

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**MODELAGEM DO PROCESSO DE EROÇÃO HÍDRICA
ENTRESSULCOS**

CLÁUDIA GONÇALVES VIANNA BACCHI

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2011**

MODELAGEM DO PROCESSO DE EROÇÃO HÍDRICA ENTRESSULCOS

CLÁUDIA GONÇALVES VIANNA BACCHI

Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. OMAR DANIEL

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutora.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2011

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central - UFGD

Bacchi, Cláudia Gonçalves Vianna
Modelagem do Processo de Erosão Hídrica
Entressulcos. / Cláudia Gonçalves Vianna Bacchi. –
Dourados, MS : UFGD, 2011.
94 f.

Orientador: Prof. Dr. Omar Daniel.
Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade
Federal da Grande Dourados.

1. Modelagem Matemática. 2. Solo – Erosão. 3.
Conservação do solo e Água. 4. Conservação Recursos
Naturais. I. Título.

MODELAGEM DO PROCESSO DE EROÇÃO HÍDRICA ENTRESSULCOS

Cláudia Gonçalves Vianna Bacchi

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTORA EM AGRONOMIA

Aprovada em: 04/07/2011

Prof. Dr. Omar Daniel
Orientador: UFGD/FCA

Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino
Instituição: UFGD/FCA

Profa. Dra. Paula Pinheiro Padovese Peixoto
Instituição: UFGD/FCA

Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho
Instituição: UFMS/CCET

Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen
Instituição: UFMS/CCET

Para Rodrigo e Guilherme,

Meu filho, minha inspiração e Meu marido, meu verdadeiro companheiro,

Pelo incentivo e apoio, se não fosse por vocês não teria chegado até aqui.

A minha família, pai Íbis, pelos exemplos e oportunidades, mãe Gina e irmão Íbis
Cláudio, pelo carinho.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Esta Tese é o resultado da realização de um sonho que se concretizou em decorrência de um trabalho executado por mim, mas com a colaboração valiosa de muitas pessoas.

Muitos amigos e colegas de trabalho contribuíram na minha formação de forma que a lista seria quase infinita, é preciso, porém, ressaltar as companheiras desta jornada: Ana Cristina Ajalla, a amiga sempre presente; Tatiana Moreno, a tranquilidade; Balbina Soriano, a agitadora e Geula Gomes, a prestativa.

Existiu o apoio: em frases e gestos de incentivo de pessoas que admiro e que me levaram a crer que eu seria capaz, Célia Maria Oliveira, Carlos Nobuyshi Ide, Mauro Polizer, Robert Souza Schiavetto, Amaury de Souza; no companheirismo na execução de tarefas intermediárias indispensáveis para a conclusão, Jamil Anache, meu querido e perfeccionista colaborador, Dulce, Paulo, Carol, Jéssyca, no campo é muito importante ter bons companheiros; Eva Mercedes, sua participação na revisão e edição desta tese foi essencial; e, no processo de aprendizagem, fundamental para o meu desenvolvimento profissional, Antônio Paranhos Filho, Elói Panachucki, Sílvio Bueno, Silvana Scalon, Marlene Marchetti, Paulo Degrande, Manoel Gonçalves, Antônio Carlos Vitorino e Paula Padovese.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Omar Daniel, símbolo da paciência, compreensão e dedicação neste período de convivência.

Ao meu “padrinho”, Teodorico Alves Sobrinho, cuja participação foi preponderante neste processo, sempre presente nas horas mais difíceis e, com certeza, o meu maior incentivador.

Apresento, ainda, o agradecimento ao meu eterno Mestre, Jorge Luiz Steffen, que desde os meus primeiros passos na jornada acadêmica e de pesquisadora, me ensinou e engrandeceu com seus profundos conhecimentos.

Ao CNPq, FINEP e CAPES pelos recursos financeiros de apoio aos projetos de pesquisa que resultaram nesta tese e na concessão de bolsa. A UFGD, pela oportunidade de aprendizagem. Finalmente, à instituição UFMS, minha mantenedora, onde pretendo retribuir contribuindo na excelência da formação de novos profissionais.

Agradeço, diariamente, a Deus, por colocá-los no meu caminho, pela amizade, pela dedicação, pela compreensão, pelo apoio, pela ajuda, por compartilharmos momentos especiais desta vida.

Muito obrigada.

SUMÁRIO

PÁGINA

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1: MODELO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA PREDIÇÃO DE VAZÃO MÁXIMA SOB CHUVA SIMULADA	3
Resumo.	3
Abstract.....	3
1 Introdução	4
2 Material e Métodos.....	8
3 Resultados e Discussão.....	15
4 Conclusão.....	20
5 Literatura Citada.....	21
CAPÍTULO 2: MODELAGEM DA PREDIÇÃO DE SEDIMENTOS NA EROSIÃO ENTRESSULCOS SOB CHUVA SIMULADA	24
Resumo	24
Abstract.....	24
1 Introdução	25
2 Material e Métodos.....	28
3 Resultados e Discussão.....	34
4 Conclusão.....	39
5 Literatura Citada.....	40
CAPÍTULO 3: PROGRAMA COMPUTACIONAL DE APLICAÇÃO DE MODELO DE PREDIÇÃO DE EROSIÃO ENTRESSULCOS - HEROS	43
Resumo	43
Abstract.....	43
1 Introdução	44
2 Material e Métodos.....	49
3 Resultados e Discussão.....	58
4 Conclusão.....	68
5 Literatura Citada.....	69
CONCLUSÕES GERAIS.....	71
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
APÊNDICES.....	73

LISTA DE QUADROS

	PÁGINA
Quadro 1: Características hidráulicas do escoamento superficial entressulcos, sob chuva simulada em três classes de solo (LVdf, LVa e RQa), sob pastagem e sem cobertura vegetal. Valores médios de 3 repetições.....	16
Quadro 2: Parâmetros estatísticos do desempenho do modelo de predição de vazão máxima do escoamento superficial nos solos LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa-Latossolo Vermelho álico e RQa-Neossolo Quartzarênico álico sob pastagem e solo sem cobertura vegetal.	17
Quadro 3: Resultados da análise de regressão entre os valores observados e os estimados de vazão máxima de escoamento superficial para os solos LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa-Latossolo Vermelho álico e RQa-Neossolo Quartzarênico álico sob pastagem e solo sem cobertura vegetal.	18
Quadro 4: Percentuais das frações mineirais dos solos LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa-Latossolo Vermelho álico e RQa-Neossolo Quartzarênico álico.	34
Quadro 5: Parâmetros calibrados de modelo de predição de produção de sedimento de erosão em entressulcos sob chuva simulada em três tipos de solo: LVdf-Latossolo Vermelho distroférico; LVa – Latossolo Vermelho álico e RQa- Neossolo Quartzarênico álico, sob pastagem e sem cobertura. Valores médios de 3 repetições.	36
Quadro 6: Parâmetros estatísticos do desempenho do modelo de predição de produção de sedimentos em três tipos de solo, LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa- Latossolo Vermelho álico, RQa-Neossolo Quartzarênico álico, sob pastagem e solo sem cobertura vegetal. Valores médios de três repetições.....	37
Quadro 7: Estimativas dos parâmetros e estatísticas de regressão entre os valores observados e os estimados de vazão máxima de escoamento superficial para os solos LVdf, LVa e RQa sob pastagem e sem cobertura vegetal, respectivamente.	38

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1: Localização da bacia do Córrego Salobra.	8
Figura 2: Bacia do Ribeirão Salobra destacando os pontos de coleta de dados. Adaptação da Classificação do Projeto RadamBrasil. (BRASIL, 1982).....	9
Figura 3: Simulador de Chuvas InfiAsper. (1) estrutura; (2) unidade de aplicação de água; (3) sistema elétrico; (4) bomba d'água; (5) coletor de escoamento. (ALVES SOBRINHO <i>et al.</i> , 2008).....	11
Figura 4: Vazão observada no campo e estimada pelo modelo matemático (média de três repetições) em LVdf, LVa e RQa sob pastagem e sem cobertura vegetal.	15
Figura 5: Esquema de discretização pelo método explícito das diferenças finitas das variáveis adimensionalizadas para o escoamento nos planos.....	52
Figura 6: Bacia do Ribeirão Salobra dividida em 15 sub-bacias, lado direito em verde e lado esquerdo em bege.	55
Figura 7: Carta de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Salobra.....	56
Figura 8: Vazão de escoamento superficial e arraste de sedimentos em função do tempo na sub-bacia 1.....	65
Figura 9: Vazão de escoamento superficial nas sub-bacias.....	66
Figura 10: Sedimentos produzidos e transportados pelo escoamento superficial nas sub-bacias.	66

BACCHI, C. G. V. **Modelagem do Processo de Erosão Hídrica Entressulcos**. 2011. 94 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

RESUMO: Modelos de predição dos impactos do uso e do manejo do solo sobre o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica são essenciais ao estudo dos fatores intervenientes no processo erosivo. Estes modelos são utilizados no planejamento adequado do uso da terra, na adoção de boas práticas para conservação dos recursos naturais solo e água e no estabelecimento dos recursos a produtores rurais a serem pagos pelos serviços ambientais prestados, decorrentes de políticas públicas de redução de riscos de enchentes e de preservação da qualidade da água. No desenvolvimento da pesquisa, para o modelo de predição da vazão máxima do escoamento superficial, em eventos chuvosos, utilizou-se o método das características das equações de continuidade e da quantidade de movimento de Saint Venant e Manning. A predição da produção de sedimentos, pelo evento chuvoso, e da capacidade de arraste, pela enxurrada, foi determinada pela conjugação de equações de desagregação e capacidade de transporte pelo escoamento superficial. Foram realizados dezoito ensaios em parcelas experimentais, no campo, num esquema fatorial completo, com três tipos de solo, Latossolo Vermelho álico, Latossolo Vermelho distroférrico e Neossolo Quartzarênico álico, dois tipos de uso, sob pastagem e sem cobertura vegetal, e três repetições, sob condição de chuva simulada. Os resultados de quantificação do escoamento superficial e dos sedimentos serviram de referenciais na calibração e validação dos modelos. Essa validação, realizada com dados independentes, demonstrou a capacidade de predição da vazão máxima do escoamento superficial e produção de sedimentos para eventos chuvosos nas condições estudadas. Então, elaborou-se um programa computacional para aplicação em escala de bacia hidrográfica dos modelos validados e dos parâmetros calibrados. Os dados fisiográficos foram obtidos em cartas topográficas e imagens de satélite disponibilizadas em um SIG. Foi utilizado o método das diferenças finitas, com o objetivo de melhor precisão na predição da vazão do escoamento superficial e do aporte de sedimentos resultantes de processo erosivo entressulcos.

Palavras-chave: erosão entressulcos, predição, recursos naturais

BACCHI, C. G. V. **Modeling of Hydric Interrill Erosion Process**. 2011. 94 f. Thesis (Ph.D. in Vegetable Production) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

ABSTRACT: Models of prediction on impacts of land use and management on the hydrology of a watershed are important to identify the factors involved in the erosion process. They are useful to the proper planning in the adoption of good practices in order to conserve natural resources soil and water, to establish payment from public policies to reduce risks of flooding and preservation of water quality to farmers due to proper agricultural activities. On the course of the research, the model for predicting the peak flow of the superficial runoff at rainfall events was the method of the characteristics equations of continuity and quantified motion of Saint Venant's and Manning's. The prediction of sediment yield, at the rainfall event, and the flood carrying capacity were determined by combining equations of breakdown and transport capacity by the superficial runoff. Eighteen trials were conducted on experimental pieces, in field, in a full factorial design with three types of soil, Hapludox, Acrudox and Quartzipsamment; two types of use, under pasture and no planting coverage; and three recurrences under simulated rain condition. The results of quantification of the superficial runoff and sediment served as referential on the calibration and validation of the model. This validation, achieved from independent data, showed the capacity to predict the flow of the superficial runoff and sediment yield due to rainfall events in the studied conditions. Thus, a computer program was designed for the application of valid models and calibrated parameters at a watershed. The physiographic data were obtained from topographic letters and satellite images. Finite Difference Method was used, aiming at a better accuracy in predicting the flow of the superficial runoff and sediment yield resulted from interrill erosion.

Keywords: interrill erosion, prediction, natural resources.

INTRODUÇÃO GERAL

A utilização adequada, e de forma mais intensa, dos recursos naturais tem sido uma preocupação constante de cientistas e profissionais das mais diferentes áreas de conhecimento, principalmente, nas últimas décadas, quando a sociedade percebeu o impacto do desequilíbrio dos ecossistemas nas atividades do dia a dia de cada cidadão.

Destaca-se que a constatação do aumento de enchentes, a redução na disponibilidade de água, o aumento da temperatura ambiente foram algumas das razões para que ações de gestão pública fossem implantadas, no intuito de garantir a adoção de boas práticas nas diversas atividades, de modo a possibilitar menores danos ambientais e melhor qualidade dos recursos naturais.

Convém lembrar que as pesquisas iniciais sobre erosão e conservação do solo datam do início do século XIX, e neles se evidencia o papel representado por Hugh Bennett, agrimensor da USDA (United State Department of Agriculture). É válido esclarecer que foi a partir de 1903, por meio dos estudos desse engenheiro, que a sociedade e o congresso americanos tomaram conhecimento dos enormes prejuízos causados pela erosão, destacando-se a importância do estudo das variáveis que influenciam esse processo. As ações de Bennett culminaram, ainda, na criação do SCS (Soil Conservation Service), em 1935, e do ARS (Agricultural Research Service), baseado na Universidade de Purdue, que se tornou o maior centro de pesquisas relacionadas à conservação do solo.

É importante ressaltar que, no Brasil, a coordenação das ações na área de conservação do solo e da água concentra-se na Superintendência de Conservação de Água e Solo, do Ministério do Meio Ambiente. Um dos seus principais programas, o Produtor de Águas, foi implementado visando incentivar a adoção de práticas que tratem das causas da sedimentação, evitando a produção e transporte de sedimento, conscientizando os produtores e os consumidores de água, sobre a importância de uma gestão integrada de bacias hidrográficas (ANA, 2008).

Sabe-se que, no processo erosivo hídrico, o escoamento superficial é o principal agente. Os fatores ambientais que exercem influência direta são: precipitação, especialmente a intensidade; atributos do solo – normalmente, em solos de maior permeabilidade podem ocorrer hidrógrafas com menores valores máximos, uma vez que haverá menor escoamento sobre a superfície; manejo do solo - esse aspecto é especialmente importante, uma vez que o emprego de técnicas de manejo sem preocupação pode ser danoso para o ambiente e para a cultura instalada.

Diante disso, deve-se, portanto, estudar e aplicar técnicas que visem aumentar a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial. No contexto do ciclo hidrológico, o escoamento superficial e a produção de sedimentos por erosão hídrica constituem-se componentes importantes no manejo da bacia hidrográfica.

Assim, a tese nesta investigação está fundamentada em que é possível calibrar parâmetros amplamente utilizados em estudos de erosão para quaisquer condições ambientais, inclusive as regionais, validar modelos de eficiência reconhecidos pela comunidade científica internacional, e, ainda, propor soluções de aplicação desses modelos, em escala de bacia hidrográfica, em ambientes simples de planilhas eletrônicas de utilização frequente por qualquer usuário.

Nesse sentido, esta pesquisa está organizada internamente em três capítulos, que apresentam os seguintes objetivos específicos:

- 1) Validação de modelo de escoamento superficial com a calibração de parâmetros para solos e uso comuns na região Centro-Oeste.
- 2) Validação de modelo de predição de produção de sedimentos por erosão entressulcos com a calibração de parâmetros.
- 3) Elaboração de um programa computacional de aplicação do modelo de predição de escoamento superficial e erosão entressulcos para escala de bacia hidrográfica.

CAPÍTULO 1

MODELO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA PREDIÇÃO DE VAZÃO MÁXIMA SOB CHUVA SIMULADA

RESUMO: A previsão da vazão do escoamento superficial em diversas condições ambientais é imprescindível na determinação das melhores técnicas de minimização no manejo e conservação do solo por ser o principal agente do processo erosivo. O modelo desenvolvido para previsão da vazão máxima do escoamento superficial, em eventos chuvosos, utiliza as equações de Saint Venant e Manning. O estudo foi desenvolvido na bacia do Córrego Salobra, região central de Mato Grosso do Sul. Nesta pesquisa, foram realizados dezoito ensaios em unidades experimentais, num esquema fatorial completo com três classes de solo, Latossolo Vermelho álico, Latossolo Vermelho distroférrico e Neossolo Quartzarênico álico, dois tipos de uso, sob pastagem e sem cobertura vegetal, e três repetições, sob condição de chuva simulada, sendo os resultados de quantificação do escoamento superficial referenciais na calibração e validação do modelo. A validação do modelo, com dados independentes, demonstrou a capacidade de predição da vazão máxima do escoamento superficial para eventos chuvosos nas condições estudadas.

ABSTRACT: The prediction of the superficial runoff flow in different environmental conditions is essential in determining the best techniques to minimize the soil management and conservation, for it being the main agent of the erosion process. The model developed to predict the peak flow of the superficial runoff in rainfall events uses the equations of Saint Venant and Manning. The study was conducted in Salobra Creek basin, central region of Mato Grosso do Sul State. In this research, eighteen trials were conducted in experimental units, in a full factorial design with three classes of soil, Hapludox, Acrudox and Quartzipsamment; two types of use, under pasture and no planting coverage; and three recurrences under simulated rain condition, being the results of quantification of the superficial runoff referential in calibration and validation of the model. The model validation, with independent data, demonstrated the capacity to predict the peak flow of the superficial runoff for rainfall events in the studied conditions.

1 INTRODUÇÃO

No sistema natural, o escoamento superficial pode ter as mais diferentes características e, estando em superfície livre, pode ser considerado permanente, quando o gradiente da velocidade e a variação do nível com relação ao do tempo são desprezíveis, o que ocorre, por exemplo, nos cálculos de remanso, em rios. Em regime não-permanente, considera-se a variação das variáveis, no tempo e no espaço, condição essa que ocorre na maioria dos problemas hidrológicos de escoamento superficial.

No dimensionamento de técnicas de práticas mecânicas de manejo e conservação do solo, como, terraços, bacias de retenção, entre outras, a precisão na previsão da vazão máxima do escoamento superficial é indispensável para a otimização da relação custo/benefício na implantação no controle do processo erosivo.

Ressalta-se, ainda, que existem poucos estudos sobre o assunto, no Brasil; conseqüentemente, faltam dados e parâmetros ajustados às condições locais para a entrada nos modelos, o que resulta na necessidade de novas investigações (PRADO *et. al.*, 2010).

O avanço tecnológico dos computadores e das linguagens de programação levaram à otimização da modelagem dos diversos fatores do processo erosivo. Os modelos, baseados em leis físicas, têm sido amplamente estudados, em função da facilidade de validação em condições de campo, utilizando-se parcelas sob precipitação natural e simulada. A modelagem de previsão, desde que devidamente validada, pode ser utilizada tanto na determinação das práticas a serem adotadas no controle do escoamento superficial, quanto na análise do efeito da adoção de tais práticas vegetativas, edáficas e mecânicas.

É importante frisar que o escoamento superficial é representado pelas equações de continuidade (1) e quantidade de movimento desenvolvidas por Saint-Venant (1871), constituindo-se a base do desenvolvimento dos modelos de predição de escoamento superficial em bacias hidrográficas. No caso unidimensional, tem-se:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

Q é a vazão (m^3s^{-1}); A é a área da seção molhada (m^2); x é a distância no sentido longitudinal (m); t é o tempo (s); e q é a vazão por unidade de largura de contribuição lateral ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (2)$$

Em que:

S_0 é a declividade de fundo, representada pela tangente do ângulo que a força devida à gravidade faz, com a normal, da direção do escoamento, g é a aceleração da gravidade e S_f é a declividade da linha de atrito ou de energia.

A equação dinâmica (2) baseia-se na premissa de que as principais forças que atuam sobre o escoamento são a da gravidade, atrito, pressão e inércia. Os dois primeiros termos representam as forças de inércia do escoamento; e, o terceiro termo, a força de pressão; posteriormente ao sinal de igual, o primeiro termo refere-se à força da gravidade e, o último, à força de atrito.

Essas equações são não-lineares e, por isso, não apresentam solução analítica. No entanto, vários estudos apresentam resoluções matemáticas dessas equações, utilizando diferentes técnicas numéricas (YING *et al.* 2004; CROSSLEY *et al.* 2003; LITRICO e FROMION 2004; DULHOSTE *et al.* 2004; LACKEY e SOTIROPOULOS 2005).

O modelo da Onda Cinemática (LIGHTHILL e WHITHAM, 1955), mais prático, tem sido bastante utilizado. As equações básicas desse modelo são a equação da continuidade distribuída (1) e a expressão simplificada da equação de quantidade de movimento (2). Na expressão simplificada, as forças de atrito e de gravidade são preponderantes sobre os termos da pressão e inércia, tornando-os nulos, e a declividade do fundo igual à declividade da linha de atrito:

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

Nesse sentido, percebe-se que o modelo da onda cinemática deve ser aplicado, então, em situações em que a onda cinemática é mais importante que as pequenas perturbações que se comportam como uma onda dinâmica, que apresentam pequena profundidade e largura indefinida. O modelo simula somente os efeitos de montante e não pode ser utilizado para simular escoamento com influência de jusante, que tem sua ocorrência em rios, canais próximos a lagos e encostas, por exemplo. (TSAI, 2003).

Considerando-se que o escoamento superficial é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida, quando a bacia situa-se na zona rural e possui cobertura vegetal, o escoamento, na superfície, sofre interferência dessa cobertura e grande parte dele se infiltra. O fluxo superficial é resultado da água precipitada que não foi interceptada pela cobertura vegetal, ou que não infiltrou, continuando a escoar por meio de caminhos de maior declividade e menor obstrução. No caso de fluxo de escoamento superficial, a solução matemática das equações de Saint Venant mais utilizada é a combinação da equação da continuidade e da equação do momento, em sua forma simplificada, pelo modelo da onda cinemática:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \alpha \frac{\partial (y^m)}{\partial x} = i - f \quad (4)$$

Aqui, y = profundidade da água (m); x =distância longitudinal(m); t = tempo (s); i = intensidade da chuva($m^3s^{-1}m^{-2}$); f = taxa de infiltração($m^3s^{-1}m^{-2}$). Os valores do expoente m para condições de escoamento laminar ou laminar-turbulento são tabulados (PONCE, 1989).

