

EROSÃO EM SULCOS EM DIFERENTES PREPAROS E ESTADOS DE CONSOLIDAÇÃO DO SOLO⁽¹⁾

**M. J. SCHÄFER⁽²⁾, J. M. REICHERT⁽³⁾, E. A. CASSOL⁽⁴⁾,
F. L. F. ELTZ⁽³⁾ & D. J. REINERT⁽³⁾**

RESUMO

O preparo e a consolidação do solo alteram a sua capacidade em resistir à erosão em sulcos. Com o objetivo de estudar a erosão em sulcos em diferentes preparos e consolidação do solo, conhecer o diâmetro mediano dos sedimentos transportados e determinar a erodibilidade em sulcos (K_r) e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) do solo, foi realizado um experimento no campo, em 1997/98, em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis repetições. Os tratamentos constaram de: preparo convencional recente (CR), preparo convencional consolidado (consolidação de dois meses) (CC), plantio direto sem palha (PDS) e plantio direto com palha (PDC, 94% de cobertura). Usou-se chuva simulada de intensidade constante (65 mm h^{-1}) até escoamento aproximadamente constante de água no solo. Em seguida, na extremidade superior do sulco, foram adicionadas descargas líquidas (Q) crescentes de $0,0002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ até $0,0010 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para os tratamentos CR e CC, e de $0,0004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ até $0,0020 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para os tratamentos PDS e PDC, sendo as amostras coletadas na parte inferior de cada sulco. As parcelas foram delimitadas por chapas metálicas cravadas no solo no sentido do declive ($0,20 \text{ m}$ de largura por $6,00 \text{ m}$ de comprimento). O valor de K_r determinado foi de $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e o τ_c foi de $2,61 \text{ N m}^{-2}$. A desagregação, as perdas de solo e o diâmetro mediano dos sedimentos apresentaram a seguinte seqüência em magnitude: CR, CC, PDS e PDC, particularmente nas maiores Q . O regime de escoamento foi turbulento supercrítico, com exceção da primeira Q aplicada, onde o regime foi laminar subcrítico, para o PDC, graças à presença de resíduos culturais, e laminar supercrítico, para os demais tratamentos. A consolidação e a cobertura do solo alteram o regime do escoamento e reduzem a erosão em sulcos e seus efeitos são complementares.

Termos de indexação: erodibilidade em sulcos, plantio direto, tamanho de sedimento, perda de solo e água, hidrologia do solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Pesquisa parcialmente financiada com recursos da FAPERGS e do Pronex-CNPq/FINEP. Recebido para publicação em novembro de 1999 e aprovado em janeiro de 2001.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, MSc. Rua 5 de Março, 83. CEP 97110-000 Santa Maria (RS).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Pesquisador do CNPq. E-mail: reichert@ccr.ufsm.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Pesquisador do CNPq.

SUMMARY: *RILL EROSION UNDER DIFFERENT SOIL TILLAGE METHODS AND SOIL CONSOLIDATION*

Soil tillage and consolidation modify soil resistance to rill erosion. Thus, an experiment was carried out on a Hapludalf, under field conditions in 1997/98, to study rill erosion under different tillage methods and soil consolidation, to evaluate the sediment size and to determine rill erodibility (K_r) and critical shear stress (τ_c). The experiment was completely randomized with six replications, using the following treatments: recent conventional tillage (RCT), two-month consolidated conventional tillage (CCT), no-tillage with mulch (NTM) with 94% surface coverage with crop residues, and no-tillage with a bare soil surface (NTB). A constant simulated rainfall of 65 mm h^{-1} was applied until a steady-state runoff rate was reached. Afterwards, extra inflows were applied at rates ranging from $0.0002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ to $0.0010 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, for RCT and CCT, and from $0.0004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ to $0.0020 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The plots (0.2 m wide by 6.0 m long) were confined by metal borders along the slope. The K_r was $0.012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ and τ_c was 2.61 N m^{-2} . Soil detachment, soil loss and sediment size had the following order RCT, CCT, NTM and NTB, particularly for the higher flows. Flow regime was turbulent and supercritical, except for the lowest inflow, where the flow was laminar and subcritical for NTM, due to the mulch, and supercritical laminar for the remaining treatments. Soil consolidation and surface coverage modify flow regime and reduce erosion, and their effects are complementary.

Index terms: rill erodibility, no-tillage, sediment size, soil and water losses, soil hydrology.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo é causada por agentes erosivos, como a precipitação pluvial e o escoamento superficial, e consiste do destacamento, transporte e deposição de partículas do solo. No processo de erosão em sulcos, o agente responsável pela desagregação e transporte dos sedimentos em sulcos é o escoamento concentrado (Meyer et al., 1975; Foster, 1982). A desagregação ocorre por ação das forças de cisalhamento atuantes no contorno sólido (interface água-superfície do solo), sendo o transporte dos sedimentos influenciado pela descarga líquida e pela velocidade do escoamento (Foster, 1982).

A erosão em sulcos ocorre somente quando as forças de cisalhamento do escoamento superam as forças coesivas do solo, momento em que ocorre a tensão crítica de cisalhamento (Foster, 1982). Portanto, a erosão em sulcos é uma resultante da interação da capacidade do escoamento em erodir e a capacidade do solo em resistir às forças de desagregação e transporte pela água. Nearing et al. (1991) observaram que a taxa de desagregação dos solos foi adequadamente descrita pela tensão cisalhante (τ) ou pela potência (Ω) do escoamento. Entretanto, em algumas situações, Ω pode ser um melhor estimador da desagregação em sulcos que τ (Elliot & Laflen, 1993). A potência do escoamento é a quantidade de energia do escoamento por unidade de tempo e de área (Bagnold, 1977).

A erodibilidade em sulcos (K_r) de um solo é representada pela susceptibilidade à desagregação pelo escoamento superficial concentrado. O solo pode ser mais ou menos erodível, conforme suas características físicas, químicas e mineralógicas, e a erosão muito afetada pelo preparo do solo (Foster, 1982).

O revolvimento aumenta a susceptibilidade à erosão e reduz a tensão crítica de cisalhamento do solo, enquanto a consolidação do solo produz um efeito inverso (Foster, 1982). No contexto agrícola, a consolidação é definida como um aumento na estabilidade estrutural do solo, proveniente da tensão efetiva (compressão) induzida pelo potencial matricial durante a redistribuição da água no solo após a chuva (Nearing et al., 1988b). Essa consolidação altera as propriedades do solo durante o ano, tais como: densidade e porosidade do solo, retenção e infiltração de água, assim como a susceptibilidade à erosão e tensão crítica de cisalhamento do solo (Nearing et al., 1988a).

