçosa – MG

Viçosa – MG			
Elevação (ft): 2264		Fator R ¹ : 276	
Ppt ² (in)	Temp ³ (°F)	%EI ⁴	%EI ⁴
*1: 10,39	*1: 73,96	0,00	15,11
*2: 6,14	*2: 74,61	25,69	32,32
*3: 5,60	*3: 73,61	36,27	42,6
*4: 2,36	*4: 70,39	45,48	46,84
*5: 1,48	*5: 66,51	47,58	47,99
*6: 0,61	*6: 63,51	48,51	48,61
*7: 0,53	*7: 62,86	48,72	48,75
*8: 0,78	*8: 64,90	48,90	48,94
*9: 2,17	*9: 67,35	49,26	49,73
*10: 3,70	*10: 70,36	51,14	53,51
*11: 8,55	*11: 71,98	55,56	65,04
*12: 10,50	*12: 73,03	73,88	84,69

1 – Fator de erosividade da chuva, [ft tonf in (ac h ano)⁻¹]; 2 – precipitação média mensal; 3 – temperatura média mensal; 4 e 5 - fração acumulada da erosividade da chuva no 1^o e 15^o dia de cada mês, respectivamente; e * seqüência dos meses do ano.

APÊNDICE D

Quadro 1D – Banco de dados CROP DATABASE do modelo RUSLE referente à cultura do milho utilizada nas parcelas experimentais instaladas na cidade de Viçosa – MG

Cultura: MILHO (VIÇOSA)							
Adição de resíduos (lb/A): 0							
Espaçamento entre fileiras (in): 31.5							
População de plantas (plt./A): 625							
Constante de decomposição de resíduos na superfície: 0.01600							
Constante de decomposição de resíduos na sub-superfície: 0.01600							
Quantidade de resíduos para obter 30% de cobertura do solo (lb/A): 0							
Quantidade de resíduos para obter 90% de cobertura do solo (lb/A): 0							
Quantidade de resíduos para obter 90% de cobertura do solo (lb/A): 0							
DAP ¹	MR ²	CC ³	HF ⁴	DAP ¹	MR ²	CC ³	HF ⁴
0	0	0	0.0	180	0	0	0
15	50	5	0.1	195	0	0	0
30	180	10	0.5	210	0	0	0
45	350	50	1.0	225	0	0	0
60	530	80	1.7	240	0	0	0
75	840	100	2.5	255	0	0	0
90	1060	100	3.0	270	0	0	0
105	1060	100	3.0	285	0	0	0
120	1060	100	3.0	300	0	0	0
135	1060	100	3.0	315	0	0	0
150	1060	90	3.0	330	0	0	0
165	1060	70	3.0	345	0	0	0

1 – Dias após o plantio; 2 – massa de raiz na camada superficial do solo (4 in), lb/A; 3 – cobertura do solo pela copa das plantas, %; 4 – altura de queda da precipitação interceptada pela copa das plantas, ft.

APÊNDICE E

Quadro 1E – Características físicas e químicas do perfil do solo, para cada local estudado, necessárias para aplicação do modelo WEPP

Profundidade	Areia	Argila	M.O.	Rocha	CTC
mm	dag kg ⁻¹			Cmol _c kg ⁻¹	
Alagoinha – PB					
120	53,0	30,0	2,170	2,0	9,7
400	44,0	39,0	1,690	1,0	9,3
1300	25,0	63,0	0,520	2,0	6,2
2000	30,0	41,0	0,220	2,0	4,5
Campinas – SP					
260	30,0	62,0	2,241	0,0	8,9
560	25,0	71,0	1,724	0,0	6,4
830	21,0	70,0	1,207	0,0	4,9
2000	24,0	66,0	0,862	0,0	4,4
2500	20,0	72,0	0,517	0,0	2,9
Dourados – MS					
100	13,0	70,0	6,480	0,0	22,4
210	11,0	78,0	2,900	0,0	12,1
430	11,0	78,0	1,960	0,0	9,9
870	11,0	79,0	1,140	0,0	7,7
1260	10,0	79,0	0,860	0,0	6,4
2520	10,0	77,0	0,600	2,0	5,9
Goiânia – GO					
200	12,0	72,0	3,000	0,0	8,0
350	9,0	78,0	3,000	0,0	7,0
650	10,0	77,0	2,000	0,0	5,0
1000	11,0	77,0	1,000	0,0	4,0
2300	7,0	81,0	1,000	0,0	2,0
2900	5,0	81,0	0,000	0,0	0,0
Guafba – RS					
200	47,0	31,0	2,000	12,0	8,5
420	29,0	48,0	1,603	9,0	9,9
700	34,0	47,0	1,172	7,0	9,0
1300	38,0	43,0	0,776	8,0	8,0
1900	44,0	37,0	0,569	7,0	6,7
2200	34,0	46,0	0,465	9,0	7,2

Continua

Quadro 1E – cont...

