

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**PROCESSO DE EROSÃO DE UM ARGISSOLO UTILIZANDO
O MODELO WEPP**

Thiago Vinicius Barros Ibiapina

Engenheiro Agrônomo

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**PROCESSO DE EROSÃO DE UM ARGISSOLO UTILIZANDO
O MODELO WEPP**

Autor: Thiago Vinicius Barros Ibiapina

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para a obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Ciência do Solo)

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: PROCESSO DE EROÇÃO DE UM ARGISSOLO UTILIZANDO O MODELO WEPP

AUTOR: THIAGO VINICIUS BARROS IBIAPINA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. JOSE RENATO ZANINI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. DIEGO SILVA SIQUEIRA

Pós-doutorando / Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Data da realização: 06 de fevereiro de 2015.

Ibiapina, Thiago Vinicius Barros
112p Processo de erosão de um argissolo utilizando o modelo wepp /
Thiago Vinicius Barros Ibiapina. – – Jaboticabal, 2015
v, 52 p. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011
Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho
Banca examinadora:
Bibliografia

1. Erosão em entressulcos. 2. Erosão em sulcos. 3. Geração de
sedimentos.. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 631.459

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

THIAGO VINICIUS BARROS IBIAPINA – Filho de Osires Ibiapina e Ana Maria Barros Ibiapina. Nasceu no município de Teresina - PI, em 17-11-1985. **CURSO DE GRADUAÇÃO:** Agronomia, Universidade Federal do Piauí, concluído em 2009; **PÓS-GRADUAÇÃO:** Stricto Sensu Mestrado em Produção Vegetal, Universidade Federal do Piauí, concluído em 2011. Foi bolsista de iniciação científica do Departamento de solos e engenharia agrícola do Centro de ciências agrárias - UFPI, do ano de 2005 a 2008, desempenhando pesquisas na área de solos desde então. Lecionou nas Faculdades associadas de Uberaba – Fazu, como professor de solos do curso de Agronomia, ministrou disciplina no curso de especialização em gestão ambiental do centro universitário de Patos de Minas UNIPAM, trabalhando o planejamento conservacionista aplicado à gestão ambiental.

“A vida é o trem, não a estação.”

Paulo Coelho

Aos meus pais, fontes de tranquilidade, apoio e sabedoria,

Aos meus avós, em especial Vicente Ibiapina e Maria Rita Ibiapina (*in memoriam*),

Às minhas irmãs,

Aos meus grandes amigos, companheiros de caminhada,

Aos meus mestres, fontes de inspiração e determinação,

DEDICO

Aos que compartilham

O interesse pelo conhecimento e saber

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse realizar este trabalho, seja ela qual for, desde os amigos que me deram apoio em horas difíceis, aos que participaram das coletas, aos que contribuíram para as análises.

A minha família, pelo incentivo.

A minha companheira pelo apoio nas horas difíceis.

Aos mestres, pelo conhecimento e exemplo de vida.

Ao meu Orientador Marcílio Vieira Martins Filho, fonte de conhecimento e sabedoria.

À CAPES e CNPq, pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 A cultura da cana-de-açúcar	3
2.2 Erosão do solo	4
2.3 Modelos empíricos	5
2.4 Modelos Físicos	6
2.5 Modelo WEPP	7
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Local de estudo	14
3.2 Aquisição de dados para WEPP	15
3.2.1 Componente climática	16
3.2.2 Componente hidrológica	17
3.2.3 Componente desenvolvimento vegetal	19
3.3 Equação Universal de perdas de solo (EUPS)	22
3.4 Valores observados de erosão	23
3.5 Análise do desempenho dos modelos WEPP e EUPS	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5 CONCLUSÃO	35
6 REFERÊNCIAS	36

PROCESSO DE EROSÃO DE UM ARGISSOLO UTILIZANDO O MODELO WEPP

RESUMO – A erosão do solo tem sido assunto de grande preocupação mundial devido às grandes mudanças no planeta. Dentre elas, estão as mudanças climáticas e as perdas na biodiversidade do planeta, mas outras mudanças pouco comentadas, mas não menos importantes são as mudanças nos ciclos de nitrogênio e fósforo. Parte deste estudo comprova que o carreamento de sedimentos gerados por erosão pode ser o grande vilão das eutrofizações de corpos de água. O presente trabalho foi realizado em área localizada no município de Tabapuã, noroeste do Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21° 05' 57, S e Longitude 49° 01' 02 W. O objetivo principal deste trabalho foi estimar a erosão com o modelo WEPP em área cultivada de Tabapuã - SP, e com os seguintes objetivos específicos: 1) adaptar o modelo para uso em climas tropicais, como o clima brasileiro; 2) aplicar o modelo para a mensuração de cenários dos possíveis impactos causados pela erosão hídrica para cultivos de cana-de-açúcar, milho e soja na área de estudo. Tem-se como resultado a composição granulométrica do sedimento dividida em cinco frações que correspondem às frações argila, silte, areia muito fina, areia fina e areia grossa, respectivamente. Nas condições do estudo, a cultura da cana-de-açúcar mostrou-se a menos protecionista quando comparada com as culturas de milho e soja. Com a geração da componente clima para a cidade do experimento, têm-se dados mais confiáveis para a mensuração dos impactos causados pelo manejo na perda de solos da área do estudo. O modelo WEPP foi eficiente na geração dos valores de erosão líquida para a área em estudo onde, na bacia, há a deposição de sedimentos.

Palavras-chave: erosão em entressulcos, erosão em sulcos, geração de sedimentos.

EROSION PROCESS OF A ULTISOL USING MODEL WEPP

ABSTRACT – Soil erosion has been the subject of great concern worldwide due to major changes in the planet. These include climate change, and biodiversity loss on the planet, but little commented other changes, but no less important are the changes in nitrogen and phosphorus cycles. Part of this study shows that the carrying of sediments generated by erosion can be the villain of eutrofizações bodies of water. This work was carried out in an area located in the municipality of Tabapuã, northwest of São Paulo, whose geographical coordinates are: Latitude 21 05 '57 S and Longitude 49 01' 02 W. The main objective of this study was to estimate the erosion with the WEPP model in acreage of Tabapuã (SP), and with the following specific objectives: 1) to adjust the model for use in tropical climates like Brazil's climate; 2) apply the model to measure scenarios of possible impacts caused by water erosion for cane sugar crops, corn and soybeans in the study area. There has resulted in the particle size composition of the sediment divided into five fractions corresponding fractions clay, silt, very fine sand, fine sand and sand respectively. Under the conditions of the study the culture of cane sugar was shown to be less protectionist when compared to corn and soybeans. With the generation of climate component to the city of the experiment have been more reliable data to measure the impacts of management in the loss of the study area soils. The WEPP model was efficient in the generation of net erosion values for the studied area in the basin where there is a deposition of sediments.

Keywords: interrill erosion, rill erosion, rill slope, sediment yield.

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
Figura 1. Representação esquemática da área em estudo, 200 ha microbacia fazenda São Domingos (FSD), Tabapuã, SP	18
Figura 2. Detalhe dos canais delimitados para estudo. (em preto são os canais utilizados para a validação dos dados, em amarelo o detalhe da orientação das vertentes acima dos canais).	19
Figura 3. Gráfico de porcentagem das frações granulométricas no fluxo	26
Figura 4. Comparação dos valores médios de perdas de solo (PS) dos modelos USLE e WEPP.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Página
Tabela 1. Atributos químicos e composição granulométrica do solo em estudo	14
Tabela 2. Dados de entrada para a construção do arquivo desenvolvimento vegetal	21
Tabela 3. Composição do sedimento erodido sob cultura de cana-de-açúcar, milho e soja, segundo o modelo WEPP	26
Tabela 4. Dados de perda de solo da microbacia calculada das encostas sob cultivo de cana-de- açúcar	29
Tabela 5. Valores médios anuais de produção de sedimentos observados no campo (Pi) e estimados pelos modelos WEPP (PiWEPP), USLE (PiUSLE) e magnitude do erro (E) em relação aos valores observados para 17 encostas da microbacia MSB.....	30
Tabela 6. Estatísticas para avaliação do desempenho dos modelos WEPP e USLE nas estimativas da produção de sedimentos por erosão (PS) no cultivo de cana-de-açúcar.....	32

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo tem sido assunto de grande preocupação mundial devido as grandes mudanças no planeta. Dentre elas, estão as mudanças climáticas e as perdas na biodiversidade do planeta, mas outras mudanças pouco comentadas, mas não menos importantes são as mudanças nos ciclos de nitrogênio e fósforo (ROCKSTRÖM et al., 2009).

A eutrofização dos corpos de água pelo carreamento de sedimentos ricos em nutrientes é uma preocupação econômica e ambiental muito relevante. Portanto a avaliação das perdas de sedimentos por erosão nas culturas deve ser vista com bastante critério.

Existem vários métodos de pesquisas para se estudar e avaliar as ocorrências e consequências do processo de erosão hídrica dos solos. Dentre as metodologias disponíveis para avaliar a erosão do solo, os modelos de predição são fundamentais, pois uma vez comprovada sua adequação e confiabilidade, são capazes de avaliar diferentes cenários de manejo do solo sem a necessidade de testes de campo, normalmente custosos e demorados (AKSOY; KAVVAS, 2005).

A modelagem do processo de erosão é uma importante ferramenta no desenvolvimento de avaliações confiáveis de predições de perdas de solo e, ainda, para o planejamento de medidas de controle do referido fenômeno. O uso de modelos baseados nas teorias atuais do mecanismo de erosão requer a obtenção de informações fundamentais sobre as relações entre erosão e sistemas de manejo das culturas. Assim, na modelagem do processo de erosão, um importante efeito a ser considerado é o da cobertura vegetal (MARTINS FILHO et al., 2009).

Modelos matemáticos foram propostos, desenvolvidos e aperfeiçoados, desde a década de 50, com o intuito de prever a magnitude das perdas de solo por erosão, com o propósito de auxiliar o planejamento agrícola, para fins de conservação do solo e da água, respeitando-se os limites toleráveis de erosão. Os modelos de predição de erosão do solo evoluíram de modelos empíricos, tais como a Equação Universal de Perdas de Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE) e a Equação

Universal De Perdas de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE), para modelos baseados em princípios teóricos, como o Projeto de Predição de Erosão Hídrica (*Water Erosion Prediction Project* - WEPP).

Para De Maria (2010), a evolução do uso desses modelos segue etapas distintas, sendo que as próximas etapas, ou seja, as tendências para a utilização destes para estudos de perdas de solo viriam pela junção do conhecimento e de dados gerados pelos modelos físicos e esta espacialização dos dados na paisagem.