Vários pesquisadores (Cogo et al., 1984; Brown & Norton, 1990; West et al., 1991; Norton & Brown, 1992) documentaram os benefícios da cobertura vegetal na redução da desagregação do solo em métodos conservacionistas. Manter os resíduos na superfície do solo por vários anos em sistema plantio direto apresenta grandes vantagens, como a redução do impacto da gota de chuva e selamento/encrostramento superficial (Alves & Cabeda, 1999; Barcelos et al., 1999), e diminuição da desagregação

do solo e transporte dos sedimentos (Cogo et al., 1984; Alves et al., 1995; Bertol et al., 1997).

Os resíduos na superfície do solo reduzem a tensão cisalhante do escoamento que atua sobre o solo, pois essa tensão passa a ser dividida entre os resíduos presentes e o próprio solo (Foster, 1982). Entretanto, os resíduos vegetais soltos na superfície do solo são eficientes na erosão em sulcos somente até o momento em que o escoamento formado conseguir transportá-los, havendo falha dos resíduos decorrentes de grandes declives ou grandes escoamentos de água ou da formação de sulco sob os resíduos (Bertol et al., 1997). Em um experimento de campo, estudando os efeitos da erosão em sulcos sobre a consolidação do solo e resíduos incorporados, Brown et al. (1990) observaram uma desagregação duas vezes maior no tratamento com solo preparado recentemente em relação ao consolidado durante um ano.

Valores para a erodibilidade em sulcos (K_r) e para a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) para trinta e seis solos foram determinados experimentalmente por Elliot et al. (1989) nos Estados Unidos. O parâmetro mais importante na regressão para prever o K_r foi a matéria orgânica seguida pelo parâmetro textural M . No Brasil, poucos estudos experimentais no campo têm adotado o modelo WEPP (Giasson & Cassol, 1996; Braida & Cassol, 1996), sendo insuficientes para estabelecer relações entre K_r e τ_c com propriedades dos solos. Outrossim, estudos sobre processos e mecânica da erosão do solo usando princípios e modelos fundamentais de erosão são também poucos. A contribuição da consolidação do solo, isolada ou conjuntamente com a cobertura morta, na redução da erosão do solo não está totalmente estabelecida.

Assim, os objetivos deste experimento foram: (a) quantificar a erodibilidade em sulcos (K_r) e a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c), (b) determinar parâmetros da erosão e do escoamento em sulcos em diferentes sistemas de manejo e consolidação do solo, e (c) avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo e consolidação do solo no diâmetro mediano dos sedimentos transportados em sulcos.

MATERIAL E MÉTODOS

Tratamentos e aplicação das chuvas e descargas líquidas

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), no verão de 1997/98. O solo estudado foi um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 1999) da unidade de mapeamento São Pedro.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e seis repetições.

Os tratamentos foram: preparo convencional recente (CR), preparo convencional consolidado (CC, consolidação por dois meses), plantio direto sem presença de palha (PDS, palha removida) e plantio direto com presença de palha (PDC, com 94% de cobertura do solo). Algumas características do solo, detalhes do histórico da área e estabelecimento dos tratamentos encontram-se em Schäfer et al. (2001).

As parcelas de erosão foram delimitadas por chapas metálicas galvanizadas cravadas no solo, que continham, na parte inferior, uma calha coletora para a amostragem do escoamento. Com a delimitação dos canais com as chapas metálicas (King, 1992), conseguiu-se escoamento concentrado sem necessidade de pré-formação de sulcos (Foster et al., 1984; Giasson & Cassol, 1996). As dimensões das parcelas de erosão foram de 0,20 m de largura e 6,00 m de comprimento, ficando a maior dimensão no sentido do maior declive.

As chuvas foram aplicadas com um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes (Norton & Brown, 1992), instalado a uma altura de 2,45 m da superfície do solo e com pressão de saída da água nos bicos mantida em 41,4 kPa. A chuva de 65 mm h⁻¹ foi aplicada durante o tempo necessário para levar o solo a escoamento aproximadamente constante. Esse tempo variou entre 30 e 50 min, dependendo da umidade inicial do solo. A intensidade de chuva efetiva foi monitorada com o auxílio de pluviômetros instalados ao lado da parcela de erosão.

Imediatamente após a chuva, para simular diferentes taxas de escoamento ou descargas líquidas (Q), foram adicionadas vazões extras de 0,0002; 0,0004; 0,0006; 0,0008 e 0,0010 m³ s⁻¹, para os tratamentos CR e CC, e de 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016 e 0,0020 m³ s⁻¹, para os tratamentos PDS e PDC. As referidas Q foram medidas com um rotâmetro. As coletas de escoamento foram realizadas com o auxílio de uma calha colocada na porção inferior de cada sulco.

Durante a chuva, foram coletadas amostras de escoamento de 10 em 10 min e cada pote permaneceu o tempo suficiente para encher. Ao final de cada chuva, foi coletada uma amostra em balde de três litros para determinação do tamanho de sedimentos erodidos e medida a temperatura da água para cálculos hidráulicos. Os recipientes utilizados na captação foram potes plásticos com capacidade de um litro.

Por ocasião da aplicação da descarga líquida extra, foram coletadas três amostras do escoamento com potes de um litro por descarga, para determinar as perdas de água, solo, infiltração e concentração de sedimento, e uma ao final de cada descarga, em balde de três litros, para determinar o tamanho de sedimento erodido. Cada descarga permaneceu no sulco o tempo estritamente necessário (aproximadamente 3 min) para estabilizar o escoamento em cada descarga e coletar as amostras, medir a profundidade do

escoamento e determinar a velocidade do escoamento. Imediatamente após, adicionou-se outra descarga no mesmo sulco. O tempo de coleta de cada amostra foi cronometrado.

Determinações e cálculos de parâmetros de erosão

As amostras de escoamento coletadas no campo foram levadas ao laboratório e pesadas para determinar o teor de solo e água. As amostras coletadas em baldes no final de cada chuva foram peneiradas em água para medir o tamanho de sedimentos erodidos pelos parâmetros diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro mediano (D_{50}), conforme procedimentos descritos em Schäfer et al. (2001).

