

## Estimativa da Produção de Sedimentos em Estradas Rurais sob Condição de Chuva e Escoamento Simulados

Haline Depiné<sup>1</sup>, Adilson Pinheiro<sup>1</sup>, Vander Kaufmann<sup>1</sup>, Leandro Mazzuco de Aguida<sup>1</sup>,  
Nilza Maria dos Reis Castro<sup>2</sup>

hali\_ne@hotmail.com; pinheiro@furb.br; ambitec@bol.com.br; leandrom@tpa.com.br; nilza@iph.ufrgs.br

Recebido: 26/06/11 - revisado: 12/11/11 - aceito: 22/01/13

---

### RESUMO

Estradas rurais não pavimentadas podem constituir-se em importante fonte de geração de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Neste trabalho, foram simuladas as erosões dos solos provocadas pela precipitação e pelo escoamento superficial simulados em estradas rurais não pavimentadas. Foram obtidas erosões em parcela com escoamento distribuído e em canais com escoamentos concentrados. Nas parcelas, com 1 m<sup>2</sup>, implantadas em estradas rurais, no município de Lontras, SC, foi empregado um simulador de chuva e, no canal, foram gerados escoamentos com vazões controladas. Para os escoamentos, foram determinadas as características hidráulicas, como altura da lâmina de água, tensão de cisalhamento e potência do escoamento. Para os sedimentos, foram determinadas as concentrações em suspensão, as cargas em suspensão e de arraste e as composições granulométricas dos sedimentos transportados por arraste. As concentrações das erosões nas parcelas e nos canais foram da mesma ordem de grandeza. As cargas transportadas por arraste foram muito superiores àquelas transportadas em suspensão. No canal, foi obtido maior percentual de areia na composição dos sedimentos transportados. Na erosão laminar, a composição variou em função do tipo de estrada. O trabalho fornece elementos importantes para a modelagem de base física de processos erosivos.

**Palavras-chave:** erosão em estradas, simulação de chuva, transporte de sedimentos.

---

### INTRODUÇÃO

Em bacias com uso predominantemente agrícola, as erosões ocorrem em áreas com agricultura, pastagens, florestas e com estradas. Em geral, as estradas não são pavimentadas e podem ser uma fonte importante de produção e transporte de sedimentos da bacia (CORRÊA e DEDECEK, 2009). Para Elliot e Hall (1997), os três efeitos dominantes das estradas no ambiente são a alteração do escoamento superficial das bacias hidrográficas, a perda de massa e a erosão superficial. Esses efeitos podem afetar os componentes dos sistemas ambientais, em especial o meio biótico.

Bertolini *et al.* (1993) consideram que as estradas rurais são vias de acesso essenciais para as comunidades, pois é através delas que se dá o escoamento da produção agrícola, o transporte de matérias-primas e o acesso da população rural aos mercados e serviços essenciais. Baesso e Gonçalves

(2003) afirmam que estradas rurais consideradas adequadas são aquelas que possuem um desenho adequado da plataforma, sendo composta pela pista de rolamento, pela faixa lateral/acostamento e pela sarjeta, infra-estrutura de drenagem corrente (bueiros) e superficial, e revestimento primário em toda extensão com material de qualidade e com espessura suficiente para suportar o tráfego. Uma vez as estradas construídas fora dos padrões técnicos adequados muitas vezes podem ocasionar problemas graves relacionados à captação, à condução e ao deságue concentrado da enxurrada em determinados pontos do terreno, fatores esses que contribuem com o processo erosivo podendo influenciar na queda da produtividade, no assoreamento de cursos d'água e na perda de valores estéticos e paisagísticos (GONÇALVES, 2002). Segundo Arruda (1997), o principal agravante é que a maioria das estradas rurais é aberta pelos próprios proprietários das terras, baseando-se apenas em sua estrutura fundiária e nas facilidades do terreno. Uma vez que as estradas são construídas fora dos padrões técnicos adequados, muitas vezes as atividades de manutenção tendem a ser realizadas também sem critério e técnicas adequadas. Estradas mal planejadas funcionam co-

---

<sup>1</sup> Universidade Regional de Blumenau.