Profundidade	Areia	Argila	M.O.	Rocha	CTC
mm	dag kg ⁻¹			Cmol _c kg ⁻¹	
Pindorama – SP					
240	89,0	9,0	1,552	0,0	4,1
430	91,0	7,0	0,690	0,0	1,8
850	91,0	6,0	0,517	0,0	1,7
1000	75,0	22,0	0,862	0,0	6,2
1400	66,0	32,0	0,862	0,0	6,7
1640	71,0	27,0	0,690	0,0	5,9
2000	74,0	20,0	0,345	0,0	8,7
2500	79,0	14,0	0,172	0,0	9,1
Planaltina – DF					
10	15,0	68,0	7,896	1,0	17,0
200	15,0	71,0	4,276	1,0	11,5
380	14,0	74,0	3,207	1,0	8,2
180	12,0	75,0	1,517	1,0	4,3
240	11,0	77,0	0,741	1,0	2,7
300	10,0	79,0	0,621	3,0	2,7
Santa Maria – RS					
250	73,0	15,0	1,190	0,0	5,4
650	78,0	12,0	1,190	0,0	5,7
1000	60,0	29,0	1,030	0,0	9,2
1300	54,0	35,0	1,170	0,0	9,6
1600	56,0	32,0	0,900	0,0	8,2
2100	53,0	35,0	0,690	0,0	7,3
Viçosa – MG					
130	58,0	26,0	2,640	0,0	4,1
260	60,0	10,0	2,240	0,0	3,2
480	60,0	24,0	2,120	0,0	2,7
750	46,0	32,0	1,770	0,0	2,7
1000	58,0	22,0	1,660	0,0	2,3
1250	82,0	10,0	1,550	0,0	2,0

APÊNDICE F

Quadro 1F – Dados de lâmina total precipitada (L_{Ppt}), lâmina total acumulada, intensidades de precipitação média ($Ip_{méd}$) e máxima ($Ip_{máx}$), duração da chuva (D) e tempo para ocorrência da $Ip_{máx}$ para cada chuva ocorrida durante o período de 12/11/2002 a 22/03/2003

Evento	Data	DAP	L_{Ppt}	$L_{Pptacum}$	$Ip_{méd}$	$Ip_{máx}$	$TP_{Ip_{máx}}$	D
			mm		mm h ⁻¹		—%—	—h—
1	12/11/02	1	23,85	23,85	8,73	40,89	35,37	2,7
2	12/11/02	1	6,47	30,33	1,59	10,22	0,00	7,1
3	15/11/02	4	7,90	38,23	7,33	30,67	6,90	1,0
4	16/11/02	5	31,35	69,58	4,58	61,34	3,92	6,8
5	17/11/02	6	4,43	74,01	0,70	10,22	0,00	6,2
6	19/11/02	8	32,37	106,38	4,01	92,01	3,31	8,1
7	22/11/02	11	71,22	177,60	10,81	92,01	15,20	56,6
8	22/11/02	11	24,20	201,80	3,97	81,79	0,60	6,1
9	24/11/02	13	37,15	238,95	9,06	122,68	26,00	4,1
10	27/11/02	16	3,41	242,36	0,67	10,22	0,00	5,0
11	06/12/02	25	12,95	255,31	35,32	61,34	50,00	0,4
12	07/12/02	26	16,70	272,01	2,29	61,34	68,80	5,3
13	09/12/02	28	4,09	276,10	1,01	10,22	0,00	4,1
14	11/12/02	30	8,52	284,62	2,35	20,45	84,40	3,6
15	11/12/02	30	6,47	291,09	1,59	10,22	0,00	7,1
16	11/12/02	30	50,78	341,87	10,46	153,35	42,30	5,0
17	12/12/02	31	71,56	413,43	2,75	61,34	37,70	25,7
18	16/12/02	35	3,75	417,18	0,52	5,11	0,00	1,8
19	16/12/02	35	25,22	442,40	5,57	92,01	76,20	5,7
20	17/12/02	36	10,56	452,97	4,73	81,79	50,00	0,2
21	17/12/02	36	16,36	469,33	2,99	30,67	1,80	5,4
22	21/12/02	40	42,00	511,33	-	-	-	-
23	25/12/02	44	0,68	512,01	2,04	10,22	0,00	0,3
24	25/12/02	44	4,77	516,78	3,87	10,22	0,00	1,2
25	30/12/02	49	1,02	517,80	0,19	10,22	0,00	3,6
26	02/01/03	52	4,43	522,23	10,22	20,45	69,23	0,4
27	03/01/03	53	63,04	585,27	6,48	102,23	6,20	9,2
28	04/01/03	54	69,52	654,79	16,82	173,78	4,00	4,1
29	05/01/03	55	15,33	670,12	8,07	92,01	7,00	1,9
30	06/01/03	56	59,98	730,10	4,85	61,34	32,60	12,7
31	07/01/03	57	20,46	750,56	4,20	20,45	18,49	4,9
32	08/01/03	58	5,79	756,36	1,42	10,22	0,00	4,1
33	12/01/03	62	14,65	771,01	4,53	40,89	56,60	3,5
34	13/01/03	63	31,01	802,02	4,42	92,01	29,80	7,2
35	14/01/03	64	4,09	806,11	1,24	10,22	26,37	3,0