A declividade da linha de atrito é obtida pelo uso de equações de movimento uniforme, tais como Chézy(5) e Manning(6). Essas equações empíricas foram estabelecidas para o escoamento uniforme, mas têm sido largamente utilizadas para o escoamento não-permanente, com resultados satisfatórios (KAZEZYILMAZ-ALHAN *et al.*, 2007; KAZEZYILMAZ-ALHAN *et al.*, 2005; LAL, 1998a,b; TISDALE *et al.*, 1998; SINGH *et al.*, 1997; BARRY e BAJRACHARYA, 1995; AKAN e YEN, 1981).

$$\alpha = C\sqrt{S_0} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{n}\sqrt{S_0} \quad (6)$$

Sendo, C = coeficiente de Chézy e n = coeficiente de atrito de Manning, que variam de acordo com a rugosidade da superfície que impõe atrito ao escoamento superficial. Vieira (1983) estabelece as condições essenciais para o uso de aproximações para as equações de Saint Venant em condições de fluxo de escoamento superficial.

Este trabalho objetiva validar um modelo de previsão da vazão máxima do escoamento superficial e a calibração de parâmetros, utilizando a equação da continuidade e da quantidade de movimento de Saint Venant e da força gravitacional e do atrito de Manning, com solução matemática pelo método das características, para a predição da vazão máxima do escoamento superficial em eventos chuvosos em condições de parcelas experimentais sob chuva simulada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados na bacia hidrográfica do ribeirão Salobra, localizada entre as coordenadas 20° 12' S e 20° 28' S e 54° 55' O e 55° 16' O. A região é considerada como de relevância nos estudos hidrossedimentológicos, por estar inserida na Bacia do Alto Paraguai, importante contribuidora da Bacia do rio Paraguai, Pantanal Mato-Grossense. O uso da terra, predominante na área em estudo é a pecuária extensiva (Figura 1).

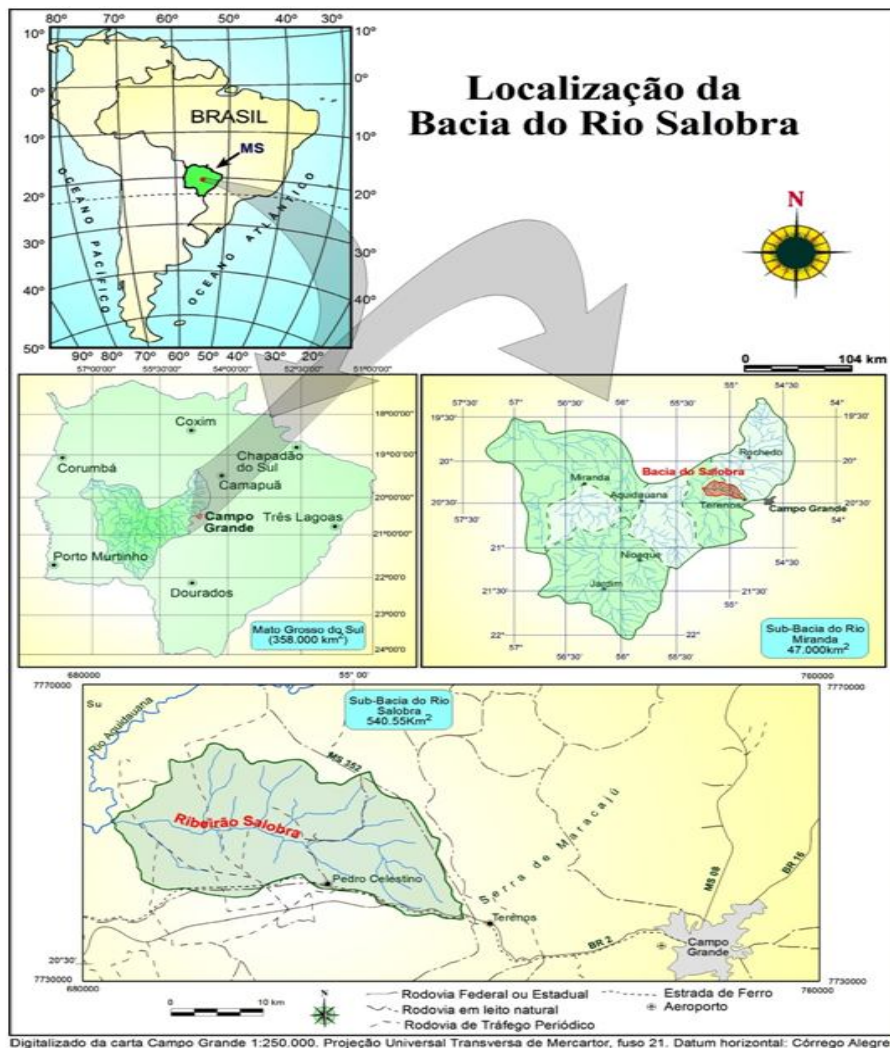


Figura 1: Localização da bacia do Córrego Salobra.

Os experimentos foram realizados num esquema fatorial completo, considerando três classes de solo, (Latosolo Vermelho distroférico (LVdf), Latossolo Vermelho álico (LVa) e Neossolo Quartzarênico álico (RQa)) (Figura 2), em duas condições diferentes de uso (com cobertura de pastagem e sem cobertura), e três repetições. Com o intuito de homogeneizar as condições ambientais, foram selecionadas áreas onde o sistema de pastejo adotado era o mesmo. Para evitar a deformação das parcelas decorrentes do impacto das gotas da chuva sobre o solo exposto, nos dados coletados em experimentos sem cobertura, a pastagem foi retirada para a realização do teste na parcela.

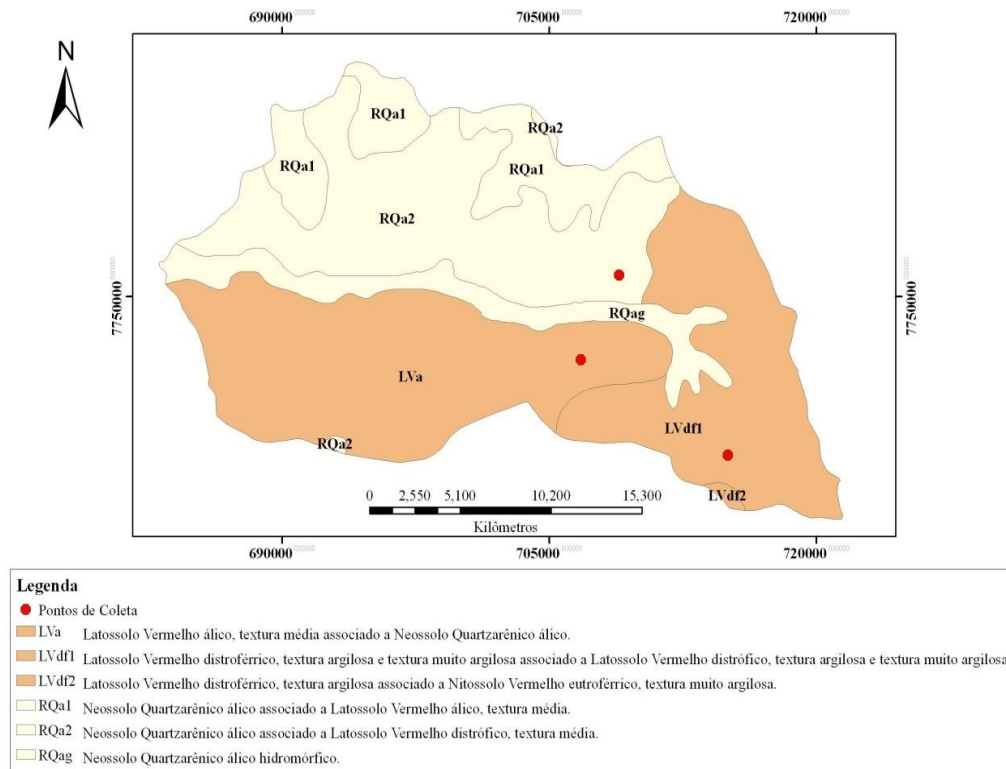


Figura 2: Bacia do Ribeirão Salobra destacando os pontos de coleta de dados. Adaptação da Classificação do Projeto RadamBrasil. (BRASIL, 1982).

Os escoamentos superficiais foram obtidos com o simulador de chuvas portátil InfiAsper (Figura 3). O equipamento produz chuva artificial com diâmetro médio volumétrico de gotas correspondente a 2,0 mm, por meio de dois bicos Veejet 80.150, posicionados a 2,30 m de altura do solo. A relação entre a energia cinética da

chuva produzida pelo simulador e a energia cinética da chuva natural corresponde a valores acima de 90%.

A área da parcela experimental, que recebe a precipitação do simulador, é contornada por um delimitador de parcelas de formato retangular. O delimitador é construído em chapas de aço galvanizadas de 0,70m de largura, por 1,00m de comprimento e 0,16m de altura. Tal dispositivo, que permite a obtenção do volume de água escoado superficialmente, é instalado no campo com o comprimento maior a favor do declive.

As parcelas receberam pré-molhamento, 24 horas antes do início dos testes com o simulador de chuvas, com objetivo de oferecer condições de umidade uniformes a todas as parcelas, constituindo-se um pré-requisito antes da aplicação da chuva artificial. Para isso utilizou-se 20 gotejadores (vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), dispostos em mangueira de polietileno, montada em formato retangular de 80cm de largura por 120 cm de comprimento, conectada a depósito com água. O tempo de molhamento foi o suficiente para saturar o solo sem, no entanto, ocorrer escoamento superficial.

O simulador foi calibrado para aplicar chuva de $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ de intensidade. A pressão de operação nos bicos foi de 35,6 kPa, permitindo a aplicação de chuva cujas gotas apresentavam diâmetro médio volumétrico de 2,0 mm.

Após a instalação e o acionamento do simulador, a coleta de amostras do volume escoado na parcela teste era feita, durante um minuto, utilizando-se frascos plásticos com capacidade para um litro, a intervalos de 2 minutos. A coleta da primeira amostra ocorria quando era verificado o início do escoamento de água na calha coletora do delimitador de parcelas, denominado como tempo zero de início de escoamento. O tempo de duração do teste, em cada parcela, era de 60 minutos, totalizando 30 amostras de escoamento superficial.

Destas amostras, uma a cada três, ou seja, a cada 6 minutos, era separado o recipiente com o volume coletado para posterior quantificação da massa de solo e a concentração de sedimento em laboratório. As amostras de material sólido obtidas eram, então, colocadas em estufa, a temperatura de 60° C , por período de tempo necessário à completa evaporação da água contida nas mesmas. A água retida nas amostras foi determinada e o valor obtido foi acrescido ao volume de água inicialmente registrado. A massa do material sólido foi obtida por pesagem.

A lâmina de escoamento superficial foi calculada pela relação entre o volume de água escoado e a área da parcela teste que recebia a precipitação (0,70 m²). Durante o período de operação do simulador, a pressão de serviço dos bicos foi monitorada a fim de evitar variações na intensidade de precipitação inicialmente calibrada e ajustada. E, ao final de cada teste na parcela experimental, efetuava-se a verificação da intensidade de precipitação real aplicada pelo simulador, medindo-se o volume precipitado em seis minutos, com auxílio de uma bandeja de calibração, que possui a mesma área da parcela teste.

Quando as condições climáticas eram de ventos fortes ou precipitação durante os testes, era afixada uma lona em torno da estrutura inferior do simulador.

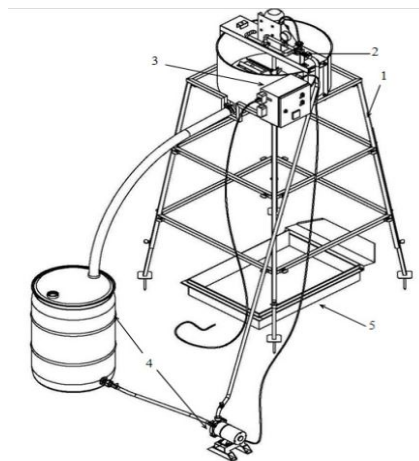


Figura 3: Simulador de Chuvas InfiAsper. (1) estrutura; (2) unidade de aplicação de água; (3) sistema elétrico; (4) bomba d'água; (5) coletor de escoamento. (ALVES SOBRINHO et al., 2008).

O modelo utilizado no tratamento dos dados coletados, sua calibração e validação são descritos a seguir:

a) Modelo

A simulação do escoamento superficial é baseada nas equações da continuidade e da quantidade de movimento simplificada pelo método da onda cinemática e a equação de Manning com solução analítica das equações utilizando o método das características.

A equação da continuidade é:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = ie \quad (7)$$

Em que:

q = vazão (m^3s^{-1}); y = área da seção molhada (m^2); x = distância longitudinal (m); t = tempo (s); ie = entrada ou saída de vazão, por unidade de largura de contribuição lateral ($m^3s^{-1}m^{-1}$).

A equação da quantidade de movimento simplificada pela onda cinemática é:

$$q = \alpha \cdot y^m \quad (8)$$

A equação de Manning estabelece que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{s_0}}{n} \quad (9)$$

em que n é o coeficiente de atrito de manning, s_0 é a declividade ($m.m^{-1}$).

Equacionando-se estas pelo método das características, tem-se que:

$$x = \alpha \cdot ie^m \cdot \frac{t^m}{ie} = \alpha \cdot \frac{y^m}{ie} \quad (10)$$

Com Manning,

$$y(x) = (n \cdot ie \cdot \frac{x}{\sqrt{s_0}})^{0,6} \quad (11)$$

E quando $t = t_c$ (tempo de concentração) e $x = L$ (comprimento total de rampa) obtêm-se:

$$L = \alpha \cdot m \cdot ie^{m-1} \cdot t_c^{m-1} \cdot \frac{t_c^m}{m} \quad (12)$$

$$t_c = \left(\frac{L}{\alpha \cdot ie^{m-1}} \right)^{1/m} \quad (13)$$

b) Calibração e Validação do modelo

A calibração do modelo foi realizada mediante utilização de planilha eletrônica alimentada com os dados observados de vazão de enxurrada. As planilhas foram elaboradas individualmente a cada repetição. A partir dos valores de enxurrada, registrados a cada dois minutos, foram estimados, por interpolação, os

valores a cada minuto. Vazões de precipitações efetivas também foram obtidas utilizando-se os valores de vazão de enxurrada a cada minuto. A análise dos gráficos com os valores de enxurrada, em função do tempo, resultou na determinação dos tempos de concentração.

A partir dos dados de comprimento da rampa, largura e declividade da unidade experimental, dos valores de precipitação efetiva e o tempo de concentração, foram calculados os valores de previsão de vazão de escoamento máximo pelo modelo proposto. Esses valores foram obtidos, inicialmente, com o coeficiente de atrito de Manning, proposto por Engman (1986) e, depois, iterativamente, até que o valor de n de Manning resultasse em valores de vazão máxima do escoamento superficial aproximada, ao valor observado nos experimentos, aplicando-se o método de aproximação pelo método dos quadrados mínimos (QM).

No processo de validação, foram utilizados parâmetros estatísticos propostos por Loague e Green(1991), Lengnick e Fox (1994) e Martins Filho *et. al.* (2003), que são:

Erro-padrão da estimativa normalizado (RMSE)

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \left(\frac{100}{O} \right) \quad (14)$$

Coefficiente de determinação (CD)

$$CD = \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - O)^2 \quad (15)$$

Eficiência do modelo (EF)

$$EF = [\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O)^2] / \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 \quad (16)$$

Coefficiente de massa residual (CRM)

$$CRM = (\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (17)$$

Erro máximo (ME)

$$ME = \text{Max } |P_i - O_i| \quad (18)$$

Diferença média (MD)

$$MD = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (19)$$

Sendo, P_i – valor predito; O_i – valor observado; i – índice amostral; O – média dos valores observados.

Os valores de RMSE, CD, EF, CRM, ME e MD foram obtidos como descrito por Loague e Green (1991), nos quais os parâmetros estatísticos assumem valores iguais a 0, 1, 1, 0, 0 e 0, respectivamente. Aplicou-se o teste t para verificar se o intercepto e o coeficiente angular das equações lineares não diferiram de 0,0 e 1,0, respectivamente, a 5% de probabilidade. Foram também avaliadas as significâncias dos valores de determinação das equações lineares de cada tratamento pela aplicação do teste F.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de vazão de enxurrada, observados nos testes, e os preditos pelo modelo matemático, adotados neste trabalho, podem ser visualizados nos gráficos apresentados a seguir (Figura 4). O modelo preconiza a influência do atrito exercido pela superfície, da declividade e do comprimento de rampa como forças físicas preponderantes sobre o fluxo da água.

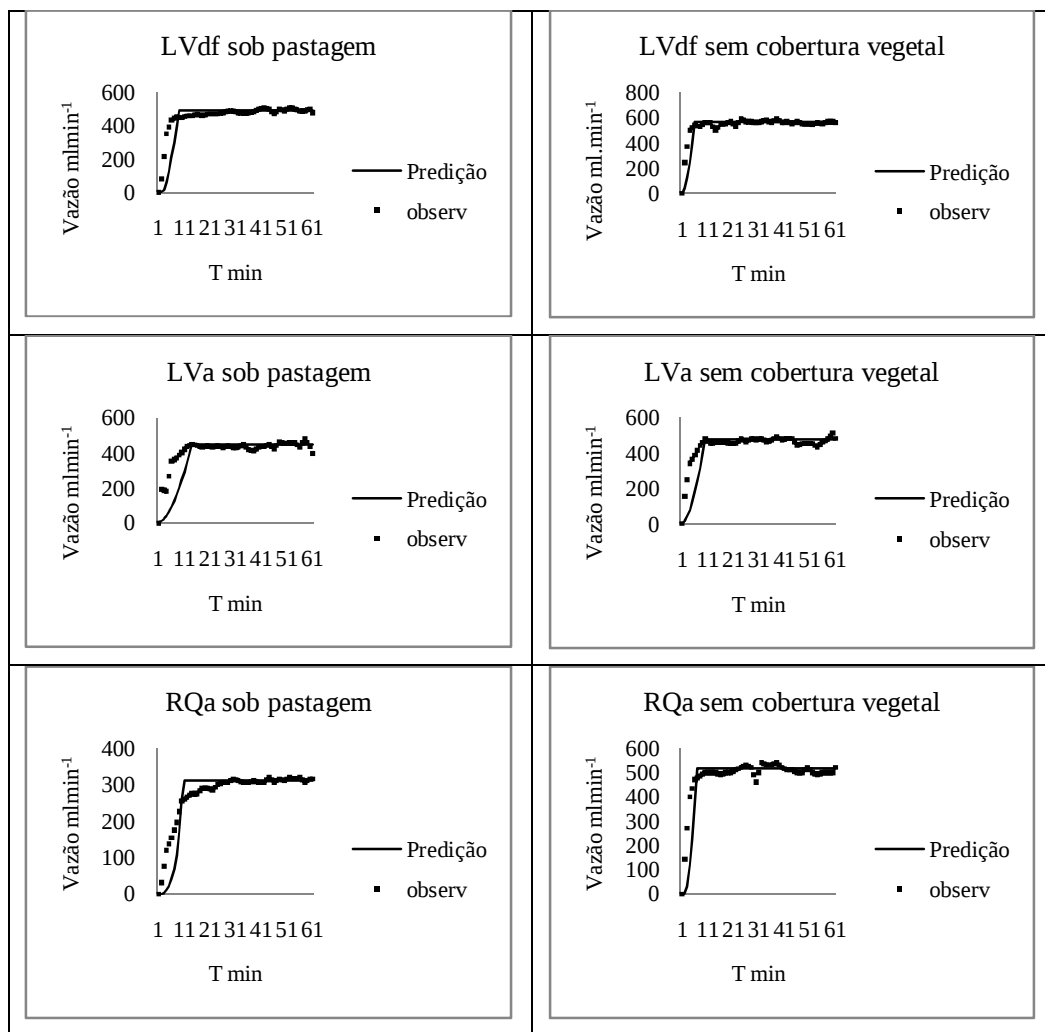


Figura 4: Vazão observada no campo e estimada pelo modelo matemático (média de três repetições) em LVdf, L Va e RQa sob pastagem e sem cobertura vegetal.

A calibração do modelo resultou em estimativas dos parâmetros empíricos para os ambientes em estudo para o uso neste e nos demais modelos baseados em leis físicas (Quadro 1). Esses parâmetros são indispensáveis no uso de modelos de predição para as condições estudadas ou semelhantes.

Quadro 1: Características hidráulicas do escoamento superficial entressulcos, sob chuva simulada em três classes de solo (LVdf, LVa e RQa), sob pastagem e sem cobertura vegetal. Valores médios de 3 repetições

Classe de solo/uso	n	Tc(min)	Vazão máxima de escoamento superficial (ml.min ⁻¹)	
			Previsto	Observado
LVdf com pastagem	0,2255	8,0	512,42	511,87
LVdf sem cobertura	0,1383	5,3	597,47	597,30
LVa com pastagem	0,3740	13,0	296,35	296,17
LVa sem cobertura	0,2575	9,7	402,53	402,50
NQa com pastagem	0,1755	8,0	283,09	282,77
NQa sem cobertura	0,1387	6,3	538,44	538,23

n: coeficiente de rugosidade de Manning; Tc: tempo de concentração.

Cassol *et. al.* (2004) estudaram o escoamento superficial em solo franco-argilo-arenoso em unidades experimentais com cobertura de palhada, em quantidades de 0,00; 0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 0,80 kg m⁻², sob chuva simulada, determinando os valores de rugosidade de Manning na faixa de 0,043 (correspondente a 0,10 kg m⁻²), a 0,522 s m^{-1/3} (referente a 0,80 kg m⁻²).

Neste estudo, os valores de n calibrados são de mesma ordem de grandeza e, assim como em Cassol et al. (2004), os valores menores referem-se às unidades experimentais sem cobertura vegetal e os maiores sob pastagem.