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

mo carreadores de sedimentos, tornando-se as principais fontes de erosão responsáveis pelo assoreamento de rios, deslizamentos e quedas de barreiras, interrupção de corredores naturais de dispersão e deslocamento de animais silvestres.

A erosão do solo é composta de três fases. A primeira é a da desagregação quando as partículas do solo são deslocadas pela energia do impacto das gotas de chuva ou pela tensão de cisalhamento produzida pela lâmina de água do escoamento superficial. A segunda é a do transporte das partículas desagregadas desde o ponto que sofrem o desprendimento até um local onde ocorre a deposição, que constitui a terceira fase. Esta terceira fase ocorre quando a carga de sedimentos transportados excede a sua capacidade de transporte do escoamento de água. O transporte pode ocorrer de forma distribuída em entre sulcos (CASSOL *et al.*, 2004) ou concentrada em sulcos ou canais (Cantalice *et al.*, 2005). Em estradas não pavimentadas, pode ainda ser considerada como fonte de produção de sedimentos a interface do rodado dos veículos e o leito da estrada e o movimento de terra advindo da manutenção das estradas.

Várias pesquisas contribuíram para o entendimento e avaliação da desagregação de solos em áreas rurais, incluindo-se áreas agrícolas, pastagens e florestas (OWOPUTI e STOLTE, 1995). As estradas com leito carroçável em terra podem contribuir com cargas significativas de sedimentos finos e grosseiros, e este leito em terra pode limitar a infiltração da água no solo, acarretando no acréscimo da taxa de produção de sedimentos na bacia (ZIEGLER e GIAMBELLUCA, 1997). Santos *et al.* (2000) mostraram que a cobertura vegetal, declividade do terreno, comprimento da rampa e intensidade da chuva influenciam na taxa de erosão laminar da superfície do solo.

Cao *et al.* (2009) mostram que as condições dos escoamentos nas estradas possibilitam a geração de taxa de erosão superior às das áreas agrícolas. Tuchy (1982) determinou que o volume de erosão antes da abertura de uma estrada florestal era de 30 kg ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, e durante o processo de construção da estrada, o volume erodido aumenta até cem vezes. Após a abertura e a posterior compactação da estrada, o volume erodido se estabilizou em 120 kg ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>.

Luce e Black (1999) propõem que em estradas de uso florestal, os sedimentos estão relacionados com outros fatores: comprimento de rampa, declividade, tipo de solo, cortes de taludes etc. Os autores observaram ainda que a produção de sedimentos em estradas cobertas com solos de textura

franco-argilosos foi cerca de nove vezes maior que o das estradas constituídas por solos com partículas maiores (solo pedregoso). Garcia *et al.* (2003) demonstraram que o volume escoado é mais afetado pelo comprimento do segmento enquanto a produção de sedimentos era mais influenciada pela declividade da rampa.

Segundo Silveira e Salvador (2000) o uso de chuvas naturais no desenvolvimento de pesquisas é oneroso e demorado. Por esse motivo, preconiza-se o uso de simuladores de chuva, que permitem controlar as características relativas à intensidade, duração e frequência da precipitação, mantendo as condições similares às da chuva natural.

O objetivo deste trabalho foi estimar a perda de solo em estradas rurais principais e de acesso às lavouras, através da produção de sedimentos devido à chuva e ao escoamento da água. A produção de sedimentos pela erosão laminar e em canais em parcelas instaladas em estradas rurais da bacia. As estradas rurais principais são utilizadas pela comunidade da bacia do Ribeirão Concórdia para tráfego de veículo, interligando propriedades, estas são mantidas pela prefeitura municipal, e servem como escoadouro da produção agropecuária. As estradas de acesso às lavouras são utilizadas unicamente pelos proprietários no seu processo produtivo.