Continua...

Quadro 1F – Cont...

Evento	Data	DAP	mm		mm h ⁻¹		TP _{Ip_{máx}}	D
			L _{Ppt}	L _{Pptacum}	Ip _{méd}	Ip _{máx}		
36	14/01/03	64	7,16	813,27	1,92	40,89	1,80	3,7
37	17/01/03	67	8,52	821,78	7,35	30,67	47,92	0,0
38	17/01/03	67	7,84	829,62	7,03	30,67	41,90	1,0
39	18/01/03	68	1,02	830,65	4,38	10,22	14,29	0,0
40	18/01/03	68	59,97	890,62	4,07	92,01	30,30	14,7
41	20/01/03	70	26,24	916,86	3,66	51,12	1,00	7,2
42	21/01/03	71	7,50	924,35	4,59	30,67	10,20	1,6
43	22/01/03	72	2,39	926,74	0,66	20,45	98,17	3,6
44	22/01/03	72	8,18	934,92	4,63	40,89	49,10	1,8
45	25/01/03	75	3,41	938,33	10,22	30,67	20,00	0,3
46	29/01/03	79	6,48	944,81	14,94	51,12	76,90	0,4
47	29/01/03	79	13,97	958,78	4,42	81,79	52,00	2,5
48	01/02/03	82	15,68	974,46	12,63	81,79	26,30	1,3
49	17/02/03	98	7,84	982,30	7,35	30,67	47,92	1,1
50	17/02/03	98	9,54	991,84	2,17	10,22	0,79	4,2
51	13/03/03	122	7,16	998,99	1,23	10,22	0,57	5,8
52	16/03/03	125	33,40	1032,39	3,70	40,89	5,20	9,0
53	18/03/03	127	36,80	1069,19	3,18	30,67	32,92	10,8
54	22/03/03	131	3,41	1072,60	1,10	10,22	1,08	3,1
55	22/03/03	131	25,56	1098,16	2,22	20,45	33,90	11,5

Quadro 2F – Dados de perdas de solo (PS) e de água (PA) referentes a cada evento de chuva ocorrido durante o período de 12/11/2002 a 23/03/2003 obtidos nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG.

