

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EM LATOSSOLO FÉRRICO**

Jacqueline Toniolo da Costa
Engenheira Agrônoma

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EM LATOSSOLO FÉRRICO**

Jacqueline Toniolo da Costa

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo).

2015

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Jacqueline Toniello da Costa – nascida em 12 de maio de 1986, na cidade de Sertãozinho, SP. Em 2004, ingressou pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – Campus de Jaboticabal, SP, no Curso de Engenharia Agrônoma, obtendo o título de Engenheira Agrônoma em março de 2009. Durante a graduação foi bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), realizou estágio nos Laboratórios de entomologia e solos e foi monitora da disciplina de conservação do solo e da água. Em 2009 ingressou no programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), mestrado, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – Campus de Jaboticabal, SP, obtendo o título de mestre em 2011, tendo como linha de pesquisa, resistência de plantas a insetos-praga. No mesmo ano (2011) iniciou, o Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal - Universidade Estadual Paulista.

Nas horas difíceis, procuremos sorrir e saibamos caminhar.

Na frente, a Divina Bondade nos espera e não faltará combustível do socorro.

Divino à lâmpada de nossas necessidades, a fim de que haja bastante luz em nosso roteiro.

Quanto mais intenso se nos fizer o trabalho com Jesus, mais ampla assistência de Jesus receberemos.

Francisco Cândido Xavier

DEDICO...

*Aos meus pais **Sandra e Amauri** e ao meu irmão **Murilo** pelo carinho, confiança, força e compreensão em todos os momentos desta e de outras caminhadas.*

OFEREÇO...

*A **Malvina Guiomar Bombonato**, pelos conselhos, carinho e por sempre acreditar em mim. A **Wagney dos Reis Machado Júnior** pelo seu apoio, compreensão, amor, que foram fundamentais para chegar até aqui.*

AGRADEÇO...

*Ao meu orientador, **Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho**, pela amizade, orientação e por todos seus ensinamentos.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu querido e amado **DEUS**, que sempre soube me mostrar o caminho certo e sempre me deu força nos momentos que sempre precisei.

A **Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal**, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos **professores do Departamento de Solos**, FCAV/UNESP, pelos conhecimentos que adquiri durante o doutorado.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Marcílio Martins Vieira Filho**, pela orientação, apoio e ensinamentos.

Aos membros da banca do exame de qualificação, pelas sugestões dadas ao trabalho.

Aos **colegas do curso de Pós-Graduação** pela troca de experiências, ensinamentos e bons momentos compartilhados.

Aos funcionários do Departamento de Solos, da seção de Pós-Graduação e da vice diretoria.

À Usina São Martinho, pela concessão da área de estudos e apoio logístico.

Enfim, a todos aqueles que de forma direta ou indiretamente tenham contribuído para o êxito deste trabalho.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE TABELA.....	iv
LISTA DE FIGURA.....	v
1. Introdução.....	1
2. Revisão de Literatura.....	3
2.1. Erosão do solo.....	3
2.2. Erosão Hídrica.....	4
2.3. Erosão em sulcos.....	6
2.4. Modelo de Erosão e transporte de sedimento.....	8
2.5. WEPP.....	11
2.6. Capacidade de transporte de sedimento.....	13
3. Material e Métodos.....	20
3.1. Caracterização da área.....	20
3.2. Preparo e caracterização dos sulcos.....	20
3.3. Simulação das chuvas.....	22
3.4. Sequência de chuvas.....	22
3.5. Determinação da vazão.....	23
3.6. Parâmetros hidráulicos e fórmulas utilizadas.....	24
3.7. Desempenho dos modelos.....	27
4. Resultados e Discussão.....	29
4.1. Características hidráulicas e regime de escoamento do fluxo da enxurrada...	29
4.2. Efeitos da taxa de descarga na capacidade de transporte de sedimentos.....	33

4.3. Estimativas da capacidade de transporte de sedimentos nos sulcos de referência.....	34
4.4. Validação dos modelos de predição da capacidade de transporte de sedimentos.....	36
5. Conclusões.....	41
6. Referências.....	42

MODELAGEM DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM LATOSSOLO FÉRRICO

RESUMO – A capacidade de transporte de sedimentos (T_c), a erodibilidade em sulcos (K_r) e a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) são utilizadas em diversos modelos de previsão da erosão, como o WEPP - *Water Erosion Prediction Project*. O objetivo deste trabalho foi propor calibrar e avaliar equações, como a de Yalin e a simplificada de FINKNER, para determinar a capacidade de transporte de sedimentos e, por consequência, a erodibilidade em sulcos e a tensão cisalhante crítica de um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa. Aos resultados permitiram obter que equações para estimar a capacidade de transporte de sedimentos (T_c), em função da tensão cisalhante do escoamento, têm maior eficiência para prever T_c , para o Latossolo estudado, quando comparadas com as equações que consideram a potência do escoamento. A Equação de Yalin permitiu estimar T_c e estabelecer valores para a erodibilidade em sulcos e tensão cisalhante crítica. Para o Latossolo Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa, as taxas de desagregação foram lineares para com as tensões cisalhantes, e o valor de erodibilidade em sulcos (K_r) foi de $0,0025 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e para a tensão cisalhante crítica (τ_c) foi de $2,560 \text{ N m}^{-2}$.

Palavras-chave: desagregação, erodibilidade, tensão cisalhante

SEDIMENT TRANSPORT CAPACITY MODELING IN LATOSOL FERRIC

ABSTRACT - The sediment transport capacity (T_c), the erodibility in grooves (K_r) and the critical shear stress of the soil (τ_c) are used in many prediction of erosion, as the WEPP - Water Erosion Prediction Project. The objective of this study was to propose, calibrate and evaluate equations, such as Yalin and simplified FINKNER, to determine the sediment transport capacity and, consequently, the erodibility in grooves and the critical shear stress of an Oxisol clayey. The results provided that equations to estimate the sediment transport capacity (T_c) as a function of the flow shear stress, are more efficient for predicting T_c Latossol to study compared with equations that consider the power flow. The equation Yalin allowed to estimate T_c and set values for the erodibility in grooves and critical shear stress. For Rhodic Latosol clay texture, breakdown rates were linear with the shear stress, and the erodibility value in grooves (K_r) was $0.0025 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ and the critical shear stress (τ_c) was 2.560 N m^{-2} .

Keywordy: breakdown, erodibility, shear stress

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Modelos de erosão e transporte de sedimentos.....	10
TABELA 2. Informação detalhada dos modelos de determinação de erosão e transporte de sedimentos com base física em escala de bacias hidrográficas.....	11
TABELA 3. Características hidráulicas dos fluxos de enxurrada nos sulcos.....	29
TABELA 4. Variáveis hidráulicas do escoamento nos sulcos.....	32
TABELA 5. Equações para estimativas da capacidade de transporte de sedimentos obtidos nos sulcos SR_1 e SR_2	35
TABELA 6. Estatísticas do desempenho de equações para estimar a capacidade de transporte de sedimentos.....	37
TABELA 7. Erodibilidade em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) considerando-se T_c obtida a partir das Equações 2 e 22.....	39

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema das dimensões dos sulcos de erosão e calha coletora.....	21
FIGURA 2. Esquema do simulador tipo Swanson, com a disposição dos sulcos de erosão na área de ação do simulador e saídas de fluxos adicionais de água...	21
FIGURA 3. Relação entre as tensões cisalhantes aplicadas nos sulcos e as taxas de fluxo de enxurrada.....	30
FIGURA 4. Relação entre as velocidades médias do fluxo superficial em relação às vazões aplicadas.....	31
FIGURA 5. Capacidade de transporte de sedimentos (T_c) em função da taxa de descarga do fluxo de enxurrada (q).....	34
FIGURA 6. Valores observados versus preditos de capacidade de transporte de sedimentos utilizando-se as Eq. 22 (\square), 23 (\circ) e 24 (\blacktriangle).....	36
FIGURA 7. Valores observados versus preditos de capacidade de transporte de sedimentos utilizando-se as eq. 25, 26 e 27.....	38
FIGURA 8. Taxa de desagregação em sulcos (D_{ry}), considerando-se a T_c obtida com a solução da Equação de Yalin, e taxa de desagregação (D_m) obtida considerando-se T_c obtida com a Equação 22.....	39
FIGURA 9. Taxa de desagregação em sulcos em função da tensão cisalhante do escoamento.....	40

1. INTRODUÇÃO

A erosão corresponde ao desprendimento, transporte e deposição de partículas de solo, ocasionados pela ação do vento (erosão eólica) e da água (erosão hídrica), é um problema que muito tem contribuído para a degradação ambiental, sendo a principal causa da degradação de terras agrícolas (PRUSKI, 2006). É um problema socioeconômico importante e fator essencial na avaliação de ecossistemas saudáveis e funcionais (CHMELOVÁ; SARAPATKA, 2002).

A erosão do solo, fundamentalmente na forma hídrica, tem sido avaliada considerando-se dois processos distintos: erosão em entressulcos e em sulcos (MARTINS FILHO, 1999). A separação do processo de erosão em entressulcos e em sulcos pode ajudar a identificar fontes potenciais de sedimentos, o que é extremamente importante na modelagem da distribuição de produtos químicos nas áreas agrícolas, especialmente daqueles que são fortemente adsorvidos pelas partículas do solo (MARTINS FILHO et al, 2009; ANDRADE et al., 2011).

Desde a década de 1940, as pesquisas de erosão do solo tem se concentrado nas estimativas de perdas de solo e água, sendo a Equação Universal de Perdas de solo (*Universal Soil Loss Equation* – EUPS), desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978), o modelo mais empregado no Brasil (BARRETO et al., 2009). Segundo o autor, embora os trabalhos com a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) ainda serem muito representativos nos dias de hoje, a partir dos anos 90, outros modelos de predição começaram a ser estudados, como o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project).

O modelo WEPP considera que o desprendimento e o arraste de partículas de solo pela água ocorrem por meio de dois processos. O primeiro envolve a liberação das partículas em decorrência da energia cinética da chuva e o segundo, da liberação das partículas do solo em virtude do escoamento superficial. Para uso do modelo WEPP, a determinação da capacidade de transporte de sedimentos, T_c , é fundamental, visto ser ela em associação com a carga de sedimentos, G , fatores que coordenam a desagregação e a deposição de partículas.

No Water Erosion Predicting Project – WEPP (NEARING et al., 1989), a capacidade de transporte de sedimentos é calculada por uma adaptação da equação de Yalin (FINKNER et al., 1989).

No Brasil uma rotina computacional para a determinação da capacidade de transporte de sedimentos (T_c) foi gerada para solucionar a equação de Yalin, a qual foi designada MSEY (Modelo para Solução da Equação de Yalin) (CERQUETANI E MARTINS FILHO, 2006). Segundos autores, a adaptação da equação de Yalin (FINKNER et al., 1989) foi eficiente para estimar capacidade de transporte de sedimentos (T_c), para um Latossolo Vermelho distrófico. Contudo, não se sabe a validade da referida equação para estimar T_c em condições de cobertura e manejo do solo diferente das testadas pelos dois últimos autores citados. Há carência de pesquisas neste sentido no Brasil, principalmente em solos sob cultivo de cana-de-açúcar e tráfego intenso devido ao sistema de colheita mecanizada.

Deste modo, os objetivos deste estudo são: calibrar e avaliar equações, como a de Yalin e a simplificada de FINKNER et al. (1989) para determinar a capacidade de transporte de sedimentos e, por consequência a erodibilidade em sulcos e a tensão cisalhante crítica de um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. EROSÃO DO SOLO.

No Brasil, pesquisas relacionadas à erosão têm sido relatadas desde o século XIX, entretanto, o modelo agrícola no país que sempre visou atingir eficiência econômica através de ganhos em produção, impediu a implantação de medidas efetivas para seu controle. O início de estudos experimentais sistêmicos, somente foi registrado em 1943 sendo que as informações dessas pesquisas se encontram dispersas na história (TELLES, 2012).

Embora os primeiros trabalhos relacionados à erosão acelerada do solo no Brasil tenham origem no final da década de 40, Barreto, Barros e Sparovek (2008) investigando a pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo, por meio da análise de artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, no período de 1949 a 2007, verificaram estado de arte recente da pesquisa brasileira no tema, pois, aproximadamente metade da produção científica foi publicada a partir de 1990. Destacam-se, ainda, a centralização da produção científica nas regiões Sul e Sudeste, predominância do enfoque da erosão a partir de uma perspectiva agrícola e grande ênfase na pesquisa dos fatores do modelo Universal Soil Loss Equation (USLE) e de estimativa de erosão (BARRETO, BARROS e SPAROVEK, 2008).

Com base em um grande volume de pesquisas e informações sobre os fatores condicionantes da erosão, em 1965 Wischmeier e Smith desenvolveram a Universal Soil Loss Equation (USLE), considerada um grande marco para o desenvolvimento da conservação do solo e da água, o que possibilitou e impulsionou a pesquisa e o controle da erosão do solo em várias partes do mundo (WISCHMEIER; SMITH, 1978 apud TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011).

A erosão promove a quebra da estrutura do solo e o transporte das partículas com conseqüente carregamento dos nutrientes, matéria orgânica e microrganismos gerando o empobrecimento das áreas agrícolas, redução da capacidade produtiva dos solos e poluindo as fontes hídricas. As perdas por erosão tende a elevar os custos de produção na agropecuária, uma vez que requer um aumento no uso de

fertilizantes, corretivos e energia (NASCIMENTO; CHAVES, 1996; CARVALHO et al., 2003; PRUSKI, 2006; SILVA et al., 2007).

Muitos estudos têm relatado os efeitos dos detritos oriundos da erosão do solo na produtividade agrícola. Segundo Bakker et al. (2004), a erosão pode reduzir a produtividade na proporção de cerca de 4 % por cada 10 cm de solo perdido. De acordo com os autores, reduções da produtividade são possíveis, entretanto dependerá do contraste entre propriedades do topo e do subsolo em termos de textura, fertilidade e estágio do processo erosivo.

O processo erosivo é resultante de uma combinação de fatores dependentes e interligados entre si, apresentando grande variabilidade espacial e temporal, tornando este fenômeno difícil de equacionar e quantificar. Os fatores que influenciam os processos erosivos são a erosividade da precipitação (medida pela sua intensidade e energia cinética), a erodibilidade dos solos (definida pelas suas características físicas e químicas), a cobertura vegetal (pela sua maior ou menor proteção do solo), os declives e comprimentos das encostas e as práticas de conservação existentes (HAAN et al., 1994; PONCE ÁLVARES; PIMENTA, 1998).

2.2. EROSÃO HÍDRICA

A erosão hídrica do solo é um fenômeno natural, originado pela ação da água da chuva, em que as forças de escoamento superficial e subsuperficial são capazes de proceder o arranque e arraste das partículas do solo (ZUQUETTE; CARVALHO; YAMANOUTH, 2007). A ação antrópica, associada ao manejo inadequado do solo, acelera esse processo, gerando grandes prejuízos ambientais, econômicos e sociais.