A fração silte desempenha um importante papel no encrostamento, sendo previsível que solos mais ricos em silte tenham tendência mais acentuada ao encrostamento. Porém, é comum, em muitos solos brasileiros, com bastante evidência nas áreas de cerrado, principalmente em Latossolos Vermelhos férricos, a formação de um pequeno encrostamento que dificulta a infiltração de água. Como os Latossolos são, por definição, pobres em silte, sua argila pode estar formando agregados do tamanho do silte Provavelmente, neste caso, a argila tenha funcionalidade de silte (RESENDE *et al.*, 2002).

A ação agregante dos óxidos é potencializada por suas ligações com a caulinita, intermediadas por Si (CAMBIER e PICOT, 1988). Acredita-se que os óxidos

pouco cristalinos são os mais eficientes na agregação, devido à sua ação cimentante (AZEVEDO e BONUMÁ, 2004). Segundo Pinheiro-Dick e Schwertmann (1996), solos com alta razão gibbsita/(gibbsita +caulinita) do Brasil central apresentaram agregados mais estáveis. Vitorino et al. (2003) encontraram resultados similares em estudos da estabilidade dos agregados caracterizando-os e observando-os do tamanho de silte.

Os solos apresentam variabilidade ao longo da paisagem em virtude da intensidade de fatores e processos de formação do solo. Quanto maior a variação desses fatores, principalmente a do material de origem e relevo, maior será a heterogeneidade dos solos (SOUZA et al., 2006). Nesta área, o LVdf é caulínítico enquanto o LVD é gibbsítico (RadamBrasil, 2002).

Estudos realizados por Ferreira et al. (1999) demonstraram que Latossolos caulíníticos se apresentam mais compactados devido à sua configuração determinada pela estrutura em blocos, fazendo com que esses solos se apresentem menos permeáveis, com menor estabilidade de agregados em água e maior tendência à erosão laminar.

Isso pode ter implicações na perda de água do solo na forma de erosão, o que foi constatado na observação dos maiores volumes de escoamento superficial no Latossolo Vermelho distroférico sem cobertura vegetal.

Valores dos parâmetros estatísticos utilizados para a validação do modelo podem ser analisados no Quadro 2. Neste trabalho, os CDs e os EFs do modelo nos tratamentos foram todos muito próximos de 1,0, assim como os CRMs, RMSEs, MEs e MDs foram de zero, indicação de calibração adequada para as condições sob as quais o estudo foi realizado.

Quadro 2: Parâmetros estatísticos do desempenho do modelo de predição de vazão máxima do escoamento superficial nos solos LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa-Latossolo Vermelho álico e RQa-Neossolo Quartzarênico álico sob pastagem e solo sem cobertura vegetal.

Tipo de solo/uso	Parâmetros Estatísticos ⁽¹⁾					
	CD	EF	CRM	RMSE	ME	MD
				%	ml.min ⁻¹	ml.min ⁻¹
LVdf sob pastagem	0,993	0,999	-0,001	0,112	0,750	0,550*
LVdf sem cobertura	0,989	1,000	0,000	0,035	0,290	0,170*
LVa sob pastagem	1,002	1,000	-0,001	0,094	0,050	0,030*
LVa sem cobertura	0,999	1,000	0,000	0,009	0,050	0,030*
RQa sob pastagem	0,994	1,000	-0,001	0,129	0,490	0,327*
RQa sem cobertura	0,999	1,000	0,041	0,041	0,310	0,207*

(1) CD – coeficiente de determinação; EF – eficiência do modelo; CRM – coeficiente de massa residual; RMSE – erro-padrão das estimativas normalizado; ME – erro máximo; e MD- diferença média.

*- não difere de zero, estatisticamente, pelo teste t a 5%.

Risse *et. al.* (1993) explicam que o parâmetro EF compara os valores observados e estimados quanto à linearidade na relação desses valores, e também as diferenças relativas. Valor de EF igual, ou aproximadamente, a 1,0 indica um modelo eficaz, o que ocorreu nos três tipos de solo sob as condições de uso estudadas.

Os erros nas predições da vazão máxima do escoamento superficial foram analisados pelo parâmetro RMSE, que representa o erro-padrão das estimativas normalizado com valor máximo obtido de 0,129%, identificando, portanto, baixa variação entre os tratamentos. Para o parâmetro ME, erros máximos cometidos pelo modelo, foram obtidos valores próximos a zero. O mesmo se deu para o MD, diferença média, no qual foram observados valores baixos com leve superestimativa, o que não compromete o modelo, pois, além do seu objetivo ser a estimativa da vazão máxima de escoamento superficial para fins de manejo e conservação do solo, o teste t demonstrou que os resultados não diferiram de zero. Valores de CRM iguais a zero, ou próximos desse, reforçam a precisão do modelo na predição de valores de vazão máxima de escoamento superficial nas condições estudadas (Quadro 2).

Recomenda-se a realização de testes adicionais na verificação da significância entre os valores estimados e os observados (LENGNICK e FOX, 1994) pela determinação equações lineares significativas a 1% de probabilidade. Então, aplicando-se o teste t, determina-se que o intercepto e o coeficiente angular das equações lineares ajustadas não diferem de 0,0 e 1,0, respectivamente. Neste estudo, esta premissa foi observada (Quadro 3), confirmando o bom desempenho do modelo.

Quadro 3: Resultados da análise de regressão entre os valores observados e os estimados de vazão máxima de escoamento superficial para os solos LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa-Latossolo Vermelho álico e RQa-Neossolo Quartzarênico álico sob pastagem e solo sem cobertura vegetal.

Tipo de solo/uso	Resultados da análise de regressão		
	Intercepto	Coeficiente angular	r^2
LVdf com pastagem	-0,332050311#	1,000730045!	0,99
LVdf sem cobertura	0,668437374#	0,998804806!	0,99
LVa com pastagem	0,498746719#	0,998923759!	0,99
LVa sem cobertura	-0,093000161#	1,00030559!	0,99
NQa com pastagem	-0,455696608#	1,002766816!	0,99
NQa sem cobertura	-0,040193218#	1,000458648!	0,99

não diferem de zero, estatisticamente, pelo teste t a 5%.

! não diferem de um, estatisticamente, pelo teste t a 5%.

Os modelos de predição de enxurrada são úteis no dimensionamento de práticas mecânicas, tais como, terraços e bacias de retenção, sendo, por isso, a precisão na previsão do volume máximo do escoamento superficial nos eventos chuvosos o objetivo principal.

4 CONCLUSÃO

O modelo proposto é eficiente e acurado na previsão de vazão máxima de escoamento superficial nas condições ambientais estudadas.

A calibração do modelo disponibiliza valores de coeficiente de atrito, n de Manning, indispensáveis na utilização de modelos principalmente baseados nas equações de Saint Venant e Manning.

5 LITERATURA CITADA

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. Superintendência de Usos Múltiplos, Brasília: ANA, 2008.

AKAN, A. O.; YEN, B. C. Diffusion-wave flood routing in channel networks. **J. Hydr. Div.**, 107_6_, 719–732, 1981.

ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v.24, n.2, p.163-170, 2008.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. **Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos**. Ci. Rural, 34:609-617, 2004.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SF.21 Campo Grande; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, p. 416, 1982.

BARRY, D. A.; BAJRACHARYA, K. On the Muskingum–Cunge flood routing method. **Environ. Int.**, 21_5_, 485–490, 1995.

CAMBIER, P.; PICOT, C. **Nature des liaisons kaolinite-oxyde de fer au sein des microagregats d'un sol ferralitique**. Sci. Sol, 26:233-238, 1988.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B. REICHARD, J. M. MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesq. Agropec. Bras**, Brasília, v.39, n.7, p.685-690, jul. 2004.

CROSSLEY, A. J.; WRIGHT, N. G.; WHITLOW, C. D. Local time stepping for modeling open channel flows. **J. Hydraul. Eng.**, 129_6_, 455–462, 2003.

DULHOSTE, J. F.; GEORGES, D.; BESANCON, G. Nonlinear control of open-channel water flow based on collocation control model. **J. Hydraul. Eng.**, 130_3_, 254–266, 2004.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 23:507-514, 1999.

KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M.; ASCE, A. M.; MEDINA, M. A. JR.; ASCE, F. Kinematic and Diffusion Waves: Analytical and Numerical Solutions to Overland and Channel Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, Vol. 133, No. 2.217–228, 2007.

KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M.; MEDINA, M. A. JR.; PRASADA, R. On numerical modeling of overland flow. **Appl. Math. Comput.**, 166.3., 724–740, 2005.

- LACKEY, T. C.; SOTIROPOULOS, F. Role of artificial dissipation scaling and multi grid acceleration in numerical solutions of the depth averaged free-surface flow equations. **J. Hydraul. Eng.**, 131_6_, 476–487, 2005.
- LAL, A. M. W. Performance comparison of overland flow algorithms. **J. Hydraul. Eng.**, 124_4_, 342–349, 1998a.
- LAL, A. M. W. Weighted implicit finite-volume model for overlandflow. **J. Hydraul. Eng.**, 124_9_, 941–950, 1998b.
- LENGNICK, L. L.; FOX, R. H. Simulation by NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I. Soil nitrate. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, n.1, p.167-175, 1994.
- LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves. I: Flood movement in long rivers. **Proc. R. Soc. London, Ser. A**, 229, 281–316, 1955.
- LITRICO, X.; FROMION, V. Frequency modeling of open channel flow. **J. Hydraul. Eng.**, 130_8_, 806–815, 2004.
- LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v.7, n.1, p. 51-73, 1991.
- LOURENÇÃO, A.; HONDA, E. A. **Influência do reflorestamento com essências nativas sobre a infiltração da água e a velocidade do escoamento superficial**. IF Sér. Reg., São Paulo, n. 31, p. 33-37, jul. 2007.
- MARTINS FILHO, M. V.; CAMPOS, M. P.; IZIDORIO, R.; COTRIN, F. B.; SERRA, E. A.; AMARAL, N. S.; SOUZA, Z. Modelagem do processo de erosão entressulcos para latossolos de Jaboticabal - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p.9-20, jan. 2003.
- NAIK, G. M.; RAO, E. P.; ELDHO, T. I. A kinematic wave based watershed model for soil erosion and sediment yield. **Catena**, v.77, p.256-265, 2009.
- PRADO, R. B.; TURETTA, A. P.; ANDRADE, A. G. Manejo e Conservação do Solo e da Água no contexto das Mudanças Ambientais. **Embrapa Solos**. Rio de Janeiro, 486 p., 2010.
- PONCE, V. M. **Engineering hydrology: Principles and practices**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J, 1989.
- PINHEIRO-DICK, D. & SCHWERTMANN, U. **Microagregates from Oxisols and Inceptisols: Dispersion through selective dissolution's and physicochemical treatments**. *Geoderma*, 74:49-63, 1996.
- RESENDE, M. ;CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de Ambientes**. NEPUT. Viçosa – MG, 338 p., 2002.
- RISSE, L. M.; NEARING, M. A.; NICKS, A. D.; LAFLEN, J. M. Error assessment in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 57, n.3, p.825-833, 1993.
- SAINT-VENANT, B. D. Theory of unsteady water flow, with application to river floods and to propagation of tides in river channels. **French Academy of Science**, 73, 148–154, 237–240, 1871.

SINGH, V. P.; WANG, G. T.; ADRIAN, D. D. Flood routing based on diffusion wave equation using mixing cell method. **Hydrolog. Process.**, 11_14_, 1881–1894, 1997.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. **Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes**. *Sci. Agric.*, 63:161-168, 2006.

TISDALE, T. S.; SCARLATOS, P. D.; HAMRICK, J. M. Stream line up wind finite-element method for overland flow. **J. Hydraul. Eng.**, 124_4_, 350–357, 1998.

TSAL, C. W. Applicability of kinematic, non inertia and quasi steady dynamic wave models to unsteady flow routing. **J. Hydraul. Eng.**, 129_8_, 613–627, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

VIEIRA, J. H. D. Conditions governing the use of approximations for the St. Venant equations for shallow surface-water flow. **J. Hydrol.**, 60_1–4_, 43–58, 1983.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. **Pesq. Agropec. Bras.**, 38:133-141, 2003.

YING, X.; KHAN, A. A.; WANG, S. S. Y. Upwind conservative scheme for the Saint Venant equations. **J. Hydraul. Eng.**, 130_10_, 977–987, 2004.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DA PREDIÇÃO DE SEDIMENTOS NA EROSÃO ENTRESSULCOS SOB CHUVA SIMULADA

RESUMO: Programas Governamentais de incentivo à adoção de boas práticas de uso da terra são fundamentados no pagamento de serviços ambientais pela redução de índices de erosão calculados por modelos de predição. Por isso, existe interesse no desenvolvimento de métodos de predição da quantificação da interveniência dos principais fatores dos processos erosivos. A predição da produção de sedimentos, em eventos chuvosos, e da capacidade de arraste pela enxurrada desses sedimentos, foram determinadas pela conjugação de equações de desagregação e capacidade de transporte do escoamento superficial. O estudo foi realizado na bacia do Ribeirão Salobra, parte central do Mato Grosso do Sul. Foram realizados dezoito ensaios em unidades experimentais, num esquema fatorial completo, com três classes de solo, Latossolo Vermelho álico, Latossolo Vermelho distroférico e Neossolo Quartzarênico álico, dois tipos de uso sob pastagem e sem cobertura vegetal, e três repetições, sob condição de chuva simulada, sendo os resultados de quantificação dos sedimentos referenciais na calibração e validação do modelo. A validação do modelo com dados independentes demonstrou a capacidade de predição da produção de sedimentos decorrentes de processo erosivo entressulcos em eventos chuvosos nas condições estudadas.

ABSTRACT: Government Programs to encourage the adoption of management and conservation practices are based on the payment for environmental services by erosion reduction indices calculates by prediction models. Therefore, there is an increasing demand of prediction methods to quantify the mediation of the main factors of the erosion process. The prediction of sediment yield, at a rainfall event, and the flood-carrying capacity of these sediments were determined by combining equations of breakdown and transport capacity of the superficial runoff. Eighteen trials were conducted in experimental units, in a full factorial design with three types of soil, Hapludox, Acrudox and Quartzipsamment; two types of use under pasture and no planting coverage; and three recurrences under simulated rain condition, being the results of quantification of referential sediments for calibration and validation of the model. The model validation with independent data demonstrated the capacity to predict sediment yield due to interrill erosion process in rainfall events in the studied conditions.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a constante ação do homem no meio ambiente provoca vários desequilíbrios ambientais, refletindo danos característicos em cada meio de ocupação humana. Exemplo disso é o uso inadequado do solo que em geral têm como consequência direta a queda de produtividade, maior frequência na ocorrência de enchentes, assoreamento dos rios, redução na qualidade da água, diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios e, finalmente, o esgotamento de nascentes, pela insuficiência de infiltração de água no subsolo para alimentar os lençóis freáticos. Esses eventos contribuem para o aumento dos custos de produção, devido à necessidade de recuperação da fertilidade do solo (GALDINO *et al.*, 2005)

Assim, o Poder Público buscou mecanismos inovadores visando solucionar tais problemas, paralelamente a criação de leis punitivas, a implementação de programas de incentivo a adoção de práticas de conservação do solo. A Agência Nacional de Águas (ANA) lançou o Programa Produtor de Águas sendo uma instituição que tem como foco a redução da erosão e do assoreamento de mananciais no meio rural. O programa utilizado pela ANA prevê apoio técnico e financeiro para execução de ações, como: construção de terraços e bacias de infiltração, readequação de estradas vicinais, recuperação e proteção de nascentes, reflorestamento das áreas de proteção permanente e reserva legal, entre outros. (ANA, 2008).

A adesão voluntária de produtores rurais, dispostos a adotar práticas e manejos conservacionistas em suas terras com vistas à conservação de solo e água, resulta em remuneração proporcional ao serviço ambiental prestado, que dependerá de prévia inspeção na propriedade. Os projetos são monitorados visando quantificar os benefícios obtidos com sua implantação. (ANA, 2008).

Em função dessa necessidade de monitoramento, aumentou a demanda por métodos eficientes e baratos para estimar a erosão após um evento chuvoso ou após a adoção de estratégias de manejo. O avanço tecnológico dos computadores e das linguagens de programação otimizou a modelagem do processo erosivo, facilitando a utilização de modelos físicos em contraponto aos empíricos de maior

dificuldade na calibração e validação de parâmetros. Entretanto, vale esclarecer que os estudos de campo são caros, consomem tempo e necessitam de dados coletados ao longo de anos. (GABRIELS *et al.*, 2003).

Diante de tudo o que já foi comentado, convém destacar que a remoção da camada superficial do solo, por meio de processos erosivos, e a sua sedimentação em outros locais resultam em sérias consequências, dentre elas, a redução da qualidade das águas e o transporte de inúmeros poluentes adsorvidos. Com a finalidade de equacionar esses problemas, tornando possível a compreensão do processo e seu controle, surgiram modelos matemáticos de vários tipos e com diferentes objetivos.

Esses modelos são classificados quanto à estrutura em empíricos e conceituais. Os empíricos utilizam relações simples de concentração e vazão. Os modelos conceituais equacionam os processos de transformação e transporte de sedimentos, sendo as equações derivadas parciais, por apresentarem o escoamento da água e o transporte associado. O intervalo de tempo é elemento determinante no tipo de modelo. Aqueles que trabalham com equações algébricas fornecem resultados em médias anuais, mensais, diárias, enquanto os que trabalham com equações diferenciais podem utilizar intervalos de tempo variáveis (ONSTAD e FOSTER, 1975).

Conceitualmente, o processo erosivo hídrico é composto por três fases, ou seja, a desagregação das partículas da massa do solo pela ação das gotas da chuva e pela força do fluxo da enxurrada, o transporte dessas partículas por meio do escoamento superficial e pela deposição de tais partículas nas partes mais baixas do terreno ou em corpos d'água. Para as duas primeiras fases, a primeira proposta de quantificação por meio de equações foi feita por Wischmeyer e Smith (1969).

Posteriormente, o ANSWER (BEASLEY *et al.*, 1981), um dos primeiros programas computacionais de predição de sedimentos em eventos chuvosos, adotou a equação modificada por Foster *et al* (1976), na predição da produção de sedimentos pela enxurrada e a equação adaptada de Foster e Meyer (1972) para a previsão da quantidade de sedimentos transportados.

O WEPP, considerado pela comunidade científica como o mais moderno e completo sistema computacional nessa área, utiliza o modelo de Foster e Meyer (1972) no transporte de sedimentos em suspensão por erosão entressulcos. A

desagregação, transporte e deposição são calculados utilizando o modelo desenvolvido por Lane e Foster (1980). (CECÍLIO *et al.*, 2009; VERMA *et al.*, 2009; GONÇALVES, 2008; BULYGINA *et al.*, 2007; ELLIOT, 2004; DEMARIA *et al.*, 2001).

Diante disso, este estudo estabeleceu como objetivo calibrar e validar um modelo de previsão de produção de sedimentos provenientes de erosão entressulcos, utilizando equações da onda cinemática para a predição da vazão máxima do escoamento superficial, em evento chuvoso conjugado a equações de desagregação e capacidade de transporte de sedimentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados na bacia hidrográfica do ribeirão Salobra, localizada entre as coordenadas 20° 12' S e 20° 28' S e 54° 55' O e 55° 16' O. A região é considerada como de relevância nos estudos hidrossedimentológicos, por estar inserida na Bacia do Alto Paraguai, importante contribuidora da Bacia do rio Paraguai, Pantanal Mato-Grossense. O uso da terra predominante na área em estudo é a pecuária extensiva.

Os experimentos foram realizados num esquema fatorial completo, considerando três classes de solo, (Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), Latossolo Vermelho álico (LVa) e Neossolo Quartzarênico álico (RQa)) (Figura 2), em duas condições diferentes de uso (com cobertura de pastagem e sem cobertura), e três repetições. Com o intuito de homogeneizar as condições ambientais, foram selecionadas áreas onde o sistema de pastejo adotado era o mesmo. Para evitar a deformação das parcelas decorrentes do impacto das gotas da chuva sobre o solo exposto, nos dados coletados em experimentos sem cobertura, a pastagem foi retirada para a realização do teste na parcela.

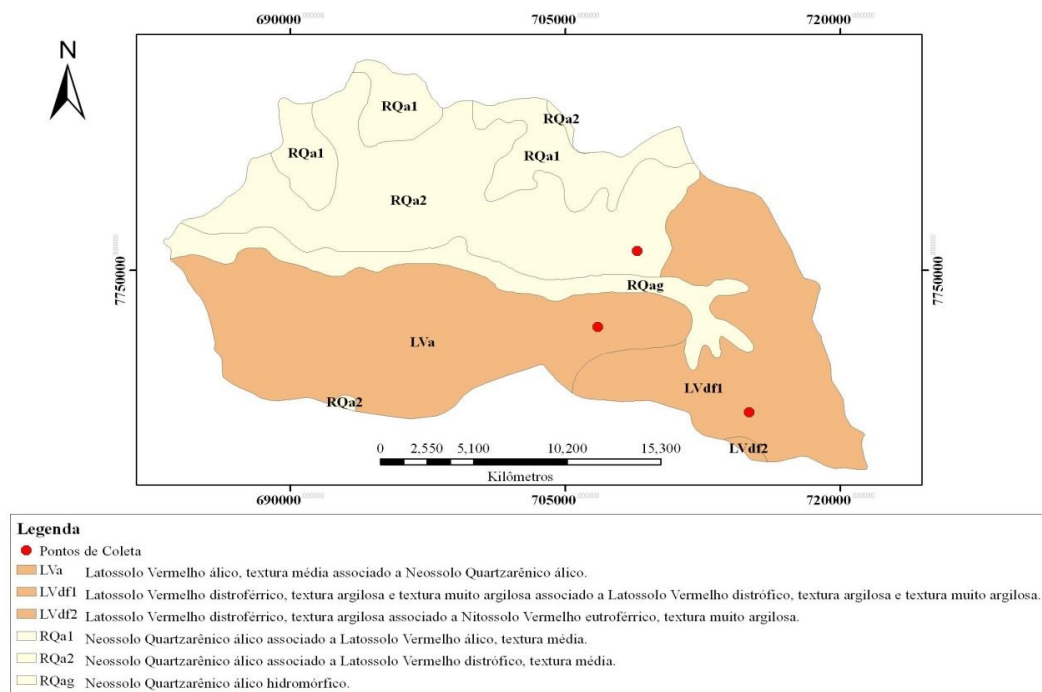


Figura 2: Bacia do Ribeirão Salobra destacando os pontos de coleta de dados. Adaptação da Classificação do Projeto RadamBrasil. (BRASIL, 1982).