## MATERIAL E MÉTODOS

As etapas deste trabalho compreendem a simulação de erosão em dois dispositivos experimentais implantados em estradas rurais, do tipo principal e de acesso às lavouras. Um dispositivo é constituído de parcela experimental, para simulação de erosão laminar superficial e o outro para simulação da erosão em canal. Foram aplicadas chuvas geradas com um simulador instalado sobre as estradas. A lâmina de água do escoamento no canal foi controlada pela vazão aplicada na entrada. Foram quantificados os sedimentos transportados em suspensão e por arraste.

As estradas rurais estão situadas na bacia do ribeirão Concórdia, localizada no município de Lontras, SC. A bacia situa-se entre as latitudes 49°31'00" e 49°27'00" e as longitudes de 27°12'00" e 27°09'30". A precipitação média anual é compreendida entre 1600 e 1800 mm, sem estação seca definida. Os solos predominantes desta bacia são Cambissolos e Argissolo Vermelho-Amarelo, este último, o tipo de solo no qual foi realizado o experimento.

Nas estradas principais da bacia do ribeirão Concórdia são realizadas obras para a sua manutenção constantemente. A atividade de manutenção limita-se a reposição do revestimento primário, e posterior reconformação da pista de rolamento, utilizando-se uma motoniveladora. Para a reposição do revestimento primário, a prefeitura municipal geralmente utiliza material proveniente de uma pedreira situada na região de Suíte Intrusiva Subida (SCHOENINGER, 2006), que é composta por rochas graníticas. Por outro lado, nas estradas de acesso, os proprietários rurais não desenvolvem ações específicas de manutenção e conservação.

### Dispositivos Experimentais

Para a estimativa de produção de sedimentos por erosão laminar, foram utilizadas parcelas de 1m<sup>2</sup> (Figura 1), implantadas em uma das bandas de tráfego do leito carroçável da estrada não pavimentada. A delimitação das parcelas foi realizada através do emprego de três chapas de aço galvanizado de 1 m de comprimento e 0,20 m de altura, acopladas a uma caixa coletora com 1 m de comprimento. As chapas foram cravadas no solo acerca de 0,05 m.

A caixa coletora foi construída com chapas de aço galvanizado, com largura de 0,20 m e altura de 0,12 m. Em um dos lados, foi realizada uma abertura, com altura de 0,05 m e 1 m de comprimento, por onde era coletado o escoamento superficial e os sedimentos transportados. A superfície a montante da caixa foi fechada e a jusante foi mantida aberta, de modo a permitir a medição da vazão pelo método volumétrico e a coleta de amostras de água e sedimento (Figura 1).