O processo de erosão tem início com o impacto das gotas de chuva sobre o solo desnudo que, por meio da quebra dos agregados, causa o desprendimento das partículas e o transporte por salpicamento. Quando o solo tem sua capacidade de infiltração reduzida e torna-se saturado, a água começa a escorrer pela superfície do terreno, dando origem ao escoamento superficial que, segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), é o maior agente de transporte de partículas no solo. A concentração

das linhas de fluxo do escoamento superficial resulta em incisões na superfície do terreno, na forma de sulcos, ravinas e voçorocas (OLIVEIRA, 1998).

Fundamentalmente, o processo de erosão hídrica é condicionado por cinco fatores: chuva, solo, cobertura e manejo, topografia e práticas conservacionistas (LEVIEN; SCHWARZ, 2003). A combinação desses fatores determina a intensidade e as variações nas taxas de perda de solo (CUNHA; GUERRA, 2006; SCHICK et al., 2000).

A erosão hídrica leva à perda de nutrientes, determinando o empobrecimento dos solos e a redução da produtividade da maioria das culturas, é o principal agente de poluição difusa, por ser um dos mais importantes meios de transporte dos nutrientes do solo para os mananciais de água (BERTOL et al., 2007b). Além disso, aumenta o custo de produção e a contaminação ambiental (SCHICK et al., 2000). Os impactos indesejáveis provocados pela erosão hídrica no ambiente ocorrem tanto no "local" de sua ocorrência como também "fora do local" onde os solos foram erodidos, causando o depauperamento da qualidade da água, o assoreamento dos corpos de água e a degradação dos ecossistemas aquáticos (MINELLA et al., 2010).

Trabalhos avaliando os aspectos financeiros da erosão hídrica têm sido realizados (PIMENTEL et al., 1995; ALFSEN et al., 1996; DISSART et al., 2000; BERTOL et al., 2007a; TÔSTO et al., 2011). Avaliar os custos financeiros da erosão hídrica é importante, pois reflete os custos de produção e a perda de valor da terra. A análise destes custos é difícil e complexa, pois envolve questões diretas e indiretas, as quais podem ser de difícil quantificação.

No Brasil, a erosão hídrica é o principal fator capaz de tornar insustentáveis os sistemas de produção agrícola e, os impactos ambientais dela oriundos, têm reflexos no aumento dos custos, causando, anualmente, um prejuízo econômico enorme ao país (HERNANI, et al., 2002). Telles (2010), em um estudo sobre os custos gerados pela erosão dos solos, menciona que no Brasil as perdas com esse processo chegam a 30 milhões de dólares ao ano.

De acordo com Santos, Bayer e Carvalho (2008), há dois grandes tipos de erosão, a laminar, produto do escoamento superficial difuso, e a linear, produto do escoamento superficial concentrado (em linhas e eixos) que promove a formação de

sulcos e voçorocas.

2.3. EROÇÃO EM SULCOS

A erosão em sulcos constitui a fase evolutiva do processo físico da erosão hídrica do solo marcada pela mudança da forma do escoamento, de difuso, sobre a superfície do solo, na fase inicial da erosão (erosão em entressulcos), tal processo concentra-se em pequenas depressões da superfície do solo chamadas de sulcos de erosão. Em condições naturais, esses pequenos canais ocorrem de forma espaçada e aleatória, formando uma rede de canais que pode desagregar e transportar grande quantidade de solo (LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011).

As incisões no solo, que dão origem aos sulcos, têm início quando a tensão de cisalhamento supera as condições de resistência ao início de movimento, característica da camada superficial do solo. O balanço entre a força erosiva do fluxo e a resistência à erosão das partículas do solo determina a taxa de desagregação (RAUWS; GOVERS, 1988).

Os Sulcos de erosão apresentam variação morfológica no tempo e no espaço. O fundo e as paredes do sulco variam de geometria quando o solo é erodido, alterando as características hidráulicas do escoamento, as quais são responsáveis pela dinâmica de formação dos sulcos (LEI et al., 1998). A necessidade do conhecimento das relações hidráulicas e da morfologia dos sulcos, para determinar a capacidade de desagregação e transporte neste escoamento, levou à utilização da prática de conduzir os sulcos por meio da pré-formação, os quais, dessa forma, são expostos à ação cisalhante do escoamento, como preconizam Laflen e Thomas (1987) e Elliot et al. (1989).

A erodibilidade em sulcos (K_r) de um solo é representada pela susceptibilidade à desagregação pelo escoamento superficial concentrado (SCHÄFER et al., 2001). No modelo WEPP – Water Erosion Prediction Project, Flanagan & Nearing (1995) consideram que a erodibilidade do solo em sulcos é determinada a partir da relação entre taxas de desagregação em sulcos e tensão cisalhante do fluxo dada pela seguinte expressão:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

em que, D_r = taxa de desagregação em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_r = erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou s m^{-1}), τ = tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2} ou Pa) e τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo (N m^{-2} ou Pa). A erodibilidade em sulcos consiste no coeficiente angular b da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo. A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (LAFLEN; THOMAS, 1987). A expressão (1) é admitida para a condição na qual a capacidade de transporte do escoamento seja muito superior à carga de sedimentos. Nesse caso, a taxa de desagregação do escoamento em sulcos é muito semelhante à capacidade de desagregação em sulcos.

Todo o sedimento destacado das áreas em entressulcos é suposto ser deslocado lateralmente para os sulcos. O fluxo de água nos sulcos transporta estes sedimentos, bem como os sedimentos destacados dos próprios sulcos. Conseqüentemente, o movimento dominante de sedimento erodido, declive abaixo, é por fluxo de água nos canais. Há na literatura metodologias específicas para a avaliação dos processos erosivos em entressulcos, em sulcos e global (LAL; ELLIOT, 1994).

A determinação da erosão em sulcos e entressulcos são importantes e permitem avaliar diferentes tipos de preparo e manejo de solo (CASSOL; LIMA, 2003) e compreender a relação de chuvas intensas com erosão hídrica do solo (SANTOS et al., 2010).

O processo de erosão em sulcos é considerado o processo mais importante de produção de sedimentos (e, portanto, a perda de solo) (CERDAN et al., 2002; DI STEFANO et al., 2013). Nesse processo a perda de sedimento é limitada pela quantidade deste disponível para transporte ou pela capacidade de transporte do fluxo (FOSTER, 1982; KNAPEN et al., 2007). Quando a quantidade de sedimento excede a capacidade de transporte do fluxo ocorre à deposição.

Laflen et al. (1987) afirmaram que quando a água flui em um canal há a ação de uma força na direção do fluxo, no leito do mesmo, a qual é conhecida como tensão

cisalhante. Esta força é dependente da unidade de peso de água, profundidade do fluxo de água e energia do declive (HANSON, 1990).

A capacidade de transporte de sedimentos está intimamente relacionada a um valor crítico de tensão cisalhante, denominado por diversos autores (FOSTER & MEYER, 1972; LAFLEN et al., 1987) tensão crítica de cisalhamento hidráulico (τ_c), que se constitui no cisalhamento hidráulico abaixo do qual não ocorre desagregação de partículas do solo. Deste modo, τ_c pode ser entendida como um parâmetro de medida da resistência do solo à erosão. Logo, é pressuposto que a τ_c possa ser relacionada a outros índices de medida da resistência do solo.

Conhecer a taxa de erosão do solo permite a compreensão da evolução do relevo e o impacto antrópico sobre os solos (PARSONS et al., 2010). Existem vários modelos desenvolvidos para modelar a erosão hídrica do solo, destacando-se os modelos da equação Universal de perda de solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e do projeto de predição de erosão hídrica (WEPP) (LANE; NEARING, 1989).

Muitos sistemas de cultivo para controle da erosão dependem do resíduo incorporado (por exemplo, palha) da colheita do ano anterior, que é deixado no campo como uma proteção do solo à erosão. O sistema hidráulico dos sulcos e a erosão podem ser fortemente modificados pela presença de diferentes coberturas do solo. A presença de cobertura do solo na forma de fragmentos de rocha, vegetação ou resíduo de vegetação, reduz a velocidade do fluxo no sulco (VERSTRAETEN et al., 2002).

2.4. MODELOS DE EROSÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Algumas revisões sobre modelos de predição de erosão e transporte de sedimentos foram publicadas. Singh e Woolhiser (2002) publicaram uma revisão sobre modelos hidrológicos de bacias hidrográficas com base em três trabalhos de revisão sobre modelos de erosão e transporte de sedimentos. Bryan (2000) realizou uma revisão sobre erosão hídrica em encosta enquanto Zhang et al. (1996a) abordou em sua revisão modelos de predição de erosão do solo em bacias hidrográficas. Nessas revisões os autores se limitaram a mencionar apenas modelos mais conhecidos. Merritt et al. (2003) publicou uma revisão mais detalhada analisando modelos mais específicos e mais recentemente Aksoy e Kavvas (2005)

em sua revisão analisou os modelos existentes para previsão de erosão e transporte de sedimentos em escalas de encosta e bacia hidrográficas.

Alguns modelos são semelhantes, pois são baseados nos mesmos pressupostos, outros são distintamente diferentes. Os modelos desenvolvidos até então, podem ser classificados em função da descrição do processo, escala e técnica de solução (SINGH, 1995).

Um modelo pode se basear numa estrutura conceitual ou empírica. Tais modelos são denominados conceituais e empíricos, respectivamente. Nos modelos conceituais a bacia hidrográfica é representada por um sistema de armazenamento de dados. Já os modelos empíricos são limitados às condições para as quais foram desenvolvidos, por exemplo, a EUPS (WISCHMEIER; SMITH, 1978) é um modelo empírico, baseado em uma grande quantidade de dados a partir dos Estados Unidos. Já o modelo AGNPS (YOUNG et al., 1989) é uma modificação da EUPS onde a parte hidrológica de respostas é um processo conceitual (BEASLEY et al., 1980).

Quando um modelo é construído usando a equação de conservação da massa de sedimentos, é chamado de modelo de erosão e transporte de sedimentos de base física. Os modelos KINEROS (SMITH, 1981), WESP (LOPES, 1987), SEM (STORM et al., 1987), SHESED (WICKS, 1988) E EUROSEM (MORGAN et al., 1998) são alguns exemplos de modelos de erosão e transporte de sedimentos de base física.

Aksoy e Kavvas (2005) categorizaram os modelos de erosão e transporte de sedimentos de acordo com a descrição do processo utilizado em sua formulação (Tabela 1.). Os modelos de base física de acordo com os parâmetros envolvidos são classificados em modelos aglomerados e distribuídos. Um modelo aglomerado utiliza valores individuais de parâmetros de entrada, sem variabilidade espacial e resulta em saídas individuais. Um modelo distribuído, porém, utiliza parâmetros espacialmente distribuídos fornecendo saídas espacialmente distribuídas, deixando explícita a variabilidade espacial do processo descrito. O modelo também pode ser classificado como determinante ou estocástico, dependendo da forma como o processo foi descrito (Tabela 2).

TABELA 1. Modelos de erosão e transporte de sedimentos (AKSOY & KAVVAS, 2005).

MODELO	EMPÍRICO	CONCEPTUAL	BASE FÍSICA
USLE	X		
MUSLE	X		
RUSLE	X		
SEDD	X		
AGNPS	X		
LASCAM		X	
RESPOSTAS			X
LISEM			X
CREMES			X
WEPP			X
EUROSEM			X
KINEROS			X
KINEROS2			X
RUNOFF			X
WESP			X
CASC2D-SED			X
SEM			X
SHESED			X

Os modelos de base física podem ser chamados, uni ou bidimensional, dependendo do número de dimensões da equação de conservação da massa utilizada no modelo. Modelos de erosão e transporte de sedimentos geralmente levam em conta a não estacionaridade do processo, embora alguns deles estivessem interessados no estado estacionário. Quando um modelo utiliza para simulação de sedimentos um único evento de chuva, é chamado de modelo baseado em evento. Já o modelo contínuo é utilizado para simulação de sedimentos de muitos eventos de chuva com escoamentos consecutivos ocorridos durante época ou período de tempo mais longo (Tabela 2) (AKSOY; KAVVAS, 2005).

TABELA 2. Informação detalhada dos modelos de determinação de erosão e transporte de sedimentos com base física em escala de bacias hidrográficas (AKSOY & KAVVAS, 2005).

Modelo	Distribuído	Determinística	1-D	2-D	Curso Estável	Curso Instável	Baseada em eventos	Contínua
RESPOSTAS	X	X	X		X		X	
LISEM	X	X	X		X		X	
CREMES	X	X	X		X		X	
WEPP	X	X	X		X			X
EUROSEM	X	X	X			X	X	
KINEROS	X	X	X			X	X	
KINEROS2	X	X	X			X	X	
RUNOFF	X	X	X			X	X	
WESP	X	X	X			X	X	
CASC2D-	X	X		X		X	X	
SED								
SEM	X	X		X		X		X
SHESED	X	X		X		X		X

2.5. WEPP

Desde a década de 50, diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados com o objetivo de prever a magnitude das perdas de erosão, auxiliando assim no planejamento agrícola, principalmente nos locais onde as perdas de solo são superiores aos limites toleráveis (AMORIM et al., 2003). Uma vez comprovada sua adequação e confiabilidade, os modelos de predição são ferramentas fundamentais capazes de avaliar diferentes cenários de manejo do solo sem necessidade de testes de campo, normalmente demorados e custosos (AKSOY; KAVVAS, 2005).

Dentre os inúmeros modelos computacionais desenvolvidos para estimar as perdas de solo, o “Water Erosion Prediction Project” (WEPP) merece destaque, sendo de ampla utilização mundial (HUANG et al., 1996; LAFLEN et al., 2004; SAVABI, 1993), na Austrália (YU; ROSEWELL, 2001) na Europa (BRAZIER et al., 2000; GRONSTEN; LUNDEKVAM, 2006; PIERI et al., 2007; RACLOT; ALBERGEL 2006), no Brasil (CASSOL; LIMA, 2003; SILVA et al., 2004; NUNES; CASSOL, 2008;

AMORIM et al., 2010). Segundo Amorim et al. (2010), as estimativas das perdas de solo médias anuais obtidas com o uso do modelo WEPP foram melhores em 40% dos locais estudados quando comparadas com a estimativa de outros métodos de predição.

O modelo WEPP é determinístico e utiliza parâmetros relacionados ao processo de erosão do solo, entre eles a erodibilidade (SHERIDAN et al., 2000). O principal objetivo do modelo WEPP é identificar regiões da encosta com maior ocorrência de escoamento superficial e de perda de solo. Nesse modelo são utilizados dois coeficientes de erodibilidade: entressulcos e sulcos (LANE; NEARING, 1989) em condições de equilíbrio dinâmico. Os coeficientes podem ser mensurados diretamente por experimentos de chuva artificial ou natural, ou estimados a partir de propriedades do solo. Bom desempenho na simulação de processos de escoamento superficial, em sulcos e em entressulcos assim como erosão em pequenas ravinas tem sido simulado com o WEPP (FLANAGAN; FRANKEMBERGER; ASCOUGH, 2012).