Em estudos de comparação entre modelos de predição de erosão, Amorim et al., (2010) concluíram que os três modelos, USLE, RUSLE e WEPP, tenham estimado valores de perdas de solo diferentes, estatisticamente, dos valores observados experimentalmente. Em suma, o modelo WEPP mostrou ter grande potencial de usabilidade em condições de clima tropical. Mahmoodabadi e Cerdà (2013) corroboram os resultados sobre o modelo WEPP, em testes de calibração e acurácia do modelo, os quais obtiveram bons resultados, mesmo com valores subestimados de erosão em entressulcos.

Este estudo tem por hipóteses: 1) a cultura da cana-de-açúcar tem menor suscetibilidade à erosão 2) o modelo WEPP é capaz de predizer com boa confiabilidade a quantidade de sedimentos a ser perdida na microbacia em estudo.

O objetivo principal deste trabalho foi estimar a erosão do solo com o modelo WEPP em área cultivada de Tabapuã - SP, e com os seguintes objetivos específicos: 1) adaptar o modelo para uso em climas tropicais, como o Clima Úmido Subúmido; 2) aplicar o modelo para a mensuração de cenários dos possíveis impactos causados pela erosão hídrica para cultivos de cana-de-açúcar, milho e soja na área de estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A importância da cultura da cana-de-açúcar é notória no cenário agrícola nacional. Segundo IBGE (2013) a produção nacional de cana-de-açúcar apresentou crescimento de 6,9% em relação ao ano anterior, alcançando 716,8 milhões de toneladas.

O Estado de São Paulo, responsável por 53,2% da produção nacional, apresenta incremento de 6,7% na produção, com a recuperação da produtividade dos canaviais. Contudo, os maiores incrementos percentuais na produção foram observados na região Centro-Oeste, áreas de expansão dos canaviais nos últimos anos. Os Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás apresentam incrementos na produção de 18,1%, 17,5% e 14,7%, respectivamente IBGE (2013).

Nesta primeira avaliação da safra de 2012/2013, a produção nacional de cana-de-açúcar está estimada em 715 333 588 toneladas, crescimento de 6,0% em relação ao ano anterior. Este aumento deve-se exclusivamente ao melhor rendimento esperado para este ano, já que a lavoura foi bastante atingida pela falta de chuva em 2012. O rendimento médio esperado de 76 947 kg/ha é 7,4% superior ao apurado no ano passado.

A cana-de-açúcar tornou-se uma cultura de destaque no cenário nacional tanto pela alta produtividade em toneladas por hectare, quanto por sua capacidade de ser fonte para a indústria alimentícia, quanto uma fonte de energia renovável (ANDRADE et al. 2011). Tal fato leva os produtores a lançarem mão de alta tecnologia para melhores produtividades e altas produções, induzindo a um uso excessivo do solo, podendo provocar um desgaste deste recurso natural.

2.2 Erosão do solo

A erosão consiste no processo de desagregação e transporte de sedimentos e posterior deposição, podendo seu transporte dá-se por via hídrica ou eólica, tratando de um processo global natural e inevitável. Os processos de erosão acelerada, que podem ser causados ou potencializados por ações antrópicas, denominam-se erosão acelerada. Esse será o objeto deste estudo.

A modelagem do processo de erosão é uma importante ferramenta no desenvolvimento de avaliações confiáveis de predições de perdas de solo e, ainda, para o planejamento de medidas de controle do referido fenômeno. O uso de modelos baseados nas teorias atuais do mecanismo de erosão requer a obtenção de informações fundamentais sobre as relações entre erosão e sistemas de manejo das culturas. Assim, na modelagem do processo de erosão, um importante efeito a ser considerado é o da cobertura vegetal (MARTINS FILHO et al., 2004).

Os sistemas conservacionistas de preparo do solo são eficazes na redução das perdas de solo em virtude da permanência da cobertura por resíduos remanescentes das culturas anteriores. No entanto, não apresentam a mesma eficácia de redução nas perdas de água por escoamento superficial (enxurrada), as quais podem até ser superiores às aquelas verificadas nos sistemas convencionais de preparo, em determinadas situações (MORAIS; COGO, 2001).

A erosão do solo tem sido assunto de grande preocupação no Brasil e no mundo, em razão da rapidez com que se processa e por acarretar grandes prejuízos diversas atividades econômicas e para o próprio meio ambiente. A erosão acelerada do solo origina-se da combinação da intensificação agrícola com eventos de chuvas intensas, a qual é responsável por aproximadamente 85% da degradação dos solos. Existem vários métodos de pesquisas para se estudar e avaliar as ocorrências e as consequências do processo de erosão hídrica dos solos. Dentre as metodologias disponíveis para avaliar a erosão do solo, os modelos de predição são fundamentais, pois uma vez comprovada sua adequação e confiabilidade, são

capazes de avaliar diferentes cenários de manejo do solo sem necessidade de testes de campo, normalmente custosos e demorados (AKSOY; KAVVAS, 2005).

Segundo Amorim et al. (2003), diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados, desde a década de 50, com o intuito de prever a magnitude das perdas de solo por erosão, visando a implementar ferramentas que possibilitam avaliar as perdas de solo com propósitos de auxiliar no planejamento agrícola, principalmente em locais onde as perdas de solo são superiores aos limites toleráveis. Os modelos de predição de erosão do solo evoluíram de modelos empíricos, tais como a Equação Universal de Perdas de Solo (*Universal Soil Loss Equation* USLE) e a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* RUSLE), para modelos baseados em princípios teóricos, como o Projeto de Predição de Erosão Hídrica (*Water Erosion Prediction Project* WEPP).

2.3 Modelos empíricos

A avaliação de dados provenientes diretamente de pequenas bacias hidrográficas permite que sejam feitas importantes inferências matemáticas sobre o comportamento da erosão ao longo do ano. Segundo Nearing et al. (2001), o modelo é muito utilizado para o planejamento conservacionista do solo e, embora seja denominado Universal, necessita da calibração dos parâmetros de acordo com as condições locais (WISCHMEIER, 1978). A Equação Universal de Perda de Solo – USLE, expressa a perda de solo por unidade de área e tempo, e considera fatores como a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o fator topográfico e os fatores de uso e manejo do solo, além de práticas conservacionistas.

O modelo empírico mais utilizado na atualidade é a Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS ou *Universal Soil Loss Equation* - USLE desenvolvida pelo centro nacional de dados de pesquisa em erosão estadunidense em colaboração com a Universidade de Perdue, sendo posteriormente revisada por Wischmeier e

Smith (1965), sendo bastante difundida, principalmente por ser um modelo de fácil aplicação pelo número de atributos necessários para sua aplicação ainda ser relativamente pequeno.

Dentre os estudos com o uso de modelos empíricos de predição de erosão, podemos ressaltar o trabalho realizado por Gameiro (1997) utilizando métodos para modelar os fatores L e S da Equação Universal de Perdas de Solo obtendo resultados bem significativos, principalmente para o fator L, já que, com a utilização de SIG, o fator S ainda não teve significância estatística. Já Farinasso et al. (2006) no estudo utilizando SIG associado a EUPS, tiveram boa resposta para os resultados de erosão atual com base nos mapas de uso do solo e erosão potencial por meio de interpolações dos dados obtidos por EUPS.

2.4 Modelos Físicos

O escoamento pode ser simulado por modelos matemáticos hidrodinâmicos (SILVA, 2004) devido à representação física desses processos. Esses modelos são classificados como modelos hidrológicos de base física (COLLISCHONN, 2001).

Essa representação pode ser feita, ainda, considerando a variabilidade espacial dos eventos de precipitação e das características da bacia. Nesses casos, os modelos são classificados como modelos distribuídos. Entre os modelos hidrológicos de base física mais citados na literatura, encontram-se o modelo SHE - Sistema Hidrológico Europeu (BATHURST et al., 1995) e o modelo TOPMODEL (BEVEN et al., 1995). O modelo SHE foi inicialmente desenvolvido em 1976, como resultado da cooperação de alguns centros de pesquisa europeus. Sendo que, em cada célula e em cada nível da discretização vertical, é necessário conhecer o valor da condutividade hidráulica e a capacidade do solo de reter a umidade.

O modelo TOPMODEL é baseado fundamentalmente nas características topográficas da bacia hidrográfica, buscando reproduzir o comportamento

hidrológico, considerando as variáveis condicionantes de forma distribuída (SCANLON et al., 2000).

Em estudos de comparação entre modelos de predição de erosão, Amorim et al. (2010) concluíram que, embora os três modelos (USLE, RUSLE e WEPP) tenham estimado valores de perdas de solo diferentes, estatisticamente, dos valores observados experimentalmente, o WEPP demonstra ter maior potencial para fazer previsão da erosão para condições edafoclimáticas brasileiras em função de seu melhor desempenho, do coeficiente angular mais próximo da unidade na comparação entre as perdas de solo médias anuais obtidas experimentalmente, versus as perdas estimadas e de ser embasado em processos físicos.

2.4.1 Modelo WEPP

Há uma crescente preocupação pública em diversos países do mundo, inclusive no Brasil, com as fontes de água superficial em termos de qualidade nas bacias hidrográficas para o abastecimento doméstico, uso industrial e produção agrícola. São exemplos de tais preocupações trabalhos como os de Dun et al. (2009), nos EUA, Singh et al. (2011), na Índia, e Farias (2013), no Brasil.

A adequação de ferramentas de simulação, por exemplo, dos cenários de erosão, numa bacia hidrográfica, é necessária para a gestão dos recursos solo e água. Modelos de simulação apropriados podem ser utilizados para avaliar uma série de cenários de gerenciamento de uma bacia, sem a necessidade de testes caros e morosos no campo (PIERI et al., 2007).

Um modelo de simulação que pode ser utilizado para monitoramento e a gestão de cenários de erosão, numa bacia hidrográfica, é o modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*).

As microbacias hidrográficas constituem-se numa unidade de drenagem natural. Estas microbacias devem, portanto, ser assumidas como a unidade básica de planejamento dos vários usos e medidas conservacionistas. Tal planejamento

deverá ter por intuito otimizar o uso dos recursos solo e água para aumentar e sustentar a produção agrícola.

O modelo WEPP é distribuído em parâmetros que podem ser executados em qualquer perfil de encosta ou na configuração de uma pequena microbacia hidrográfica. A escala espacial para simulações de encosta é tipicamente de 1 a aproximadamente 100 m de comprimento, embora, em algumas situações, grandes encostas de várias centenas de metros talvez sejam mais adequadamente simuladas.

Para pequenas microbacias em que a aplicação de interesse é a captação do sedimento gerado, a máxima área a ser utilizada pelo modelo tem cerca de 260 ha, embora novamente, em algumas situações, performances mais satisfatórias talvez sejam mais bem atingidas em áreas maiores (FLANAGAN; FRANKEMBERGER; ASCOUGH, 2012).