Evento	Data	DAP	PA (mm)				PS (t ha ⁻¹)				C _{esc}			
			SDEN ¹	SDMA ²	MCMA ³	MCEN ⁴	SDEN ¹	SDMA ²	MCMA ³	MCEN ⁴	SDEN ¹	SDMA ²	MCMA ³	MCEN ⁴
1	22/11/02	11	2,27	2,72	1,26	0,38	0,16	0,21	0,11	0,01	0,032	0,038	0,018	0,005
2	22/11/02	11	1,04	1,87	1,41	0,00	0,06	0,08	0,03	0,00	0,043	0,077	0,058	0,000
3	24/11/02	13	5,62	10,10	3,42	2,55	0,25	0,60	0,50	0,20	0,151	0,272	0,092	0,069
4	06/12/02	25	0,05	0,25	0,13	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,004	0,020	0,010	0,002
5	07/12/02	26	0,06	0,07	0,05	0,05	0,11	0,13	0,09	0,05	0,004	0,004	0,003	0,003
6	11/12/02	30	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,003	0,000	0,000
7	11/12/02	30	3,38	4,11	3,63	1,07	0,34	0,47	0,14	0,04	0,067	0,081	0,072	0,021
8	12/12/02	31	1,94	2,25	0,43	0,35	0,06	0,08	0,02	0,00	0,027	0,031	0,006	0,005
9	16/12/02	35	2,08	2,74	1,97	1,25	0,43	0,90	0,26	0,03	0,083	0,108	0,078	0,049
10	17/12/02	36	1,16	1,74	0,66	0,47	0,14	0,26	0,12	0,02	0,071	0,106	0,040	0,029
11	21/12/02	40	3,51	3,76	1,48	0,93	0,56	1,08	0,24	0,06	0,084	0,090	0,035	0,022
12	03/01/03	53	5,74	6,17	1,11	0,59	1,20	1,73	0,28	0,08	0,091	0,098	0,018	0,009
13	04/01/03	54	9,92	11,49	7,26	2,41	10,81	22,76	0,77	0,03	0,143	0,165	0,104	0,035
14	05/01/03	55	0,17	0,31	0,10	0,04	0,02	0,06	0,00	0,00	0,011	0,020	0,007	0,002
15	06/01/03	56	5,87	6,07	0,99	0,88	0,64	0,95	0,00	0,00	0,098	0,101	0,017	0,015
16	07/01/03	57	1,80	2,14	0,24	0,05	0,21	1,06	0,00	0,00	0,088	0,104	0,012	0,002
17	12/01/03	62	1,03	0,80	0,36	0,03	0,06	0,14	0,02	0,00	0,070	0,055	0,025	0,002
18	13/01/03	63	5,85	11,54	4,47	0,85	13,67	13,97	0,00	0,00	0,189	0,372	0,144	0,027
19	14/01/03	64	0,10	0,18	0,02	0,01	0,04	0,04	0,00	0,00	0,014	0,025	0,003	0,001

1 solo com preparo convencional no sentido transversal ao declive e mantido descoberto (SDEN), 2 solo com preparo convencional no sentido do declive e mantido descoberto (SDMA), 3 solo com preparo convencional e 4 plantio de milho no sentido do declive (MCMA) Continua...

Quadro 2F – Cont...

Evento	Data	DAP	PA (mm)				PS (t ha ⁻¹)				C _{esc}			
			SDEN ¹	SDMA ²	MCMA ³	MCEN ⁴	SDEN ¹	SDMA ²	MCMA ³	MCEN ⁴	SDEN ¹	SDMA ²	MCMA ³	MCEN ⁴
20	17/01/03	67	0,16	0,46	0,07	0,01	0,02	0,08	0,00	0,00	0,020	0,058	0,008	0,001
21	18/01/03	68	13,60	16,56	3,18	1,02	3,46	6,43	0,10	0,02	0,227	0,276	0,053	0,017
22	20/01/03	70	6,66	10,72	1,27	0,23	1,91	3,55	0,01	0,00	0,254	0,409	0,049	0,009
23	22/01/03	72	0,47	1,14	0,00	0,01	0,12	0,14	0,00	0,00	0,058	0,139	0,001	0,001
24	29/01/03	79	0,42	0,67	0,00	0,00	0,18	0,19	0,00	0,00	0,065	0,103	0,000	0,000
25	29/01/03	79	1,63	2,38	0,04	0,02	0,90	1,26	0,00	0,00	0,117	0,170	0,003	0,001
26	01/02/03	82	1,72	1,93	0,03	0,04	0,80	1,18	0,00	0,00	0,110	0,123	0,002	0,003
27	16/03/03	97	1,08	1,23	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,032	0,037	0,002	0,001
28	18/03/03	99	3,65	3,74	0,09	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,099	0,102	0,002	0,003
29	22/03/03	131	0,05	0,19	0,19	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002	0,008	0,007	0,003

1 solo com preparo convencional no sentido transversal ao declive e mantido descoberto (SDEN), 2 solo com preparo convencional no sentido do declive e mantido descoberto (SDMA), 3 solo com preparo convencional e 4 plantio de milho no sentido do declive (MCMA)