A taxa de desagregação (D_r , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi calculada por: $D_r = \text{descarga sólida (kg s}^{-1})/\text{área total (m}^2)$ do sulco. A área do sulco (A) foi obtida multiplicando-se a largura do escoamento, medida no campo, pelo comprimento do canal, que foi de 5,90 m. A descarga sólida (q_s) foi encontrada pela fórmula: $q_s = Q C$, sendo: $Q = \text{descarga líquida (m}^3 \text{s}^{-1})$ e $C = \text{concentração de sedimento (kg m}^{-3})$; $Q = \text{massa de água (kg)/tempo (s)}$ e $C = \text{massa de solo (kg)/volume de água (m}^3)$.

A área da seção transversal do escoamento (A, m^2) foi calculada por: $A = Q/V_m$ ($Q = \text{descarga líquida (m}^3 \text{s}^{-1})$ e $V_m = \text{velocidade média do escoamento (m s}^{-1})$). A velocidade média do escoamento (V_m , m s^{-1}) foi obtida por: $V_m = \text{velocidade na superfície do escoamento multiplicado por 0,74 (King, 1992)}$, que é o fator de correção atribuído à diminuição da velocidade com a profundidade do escoamento decorrente do atrito com o solo. A velocidade na superfície do escoamento foi determinada com o uso de uma solução traçadora de azul de metileno.

A tensão de cisalhamento do escoamento (τ , N m^{-2}) foi obtida pela equação: $\tau = Rh S \gamma$, enquanto a potência do escoamento (Ω , $\text{N m}^{-1} \text{s}^{-1}$) foi calculada pela fórmula: $\Omega = \gamma Q S$, em que: $Rh = \text{raio hidráulico (m)}$, $S = \text{declividade do sulco (m m}^{-1})$, $\gamma = \text{peso específico da água (N m}^{-3})$ e $Q = \text{descarga líquida (m}^3 \text{s}^{-1})$. O raio hidráulico (Rh) foi calculado pela fórmula: $Rh = A/\text{perímetro molhado}$. A largura e a profundidade do escoamento foram determinadas com o auxílio de uma régua. A altura foi medida entre um ponto fixo acima do escoamento e a superfície do escoamento de água.

A tensão cisalhante do escoamento no sulco, quando existe presença de resíduos culturais, não é exercida toda diretamente sobre o solo, pois parte dela é dissipada sobre o resíduo. Calculando a diferença entre a perda de carga no PDC e a do PDS, que apresentava as mesmas condições de solo mas sem a presença dos resíduos culturais na superfície, obteve-se a tensão exercida sobre a palha. Para o cálculo da tensão cisalhante exercida somente no

solo, usou-se a expressão $\tau_{\text{solo}} = \tau_{\text{total}} (f_{\text{no solo}}/f_{\text{total}})$ (Foster, 1982; King, 1992), em que: $\tau_{\text{solo}} = \text{tensão cisalhante do escoamento exclusivamente sobre o solo sem a palha no PDC}$; $f_{\text{no solo}} = \text{perda de carga no PDS}$; $f_{\text{total}} = \text{perda de carga total no PDC na presença da palha}$ e $\tau_{\text{total}} = \text{tensão cisalhante sobre o solo e palha no PDC}$.

O fator perda de carga de Darcy-Weisbach (f), o número de Reynolds (Re) e o número de Froude (F) foram calculados conforme Chow (1959). O f é um fator que descreve a resistência ao escoamento, o Re é um índice de turbulência do escoamento e o F indica se há formação de ondas gravitacionais (Chow, 1959) e são todos adimensionais.

A erodibilidade em sulcos (K_r) e a tensão crítica de cisalhamento (c) foram calculadas pela equação: $D_r = K_r (\tau - \tau_c)$, sendo: $D_r = \text{taxa de desagregação do solo em sulcos (kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$, $K_r = \text{erodibilidade do solo em sulcos (kg N}^{-1} \text{s}^{-1})$, $\tau = \text{tensão cisalhante do escoamento (N m}^{-2})$ e $\tau_c = \text{tensão crítica de cisalhamento (N m}^{-2})$ (Foster, 1982). Para que essa equação possa ser usada na determinação da D_r , a relação D_r/D_c deve tender à unidade (Elliot, 1988; King, 1992). Isso ocorre quando a carga de sedimento (G) no escoamento é muito pequena se comparada com a capacidade de transporte (T_c) do escoamento, podendo-se assumir que o sedimento em transporte não reduz a desagregação (Elliot, 1988).

Alternativamente, expressou-se a equação anterior como $D_r = K_{r\Omega} (\Omega - \Omega_c)$, em que: $\Omega = \text{potência do escoamento (N m}^{-1} \text{s}^{-1})$, $\Omega_c = \text{potência crítica do escoamento (N m}^{-1} \text{s}^{-1})$ e $K_{r\Omega} = \text{parâmetro de erodibilidade em sulcos (kg N}^{-1} \text{m}^{-1})$, calculado com base na desagregação do solo e da potência do escoamento (Elliot, 1988; King, 1992; Elliot & Lafren, 1993).

Para calcular a carga de sedimento (G , $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), dividiu-se a descarga sólida (kg s^{-1}) pela largura do escoamento (m) em cada descarga. A capacidade de transporte (T_c , $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) do escoamento foi estimada pela equação de Yalin (Julien, 1988), conforme procedimentos relatados por Elliot (1988).

Para analisar os dados qualitativos, usaram-se a análise de variância e o teste de médias (Duncan 5%) e, para os dados quantitativos, realizou-se a análise de regressão para ajuste de equações lineares e não-lineares, usando o pacote estatístico SAS (SAS Institute, 1988).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Chuva simulada

A menor descarga líquida constante (Q_c) (Quadro 1) durante a chuva ocorreu no solo preparado e com dois meses de consolidação (CC),

Quadro 1. Descarga líquida constante (Q_c), descarga sólida constante (qs_c) e concentração constante de sedimento (C_c), considerando os diferentes preparos do solo e consolidação durante a chuva simulada de 65 mm h⁻¹

Tratamento	Q_c m ³ s ⁻¹	qs_c kg s ⁻¹	C_c kg m ⁻³
Convencional recente (CR)	0,000015 a	0,000218 a	14,78 a
Convencional consolidado (CC)	0,000011 b	0,000153 ab	12,96 a
Plantio direto sem palha (PDS)	0,000015 a	0,000104 b	7,23 b
Plantio direto com palha (PDC)	0,000015 a	0,000010 c	0,64 c

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste de Duncan a 5%.

não havendo redução na Q_c com o sistema plantio direto com (PDC) ou sem (PDS) cobertura em relação ao preparo convencional recente (CR). Em contraste, Cassol & Lima (1998) verificaram uma redução de 53% na taxa de descarga líquida do plantio direto, indicando que a hidrologia do solo sob plantio direto depende da qualidade do espaço poroso do solo. A menor Q_c em sulcos no tratamento CC está em consonância com a baixa taxa constante de escoamento de água em entressulcos, obtida para esse tratamento (Schäfer et al., 2001).