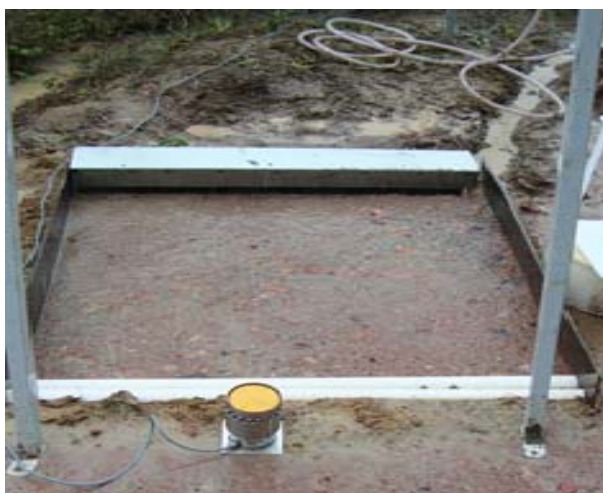


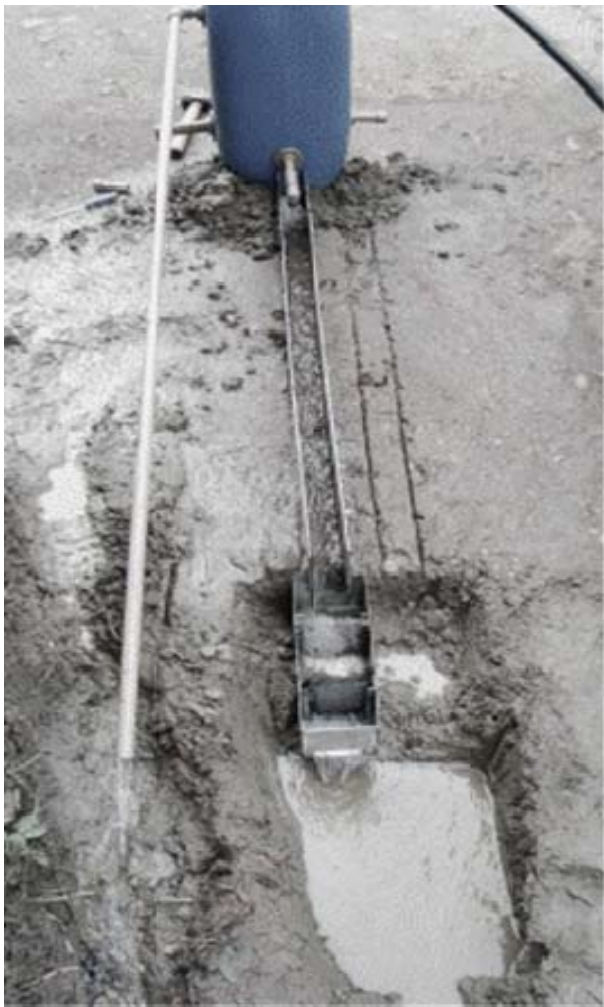
Figura 1 - Parcela experimental para erosão laminar

Sobre a parcela, foi instalado um simulador de chuva oscilatório, com bico aspersor, semelhante ao descrito por Meyer e Harmon (1979), localizado a 2,4 m acima da superfície do solo. Foi utilizado um bico tipo Veejet 80-100 e operado com pressão constante, aferida por meio de um manômetro. A altura de precipitação simulada foi medida com um pluviômetro Davis<sup>®</sup> colocado, ao acaso, ao lado da parcela. O pluviômetro é acoplado a um datalogger registrador Novus<sup>®</sup>, com aquisição dos dados em intervalos de 5 min. Além deste acompanhamento contínuo da chuva, no final da simulação, foi instalado sobre a parcela um tanque de alumínio. O tanque possui formato quadrado, com 1,10 m de lado, altura de 0,10 m e espessura da parede de 0,001 m. A coleta da precipitação ocorreu durante uma duração de 5 min. As alturas de chuva medidas com o pluviômetro e com o tanque foram comparadas, visando identificar eventuais erros.

Para a estimativa da produção de sedimentos em canais, foi construído um sistema coletor (Figura 2), semelhante ao apresentado por Gonçalves (2008), constituído por duas chapas de aço galvanizado, de 0,20 m de altura e 1,10 m de comprimento, uma caixa de coleta de 0,05 m de largura e 0,30 m de comprimento. A caixa de coleta foi posicionada na extremidade inferior do canal experimental.

Ela foi construída com chapas galvanizadas e dois sistemas de filtragem a fim de reter os sedimentos transportados. As chapas foram instaladas no leito carroçável da estrada, formando um canal de escoamento, com largura de cerca de 0,06 m. As placas foram enterradas cerca de 0,05 m no solo, para condução do escoamento superficial até a caixa de coleta. A declividade do canal foi determinada com um nível de bolha. A água foi aplicada a montante do canal, através de um reservatório de nível constante, com capacidade de 50 L. A saída da água foi controlada com orifícios com diâmetro variando de modo a fornecer vazões variáveis para cada ensaio. As vazões variaram entre 1,217 e 9,214 L s<sup>-1</sup>.

A altura da lâmina de água no canal foi medida com régua instaladas em três pontos do canal: a 0,15 m do ponto de alimentação, na metade do canal e a 0,15 m da caixa de coleta. A vazão escoada na caixa coletora foi medida pelo método volumétrico, com o auxílio de um recipiente de 0,920 L. Foi utilizado um cronômetro para medição do tempo de enchimento do recipiente, de modo a determinar a vazão escoada.