A eficácia do modelo WEPP foi testada para prever o escoamento e produção de sedimentos em condições de inclinação íngreme do leste do Himalaya, segundo os autores, o modelo WEPP simula o escoamento e produção de sedimentos satisfatoriamente em condições de declive com coeficientes de Nash-Sutcliffe $> 0,87$ por cento e desvios $< \pm 5,23$ elevada pluviosidade. A comparação entre os valores WEPP-medidos e simulados de escoamento e produção de sedimentos revelou que o modelo tende a sub-predizer os valores de maior magnitude (SINGH et al., 2011).

Uma avaliação do desempenho de modelos de predição de perdas de solo USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas brasileiras, demonstrou que o modelo WEPP apresentou medidas mais precisas em condições simuladas, demonstrando ter maior potencial para fazer previsão da erosão para diferentes condições edafoclimáticas brasileiras (AMORIM et al., 2010).

No Brasil, o modelo WEPP foi utilizado para avaliar a erosão hídrica na microbacia do ribeirão Ceveiro, pertencente à bacia do rio Piracicaba (SP), cujo principal cultivo é cana-de-açúcar. Nessa região a taxa de erosão estimada pelo modelo 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%). Os resultados confirmaram as inadequadas práticas

conservacionistas adotadas na área e explicam o grande assoreamento observado nos reservatórios de água existentes na microbacia (BACCHI et al. 2000).

Os modelos de simulação de erosão são ferramentas que auxiliam compreender os processos de degradação dos solos, entretanto, é necessário que antes de serem aplicados, sejam devidamente calibrados e validados com o uso de dados hidrológicos medidos na bacia hidrográfica (SINGH et al., 2011).

A principal limitação para a aplicação de modelos de predição de erosão é a falta de dados confiáveis medidos no campo para calibrar e validar os modelos. Segundo Martins Filho (2009), uma das dificuldades na calibração e 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. Essa variabilidade espacial aumenta a dificuldade de modelagem do processo de erosão.

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

2.6. CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A capacidade de transporte de sedimento, T_c , é definida como a máxima quantidade de sedimento que o fluxo pode conduzir. É um conceito básico na determinação dos processos de desagregação e deposição nos atuais modelos de predição da erosão do solo (ZHANG et al., 2009). O fenômeno de erosão inclui os processos de desagregação das partículas da massa do solo e o subsequente transporte delas e/ou a deposição destas na superfície do solo. Todo o material desagregado num evento de erosão é considerado como sedimento.

Segundo ZHANG et al., (2011) a capacidade de transporte de sedimentos é função principal em sistemas de fluxo hidráulico e está fortemente relacionada com as propriedades do sedimento, tais como o tamanho dos sedimentos, densidade, forma e rugosidade (GUY et al., 2009b e NORD et al., 2009). A seletividade do tamanho no escoamento superficial (ISSA et al., 2006) indica que a T_c

correspondente a um determinado fluxo, sofre grande influência do tamanho dos sedimentos.

A compreensão dos processos de erosão do solo para o desenvolvimento de modelos de predição tem estimulado pesquisadores investigar novas formas de estimar a capacidade de transporte de sedimentos (T_c) nos fluxos (NEARING et al., 1997; HUANG et al., 1999; TAYFUR, 2002; POLYAKOV; NEARING, 2003). Muitos pesquisadores têm dado atenção para a determinação da capacidade de transporte de sedimentos (FOSTER, 1982; FINKNER et al., 1989; SHARMA et al., 1996; FERRO, 1998; LEI et al., 2001; POLYAKOV; NEARING, 2003; HESSEL; JETTEN, 2007; NORD; ESTEVES, 2007; ALI et al., 2013). Várias fórmulas têm sido desenvolvidas para computar a capacidade de transporte de sedimentos, entretanto, nenhuma expressão e/ou método desenvolvidos têm ampla aceitação para fluxos superficiais e situações de sedimentação não uniforme (LEI et al, 2001). Contudo, Alonso et al. (1981) e Ferro (2008), avaliaram que a equação de Yalin foi apropriada para determinar a T_c . A equação de Yalin é definida como (YALIN, 1963):

$$\frac{T_c}{SG d \rho_w^{1/2} \tau_o^{1/2}} = 0.635 \delta \left[1 - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta) \right] \quad (2)$$

com β e δ expressos como:

$$\beta = 2.45 SG^{-0.4} Y_{cr}^{0.5} \delta \quad (3)$$

$$\delta = \frac{Y}{Y_{cr}} - 1 \quad (\text{quando } Y < Y_{cr}, \delta = 0) \quad (4)$$

$$Y = \frac{V^2}{(SG - 1) g d} \quad (5)$$

em que, T_c - capacidade de transporte de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); SG - densidade de partícula, assumida neste trabalho como igual a 2,65 (adimensional); d - diâmetro de partícula (m); ρ_w - densidade da água (kg m^{-3}); τ_o - tensão cisalhante atuando no leito ou fundo do canal (Pa); Y - tensão cisalhante adimensional; Y_{cr} - tensão

cisalhante crítica adimensional, obtida pelo diagrama de Shields (JULIEN, 1998); V - velocidade cisalhante (m s^{-1}); g - aceleração da gravidade (m s^{-2}); δ e β - parâmetros adimensionais definidos pelas equações 3 e 4, respectivamente.

Uma equação para a avaliação da capacidade de transporte de sedimento, pelo fluxo superficial, capaz de descrever os processos de desagregação e transporte, é parte fundamental num modelo de concepção física para estimativa da erosão. No Water Erosion Predicting Project – WEPP (NEARING et al., 1989), a capacidade de transporte de sedimentos é calculada por uma adaptação da equação de Yalin (FINKNER et al., 1989). A determinação de T_c torna-se, segundo Huang et al. (1999), fator chave no estabelecimento da ocorrência dos processos de desagregação e deposição.

Uma simplificação da equação de Yalin foi apresentada por Finkner et al. (1989), com o intuito de reduzir o número de cálculos necessários, para se obter T_c e aliviar as instabilidades associadas com soluções numéricas, como:

$$T_c = K_t t^z \quad (6)$$

em que, K_t – coeficiente de transporte; t - tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2}); z – expoente igual a $3/2$ (FINKNER et al., 1989). Cerquetani e Martins Filho (2006) demonstraram que a equação (6) foi eficiente para estimar T_c , para um Latossolo Vermelho distrófico.

Foster e Meyer (1972) avaliaram diversas equações de transporte de sedimentos com quantidade de dados limitados e recomenda-se a equação de Yalin para prever a capacidade de transporte de sedimentos no fluxo superficial.

Alonso et al., (1981), avaliaram nove equações de transporte, utilizando 739 dados da literatura e concluiu que a equação de Yalin foi a melhor equação para estimar a capacidade de transporte de sedimentos de fluxo superficial.

Hessel e Jetten (2007) avaliaram a adequação de oito equações de capacidade de transporte utilizando dados de encostas íngremes. Os autores concluíram que a maioria das equações foi sensível à inclinação do terreno e os valores de T_c foram superestimados. Além disso, os autores observaram grandes discrepâncias entre os valores medidos e preditos de T_c através da equação de Yalin.

Um estudo realizado por Zhang et al. (2008) para avaliar o desempenho da equação de Yalin (FINKNER et al., 1989 e FOSTER; MEYER, 1972) para capacidade de transporte de sedimentos em encostas íngremes, mostrou que a equação da capacidade de transporte de sedimentos utilizada no modelo WEPP subestima o valor real da capacidade de transporte de sedimentos.

Uma avaliação recente sobre a adequação de cinco equações de capacidade de transporte de sedimentos, amplamente utilizadas em condições de escoamento superficial, foi realizada por ALI et al., (2013), segundo os autores nenhuma equação foi eficiente para mensurar os resultados, principalmente baixas taxas de escoamento. Os resultados demonstram que as equações desenvolvidas para determinar a capacidade de transporte de sedimentos, estimam de forma razoável a T_c somente para as condições em que foram formuladas. O grau de precisão dos resultados varia substancialmente com o tamanho do sedimento. Na verdade, muitas equações são válidas apenas para intervalos específicos de tamanho e densidade de sedimentos (GUY et al., 2009a).

Alguns pesquisadores acreditavam que para um determinado solo, inclinação ou taxa de fluxo, a quantidade de T_c não é o mesmo (POLYAKOV; NEARING, 2003; SANDER et al., 2007). SANDER et al. (2007), descobriram que o valor de T_c não é constante para um único solo, porque as partículas estão distribuídas numa gama de tamanhos, a T_c só pode ser considerada única quando todas as partículas têm tamanho idênticos. Esta é uma das dificuldades que se encontra para avaliar a capacidade de transporte de sedimentos sob condições hidráulicas de fluxo diferentes.

Durante as três últimas décadas diversos autores vêm estudando a influência dos diferentes parâmetros hidráulicos sobre a capacidade de transporte de sedimentos tais como, unidade de descarga, velocidade média do fluxo e declividade (BEASLEY; HUGGINS, 1982; JULIEN; SIMONS, 1985; GOVERS; RAUWS, 1986; FINKNER et al., 1989; GOVERS, 1990; GUY et al., 1990; EVERAERT, 1991; GOVERS, 1992; ABRAHAMS; Li, 1998; JAYAWARDENA; BHUIYAN, 1999; PROSSER; RUSTOMJI, 2000; ABRAHAMS et al., 2001; ZHANG et al., 2009; ALI et al., 2011).

A influência desses parâmetros hidráulicos tem sido estudada principalmente, utilizando conjunto de dados obtidos a partir de canais não-erodíveis. Para experimentos em canais erodíveis geralmente os pesquisadores assumem que o comprimento do canal selecionado foi adequado para atingir a capacidade de transporte (exemplo GOVERS, 1990; EVERAERT, 1991). Mas, informações qualitativas e quantitativas são necessárias para verificar essa suposição (ALI et al., 2011).

Diversos estudos afirmam que para canais não-erodíveis o efeito de inclinação sobre a capacidade de transporte é maior do que o efeito da unidade de descarga. No entanto, Zhang et al. (2009) revelou que a capacidade de transporte é mais suscetível à elevação da unidade de descarga em relação ao declive, contradizendo os resultados mencionados anteriormente. Isto levanta questões sobre a aplicabilidade das informações obtidas a partir de canais não-erodíveis para o desenvolvimento de equações de transporte de sedimentos para ser usado em modelos de erosão do solo (ALI et al., 2011).

Segundo Ali et al., 2011 a relação entre capacidade de transporte e unidade de descarga tem sido pouco abordada e pesquisas anteriores deixam claro que essa relação é dependente da declividade (BEASLEY; HUGGINS, 1982; JULIEN; SIMONS, 1985; GOVERS; RAUWS, 1986; GOVERS, 1990; EVERAERT, 1991; JAYAWARDENA; BHUIYAN, 1999; PROSSER; RUSTOMJI, 2000; LEI et al., 2001; ZHANG et al., 2009), provavelmente devido ao fato de que, para as mesmas condições hidráulicas e de sedimento, a rugosidade de canais erodíveis é sempre maior do que a de canais não-erodíveis.

A velocidade média do fluxo é outro parâmetro hidráulico importante que afeta a capacidade de transporte de sedimentos e depende da descarga total, tamanho médio dos grãos e geometria do canal (ALI et al., 2011). Resultados obtidos por Ali et al. (2011), demonstraram correlação entre a capacidade de transporte com o aumento da velocidade média do fluxo para cada classe de declive. O aumento da capacidade de transporte se deve ao fato de que o aumento da energia de um fluxo, aumenta substancialmente com a inclinação, entretanto não se pode desprezar que uma grande parte da energia do fluxo é dissipada para o desprendimento e

transporte do sedimento em vez de aumentar a velocidade do fluxo (GIMENEZ; GOVERS, 2002).

A influência da velocidade média do fluxo na capacidade de transporte foi estudada principalmente sob condições de leito não-erodíveis (GUY et al., 1990; ABRAHAMS; LI, 1998; ZHANG et al., 2009;), verificaram que a capacidade de transporte aumenta com a velocidade média do fluxo conforme há um aumento no declive. Zhang et al. (2009), observou um aumento linear entre capacidade de transporte e velocidade média do fluxo.

Entretanto, os resultados foram contraditórios para condições de canais erodíveis (GOVERS, 1990; NEARING et al, 1997;. TAKKEN et al., 1998; NEARING et al., 1999; GIMENEZ; GOVERS, 2001), onde a relação entre inclinação e velocidade de fluxo não foi significativa e a velocidade do fluxo não teve uma influência clara sobre a capacidade de transporte de sedimentos. A possível razão para tal seria o fato de que sob canais não-erodíveis a velocidade média do fluxo aumenta gradualmente com a inclinação, devido à menor variação da rugosidade do canal (FOSTER et al., 1984; ABRAHAMS et al., 1996; GIMENEZ; GOVERS, 2001; ZHANG et al., 2009), enquanto que para sulcos erodíveis a velocidade média do fluxo é quase que independente do efeito de inclinação, pois a morfologia do canal e rugosidade depende tanto da taxa de descarga quanto da inclinação (GOVERS 1992; NEARING et al., 1997; TAKKEN et al., 1998; NEARING et al., 1999; GIMENEZ; GOVERS, 2001).

Esses resultados evidenciam que existe uma necessidade de estudar de forma mais abrangente a influência dos diferentes parâmetros hidráulicos sobre a capacidade de transporte de sedimentos (ALI et al., 2011) e que os conceitos teóricos derivados de canais não erodíveis não refletem necessariamente as condições de sulcos propensos à erosão e sua aplicação podem gerar erros na predição.

Vários cientistas têm usado uma força composta para estimar a capacidade de transporte do escoamento superficial (YANG, 1972; MOORE; BURCH, 1986; GOVERS; RAUWS, 1986; LU et al., 1989; GOVERS, 1990; EVERAERT, 1991; GOVERS, 1992; JAYAWARDENA; BHUIYAN, 1999; PROSSER; RUSTOMJI, 2000; ABRAHAMS et al., 2001; ZHANG et al., 2009). Variáveis hidráulicas entre elas,

tensão cisalhante, poder de escoamento, unidade de poder de escoamento e poder de escoamento efetivo, foram combinadas de diferentes maneiras para formar a força composta e estimar a capacidade de transporte (DUBOYS de 1879; BAGNOLD, 1966; YANG, 1972; GOVERS, 1990). Contudo, os resultados obtidos foram muito diferentes, uma vez que, o desempenho de preditores de forças compostas foi testado em diferentes gamas de condições morfológicas.