Os escoamentos superficiais foram obtidos com o simulador de chuvas portátil InfiAsper (Figura 3). O equipamento produz chuva artificial com diâmetro médio volumétrico de gotas correspondente a 2,0 mm, por meio de dois bicos Veejet 80.150, posicionados a 2,30 m de altura do solo. A relação entre a energia cinética da chuva produzida pelo simulador e a energia cinética da chuva natural corresponde a valores acima de 90%.

A área da parcela experimental, que recebe a precipitação do simulador, é contornada por um delimitador de parcelas de formato retangular. O delimitador é construído em chapas de aço galvanizadas de 0,70m de largura, por 1,00m de comprimento e 0,16m de altura. Tal dispositivo, que permite a obtenção do volume de água escoado superficialmente, é instalado no campo com o comprimento maior a favor do declive.

As parcelas receberam pré-molhamento, 24 horas antes do início dos testes com o simulador de chuvas, com objetivo de oferecer condições de umidade uniformes a todas as parcelas, constituindo-se um pré-requisito antes da aplicação da chuva artificial. Para isso utilizou-se 20 gotejadores (vazão de 2 L.min⁻¹), dispostos em mangueira de polietileno, montada em formato retangular de 80cm de largura por 120 cm de comprimento, conectada a depósito com água. O tempo de molhamento foi o suficiente para saturar o solo sem, no entanto, ocorrer escoamento superficial. O simulador (figura 3) foi calibrado para aplicar chuva de 60 mm.h⁻¹ de intensidade. O equipamento é equipado com dois bicos Veejet 80.150 dispostos paralelamente e posicionados a 2,30 m de altura em relação ao solo. A pressão de operação nos bicos foi de 35,6 kPa, permitindo a aplicação de chuva cujas gotas apresentavam diâmetro médio volumétrico de 2,0 mm. A relação entre a energia cinética da chuva produzida pelo simulador e a energia cinética da chuva natural corresponde a valores acima de 90%.

Após a instalação e o acionamento do simulador, a coleta de amostras do volume escoado na parcela teste era feita, durante um minuto, utilizando-se frascos plásticos com capacidade para um litro, a intervalos de 2 minutos. A coleta da primeira amostra ocorria quando era verificado o início do escoamento de água na calha coletora do delimitador de parcelas, denominado como tempo zero de início de escoamento.

O tempo de duração do teste, em cada parcela, era de 60 minutos, totalizando 30 amostras de escoamento superficial. Destas amostras, uma a cada três, ou seja, a cada 6 minutos, era separado o recipiente com o volume coletado para posterior quantificação da massa de solo e a concentração de sedimento em laboratório. As amostras de material sólido obtidas eram, então, colocadas em estufa, a temperatura de 60° C, por período de tempo necessário à completa evaporação da água contida nas mesmas. A água retida nas amostras foi determinada e o valor obtido foi acrescido ao volume de água inicialmente registrado. A massa do material sólido foi obtida por pesagem. A lâmina de escoamento superficial foi calculada pela relação entre o volume de água escoado e a área da parcela teste que recebia a precipitação (0,70 m²).

Durante o período de operação do simulador, a pressão de serviço dos bicos foi monitorada a fim de evitar variações na intensidade de precipitação inicialmente calibrada e ajustada. E, ao final de cada teste na parcela experimental, efetuava-se a verificação da intensidade de precipitação real aplicada pelo simulador, medindo-se o volume precipitado em seis minutos, com auxílio de uma bandeja de calibração, que possui a mesma área da parcela teste. Quando as condições climáticas eram de ventos fortes ou precipitação durante os testes, era afixada uma lona em torno da estrutura inferior do simulador.

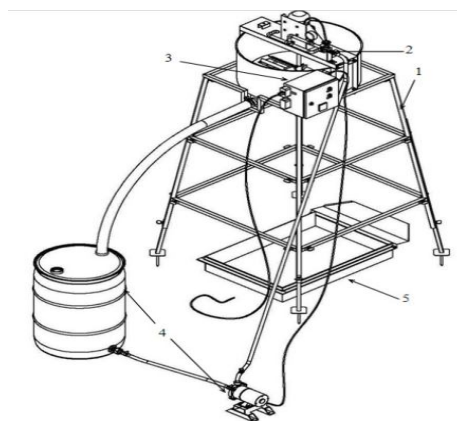


Figura 3: Simulador de Chuvas InfiAsper. (1) estrutura; (2) unidade de aplicação de água; (3) sistema elétrico; (4) bomba d'água; (5) coletor de escoamento. (ALVES SOBRINHO et al., 2008).

O modelo utilizado no tratamento dos dados coletados, sua calibração e validação são descritos a seguir.

a) Modelo

A simulação da produção e transporte de sedimentos foi feita pelas equações de desagregação e transporte nas encostas, em função do escoamento superficial e da desagregação do solo pelo impacto da chuva propostas por BYNE et. al. (2000):

$$D_R = 0,108.C.K.A.I^2 \quad (20)$$

Em que D_R = taxa de desagregação pelo impacto da chuva (kg min^{-1}); C = fator de uso e manejo; K = fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg acre}^{-1}\text{EI}^{-1}$); A = incremento da área (m^2); I = intensidade da chuva (mm min^{-1}).

No que se refere à desagregação e transporte nas encostas, em consequência do escoamento superficial, pode-se expressar, como:

$$D_f = 0,90.C.K.A.S.q \quad (21)$$

Tem-se D_f = taxa de desagregação devido ao escoamento superficial (kg min^{-1}); S = fator declividade; q = média do fluxo por unidade de comprimento ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$). O fator declividade é calculado por

$$S = 1,05 - 0,85\text{EXP}(-4\text{SEN}\theta) \quad (22)$$

Sendo θ o ângulo da declividade (graus).

O total de solo desagregado é:

$$D_T = D_R + D_f \quad (23)$$

Define-se D_T como total de solo desagregado (kg.min^{-1}).

O transporte de solo por espalhamento pela ação da chuva foi assumido como tendo sido desprezível. O transporte do solo pelo escoamento superficial foi descrito pelas relações:

$$T = 161 \cdot S \cdot q^{0,5} \quad \text{para } q \leq 0,046 \text{ m}^2\text{min}^{-1} \quad (24)$$

$$T = 16320 \cdot S \cdot q^2 \quad \text{para } q > 0,046 \text{ m}^2\text{min}^{-1} \quad (25)$$

Em que:

T é a taxa potencial de transporte de sedimentos ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$).

b) Calibração e Validação do Modelo

A calibração do modelo foi realizada mediante utilização de planilha eletrônica elaborada individualmente a cada repetição. Inicialmente, foi realizada a calibração do parâmetro K (erodibilidade do solo), utilizando-se os dados de área da parcela, declividade em graus, vazão máxima do escoamento superficial e os valores de sedimentos depois de atingida a vazão máxima, ou seja, durante todo o período após o tempo de concentração, onde a vazão do escoamento atinge a estabilidade. Inicialmente foram estabelecidos os valores de K das parcelas sem cobertura vegetal, visto que nessas parcelas o valor de C (fator de cobertura do solo) é unitário.

O modelo foi aplicado para cada tipo de solo em estudo, com valores de K propostos por Nunes e Cassol (2008), e, depois, iterativamente, até que o valor de K resultasse em valores de produção de sedimentos aproximados aos valores médios observados, ou seja, utilizando-se a técnica de aproximação por Quadrados Mínimos. Determinados os valores de K, da mesma forma, foram determinados os valores de C para as unidades experimentais sob pastagem.

Os modelos de predição de produção de sedimentos, provenientes de erosão entressulcos, são úteis na avaliação dos impactos ambientais decorrentes das atividades exercidas na bacia. Isso ocorre, também, na mensuração dos benefícios decorrentes da adoção de boas práticas, com o intuito de conservação do solo e da água, tais como, plantio direto, construção de terraços e bacias de retenção; sendo, por isso, o objetivo principal a precisão na predição da quantificação da produção de sedimentos e também a calibração dos parâmetros envolvidos no processo.

Os experimentos foram realizados em três classes de solo e em duas condições de uso distintas para que se pudesse avaliar o desempenho do modelo em diferentes situações e se disponibilizasse valores de parâmetros calibrados em situações diversas.

No presente trabalho, no processo de validação foram utilizados parâmetros estatísticos propostos por Loague e Green (1991), Lengnick e Fox (1994). Os valores de RMSE, CD, EF, CRM, ME e MD foram obtidos, caso a caso, como descrito por Loague e Green (1991), para experimentos inteiramente casualizados. Na validação do modelo, considerou-se que, quando os valores preditos e observados são os mesmos, os parâmetros estatísticos RMSE, CD, EF, CRM, ME e MD assumem valores aproximados a 0; 1; 1; 0; 0 e 0, respectivamente.

Além disso, conforme proposto Martins Filho *et. al.* (2003), por equações lineares significativas a 1% de probabilidade foram obtidas entre os valores preditos pelo modelo e os observados nos ensaios experimentais. Aplicando-se o teste t, foi verificado se o intercepto e o coeficiente angular das equações lineares não diferiram de 0,0 e 1,0, respectivamente, a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O parâmetro erodibilidade do solo está diretamente relacionado com a textura (Quadro 4) e estrutura do solo.

Quadro 4: Percentuais das frações mineirais dos solos LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa-Latossolo Vermelho álico e RQa-Neossolo Quartzarênico álico.

Classe de solo		LVdf	LVa	NQa
Classe textural ABNT	areia média	3,7	8,38	7,38
	areia fina	39,69	78,35	79,67
	silte	26,93	5,86	6,65
	argila	29,68	7,41	6,3

Intervalos ABNT Argila < 0.005; Silte de 0.005 a 0.05; Areia fina de 0.05 a 0.42; Areia média de 0.42 a 2; Areia grossa de 2 a 4.8 e Pedregulho >4.8.

Apesar de os Latossolos apresentarem características físicas que favorecem sobremaneira o seu uso (Oliveira *et al.*, 2004), quando são submetidos ao uso intenso, podem sofrer degradação da estrutura e alteração no tamanho dos agregados (CARPENEDO; MIELNICKZUK, 1990), reduzindo sua estabilidade (Nóbrega *et al.*, 2001). Cada tipo de agregado possui uma gênese própria refletida em seu tamanho, forma, composição e estabilidade (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004).

Vitorino *et al.* (2003) avaliaram a relação da composição mineralógica e química do solo com a estabilidade de agregados do tamanho de silte, onde foram utilizadas amostras de horizontes A e B de diversos solos da Região Sudeste do Brasil. Os autores concluíram que as composições mineralógica e química dos solos têm efeito marcante na dispersão de argila, com reflexos na fração silte, pois maiores teores de gibbsita refletiram em maior estabilidade dos agregados do tamanho de silte, enquanto a caulinita proporcionou efeito inverso. Foi também observado que as

formas de Al determinadas na fração pseudo-silte estão associadas à maior dificuldade de dispersão da fração argila dos solos.

Neste caso, provavelmente, a argila tenha funcionalidade de silte. A fração silte desempenha um importante papel no encrostamento que dificulta a infiltração de água. Em muitos solos brasileiros, com bastante evidência nas áreas de cerrado, principalmente em Latossolos Vermelhos férricos, é comum a formação de um pequeno encrostamento (RESENDE *et al.*, 2002).

Além disso, os Latossolos caulíníticos apresentam sua configuração determinada pela estrutura em blocos e com menor estabilidade de agregados em água. Por isso são mais compactados, fazendo com que esses solos se apresentem menos permeáveis, e consequentemente caracterizem-se com maior tendência à erosão laminar (FERREIRA *et al.*, 1999).

Os Neossolos Quartzarênicos, que apresentam textura areia ou areia franca nos horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo, e estrutura granular decorrente dos reduzidos teores de argila e matéria orgânica, e menos agregados tornam-se mais suscetíveis aos efeitos dos processos erosivos laminares (RESENDE *et al.*, 2002).

Neste estudo, foram determinados, primeiramente, os valores do parâmetro K, que foram 0,0681; 0,0669 e 0,0871 Mg acre⁻¹EI⁻¹ (0,6058; 0,5951 e 0,7748 x 10⁶kg s m⁻⁴) para as classes de solo LVdf; LVa e RQa, respectivamente. (Quadro 5).

Nunes e Cassol (2008) obtiveram o fator de erodibilidade do solo em entressulcos pela média entre o fator K do solo natural e o do solo cultivado, pois não observaram diferença significativa em relação ao fator K entre esses tipos de uso do solo. O fator K determinado experimentalmente nos solos LVaf, LVdf e LVD foi, respectivamente, de 0,76 x 10⁶; 0,97 x 10⁶ e 1,48 x 10⁶ kg s m⁻⁴.

Em estudos semelhantes de campo, Braidá e Cassol (1996) obtiveram um fator K de 5,1 x 10⁶ kg s m⁻⁴ em um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Cassol e Lima (2003) encontraram um fator K de 2,83 x 10⁶ kg s m⁻⁴ para um Argissolo Vermelho distrófico típico franco-argiloarenoso no Rio Grande do Sul. E Cassol *et al.* (2004) obtiveram o fator K médio de 2,55 x 10⁶ kg s m⁻⁴, para um Argissolo Vermelho distrófico típico em ensaios realizados no campo e no laboratório.

Quadro 5: Parâmetros calibrados de modelo de predição de produção de sedimento de erosão em entressulcos sob chuva simulada em três tipos de solo: LVdf-Latossolo Vermelho distroférico; LVa – Latossolo Vermelho álico e RQa- Neossolo Quartzarênico álico, sob pastagem e sem cobertura. Valores médios de 3 repetições.

Tipo de solo/uso	K	C	Cobertura Vegetal Massa Seca (g.m ⁻²)	Produção de Sedimentos (g.min ⁻¹)	
				Previsto	Observado
LVdf sob pastagem	0,0681	0,0910	689,65	0,1716	0,1717
LVdf sem cobertura	0,0681	1,0000	0,00	1,3018	1,3023
LVa sob pastagem	0,0669	0,0574	909,71	0,0700	0,0700
LVa sem cobertura	0,0669	1,0000	0,00	1,1981	1,1980
RQa sob pastagem	0,0871	0,1217	530,19	0,1726	0,1727
RQa sem cobertura	0,0871	1,0000	0,00	1,5960	1,5960

K: fator erodibilidade do solo da USLE (Mg.acre⁻¹.EI⁻¹); C: fator uso e cobertura do solo da USLE, adimensional.

Silva et al (2010) apresentam os valores de C 0,05; 0,01; 0,001 e 0,005 para pastagens degradadas, sem manejo, com manejo e nativa respectivamente, para usos na região de São Carlos/SP. Em estudos realizados na região do Alto Paraíba/PI, em função do tipo de cultura e sua abrangência, bem como da área de pastagens do município, os valores de C para a agropecuária variam de 0,019 à 0,024, com média de 0,0215 (FARINASSO et al., 2006). Bertoni e Lombardi Neto (2005) preconizam o valor de C 0,07 como médio para o uso pastagem.

Os valores de C, calculados neste trabalho, são de mesma grandeza dos trabalhos citados e apresentam-se coerentemente, sendo maiores nas unidades experimentais com menor quantidade de cobertura vegetal, assim como os valores de K, que também foram semelhantes aos apresentados em estudos realizados nas mesmas classes, mostrando-se maiores, se maior for a susceptibilidade dos solos, em função das características dos solos estudados.

Os coeficientes de determinação (CD) do modelo nos diferentes tratamentos foram todos muito próximos de 1,0 (Quadro 6), valor desejado. Dos valores dos coeficientes de massa residual (RM), apenas o obtido para NQa sem cobertura vegetal houve leve superestimativa, sendo que, em todos os outros tratamentos, os CRM foram iguais a zero. Segundo Zacharias *et al.* (1996), valores iguais ou próximos de zero reforçam a precisão do modelo analisado.

Os erros nas predições da vazão máxima do escoamento superficial foram analisados pelo parâmetro RMSE, que representa o erro-padrão das estimativas normalizado e que não foi superior a 0,084%. Observou-se baixa variação desse indicador entre os tratamentos, sempre com percentuais próximos a zero, bem como os ME, erros máximos cometidos pelo modelo e os MD, diferença média, que tiveram suas variações apenas na casa do milésimo. Os resultados obtidos com esses três indicadores demonstram que o modelo foi eficiente na predição de produção de sedimentos nas três classes de solo LVdf, LVa e RQa, sob pastagem e sem cobertura vegetal, sendo comprovado o bom desempenho em diferentes condições, indicando calibração adequada para as condições do estudo.

Quadro 6: Parâmetros estatísticos do desempenho do modelo de predição de produção de sedimentos em três tipos de solo, LVdf-Latossolo Vermelho distroférico, LVa- Latossolo Vermelho álico, RQa- Neossolo Quartzarênico álico, sob pastagem e solo sem cobertura vegetal. Valores médios de três repetições

Tipo de solo/uso	Parâmetros Estatísticos ⁽¹⁾					
	CD	EF	RM	RMSE	ME	MD
				%	g.min ⁻¹	g.min ⁻¹
LVdf sob pastagem	1,003	1,000	0,000	0,037	0,000	0,000
LVdf sem cobertura	0,999	1,000	0,000	0,044	-0,002	-0,002
LVa sob pastagem	1,000	1,000	0,000	0,046	0,001	0,001
LVa sem cobertura	0,997	1,000	0,000	0,035	0,001	0,001
RQa sob pastagem	0,999	1,000	0,000	0,084	0,000	0,000
RQa sem cobertura	0,998	1,000	0,032	0,032	0,000	0,000

(1)CD – coeficiente de determinação; EF – eficiência do modelo; CRM – coeficiente de massa residual; RMSE – erro-padrão das estimativas normalizado; ME – erro máximo; e MD- diferença média.

*- não difere de zero, estatisticamente, pelo teste t a 5%.

Testes adicionais de coincidência, entre valores preditos e observados, foram realizados, segundo Lengnick e Fox (1994). O teste t, aplicado aos resultados das análises de regressão sobre as equações lineares significativas a 1%, obtidas entre os valores observados e preditos, indicaram que o intercepto e o coeficiente angular das equações lineares ajustadas não diferiram de 0,0 e 1,0, respectivamente (Quadro 7).

Diante dos resultados das análises estatísticas pode-se inferir que existe boa confiabilidade e acurácia das estimativas obtidas pelo modelo nos tratamentos avaliados.

A calibração do modelo resultou em estimativas dos parâmetros empíricos que podem ser utilizados nesse e nos demais modelos baseados em leis físicas e empíricas, tais como, a USLE, MUSLE e RUSLE. Esses parâmetros são indispensáveis no uso de modelos de predição para as condições estudadas ou semelhantes.

Quadro 7: Estimativas dos parâmetros e estatísticas de regressão entre os valores observados e os estimados de vazão máxima de escoamento superficial para os solos LVdf, LVa e RQa sob pastagem e sem cobertura vegetal, respectivamente.

Tipo de solo/uso	Resultados da análise de regressão		
	Intercepto	Coefficiente angular	r^2
LVdf sob pastagem	0,000259844#	0,998386114!	0,99
LVdf sem cobertura	-0,001347286#	1,000620965!	0,99
LVa sob pastagem	-1,77505E-05#	1,000620965!	0,99
LVa sem cobertura	-0,001518036#	1,001379136!	0,99
RQa sob pastagem	-0,000143002#	1,000465633!	0,99
RQa sem cobertura	-0,001388172#	1,000839838!	0,99

não diferem de zero, estatisticamente, pelo teste t a 5%

! não diferem de um, estatisticamente, pelo teste t a 5%

4 CONCLUSÃO

O modelo de Byne (2000) foi eficiente e acurado na previsão de produção de sedimentos pelo escoamento superficial em erosão laminar nas condições ambientais estudadas.

A calibração do modelo disponibiliza valores de erodibilidade do solo, K , para os solos LVdf; LVa e RQa, e de fator de uso e cobertura do solo, C , sob cobertura de pastagem.

5 LITERATURA CITADA

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. Superintendência de Usos Múltiplos, Brasília: ANA, 2008.

ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J. A. A portable integrated rain fall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v.24, n.2, p.163-170, 2008.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. **Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos**. Ci. Rural, 34:609-617, 2004.

BYNE, W. Predicting Sediment Detachment and Channel Scour in The Process-Based Planning Model Answers-2000. **Thesis** Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Biological Systems Engineering. Blacksburg, Virginia. p. 273, April, 2000.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. **ANSWERS**: A model for watershed planning. Trans. of the ASAE 23(4):938-944, 1981. Disponível em <<http://www.bse.vt.edu/ANSWERS/Download/ANSWERSManual2ndEd.pdf>>. Acesso em 28 mar 2010.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO. F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 20:127-134, 1996.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SF.21 Campo Grande; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 416 p., 1982.

BULYGINA, N. S.; NEARING, M. A.; STONE, J. J.; NICHOLS, M. H. DWEPP: a dynamic soil erosion model based on **WEPP** source terms. Earth Surface Processes and Landforms V. 32, Issue 7. Pages: 998–1012, 2007.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.14, p.99- 105, 1990.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesq. Agropec. Bras.**, 38:117-124, 2003.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHARD, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesq. Agropec. Bras**, Brasília, v.39, n.7, p.685-690, jul. 2004.

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

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 latossolo vermelho distroférrico típico em Campinas, SP. **VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão**, Goiânia-GO, 2001.

ELLIOT, W. J. **WEPP** Internet interfaces for forest erosion prediction. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. v. 40, issue 2, Pages: 299–309, 2004.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba– PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 7, nº 2. p. 73-85. 2006.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 23:507-514, 1999.

FLANAGAN, D. C.; J. C. ASCOUGH II, W. F.; GETER, O. DAVID. **Development of a hillslope Erosion module for the object modeling system**. ASAE Paper No. 052012. St. Joseph, Mich.: ASAE, 1995. <http://www.bse.vt.edu/ANSWERS/Download/ANSWERSManual2ndEd.pdf>. Acesso em 28 mar 2010.

FOSTER, G. R.; L D. MEYER. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: H.W. Shen (Ed), **Sedimentation: Symposium to honor Professor H.A. Einstein**. Ft. Collins, CO. Chapter 12:12.1-12.9, 1972.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D.; ONSTAD, C. A. An erosion equation derived from basic erosion principles. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 19, n. 4, p. 678-682, 1976.