A descarga sólida (qs) e a concentração de sedimentos (C) constante foram as menores no tratamento com cobertura vegetal (PDC), graças à interceptação das gotas da chuva e dissipação da sua energia cinética, e maiores no CR e CC, graças ao impacto das gotas de chuva na superfície sem cobertura e recentemente revolvida, sem expressar-se o efeito da consolidação do solo.

A concentração constante de sedimento (C_c) no escoamento (Quadro 1) reflete as quantidades de solo transportadas quando o escoamento se estabilizou. As maiores C_c ocorreram no CR e no CC, enquanto a menor C_c ocorreu no PDC considerando as baixas taxas de desagregação do solo e do transporte de sedimento, resultantes da proteção da cobertura pelos resíduos vegetais e associadas à resistência conferida pelos processos de consolidação e agregação do solo.

O menor diâmetro médio geométrico (DMG) e mediano (D_{50}) dos sedimentos erodidos pelo escoamento decorrente da chuva (Quadro 2) ocorreu no PDC, indicando serem os solos com adequada agregação e cobertura vegetal mais resistentes à erosão e serem os sedimentos de menor tamanho transportados. Comparando somente os solos preparados convencionalmente, o DMG e o D_{50} foram menores no CR que no CC, no qual a consolidação aumentou a estabilidade de agregados do solo (Schäfer et al., 2001), aumentando a sua resistência ao impacto das gotas da chuva.

Quadro 2. Diâmetro médio geométrico (DMG) e mediano (D_{50}) dos sedimentos no escoamento coletado durante o período da chuva nos sulcos, considerando os diferentes sistemas de preparo do solo e consolidação

Tratamento	DMG	D_{50}
	mm	
Convencional recente (CR)	0,12 b	0,07 b
Convencional consolidado (CC)	0,21 a	0,11 a
Plantio direto sem palha (PDS)	0,10 b	0,11 a
Plantio direto com palha (PDC)	0,05 c	0,06 b

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste de Duncan a 5%.

Descargas líquidas extras aplicadas no sulco

Com a descarga líquida (vazão) extra aplicada no sulco, no tratamento CR, as descargas sólidas (qs) e as taxas de desagregação (Dr) foram crescentes até à descarga mais alta, com elevada concentração de sedimentos no escoamento (Figura 1). No CC e PDS, as curvas para taxa de desagregação e concentração de sedimento tiveram um ponto de máxima e um decréscimo posterior.

Esse fato parece estar relacionado com a existência de uma camada superficial mais erodível (correspondente à profundidade de preparo do solo), a qual é removida por escoamentos mais intensos, e de uma camada subjacente mais compactada (Foster, 1982), decorrente do não-revolvimento com pé-de-arado, que resiste ao destacamento de partículas de solo. No PDC, a taxa de desagregação (Dr) com a descarga líquida (Q) foi significativa, porém com pequeno incremento da Dr com a Q , considerando a cobertura do solo proporcionada pelos resíduos vegetais, a consolidação e a agregação que reduziram a desagregação e as perdas de solo.

Em estudos similares, Norton & Brown (1992) encontraram que a consolidação reduziu em 72% a erosão em sulcos em dois solos (franco-siltoso e argilo-siltoso) consolidados por até oito anos, comparados aos recém-preparados, mas não houve diferença entre os solos consolidados por diferentes durações. Brown & Norton (1994) encontraram reduções de 88% na perda de solo, devidas à consolidação de oito anos, e mais 4%, à cobertura (45%) de um solo franco-siltoso consolidado.

A concentração de sedimento (C) (Figura 1), similarmente à descarga sólida e taxa de desagregação, para todas as descargas líquidas (Q), foi sempre maior no CR em relação à dos demais tratamentos. No tratamento CC, a C teve uma relação parabólica com o tempo de chuva, atingindo

um valor máximo na segunda Q aplicada e diminuindo posteriormente. Esse comportamento deveu-se, provavelmente, ao fato de ter o escoamento atingido uma camada de solo com maior resistência ao cisalhamento e, portanto, ser menos erodível, produzindo menor perda de solo e menor concentração de sedimento para determinada taxa de escoamento. Para os tratamentos PDS e PDC, praticamente não houve incremento na concentração de sedimento com o aumento na descarga líquida, em virtude da elevada consolidação e estruturação nos dois solos e da presença de cobertura no segundo solo.

Em síntese, a descarga sólida, a desagregação e a concentração de sedimento foram maiores no CR, intermediárias no CC e PDS, e menores no PDC,