O principal objetivo do modelo WEPP é de identificar regiões na encosta com maior ocorrência de escoamento superficial e de perda de solo. Áreas substancialmente grandes (> 260 ha) têm sido simuladas com o WEPP, obtendo boa performance na simulação de processos de escoamento superficial, em sulcos e em entressulcos e a erosão em pequenas ravinas (FLANAGAN, FRANKEMBERGER & ASCOUGH, 2012).

As chuvas em excesso não são o único mecanismo de geração de escoamento que influencia a hidrologia e a erosão numa microbacia (COVERT, 2003). A cobertura vegetal, a topografia, a idade, a profundidade e a composição granulométrica dos solos diferenciam as características do escoamento superficial entre áreas florestadas e agrícolas.

O modelo torna-se menos robusto em áreas que se enquadram nos seguintes casos: 1) canal exutório está em locais em que o processo predominante é a erosão; 2) onde não há controle do sedimento transportado para fora da rede de canais; 3) presença de solapagem em canais; 4) ocorrência de desmoronamentos laterais. Nesses casos, o WEPP simulará resultados confiáveis se os mesmos não forem contabilizados.

O WEPP também foi adaptado para considerar a presença de camadas do subsolo impermeáveis, assim como o material de origem logo abaixo dos horizontes permeáveis do solo (FLANAGAN et al., 2012).

O modelo WEPP originalmente não foi projetado para simulações que envolvam rios perenes, ravinas ou para processos de erosão, tal como deslizamentos de terra. No entanto, o modelo simula o movimento das águas subterrâneas e superficiais, incluindo infiltração, infiltração profunda, fluxo lateral.

As encostas e a rede de canais são particionadas no WEPP, a partir de um divisor de águas, o que inclui vários segmentos de canais e represamentos. O fluxo superficial alimenta essa rede de canais. Estes compartimentos de encostas em elementos de fluxo superficial, dentro do qual solo, vegetação e manejo, são assumidos estarem sob condições homogêneas.

Foi desenvolvida mais recentemente interface de espacialização dos dados, o GeoWEPP, que permite o uso de modelos de elevação digital, para gerar configurações de bacias hidrográficas e insumos topográficos de grande importância para o modelo WEPP (RENSCHLER, 2003).

Importantes funções e rotinas do WEPP foram descritas por Flanagan et al. (1995) e Dun et al. (2009), as quais são descritas resumidamente na sequência deste texto.

A componente encosta do WEPP simula os seguintes processos: hidrologia e hidráulica superficiais, hidrologia subsuperficial, desenvolvimento vegetal e decomposição de resíduos, processos de inverno, desagregação e transporte de sedimentos.

Informações sobre o clima, práticas culturais e manejo são utilizadas pela rotina hidrologia, a qual gera e mantém, a partir destas informações, um contínuo balanço da água no solo, em base diária.

Com base em soluções de equações cinemáticas, a rotina hidráulica estabelece a rota do fluxo superficial, bem como determina ajustes nas propriedades hidráulicas em função de mudanças nas condições do solo e da vegetação.

Os fluxos laterais são calculados com as rotinas da hidrologia subsuperficial, seguindo a lei de Darcy. Já as rotinas do desenvolvimento vegetal e a decomposição de resíduos calculam a produção de biomassa e a decomposição de resíduos sob práticas de manejo comum.

As rotinas de inverno simulam o congelamento-degelo do solo, com acúmulo de neve e derretimento, o que não é o caso em condições tropicais. Já as rotinas de erosão estimam a erosão em entressulcos e em sulcos, bem como o transporte de sedimentos nos canais.

O componente de canais é constituído por duas rotinas: hidrologia de canais e canais de erosão. Estas rotinas geram hidrógrafas pela combinação de escoamento no canal com o superficial nos elementos da bacia, ou seja, encosta, canais ou depressões.

As rotinas para canais de erosão simulam a desagregação do solo no leito do canal e em locais de deposição devido ao excesso de tensão cisalhante ao longo dos pontos de incisão e alagamento do canal, bem como de estimativas do transporte e deposição de sedimento (DUN et al., 2009).

A produção de sedimentos representa a quantidade total de sedimentos observada em um determinado ponto, em uma paisagem ou num sistema fluvial, como a saída da bacia, em um intervalo de tempo específico.

Estimativas da produção de sedimentos são de interesse fundamental na gestão de bacias hidrográficas, devido às preocupações crescentes sobre a qualidade da água e da vida das estruturas artificiais (barragens, pontes, portos e sistemas de abastecimento de água) (ZHENG et al., 2014).

O modelo WEPP, em sua aplicação para microbacias apresenta vários resultados como: produção de sedimentos; perda de solo; sedimento gerado; taxa de erosão líquida; taxa de transferência de sedimentos (*Sediment Delivery Ratio* – SDR). Esta última tem grande valor para o conhecimento da quantidade de sedimento realmente erodido, pois nem todo sedimento gerado na bacia é transportado para fora da mesma.

A taxa de transferência de sedimentos é uma razão entre produção de sedimento em um ponto específico e a erosão total que ocorre a montante deste ponto. A produção de sedimentos trata do sedimento total que passa pelo canal exutório da microbacia estudada. A importância do conhecimento deste conceito da taxa de transferência de sedimentos está intimamente ligada ao conceito de eficiência da bacia em transportar o sedimento gerado para fora da mesma.

Associado a esse conceito, estão fatores como: a forma do relevo, o tamanho da microbacia, a capacidade de uso da terra. Quanto ao tamanho da microbacia, normalmente, quanto maior seu tamanho, de forma, geral maiores as chances de ocorrer deposição de sedimentos no comprimento da vertente, diminuindo assim a eficiência da transferência de sedimentos, diminuindo, portando, os valores de SDR. Nesse caso o SDR funciona como um indicador, e quanto maior for o valor de SDR, menor será a eficiência na retenção de sedimentos na bacia (DIDONÉ, 2013). Tal fato configura um importante resultado para o melhor entendimento do comportamento das formas de relevo presentes na bacia e suas interações com a hidrologia e o uso do solo.

Bacchi et al. (2000) avaliaram a erosão hídrica na microbacia do ribeirão Ceveiro, pertencente à bacia do Rio Piracicaba - SP, cultivada com cana-de-açúcar, por meio da análise da redistribuição do "fallout" do ^{137}Cs . A taxa de erosão estimada pela USLE foi de $39 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e pelo modelo WEPP foi de $16,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com uma taxa de liberação de sedimentos de $12,4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (SDR = 75%). Esses resultados confirmaram as inadequadas práticas conservacionistas adotadas na área e explicam o grande assoreamento observado nos reservatórios de água existentes na microbacia.

Para compreender melhor a degradação do solo, é necessário entender o processo físico de erosão em relação à topografia, ao uso e ao manejo dos solos e da cobertura vegetal numa unidade básica de planejamento. Para tanto, é necessário o uso de modelos de predição da erosão confiáveis: calibrados e validados.

Modelos de simulação devem ser devidamente calibrados e validados, antes de serem aplicados, com o uso de dados hidrológicos medidos na bacia hidrográfica

(SINGH et al., 2011). A falta de dados confiáveis medidos no campo, para a calibração e a validação de modelos, é a principal limitação para a aplicação destes.

Uma das dificuldades na calibração e na validação do WEPP é resultante das variações das propriedades do solo, cobertura vegetal do dossel e sobre a superfície do solo, diferenças topográficas e práticas de manejo (MARTINS FILHO, 2007). Essa variabilidade espacial aumenta a dificuldade de modelagem do processo de erosão.

Há a variabilidade temporal a que o fenômeno de erosão também está sujeito, além das incertezas associadas aos valores dos parâmetros de entrada aplicados nos modelos computacionais, os quais são utilizados para predizer este processo erosivo do solo (JETTEN et al., 2003).

A situação exposta poderá ser mais melhorada pelo uso de informações especializadas para a calibração e a validação de modelos do que apenas e tão somente pela utilização dos dados de saída e de modelos otimizados, que descrevem apenas o processo dominante atuando numa paisagem (JETTEN et al., 2003).

Nas últimas duas décadas, expressivas quantidades de dinheiro e tempo foram despendidas no desenvolvimento e na aplicação de tecnologias, com o intuito de manejar a variabilidade das culturas dentro das áreas cultivadas (MARTINS FILHO, 2007).

Muitos desses esforços foram focados na variabilidade solo-paisagem, particularmente em relação à fertilidade do solo, caso típico do setor sucroenergético no Brasil.

Tem sido demonstrado que a erosão é o principal processo de degradação a afetar a variabilidade de uma cultura numa paisagem (LOBB, 2006).

Processos erosivos podem condicionar um maior movimento da água nas posições de topo numa paisagem, o que aumenta a variabilidade espacial do teor de água no sentido dos pontos de menor para os pontos de maior cota na paisagem.

A erosão pode, também, promover a decapitação do perfil de solo, expondo os horizontes subsuperficiais que têm menor potencial de produtividade para as culturas. É extremamente importante reconhecer que, se a erosão é uma das

causas de variabilidade na relação solo-paisagem, essa variabilidade não é estática e aumentará em severidade e extensão em áreas cultivadas.

É fundamental o manejo dos processos intimamente ligados à paisagem, principalmente o de erosão. Desse modo, um manejo adequado da variável solo-paisagem, necessariamente, exigirá o estabelecimento de um balanço que considere, segundo LOBB (2006): a(s) causa(s) de variabilidade pode(m) ser manejada(s) tal como o(s) seu(s) efeito(s).

Logo, se o aumento de variabilidade numa paisagem está associado com o fenômeno de erosão, é evidente que a solução será controlá-lo (MARTINS FILHO, 2007). Uma boa estratégia para o controle da erosão está no uso de sistemas conservativos, como o cultivo mínimo e o plantio direto, em detrimento do sistema convencional de preparo do solo (WALTON et al., 2000).

No Brasil, na última década, o setor sucroenergético tem merecido destaque, principalmente quanto ao aumento no número de novos empreendimentos para a produção de açúcar e álcool em diferentes regiões do País (MARTINS FILHO, 2007). Nos últimos anos, o avanço no uso da colheita mecanizada da cana-de-açúcar (cana crua) tem aumentado, dado à proibição ou à limitação no uso do processo de despalha da cultura com o fogo (cana queimada) no período de pré-colheita, em função de demandas socioambientais (ANDRADE et al., 2011).

Os resíduos vegetais na superfície do solo são reconhecidamente efetivos na dissipação da energia das gotas d'água da chuva, no controle do escoamento superficial da água, como apontam trabalhos de Braida & Cassol (1999), Martins Filho et al. (2004), Silva et al. (2012) e Sousa et al. (2012). No que tange ao manejo da cultura de cana-de-açúcar, a colheita mecanizada traz consigo um relativo benefício, o de promover a cobertura do solo com os resíduos da cana-de-açúcar (MARTINS FILHO et al., 2009).