GABRIELS, D.; GHEKIERE, G.; SCHIETTECATTE, W.; ROTTIERS, I. **Assessment of USLE cover management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed**. Belgium: Soil & Tillage Research. 74: 47-53. 2003.

GALDINO, S.; VIEIRA, L. M.; PELLEGRIN, L. A. Impactos **Ambientais e Socioeconômicos na Bacia do Rio Taquari** – Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal. 356 p. 2005.

GONÇALVES, F. A. WEPP model validation in the prediction of water erosion for edaphic climatic conditions in the region of Viçosa-MG. **Tese** (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. 116f, 2008.

LANE, L. J.; FOSTER, G. R. Chapter 11. **Concentrated flow relationships**. In: Knisel, W. G. (Ed), **CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems**. USDA. Conservation Research Report No. 26. 640 pp, 1980.

- LENGNICK, L. L.; FOX, R. H. Simulation by NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I. Soil nitrate. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, n.1, p.167-175, 1994.
- LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v.7, n.1, p. 51-73, 1991.
- MARTINS FILHO, M. V.; CAMPOS, M. P.; IZIDORIO, R.; COTRIN, F. B.; SERRA, E. A.; AMARAL, N. S.; SOUZA, Z. Modelagem do processo de erosão entressulcos para latossolos de Jaboticabal - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p.9-20, jan. 2003.
- MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 12, n. 6, p. 754-758, 1969.
- NÓBREGA, J. C. A.; LIMA, J. M.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O. & MOTTA, P. E. F. Fósforo e micorriza na estabilidade de agregados em amostras de Latossolos cultivados e não cultivados. **Pesq. Agropec. Bras.**, 36:1425-1435, 2001.
- NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32:2839-2845, Número Especial. 2008.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. de S.; CURTI, N.; RESCK, D. V. S. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após 20 anos de manejo e cultivo do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa (MG), v. 28, n. 2, p. 335-344, 2004.
- ONSTAD, C. A.; FOSTER, G. R. Erosion Modeling on a Watershed. *Transactions of the ASAE*. 18(2), p.288-292. 1975.
- RESENDE, M. ;CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: Base para distinção de Ambientes. NEPUT. Viçosa – MG, 338 p., 2002.
- SILVA, F. G. B.; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim – SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Eng Sanit Ambient**. v.15 n.2. p. 141-148. 2010.
- VERMA, A. K.; JHA, M. K.; MAHANA, R. K. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. **Paddy Water Environ** v.8. p. 131–144, 2009.
- VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURTI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. **Pesq. Agropec. Bras.**, 38:133-141, 2003.
- ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C. D.; COAKLEY, C. W. Robust quantitative techniques for validating transport models. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, n.1, p.98-102, 1996.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA COMPUTACIONAL DE APLICAÇÃO DE MODELO DE PREDIÇÃO DE EROÇÃO ENTRESSULCOS - HEROS

RESUMO: Este trabalho propõe um programa que prediz o volume do escoamento superficial pela equação da onda cinemática (KWE) com solução matemática utilizando elementos de diferenças finitas (DEM) conjugado a equações de produção e capacidade de transporte de sedimentos. Os parâmetros calibrados e ambos os modelos validados para as condições estudadas tem o objetivo de uma melhor precisão na predição do aporte de sedimentos resultantes de processo erosivo entressulcos a partir de informações de uma bacia hidrográfica. Os dados fisiográficos para alimentação do modelo foram obtidos em cartas topográficas e imagens de satélite disponibilizadas em um SIG. O uso de modelos de predição dos impactos do uso e manejo do solo sobre o comportamento hidrológico é imprescindível no estudo de mensuração da influência dos fatores intervenientes no processo erosivo e no planejamento adequado da adoção de boas práticas com objetivo de conservação dos recursos naturais, solo e água, preponderantes na otimização dos dividendos das atividades agropecuárias.

ABSTRACT: This paper proposes a computer program which predicts the volume of the superficial runoff from the kinematic wave equation (KWE) with mathematical solution using elements of finite differences (FD) coupled to equations of production and transport capacity of sediments. The calibrated parameters and both validated models for the studied conditions have the goal of a better accuracy in predicting the amount of sediment resulting from interrill erosion process from the information of a watershed. Physiographic data for feeding the model were obtained from topographic maps and satellite images available in a GIS. The use of models to predict the impacts of soil use and management on the hydrological behavior is essential in the measurement study of the influence of intervening factors on the erosion process and the proper planning of adopting good practices in order to conserve natural resources, soil and water preponderant in the optimization of the dividends of agricultural activities.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os produtores rurais, técnicos e industriais encontram-se conscientes da importância da adoção de técnicas de desaceleração do processo erosivo. Isto porque existe consenso que as atividades exercidas em determinada área podem afetar a dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica como um todo, causando os prejuízos tanto nas áreas rurais quanto nas urbanas, decorrentes da redução da fertilidade, assoreamento de rios, enchentes, redução na qualidade e quantidade da água. Tais afirmações nos permitem observar que o planejamento do uso da terra e da água passa a ser uma importante atividade de gestão pública, atendendo, assim, a uma necessidade premente da sociedade contemporânea.

Em função disso, modelos matemáticos de predição dos efeitos negativos decorrentes da aceleração do processo erosivo e mensuração da magnitude dos fatores intervenientes neste processo em escala de bacia hidrográfica tornam-se ferramentas indispensáveis na execução deste planejamento. (ANA, 2008).

A principal dificuldade em selecionar práticas de manejo para uma determinada área é a variação da eficácia das diferentes técnicas de conservação de solo e água, que depende de condições ambientais próprias, tais como, tipo de solo, clima, topografia, formas de uso da terra. Consequentemente, para a adoção de técnicas realmente efetivas no controle do processo erosivo, são necessários meios de avaliação das técnicas adotadas no espaço e no tempo. (BLANCANEUX et al., 1998)

Quando se estuda o fenômeno da erosão em escala de bacia, deve-se considerar a existência de áreas com características próprias dentro deste espaço, as quais possibilitam diferentes comportamentos hidrológicos sob os mesmos eventos chuvosos. Além disso, é comum que ocorram em diversos pontos da bacia, eventos chuvosos de diferentes magnitudes (TUCCI, 2005).

Considerando toda essa diversidade de eventos, é simples concluir que, ao se aplicar modelos matemáticos de predição dos processos erosivos, não basta que estes sejam apenas calibrados e validados. É necessário, ainda, que os sistemas

computacionais que processam tais modelos sejam programados de forma a abranger a máxima variação possível nos dados coletados dentro da bacia hidrografia, em diversos eventos chuvosos. (TUCCI, 2005).

Os modelos matemáticos científicos são geralmente estruturados para fornecer uma descrição matemática bem próxima da realidade, a partir da inclusão dos principais fenômenos de interesse. Qualquer estudo relativo à distribuição espacial e temporal de um constituinte em um meio físico tem como ponto de partida uma lei de conservação. Tal lei é estabelecida segundo um ponto de vista físico e, então, colocada de forma matemática conveniente. O processo de traduzir conceitos físicos ou biológicos de qualquer sistema por um conjunto de relações matemáticas e a manipulação dos sistemas assim obtidos, designa-se por uma análise de sistemas. O sistema matemático, denominado modelo, depende das características específicas do sistema a ser modelado, o que também determina a sua estrutura. (PORTO, 1991).

Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos: os estocásticos ou determinísticos de acordo com o tipo de variáveis utilizadas; empíricos ou baseados em processos segundo o tipo de relações entre essas variáveis; discretos ou contínuos de acordo com a forma de representação dos dados; pontuais ou distribuídos em função da existência ou não de relações espaciais e estáticos ou dinâmicos quando há dependência temporal (TUCCI *et al.*, 2005).

Para que o modelo seja estocástico deve contar com a aleatoriedade em pelo menos uma das variáveis envolvidas. Caso os conceitos de probabilidade não sejam considerados durante a elaboração de um modelo, ele será determinístico. Os modelos empíricos utilizam relações baseadas em observações, sendo em geral de estrutura simples e pouco robustos, de uso restrito para a região e condições para as quais as relações foram estimadas. Os modelos baseados em processos são mais complexos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado. Esses modelos podem ser subdivididos em modelos conceituais, que fazem uso de fórmulas empíricas, mas que descrevem o sistema segundo as leis da física, ou modelos físicos que utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos. Seus parâmetros possuem um significado físico, podendo, portanto, ser estimados por medidas reais. Os modelos podem ser ainda, classificados como estáticos, quando um conjunto de dados de entrada produz um resultado oriundo da solução das

equações do modelo em um único passo, ou dinâmicos, que utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração. (RENNÓ; SOARES, 2003).

Paiva *et. al.*(2003) apresentam duas correntes no que tange à modelagem dos fenômenos do ciclo hidrológico: de parâmetros gerais ou concentrados e de modelos de parâmetros distribuídos. Nos parâmetros concentrados (*lumped-parameter*), ou caixa preta, os parâmetros consideram a bacia hidrográfica como uma entidade singular homogênea, em que as entradas são representadas pelo excesso da precipitação e as saídas pelo hidrograma na foz, sem considerar a variabilidade espacial. Essas formulações simplificadas do fenômeno fazem com que o modelo careça de efetivo significado espacial, e que os diversos programas que os implementam tenham características próprias, restringindo-os a regiões geográficas específicas.

Na vertente dos modelos distribuídos, procura-se captar, tanto quanto possível, a variabilidade espacial da bacia hidrográfica, dividindo-a em áreas regulares menores, em geral quadradas, ou sub-bacias, onde os parâmetros são considerados uniformemente. O fenômeno hidrológico é simulado dentro de cada subárea, adicionado ao de outras subáreas e o resultado é propagado em direção à foz. (PAIVA *et. al.*, 2003).

Neto (2000) observa que os modelos distribuídos vêm assistindo ao interesse dos pesquisadores com a melhoria das tecnologias computacionais. Enquanto os modelos concentrados proporcionam melhores desempenhos computacionais, os modelos distribuídos, normalmente, apresentam melhores resultados.

Destaca-se que a escolha de um determinado tipo de modelo deve ser feita com base na aplicação que se deseja e na disponibilidade de dados básicos. O uso de modelos hidrológicos distribuídos físicos se baseia no argumento de que esse tipo de modelo é o que melhor representa os processos físicos dentro de uma bacia hidrográfica e é inerentemente superior a um modelo concentrado. Por outro lado, necessariamente, requerem uma quantidade bastante extensa e detalhada de informações sobre a bacia de modo a realizar uma boa parametrização do modelo. Para estudos hidrológicos, que analisam fluxos superficiais, os modelos concentrados têm pouca aplicabilidade (TUCCI *et al.*, 2005).

Como a topografia é o principal fator determinante nos processos de transporte de materiais, os modelos que tratam da distribuição espacial da água na bacia hidrográfica requerem dados baseados nas características topográficas dessa bacia, tais como: limites das bacias e sub-bacias, inclinação do terreno, comprimento de rampa, forma do declive, orientação das vertentes, características dos canais de drenagem e conexões entre áreas que definirão como a água se move através da superfície. (RENNÓ; SOARES, 2003).

O balanço vertical (chuva, interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação e umidade do solo) depende da classe, uso do solo e geologia, enquanto os processos de escoamento (horizontais) dependem da drenagem da área, que é baseado nas condições de relevo. Numa bacia, esses sistemas não são uniformes nos mesmos padrões. Portanto, já no final da década de 1990 surgem os modelos distribuídos mais modernos onde são separadas as discretizações desses dois processos, nos quais o escoamento é representado por módulos quadrados (chamados de “Blocos” ou, atualmente, de “mini-bacias”), definidos de acordo com o relevo superficial em toda a bacia, classificada de acordo com o solo, seu uso e geologia, denominado de Unidade de Resposta Hidrológica (URH). Em cada bloco, poderão existir todos os URHs, em que toda a bacia é discretizada. Para cada URH, são feitos os balanços drenados nos blocos. (TUCCI, 2011).

Dentre os sistemas computacionais com modelos de parâmetros distribuídos para a predição de vazão de escoamento superficial e produção de sedimentos, destacam-se: ANSWERS (HUGGINS e MONKE, 1966, BEASLEY e HUGGINS, 1981; DILLAHA e BEASLEY, 1983, BOURAOUI *et al*, 1997); FESHM (ROSS *et al*, 1982); AGNPS (YOUNG *et al*, 1987); SHE (ABBOTT *et al*, 1986) e WEPP (FLANAGAN *et al*, 1995).

Devido à indisponibilidade de algumas informações das bacias hidrográficas indispensáveis ao uso de sistemas prontos e principalmente às dificuldades nos estudos dos diversos fatores intervenientes no processo erosivo e dos impactos das diferentes técnicas e práticas de controle do processo, muitos pesquisadores optam por elaborar sistemas de aplicação de modelos, tais como: Prusky (2001), Tayfur e Singh (2006), Venkata *et al*. (2008) e Naik *et al*. (2009).

Steffen (1997) desenvolveu um modelo unidimensional de escoamento superficial baseado em informações topográficas e que divide a bacia hidrográfica

em faixas de fluxo, apresentando grande facilidade para a introdução das variações espaciais e temporais dos parâmetros e dos processos de precipitação e infiltração. A simulação unidimensional do escoamento superficial em bacia hidrográfica é baseada na teoria da onda cinemática com solução matemática por elementos de diferenças finitas e a adimensionalização de variáveis. Este modelo será utilizado no sistema computacional proposto neste trabalho.

O escoamento na superfície do solo se caracteriza como de pequena profundidade e grande largura. Dessa forma, o modelo da onda cinemática é o mais utilizado quando se quer representar o escoamento superficial em bacias, considerando-se que esse escoamento ocorre em planos, onde a declividade predomina em relação aos demais termos.

Vale esclarecer que o modelo desta pesquisa é determinístico, com parâmetros distribuídos, por ser a melhor arquitetura de modelos ao se estudar eventos hidrológicos em escala de bacia, de estrutura dinâmica, por apresentar a possibilidade de variação espacial e temporal em sua aplicação, com o uso de equações de onda.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, propor um programa computacional para modelagem de previsão de escoamento superficial, desagregação e transporte de sedimentos provenientes de erosão entressulcos em escala de bacia hidrográfica, a partir de equações de onda cinemática conjugados a equações de desagregação e transporte de sedimentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados na bacia hidrográfica do ribeirão Salobra, localizada entre as coordenadas 20° 12' S e 20° 28' S e 54° 55' O e 55° 16' O. A região é considerada como de relevância nos estudos hidrossedimentológicos, por estar inserida na Bacia do Alto Paraguai, importante contribuidora da Bacia do rio Paraguai, Pantanal Mato-Grossense. O uso da terra predominante na área em estudo é a pecuária extensiva.

a) Modelo

O sistema proposto é o escoamento em regime não permanente, que considera a variação no tempo e no espaço das variáveis que o retratam. O método de diferenças finitas é especialmente adaptável à avaliação do impacto nas mudanças de uso do solo no fluxo de sedimentos, desde que a área de drenagem possa ser dividida em um número finito de subáreas ou elementos. As propriedades de um ou de todos os elementos podem ser alteradas para simular o efeito sobre as respostas hidrológicas do sistema completo da bacia. Este modelo utiliza, além das equações da continuidade e da quantidade de movimento, a equação de Manning para relacionar a vazão com a profundidade e a declividade de fundo. Quanto à solução numérica das equações, a variável dependente no escoamento superficial é a vazão por unidade de largura (q). A precipitação pode ser variada no tempo e no espaço para a simulação dos eventos. As equações do modelo são apresentadas na ordem de solução. A equação da continuidade:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (26)$$

Em que:

Q = vazão, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; A = área da seção molhada, m^2 ; x =distância longitudinal, m ; t = tempo, s ; q_1 = entrada ou saída de vazão, por unidade de largura de contribuição lateral, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$.

A equação da quantidade de movimento:

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} = (S_0 - S_f) \quad (27)$$

Sendo: g = aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$); y = profundidade do escoamento (m); S_0 = declividade do fundo ($m.m^{-1}$); S_f = declividade da linha de fricção ($m.m^{-1}$).

Essas equações são de difícil solução analítica, devendo-se empregar métodos numéricos, desprezando-se os termos inerciais e de pressão na equação dinâmica, considerando assim, que a declividade da linha de energia S_f no trecho seja igual à declividade de fundo S_0 , o que resulta para a equação da quantidade de movimento em:

$$S_f = S_0 \quad (28)$$

Na equação de Manning a profundidade é substituída pela área e a seguinte relação:

$$A = \alpha_0 \cdot Q^{\beta_0} \rightarrow b \cdot y = \alpha_0 \cdot (b \cdot q_0)^{\beta_0} \rightarrow q_0 = \alpha_0 \cdot y^m \quad (29)$$

Em que :

α_0 e m são parâmetros.

Assim, a equação da continuidade é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial q_0}{\partial x} + \frac{1}{\alpha_0^m m q_0^{1-\frac{1}{m}}} \cdot \frac{\partial q_0}{\partial t} = \begin{matrix} i_e & \text{para} & t \leq t_d \\ -f_c & \text{para} & t > t_d \end{matrix} \quad (30)$$

Em que: b = largura do escoamento (m); y_s = altura do escoamento (m); i_e e f_c = precipitação efetiva ou infiltração no plano ($mm.h^{-1}$).

Conforme metodologia apresentada por Stephenson e Meadows (1986), as variáveis (x , q , t) podem ser adimensionalizadas (X , T , P), considerando que i_e

representa a precipitação efetiva no plano e t_c o tempo de concentração desse plano. Ao trabalhar com diversos planos e bacias, torna-se necessário a adoção de um tempo de referência t_R em substituição ao t_c .

$$X = \frac{x}{L_0} \quad \text{logo} \quad x = X \cdot L_0 \quad (31)$$

$$F = f_c / i_R \quad (32)$$

$$P = \frac{q_0}{(i_R \cdot L_0)} \quad \text{logo} \quad q_0 = P \cdot i_R \cdot L_0 \quad (33)$$

$$T = \frac{m \cdot t}{t_R} \quad \text{logo} \quad t = \frac{t_R \cdot T}{m} \quad (34)$$

No caso de variar a precipitação efetiva i_e no tempo, adota-se também uma precipitação de referência i_R . Ao utilizar-se a precipitação efetiva, considera-se $f_c = 0$ e $F = 0$; isto significa que a parcela referente à infiltração é desprezada.

A partir das equações definidas para o escoamento superficial nos planos, chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{L_0}{\alpha_0^{1/m} \cdot P^{1-1/m} \cdot i_R^{1-1/m} \cdot L_0^{1-1/m} \cdot t_R} \frac{\partial P}{\partial T} = \frac{i_e}{i_R} \quad (34)$$

Assim, t_R poderá ser obtido na forma:

$$t_R = \left(\frac{m}{NIT \cdot \Delta t} \right) * t_B \quad (35)$$

Em que:

NIT = número de intervalos de tempo; t_B = tempo de base do hidrograma;

Δt = intervalo de tempo; t_R = tempo adimensional de duração da chuva.

Estabelecendo-se $K_0 = \frac{i_e}{i_R}$, deduz-se que:

$$\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{t_{cR}}{t_R \cdot P^{0.4}} \frac{\partial P}{\partial T} = K_0 \quad (36)$$

Em que:

t_{c_R} = é o tempo de concentração para cada plano, calculado utilizando a precipitação de referência i_R :

$$t_{c_R} = \left(\frac{L_0}{\alpha_0} \right)^{1/m} \cdot \frac{1}{i_R^{1-1/m}} \quad (37)$$

Aplicando o método numérico das diferenças finitas, conforme discretização esquematizada na Figura 5, e considerando $P = P_2$; ou P_3 ou P_1 , ou relações entre valores conhecidos. Tem-se:

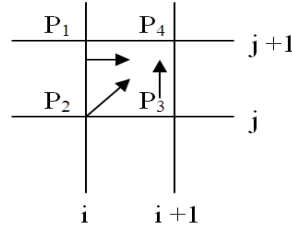


Figura 5: Esquema de discretização pelo método explícito das diferenças finitas das variáveis adimensionalizadas para o escoamento nos planos.

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{P_4 - P_1}{\Delta X} \quad (38)$$

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{P_4 - P_3}{\Delta T} \quad (39)$$

Isolando P_4 na equação, obtém-se o seu valor discretizado da equação do plano no tempo e espaço seguintes:

$$P_4 = \frac{K_0 \Delta X + P_1 + \beta P_3}{(1 + \beta)} \quad (40)$$

$$\beta = \frac{\Delta X T_c}{t_R \Delta T P_2^{0,4}} \quad (41)$$

Para a simulação da produção e transporte de sedimentos, foi feito um complemento no método, incluindo equações de desagregação do solo pelo impacto das gotas de chuva e de arraste pelo escoamento superficial. No o escoamento nas encostas, a desagregação do solo pelo impacto da chuva é estimada pela equação (BYNE, 2000), utilizada, calibrada e validada.

$$D_R = 0,108.C.K.A.I^2 \quad (42)$$

Em que D_R = taxa de desagregação pelo impacto da chuva (kg min^{-1}); C = fator de uso e manejo; K = fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg acre}^{-1}\text{EI}^{-1}$); A = incremento da área (m^2); I =intensidade da chuva(mm min^{-1}).

No que se refere à desagregação e transporte nas encostas, em consequência do escoamento superficial, pode-se expressar, como:

$$D_f = 0,90.C.K.A.S.q \quad (43)$$

Tem-se D_f = taxa de desagregação devido ao escoamento superficial (kg min^{-1}); S = fator declividade; q = média do fluxo por unidade de comprimento ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$).O fator declividade é calculado por

$$S = 1,05 - 0,85\text{EXP}(-4\text{SEN}\theta) \quad (44)$$

Sendo θ o ângulo da declividade (graus).

No caso de bacia, o total de solo desagregado é:

$$D_T = D_R + D_f + D_0 \quad (45)$$

Em que: D_0 = total transferido de montante. E valor de $D = 0$ no início do plano.

O transporte de solo por espalhamento pela ação da chuva foi assumido como tendo sido desprezível. O transporte do solo pelo escoamento superficial foi descrito pelas relações:

$$T = 161 \cdot S \cdot q^{0,5} \quad \text{para } q \leq 0,046 \text{ m}^2\text{min}^{-1} \quad (46)$$

$$T = 16320 \cdot S \cdot q^2 \quad \text{para } q > 0,046 \text{ m}^2\text{min}^{-1} \quad (47)$$

Em que:

T é a taxa potencial de transporte de sedimentos ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$).