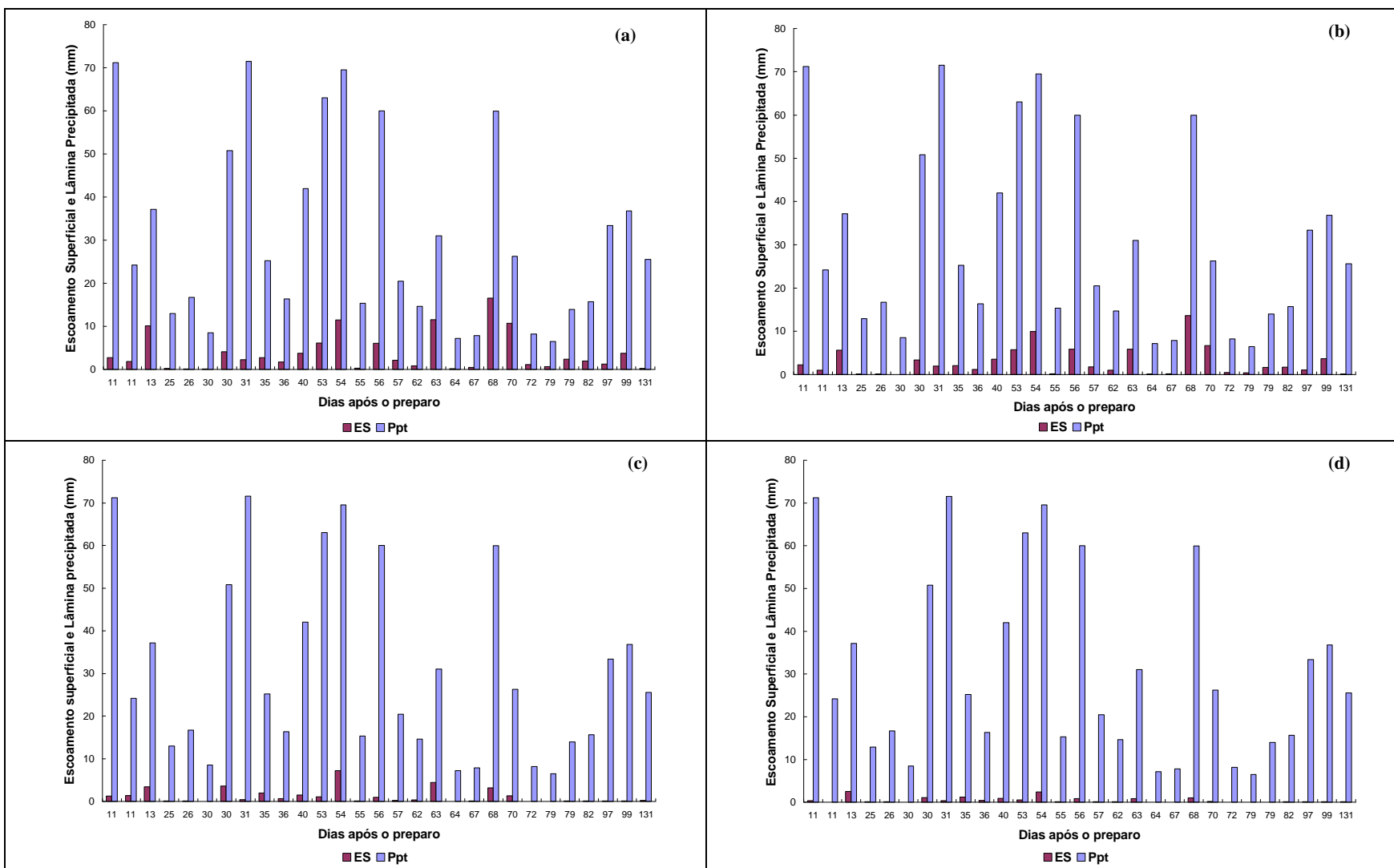


Figura 1F – Lâmina de escoamento superficial (ES) e de precipitação (Ppt) para os eventos de chuva ocorridos durante o período de novembro/2002 a dezembro/2003 nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG: SDMA (a), SDEN (b), MCMA (c) e MCEN (d).