A manutenção dos resíduos de cana-de-açúcar, segundo Martins Filho et al. (2009) sobre a superfície, deve ser importante em solos suscetíveis à erosão, como os Argissolos. Entretanto, não há pesquisas direcionadas em comprovar e entender como tal sistema de manejo atua no controle de fenômenos degradativos, como a erosão do solo em áreas canavieiras (MARTINS FILHO, 2007). Com isto, justifica-se também a relevância do objeto de estudo desta tese.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de estudo

O presente trabalho foi realizado em área localizada na formação geomórfica do planalto ocidental paulista, município de Tabapuã, São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21° 05' 57", S e Longitude 49° 01' 02" W. O clima local, segundo a classificação pelo sistema de Thornthwaite, é: C2rA'a' – Clima Úmido Subúmido com pequena deficiência hídrica (ROLIM et al., 2009) e precipitação média anual de 1.350 mm.

Ressalta-se que a área apresenta um histórico de mais de 20 anos consecutivos com cultivo de cana-de-açúcar. Logo, a cobertura vegetal da área, na época da realização deste trabalho, era constituída por resíduos de cana-de-açúcar, que foram mantidos na superfície do solo após a colheita mecânica da cultura, para a realização de chuvas simuladas por Martins Filho et al. (2009). O solo da área foi classificado por Sanchez et al. (2009) como Argissolo Vermelho eutrófico, conforme os critérios da EMBRAPA (2013). De composição granulométrica e atributos químicos, são encontrados na Tabela 1, de acordo com Martins Filho et al. (2009).

Tabela 1. Atributos químicos e composição granulométrica do solo em estudo.

Atributos químicos								
Profundidade	pH	MO	P	K	Ca	Mg	SB	CTC
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----				
0-0,2 m	5,0	16	34	2	20	9	31	48,9
Composição granulométrica								
Profundidade	Argila	Silte	AT	AMG	AG	AM	AF	AMF
	g kg ⁻¹							
0-0,2 m	180	31	789	0	4	73	531	181

AT = areia total; AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AM = areia média; AF = areia fina e AMF = areia muito fina.

3.2 Aquisição de dados para o WEPP

A quantificação das perdas de solo e de água por erosão foi realizada por Martins Filho et al. (2009). Estas avaliações são necessárias para a construção do banco de dados analisado pelo presente estudo.

As avaliações realizadas por Martins Filho et al. (2009) foram as perdas de solo em entressulcos, sob condições de chuva artificial, que foram realizadas para três condições de cobertura vegetal em contato direto com a superfície: 1) ausência de cobertura; 2) 50% de cobertura, e 3) 100% de cobertura.

Estas porcentagens de cobertura foram avaliadas com uma régua graduada de 0,50 m, conforme método descrito por Adams e Arkin (1977). A dose de aplicação de resíduos foi a mesma para 50% e 100%, e igual a $1,4 \text{ kg m}^{-2}$.

As parcelas adotadas para este experimento, têm dimensões de 0,50 m de largura e 0,75 m de comprimento ($0,375 \text{ m}^2$), delimitadas com chapas metálicas nas laterais e parte superior, e por calhas coletoras metálicas em seus limites inferiores. As calhas coletoras, com 0,50 m de largura, convergiam para uma saída lateral de 0,065 m de diâmetro.

As parcelas experimentais foram submetidas a chuvas simuladas com intensidade média em torno de 65 mm h^{-1} (I), durante 65 minutos. Utilizou-se, para realizar as referidas precipitações, de um simulador de chuvas de hastes rotativas do tipo Swanson, com bicos veejet 80-100, previamente calibrado e nivelado no terreno, como proposto por Swanson (1965). Trinta e seis pluviômetros, alinhados no sentido do declive, na área de ação do simulador de chuvas, como descrito por Martins Filho (1999), foram utilizados para determinar as intensidades das precipitações produzidas pelo simulador, nas áreas ocupadas pelas parcelas experimentais.

Amostras de enxurrada foram coletadas nestas calhas para quantificar as perdas de solo e de água. Todas as parcelas foram alinhadas no sentido da

declividade do terreno, a qual, em média, foi de 7,5 %. O preparo do solo também foi realizado no sentido do declive.

.Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos foram realizadas no quinto minuto após o início da enxurrada e, a partir daí, a cada cinco minutos, como o realizado por Martins Filho (1999). Amostras foram coletadas em recipientes de vidro com capacidade de 1 L, cronometrando-se o tempo de coleta. Logo após as coletas, os recipientes foram fechados e conduzidos ao laboratório para a quantificação da concentração de sedimentos e do volume de solução, e consequente determinação das taxas de perdas de solo e de água.

Os volumes de solução coletados foram avaliados gravimetricamente, em balança com resolução de 0,01 g, e, em seguida, as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas para a deposição de sedimentos. Após o período de repouso de 24 horas, as amostras foram levadas à estufa a 105°C até secagem completa. Após a secagem, as amostras foram pesadas, determinando-se o peso de sedimento de cada uma. A concentração de sedimentos foi obtida considerando-se o volume da solução, a densidade da água e do sedimento na solução, conforme descrito por Vanoni (1975).

Todo esse experimento foi necessário para a obtenção de dados e posterior formação do banco de dados para o modelo WEPP, modelo este que se subdivide em seis componentes: clima, hidrologia, solo, desenvolvimento vegetal, erosão/deposição e irrigação (opcional). Após a descrição da aquisição de dados para o modelo abaixo, são descritos como foram alimentados os bancos de dados.

3.2.1 Componente climática

A análise de clima é feita estocasticamente e utilizada pelo modelo paralelo CLIGEN. Para alimentar este modelo de clima, foi necessário inicialmente gerar quatro arquivos a serem utilizados pelo software “BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP” Gete et al. (1999) que, com isso, pode alimentar o primeiro modelo climático. Para isto, foram utilizados dados de precipitação, temperatura, ponto de orvalho e radiação solar da estação meteorológica do município de

Catanduva – SP, onde os dados são mais completos e correspondentes à realidade de Tabapuã.

3.2.2 Componente hidrológica

A componente hidrológica do modelo baseia-se em informações de solo, topografia, infiltração e evapotranspiração. Para isto se fez-se necessária a criação de arquivos de solo e topografia. Para o arquivo solo foram utilizados banco de dados obtido por Sanches et al. (2009) para textura, densidade e conteúdo de matéria orgânica do solo. Valores calibrados e validados por Martins Filho (2007) permitiram compor o arquivo de solo, para o modelo WEPP, com relativa confiabilidade, para a tensão cisalhante crítica ($\tau_c = 2,18 \text{ Pa}$) e erodibilidades em entressulcos ($K_i = 5,32 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-1}$) e em sulcos ($K_r = 0,002 \text{ s m}^{-1}$). A classificação granulométrica no arquivo de solo foi executada segundo os critérios de classificação do USDA (1993).

O arquivo de topografia foi gerado com base nos dados de descrição topográfica da área, o que originou como resultado representação de elevação digital da área. Tal representação foi utilizada para a locação das vertentes principais para análise pelo WEPP da declividade e curvatura do relevo.

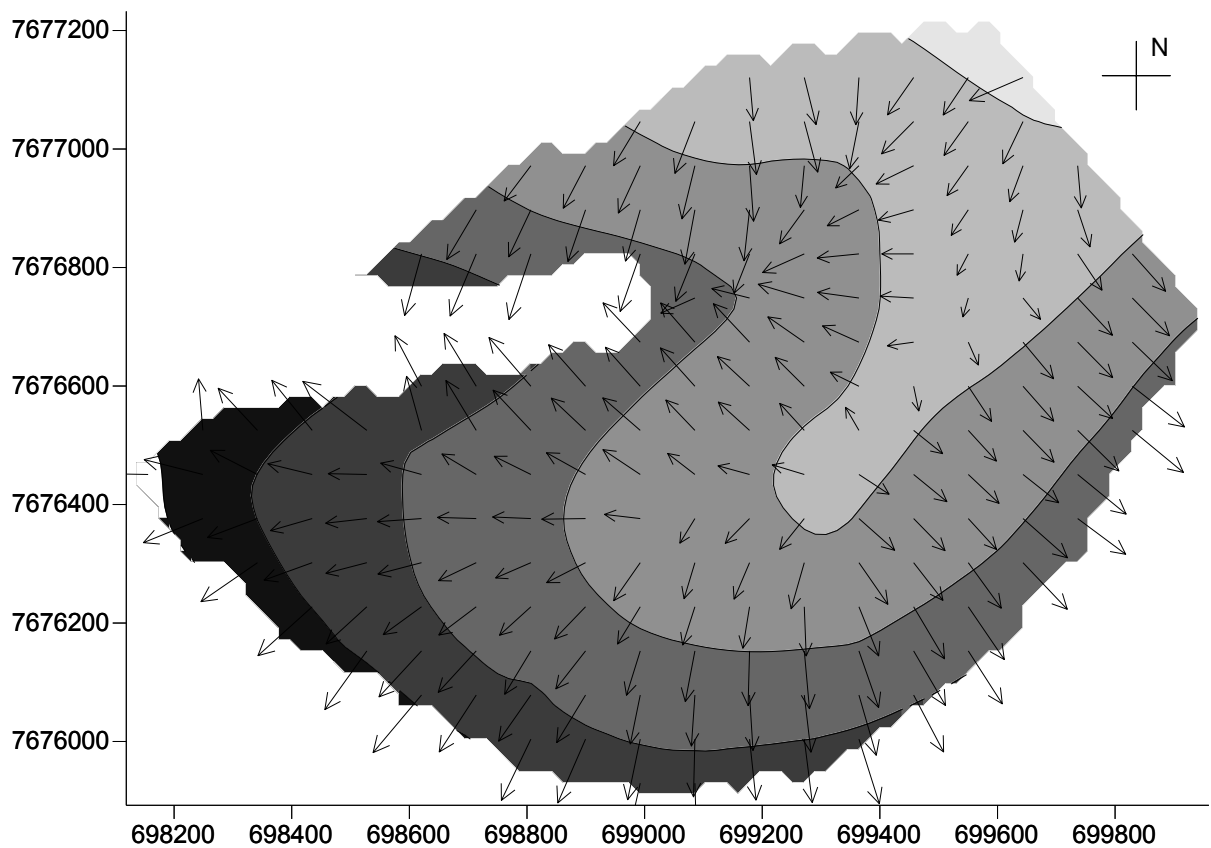


Figura 1. Representação esquemática da área em estudo, 200 ha microbacia fazenda São Domingos (FSD), Tabapuã - SP (as setas representam a direção dos pontos de maior para os pontos de menor cota).