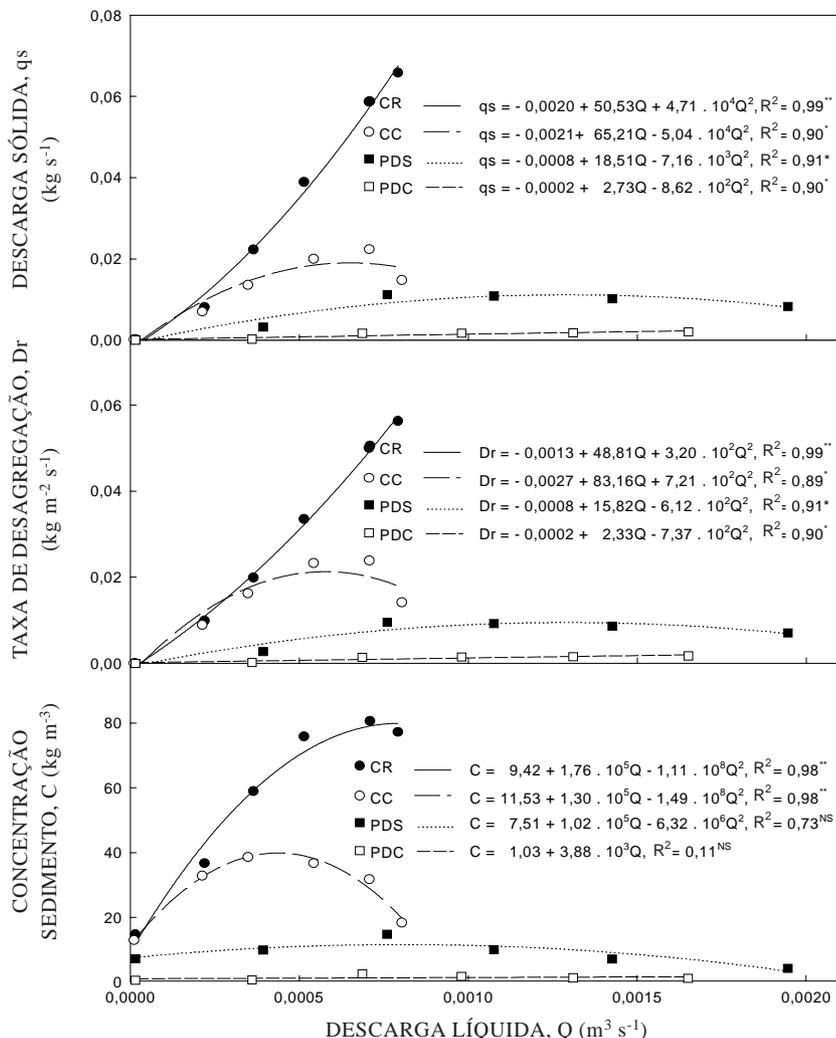


Figura 1. Descarga sólida (qs), taxa de desagregação em sulcos (Dr), concentração de sedimento (C) e descarga líquida (Q), considerando diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha). ** = significativo (P < 0,01); * = significativo (P < 0,05); NS = não-significativo.

estando relacionadas com a consolidação, agregação e cobertura do solo. Similarmente, King (1992) encontrou a seguinte seqüência decrescente na concentração de sedimentos em sulcos: preparo convencional recente, preparo convencional consolidado por pouco tempo, sistema plantio direto sem cobertura e plantio direto com cobertura.

O fator perda de carga (f) no PDC diminuiu exponencialmente com o aumento na descarga líquida (Q). Dos fatores de resistência no escoamento superficial, o f parece ser o melhor (Abrahams et al., 1986), o qual descreve perdas de carga resultantes de forças de cisalhamento do fluido com os resíduos vegetais e com a superfície do solo. Entre a segunda e a terceira Q (Quadro 3, Figura 2), o resíduo não foi mais responsável por essa perda (Quadro 3), pois foi

suspenso e transportado para fora da parcela, semelhantemente ao observado por Foster (1982). Entretanto, o fato de a perda de carga no resíduo não chegar a zero significa que o resíduo poderia estar suspenso, mas não removido da parcela, atuando como um conjunto entrelaçado e preso ao solo (King, 1992). Nos demais tratamentos, não houve uma relação clara e significativa entre f e Q .

O escoamento foi turbulento (Re maior que 2000), exceto nas descargas líquidas (Q) até $0,0004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, onde o escoamento foi transicional (Re entre 500 e 2000). A relação entre Re e Q foi linear (Figura 2). Graças à turbulência, o escoamento apresentou grande capacidade de provocar erosão.

O número de Froude (F) (Figura 2) indica que, apenas na primeira descarga no PDC com presença

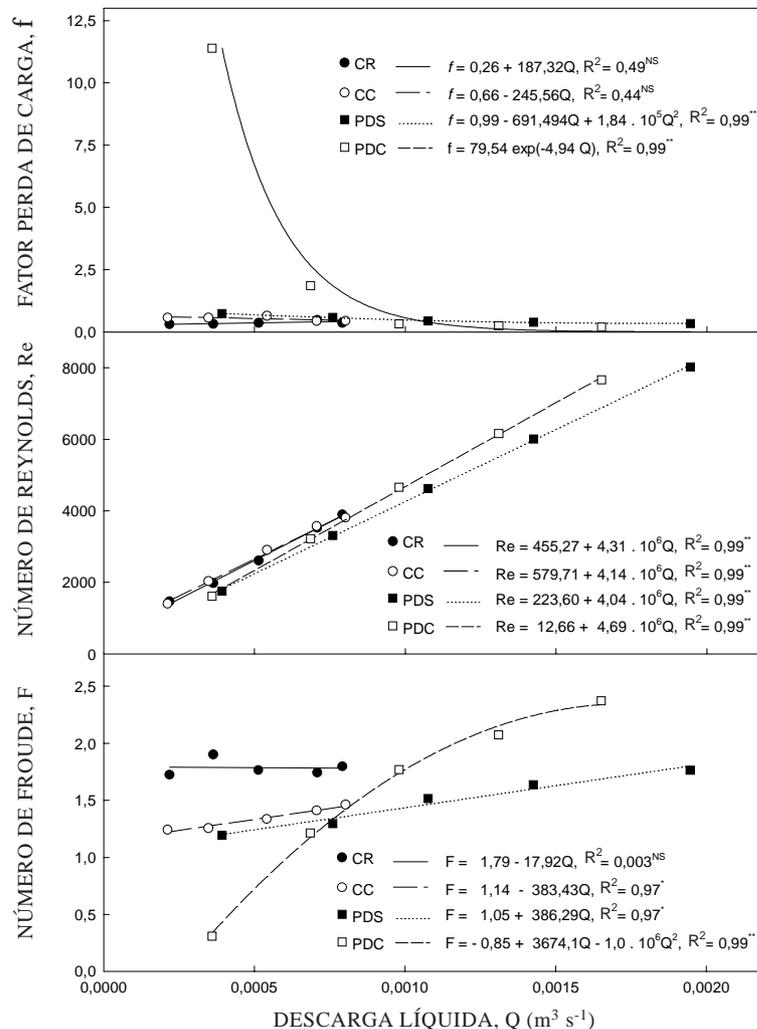


Figura 2. Fator perda de carga (f), número de Reynolds (Re) e de Froude (F) e descarga líquida (Q), considerando diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha). ** = significativo ($P < 0,01$); * = significativo ($P < 0,05$); NS = não-significativo.