**Figura 2 – Dispositivo experimental em canal para erosão em sulco**

### Ensaios

Os ensaios com simulação de chuva nas parcelas, em cada um dos tipos de estrada, foram realizados com intensidade constante, durante um intervalo de tempo de 40 min, no qual pôde-se observar a constância do escoamento superficial. Foram simuladas as intensidades de 136 e 176 mm h<sup>-1</sup>, aplicadas distintamente em cada ensaio. Estas intensidades correspondem às chuvas intensas com períodos de retorno da ordem de 2,3 e 7 anos, de acordo com a equação intensidade-duração e frequência, da estação pluviométrica Rio do Sul, código ANA 02748008, estabelecida por Back (2002), situada no município vizinho, distante aproximadamente 10 km da área do experimento. Além deste aspecto, ressalta-se que outros estudos com simulação de

chuva, empregam diferentes intensidades (BERTOL *et al.*, 2007; MORI *et al.*, 2009).

As medições de vazões e as coletas de amostras sedimentos foram realizadas com intervalos de tempo de 5 min, sendo a primeira efetuada imediatamente após o início do escoamento superficial. A declividade da parcela da estrada principal, medida no seu interior, apresentou valor médio de 12,4% e a da estrada de acesso foi de 14,3%.

Foram realizadas duas séries de ensaios em canais na estrada principal e duas na estrada de acesso. Uma série de ensaio é constituída pela simulação de três vazões diferentes, no qual em cada simulação o canal era realocado, sendo instalado imediatamente ao lado do anterior. Cada ensaio teve a duração de tempo de 20 min. As medições de lâmina de água no canal e da vazão escoada na caixa coletora foram realizadas nos instantes de tempo de 0, 5, 10, 15 e 20 min. Os canais apresentaram declividades médias variando de 10,8 a 15,8%.

### Hidráulica dos escoamentos

Os escoamentos de água no canal e na parcela são descritos pelas equações de Manning. Com as vazões medidas na saída da caixa coletora, foram estimadas as rugosidades no canal, a velocidade de cisalhamento, a tensão de cisalhamento e a potência do escoamento. A rugosidade foi determinada pelo coeficiente de Manning através da expressão (equação 1):

$$n = \frac{A.R^{2/3}.I^{1/2}}{Q} \quad (1)$$

onde  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning (s m<sup>-1/3</sup>),  $A$  é a área da seção transversal de escoamento (m<sup>2</sup>),  $R$  é o raio hidráulico do escoamento (m),  $I$  é a declividade (m m<sup>-1</sup>) e  $Q$  é a vazão escoada no canal (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

Com as características hidráulicas das seções transversais do canal e do escoamento foram determinadas a velocidade de cisalhamento (Equação 2), parâmetro que tem sido relacionado ao início de formação de sulcos (RAUWS, 1987), a tensão de cisalhamento (Equação 3) e a potência do escoamento (Equação 4), através das seguintes expressões (KNAPEN *et al.*, 2007):

- velocidade de cisalhamento:

$$u_* = \sqrt{gRI} \quad (2)$$

- tensão de cisalhamento:

$$\tau = \gamma R I \quad (3)$$

- potência do escoamento:

$$\Omega = \gamma R Q \quad (4)$$

onde  $u_*$  é a velocidade de cisalhamento do escoamento ( $m s^{-1}$ ),  $\tau$  é a tensão de cisalhamento produzido pelo escoamento superficial (Pa),  $\Omega$  é a potência do escoamento ( $kgf m s^{-1}$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ ),  $\gamma$  é o peso específico da água ( $N m^{-3}$ ),  $R$  é o raio hidráulico do escoamento (m) e  $I$  é a declividade ( $m m^{-1}$ ).

As características hidráulicas das parcelas foram determinadas a partir dos coeficientes de rugosidades estimados nos canais, nos quais foram medidas as vazões e as alturas das lâminas de água escoadas. A altura da lâmina de água foi determinada com a expressão de Braida e Cassol (1999), apresentada para estimativa do coeficiente de rugosidade de Manning (Equação 5). Assim, a equação é expressa por:

$$h = \left( \frac{q \cdot n}{I^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (5)$$

onde  $h$  é a altura da lâmina de escoamento (m),  $q$  é a vazão escoada por unidade de comprimento ( $m^2 s^{-1}$ ),  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning ( $s m^{-1/3}$ ) e  $I$  é a declividade da parcela ( $m m^{-1}$ ).