Houve um crescimento nos estudos propostos para obter parâmetros ou para validar modelos de predição de erosão baseados em processos (ZHANG et al., 2015). Uma visão diferente para determinar a capacidade de transporte de sedimentos foi apresentada por Lei et al. (1998), seguindo o conceito de potência de escoamento de Bagnold. A potência de escoamento pode ser definida como, a taxa de dissipação de energia por unidade contra o leito ou as margens do sulco. Lei et al., (1998) descreveu a potencia de escoamento como:

$$\omega = \rho g S_{fx} q \quad (7)$$

onde, ρ é a densidade da água (kg m^{-3}), g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), S_{fx} é a inclinação (mm^{-1}) e q é a taxa de fluxo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Ali et al. (2011), avaliando o efeito dos parâmetros hidráulicos na determinação da capacidade de transporte de sedimentos para sulcos erodíveis concluíram que o poder de escoamento é um indicador de melhor desempenho para a estimativa quando comparado com a tensão de cisalhamento. Entretanto, ambos os parâmetros hidráulicos demonstram um bom potencial para a predição da capacidade de transporte de sedimentos.

Tanto a potência do escoamento, quanto a tensão cisalhante proporcionam ajustes razoáveis para condições combinadas de declividade e vazão. A equação do poder de fluxo é uma forma alternativa à tensão de cisalhamento com a vantagem de não precisar saber o raio hidráulico e a velocidade do fluxo. Para aplicar a equação de poder de fluxo é necessária apenas a unidade de descarga do fluxo, ou seja, a taxa de descarga total e a largura do canal (ZHANG et al., 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área

O presente trabalho foi conduzido em área experimental, no município de Pradópolis - SP, na Fazenda São Bento, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21° 21' 34" S e Longitude 48° 03' 56" W. O solo local foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa segundo critérios da EMBRAPA (2013). O LVef, na camada de 0,00 a 0,20 m, apresentou teores médios de 653 g kg⁻¹ de argila, 169 g kg⁻¹ de silte e 178 g kg⁻¹ de areia.

Foi utilizada uma encosta caracterizada pelas seguintes posições: topo, meia encosta e sopé. Cumpre ressaltar que, a área experimental vem sendo utilizada para a produção de cana-de-açúcar e com um histórico de mais de quatro anos de colheita mecanizada. Deste modo, a cobertura vegetal na área, na época da realização deste trabalho, era constituída por resíduos de cana-de-açúcar, os quais foram retirados da superfície após a colheita mecanizada da cana.

3.2. Preparo e caracterização dos sulcos

Para fins de avaliação do processo de erosão em sulcos em solo recém-preparado, seis sulcos ou canais com geometria retangular com 0,25 m de largura, 9 m de comprimento e 0,20 m de profundidade na porção central, foram pré-formados com um enxadão (Figura 1).

As laterais destes sulcos foram delimitadas por pequenos amontoados de terras, originados a partir da formação dos mesmos. No limite inferior de cada sulco foi instalada uma calha coletora convergente para uma saída de aproximadamente 0,10 m de diâmetro, facilitando a coleta de amostras de enxurrada e as avaliações de vazões (Figura 1). Na cabeceira de cada um dos seis sulcos existiam também, saídas individuais em tubo PVC de 0,10 m de diâmetro, para fornecimento de fluxos adicionais de água (Figura 2).

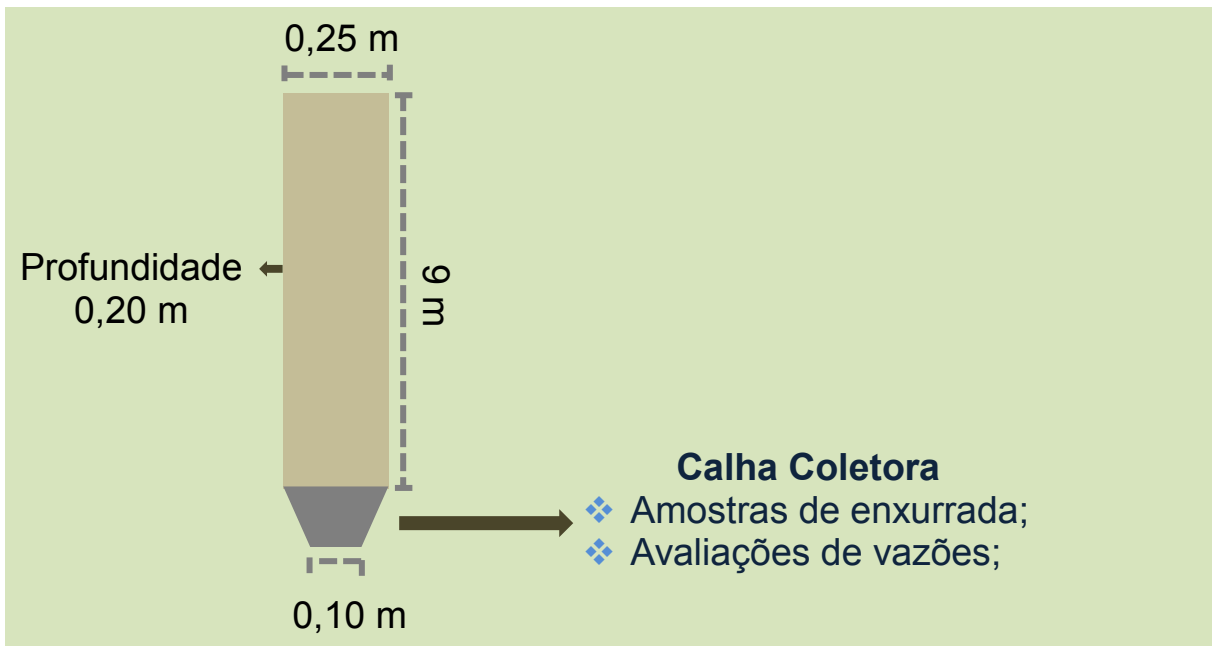


FIGURA 1. Esquema das dimensões dos sulcos de erosão e calha coletora.

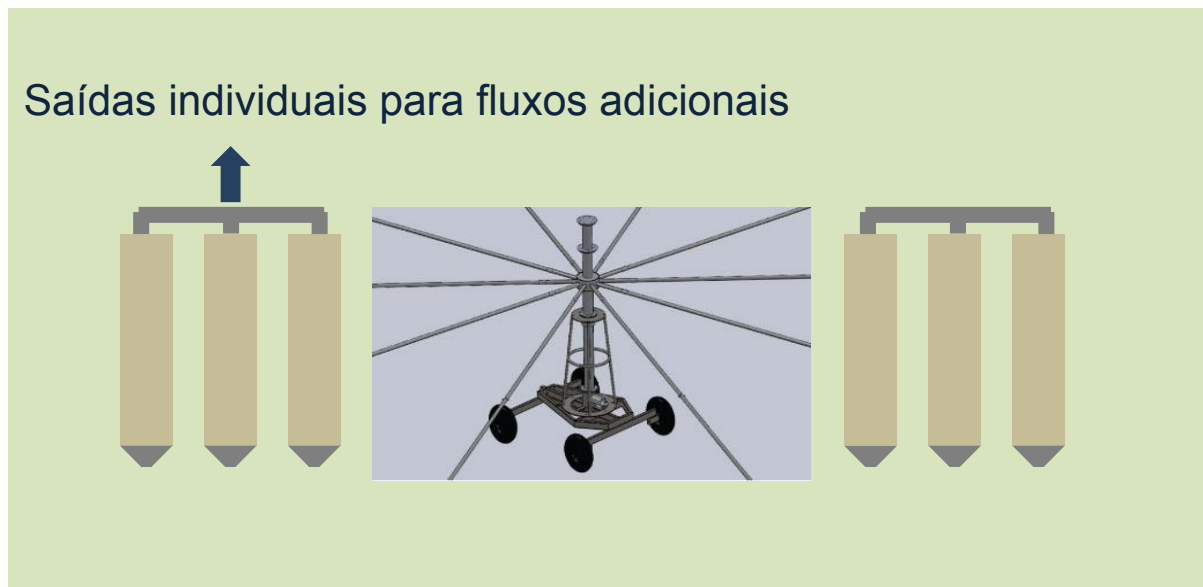


FIGURA 2. Esquema do simulador tipo Swanson, com a disposição dos sulcos de erosão na área de ação do simulador e saídas de fluxos adicionais de água.

3.3. Simulação das chuvas

Para as simulações de chuvas, com conseqüente produção de sedimentos erodidos, foi utilizado um simulador de chuvas de hastes rotativas, tipo Swanson (Figura 2), com bicos “veejet” 80100, previamente calibrado e nivelado no terreno, como proposto por Martins Filho et al. (2009). As intensidades de chuvas foram determinadas dispondo-se 36 pluviômetros radialmente no sentido do declive (Figura 2).

Uma chuva de 60 mm h^{-1} foi aplicada 24 horas antes dos testes experimentais para uniformizar a umidade do solo próximo das suas capacidades de campo. Para evitar danos ao solo foram utilizadas telas plásticas para dissipar a energia das gotas da água da chuva nas parcelas. Após este procedimento as parcelas foram cobertas com lona plástica, para se evitar perdas de água por evaporação e, ainda, danos devido a eventual ocorrência de precipitações naturais.

3.4. Sequência de Chuvas

No dia seguinte, após uniformizar a umidade do solo próximo à capacidade de campo, foi dado início a sequência de chuvas. Nos sulcos foi aplicada a chuva (C), chuva mais fluxos adicionais ($C + F_n$, para $n= 1, 2$ e 3) e apenas fluxos extras de água limpa (F_n , para $n=1, 2$ e 3); os fluxos tinham as seguintes vazões: $F_1 = 10 \text{ L min}^{-1}$; $F_2 = 20 \text{ L min}^{-1}$ e $F_3 = 30 \text{ L min}^{-1}$. A tensão cisalhante, o raio hidráulico e a velocidade superficial do fluxo nos sulcos foram avaliados aos 5, 35 e 55 minutos para a chuva (C) e aos 5, 10 e 15 minutos quando da aplicação dos fluxos adicionais (F_n) ou chuva + fluxos ($C + F_n$).

O cisalhamento hidráulico foi obtido medindo-se os raios hidráulicos utilizando-se de um perfilômetro, o qual foi fotografado com máquina digital. Essas avaliações foram executadas em duas posições dos sulcos: a 2 m da cabeceira e a 2 m antes do final dos canais. O perfilômetro foi constituído de 100 hastes metálicas espaçadas de 5 mm e acopladas em estrutura retangular de acrílico com 1,80 m de comprimento e 1,50 m de altura. As fotografias foram digitalizadas e os dados processados, analisados em planilha Excel para que as variáveis hidráulicas como o

perímetro molhado (P_m), a área de secção transversal ocupada pelo fluxo (a) e o raio hidráulico (R_h) fossem determinados.

A velocidade superficial do fluxo foi determinada, utilizando-se como corante o azul de metileno, cronometrando-se o tempo necessário para que este percorresse os 5 m centrais do comprimento total de cada sulco. Esses valores de velocidade superficial medidos foram multiplicados por um fator de correção, $a = 0,6$, para se obter a velocidade média do escoamento, tendo-se em vista a distribuição do perfil de velocidade nos sulcos.

Durante a última amostragem da enxurrada uma graduação nos recipientes de coleta foi o indicador do equilíbrio atingido durante a chuva (C). Como o tempo de amostragem foi cronometrado, até o volume de enxurrada atingir a graduação dos recipientes de coleta, facilmente pode ser estimada a vazão de enxurrada nos minutos finais da chuva (C), caracterizando uma condição de equilíbrio. A partir deste momento três diferentes vazões (F_1 , F_2 e F_3) foram aplicadas diretamente nas cabeceiras dos sulcos, por meio de um sistema de fornecimento de fluxos adicionais acoplado a uma moto-bomba. As combinações $C + F_1$, $C + F_2$ e $C + F_3$ tinham a duração de 20 minutos cada. Após as combinações chuva-fluxos adicionais foi aplicado apenas os fluxos F_1 , F_2 e F_3 , durante 20 minutos, sem a presença da chuva (C). Em todas as fases descritas, anteriormente, o cisalhamento, o raio hidráulico e a velocidade superficial do fluxo nos sulcos foram avaliados como já descrito, além das perdas de solo e água.

3.5. Determinação da vazão

Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos, quando da aplicação da chuva e/ou dos fluxos adicionais, foram realizadas a cada 5 minutos após o início da enxurrada, numa calha coletora localizada na parte inferior de cada sulco. Amostras foram coletadas em recipientes, com capacidade para 1L, cronometrando-se o tempo de coleta.

Logo após as coletas, os recipientes foram fechados e conduzidos ao laboratório, pesados e posteriormente mantidos em repouso por 24 horas, quando foi sifonado o máximo possível de água. Posteriormente, os recipientes foram

levados para uma estufa a uma temperatura de 65°C, e ali foram mantidos até peso constante, para serem novamente pesados, o que possibilitou quantificar a concentração de sedimentos, o volume da solução e, conseqüentemente, determinar as taxas de perdas de solo e água.

3.6. Parâmetros hidráulicos e fórmulas utilizadas

O raio hidráulico (R_h , m) dos sulcos foi determinado como:

$$R_h = \frac{a}{P_m} \quad (8)$$

em que, a – área se secção transversal (m^2); P_m – perímetro molhado da secção transversal (m).

A declividade dos sulcos foi determinada com um nível de precisão, pela variação da altura entre dois pontos a uma distância determinada nos sulcos (a 0,5 m da cabeceira e a 0,5 m antes do final do canal). As taxas de descarga (q , $m^2 s^{-1}$) foram determinadas pela medição do volume de enxurrada coletada durante um tempo cronometrado e dividida pelo perímetro molhado (P_m , m) dos sulcos.

Parâmetros referentes à hidráulica do fluxo de enxurrada número de Reynolds, número de Froude, velocidade de cisalhamento e coeficiente de rugosidade de Manning, foram determinados como descritos na sequência.

O número de Reynolds (R_e) foi obtido conforme expressão apresentada por Gilley e Doran (1998):

$$R_e = \frac{q}{\nu} \quad (9)$$

em que, q é a descarga líquida por unidade de largura ($m^2 s^{-1}$), e ν é a viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$).

A viscosidade cinemática da água (ν) foi determinada, segundo Julien (1998), com base na temperatura ($^{\circ}C$) obtida por meio de um termômetro em cada teste, como:

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

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

Quando $Re < 500$, $Re > 500$ e $Re > 2.000$, o fluxo foi considerado laminar, turbulento transicional e completamente turbulento, respectivamente (EVANS et al., 1997; LOWE, 2003).

Para obter o número de Froude (Fr), foi utilizada a seguinte expressão (CHANSON, 2004):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h}} \quad (11)$$

em que, v – velocidade média do fluxo ($m s^{-1}$); g - aceleração da gravidade ($m s^{-2}$), e h - altura do fluxo superficial (m).

Conforme Grant (1997), quando $Fr > 1$, o fluxo foi denominado de supercrítico e, no caso contrário, de subcrítico.

A velocidade de cisalhamento (U^* , $m s^{-1}$) foi determinada como:

$$U^* = \sqrt{g S R_h} \quad (12)$$

em que, g - aceleração da gravidade ($m s^{-2}$), S é a razão de inclinação do canal ($m m^{-1}$) e R_h é o raio hidráulico (m). Neste caso, admitiu-se que a declividade do fundo do sulco era igual à declividade da linha d'água.