Com base no esquema vetorial da direção dos escoamentos superficiais (Figura 1), considerando-se pontos de maior cota para os pontos de menor cota, definiram-se as vertentes para as quais foram determinados seus potenciais erosivos. Com tal técnica foi estabelecida a bacia com seus elementos de encostas (H1 a H89) e canais (C1 a C160), o que é apresentado na Figura 2.

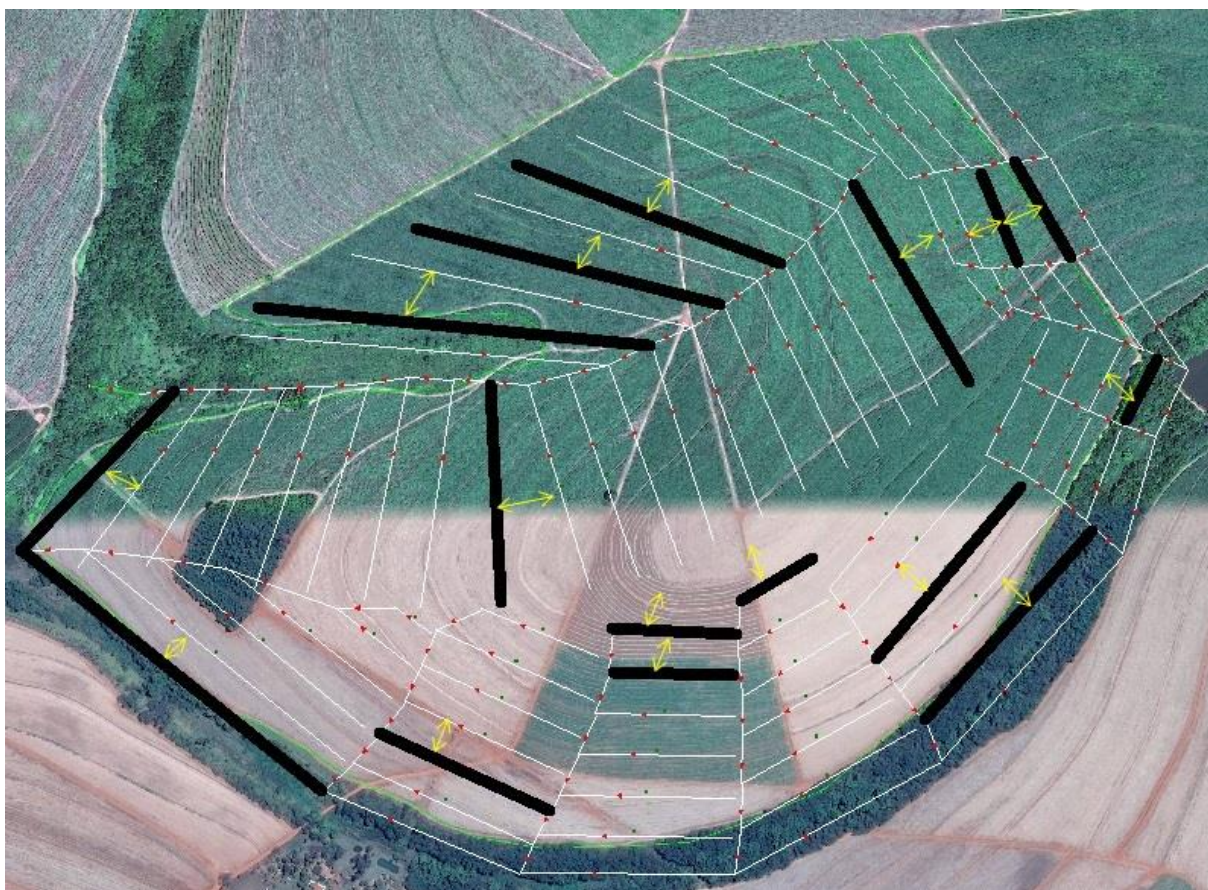


Figura 2. Detalhe dos canais delimitados para estudo. (em preto são os canais utilizados para a validação dos dados, em amarelo o detalhe da orientação das vertentes acima dos canais).

3.2.3 Componente desenvolvimento vegetal

Foram utilizados, na componente desenvolvimento vegetal (Tabela 2), dados fornecidos pelo próprio programa, especificamente para culturas de milho e soja com finalidade de simulação de cenários sob manejos diferentes, a cultura da cana-de-açúcar como base para o estudo, já que representava o manejo atual das áreas em questão. Para a comparação entre cenários da componente planta, foram utilizados dados da cultura de milho e soja. Para cobertura de palhada, os dados para cada cenário foram: cana-de-açúcar equivalente a 90% de cobertura de solo; milho com 80%, e soja com 90%.

Na componente de manejo para as culturas, foram usados os valores -
-padrão do modelo WEPP para as culturas de soja e milho; já para a cultura de
cana--de-açúcar, foram utilizados os valores realizados por Pieri et al. (2007).

Tabela 2. Dados de entrada para a construção do arquivo desenvolvimento vegetal.

Propriedades	Cana-de-açúcar	Milho	Soja
Razão de energia da biomassa (kg MJ ⁻¹)	39	35	23
Relação de energia biomassa (kg MJ ⁻¹)	300	55	60
Graus-dia até a emergência (Graus-dia)	1.800	1.700	1.150
Graus-dia para colheita (Graus-dia)	20	21,9	25
Espaçamento entre plantas (cm)	2,54	5,1	2,5
Altura do resíduo remanescente após a colheita (cm)	28,5	30,4	15,2
Índice de colheita (produtividade da cultura / total de biomassa seca) (%)	79	50	50
Base de dados de temperatura do ar diária (amplitude térmica)			
Temperatura ideal para o crescimento das plantas (°C)	25	25	25
Temperatura máxima que impede o crescimento de uma cultura perene (°C)	30	38	36
Temperatura de congelamento Crítica para uma cultura perene (°C)	0	0	0
Coeficiente de extinção de radiação	0	0	0
Coeficiente de cobertura do dossel	0,7	0,65	0,31
O valor do parâmetro para a equação altura do dossel	3	3,6	14
A altura máxima do dossel (cm)	3	3	3
Índice máximo de área foliar	2	260,1	101
A profundidade máxima de raiz (cm)	6	3,5	5
Proporção (% crescimento da raiz / % acima do crescimento vegetativo)	1	152	100
Massa máxima de raízes para uma cultura perene (%)	50	25	25
Índice de área foliar na senescência (0-100%)	10	10	10
Período durante o qual ocorre a senescência			
Dossel por cento restante, após a senescência (0-100%)	90	85	90
Biomassa remanescente, após a senescência (0-100%)	29	30	14
Parâmetro para a equação de resíduo de plano (%)	89	65	10
De pé ao fator de ajuste resíduo plano (vento, neve, etc.)	80	98	10
Decomposição constante para calcular a variação da massa de biomassa acima do solo	-	0,0065	0,013
Decomposição constante para calcular a variação da massa de biomassa radicular (MFO)	-	0,0065	0,013
Fator de atrito máximo Darcy Weisbach para planta viva	-	0	0

3.3 Equação universal de perdas de solo (EUPS)

A erosão foi estimada como proposto por Wischmeier e Smith (1978):

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

em que, A= perda de solo por unidade de área, $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$; R= fator de erosividade da chuva, $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$; K= fator de erodibilidade do solo, $t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$; LS= fator para o efeito combinado do declive e do comprimento da rampa; C= fator cobertura e manejo do solo; P= fator práticas conservacionistas.

A erosividade média das chuvas (R) foi estimada em $6.819,00\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$, através de método proposto por Lombardi Neto et al. (2000). O fator erodibilidade (K) foi estimado utilizando equação proposta por Denardin (1990):

$$K = 0,00000748\ M + 0,004448059\ p - 0,06631175\ DMP + 0,01039567\ X32 \quad (2)$$

em que, M = novo silte (novo silte + nova areia); p = permeabilidade codificada segundo Wischmeier et al. (1971); DMP = diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm, mm; X32 = nova areia (MO/100); Novo silte = silte + areia muito fina, %; Nova areia = areia muito grossa + areia grossa + areia média + areia fina, %.

O valor médio do fator K estimado foi de $0,024\ t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$, conforme obtido por Andrade et al. (2011), para o mesmo Argissolo do presente trabalho.

O fator LS foi determinado como proposto por Wischmeier e Smith (1978):

$$LS = (\lambda/22,13)^m (65,41\ sen^2\ \Theta + 4,56\ sen\ \Theta + 0,065) \quad (3)$$

em que, λ = comprimento de rampa (m); m = expoente variável com a declividade do terreno; Θ = ângulo do declive em graus.

O fator C foi considerando como sendo igual a 0,11 para cana-de-açúcar, 0,12 para milho e 0,116 para soja.

Para o fator P, adotaram-se valores propostos por Wischmeier & Smith (1978), em função da declividade do terreno.

A tolerância de perdas de solo por erosão (T) foi determinada a partir de atributos do solo, conforme método proposto por Oliviera (2004) e estabelecida como sendo igual a 5,1 t ha⁻¹ ano⁻¹.

Os valores de perdas de solo por erosão foram submetidos ao teste F aplicado à análise da variância, e as médias foram confrontadas pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para todas as análises estatísticas, foi utilizado o programa STATISTICA (STATSOFT, 1994).

3.4 Valores observados de erosão

Resultados experimentais de valores de perdas de solos por erosão, no cultivo de cana-de-açúcar, utilizados nesse trabalho, foram obtidos por Martins Filho et al. (2009).

3.5 Análise do desempenho dos modelos WEPP e EUPS

O desempenho dos modelos em estudo foi avaliado com o auxílio dos seguintes parâmetros estatísticos: erro quadrático médio do erro (RMSE) (eq. (4)), índice de concordância de Wilmott (eq.(5)), índice de confiança e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (eq(6)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{n}} \quad (4)$$

em que, RMSE – raiz do quadrado médio do erro; Y_{obs} – valor observado; Y_{est} – valor estimado, e n – número total de pares de valores observados e estimados.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{esti} - Y_{obsi})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_{esti} - \bar{Y}| + |Y_{obsi} - \bar{Y}|)^2} \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obsi} - Y_{esti})^2}{\sum_{i=1}^n Y_{obsi} - \bar{Y}^2} \quad (6)$$

em que, d – índice de concordância; $\bar{Y}$ - média dos valores observados; NS – coeficiente de Nash-Sutcliffe.

O índice de confiança (c) foi obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição do sedimento erodido estimado com o modelo WEPP, em termos de granulometria e presença de matéria orgânica, considerando-se o cultivo de cana-de-açúcar, milho e soja, em toda a área da bacia, é apresentada na Tabela 3.