#### Avaliação dos sedimentos

Os sedimentos coletados nas calhas de coleta foram avaliados em termos da massa total depositada e granulometria. A massa total foi determinada pela pesagem do material, após secagem em estufa à temperatura de 50 a 60°C, até peso constante. A análise granulométrica foi realizada pelo método do tamisamento seco (peneiramento) até o diâmetro de 0,62  $\mu m$  (areias) e o da pipeta, para obtenção das frações de silte e argila, descritas pela NBR 7181/84 (ABNT, 1984).

A concentração de sedimentos em suspensão foi determinada através da relação entre a massa de sedimentos e o volume da amostra de água coletada através da caixa coletora.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Simulação em canais

A Tabela 1 apresenta as características hidráulicas dos escoamentos nos canais e os esforços exercidos sobre o solo e as partículas transportadas. As vazões variaram entre 1,217 e 9,214  $L s^{-1}$ . Valores de vazões nesta ordem de grandeza foram simulados por Franti *et al.* (1999) e Cao *et al.* (2009). Os coeficientes de rugosidade de Manning calculados variaram entre 0,015 e 0,040  $s m^{-1/3}$ . As variações destes coeficientes são resultantes das heterogeneidades do leito carroçável das estradas. Cantalice *et al.* (2005) obtiveram coeficientes de rugosidades de Manning cerca de duas vezes mais elevados em sulcos de solos agrícolas do tipo franco-argilo-arenoso.

A tensão de cisalhamento está associada à desagregação das partículas da estrada pelo escoamento. A tensão de cisalhamento variou entre 2,185 e 8,093 Pa. Knapen *et al.* (2007) mostram que nos ensaios em laboratório e em campo com escoamentos concentrados, a tensão de cisalhamento tem sido adotada entre 0 e 192 Pa. A taxa de desagregação das partículas ocorre a partir de uma tensão de cisalhamento crítica. Hanson e Simon (2001) determinam uma relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a erodibilidade do solo. Os autores utilizaram tensão de cisalhamento variando entre 0,38 e 400 Pa, demonstrando que a tensão crítica pode variar de até 6 ordens de grandeza. Cao *et al.* (2009) determinaram os valores de tensão crítica de 2,12 Pa para estradas principais e de 6,68 Pa para estradas secundárias.

A Tabela 2 apresenta as concentrações médias em suspensão e as cargas de sedimentos transportados em suspensão e por arraste, bem como a granulometria dos sedimentos transportados por arraste. As concentrações médias dos ensaios obtidas variaram entre 0,313 e 16,187  $g L^{-1}$ . Estas concentrações foram relacionadas com as características hidráulicas do escoamento. No entanto, os coeficientes de determinação obtidos foram baixos, indicando baixa correlação entre eles.

As cargas de sedimentos transportados em arraste nos ensaios variaram entre 15,301 e 121,574 g. Em suspensão, a carga foi bastante inferior, tendo variado entre 0,013 e 1,349 g. A relação entre elas foi da ordem de 100 vezes. A análise granulométrica foi realizada nas estradas para identificar as diferentes proporções entre areia, silte e argila, pois estes materiais possuem características que podem influenciar diferentemente as condições físicas das estradas. Segundo Santos *et al.* (1985), a

**Tabela 1 - Características hidráulicas do escoamento nos canais (Q – vazão, A – área, P – perímetro, R – raio hidráulico, n – coeficiente de rugosidade,  $\tau$  – tensão de cisalhamento,  $u_*$  - velocidade de cisalhamento,  $\Omega$  - potência do escoamento)**