A rugosidade hidráulica ao escoamento superficial foi obtida determinando-se o coeficiente de rugosidade de Manning (CHOW, 1959):

$$n = \frac{1}{v} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (13)$$

em que, R_h é o raio hidráulico (m), e S é a razão de inclinação do canal ($m m^{-1}$).

Amostras deformadas foram coletadas nas laterais dos sulcos, com auxílio de um trado, nos intervalos de 0, 0-10, 10; 0, 10-0, 20; e 0, 20-0, 30 m, para determinação da umidade do solo (u). A umidade foi determinada gravimetricamente, a partir de amostras coletadas no campo. No laboratório, as amostras foram pesadas e secas em estufa sob circulação forçada a $105^\circ C$ por 24 horas e pesadas novamente. A umidade gravimétrica foi expressa em $g g^{-1}$ e, posteriormente, convertida em $m^3 m^{-3}$ utilizando-se da densidade do solo (ds), a qual foi determinada como descrito pela EMBRAPA (1997).

A contribuição de sedimento desagregado nas áreas entressulcos para os sulcos (em $kg m^{-2} s^{-1}$) foi determinada conforme (ELLIOT et al., 1989):

$$E = D_i [(ES - L_r) / L_r] \quad (14)$$

em que, D_i – taxa de erosão entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); ES – espaço entre os sulcos (m); L_r – largura do fluxo no sulco (m).

A partir da massa de solo seco e da duração das coletas, determinou-se as taxas de descarga sólida, em kg s^{-1} . Por fim, as taxas de desagregação de solo nos sulcos foram obtidas pela seguinte relação:

$$D_r = \frac{CQ_s}{LP_m} - E \quad (15)$$

em que, D_r - taxa de desagregação do solo nos sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Q_s - descarga líquida (L s^{-1}), C - concentração de sólidos no escoamento (kg L^{-1}), P_m - perímetro molhado (m) e L - comprimento do sulco (m).

A carga média de sedimentos no fluxo (G , $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) em sulco foi calculada como (BRAIDA, 1994):

$$G = PS / (P_m t) \quad (16)$$

em que, PS – perda total de solo (kg), P_m - perímetro molhado (m) e t – tempo de duração do teste (s).

A erodibilidade em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) foram determinadas pela análise de regressão entre as taxas de desagregação (D_r) e os valores médios da tensão cisalhante do fluxo (τ). A tensão cisalhante média do fluxo (τ) foi obtida com a equação (2). Portanto, a erodibilidade (K_r) constitui-se no coeficiente angular da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo (τ). A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) correspondeu ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$ (LAFLEN; THOMAS, 1987).

A capacidade de transporte de sedimentos do fluxo (τ_c) foi determinada utilizando-se modelo para solução da equação de Yalin (MSEY) descrito por Cerquetani e Martins Filho (2006). Posteriormente, os valores de T_c foram correlacionados com os de tensão cisalhante (τ) para avaliação da equação (11) proposta por Finkner et al. (1989).

A distribuição acumulada de diâmetros de partículas do sedimento erodido nos sulcos foi obtida conforme descrito por Cantalice et al. (2005), a partir da coleta de quatro amostras, durante os 60 minutos iniciais, e de duas amostras, nos 20 minutos finais. Obteve-se com tais resultados o δ_{50} utilizado na equação de Yalin.

A potência do escoamento foi descrita segundo Lei et al. (1998) utilizando-se a Equação 7. Para caracterização química do solo, o cálcio, o magnésio, o potássio e o fósforo foram extraídos pelo método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1987). O carbono orgânico foi determinado seguindo metodologia da EMBRAPA (1979). O pH foi obtido potenciometricamente em solução de CaCl_2 0,01 M.

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de alta rotação (12.000 rpm) (GEE & BAUDER, 1986). As frações granulométricas foram separadas com base na classificação proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Os resultados foram submetidos à análise da variância, segundo um delineamento fatorial, sendo que para as comparações múltiplas das médias, foi utilizado o teste de Duncan, a 5%. Todos os resultados das análises estatísticas foram obtidos com o programa Statistica (STATSOFT, 1994).

3.7. Desempenho dos modelos

Os desempenhos dos modelos foram avaliados com os seguintes parâmetros estatísticos: índice de concordância de Wilmott (NS) (eq.(17)) e diferença média (MD) (eq (18)).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs_i} - Y_{est_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs_i} - \bar{Y})^2} \quad (17)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{est_i} - Y_{obs_i})}{n} \quad (18)$$

em que, NS – coeficiente de Nash-Sutcliffe; Y_{obs} – valor observado; Y_{est} – valor estimado; \bar{Y} - média dos valores observados; e n – número total de pares de valores observados e estimados.

Para a calibração e a proposição de equações de determinação da capacidade de transporte de sedimentos utilizou-se de 2 sulcos de um total de seis pré-formados, os quais foram denominados sulcos de referência (SR): um com 6,2% (SR₁) e outro com 7,4% (SR₂) de declividade. Os demais sulcos apresentavam

com 7,2% de declividade. No caso da avaliação do desempenho dos modelos utilizou-se os resultados obtidos nos 4 sulcos de erosão, cujos dados não foram utilizados no processo anterior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características hidráulicas e regime de escoamento do fluxo de enxurrada nos sulcos

Para a condição em que os sulcos não receberam fluxos adicionais, mas produziram vazão de enxurrada com a chuva aplicada, o regime do fluxo de enxurrada foi classificado como transicional-turbulento subcrítico (Tabela 3). Tal classificação foi devida ao número de Reynolds (R_e) ser inferior a 2000 e o número de Froude (F_r) ter valor inferior a 1.

TABELA 3. Características hidráulicas dos fluxos de enxurrada nos sulcos.

Tratamento	τ	q	R_e	F_r	Regime do fluxo de enxurrada
C	3,639	0,00129	1489,746	0,953	Transicional-turbulento subcrítico
F1	4,073	0,00203	2338,564	1,205	Turbulento supercrítico
F2	5,117	0,00335	3867,272	1,402	Turbulento supercrítico
F3	6,894	0,00485	5601,561	1,535	Turbulento supercrítico
F1+C	5,493	0,00358	4140,102	1,449	Turbulento supercrítico
F2+C	6,510	0,00416	4806,340	1,378	Turbulento supercrítico
F3+C	7,847	0,00557	6428,265	1,411	Turbulento supercrítico

C = chuva com intensidade de 65,3 mm h⁻¹; F1 = 10 L min⁻¹; F2 = 20 L min⁻¹; F3 = 30 L min⁻¹; τ = tensão cisalhante do escoamento; q = taxa de descarga do fluxo de enxurrada (m² s⁻¹); R_e = número de Reynolds; F_r = número de Froude. Valores médios de seis repetições (n = 6).

Para os tratamentos com fluxos adicionais de 10 a 30 L min⁻¹ os regimes dos fluxos de enxurrada foram classificados como turbulentos supercríticos, visto que $R_e > 2000$ e $F_r > 1$. Cantalice et al. (2005) obtiveram resultados semelhantes para sulcos pré-formados em Argissolo Franco Argilo Arenoso. Os resultados apresentados permitem afirmar que os regimes dos fluxos de enxurrada nos canais de erosão foram típicos do processo de erosão em sulcos. Tais resultados

permitiram observar que houve uma correlação linear entre as tensões aplicadas nos sulcos e as taxas de fluxo de enxurrada (Figura 3). Além do exposto, verificou-se que as velocidades médias do fluxo superficial de enxurrada elevaram-se a taxas crescentes e tenderam a uma constância com as descargas líquidas pela aplicação das vazões extras, ajustando-se dessa forma ao modelo de uma função potência (Figura 4). Cantalice et al. (2005) obtiveram um coeficiente a de 0,326 e um expoente de 0,3254 para a descarga líquida expressa em $L s^{-1}$, este último expoente é bem próximo ao obtido no presente trabalho que foi de 0,309.

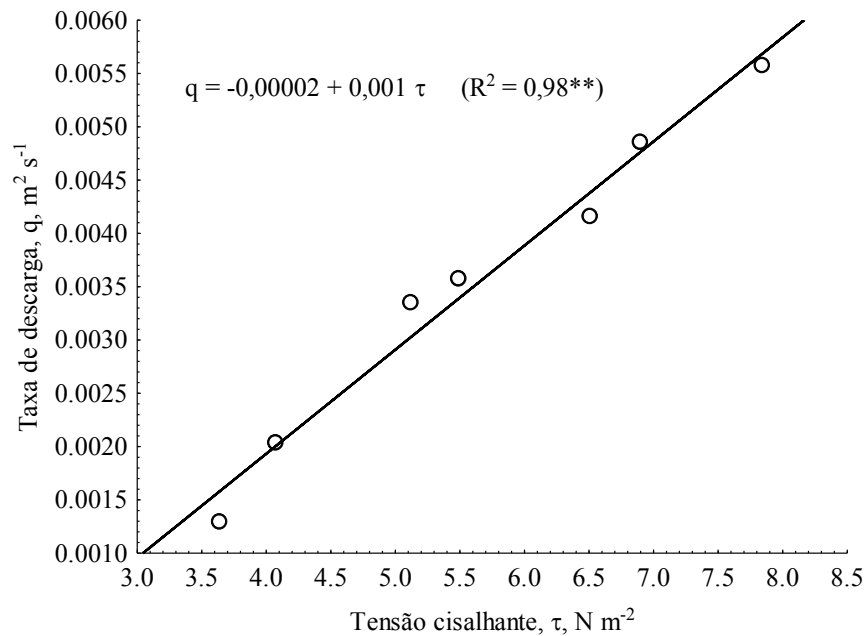


FIGURA 3. Relação entre as tensões cisalhantes aplicadas nos sulcos e as taxas de fluxo de enxurrada.

O aumento do raio hidráulico, em decorrência da vazão de enxurrada, ajustou-se a uma função potência como:

$$R_h = 0,012595 Q^{0,377361} \quad (R^2 = 0,95^{**}) \quad (19)$$

em que, R_h = raio hidráulico (m) e Q = vazão de enxurrada ($L s^{-1}$).

Este último resultado demonstra que a evolução do R_h dos sulcos determinou a grandeza das tensões cisalhantes sobre eles. Deste modo, é possível inferir que

as crescentes tensões cisalhantes do escoamento implicaram em alterações das características hidráulicas dos sulcos.

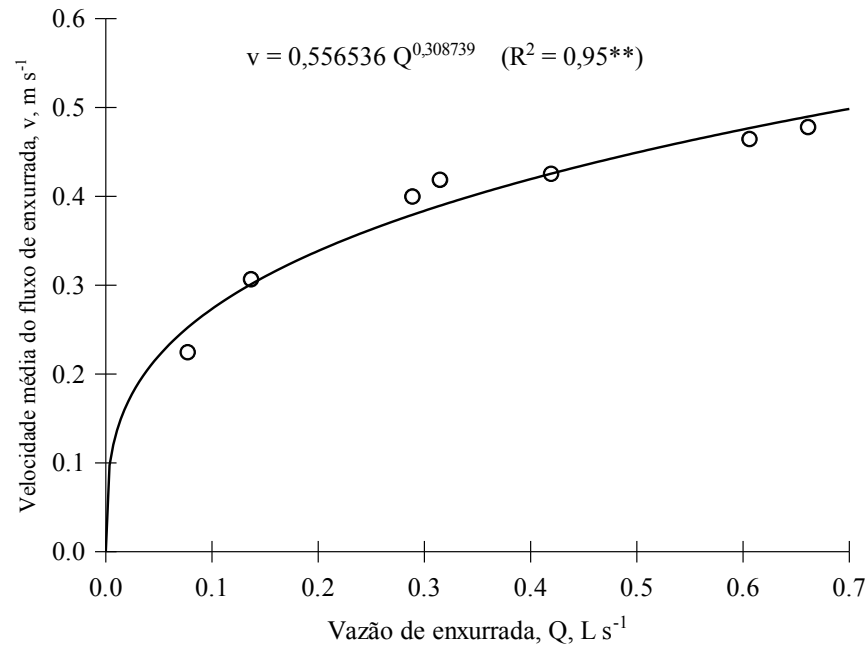


FIGURA 4. Relação entre as velocidades médias do fluxo superficial em relação às vazões aplicadas.

O aumento médio da velocidade média do escoamento com o aumento da vazão propicia danos nas paredes laterais e no leito dos canais, com consequente aumento no perímetro molhado (P_m), como observado por Bezerra et al. (2010) em um Cambissolo e no presente trabalho. Isto pode ser confirmado, uma vez que uma equação na forma de potência foi ajustada entre perímetro molhado (P_m) e vazão do escoamento (Q) como:

$$P_m = 0,999416 Q^{0,287689} \quad (R^2 = 0,99^{**}) \quad (20)$$

em que, P_m = perímetro molhado (m) e Q = vazão de enxurrada (m³ s⁻¹).

A concentração desse escoamento provocou maior transporte de sedimentos, pela maior desagregação do solo a partir das velocidades de cisalhamento (U, Tabela 4) ter sido superada com o aumento do escoamento, o que é demonstrado pela concentração de sedimentos (Tabela 4). Os resultados indicam que alterações

na geometria das seções transversais dos sulcos ocorreram com os escoamentos, o que pode ser demonstrado pela evolução do raio hidráulico atestada pela sua relação com área seção dos sulcos ocupada pelo escoamento como:

$$R_h = 0,335256 a^{0,518113} \quad (R^2 = 0,97^{**}) \quad (21)$$

em que, R_h = raio hidráulico (m) e a = área de seção do sulco (m^2).

TABELA 4. Variáveis hidráulicas do escoamento nos sulcos.

Fluxos	Variáveis									
	Q	v	a	Pm	Rh	n	d ₅₀	ω	S	U
C	0,00007	0,223	0,0004	0,066	0,005	0,037	0,102	0,868	0,07	0,060
F1+C	0,00032	0,419	0,0008	0,098	0,008	0,026	0,126	2,410	0,07	0,064
F2+C	0,00042	0,425	0,0010	0,107	0,010	0,028	0,126	2,798	0,07	0,071
F3+C	0,00066	0,477	0,0014	0,123	0,012	0,028	0,144	3,735	0,07	0,081
F1	0,00014	0,306	0,0005	0,077	0,006	0,029	0,146	1,314	0,07	0,074
F2	0,00029	0,400	0,0007	0,096	0,008	0,026	0,151	2,207	0,07	0,080
F3	0,00061	0,464	0,0013	0,118	0,010	0,026	0,147	3,279	0,07	0,089

C = chuva com intensidade de $65,3 \text{ mm h}^{-1}$; F1 = 10 L min^{-1} ; F2 = 20 L min^{-1} ; F3 = 30 L min^{-1} ; τ = tensão cisalhante do escoamento; q = taxa de descarga do fluxo de enxurrada ($m^2 \text{ s}^{-1}$); Q = vazão de enxurrada ($m^3 \text{ s}^{-1}$); v = velocidade do escoamento ($m \text{ s}^{-1}$); área de seção do canal (m^2); Pm = perímetro molhado (m); Rh = raio hidráulico (m); n = coeficiente de rugosidade; d₅₀ = tamanho médio de partículas presentes no escoamento (mm); ω = potência do escoamento ($kg \text{ m}^{-3}$); S = razão de inclinação dos sulcos ($m \text{ m}^{-1}$); U = velocidade de cisalhamento ($m \text{ s}^{-1}$); Valores médios de seis repetições (n = 6).