Quadro 3. Fator perda de carga (f) e tensão cisalhante (t) do escoamento determinado para os tratamentos com sistema plantio direto

Descarga líquida	f_{total} PDS ⁽¹⁾	f_{solo} PDC	$f_{resíduo}$ PDC	τ_{total} PDC	τ_{solo} PDC
$m^3 s^{-1}$				————— $N m^{-2}$ —————	
0,0004	11,39	0,74	10,65	6,32	0,41
0,0008	1,86	0,58	1,28	9,51	2,97
0,0012	0,33	0,43	0 ⁽²⁾	11,03	11,03 ⁽²⁾
0,0016	0,24	0,39	0	12,66	12,66
0,0020	0,20	0,34	0	14,77	14,77

⁽¹⁾ PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha. ⁽²⁾ Quando $f_{total} < f_{solo}$, considerou-se $f_{resíduo} = 0$ e $\tau_{total} = \tau_{solo}$.

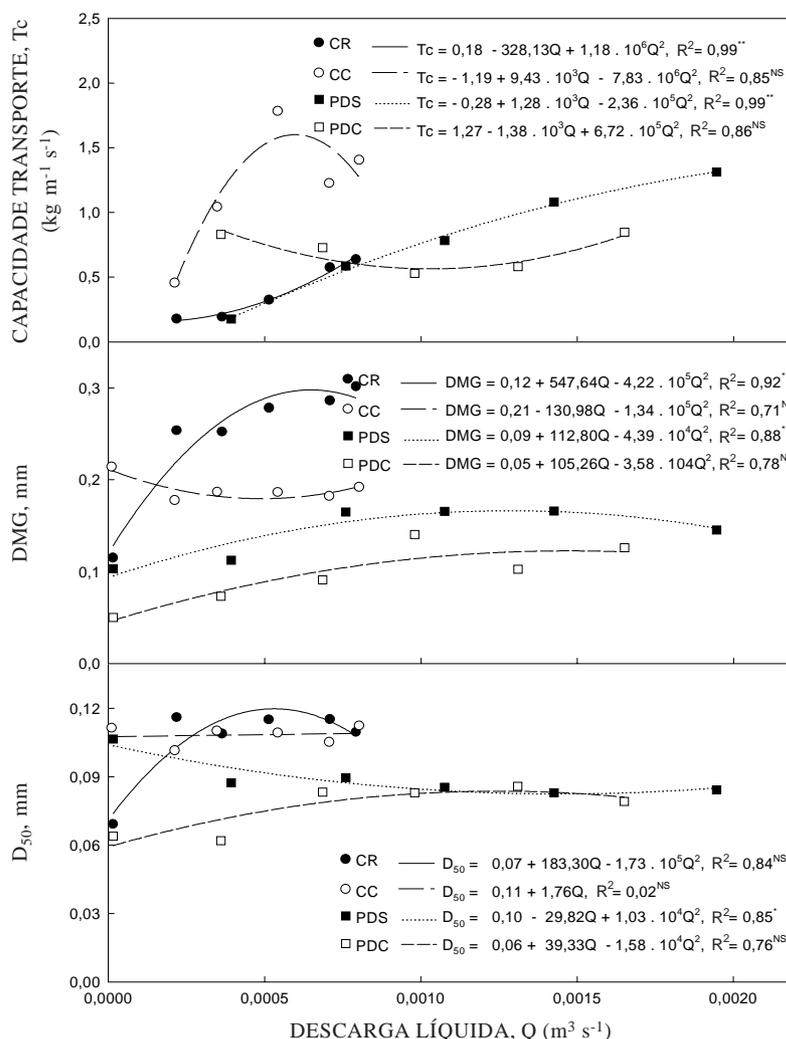


Figura 3. Capacidade de transporte de sedimento (T_c), diâmetro médio geométrico (DMG) e mediano (D_{50}) de sedimentos erodidos e descarga líquida (Q), considerando diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha). ** = significativo ($P < 0,01$); * = significativo ($P < 0,05$); NS = não-significativo.

de resíduos culturais, o escoamento se comportou como subcrítico, ou seja, tranqüilo sem formação de ondas (Morgan, 1995), enquanto, nas demais descargas no PDC, o regime passou a ser supercrítico em decorrência do aumento do escoamento e da remoção do resíduo. Nos demais tratamentos, o escoamento foi sempre supercrítico, indicando maior capacidade em provocar erosão.

A capacidade de transporte de sedimento (Tc) foi crescente com o incremento das descargas líquidas (Q) em todos os tratamentos (Figura 3), com exceção do PDC que apresentou um mínimo no momento da falha do resíduo, com um subsequente incremento. A relação G/Tc (carga de sedimento/capacidade de transporte) foi pequena, sendo de 0,022, para o CR; de 0,008, para o CC; de 0,010, para o PDS, e de 0,0005, para o PDC. Nesse caso, segundo (Elliot, 1988), o sedimento em transporte não reduziu a desagregação do solo.

A presença dos restos culturais sobre a superfície do solo no PDC proporcionou uma expressiva diminuição do DMG e D₅₀ dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial nas diferentes descargas líquidas (Q) (Figura 3). Com exceção do CC, que teve um pequeno decréscimo

inicial no tamanho do sedimento provavelmente devido ao arraste de partículas soltas na superfície, o D₅₀ e o DMG aumentaram com o incremento da Q, até determinado valor, diminuindo posteriormente. Nos tratamentos PDC e PDS, houve pequeno aumento no DMG e D₅₀, tendendo a estabilizar-se nas maiores Q.

Com o incremento da Q, houve aumento na velocidade do escoamento e foram transportados sedimentos com maior tamanho, pois havia partículas separadas da massa do solo e disponíveis ao transporte. Quando todos os sedimentos separados da massa já haviam sido transportados, o escoamento possivelmente dissipou mais energia para desagregar sedimentos e transportá-los, diminuindo o diâmetro dos sedimentos erosionados.

A tensão cisalhante (τ) e a potência (Ω) do escoamento apresentaram relação linear com a Q em todos os tratamentos (Figura 4). As equações de regressão linear entre Ω e Q, para os diferentes tratamentos, foram praticamente paralelas e sobrepostas.