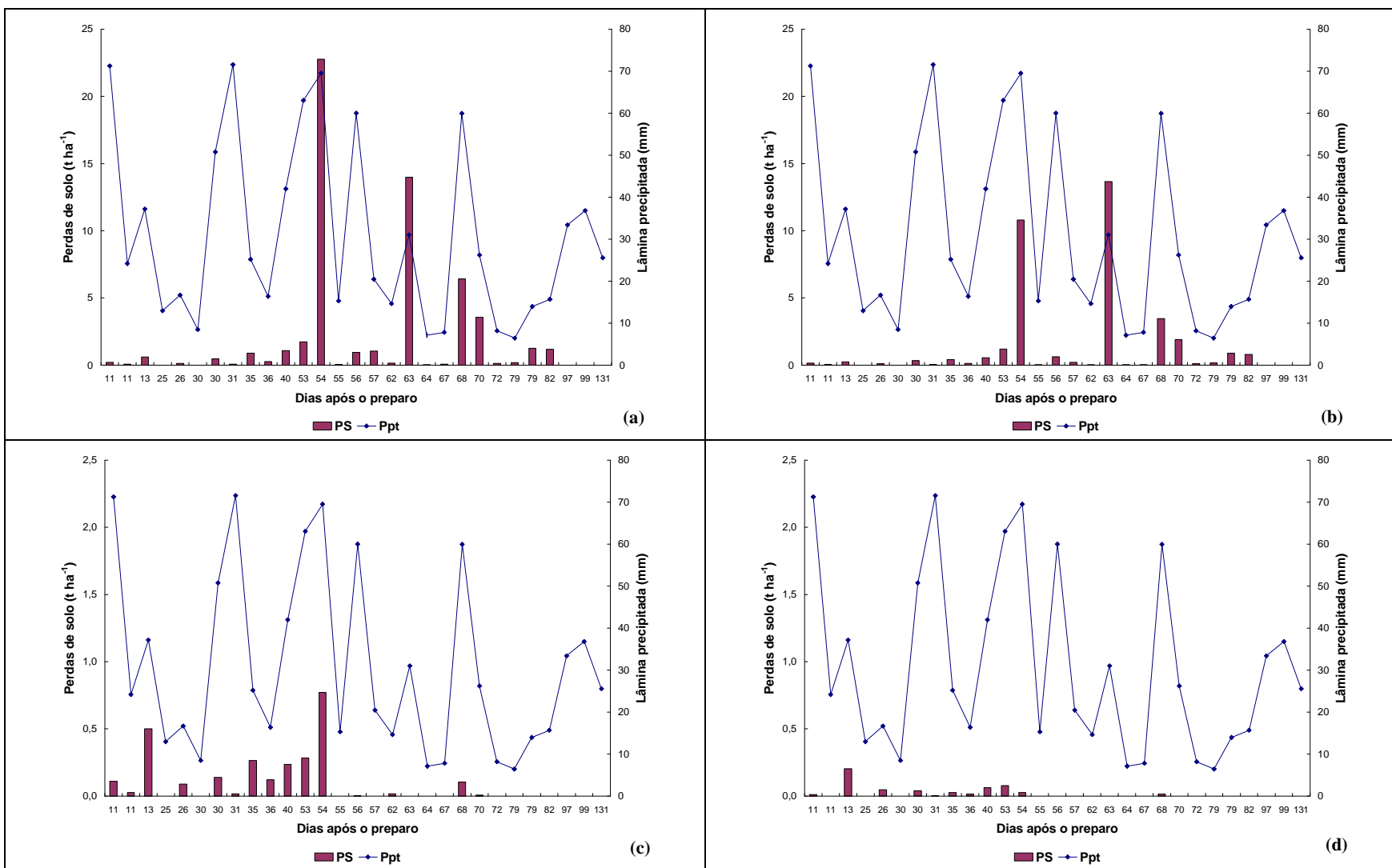


Figura 2F – Perdas de solo (PS) e lâmina de precipitação (Ppt) para os eventos de chuva ocorridos durante o período de novembro/2002 a dezembro/2003 nas parcelas experimentais instaladas em Viçosa – MG: SDMA (a), SDEN (b), MCMA (c) e MCEN (d).