As variáveis hidráulicas do escoamento determinadas no experimento podem ser observadas nas Tabelas 3 e 4. É possível observar que a rugosidade (n) variou de 0,26 a 0,37, porém, não significativamente, cujos valores correspondem a escoamento em canais sem vegetação. Esta rugosidade representa a soma da rugosidade das partículas e agregados do solo (n') e da rugosidade da forma dos sulcos (n''). Valores da ordem de 10^{-3} demonstram, segundo Bezerra et al. (2010), presença mínima de agregados em superfície, caracterizando baixos valores de rugosidade hidráulica, o que está refletido no transporte de partículas com tamanho de 0,102 a 0,151 mm. Cumpre ressaltar que, no presente trabalho, tais valores foram obtidos para sulcos com declives em torno de $0,07 \text{ m m}^{-1}$.

A velocidade cisalhante (U), a qual está relacionada com o desenvolvimento inicial dos sulcos, apresentou valores de 0,06 a 0,089 m s^{-1} (Tabela 4). Tais valores são inferiores aos obtidos por Cantalice et al. (2005) em Argissolo (0,081 a 0,125 m s^{-1}) e superiores aos obtidos por Bezerra et al. (2010) em Cambissolo (0,03 a 0,04 m s^{-1}). Valores de U acima de 0,032 m s^{-1} , segundo Rauws (1987), atestam a ocorrência de eventos em regime supercrítico, o que foi o caso em 87% dos escoamentos proporcionados nos sulcos (Tabela 3).

4.2. Efeitos da taxa de descarga na capacidade de transporte de sedimentos

Para tais análises utilizaram-se dos resultados obtidos em apenas dois dos seis sulcos pré-formados, os quais foram denominados sulcos de referência (SR) um com 6,2% (SR₁) e outro com 7,4% (SR₂) de declividade. Na Figura 5, a capacidade de transporte de sedimentos (T_c) em função da taxa de descarga do fluxo de enxurrada permite verificar que a declividade dos canais não teve forte influência na T_c medida. No caso, quando foi simulada uma taxa de descarga igual a 0,0015 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, o valor de T_c obtido com 7,4% de declive foi 16% menor que o valor obtido com 6,2% de declive. Para um valor simulado de 0,005 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ de taxa de descarga, o valor de T_c obtido com 7,4% de declive foi 6% maior que o valor obtido com 6,2% de declive. Geralmente, a declividade de um canal tem forte influência na capacidade de transporte de sedimentos. Tal influência, segundo Ali et al. (2012), é explicada pela ação da componente tangencial da força da gravidade que atua no leito de um canal, a qual aumenta com o declive.

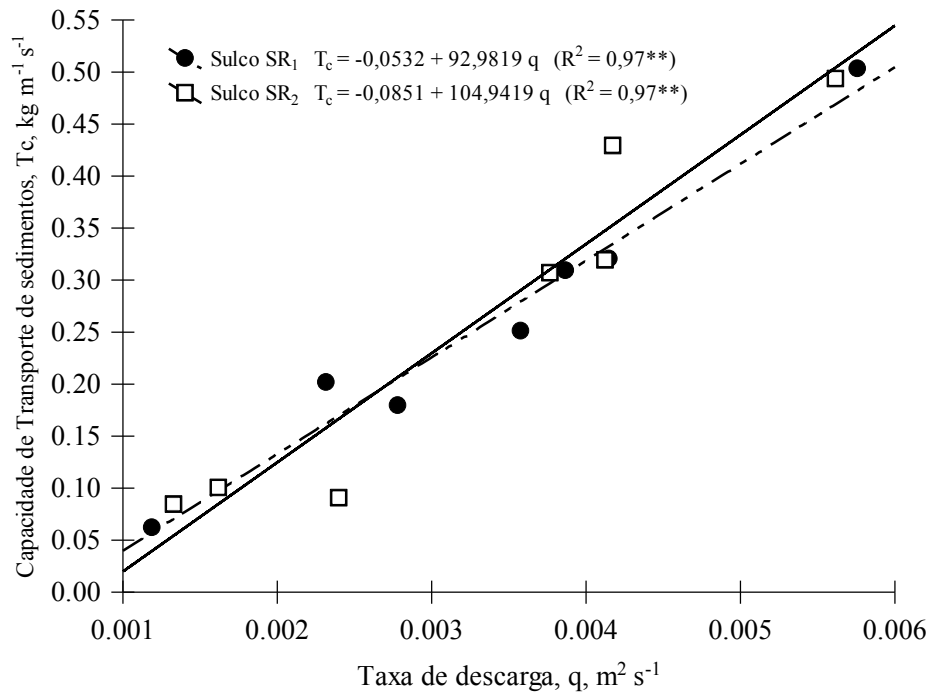


FIGURA 5. Capacidade de transporte de sedimentos (T_c) em função da taxa de descarga do fluxo de enxurrada (q).

4.3. Estimativas da capacidade de transporte de sedimentos nos sulcos referências

Com valores da capacidade de transporte de sedimentos obtidos nos sulcos SR_1 e SR_2 , com o MSEY (CERQUETANI; MARTINS FILHO, 2006) para conjunto de dados resolvendo-se a Yalin (1963), obteve-se os resultados apresentados na Tabela 5.

Os valores de K_t e z apresentados para as equações 22 e 23 diferem dos valores estabelecidos por Cerquetani e Martins Filho (2006), para um Latossolo Vermelho distroférico em Jaboticabal (SP), os quais obtiveram K_t igual a 0,04341 e z igual a 1,614 para o modelo da Eq. 23 e K_t igual a 0,05653 para o modelo da Eq. 22. Os coeficientes de determinação para as Eq. 22 e 23 foram inferiores àqueles obtidos para as Eq. 24, 25, 26 e 27. O desempenho da tensão cisalhante do escoamento na predição de T_c foi razoável ($R^2 = 0,76$ a $0,77$), quando comparada com os demais componentes estimadores (Tabela 5).

Para o modelo que tem por origem a Eq. 25, Zhang et al. (2011) obtiveram valores para K_t da ordem de 0,095 a 0,283 e para z de 1,266 a 1,441, com sedimentos compostos por partículas da ordem de 0,10 mm a 1,16 mm de diâmetro. Logo, os resultados obtidos com a Eq. 25 se enquadram no intervalo de valores obtidos por Zhang et al. (2011).

TABELA 5. Equações para estimativas da capacidade de transporte de sedimentos obtidos nos sulcos SR₁ e SR₂.

Modelo	K_t	Z	a	b	c	R ²	Equação
$T_c = K_t \tau^{1,5}$	0,0294	-	-	-	-	0,77**	22
$T_c = K_t \tau^z$	0,0372	1,3597	-	-	-	0,76**	23
$T_c = a q^b S^c$	-	-	0,7601	1,3231	-2,3157	0,93**	24
$T_c = K_t \omega^z$	0,0990	1,3231	-	-	-	0,94**	25
$T_c = a + b \omega$	-	-	-0,0704	0,1637	-	0,93**	26
$T_c = a + b \ln \omega$	-	-	0,0964	0,2744	-	0,86**	27

T_c = capacidade de transporte de sedimentos ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); K_t = coeficiente de transporte; q = taxa de descarga (kg m^{-2}); S = razão de inclinação (m m^{-1}); ω = potência do escoamento (kg m^{-3}); z , a , b e c = constantes ajustadas; R^2 = coeficiente de determinação; SR₁ e SR₂ = sulcos referências com 6,2% e 7,4% de declividade, respectivamente.

Deste modo, a exemplo do observado por Ali et al. (2012) e Zhang et al. (2015), pode-se pressupor que equações compostas pela potência do escoamento podem ser promissoras para estimativas de T_c . Os resultados até aqui parecem corroborar com os dados obtidos por Ali et al. (2012), o qual observou ser a tensão cisalhante um pobre preditor para estimar a capacidade de transporte de sedimentos. Para comprovar tais inferências testes de comparações entre valores preditos pelas Eq. 22 a 27 e valores de T_c observados em 4 sulcos de erosão serão apresentados na sequência.

4.4. Validação dos modelos de predição da capacidade de transporte de sedimentos

Para tais testes utilizou-se dos quatro sulcos, cujos resultados não foram utilizados para a calibração das equações de 22 a 27. Na Figura 6 é possível observar valores observados versus preditos de capacidade de transporte de sedimentos utilizando-se as eq. 22, 23 e 24.

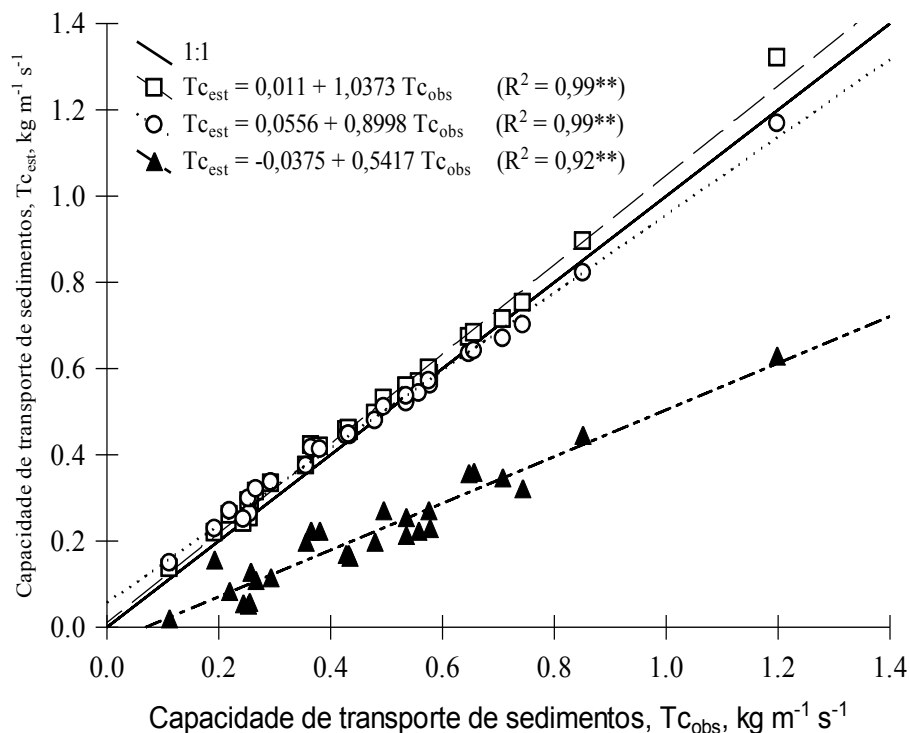


FIGURA 6. Valores observados versus preditos de capacidade de transporte de sedimentos utilizando-se as Eq. 22 (□), 23 (○) e 24 (▲).

A Eq. 22 na Figura 6 demonstrou que propicia um bom grau de associação entre valores observados e estimados da capacidade de transporte de sedimentos (T_c) obtidos pela Equação de Yalin (1963). É possível observar que a Equação 22 é eficiente para estimar os valores observados de T_c , pois a EF obtida é igual 0,9745, ou seja, próxima do valor ideal que é a unidade (Tabela 6). Verifica-se, ainda, que os valores estimados superestimam os observados de T_c , o que é confirmado pelo valor positivo de MD.

Na Tabela 6 nota-se um EF determinado igual a 0,9833 e um MD de 0,0098 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ com a Equação 23, os quais indicam melhor eficiência e menor superestimativa dos valores observados por aqueles estimados. Quanto à análise do coeficiente de eficiência de Nasc-Sutcliffe para a Equação 24 conforme critérios apresentados por Baltokoski et al. (2010), permite considerar que o desempenho desta equação é inaceitável. Valores de NS inferiores a 0,36 fazem com que os modelos sejam classificados como inaceitáveis. Valores de $EF < 1$ 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), o que é o caso dos resultado obtido com a Eq. 23 ($EF = -0,4306$, Tabela 6). O uso da Eq. 23 estabeleceu um MD igual a $-0,2512 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, o qual indica que os valores estimados subestimam os observados para T_c .

TABELA 6. Estatísticas do desempenho de equações para estimar a capacidade de transporte de sedimentos.

<i>Estatística</i>	Eq. 22	Eq. 23	Eq. 24	Eq. 25	Eq. 26	Eq. 27
EF	0,97	0,98	-0,43	0,64	0,64	0,64
MD ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	0,0284	0,0098	-0,2512	-0,109	-0,119	0,718

EF = eficiência do modelo; MD = diferença média.

Na Figura 7, os valores preditos da capacidade de transporte de sedimentos foram determinados pelas equações 25, 26 e 27. Os resultados demonstram haver um bom grau de associação entre os valores estimados versus observados de T_c para as equações 25 a 27, cujos valores de EF são iguais a 0,64. Verifica-se, ainda, que os valores estimados por ambas as equações, subestimam os observados de T_c , uma vez que, os valores de MD são negativos (-0,109 e -0,119, respectivamente). Com relação à equação 27, quanto à análise do coeficiente de eficiência, considera-se o seu desempenho aceitável, visto que esta apresentou valor de $EF > 1$ (Tabela 6). O MD estabelecido pela equação 27 foi igual a $0,718 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, indicando uma superestimação dos valores estimados quando comparados

aos valores observados de T_c .