A classe no tamanho de partículas da ordem de 0,002 mm é composta de 100% de argila presente no sedimento erodido e por 90,9% de matéria orgânica. Esta classe de tamanho representa 2,9% da fração erodida do sedimento. A classe de tamanho da correspondente à fração silte da ordem de grandeza de 0,01mm não ocorreu no sedimento erodido. O sedimento com tamanho da classe areia muito fina corresponde a 9,3% do sedimento erodido, com a seguinte composição: 45,8% de silte, 54,2% de argila e 49,3% de matéria orgânica. Na sequência, a classe de tamanho areia média correspondeu a 43,3% da fração erodida do sedimento, com a seguinte composição: 81,2% de areia, 11,6% de silte, 7,2% de argila e 6,5% de matéria orgânica. Já na classe de tamanho areia fina, composta por 100% de areia, representou 44,5% da fração erodida do sedimento.

Toda a composição do sedimento erodido discutida anteriormente foi a mesma observada para os três cenários testados no presente trabalho.

Pelos resultados apresentados na Tabela 3, verifica-se que grande parte da matéria orgânica foi perdida associada ao sedimento presente no fluxo de enxurrada. Tal fato ocorre porque o processo de erosão tende a ser seletivo, uma vez que a matéria orgânica e as frações mais finas do solo são mais vulneráveis às perdas que as mais grosseiras, o que é corroborado por resultados de Martins Filho et al. (2009), obtidos no mesmo solo e local do presente estudo.

Tabela 3. Composição do sedimento erodido sob cultura de cana-de-açúcar, milho e soja segundo o modelo WEPP

Classe	Diâmetro (mm)	Peso específico g cm ³	Composição do sedimento			Fração erodida do sedimento	
			% Areia	% Silte	% Argila	% M.O.	
Argila	0,002	2,6	0	0	100	90,9	0,029
Silte	0,01	2,65	0	100	0	0	0
AMF	0,03	1,8	0	45,8	54,2	49,3	0,093
AM	0,3	1,6	81,2	11,6	7,2	6,5	0,433
AF	0,2	2,65	100	0	0	0	0,445
Taxa de enriquecimento (ER)		Cana-de-açúcar		Milho		Soja	
		1,63		1,38		1,19	

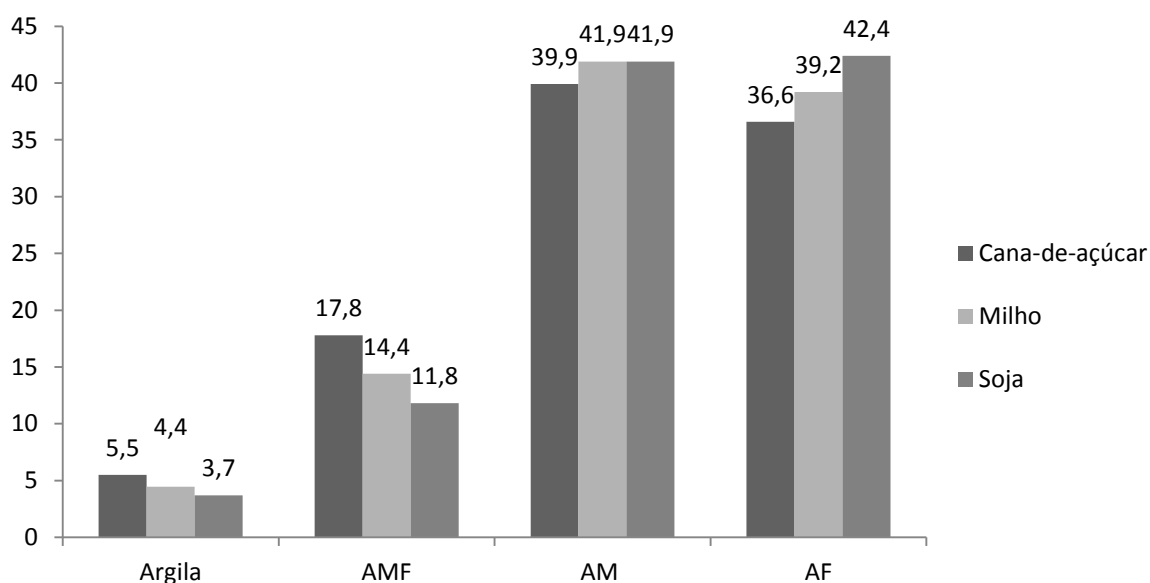


Figura 3. Gráfico de porcentagem das frações granulométricas no fluxo. (AMF = Areia muito fina; AM = Areia média; AF = Areia fina)

A composição granulométrica do sedimento não variou nos cenários testados para os cultivos de cana-de-açúcar, milho e soja (Tabela 3), dado que a componente solo utilizada pelo modelo WEPP foi a mesma. Os três cenários testados apresentaram como diferencial as taxas de enriquecimento do sedimento erodido por frações granulométricas menores que 0,2 mm e matéria orgânica (Figura

3). Os mesmos cenários também se diferenciaram pela fração de sedimento presente no fluxo de enxurrada. Tais resultados são provavelmente consequência do uso e do manejo do solo que alteram as forças de resistência à desagregação, pois sabe-se que a maior parte dos efeitos de redução da produção de sedimentos deve ser atribuída ao aumento da cobertura do solo proporcionado pelos cultivos conservacionistas (OLIVEIRA et al., 2012).

O sedimento erodido pode ser considerado enriquecido por frações granulométricas e matéria orgânica, visto que as taxas de enriquecimento (ER) foram superiores a 1,0. As taxas de enriquecimento do sedimento erodido (ER) por matéria orgânica (MO) e nutrientes (P, K, Ca e Mg) são apresentadas na Tabela 3.

A ER é a relação entre a concentração de MO e/ou nutrientes no sedimento erodido (Tabela 3) e no solo original (Tabela 1). Quando ER é maior que 1, significa que o sedimento se encontra enriquecido por matéria orgânica ou nutrientes do solo (MARTINS FILHO et al., 2009). As taxas de enriquecimento maiores do que 1,0 indicam que a concentração no sedimento erodido foi maior do que no solo original. Tal fato caracteriza a seletividade de arraste de material no processo da erosão hídrica, que transporta principalmente as partículas mais finas, as frações mais reativas do solo e, conseqüentemente, com maior capacidade de carrear nutrientes e carbono orgânico, como comprovado por Sousa et al. (2012).

No presente estudo, a maior taxa de enriquecimento do sedimento foi a obtida para a cana-de-açúcar, que apresentou valor de ER de 1,63, seguida pelo milho, com ER igual a 1,38, e soja com, valor de 1,19. Esses resultados de taxa de enriquecimento são preocupantes do ponto de vista do carreamento de nutrientes para os corpos de água.

Tendo em vista que este estudo foi realizado em área representativa da Bacia Bauru (Planalto ocidental paulista), onde estão localizados rios de grande importância como: Rio Grande, Tiête e Dourado, nesse sedimento gerado em áreas cultivadas com cana-de-açúcar a eutrofização desses rios é gerada pelos teores de P contidos na fração argila da área do estudo, como aponta trabalho realizado por Oliveira et al. (2013). Tal fato leva os rios da região à eutrofização, como sugere a

classificação trófica preconizada pela CETESB (2007), baseada nos teores de P adsorvidos ao sedimento, e por sua vez levados aos corpos de água. Tem-se, além da erosão de grande parte dos 20.000 hectares plantados com cana-de-açúcar na área da Bacia Bauru, uma provável eutrofização desses rios por esses sedimentos.

Os resultados de produção e a razão de transferência de sedimentos na área da microbacia FSD são apresentados na Tabela 5. Pode ser observado que a produção de sedimentos (erosão líquida) demonstrou que o maior potencial à erosão na área da microbacia FSD, para os cenários simulados, seria com o cultivo cultura da cana-de-açúcar, seguido pelo cultivo de milho e soja, nesta ordem.

No cenário de cultivo de cana-de-açúcar verificou-se que há menor quantidade de sedimentos produzidos por ano (Tabela 4). Contudo, com o cultivo da cana-de-açúcar, há maior eficiência no transporte de sedimentos para fora da microbacia. Isto pode ser verificado observando-se os valores percentuais da razão de transferência de sedimentos (SDR, sediment delivery ratio): 58% de todo o sedimento gerado com o cultivo de cana-de-açúcar são transferidos para fora da microbacia, enquanto 42% da erosão bruta ficariam depositados.

Em termos de produção de sedimentos, o cenário de cultivo de cana-de-açúcar apresentou o menor valor, ou seja, $8,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em comparação ao cenário com milho ($10,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e com a soja ($8,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Contudo, a cana-de-açúcar foi a cultura que proporcionou a maior SDR (58,5%). Com intensivo tráfego agrícola, em áreas de cana-de-açúcar, observa-se uma redução na macroporosidade do solo, como constatado por Roque et al. (2010), e subsequente aumento nos valores de densidade do solo, principalmente na linha trafegada pelos rodados. Isto causa menor infiltração de água no solo, o que leva a maior eficiência do fluxo de enxurrada em transportar maiores quantidades de sedimentos para fora da microbacia.

Maalim et al. (2013), modelando as perdas de solo e a geração de sedimentos, em função de mudanças no uso e manejo do solo, em Minnesota, verificaram que as menores coberturas de solo geram mais impactos em seu uso. É conhecido que a cultura do milho tem uma arquitetura que não permite a esta cultura

oferecer, em comparação à soja e à cana-de-açúcar, maior cobertura vegetal ao solo. Isto explica o fato da cultura do milho ter apresentado a maior produção de sedimentos, mesmo com a menor SDR (Tabela 4).

No cenário simulado com o cultivo de soja, verificou-se SDR superior à do milho e inferior à da cana-de-açúcar. Quanto à produção de sedimentos, esta foi estimada ser, no cenário com soja, inferior à predita com milho e superior à com cana-de-açúcar. Do exposto, pode-se afirmar que tais resultados contrariam os obtidos por Marioti et al. (2013), que verificaram maior produção de sedimentos com o cultivo da soja do que com o do milho.

Tabela 4. Dados de perda de solo da microbacia calculada das encostas sob cultivo de cana-de- açúcar.

Culturas	Volume de descarga (m ³ ano ⁻¹)	Produção de sedimentos total (t ano ⁻¹)	Produção de sedimentos (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Razão de transferência de sedimento (SDR)
Cana-de-açúcar	323.434	1.305,2	8,1	0,585
Milho	331.814	1.752,1	10,9	0,45
Soja	380.519	1.369,2	8,5	0,492

Uma Comparação de desempenho entre os modelos WEPP e USLE só foi possível para o cenário de cultivo de cana-de-açúcar, que é o uso atual da área. Para tal cenário, existe um banco de dados de valores observados de erosão em entressulcos, sulcos e global, obtido por Martins Filho (2007). Parte do referido banco de dados foi utilizado para a obtenção dos resultados apresentados na sequência.