Ensaio	Q (L min <sup>-1</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	P (cm)	R (mm)	n (s m <sup>-1/3</sup> )	$\tau$ (Pa)	$u_*$ (m s <sup>-1</sup> )	$\Omega$ (kg m s <sup>-1</sup> )
1	2,141	1,517	6,967	2,177	0,028	3,380	0,058	7,80x10 <sup>-5</sup>
2	5,267	3,304	7,517	4,396	0,040	6,825	0,083	3,90x10 <sup>-4</sup>
3	7,421	4,035	7,742	5,213	0,039	8,093	0,09	6,40x10 <sup>-4</sup>
4	1,217	1,450	7,650	1,895	0,038	2,246	0,047	3,80x10 <sup>-5</sup>
5	4,552	2,600	8,650	3,006	0,025	3,562	0,06	2,30x10 <sup>-4</sup>
6	7,215	3,963	7,167	5,530	0,036	6,553	0,081	6,60x10 <sup>-4</sup>
7	1,704	1,438	6,250	2,300	0,029	2,443	0,049	6,50x10 <sup>-5</sup>
8	5,188	2,588	6,650	3,891	0,024	4,133	0,064	3,40x10 <sup>-4</sup>
9	9,214	3,958	7,517	5,266	0,026	5,594	0,075	8,10x10 <sup>-4</sup>
10	2,566	1,261	7,076	1,782	0,015	2,185	0,047	7,60x10 <sup>-5</sup>
11	4,966	2,286	6,967	3,281	0,022	4,021	0,063	2,70x10 <sup>-4</sup>
12	8,127	3,466	7,456	4,649	0,025	5,699	0,076	6,30x10 <sup>-4</sup>

**Tabela 2 - Características dos sedimentos nos ensaios de erosão em canais**

Ensaio	Concentração em suspensão (g L <sup>-1</sup> )	Carga em suspensão (g)	Carga em arraste (g)	Areia	Silte	Argila
				(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )
1	1,308	0,095	38,893	664,80	121,00	214,20
2	5,341	0,490	82,422	707,71	106,00	186,29
3	1,965	0,244	15,301	602,27	126,50	271,23
4	2,431	0,046	52,611	736,43	97,50	166,07
5	4,728	0,326	90,703	676,89	81,50	241,61
6	2,333	0,561	77,281	857,70	56,50	85,80
7	7,076	0,190	111,168	816,90	103,50	79,60
8	16,187	1,349	105,128	923,73	72,50	3,77
9	3,030	0,931	76,260	874,19	108,00	17,81
10	0,313	0,013	121,574	616,68	215,50	167,82
11	2,758	0,196	23,531	695,78	107,50	196,72
12	3,166	0,534	35,580	660,34	190,00	149,66

argila possui característica ligante, o que a torna um material fundamental para estradas de terra, enquanto o silte possui características técnicas pouco satisfatórias que podem ocasionar problemas como: baixa capacidade de suporte, formação de atoleiros e excesso de pó.

Segundo Luce (1997), as superfícies das estradas são altamente compactadas, possuindo alta

densidade de massa e pouco ou nenhum espaço poroso, excedendo rapidamente a capacidade de infiltração do solo, mesmo em baixas intensidades de chuva. O corte da camada superficial da estrada para regularizar imperfeições, que é feito regularmente, gera um material que, desagregado, permanece na superfície em toda a extensão da estrada,

potencializando a produção de sedimentos ao longo do tempo.

Através da composição granulométrica dos sedimentos transportados em arraste, verifica-se que o percentual de areia é superior a 60%, chegando ao máximo de 92% no oitavo ensaio. O percentual de argila foi em média de 15%. As composições granulométricas poderiam ser explicadas pelas tensões de cisalhamento geradas e também pela potência de escoamento produzida.

**Simulação nas parcelas**

A Tabela 3 apresenta as características hidráulicas resultantes das chuvas simuladas nas duas estradas. As vazões médias escoadas na estrada principal foram inferiores àquelas da estrada de acesso, devido a diferença de declividade das parcelas. No entanto, as lâminas de água escoadas na estrada principal foram superiores aquelas da estrada de acesso. Elas variaram entre 0,454 e 0,590 mm. Estes valores são similares aos obtidos por Cassol *et al.* (2004) que simularam a erosão entressulco de solos agrícolas. Como consequência, as velocidades médias do escoamento na estrada principal foram menores do que as da estrada de acesso. Estas diferenças entre as estradas estão associadas aos coeficientes de rugosidades empregados para a estimativa das lâminas de águas escoadas sobre as parcelas. As tensões de cisalhamento variaram entre 0,636 Pa, na estrada de acesso, e 0,716 Pa, na estrada principal.