Então quando $D_T \leq T$, todo o valor de sedimentos produzidos é transportado pelo escoamento superficial. Quando $D_T > T$, a taxa potencial de transporte é arrastada pela enxurrada, sendo depositada a diferença entre os termos.

No elemento de largura unitária e comprimento Δx e tempo t , pode-se adotar o disposto nas equações 21 e 22:

$$q = \frac{(P_1 + P_4)}{2} \cdot I_r \cdot L_0 \cdot 60 \quad (48)$$

$$\Delta X = L_0 \cdot \Delta x \quad (49)$$

O cálculo é realizado elemento a elemento até terminar o plano e descarregar no rio.

b) Aplicação do Modelo

A bacia do Ribeirão Salobra foi dividida em 15 sub-bacias, respeitando os divisores naturais de água e buscando homogeneidade no que se referiu principalmente a tipo do solo, uso e declividade e consideradas como unidades de respostas hidrológicas (HRUs) distintas, possibilitando avaliar o escoamento e o transporte de sedimentos em cada sub-bacia e a influência das variáveis envolvidas no processo erosivo (Figura 6).

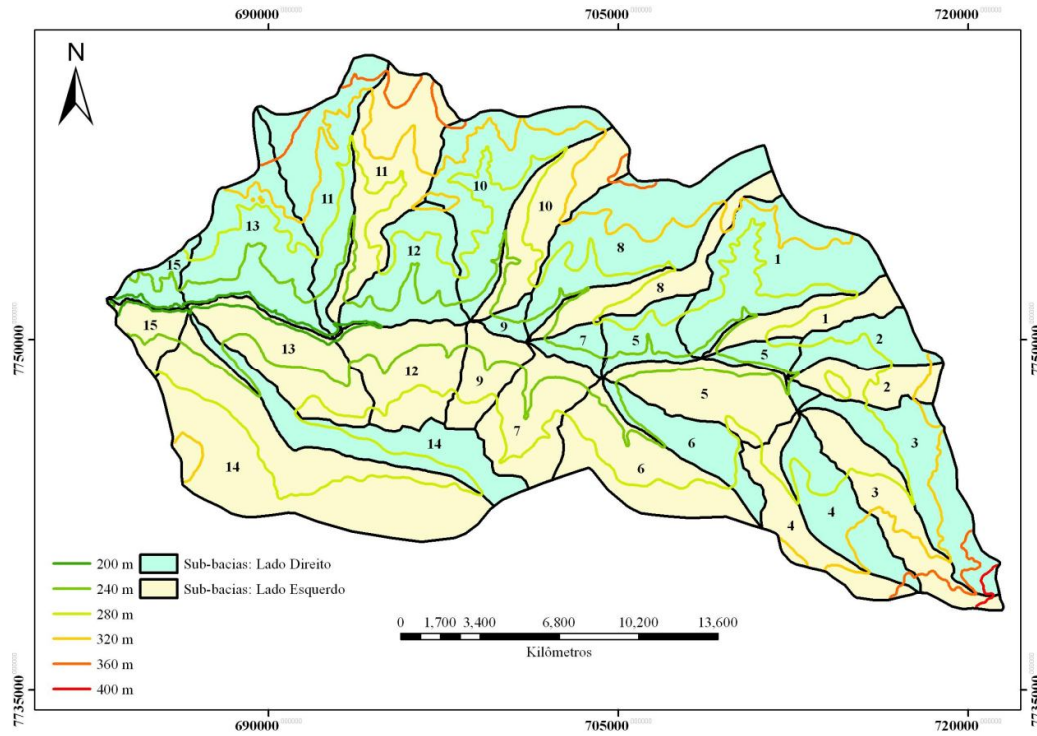


Figura 6: Bacia do Ribeirão Salobra dividida em 15 sub-bacias, lado direito em verde e lado esquerdo em bege.

A metodologia estabelecida previu a produção de sedimentos para os planos do lado direito e do lado esquerdo de cada sub-bacia, sendo o comprimento do plano estabelecido como o mesmo do curso principal. O comprimento da encosta (L) do plano de cada lado do curso principal da sub-bacia foi determinado a partir da utilização do método do retângulo equivalente (equações 50, 51 e 52), amplamente utilizado em projetos de drenagem na engenharia civil, que consiste em um retângulo de mesma área e perímetro da área de cada lado da sub-bacia.

$$L_e = \left(\frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \right) * [1 + \sqrt{1 - (1,128/K_c)^2}] \quad (50)$$

$$l_e = \left(\frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \right) * [1 - \sqrt{1 - (1,128/K_c)^2}] \quad (51)$$

$$K_c = 0,282 * P/\sqrt{A} \quad (52)$$

Em que: L_e = comprimento do retângulo vertente equivalente (m); l_e = largura do retângulo vertente equivalente (m); K_c = coeficiente de compacidade; P = perímetro do plano (m); A = área do plano (m^2).

A declividade média dos planos foi calculada a partir do somatório dos comprimentos das curvas de nível de cada lado dividido pela sua área e multiplicado pela diferença de cotas, que nas cartas adotadas é de 40m. Além da declividade, foram determinados os parâmetros K , erodibilidade do solo, em função da carta de tipo de solo, assim como os parâmetros C , de uso e ocupação do solo, em função da carta de uso e ocupação e dos valores calibrados nos ensaios experimentais destes dois parâmetros, sendo realizada a média ponderada dos valores na ocorrência de mais de um tipo de solo e uso na área de estudo da bacia. Como neste estudo só foram calibrados valores de C para uso pastagem, no caso dos demais usos foram utilizados os valores propostos por Bertoni e Lombardi Neto (2005).

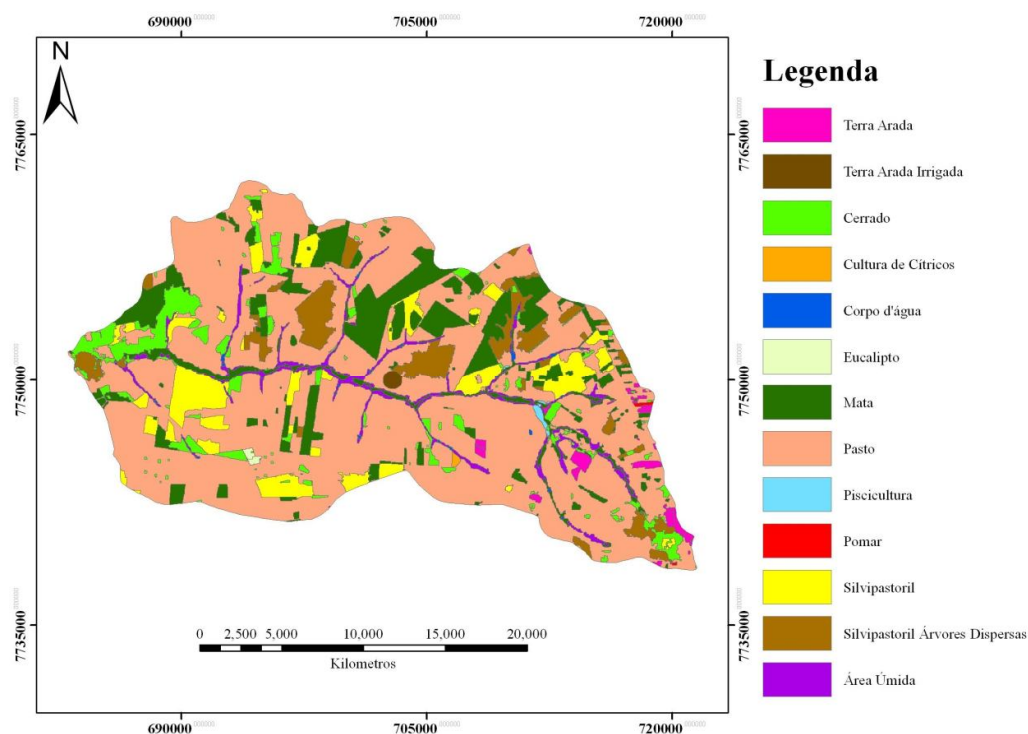


Figura 7: Carta de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Salobra.

c) Estrutura do programa computacional

Todas as variáveis e parâmetros necessários à alimentação do modelo são disponibilizadas em planilhas eletrônicas. Um programa computacional de fluxograma (Apêndice A) gerencia a busca dos dados necessários à execução do modelo matemático. Para a disponibilização dos resultados, planilhas são geradas com os valores calculados (Apêndices B e C), valores preditos e gráficos.

Nas planilhas de geração de volume de escoamento por plano de cada sub-bacia são informados também os intervalos de tempo e espaço, o tempo de retorno, a intensidade da precipitação efetiva do evento a ser estudado (Apêndice A).

Os Mapas de classes e uso do solo, disponíveis no laboratório de estudos de processos erosivos da UFMS, auxiliaram na determinação dos parâmetros K e C necessários (Apêndices H e I), que foram dispostos em planilhas eletrônicas para alimentação do programa de aplicação dos modelos de predição de vazão de escoamento superficial e produção de sedimentos em escala de bacia hidrográfica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa computacional foi elaborado de forma a possibilitar a predição de vazão de escoamento superficial em eventos chuvosos com a utilização de quantidade reduzida de dados de entrada que são dispostos em planilhas eletrônicas com interfaces de uso comum e, por isso, bastante amigáveis. As unidades de respostas hidrológicas são estabelecidas previamente em um SIG, conforme a necessidade do estudo, e então as características fisiográficas são obtidas no SIG de preferência e alimentadas nas planilhas eletrônicas. Essa opção de metodologia de trabalho possibilita os mais diversos estudos dos fatores intervenientes, no processo erosivo, dos impactos de técnicas e práticas de controle. Além disso, há um controle completo dos parâmetros utilizados, sem o risco desses serem ajustados aleatoriamente para fins de calibração e validação do modelo. Por isso, existe uma maior precisão dos resultados apresentados, visto que os parâmetros utilizados são calibrados e validados anteriormente à utilização do modelo. O programa disponibiliza os resultados em gráficos simples (figura 8) que são facilmente interpretáveis.

Código de Programa para aplicação do Modelo

```
Private Sub Dados_Click()  
Dim NSB
```

```
NSB = Worksheets("Dados").Cells(3, 2).Value  
For k = 1 To NSB  
Worksheets("PlanoE").Cells(1, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,  
1).Value  
Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,  
2).Value  
Worksheets("PlanoE").Cells(3, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,  
3).Value  
Worksheets("PlanoE").Cells(4, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,  
4).Value  
Worksheets("PlanoD").Cells(1, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,  
1).Value
```

```
Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,
5).Value
Worksheets("PlanoD").Cells(3, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,
6).Value
Worksheets("PlanoD").Cells(4, 9).Value = Worksheets("Dados").Cells(5 + k,
7).Value
```

```
Worksheets("RunoffE").Cells(1, 1).Value = "Bacia"
Worksheets("RunoffE").Cells(2, 1).Value = k
Worksheets("RunoffE").Cells(4, 1).Value = "Vazãoem m2/min por metro de largura
(larguraunitária)"
Worksheets("RunoffE").Cells(8, 1).Value = "Tempo(min)"
Worksheets("RunoffE").Cells(7, 2).Value = "Comprimento(m)"
Worksheets("RunoffD").Cells(1, 1).Value = "Bacia"
Worksheets("RunoffD").Cells(2, 1).Value = k
Worksheets("RunoffD").Cells(4, 1).Value = "Vazãoem m2/min por metro de largura
(larguraunitária)"
Worksheets("RunoffD").Cells(8, 1).Value = "Tempo(min)"
Worksheets("RunoffD").Cells(7, 2).Value = "Comprimento(m)"
Worksheets("Runoff").Cells(1, 1).Value = "Vazão em m2/min por metro de largura
(largura unitária)"
Worksheets("Runoff").Cells(2, 1) = "Sub-Bacia"
Worksheets("Runoff").Cells(2, 1 + k) = k
Worksheets("Runoff").Cells(3, 1 + k) = "RunoffE"
Worksheets("Runoff").Cells(3, 1) = "Tempo"
Worksheets("Runoff").Cells(1, 17).Value = "Vazãoem m2/min por metro de largura
(larguraunitária)"
Worksheets("Runoff").Cells(2, 17) = "Sub-Bacia"
Worksheets("Runoff").Cells(2, 17 + k) = k
Worksheets("Runoff").Cells(3, 17 + k) = "RunoffD"
Worksheets("Runoff").Cells(3, 17) = "Tempo"
```

```
For i = 1 To 36
    For j = 1 To 11
        valor1 = Worksheets("PlanoE").Cells(8, 1 + j).Value *
Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9).Value
        valor2 = (Worksheets("PlanoE").Cells(8 + i, 1).Value *
Worksheets("PlanoE").Cells(5, 5).Value / Worksheets("PlanoE").Cells(3, 5).Value) /
60
        valor3 = Worksheets("PlanoE").Cells(8 + i, 1 + j).Value *
(Worksheets("PlanoE").Cells(2, 6).Value * 60) * Worksheets("PlanoE").Cells(2,
9).Value
```

```
valor4 = Worksheets("PlanoD").Cells(8, 1 + j).Value *
Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9).Value
valor5 = (Worksheets("PlanoD").Cells(8 + i, 1).Value *
Worksheets("PlanoD").Cells(5, 5).Value / Worksheets("PlanoD").Cells(3, 5).Value)
/ 60
```

```

valor6 = Worksheets("PlanoD").Cells(8 + i, 1 + j).Value *
(Worksheets("PlanoD").Cells(2, 6).Value * 60) * Worksheets("PlanoD").Cells(2,
9).Value

```

```

Worksheets("RunoffE").Cells(8, 1 + j).Value = valor1
Worksheets("RunoffE").Cells(8 + i, 1).Value = valor2
Worksheets("RunoffE").Cells(8 + i, 1 + j).Value = valor3
Worksheets("RunoffD").Cells(8, 1 + j).Value = valor4
Worksheets("RunoffD").Cells(8 + i, 1).Value = valor5
Worksheets("RunoffD").Cells(8 + i, 1 + j).Value = valor6

```

Next j

```

Worksheets("Runoff").Cells(3 + i, 1) = (Worksheets("PlanoE").Cells(8 + i, 1) *
Worksheets("PlanoE").Cells(5, 5) / 1.66666) / 60
Worksheets("Runoff").Cells(3 + i, 1 + k) = valor3
Worksheets("Runoff").Cells(3 + i, 17) = (Worksheets("PlanoD").Cells(8 + i, 1) *
Worksheets("PlanoD").Cells(5, 5) / 1.66666) / 60
Worksheets("Runoff").Cells(3 + i, 17 + k) = valor6

```

Next i

```

Worksheets("SedimentosE").Cells(1, 1).Value = "Bacia"
Worksheets("SedimentosE").Cells(2, 1).Value = k
Worksheets("SedimentosE").Cells(1, 2).Value = "Predição Sedimentos em Kg/min"
Worksheets("SedimentosE").Cells(3, 1).Value = "Tempo(min)"
Worksheets("SedimentosE").Cells(2, 2).Value = "Comprimento(m)"

```

```

Worksheets("SedimentosD").Cells(1, 1).Value = "Bacia"
Worksheets("SedimentosD").Cells(2, 1).Value = k
Worksheets("SedimentosD").Cells(1, 2).Value = "Predição Sedimentos em Kg/min"
Worksheets("SedimentosD").Cells(3, 1).Value = "Tempo(min)"
Worksheets("SedimentosD").Cells(2, 2).Value = "Comprimento(m)"

```

```

Worksheets("Sedimentos").Cells(3, 2).Value = "Predição Sedimentos em Kg/min"
Worksheets("Sedimentos").Cells(2, 1) = "Sub-Bacia"
Worksheets("Sedimentos").Cells(2, 1 + k) = k
Worksheets("Sedimentos").Cells(1, 1) = "SedimentosE"
Worksheets("Sedimentos").Cells(3, 1) = "Tempo em min"

```

```

Worksheets("Sedimentos").Cells(3, 18).Value = "Predição Sedimentos em Kg/min"
Worksheets("Sedimentos").Cells(2, 17) = "Sub-Bacia"
Worksheets("Sedimentos").Cells(2, 17 + k) = k
Worksheets("Sedimentos").Cells(1, 17) = "SedimentosD"
Worksheets("Sedimentos").Cells(3, 17) = "Tempo em min"

```

```

For yy = 1 To 36
    D0e = 0

```

```

        valor8 = (((Worksheets("PlanoE").Cells(8 + yy, 2).Value) + 0) / 2) *
(Worksheets("PlanoE").Cells(2, 6) * 60) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9)
Dre = 0.027 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 12) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 10) * Worksheets("PlanoE").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9) *
((Worksheets("PlanoE").Cells(1, 5) / 60) ^ 2)
Dfe = 0.018 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 12) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 10) * Worksheets("PlanoE").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9) *
Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * valor8
Dte = Dre + Dfe + D0e
    If valor7 < 0.046 Or valor8 = 0.046 Then
Te = 161 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * (valor8 ^ 0.5)
    Else
Te = 16320 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * (valor8 ^ 2)
    End If

    If Te>DteOrTe = Dte Then
D0e = Dte
    Else
D0e = Te
    End If

Worksheets("sedimentosE").Cells(3 + yy, 2).Value = D0e
Worksheets("sedimentosE").Cells(3 + yy, 1).Value = (Worksheets("PlanoE").Cells(8
+ yy, 1) * Worksheets("PlanoE").Cells(5, 5) / 1.66666) / 60
Worksheets("Sedimentos").Cells(3 + yy, 1).Value = (Worksheets("PlanoE").Cells(8
+ yy, 1) * Worksheets("PlanoE").Cells(5, 5) / 1.66666) / 60

Next yy

For y = 1 To 11
    D0e = 0
        valor7 = (((Worksheets("PlanoE").Cells(9, 1 + y).Value) + 0) / 2) *
(Worksheets("PlanoE").Cells(2, 6) * 60) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9)
Dre = 0.027 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 12) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 10) * Worksheets("PlanoE").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9) *
((Worksheets("PlanoE").Cells(1, 5) / 60) ^ 2)
Dfe = 0.018 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 12) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 10) * Worksheets("PlanoE").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9) *
Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * valor7
Dte = Dre + Dfe + D0e
    If valor7 < 0.046 Or valor7 = 0.046 Then
Te = 161 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * (valor7 ^ 0.5)
    Else
Te = 16320 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * (valor7 ^ 2)

    End If

    If Te>DteOrTe = Dte Then
D0e = Dte

```

```

Else
D0e = Te
End If

```

```

Worksheets("sedimentosE").Cells(4, 1 + y).Value = D0e
Worksheets("sedimentosE").Cells(3, 1 + y).Value = Worksheets("PlanoE").Cells(8,
1 + y).Value * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9).Value
Worksheets("Sedimentos").Cells(4, 1 + y).Value = D0e

```

```

Next y

```

```

D0e = 0

```

```

For m = 1 To 35

```

```

  For mm = 1 To 10

```

```

    valor9 = ((Worksheets("PlanoE").Cells(9 + m, 2 + mm).Value +
Worksheets("PlanoE").Cells(9 + m, 2 + mm - 1).Value) / 2) *
(Worksheets("PlanoE").Cells(2, 6) * 60) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9)
Dre = 0.027 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 12) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 10) * Worksheets("PlanoE").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9) *
((Worksheets("PlanoE").Cells(1, 5) / 60) ^ 2)
Dfe = 0.018 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 12) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 10) * Worksheets("PlanoE").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9) *
Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * valor9
Dte = Dre + Dfe + D0e
    If valor9 < 0.046 Or valor8 = 0.046 Then
Te = 161 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * (valor9 ^ 0.5)
    Else
Te = 16320 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 14) * (valor9 ^ 2)
    End If

```

```

    If Te > Dte Or Te = Dte Then
D0e = Dte
    Else
D0e = Te
    End If

```

```

Worksheets("sedimentosE").Cells(4 + m, 2 + mm).Value = D0e

```

```

Next mm

```

```

Worksheets("Sedimentos").Cells(4 + m, 1 + k) = D0e

```

```

Next m

```

```

For ff = 1 To 36
  D0d = 0

```

```

    valor10 = (((Worksheets("PlanoD").Cells(8 + ff, 2).Value) + 0) / 2) *
(Worksheets("PlanoD").Cells(2, 6) * 60) * Worksheets("PlanoE").Cells(2, 9)
Drd = 0.027 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 11) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 13) * Worksheets("PlanoD").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9) *
((Worksheets("PlanoD").Cells(1, 5) / 60) ^ 2)
Dfd = 0.018 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 11) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 13) * Worksheets("PlanoD").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9) *
Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * valor10
Dtd = Drd + Dfd + D0d
    If valor10 < 0.046 Or valor10 = 0.046 Then
        Td = 161 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * (valor10 ^ 0.5)
    Else
        Td = 16320 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * (valor10 ^ 2)
    End If

    If Td > Dtd Or Td = Dtd Then
        D0d = Dtd
    Else
        D0d = Td
    End If

Worksheets("sedimentosD").Cells(3 + ff, 2).Value = D0d
Worksheets("sedimentosD").Cells(3 + ff, 1).Value = (Worksheets("PlanoD").Cells(8
+ ff, 1) * Worksheets("PlanoD").Cells(5, 5) / 1.66666) / 60
Worksheets("Sedimentos").Cells(3 + ff, 17).Value = (Worksheets("PlanoD").Cells(8
+ ff, 1) * Worksheets("PlanoD").Cells(5, 5) / 1.66666) / 60

Next ff

For f = 1 To 11
    D0d = 0
    valor11 = (((Worksheets("PlanoD").Cells(9, 1 + f).Value) + 0) / 2) *
(Worksheets("PlanoD").Cells(2, 6) * 60) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9)
Drd = 0.027 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 11) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 13) * Worksheets("PlanoD").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9) *
((Worksheets("PlanoD").Cells(1, 5) / 60) ^ 2)
Dfd = 0.018 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 11) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 13) * Worksheets("PlanoD").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9) *
Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * valor11
Dtd = Drd + Dfd + D0d
    If valor11 < 0.046 Or valor11 = 0.046 Then
        Td = 161 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * (valor11 ^ 0.5)
    Else
        Td = 16320 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * (valor11 ^ 2)
    End If

    If Td > Dtd Or Td = Dtd Then
        D0d = Dtd
    Else

```

```
D0d = Td
End If
```

```
Worksheets("sedimentosD").Cells(4, 1 + f).Value = D0d
Worksheets("sedimentosD").Cells(3, 1 + f).Value = Worksheets("PlanoD").Cells(8,
1 + f).Value * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9).Value
Worksheets("Sedimentos").Cells(4, 17 + f).Value = D0d
```

```
Next f
```

```
D0d = 0
For n = 1 To 35
    For nn = 1 To 10
        valor12 = ((Worksheets("PlanoD").Cells(9 + n, 2 + nn).Value +
Worksheets("PlanoD").Cells(9 + n, 2 + nn - 1).Value) / 2) *
(Worksheets("PlanoD").Cells(2, 6) * 60) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9)
Drd = 0.027 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 11) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 13) * Worksheets("PlanoD").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9) *
((Worksheets("PlanoD").Cells(1, 5) / 60) ^ 2)
Dfd = 0.018 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 11) * Worksheets("dados").Cells(5
+ k, 13) * Worksheets("PlanoD").Cells(4, 2) * Worksheets("PlanoD").Cells(2, 9) *
Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * valor12
Dtd = Drd + Dfd + D0d
```

```
If valor12 < 0.046 Or valor12 = 0.046 Then
    Td = 161 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * (valor12 ^ 0.5)
Else
    Td = 16320 * Worksheets("dados").Cells(5 + k, 15) * (valor12 ^ 2)
End If
```

```
If Td > Dtd Or Td = Dtd Then
    D0d = Dtd
Else
    D0d = Td
End If
```

```
Worksheets("sedimentosD").Cells(4 + n, 2 + nn).Value = D0d
```

```
Next nn
```

```
Worksheets("Sedimentos").Cells(4 + n, 17 + k) = D0d
```

```
Next n
```

```
Next k
```

```
End Sub
```

```
**Fim do programa
```

Gráficos de predição de vazão de escoamento superficial e produção e arraste de sedimentos (Figura 8) são obtidos por plano de cada sub-bacia para o evento chuvoso em estudo.