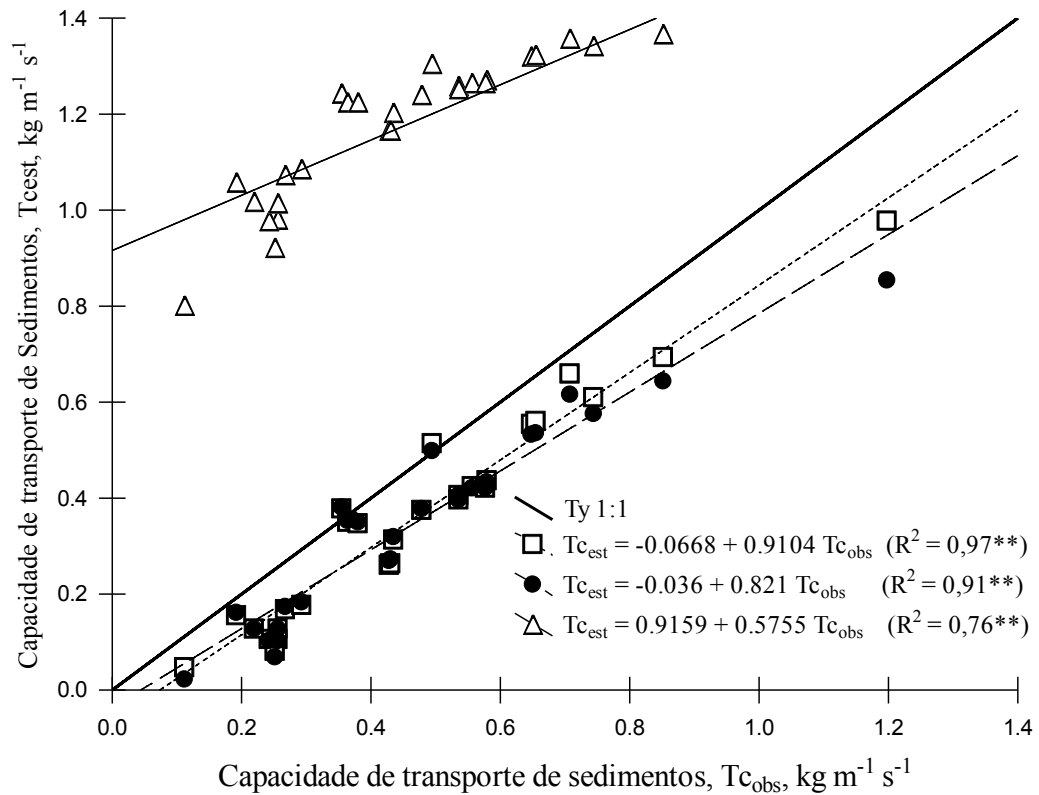


FIGURA 7. Valores observados versus preditos de capacidade de transporte de sedimentos utilizando-se as eq. 25, 26 e 27.

Considerando-se que a taxa de desagregação em sulcos (D_r) é obtida como $D_r = D_c [1 - (G/T_c)]$, em que D_c é a desagregação por um fluxo de água limpa, G é a carga de sedimento no fluxo e T_c é a capacidade de transporte do escoamento, verificou-se que a taxa de desagregação em sulcos (D_{ry}), para T_c obtida com a solução da Equação de Yalin, tem alta correlação com a taxa de desagregação (D_m) obtida considerando-se a T_c obtida com a Equação 22 (Figura 8).

A partir dos resultados expressos na Figura 6 determinaram-se as relações entre as taxas de desagregação em sulcos (D_{ry} ; D_{mi}) e tensão cisalhante (Figura 9).

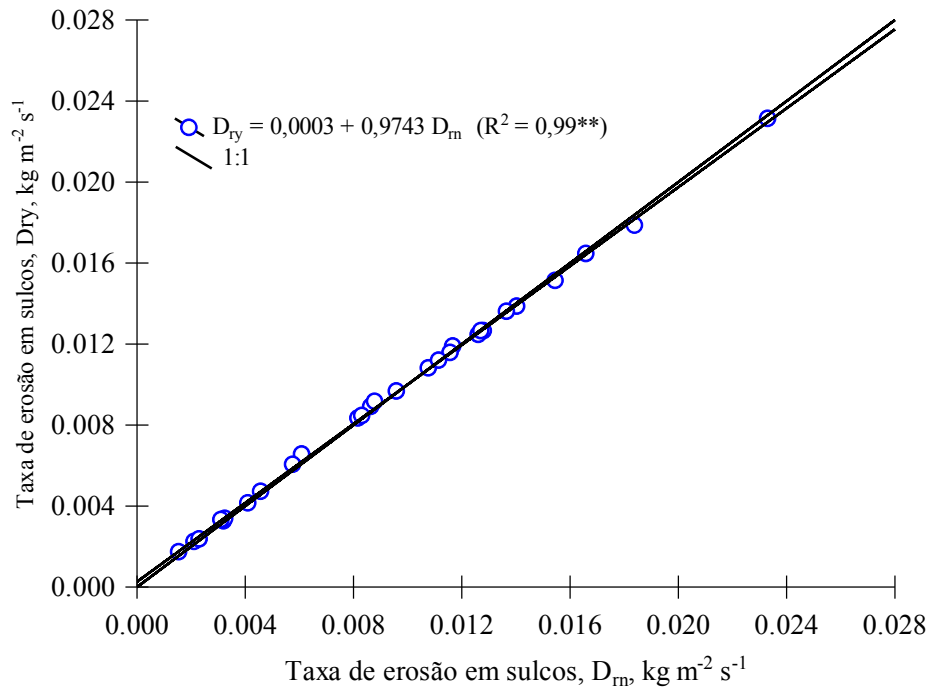


FIGURA 8. Taxa de desagregação em sulcos (D_{ry}), considerando-se a T_c obtida com a solução da Equação de Yalin, e taxa de desagregação (D_m) obtida considerando-se T_c obtida com a Equação 22.

A partir das regressões obtidas foram estimados os valores de erodibilidade em sulcos (K_r) e da tensão cisalhante crítica (τ_c) para o Latossolo do presente estudo. Considerando-se D_{ry} vs τ o valor de K_r foi de $0,0025 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e para a τ_c foi de $2,560 \text{ N m}^{-2}$. Para D_m vs τ o valor de K_r foi de $0,0025 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e a τ_c foi de $2,720 \text{ N m}^{-2}$ (Tabela 7).

TABELA 7. Erodibilidade em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) considerando-se T_c obtida a partir das Equações 2 e 22.

Atributo do solo	Dry (Eq. 2)	Dm (Eq. 22)
K_r	0,0025	0,0025
τ_c	2,5600	2,7200

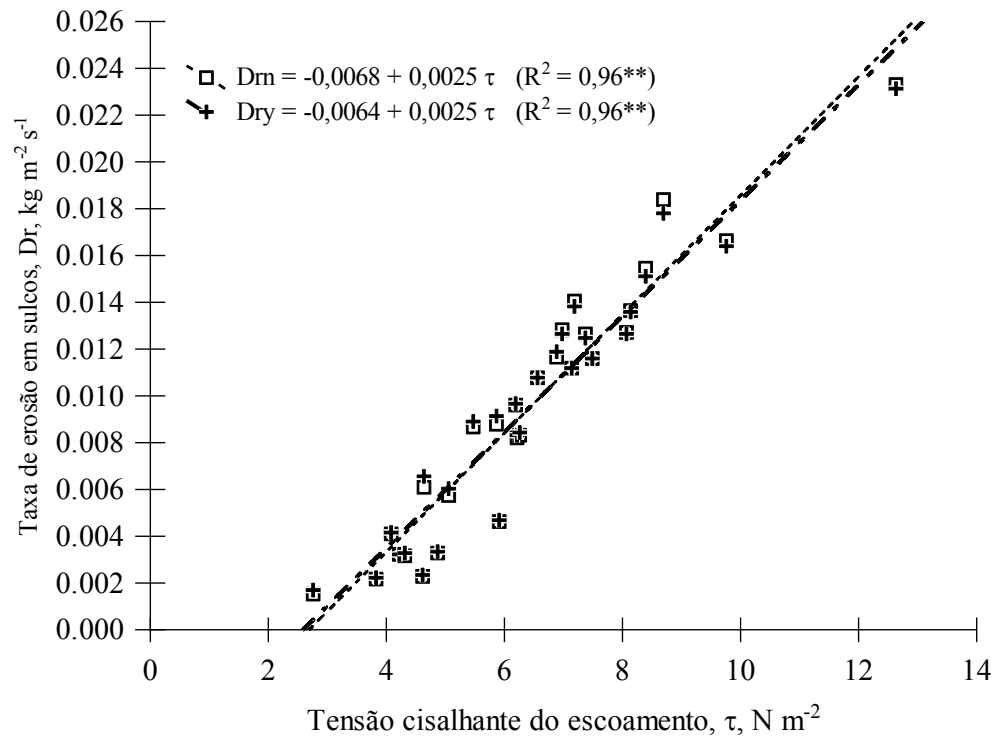


FIGURA 9. Taxa de desagregação em sulcos em função da tensão cisalhante do escoamento.

5. CONCLUSÃO

1. Equações para estimar a capacidade de transporte de sedimentos (T_c), em função da tensão cisalhante do escoamento, têm maior eficiência para prever T_c , para o Latossolo estudado, quando comparadas com as equações que consideram a potência do escoamento;
2. A Equação de Yalin permitiu estimar a capacidade de transporte de sedimentos e estabelecer valores para a erodibilidade em sulcos e tensão cisalhante crítica.
3. Para o Latossolo Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa, as taxas de desagregação foram lineares para com as tensões cisalhantes, e o valor de erodibilidade em sulcos (K_r) foi de $0,0025 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e para a tensão cisalhante crítica (τ_c) foi de $2,560 \text{ N m}^{-2}$.

6. REFERÊNCIAS

- ABRAHAMMS, A. D. **Hillslope processes**. Boston: Allen & Unwin, 1986.
- ABRAHAMMS, A. D.; LI, G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.23, p.953–960, 1998.
- ABRAHAMMS, A. D.; LI, G.; KRISHANA, C.; ATKINSON, J. F. A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surface. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.26, p.1443–1459, 2001.
- ABRAHAMMS, A. D.; LI, G.; PARSONS, A. J. Rill hydraulics on a semi-arid hillslope, Southern Arizona. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.21, p.35-47, 1996.
- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A Review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, Amsterdam, v.64, p.247–271, 2005.
- ALFSEN, K.H.; FRANCO, M.A. de; GLOMSROD, S.;JOHNSEN, T. The cost of soil erosion in Nicaragua. **Ecological Economics**, New York, v.16, p.129-145, 1996.
- ALI, M., SEEGER, M., STERK, G., MOORE, D. A unit stream power based sediment transport function for overland flow. **Catena**, Amsterdam, v.101, p.197–204, 2013.
- ALI, M.; STERK, G.; SEEGER, M.; BOERSEMA, M. P.; PETERS, P. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Katlenburg-Lindau, v.8, p.6939-6965, 2011.
- ALI, M.; STERK, G.; SEEGER, M.; STROOSNIJDER, L. Effect of discharge and median grain size on mean flow velocity under overland flow. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.7, p.150-160, 2012.
- ALONSO, C.V.; NEIBLING, W.H.; FOSTER, G.R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.24, n.5, p.1211-1220, 1981.
- 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, 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.1046-1049, 2010.
- ANDRADE, N.S. F.; MARTINS FILHO, M. V.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J. 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, 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**, Barcelona, v.35, n.3-4, p.251-259, 2000.

BAGNOLD, R. A. **An approach to the sediment transport problem from general physics**. Reston: United States Geological Survey, 1996. p.422-I. (Professional Paper, 76)

BAKKER, M. M., GOVERS, G., ROUNSEVELL, M.D.A. The crop productivity erosion relationship: an analysis based on experimental work. **Catena**, Amsterdam, v.57, n.1, p.55-76. 2004.

BALTOKOSKI, V.TAVARES, M H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão de fosforo total nas sub-bacias dos rios conrado e pinheiro – pato branco PR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.34, p.253-261, 2010

BARRETO, A. G. O. P.; LINO, J. S.; GERD, S. Bibliometria da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo: instituições, temas, espaço e cronologia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.33, n.6, p.1845-1854, 2009.

BARRETO, A. G. O.; BARROS, M. G. E.; SPAROVEK, G. Bibliometria, história e geografia da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, p.2443-2460, 2008.

BEASLEY, C. B. et al. ANSWERS: a model for watershed planning. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.23, n.8, p.938-944, 1980.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F. **ANSWERS user's manual**. West Lafayette: Department of Agricultural Engineering, 1982.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; SCHICK, J.; GUADAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica e diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, p.133-142, 2007a

BERTOL, I.; LEITE, D.; ENGEL, F.L.; COGO, N.P.; PAZ GONZÁLEZ, A. Erodibilidade de um Nitossolo Háplico aluminico determinada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, p.541-549, 2007b.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Erosão. In: BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4.ed. São Paulo: Ícone, 1999. cap.7, p.68-93.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B.; CUNHA FILHO, M.; SOUZA, W.L.S. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um cambissolo do semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.34, n.4, p.1325-1332, 2010.

BRAIDA, J. A. **Relações da erosão entressulcos, com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em solo podzólico vermelho-escuro**. 1994. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, n.1, p.127-134, 1996.

BRAZIER, R. E.; BEVEN, K. J.; FREER, J., ROWAN, J. S. Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: Application of the glue methodology to WEPPthe water erosion prediction project-for sites in the UK and USA. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.25, p.825–845, 2000.

BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, London, v.32, p.385-415, 2000.

CANTALICE, J.R.B.; CASSOL, J.E.; REICHERT, J.M.; BORGES, A.L.O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, n.4, p.597-607, 2005.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; CRUZ, E. S. DA; LANA, A. M. Q.; SILVA, W. A. Efeito da cobertura morta e do preparo do terreno nas perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho-Amarelo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.11, n.1-4, p.15-22, 2003.

CASSOL, E.A.; LIMA, V.S.; Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.1, p.117-124, 2003.

CERDAN, O.; LE BISSONNAIS, Y.; COUTURIER, A.; BOURENNANE, H.; SOUCHÈRE, V. Rill erosion on cultivated hill slopes during two extreme rainfall events in Normandy. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.67, p.99–108, 2002.

CERQUETANI, G. E.; MARTINS FILHO, M. V. Rotina computacional e equação simplificada para modelar o transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p.617-626, 2006.

CERRI, L. E. S.; AMARAL, C. P. Riscos Geológicos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N.A. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. cap.18, p.301-310.

CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow**. London: Butterworth Heinemann, 2004. 488 p.

CHMELOVÁ, R.; SARAPATKA, B. Soil erosion by water: contemporary research methods and their use. **Geographica**, Olomuc, v.37, n.1, p.23-30, 2002.

CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 680 p.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 6.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p.337-379.

DI STEFANO, C.; FERRO, V.; PAMPALONE, V.; SANZONE, F. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. **Catena**, Amsterdam, v.101, p.226–234, 2013.

DISSART, J.; BAKER, L.; THOMASSIN, P.J. The economics of erosion and sustainable practices: the case of the Saint-Espirit watershed. **Canadian Journal of Agricultural Economics**, Ottawa, v.48, p.103-122, 2000.

DUBOYS, M. P. Le Rhône et les rivières à lit affluillable. **Annals de Ponts et Chaussee**, Paris, v.18, n.5, p.141 – 195, 1879.

ELLIOT, W. J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KHOL, K. D. **A compendium of erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987/88**. Ohio: Ohio State University, 1989. p.A2-A25. (Report, 3).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. rev.ampl. Brasília, DF, 2013.

EVANS, J.; LIEPMANN, D.; PISANO, A. P. Planar laminar mixer. In: **ANNUAL INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICROELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, 10., 1997, Nagoya. Proceedings...** Nagoya: IEEE, 1997. p.96-101.

EVERAERT, W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.16, p.513–532, 1991.

FERRO V. **Atlante della qualità dei suoli del bacino del fiume Imera Meridionale**. Palermo: Edizioni Fotograf, 2008. 300 p.

FERRO, V. Evaluating overland flow sediment transport capacity. **Hydrological Processes**, Chichester, v.1, p.1895-1910, 1998.