Os resultados apresentados na Tabela 5 permitem avaliar que o modelo WEPP tendeu a estimar valores semelhantes aos obtidos experimentalmente (Pi). Já a USLE parece não ter permitido melhores estimativas de Pi, embora os valores estimados por este modelo apresentem a mesma ordem de grandeza dos

observados experimentalmente. Considerando-se a magnitude dos erros, observa-se que com a USLE ocorreu variação de $-0,8$ e $4,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e para o WEPP entre $-1,2$ e $1,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Valores das médias dos erros ou diferença média (MD) com sinal negativo indicam que os valores estimados subestimam os valores observados. Verifica-se, portanto, que o modelo WEPP tendeu a subestimar os valores observados. O contrário ocorreu com a USLE.

Tabela 5. Valores médios anuais de produção de sedimentos observados no campo (Pi) e estimados pelos modelos WEPP (PS_{WEPP}), USLE (PS_{USLE}) e magnitude do erro (E) em relação aos valores observados para 17 encostas da microbacia MSB.

Encostas	PS_{obs}	PS_{WEPP}	E_{WEPP}	PS_{USLE}	E_{USLE}
			$\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$		
H1	2.0	3.2	1.2	1.2	-0.8
H8	2.7	3.6	0.8	3.7	1.0
H10	3.8	3.3	-0.5	4.3	0.5
H15	3.4	3.8	0.4	3.3	-0.1
H20	3.7	3.7	0.0	3.6	-0.1
H28	3.5	3.1	-0.3	5.6	2.1
H29	2.6	2.3	-0.3	5.7	3.0
H33	2.7	2.2	-0.5	2.6	-0.2
H39	2.7	2.1	-0.6	4.1	1.3
H44	1.9	1.8	0.0	3.3	1.5
H45	1.7	1.9	0.2	3.4	1.7
H52	2.0	1.5	-0.4	5.9	4.0
H54	3.5	2.2	-1.3	8.0	4.6
H56	2.6	3.4	0.8	5.8	3.2
H70	2.7	1.5	-1.2	3.3	0.5
H88	1.9	2.1	0.2	3.8	1.9
H89	1.7	2.1	0.4	3.8	2.1

Valores de MD para o WEPP não diferiram de zero pelo teste t, e o contrário ocorreu com a USLE. Logo, tais resultados permitem avaliar ser o WEPP melhor estimador que a USLE para a produção de sedimentos na microbacia.

Na Tabela 7, é possível verificar que a média da estimativa da produção de sedimento (PS) com o modelo WEPP (PS_{WEPP}) não diferiu significativamente da

média observada (PS_{obs}) nas parcelas experimentais. Já a estimativa com a USLE (PS_{USLE}) apresentou valor médio significativamente superior a PS_{WEPP} e PS_{obs} . Com relação à média da magnitude dos erros (E) para PS, o modelo WEPP proporcionou uma média menor e significativa em relação à obtida nas estimativas de PS com a USLE.

Na análise do erro quadrático médio (RMSE), observa-se que seu valor com o WEPP foi mais próximo de 1, que o obtido com a USLE (Tabela 6). Valores de RMSE iguais a 1 são considerados como ideais, visto que tal condição indicaria que os valores estimados e observados são iguais.

Quanto ao índice de concordância (d) de Wilmott, que expressa a exatidão entre valores estimados e observados, verificou-se que o WEPP proporcionou maior grau de exatidão ($d = 0,76$), uma vez que seu índice de concordância (d) foi o mais próximo da unidade. Amorim et al. (2010) obtiveram na avaliação do desempenho dos modelos WEPP e USLE na predição da erosão, um d igual a 0,86 com o modelo WEPP e 0,56 com a USLE. Estes valores são superiores aos apresentados na Tabela 7.

A análise do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o WEPP e USLE, conforme critérios apresentados por Baltokoski et al. (2010), permite considerar que o desempenho dos modelos é inaceitável. Valores de NS inferiores a 0,36 fazem com que os modelos sejam classificados como inaceitáveis. Pieri et al. (2007) e Amorim et al. (2010) obtiveram valores de NS iguais a 0,34 e 0,24, os quais são superiores aos apresentados na Tabela 7.

Valores de $NS < 1$ indicam que as estimativas de um modelo são mais errôneas do que o simples uso da média dos valores observados (MARTINS FILHO et al., 2003). No caso do modelo WEPP, tal proposição justifica-se, uma vez que a média dos valores estimados não diferiu significativamente daquela obtida com os valores observados (Tabela 5).

Tabela 6. Estatísticas para avaliação do desempenho dos modelos WEPP e USLE nas estimativas da produção de sedimentos por erosão (PS) no cultivo de cana-de-açúcar.

Estatísticas	PS _{WEPP}	PS _{USLE}	PS _{obs}
Médias de PS, t ha ⁻¹ ano ⁻¹	2,59 b	4,20 a	2,66 b
Diferença média, MD, t ha ⁻¹ ano ⁻¹	-0,07 b*	1,54 a	
RMSE	0,68	2,13	
Índice de concordância, d	0,76	0,49	
Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe, NS	0,06	-0,58	
Coeficiente de correlação, r	0,58	0,32	
Índice de confiança, c	0,44	0,16	

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si, pelo teste de Duncan a 5%. * Não difere de zero pelo teste t a 5%.

Para o índice de confiança (c) obtidos com os modelos WEPP e USLE, segundo Biudes et al. (2008), este pode ser classificado como sofrível e péssimo, respectivamente. Este resultado é discordante do obtido por Amorim et al. (2010) para o modelo WEPP, o qual obteve valor de c considerado bom com este modelo. Contudo, quanto à USLE, os resultados são concordantes.

Mediante os resultados expostos, em geral, as estatísticas de avaliação dos modelos WEPP e USLE, apresentadas na Tabela 5, permitem verificar que o WEPP apresenta estimativas mais precisas em relação à USLE. A média dos valores estimados com o WEPP não difere da obtida experimentalmente.

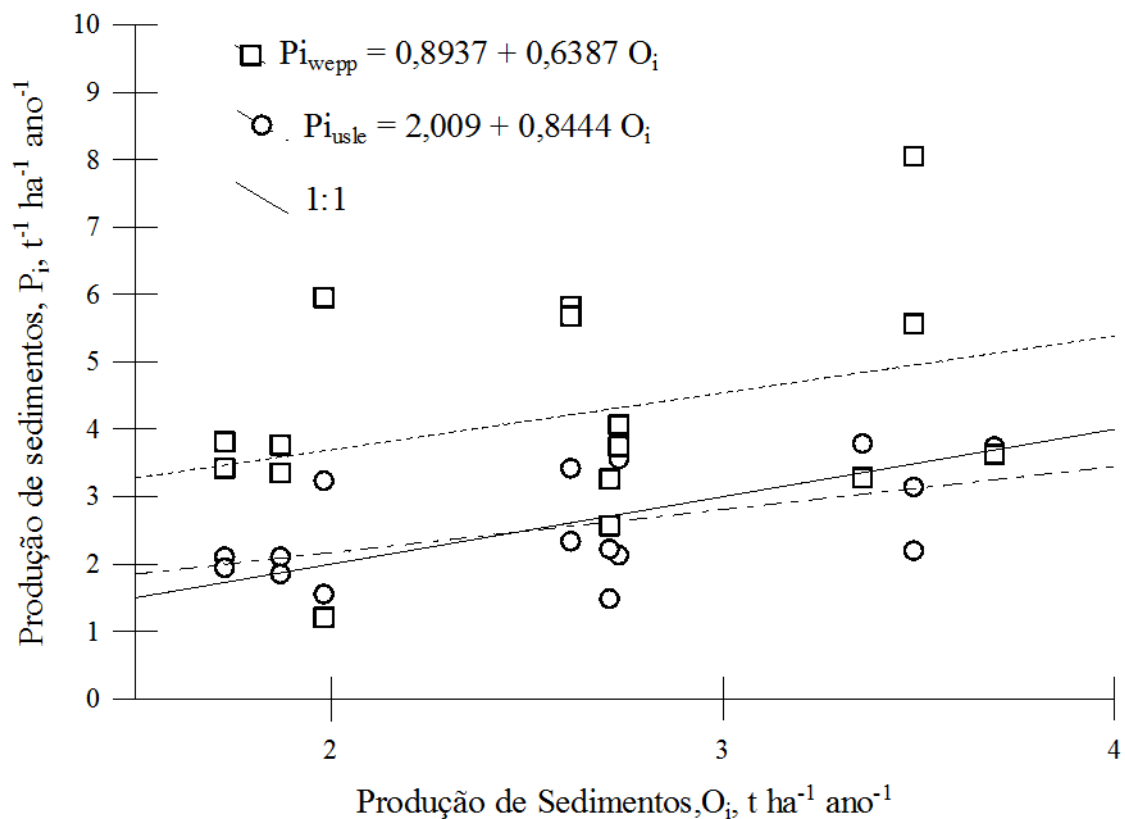


Figura 4. Comparação dos valores médios de perdas de solo (PS) dos modelos USLE e WEPP.

Na Figura 4, estão apresentadas as comparações dos valores médios de perdas de solo estimados, utilizando-se dos modelos USLE e WEPP, versus os valores observados experimentalmente.

Nas condições de eventos extremos de perdas de solo, se tem maior distanciamento entre valores preditos e observados com o modelo WEPP (Figura 4). Isso corrobora Pieri et al. (2007), que afirmaram, para a ocorrência de eventos extremos de produção de sedimentos, haver uma tendência do modelo WEPP subestimar esses valores.

Já os valores estimados com a USLE foram os que se mantiveram mais distanciados da reta 1:1 (PS observada), num indicativo claro da superestimativa dos valores observados pelos preditos.

Este melhor desempenho do modelo WEPP pode ser explicado, pela adequação do banco de dados utilizado neste estudo, já que as componentes climática e solo foram estabelecidas com dados específicos da área estudada.

Em vários trabalhos na literatura, foi atribuída a inadequação dos modelos WEPP, RUSLE e USLE, nas estimativas de erosão, à não consideração de características do solo, uso de equações inadequadas para estimar a condutividade hidráulica, K_i , K_r e τ_c (BEZERRA; CANTALICE, 2006; NUNES; CASSOL, 2008; AMORIM et al., 2010).

No caso do presente trabalho, a inadequação maior julga-se estar na não calibração e validação dos dados para a componente vegetal do modelo. Disto decorram, provavelmente, os erros nas estimativas com o modelo WEPP. Tais limitações talvez tenham sido maiores para o cenário de cana-de-açúcar, uma vez que há informações não disponíveis na literatura. Nos outros dois cenários restantes, foram utilizados os dados padronizados no modelo WEPP.

5 CONCLUSÃO

Considerando as condições da área de estudo e os cenários de estimativas de produção de sedimentos na microbacia avaliada, é possível afirmar que o uso e o manejo do solo são capazes de propiciar impactos ambientais, em termos de erosão líquida, na seguinte ordem: cana-de-açúcar > milho > soja.