A tensão cisalhante representa uma média da tensão exercida na superfície do solo, pressupondo-

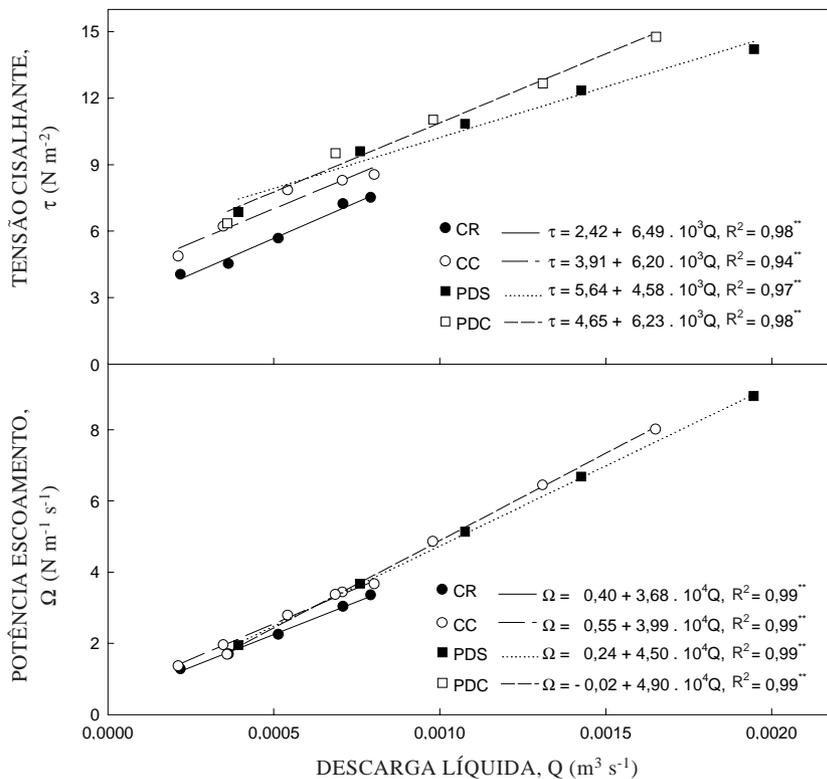


Figura 4. Tensão cisalhante (τ) e potência (Ω) do escoamento da descarga líquida (Q), considerando diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha; τ e Ω atuantes no solo e no resíduo). ** = significativo (P < 0,01).

se o escoamento uniforme em toda a seção transversal do sulco; entretanto, isso não é correto dadas as variações no escoamento (Foster et al., 1984). Além disso, a quantificação da tensão cisalhante depende tanto da medição do raio hidráulico como da profundidade do sulco, que, no campo, são de difícil medição. Por essa razão, alguns autores (Bagnold, 1977; Nearing et al., 1991; Elliot & Laflen, 1993) sugeriram usar a potência do escoamento em modelos de erosão, determinada com base na descarga sólida e declividade. Assim, neste trabalho, calcularam-se os dois parâmetros.

O valor de K_r determinado para este solo foi de $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e o τ_c foi de $2,61 \text{ N m}^{-2}$ (Figura 5). Esses valores situam-se dentro dos limites de K_r de $0,0006$ a $0,0453 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e de τ_c de $0,4$ a $6,6 \text{ N m}^{-2}$ encontrados por Elliot et al. (1989) para solos dos Estados Unidos. No Brasil, Braida & Cassol (1996) determinaram um K_r ($0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$) semelhante e um τ_c ($4,81 \text{ N m}^{-2}$) maior para um Podzólico

Vermelho-Escuro franco arenoso de textura similar ao solo deste estudo, enquanto Giasson & Cassol (1996) quantificaram um K_r de $0,0077 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e τ_c de $1,13 \text{ N m}^{-2}$ para um Plintossolo franco-argilo-arenoso com teor de argila maior que o dos solos brasileiros supracitados. Esses resultados locais são ainda insuficientes para estabelecer uma relação entre os dois parâmetros de erosão em sulcos (K_r e τ_c) com propriedades do solo.

Considerando a potência do escoamento, o valor do parâmetro erodibilidade $K_{r\Omega}$ foi de $0,027 \text{ kg N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ e a potência crítica do escoamento Ω_c foi de $0,95 \text{ N m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Figura 5). Em relação à tensão cisalhante, a potência do escoamento ajustou-se melhor aos dados de desagregação.

O cálculo dos parâmetros erodibilidade e tensão cisalhante crítica para solos consolidados e com palha deve ser evitado. Vários estudos mostraram que desagregação não se correlacionou com tensão

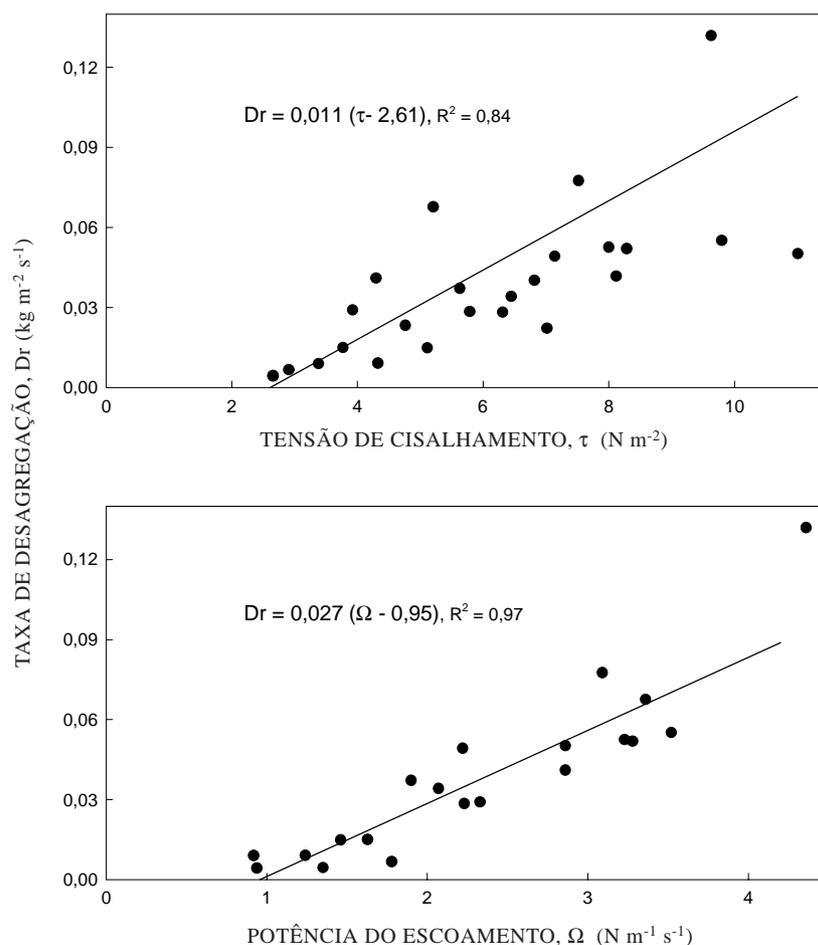


Figura 5. Relações entre taxa de desagregação (D_r) com tensão cisalhante (τ) e potência (Ω) do escoamento para o tratamento convencional recente. Usaram-se somente as repetições cujo valores críticos de tensão cisalhante ou potência do escoamento foram positivos.