APÊNDICE G

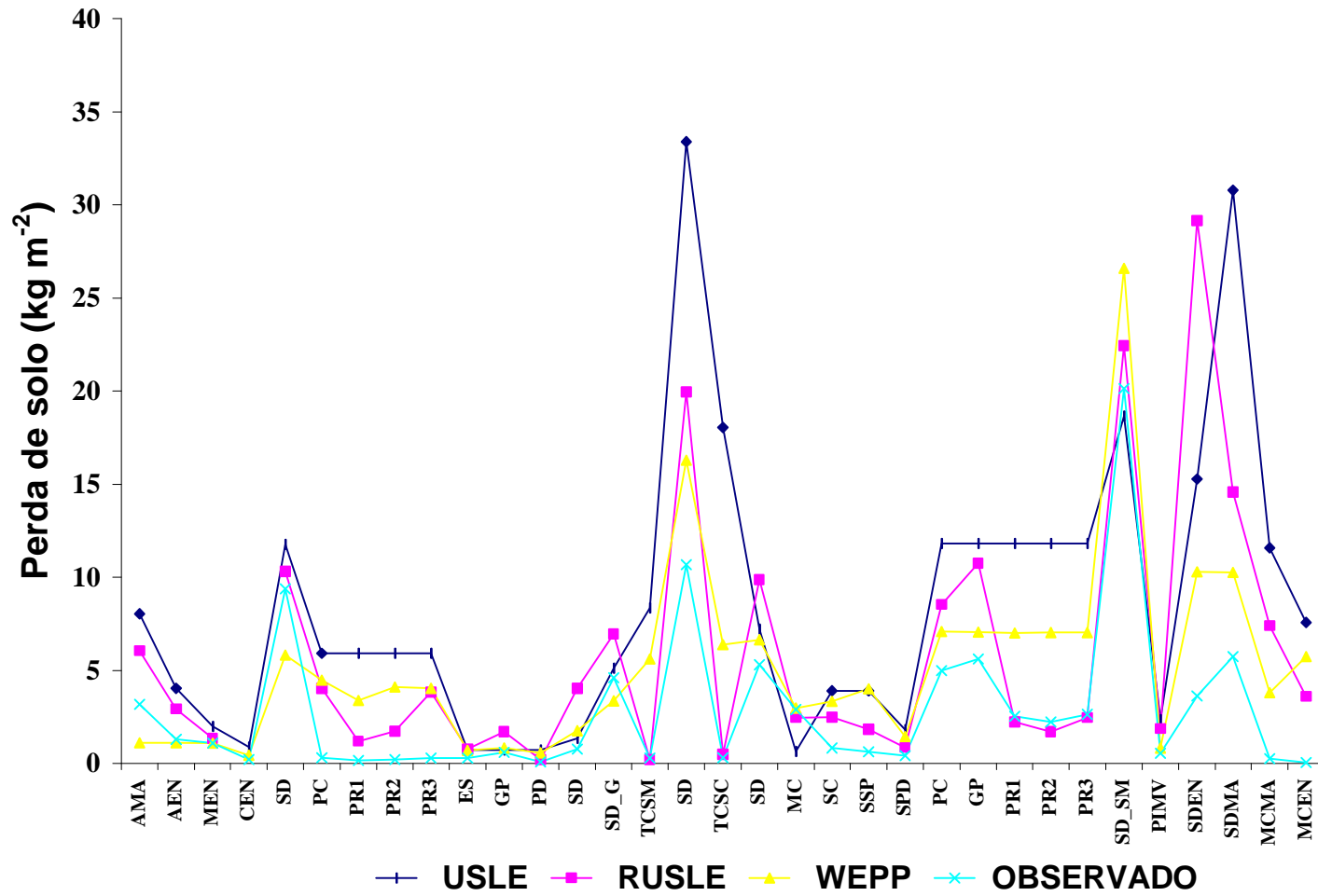


Figura 1G – Dados de perdas de solo estimadas pelos modelos USLE, RUSLE e WEPP e observados experimentalmente para as condições de uso e manejo do solo adotadas nas diferentes localidades.

APÊNDICE H

Quadro 1H – Valores discretizados dos parâmetros utilizados na avaliação do efeito da variação dos parâmetros de entrada sobre as estimativas das perdas de solo (PS) e de água (PA) pelo modelo WEPP