FINKNER, S.C.; NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; GILLEY, J.E. A simplified equation for modeling sediment transport capacity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.5, p.1545-1550, 1989.

FLANAGAN, D. C.; FRANKENBERGER, J. R.; ASCOUGH II, J.C. WEPP: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, New York, v.55, n.4, p.1463-1477, 2012.

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**. West Lafayette: NSERL, 1995. (Report, 10)

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D.L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p.296-380. (Monograph, 5).

FOSTER, G. R.; HUGGINS, L. F.; MEYER, L. D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationship. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.27, p.790-796, 1984.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: SHEN, H. W. (Ed.). **Sedimentation**. Fort Collins: Colorado State University, 1972. p.12-19.

FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; NEARING, M.A.; FINKNER, S.C.; FLANAGAN, D.C. In: LANE, L.J.; NEARING, M.A. (Ed.). **USDA – water erosion prediction project: hillslope profile model documentation**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA, 1989. p.10.1-10.12. (Report, 2).

GEE, G.W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: ASA, 1986. p.383-411. (Agronomy Monography, 9).

GILLEY, J. E.; DORAN, J. W. Soil erosion potential former conservation reserve program sites. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.41, n.1, p.97-103, 1998.

GIMENEZ, R.; GOVERS, G. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1475-1483, 2002.

GIMENEZ, R.; GOVERS, G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills, **Water Resources Research**, Washington, v.37, n.3, p.791-799, 2001.

GOVERS, G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. Erosion, Transport and Deposition Processes. In: JERUSALEM WORKSHOP, 1987, Jerusalém, 1990. **Proceedings...** Netherlands: IAHS, 1990. p.45-63.

GOVERS, G. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. In: PARSONS, A.J.; ABRAHAM, A.D. (Ed.). **Overland flow hydraulics and erosion mechanics**. London: University College London Press, 1992. p.243–273.

GOVERS, G.; RAUWS, G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.11, p.515–524, 1986.

GRANT, G. E. Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: A new hypothesis. **Water Resources Research**, Washington, v.33, n.2, p.349–358, 1997.

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

GUY, B. T.; DICKINSON, W. T.; RUDRA, R. P.; WALL, G. J. Hydraulics of sediment-laden sheet-flow and the influence of simulated rainfall. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.15, p.101–118, 1990.

GUY, B.T., DICKINSON, W. T., SOHRABI, T. M., RUDRA, R. P. Development of an empirical model for calculating sediment transport capacity in shallow overland flows: model calibration. **Biosystems Engineering**, London, v.103, p.245–255, 2009a

GUY, B.T.; RUDRA, R.P.; DICKINSON, W.T.; SOHRABI, T. M. Empirical model for calculating sediment transport capacity in shallow overland flow: model development. **Biosystems Engineering**, London, v.103, p.105–115, 2009b.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. San Diego: Academic Press, 1994. 588 p.

HANSON, G. J. Surface erodibility of earthen channels at high stresses part II – developing an in situ testing device. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.33, n.1, p.132-137, 1990.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F. F.; MARIA, I. C. DE; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. C. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J. R. R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2002. p.47-60.

HESSEL, R., JETTEN, V. Suitability of transport equations in modelling soil erosion for a small Loess Plateau Catchment. **Engineering Geology**, Oxford, v.91, p.56–71, 2007.

HUANG, C. H.; BRADFORD, J. M.; LAFLEN, J. M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.6, p.734–739, 1996.

HUANG, G.; WELLS, L.K.; NORTON, L.D. Sediment transport capacity and erosion processes: model concepts and reality. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.24, p.503-516, 1999.

ISSA, O. M.; LE BISSONNAIS, Y.; PLANACHON, O.; MORTLOC, D. F.; SILVEIRA, N. Soil detachment and transport on Field and laboratory scale interrill areas: erosion processes and the size selectivity of eroded sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.31, n.5, p.929-939, 2006.

JAYAWARDENA, A. W.; BHUIYAN, R. R. Evaluation of an interrill soil erosion model using laboratory catchment data. **Hydrological Processes**, Chichester, v.13, p.89–100, 1999.

JULIEN, P.Y.; SIMONS, D. B. Sediment transport capacity of overland flow. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.28, p.755–762, 1985.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 280p.

KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYSSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v.80, p.75-109, 2007.

LAFAYETTE, K. P.V; CANTALICE, J. R. B; COUTINHO, R. Q. Resistência à erosão em ravinas, em Latossolo argilo arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.35, n.6, p., 2011.

LAFLEN, J. M., THOMAS, A. W.; WELCH, R. **Cropland experiments for the WEPP project**. Saint Joseph: ASAE, 1987.14 p.

LAFLEN, J. M.; FLANAGAN, D. C.; AND ENGEL, B. A. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. **Journal of American Water Resources Association**, Herndon, v.40, p.289–297, 2004.

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

LAL, R.; ELLIOT, W. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. **Soil erosion research methods**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society/Saint Lucie Press, 1994. p.11-332.

LANE, L.J.; NEARING, M.A. **USDA water erosion prediction project: hillslope profile model documentation**. West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1989.

LEI, T.; NEARING, M. A.; HAGHIGHI, K.; BRALTS, V.F. Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. **Water Resources Research**, Washington, v.34, n.11, p.3157-3168, 1998.

LEI, T.W.; ZHANG, Q.; ZHAO, J.; TANG, Z. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.44, n.6, p.1537-1542, 2001.

LOPES V L. **A numerical model of watershed erosion and sediment yield**. 1987. Dissertation (PhD) - University of Arizona, Tucson, 1987

LOWE, S. A. Omission of critical Reynolds number for open channel flows in many textbooks. **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice**, Reston, v.129, n.1, p.58-59, 2003.

LU, J. Y.; CASSOL, E. A.; MOLDENHAUER, W. C. Sediment transport relationships for sand and silt loam soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.6, p.1923-1931, 1989.

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

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

MARTINS FILHO, M.V.et. al. Modelagem do processo de erosão entressulcos para latossolos de Jaboticabal – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p.9-20, 2003.

MARTINS FILHOS, M. V.; LICCIOTI, T. T.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JUNIOR, 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, 2009.

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

MINELLA, J. P.G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; CASSOL, E. A. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P.D.; ANDRADE, A. G. de (Org.). **Manejo e conservação do solo no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p.105-121.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. **Water Resources Research**, Washington, v.22, n.7, p.1350-1360, 1986.

MORGAN, R. P.C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; STYCZEN, M. E. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and

small catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.23, p.527–544, 1998.

NASCIMENTO, C. W. A.; CHAVES, I. B. Erosividade e características da chuva correlacionadas com perdas de solo em Alagoinha – PB. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.26, n.3, p.407-412, 1996.

NEARING M.A.; NORTON L.D.; BULGAKOV D.A.; LARIONOV G.A.; WEST L.T.; DONTSOVA K.M. Hydraulics and Erosion in eroding rills. **Water Resources Research**, Washington, v.33, p.865-876, 1997.

NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A process-based soil erosion model for USDA-Water erosion prediction project technology. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.5, p.1587-1593, 1989.

NEARING, M. A.; SIMANTON, J. R.; NORTON, L. D.; BULYGIN, S. J.; STONE, J. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.24, p.677–686, 1999.

NORD, G.; ESTEVES, M. Evaluation of sediment transport formulae and detachment parameters in eroding rills using PSEM-2D and the water erosion prediction project (WEPP) database. **Water Resources Research**, Washington, v.43, p.1–14, 2007.

NORD, G.; ESTEVES, M.; LAPETITE, J.M.; HAUET, A. Effect of particle density and inflow concentration of suspended sediment on bed load transport in rill flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.34, p.25–263, 2009.

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

OLIVEIRA, L. M. **Guia de prevenção de acidentes geológicos urbanos**. Curitiba: Mineropar, 1998. 52 p.

PARSONS, A. J.; WAINWRIGHT, J.; FUKUWARA, T.; ONDA, Y. Using sediment travel distance to estimate medium-term erosion rates: a 16-year record. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.35, n.4, p.1694-1700, nov.2010.

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. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.336, p.84–97, 2007.

PIERSON, F.B.; MOFFET, C.A.; WILLIAMS, C.J.; HARDEGREE, S.P.; CLARK, P.E. Prescribed-fire effects on rill and interrill runoff and erosion in a mountainous sagebrush landscape. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.34, p.193-203, 2009.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; McNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.267, n.1, p.117-1.123, 1995.

POLYAKOV, V.O.; NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v.51, n.1, p.33-43, 2003.

PONCE ÁLVARES, M. T.; PIMENTA, M. T. Erosão hídrica e transporte sólido em pequenas bacias hidrográficas. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 4., 1998, Lisboa. Disponível em: <http://snirh.inag.pt/snirh/download/relatorios/cong_ag4_erosao.PDF>. Acesso em: 13 ago. 2014.

PROSSER, I.; RUSTOMJI, P. Sediment transport capacity relations for overland flow. **Progress in Physical Geography**, London, v.24, p.179–193, 2000.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água**: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa: UFV, 2006. 240 p.

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

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RAUWS, G. Hydraulics and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Catena**, Amsterdam, v.8, p.1-15, 1987.

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

SANDER, G. C.; PARLANGE, J. Y.; BARRY, D. A.; PARLANGE, M. B.; HOGARTH, W. L. Limitation of the transport capacity approach in sediment transport modeling. **Water Resources Research**, Washington, n.43, n.2, 2007.

SANTOS, F. P.D.; BAYER, M.; CARVALHO, T. M. D. Compartimentação pedológica da Bacia do Rio dos Bois, municípios de Cezarina, Varjão, Guapó e Palmeira de Goiás (GO) e sua relação com a suscetibilidade e risco à erosão laminar. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v.28, p.103-124, 2008.

SANTOS, G. S.; NORI, P.G.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.115-123, 2010.

SANTOS, G. S.; NORI, P.G.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.115-123, 2010.

SAVABI, M. R. Modeling subsurface drainage and surface runoff with wepp. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, New York, v.119, p.801–813, 1993.

SCHÄFER, M. J.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; CASSOL, E. A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, n.2, p.431-441, 2001.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT Jr., A. A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n.2, p.437-447, 2000.

SHARMA, K.D.; MURTHY, J.S.R.; DHIR, R.P. Modeling sediment delivery in arid upland basins. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.39, n.2, p.517-524, 1996.

SHERIDAN, G. J.; SO, H. B.; LOCH, R. J.; WALKER, C. M. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. **Australian Journal of Soil Science**, Collingwood, v.38, n.2, p.129-136, 2000.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, Amsterdam, v.57, p.251-259, 2004

SILVA, F.G.B.; MINOTI, R.T.; PRIMAVESI, O.; NETTO, A.A.; CRESTANA, S. **Aplicação preliminar do modelo WEEP para determinação da perda de solo por erosão e parâmetros hidrológicos na bacia do ribeirão dos negros – São Carlos – SP.2007.** Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/15210/1/PROCI%28OP2004.00066%29.pdf>>. Acesso em: 10 nov.2014.

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, 261–276, 2011.

SINGH, V.P. Watershed modelling. In: SINGH, V.P.(Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. p.1–22.

SINGH, V.P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v.7, n.4, p.270-292, 2002.

SLATTERY, M. C.; BRYAN, R.B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.17, n.2, p.127-146, 1992.

SMITH, R.E. A kinematic model for surface mine sediment yield. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.24, n.6, p.1508– 1514, 1981.

STATSOFT. **Statistica**: quick reference. Tulsa, 1994. 148p.

STORM B, JORGENSEN G H, STYCZEN M. Simulation of water flow and soil erosion processes with a distributed physically-based modeling system. In: VANCOUVER SYMPOSIUM FOREST HYDROLOGY AND WATERSHED MANAGEMENT, 1987, Vancouver. **Proceedings...** Wallingford: IAHS Publications, 1987. v.167, p.595–608.

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

TAKKEN, I.; GOVERS, G.; CIESIOLKA, C. A. A.; SILBURN, D. M.; LOCH, R. J. Factors influencing the velocity-discharge relationship in rills. In: MODELLING SOIL EROSION, SEDIMENT TRANSPORT AND CLOSELY RELATED HYDROLOGICAL PROCESSES, 1998, Vienna. **Proceedings...** Wallingford: IAHS Publications 1998. v.249, p.63-69.

TAYFUR, G. Applicability of sediment transport capacity models for nonsteady state erosion from steep slopes. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v.7, n.3, p.252-259, 2002.

TELLES, T. S. **A erosão do solo no Brasil: histórico da pesquisa e custos das perdas de nutrientes**. 2012. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

TELLES, T. S. **Os custos da erosão do solo**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2010. p.61.

TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.35, p.287-298, 2011.

TÔSTO, S.G.; PEREIRA, L.C.; MANGABEIRA, J.A.C.; CARVALHO, J.P. **Valoração ambiental de serviço ecossistêmico da perda de solo no Município de Araras, SP**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 23 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 20).

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J.; VAN ROMPAEY, A.; VAN OOST, K.; GOVERS, G.; GILLIJNS, K. **Implementation of best management practices in flanders and their impact on soil loss and sediment delivery cost**. Brussels: Soil Erosion and Global Change meeting: Socio-economic factors and soil erosion, 2002. 623 p.

WICKS J M. **Physically based mathematical modelling of catchment sediment yield**. 1998. Dissertation (PhD) - University of Newcastle, Newcastle, 988.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agriculture handbook, 537)

YALIN, Y. S. An expression for bed load transportation. **Journal of Hydraulic Division**, Saint Joseph, v.3, n.1, p.221-250, 1963.

YANG, C. T. Unit stream power and sediment transport, **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v.98, p.1805–1826, 1972.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D.; ANDERSON, W.P. AGNPS: a nonpointsource pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.44, n.2, p.168–178, 1989.

YU, B.; ROSEWELL, C. J. Evaluation of WEPP for runoff and soil loss prediction at Gunnedah, NSW, Australia. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.39, p.1131–1145, 2001.

ZHANG, G. H.; WANG, L. L.; TANG, K. M.; LUO, R.T.; ZHANG, X. C. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v.56, n.7, p.1289–1299, 2011.

ZHANG, G.; LIU, B.; HAN, Y.; ZHANG, X. C. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. transport capacity estimation. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.73, n.4, p.1291–1297, 2009a.

ZHANG, K.; ZHENG, H.; CHEN, F. L.; OUYANG, Z. Y.; WANG, Y.; WU, Y. F.; LAN, J.; FU, M.; XIANG, X. W. Changes in soil quality after converting Pinus to Eucalyptus plantations in southern China. **Solid Earth**, New York, v.6, p.115–123, 2015

ZHANG, L.; O'NEILL, A.L.; LACEY, S. Modelling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. **Environmental Software**, Oxford, v.11, n.1-3, p.123-133, 1996a.

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAN, R. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. **Land Degradation and Development**, New York, v.20, p.84–91, 2009b.

ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, J. A. R.; YAMANOUTH, G. R. D. B. Feições erosivas na bacia do córrego do Espreado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972 - 2002. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v.37, p.414-425, 2007.