cisalhante em solos consolidados ou com palha na superfície, obtendo valores inconsistentes, como t_c negativo, ou grande variabilidade e baixo coeficiente de correlação (Brown et al., 1990; Norton & Brown, 1992; Brown & Norton, 1994), semelhantemente ao observado neste trabalho, embora possam haver exceções (Franti et al., 1985; King, 1992).

CONCLUSÕES

1. Para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico estudado, o valor básico da erodibilidade em sulcos (K_r) foi de $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) foi de $2,61 \text{ N m}^{-2}$. Esses valores podem ser utilizados em modelos físicos que separam a erosão em sulcos e em entressulcos.

2. A perda de solo, as taxas de desagregação em sulcos e o diâmetro mediano do sedimento erosionado em sulcos foram afetados pelo preparo e consolidação de solo, sendo mais intensos nos preparos convencionais (convencional recente e convencional com dois meses de consolidação) do que no plantio direto (tanto com palha quanto sem palha).

3. A consolidação e o preparo do solo não influenciaram no regime do escoamento nos sulcos, o qual foi turbulento supercrítico, com exceção da menor descarga líquida aplicada, onde o regime de escoamento foi laminar subcrítico, para o plantio direto com palha, e laminar supercrítico, para os demais tratamentos.

AGRADECIMENTOS

Aos bolsistas de iniciação científica Márcio José Silveira, Celso Gonçalves, Emerson Varlei Wohlemberg e Márcio Conceição, pelo auxílio nos trabalhos de campo e de laboratório.

LITERATURA CITADA

- ABRAHAM, A.D.; PARSON, A.J. & LUK, S.H. Resistance to overland flow on desert hillslopes. *J. Hydrol.*, 88:343-363, 1986.
- ALVES, A.G.C.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Relações da erosão do solo com a persistência da cobertura vegetal morta. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:127-132, 1995.
- ALVES, M.C. & CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:753-761, 1999.
- BAGNOLD, R.A. Bed load transport by natural rivers. *Water Res. Res.*, 13:303-312, 1977.
- BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A. & DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:35-43, 1999.
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Comprimento crítico de declive em sistemas de preparos conservacionistas de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:139-148, 1997.
- BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos em um Podzólico Vermelho-Escuro franco-arenoso. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:127-134, 1996.
- BROWN, L.C. & NORTON, L.D. Soil erosion from ridge-tillage systems. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineering, 1990. (ASAE Paper 90-2563)
- BROWN, L.C. & NORTON, L.D. Surface residue effects on soil erosion from ridges of different soils and formation. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 37:1515-1524, 1994.
- BROWN, L.C.; WEST, L.T.; BEASLEY, D.B. & FOSTER, G.R. Rill erosion one year after incorporation of crop residue. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:1531-1540, 1990.
- CASSOL, E.A. & LIMA, V.S. Erosão em entressulcos em um Podzólico Vermelho-Amarelo do Rio Grande do Sul sob diferentes preparos do solo e manejo de resíduos culturais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12., Fortaleza, 1998. Fortaleza, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p.354-355.
- CHOW, V.T. Open-channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, 1959. 680p.
- COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 84:368-373, 1984.
- ELLIOT, W.J. & LAFLEN, J.M. A process-based rill erosion model. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 36:65-72, 1993.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M. & KOHL, K.D. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987;88. West Lafayette, The Ohio State University/USDA-Agricultural Research Service, 1989. p.A2-A25. (NSERL Report 3)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412p.
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HANN, C.T.; JOHNSON, H.P. & BRAKENSIEK, D.L., eds. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineering, 1982. p.297-380.
- FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F. & MEYER, L.D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 27:790-796, 1984.
- FRANTI, T.G.; LAFLEN, J.M. & WATSON, D.A. Soil erodibility and critical shear under concentrated flow. *Am. Soc. Agric. Eng. Paper*, 85-2033, 1985.

- GIASSON, E. & CASSOL, E.A. Relações da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um plintossolo franco-argiloarenoso. R. Bras. Ci. Solo, 20:117-125, 1996.
- KING, K.W. Comparison of rill erodibility parameters as influenced by no-till farming. West Lafayette, Purdue University, 1992. 98p. (Tese de Mestrado)
- MEYER, L.D.; FOSTER, G.R. & RÖMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: PRESENT and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington, USDA-Agricultural Research, 1975. p.177-189.
- MORGAN, R.P.C. Soil erosion & conservation. 2.ed. New York, Longman, 1995. 198p.
- NEARING, M.A.; BRADFORD, J.M. & PARKER, S.C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. Soil Sci. Soc. Am. J., 55:339-344, 1991.
- NEARING, M.A.; WEST, L.T. & BRADFORD, J.M. Consolidation of an unsaturated illitic clay soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 52:929-934, 1988a.
- NEARING, M.A.; WEST, L.T. & BROWN, L.C. A consolidation model for estimating changes in rill erodibility. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 31:696-700, 1988b.
- NORTON, L.D. & BROWN, L.C. Time-effect on water erosion for ridge tillage. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 35:473-478, 1992.
- SAS INSTITUTE. SAS/STAT users guide. Version 6.03. Cary, SAS Institute, 1988.
- SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:431-441, 2001.
- WEST, L.T.; MILLER, W.P.; LANGDALE, R.R.; BRUCE, R.R.; LAFLEN, J.M. & THOMAS, A.W. Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia Piedmont. Soil Sci. Soc. Am. J., 55:460-466, 1991.