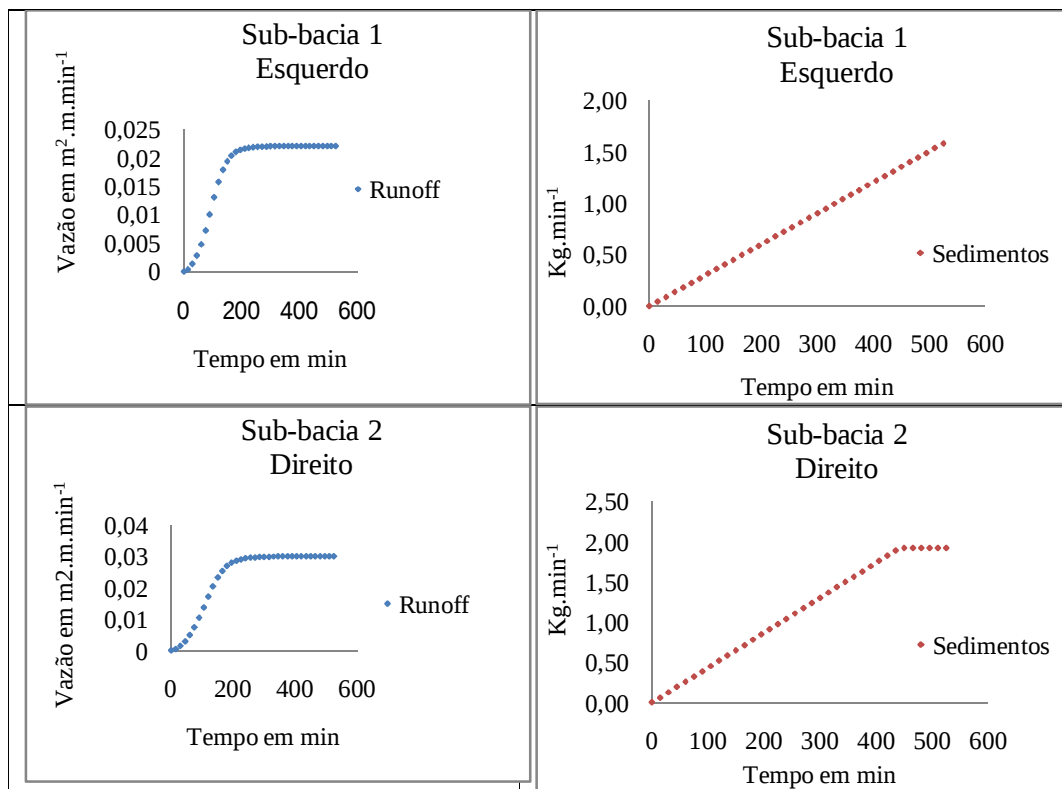


Figura 8: Vazão de escoamento superficial e arraste de sedimentos em função do tempo na sub-bacia 1.

A análise dos gráficos resulta na constatação da produção de sedimentos relacionada à maior vazão de escoamento superficial, registrada em decorrência do que preconiza o modelo.

O modelo matemático de predição de sedimentos, em eventos chuvosos, utilizado neste estudo, considera a capacidade de transporte da vazão do escoamento superficial, sendo depositado o sedimento desagregado e não transportado. Assim, a produção de sedimentos não é apenas resultado da energia da força de desagregação, devido ao impacto pelas gotas da chuva em contato com o solo, e do efeito da cobertura do solo como atenuante nesse impacto.

Vazões totais de escoamento superficial e produções totais de sedimentos por plano de cada sub-bacia são apresentadas em gráficos. A partir da análise das

Figuras 9 e 10, infere-se que os maiores valores são referentes às áreas de maior declividade com efeito potencializado por solos de maior vulnerabilidade à erosão, que apresentam maiores valores de erodibilidade do solo, K, nesse caso, os Neossolos Quartzarênicos presentes nas bacias 10 e 12 e no lado direito da bacia 13.

O uso da terra interferiu na produção de sedimentos. Em função disso, observaram-se alguns planos com maior volume de escoamento superficial por minuto e uma redução na quantidade de sedimentos produzidos em relação a planos com volumes menores e mesma quantidade de produção de sedimentos, como por exemplo, o plano esquerdo das sub-bacias 11 e 13.

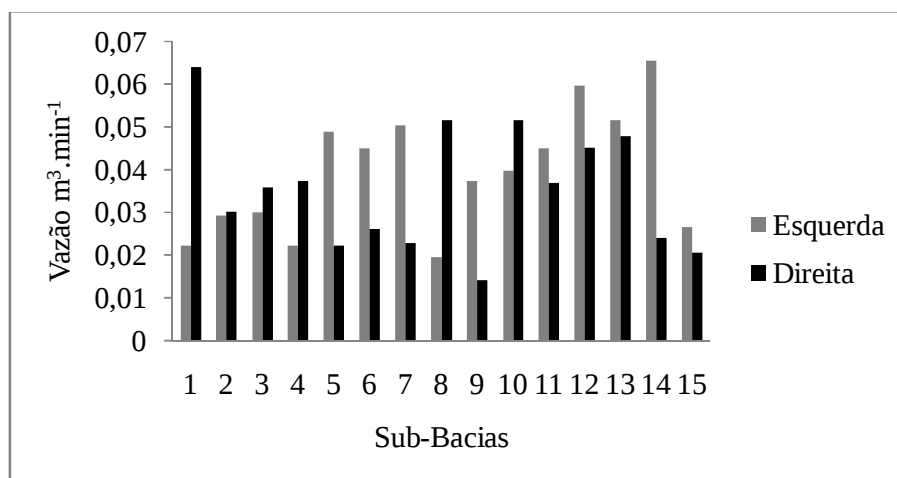


Figura 9: Vazão de escoamento superficial nas sub-bacias.

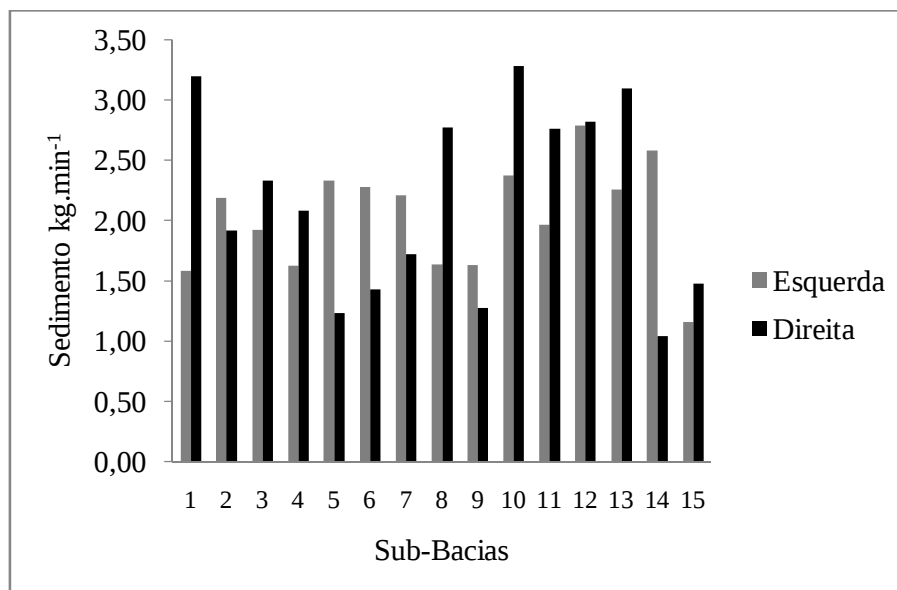


Figura 10: Sedimentos produzidos e transportados pelo escoamento superficial nas sub-bacias.

Vazões de escoamento superficial foram menores nas áreas onde os solos têm maior permeabilidade, menores valores de n de Manning, os Latossolos Vermelhos, por exemplo, resultando valores coerentes ao modelo matemático adotado.

A utilização do modelo matemático de previsão de escoamento superficial e produção de sedimentos proveniente de processo erosivo entressulcos, utilizado neste trabalho, possibilita a identificação das áreas mais vulneráveis e de maior produção de sedimentos. Permite, ainda, o estudo dos fatores intervenientes no processo e a mensuração da interferência desses fatores. Essas informações são primordiais no planejamento de uso dessas áreas, de forma a minimizar os fatores que incrementam a produção de sedimentos.

4 CONCLUSÃO

O programa computacional proposto calcula a produção de sedimentos decorrentes dos processos de erosão entressulcos nos planos das sub-bacias, considerando a capacidade de transporte do escoamento superficial

O modelo pode ser calibrado a partir de dados de bacias devidamente monitoradas, tornando-o preciso e útil na previsão do aporte de sedimentos de bacias hidrográficas.

5 LITERATURA CITADA

ABBOTT, M. T.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologi que European, SHE. 2: structure of a physically-based, distributed modeling system. **J. Hydrol.**, 87, 61-77, 1986.

ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v.24, n.2, p.163-170, 2008.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. Superintendência de Usos Múltiplos, Brasília: ANA, 2008.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F. **ANSWERS Users Manual**. EPA-905/9-82-001:USEPA. Chicago, IL, 1981.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005.

BLANCANEUX, P.; AMABILE, R. F.; CARVALHO FILHO, A.; CARVALHO JUNIOR, W.; CARVALHO, A. M.; CHAGAS, C. S.; COSTA, L. D.; KER, J. C.; FREITAS, P. L.; LANDERS, J.; LIMA, E. M. B.; MILHOMEN, A.; MOTTA, P. E. F.; PEREIRA, N. R.; RAMALHO FILHO, A.; TEIXEIRA, S. M. **Interações Ambientais no cerrado: microbacia piloto de Morrinhos, Estado de Goiás, Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq. p. 338. 1998.

BYNE, W. Predicting sediment detachment and channel scour in the process-based planning model answers-2000. **Thesis** Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Biological Systems Engineering. Blacksburg, Virginia. p. 273, April, 2000.

BOURAOUI, F.; VACHAUD, G.; HAVERKAMP, R.; NORMAND, B. A distributed physical approach for surface-subsurface water transport modeling in agricultural watersheds. **Journal of Hydrology** 203:79-92, 1997.

DILLAHA, T. A; BEASLEY, D. B. **Distributed parameter modeling of sediment movement and particles sizes distributions**. Trans. ASAE. 26 (6).1766-1772,1777, 1983.

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. (Editors), WEPP User Summary. NSERL Report No. 11, **National Soil Erosion Research Laboratory**, West Lafayette, Indiana, p. 131, 1995.

HUGGINS, L. F., MONKE, E. J. The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds. Tech. Rep. n.1. Water Resour. **Res. Ctr. Purdue**. Univ., West Lafayette, Ind, 1966.

NAIK, G. M.; RAO, E. P.; ELDHO, T. I. A kinematic wave based watershed model for soil erosion and sediment yield. **Catena**, v.77, p.256-265, 2009.

NETO, S. L. R. Um modelo conceitual de sistemas de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações. **Tese** apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, p. 231, 2000.

PAIVA, C. F. E.; OLIVEIRA, V. S.; VENDRAME, I. F.; AULICINO, L. C. M. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica na Bacia do Rio Una Taubaté-SP com o emprego de sensoriamento remoto. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte: p. 05-10, Abr. 2003.

PORTO, R. L. L., (org.) **Hidrologia ambiental**. Samuel Murgel Branco ... [*et al.*];. São Paulo: ABRH: Edusp, 1991.

PRUSKY F. F. *et. al.* **Sistema Especialista para o manejo integrado dos recursos hídricos**. UFV, Viçosa, 2001. URL:<http://www.iica.org.br/aguas>.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. In: **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. INPE. São José do Campos, SP, 2003.

CD-ROM.

ROSS, B. B., WOLF, M. L., SHANHOLTZ, V. O., SMOLEN, M. D., CONTRACTOR, D. N. **Model for simulating runoff and erosion in ungaged watersheds**. Bull. n. 130. Virginia Water Resour. Res. Cr. Virginia Polytechnic Inst. and State Univ. Blacksburg, VA, 1982.

STEFFEN, J. L. Simulação Unidimensional do Escoamento Superficial em Bacias Hidrográficas Descritas por Modelo Numérico de Terreno. Escola de Engenharia de São Carlos – USP: **Tese de Doutorado**. Setembro, 1997.

STEPHENSON, D.; MEADOWS, M. E. **Kinematic Hydrology and Modeling**. Elsevier Science Publishing Company. Nova York, NY, USA. v.6. p. 248, 1986.

TAYFUR, G.; SINGH, V. P. Kinematic wave model of bed profiles in alluvial channels, **Water Resources Research**, v.42, 2006.

TUCCI, C. E. M. (organizador). **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

VENKATA, R. K.; ELDHO, T. I; RAO, E. P. A Distributed Kinematic Wave – Philip Infiltration Watershed Model Using FEM, GIS and Remoted Sensed Data. **Water Resour Manage**, (22):737-755, 2008.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D.; ANDERSON, W. P. **AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: A watershed analytical tool**. Conservation Research Report, n.35. Washington, D.C.: USDA. 1987.

CONCLUSÕES GERAIS

As principais contribuições deste estudo foram:

- a) o modelo da onda cinemática é eficiente e acurado na previsão de vazão máxima de escoamento superficial em entressulcos nas condições ambientais estudadas;
- b) a calibração do modelo disponibilizou valores de coeficiente de atrito, n de Manning, indispensáveis na utilização de modelos;
- c) o modelo de Byne (2000) foi eficiente e acurado na previsão de produção de sedimentos pelo escoamento superficial em erosão entressulcos nas condições ambientais estudadas;
- d) a calibração do modelo de Byne (2000) disponibilizou valores de erodibilidade do solo, K , iguais a 0,6058; 0,5951 e $0,7748 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ para os solos LVdf; LVa e RQa, respectivamente, e de fator de uso e cobertura do solo, C , sob cobertura de pastagem, iguais a 0,0910; 0,0574; 0,1217, para massa seca de 689,65; 909,71 e 530,19 g.m^{-2} , respectivamente;
- e) o programa HEROS calcula a produção de sedimentos decorrentes dos processos de erosão laminar nos planos das sub-bacias, considerando a capacidade de transporte do escoamento superficial, e pode ser calibrado a partir de dados de bacias devidamente monitoradas, tornando-o preciso e útil na previsão do aporte de sedimentos de bacias hidrográficas.

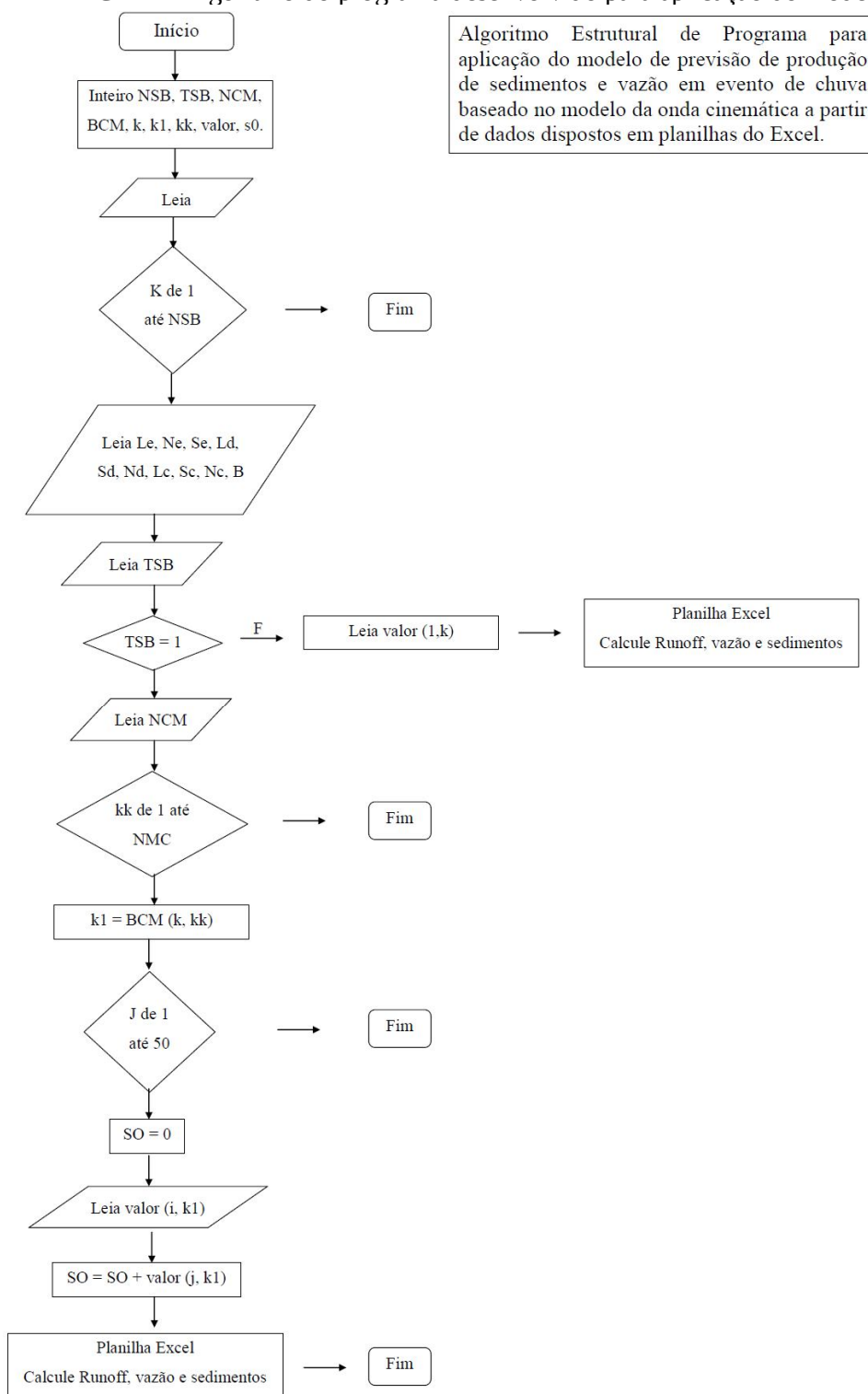
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram calibrados parâmetros necessários ao estudo do processo erosivo, mas apenas em condições de pastagem e sem cobertura vegetal, sendo necessária a calibração desses parâmetros para os demais usos do solo para maximização da eficácia na utilização de modelos de predição de escoamento superficial e produção de sedimentos, no planejamento de ocupação de bacias hidrográficas.

O modelo de aplicação da onda cinemática, por diferenças finitas em escala de bacia hidrográfica, possibilita a discretização dos planos das sub-bacias, em vários segmentos, em cascata, o que, possivelmente, aumentaria a precisão nos cálculos realizados. Essa metodologia é complexa e demanda um algoritmo mais extenso, exigindo estudos da relação custo/benefício desse incremento.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Algoritmo do programa desenvolvido para aplicação do modelo.



NSB-Número de Sub-bacias. Le-comprimento de rampa do plano esquerdo; Ne-coeficiente de atrito do plano esquerdo; Se-declividade do plano esquerdo; Ld-comprimento rampa do plano direito; Nd-coeficiente de atrito do plano direito; Sd-declividade do plano direito.

APÊNDICE B - Planilha intermediária com dados de precipitação, dados da bacia sub-bacia em estudo e valores de Q em função de dx e dt.