A geração de um banco de dados climáticos específico para a cidade do experimento propicia maior confiabilidade para a mensuração dos impactos causados pelo manejo nas perdas de solos numa microbacia.

O modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) é eficiente na estimativa dos valores de erosão líquida (produção de sedimentos), em relação à USLE (Equação Universal de Perdas de Solo), para microbacia em que há efetiva deposição de sedimentos.

6 REFERÊNCIAS

- ADAMS, J. E.; ARKIN, G. F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 1, p. 789-792, 1977.
- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, Amsterdam v.64, n.1, p.247-271, 2005.
- AMORIM, R.S.S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 2003. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.
- AMORIM, R. S. S. ; DA SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; DE MATOS, A. T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil, **Engenharia Agrícola**., Jaboticabal, v.30, n.6, p.1.046-1.049, 2010.
- ANDRADE, N. S. F. de; MARTINS FILHO, M. V.; TORRES, J. L. R. Impacto técnico e econômico das perdas de solo e nutrientes por erosão no cultivo da cana-de-açúcar, **Engenharia Agrícola**., Jaboticabal, v.31, n.3, p.539-550, maio/jun. 2011.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARD, K.; SPAROVEK, G. ; RANIERI, S.B.L., Soil erosion e valuation in a small watershed in Brazil through ¹³⁷Cs fallout redistribution analysis and conventional models **Acta Geologica Hispanica**, v. 35, nº 3-4,p. 251-259, 2000.
- BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco - PR, **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34: p. 253-261, 2010.
- BATHURST, J. C.; WICKS, J. M.; O'CONNELL, P. E. (The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System. In: V.P. Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology. **Water Resources Publications**, Highlands Ranch, Colorado, 1995.
- BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , 5, p.145-149, 1981.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , 25, p.167-177, 2001.
- BEVEN, K. J. ; LAMB, R. ; QUINN, P. ; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. TOPMODEL. In: Models of watersheds hydrology. **Water Resources Publications**. c.18. 1995.

BIUDES, M. S.; VALENTINI, C. M. A.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. S. Estimativa da evapotranspiração numa pastagem mista, em condições de cerrado, pelos métodos de razão de bowen e penman- monteich, **Ciência e Natura**, UFSM, 30, p.71-86, 2008.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 711-721, 1999.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 132p. 1997.

CAMPOS, B.C., REINERT, D. J.; NICOLODI, R. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 121-126, 1995.

CARVALHO, D. F. de; CRUZ, E. S. da; PINTO, M. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo, **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.1, p.3–9, 2009.

CETESB (2007). **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo: 2006**. São Paulo: CETESB, 2007.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado. IPH –UFRGS. 2001.

DE MARIA, I. C. Geotecnologias e modelos aplicados ao manejo e conservação do solo e da água In: PRADO, R. B. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais** / organizado por Rachel Bardy Prado, Ana Paula Dias Turetta e Aluísio Granato de Andrade – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 486 p.: il.

DIDONÉ, E. J. **Erosão brita e produção de sedimentos em bacia hidrográfica sob plantio direto do planalto do Rio Grande do Sul**, Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2013.

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

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**– 3. ed. rev. ampl. – Brasília - DF : Embrapa, 2013.

FARIAS, V.L.S. M. **Concentração de nutrientes e qualidade da água de enxurrada em entressulcos**. Jaboticabal, 2013, 46 f. (Dissertação de mestrado) -

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2013.

FARINASSO, M. de; 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 – Equação Universal de Perdas de Solos 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, 2006.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. **USDA-Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation** NSERL Report 10, 1995.

FLANAGAN, D. C.; FRANKENBERGER, J. R. & ASCOUGH II, J.C WEPP: Model use, calibration, and validation, **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Vol. 55(4): p.1.463-1.477, 2012.

GAMEIRO, M. G. **Avaliação de métodos para obtenção dos fatores “L” e “S” da EUPS numa microbacia, via geoprocessamento e banco de dados** / M. G. Gameiro. – São José dos Campos: INPE, 116p. 1997.

GETE, Z.; WINTER, T.; FLANAGAN, D. **BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets**, USDA-ARS, National soil erosion research laboratory, West Lafayette, Indiana, 1999.

GRANT, C.A.; LANFOND, G.O. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.73, n.2, p.223-232, May 1993.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Estatística da Produção Agrícola**, Brasília, 2013.

JETTEN, V.; GOVERS, G.; HESSEL, R. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 17, n. 5, p. 887-900, 2003.

LOBB, D.A. Understanding and managing the causes of soil-landscape variability. 2006. 11p. Disponível em: <http://paridss.usask.ca/cgi-bin/p_farm/pari.pl?function=sheet&id=1>. Acesso em: 19 ago. 2006.

LOMBARDI NETO, F.; PRUSKI, F.F.; TEIXEIRA, A. de F. **Sistema para cálculo da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1 CD-ROM., 2000.

MAALIM, F. K.; MELESSE, A. M.; BELMONT, P.; GRAN, K. B. Modeling the impact of land use changes on runoff and sediment yield in the Le Sueur watershed, Minnesota using GeoWEPP, **Catena** 107, p. 35–45, 2013.

MAHMOODABADI, M.; CERDÀ, A.; WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments, **Geoderma** 204–205 p.75–83, 2013.

MARTINS FILHO, M.V.; CAMPOS, M.P.; IZIDORIO, R.; COTRIN, F.B.; SERRA, E.A.; AMARAL, N.S.; SOUZA, Z. Modelos para estimativas do subfator cobertura-manejo relativo à erosão entressulcos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.603-611, 2004.

MARTINS FILHO, M. V.; LICCIOTI, T. T.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J. SANCHEZ, R. B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.8-18, jan./mar. 2009.

MARTINS FILHO, M. V. **Modelagem do processo de erosão e padrão espacial da erodibilidade em entressulcos**. –Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Jaboticabal, viii, 121 f. ; 28, 2007.

_____. **Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal – SP**. 140 f. Tese. (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

MARIOTI, J.; BERTOL, I.; RAMOS, J. C.. WERNER, R. de S; PADILHA, J. & BANDEIRA, D. H. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto, **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , 37:1361-1371, 2013.

MORAIS, L.F.B.; COGO, N.P. Comprimentos críticos de rampa para diferentes manejos de resíduos culturais em sistema de semeadura direta em um Argissolo Vermelho da Depressão Central - RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , 25, p.1.041-1.051, 2001.

NEARING, M.A.; NORTON, D.L; ZHANG, X. Soil erosion and sedimentation. In: RITTER, W.F.; SHIRMOHAMMADI, A. (Eds.). **Agricultural nonpoint source pollution**. Boca Raton: Lewis Publishers, 2001.

NIERO, L. A. C. **Avaliações visuais do solo como índice de qualidade de um Latossolo Vermelho em oito usos e manejos e sua validação por análises físicas e químicas** / Dissertação. Campinas, 111 f. 2009.

OLIVEIRA, F. P. de; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A. ; MINELLA, J. P. G Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo de solo, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.4 p. 337-346, 2012.

OLIVEIRA, I. R. de; TEIXEIRA, D. De B.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Modelagem geoestatística das incertezas

da distribuição espacial do fósforo disponível no solo, em área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37, p.1.481-1.491, 2013

OLIVEIRA, J.O.A.P.; VIDIGAL FILHO, P.S.; TORMENA, C.A.; PEQUENO, M.G.; SCAPIM, C.A.; MUNIZ, A.S.; SAGRILO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25, p.443-450, 2001.

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

PIERI, L.; POGGIO, M.; VIGNUDELLI, M.; BITTELLI, M. Evaluation of the WEPP model and digital elevation grid size, for simulation of streamflow and sediment yield in a heterogeneous catchment, **Earth Surface Process Landforms**, Vol. 39, p.1.331–1.344, 2014.

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

RENSCHLER, C.S., Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. **Hydrology Process**. 17, p. 1.005–1.017, 2003.

RIBON, A.A. & TAVARES FILHO, J. Model propositions for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 47:25-31, 2004.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K. ; PERSSON, Å.; CHAPIN, F.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M. ; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A. de; HUGHES, T.; LEEUW, S. van der; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY J. A. A safe operating space for humanity, **Nature**, Nova Iorque, Vol 461, p.472-475, 2009.

ROQUE, A. A.de O; SOUZA, Z. M. de; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar, **Pesquisa agropecuária brasileira** vol.45 no.7 Brasília, 2010.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; DE SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. ; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas, **Bragantia**, Campinas, v.68, n.4, p.1.095-1.103, 2009.

SCANLON TM, RAFFENSPERGER JP, HORNBERGER GM, CLAPP RB. SHALLOW subsurface storm flow in a forested headwater catchment: observations

and modeling using a modified TOPMODEL. **Water Resources Research** 36(9), p. 2.575– 2.586. 2000.

SILVA, M. R. **Previsão hidrossedimentológica numa Bacia Periurbana através do acoplamento de modelos climatológicos e hidrológicos**. PPGEU /DEC/UFPB João Pessoa, p. 21. 2004.

SINGH, R.K.; PANDA , R.K.; SATAPATHY, K.K.; NGACHAN, S.V. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model, **Journal of Hydrology** , Amsterdam, 405, p.261–276, 2011.

SOUSA, G. B.; MARTINS FILHO, M. V.; MATIAS, S. S. R. Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.3, p.490-500, 2012.

STATSOFT. **Statistica**: Quick reference. Tulsa: StatSoft, 1994. 148p.

STONE, L.F. ; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25, p.395-401, 2001.

SWANSON, N. P. Rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 8, n. 1, p. 71-72, 1965.

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal Soil Science**., 33, p.141-163, 1982.

TISPDELL, C. A. **Economics of environmental conservation**: economics for environmental and ecological management. Amsterdam: Elsevier Science, 1991. 233 p.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , Viçosa, v.28, n.6, p.1.023-1.031, 2004.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com soja**. Londrina: Embrapa – CNPSO, 58p. 2001.

VANONI, V. A. **Sedimentation engineering**. New York: The American Society of Civil Engineers, 745 p. 1975.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 7, p. 873-882, jul. 1995.

WALTON, R. S.; VOLKER, R. E.; BRISTOW, K. L.; SMETTEM, K. R. J. Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 233, n. 1-4, p. 19-36, 2000.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny**, v.25, n.5, p. 183-189, 1971.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (USDA. Handbook, 5). USDA, Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, **Soil survey manual**. Handbook 18. 1993.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**: guide selection of practices for soil and water conservation. Washington, 1965

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Handbook, 537).

ZHENG, M.; LIAO, Y.; HE, J. Sediment delivery ratio of single flood events and the influencing factors in a headwater basin of the Chinese Loess Plateau. **PLoS ONE** vol:9, 11, p.1.1259, 2014