Parâmetros	Valor de base	Valor do parâmetros	Variação do Parâmetro (%)	Variação (%)	
				PS	PA
Erodibilidade entressulcos (kg s m ⁻⁴)	2850000	500000	-82,5	-0,97	0,00
		970000	-66,0	-0,61	0,00
		1440000	-49,5	-0,48	0,00
		1910000	-33,0	-0,33	0,00
		2380000	-16,5	-0,18	0,00
		2850000	0,0	0,00	0,00
		3320000	16,5	0,20	0,00
		3790000	33,0	0,40	0,00
		4260000	49,5	0,60	0,00
		4730000	66,0	0,81	0,00
		5200000	82,5	1,01	0,00
Erodibilidade no sulco (s m ⁻¹)	0,0151	0,00020	-98,7	-95,15	0,00
		0,00318	-78,9	-67,89	0,00
		0,00616	-59,2	-45,89	0,00
		0,00914	-39,5	-27,82	0,00
		0,01212	-19,7	-12,75	0,00
		0,01510	0,0	0,00	0,00
		0,01808	19,7	10,93	0,00
		0,02106	39,5	20,39	0,00
		0,02404	59,2	28,69	0,00
		0,02702	78,9	36,03	0,00
		0,03000	98,7	42,57	0,00
Condutividade hidráulica (mm h ⁻¹)	31,25	2,50	-92	76,99	75,86
		8,25	-74	31,71	28,30
		14,00	-55	15,40	12,84
		19,75	-37	7,35	5,86
		25,50	-18	2,72	2,42
		31,25	0	0,00	0,00
		37,00	18	-1,98	-1,24
		42,75	37	-3,61	-2,31
		48,50	55	-4,06	-2,62
		54,25	74	-4,84	-2,89
		60,00	92	-5,31	-3,09

Continua...

Quadro 1H – Cont...

Parâmetros	Valor de base	Valor do parâmetros	Variação do Parâmetro (%)	Variação (%)	
				PS	PA
Tensão cisalhante crítica do solo (Pa)	5,5	1	-81,8	33,09	0,00
		1,9	-65,5	30,24	0,00
		2,8	-49,1	25,31	0,00
		3,7	-32,7	17,22	0,00
		4,6	-16,4	8,69	0,00
		5,5	0,0	0,00	0,00
		6,4	16,4	-8,67	0,00
		7,3	32,7	-17,18	0,00
		8,2	49,1	-25,35	0,00
		9,1	65,5	-33,08	0,00
		10	81,8	-40,35	0,00
Cobertura do solo pela copa das plantas (%)	50	0	-100,0	-0,51	-0,23
		10	-80,0	-0,33	-0,18
		20	-60,0	-0,28	-0,17
		30	-40,0	-0,22	-0,09
		40	-20,0	-0,13	-0,04
		50	0,0	0,00	0,00
		60	20,0	0,13	0,05
		70	40,0	0,13	-0,20
		80	60,0	0,09	-0,18
		90	80,0	0,01	-0,18
		100	100,0	-0,47	-0,21
Rugosidade randômica após o preparo do solo (cm)	3,25	1,3	-60,0	5,44	1,43
		1,69	-48,0	4,18	1,11
		2,08	-36,0	3,31	0,89
		2,47	-24,0	2,30	0,59
		2,86	-12,0	1,13	0,30
		3,25	0,0	0,00	0,00
		3,64	12,0	-1,16	-0,30
		4,03	24,0	-2,61	-0,65
		4,42	36,0	-4,20	-1,15
		4,81	48,0	-5,84	-1,68
		5,2	60,0	-7,18	-2,10

Continua...

Quadro 1H – Cont...

Parâmetros	Valor de base	Valor do parâmetros	Variação do Parâmetro (%)	Variação (%)	
				PS	PA
Adição de resíduo (t ha-1)	5	0	-100,0	2,30	2,02
		1	-80,0	1,70	1,64
		2	-60,0	1,19	1,15
		3	-40,0	0,72	0,80
		4	-20,0	0,33	0,37
		5	0,0	0,00	0,00
		6	20,0	-0,32	-0,46
		7	40,0	-0,59	-0,78
		8	60,0	-0,85	-1,15
		9	80,0	-1,04	-1,50
Comprimento de rampa (m)	55,5	11	-80,2	-78,36	3,70
		19,9	-64,1	-57,07	2,88
		28,8	-48,1	-38,68	2,14
		37,7	-32,1	-23,48	1,34
		46,6	-16,0	-10,69	0,69
		55,5	0,0	0,00	0,00
		64,4	16,0	9,08	-0,56
		73,3	32,1	16,75	-1,12
		82,2	48,1	23,19	-1,73
		91,1	64,1	28,94	-2,16
Declividade da rampa (%)	10,25	100	80,2	34,00	-2,74
		0,5	-95,1	-98,79	-11,84
		2,45	-76,1	-91,68	-6,39
		4,4	-57,1	-71,23	-3,81
		6,35	-38,0	-48,33	-2,18
		8,3	-19,0	-24,23	-0,56
		10,25	0,0	0,00	-0,59
		12,2	19,0	24,08	2,12
		14,15	38,0	50,19	2,56
		16,1	57,1	69,76	2,79
18,05	76,1	91,21	3,06		
20	95,1	111,44	3,09		