ModeloTeseSalobra.xlsm - Microsoft Excel uso não comercial

Calibri 11

Quebrar Texto Automaticamente

Mesclar e Centralizar

Formatar como Tabela

Estilos de Célula

Área de Trabalho

Fonte

Alinhamento

Número

Estilo

E5

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1									7						
2				iR=	10	2,7778E-06		Le=	607,192						
3	DT=	0,05		m=	1,66667			Se=	0,032023						
4	DX=	0,1		Dt=	15	900		Ne=	0,374033						
5	Vinicial=	0,001		tR=	30000			α=	0,47843						
6				Tcr=	12151,4	Beta0=	0,405046								
7															
8	T/X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	le	K0	Pe*Le
9	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1,38889E-06	0,5	0,61
10	0,05	0,001	0,008	0,003	0,006	0,004	0,006	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	1,38889E-06	0,5	2,87
11	0,1	0,001	0,014	0,014	0,008	0,016	0,009	0,015	0,010	0,014	0,011	0,013	1,38889E-06	0,5	8,01
12	0,15	0,001	0,019	0,027	0,021	0,021	0,025	0,019	0,026	0,020	0,025	0,021	1,38889E-06	0,5	12,79
13	0,2	0,001	0,023	0,040	0,038	0,033	0,038	0,036	0,035	0,038	0,035	0,038	1,38889E-06	0,5	22,95
14	0,25	0,001	0,027	0,050	0,057	0,051	0,051	0,054	0,051	0,053	0,053	0,052	1,38889E-06	0,5	31,69
15	0,3	0,001	0,030	0,059	0,074	0,074	0,069	0,071	0,072	0,071	0,072	0,072	1,38889E-06	0,5	43,43
16	0,35	0,001	0,033	0,066	0,089	0,096	0,093	0,091	0,093	0,093	0,093	0,093	1,38889E-06	0,5	56,66
17	0,4	0,001	0,035	0,072	0,101	0,117	0,119	0,116	0,116	0,117	0,117	0,117	1,38889E-06	0,5	70,96
18	0,45	0,001	0,037	0,077	0,110	0,134	0,144	0,144	0,142	0,142	0,143	0,143	1,38889E-06	0,5	86,76
19	0,5	0,001	0,039	0,081	0,118	0,147	0,165	0,172	0,171	0,171	0,171	0,171	1,38889E-06	0,5	103,97
20	0,55	0,001	0,041	0,084	0,124	0,158	0,183	0,197	0,202	0,202	0,201	0,202	1,38889E-06	0,5	122,37

APÊNDICE C - Planilha com os valores calculados de escoamento superficial por sub-bacia em função do tempo de duração em minutos do evento chuvoso.

ModeloTeseSalobra12.02.xlsm - Microsoft Excel uso não comercial

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Vazão em m2/min por metro de largura (largura unitária)															
2	Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	Tempo	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe	Runoffe
4	0	4,42E-05	5,83E-05	5,98E-05	4,41E-05	9,78E-05	9,01E-05	0,000101	3,89E-05	7,48E-05	7,94E-05	8,99E-05	0,000119	0,000104	0,000134	5,3E-05
5	15	0,000421	0,000555	0,000484	0,000425	0,000503	0,000482	0,000478	0,00047	0,00047	0,000384	0,000652	0,000522	0,000749	0,000497	0,000481
6	30	0,001351	0,001783	0,001473	0,001371	0,0014	0,001345	0,001336	0,001637	0,001069	0,001991	0,001467	0,002132	0,001387	0,001423	0,001181
7	45	0,00283	0,003735	0,002996	0,002877	0,002392	0,002362	0,002132	0,003559	0,001823	0,004059	0,002693	0,004048	0,002245	0,001616	0,002361
8	60	0,004822	0,006364	0,005043	0,004907	0,004147	0,004046	0,003825	0,006169	0,003163	0,006837	0,004539	0,006771	0,003999	0,003488	0,003955
9	75	0,007277	0,009603	0,007546	0,007408	0,005848	0,005759	0,005282	0,009281	0,004459	0,010239	0,006565	0,00991	0,005543	0,004668	0,005887
10	90	0,010105	0,013335	0,010484	0,01028	0,008046	0,00793	0,007238	0,012426	0,006134	0,014231	0,009048	0,013673	0,007604	0,006028	0,008162
11	105	0,013062	0,017236	0,013777	0,01326	0,010486	0,010338	0,009444	0,01504	0,007994	0,018691	0,011819	0,017905	0,009918	0,007871	0,010734
12	120	0,015769	0,020806	0,017233	0,015956	0,013172	0,013006	0,011827	0,016865	0,010041	0,023337	0,014904	0,022616	0,012426	0,009945	0,013531
13	135	0,017922	0,023645	0,020517	0,018072	0,016137	0,015944	0,014459	0,017991	0,012301	0,027695	0,018286	0,027752	0,0152	0,01208	0,016371
14	150	0,019446	0,025655	0,023296	0,019553	0,019346	0,01912	0,017329	0,018635	0,014747	0,03133	0,021931	0,033174	0,018217	0,014333	0,018989
15	165	0,020441	0,026966	0,025416	0,02051	0,022789	0,022523	0,020396	0,018991	0,017371	0,034066	0,025746	0,038566	0,021444	0,016808	0,021161
16	180	0,02106	0,027783	0,026911	0,021102	0,02644	0,026075	0,023671	0,019189	0,020156	0,035974	0,029513	0,043501	0,024893	0,019507	0,02281
17	195	0,021438	0,028281	0,027914	0,021462	0,030167	0,029585	0,02715	0,019302	0,023002	0,037242	0,032956	0,047657	0,02854	0,022358	0,023984
18	210	0,021671	0,028587	0,028569	0,021682	0,033741	0,032817	0,030725	0,019368	0,025737	0,038065	0,035875	0,050921	0,032248	0,025312	0,024786
19	225	0,021816	0,028779	0,028994	0,021819	0,036943	0,035596	0,034203	0,019409	0,028193	0,038597	0,0382	0,053357	0,035802	0,028397	0,025322
20	240	0,021909	0,028902	0,029273	0,021908	0,039643	0,037855	0,037383	0,019435	0,030268	0,038944	0,03997	0,055116	0,039003	0,031673	0,025681
21	255	0,021972	0,028984	0,029459	0,021966	0,041814	0,039615	0,040133	0,019452	0,03194	0,039176	0,041278	0,056364	0,041731	0,035165	0,025922
22	270	0,022014	0,02904	0,029586	0,022007	0,0435	0,040948	0,042406	0,019464	0,03324	0,039334	0,042228	0,057246	0,043958	0,038816	0,026087

APÊNDICE D - Planilha eletrônica com os valores calculados de transporte de sedimentos em suspensão em cada sub-bacia para o evento chuvoso em estudo.

ModeloTeseSalobra12.02.xlsm - Microsoft Excel uso não comercial

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	SedimentosE															
2	Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	Tempo em min	Predição Sedimentos em Kg/min														
4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	15	0,05	0,06	0,06	0,05	0,10	0,07	0,06	0,07	0,05	0,14	0,06	0,21	0,06	0,08	0,03
6	30	0,09	0,12	0,12	0,09	0,20	0,15	0,13	0,13	0,09	0,27	0,11	0,41	0,13	0,17	0,07
7	45	0,14	0,19	0,19	0,14	0,30	0,22	0,19	0,20	0,14	0,41	0,17	0,62	0,19	0,25	0,10
8	60	0,18	0,25	0,25	0,19	0,41	0,29	0,25	0,27	0,19	0,55	0,22	0,82	0,26	0,33	0,13
9	75	0,23	0,31	0,31	0,23	0,51	0,36	0,31	0,33	0,23	0,68	0,28	1,03	0,32	0,42	0,16
10	90	0,27	0,37	0,37	0,28	0,61	0,44	0,38	0,40	0,28	0,82	0,34	1,23	0,39	0,50	0,20
11	105	0,32	0,44	0,43	0,33	0,71	0,51	0,44	0,47	0,33	0,96	0,39	1,44	0,45	0,59	0,23
12	120	0,36	0,50	0,49	0,37	0,81	0,58	0,50	0,54	0,37	1,09	0,45	1,64	0,52	0,67	0,26
13	135	0,41	0,56	0,56	0,42	0,92	0,65	0,57	0,60	0,42	1,23	0,50	1,85	0,58	0,75	0,30
14	150	0,45	0,63	0,62	0,47	1,02	0,73	0,63	0,67	0,47	1,37	0,56	2,05	0,64	0,84	0,33
15	165	0,50	0,69	0,68	0,51	1,12	0,80	0,69	0,74	0,51	1,50	0,62	2,26	0,71	0,92	0,36
16	180	0,54	0,75	0,74	0,56	1,22	0,87	0,76	0,80	0,56	1,64	0,67	2,47	0,77	1,00	0,40
17	195	0,59	0,81	0,80	0,60	1,32	0,95	0,82	0,87	0,61	1,78	0,73	2,67	0,84	1,09	0,43
18	210	0,63	0,88	0,87	0,65	1,43	1,02	0,88	0,94	0,65	1,91	0,78	2,71	0,90	1,17	0,46
19	225	0,68	0,94	0,93	0,70	1,53	1,09	0,95	1,00	0,70	2,05	0,84	2,72	0,97	1,25	0,50
20	240	0,72	1,00	0,99	0,74	1,63	1,16	1,01	1,07	0,75	2,19	0,90	2,74	1,03	1,34	0,53
21	255	0,77	1,06	1,05	0,79	1,73	1,24	1,07	1,14	0,79	2,32	0,95	2,75	1,10	1,42	0,56

APÊNDICE E- Cálculo Parâmetros Retângulo Equivalente

Sub-Bacia	Perím D Km	Perím E Km	Área D Km2	Área E Km2	Kc D	Kc E	le D	le E	LmD	LmE
1	25,71	20,14	30,05	9,55	1,32	1,84	3,07	1,06	767,71	264,97
2	16,84	16,04	10,08	9,26	1,50	1,49	1,45	1,40	361,40	349,53
3	28,80	27,46	21,77	17,63	1,74	1,84	1,72	1,43	429,19	358,53
4	21,14	26,82	15,73	13,08	1,50	2,09	1,79	1,06	448,06	264,80
5	26,83	20,16	13,08	18,15	2,09	1,33	1,06	2,35	264,64	586,83
6	20,90	25,03	11,51	22,38	1,74	1,49	1,25	2,16	312,71	540,42
7	9,73	19,19	4,12	17,41	1,35	1,30	1,09	2,43	272,78	607,19
8	30,82	30,00	32,01	13,13	1,54	2,33	2,48	0,93	618,76	233,40
9	8,07	13,80	2,27	9,17	1,51	1,29	0,68	1,80	169,23	448,99
10	28,54	23,37	29,18	18,63	1,49	1,53	2,47	1,91	618,29	476,31
11	31,28	28,88	24,46	26,51	1,78	1,58	1,76	2,16	440,69	539,52
12	21,02	19,24	18,08	19,35	1,39	1,23	2,17	2,86	541,60	716,02
13	28,84	21,63	27,77	20,70	1,54	1,34	2,29	2,49	572,32	621,42
14	37,70	39,75	20,34	53,69	2,36	1,53	1,15	3,22	287,33	806,05
15	12,41	11,69	5,13	5,82	1,55	1,37	0,98	1,27	245,53	317,98

Legenda: Perím D – Perímetro do lado direito da sub-bacia; Perím E – Perímetro do lado esquerdo da sub-bacia; Área D- área do lado direito da sub-bacia; Área E- área do lado esquerdo da sub-bacia; Kc D – coeficiente de compacidade do lado direito; Kc E – coeficiente de compacidade do lado esquerdo; le D- largura do retângulo vertente equivalente do lado direito; le E- largura do retângulo vertente equivalente do lado esquerdo; Lm D – comprimento do retângulo vertente equivalente do lado direito; Lm E- comprimento do retângulo vertente equivalente do lado esquerdo.

APÊNDICE F - Planilha auxiliar no cálculo dos valores de n de Manning e C (uso de cobertura da USLE), em função dos percentuais de uso. Lado Direito.

Parâmetros n e C e percentual de uso nas sub-bacias plano direto para cálculo médio ponderado.

Valor n		0,300	0,023	0,500	0,010	0,400	0,050	0,046
Valor C		0,090	0,010	0,001	0,000	0,050	0,410	0,505
Sub-bacia	Uso %	Pasto	Cerrado	Mata	água	silvipast	umida	arada
1	Direita	37	2	30	1	28	3	0
2		45	16	0	0	30	5	3
3		4	9	5	0	8	3	71
4		87	2	5	0	0	4	2
5		52	4	9	1	27	6	0
6		87	3	3	0	0	4	6
7		55	0	9	0	12	7	24
8		45	2	42	0	10	2	0
9		76	0	12	0	0	12	0
10		53	1	18	0	25	3	0
11		62	3	11	0	19	5	0
12		89	3	3	0	1	3	0
13		43	3	21	0	7	1	0
14		69	8	4	0	18	1	0
15		18	61	12	0	9	0	0

APÊNDICE G - Planilha auxiliar no cálculo ponderado dos valores de n de Manning e C (uso de Cobertura da USLE), em função dos percentuais de uso. Lado Esquerdo.

Parâmetros n e C e percentual de uso nas sub-bacias plano direto para cálculo médio ponderado.

Valor n	0,300	0,023	0,500	0,010	0,400	0,050	0,046	0,350
Valor C	0,090	0,010	0,001	0,000	0,050	0,410	0,505	0,135
Uso% E	Pasto	Cerrado	Mata	água	silvipast	Úmida	arada	pomar
1	40	3	16	0	35	2	0	0
2	71	4	12	0	4	1	6	3
3	61	9	6	0	12	5	7	0
4	77	3	7	0	6	5	2	0
5	85	3	5	3	0	3	0	0
6	85	4	4	0	4	2	0	1
7	87	1	5	0	2	5	0	0
8	55	0	15	0	28	1	1	0
9	74	1	13	0	3	8	0	0
10	58	2	38	0	0	1	0	0
11	67	5	16	0	8	4	0	0
12	63	10	13	0	12	1	0	0
13	47	3	7	0	4	3	0	0
14	78	3	7	0	11	1	0	0
15	42	15	7	0	36	1	0	0

Parâmetros C e n calculados para cada lado das 15 sub-bacias por média ponderada, em função dos percentuais de uso.

Sub-bacia	Cdireita	Cesquerda	ndireita	nesquerda
1	0,0601	0,06216	0,37506	0,34169
2	0,09275	0,10487	0,26256	0,30368
3	0,3794	0,11771	0,10523	0,26879
4	0,10505	0,10327	0,28938	0,29411
5	0,08539	0,08915	0,31302	0,28249
6	0,12533	0,08849	0,28145	0,29642
7	0,20549	0,09995	0,27254	0,29673
8	0,05432	0,0728	0,38646	0,35296
9	0,11772	0,10113	0,294	0,30323
10	0,07278	0,05688	0,35073	0,36496
11	0,08621	0,08136	0,32019	0,31615
12	0,09323	0,06793	0,28819	0,3048
13	0,04681	0,05697	0,26319	0,19419
14	0,07604	0,08017	0,30134	0,31419
15	0,02692	0,06147	0,16403	0,30895

Parâmetro K calculado por média ponderada.

Sub-bacia	Solo % Direita			Solo% Esquerda			K	
	LVdf	LVa	NQa	LVdf	LVa	NQa	Direita	Esquerda
1	63	0	37	97	0	3	0,0751	0,0687
2	88	0	12	89	0	11	0,0704	0,0702
3	94	0	6	95	0	5	0,0692	0,0691
4	90	0	10	92	0	8	0,0700	0,0696
5	0	81	19	7	53	40	0,0707	0,0751
6	43	57	0	49	51	0	0,0674	0,0675
7	0	0	100	0	100	0	0,0871	0,0669
8	0	0	100	0	0	100	0,0871	0,0871
9	0	0	100	0	100	0	0,0871	0,0669
10	0	0	100	0	0	100	0,0871	0,0871
11	0	0	100	0	100	0	0,0871	0,0669
12	0	0	100	0	0	100	0,0871	0,0871
13	0	0	100	0	100	0	0,0871	0,0669
14	0	100	0	0	100	0	0,0669	0,0669
15	0	0	100	0	100	0	0,0871	0,0669

Valores de P (adimensionais) calculados pela técnica do Método de Diferenças Finitas

T/X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,05	0,001	0,007	0,002	0,006	0,003	0,005	0,004	0,005	0,004	0,005	0,004
0,1	0,001	0,012	0,012	0,007	0,014	0,007	0,014	0,008	0,013	0,009	0,012
0,15	0,001	0,017	0,024	0,017	0,019	0,022	0,016	0,023	0,016	0,023	0,017
0,2	0,001	0,021	0,036	0,032	0,028	0,033	0,030	0,030	0,032	0,029	0,033
0,25	0,001	0,025	0,046	0,049	0,042	0,044	0,046	0,043	0,046	0,045	0,045
0,3	0,001	0,028	0,054	0,065	0,062	0,058	0,062	0,061	0,060	0,061	0,060
0,35	0,001	0,031	0,062	0,080	0,082	0,077	0,078	0,079	0,078	0,079	0,079
0,4	0,001	0,033	0,068	0,092	0,102	0,100	0,097	0,098	0,099	0,098	0,099
0,45	0,001	0,036	0,073	0,103	0,120	0,123	0,120	0,119	0,121	0,120	0,120
0,5	0,001	0,037	0,077	0,111	0,135	0,146	0,146	0,143	0,144	0,144	0,144
0,55	0,001	0,039	0,080	0,118	0,147	0,165	0,171	0,170	0,169	0,169	0,169
0,6	0,001	0,041	0,083	0,123	0,157	0,181	0,194	0,198	0,197	0,196	0,196
0,65	0,001	0,042	0,086	0,127	0,165	0,195	0,215	0,224	0,226	0,225	0,225
0,7	0,001	0,043	0,088	0,131	0,171	0,205	0,231	0,248	0,255	0,256	0,256
0,75	0,001	0,044	0,090	0,134	0,176	0,214	0,245	0,268	0,281	0,286	0,288
0,8	0,001	0,045	0,091	0,136	0,180	0,220	0,256	0,284	0,304	0,315	0,320
0,85	0,001	0,046	0,092	0,138	0,183	0,225	0,264	0,297	0,323	0,340	0,350
0,9	0,001	0,046	0,093	0,140	0,186	0,230	0,271	0,308	0,338	0,362	0,378
0,95	0,001	0,047	0,094	0,142	0,188	0,233	0,276	0,316	0,351	0,380	0,402
1	0,001	0,047	0,095	0,143	0,190	0,236	0,280	0,322	0,361	0,394	0,421
1,05	0,001	0,048	0,096	0,144	0,191	0,238	0,283	0,327	0,368	0,405	0,437
1,1	0,001	0,048	0,097	0,145	0,193	0,240	0,286	0,331	0,374	0,414	0,450
1,15	0,001	0,049	0,097	0,146	0,194	0,241	0,288	0,334	0,379	0,421	0,460
1,2	0,001	0,049	0,098	0,146	0,195	0,243	0,290	0,337	0,383	0,426	0,468
1,25	0,001	0,049	0,098	0,147	0,195	0,244	0,292	0,339	0,385	0,431	0,474
1,3	0,001	0,049	0,098	0,147	0,196	0,245	0,293	0,341	0,388	0,434	0,479
1,35	0,001	0,050	0,099	0,148	0,197	0,246	0,294	0,342	0,390	0,437	0,483
1,4	0,001	0,050	0,099	0,148	0,197	0,246	0,295	0,343	0,391	0,439	0,486
1,45	0,001	0,050	0,099	0,149	0,198	0,247	0,296	0,344	0,393	0,441	0,488
1,5	0,001	0,050	0,099	0,149	0,198	0,247	0,296	0,345	0,394	0,442	0,490
1,55	0,001	0,050	0,100	0,149	0,199	0,248	0,297	0,346	0,395	0,443	0,492
1,6	0,001	0,050	0,100	0,149	0,199	0,248	0,298	0,347	0,396	0,444	0,493
1,65	0,001	0,050	0,100	0,150	0,199	0,249	0,298	0,347	0,396	0,445	0,494
1,7	0,001	0,050	0,100	0,150	0,199	0,249	0,298	0,348	0,397	0,446	0,495
1,75	0,001	0,050	0,100	0,150	0,200	0,249	0,299	0,348	0,397	0,447	0,496

APÊNDICE H - Planilha com parâmetros para cálculo do escoamento superficial

NSB=		15					
Bacia	Le	Se	Ne	Ld	Sd	Nd	
1	264,967	0,030	0,224	767,705	0,041	0,207	
2	349,531	0,050	0,220	361,397	0,029	0,220	
3	358,531	0,030	0,223	429,187	0,040	0,223	
4	264,798	0,031	0,222	448,062	0,026	0,221	
5	586,834	0,024	0,284	264,639	0,055	0,336	
6	540,424	0,026	0,301	312,712	0,023	0,310	
7	607,192	0,032	0,374	272,775	0,031	0,176	
8	233,400	0,034	0,176	618,756	0,036	0,176	
9	448,992	0,024	0,374	169,226	0,026	0,176	
10	476,307	0,034	0,176	618,290	0,058	0,176	
11	539,517	0,054	0,374	440,687	0,058	0,176	
12	716,025	0,028	0,176	541,602	0,046	0,176	
13	621,420	0,036	0,374	572,317	0,055	0,176	
14	806,052	0,020	0,374	287,329	0,024	0,374	
15	317,978	0,049	0,374	245,525	0,021	0,176	

NSB-Número de Sub-bacias; Le-comprimento rampa plano esquerdo; Ne-coeficiente de atrito plano esquerdo; Se-declividade plano esquerdo; Ld-comprimento rampa plano direito; Nd-coeficiente de atrito plano direito; Sd-declividade plano direito.

APÊNDICE I - Parâmetros necessários ao cálculo de produção e transporte de sedimentos.

Bacia	Ke	Kd	Ce	Cd	Se	Sd
1	0,069	0,075	0,092	0,102	0,296	0,329
2	0,070	0,070	0,094	0,095	0,355	0,292
3	0,069	0,069	0,092	0,093	0,295	0,326
4	0,070	0,070	0,093	0,094	0,298	0,283
5	0,075	0,071	0,085	0,070	0,277	0,369
6	0,067	0,067	0,074	0,072	0,285	0,273
7	0,067	0,087	0,057	0,122	0,302	0,298
8	0,087	0,087	0,122	0,122	0,308	0,314
9	0,067	0,087	0,057	0,122	0,277	0,284
10	0,087	0,087	0,122	0,122	0,308	0,375
11	0,067	0,087	0,057	0,122	0,366	0,377
12	0,087	0,087	0,122	0,122	0,291	0,344
13	0,067	0,087	0,057	0,122	0,313	0,368
13	0,067	0,067	0,057	0,057	0,266	0,278
15	0,067	0,087	0,057	0,122	0,351	0,270

Ke: erodibilidade solo esquerda, Kd: erodibilidade solo direita, Ce: coeficiente de uso e cobertura esquerda, Cd: coeficiente de uso e cobertura direita, Se: coeficiente de declividade esquerda, Sd: coeficiente de declividade direita.