Nas Figuras 3 e 4, são apresentadas as vazões escoadas e as concentrações de sedimentos em suspensão na estrada principal e na de acesso, respectivamente. As vazões escoadas são proporcionais às intensidades da precipitação aplicada. Na Tabela 3 são apresentadas as características hidráulicas médias dos escoamentos nas simulações na estrada principal e na de acesso. Na estrada principal, as vazões escoadas foram cerca de 8% superiores àquelas da estrada de acesso.

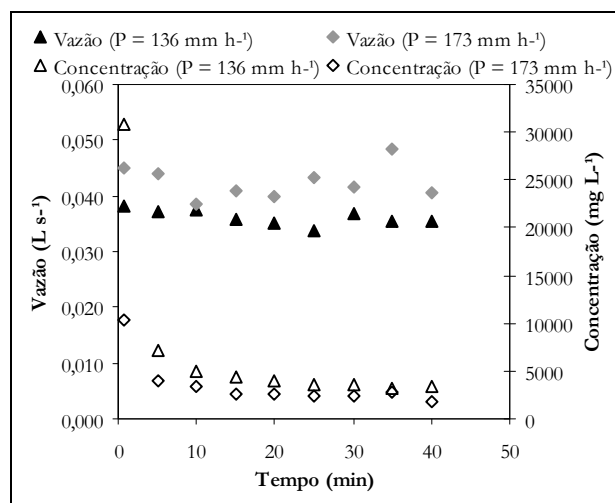
As lâminas de água calculadas na estrada principal foram superiores àquelas da estrada de acesso. Elas variaram entre 0,454 e 0,590 mm.

A diferença nas lâminas de água gerou velocidades mais elevadas na estrada de acesso. Em contrapartida, as tensões de cisalhamento na estrada principal foram pouco superiores àquelas da estrada de acesso. Os valores estiveram compreendidos entre 0,636 e 0,716 Pa.

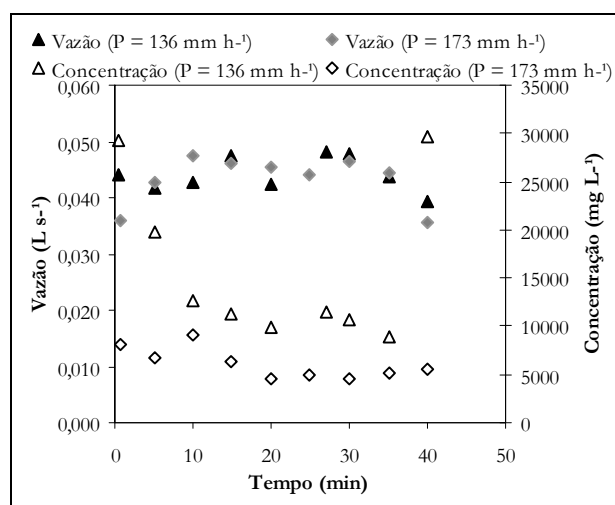
A Tabela 4 apresenta as características dos sedimentos gerados com simulação de chuvas na estrada principal e na de acesso. Observa-se que as concentrações médias dos sedimentos em suspensão

na estrada de acesso foram superiores àquelas da estrada principal. Isto implicou em cargas em suspensão transportadas na estrada principal superiores àquelas da estrada de acesso. Na estrada de acesso, a carga em suspensão foi de até 80,726 g, enquanto na estrada principal, o transporte para a maior intensidade de chuva aplicada foi de 24,13 g.

Quando analisados em termos da carga de arraste, os valores foram completamente invertidos; i.e., na estrada principal, as cargas totais foram superiores àquelas da estrada de acesso, mas em ambos os casos, as cargas foram superiores a 540 g. Comparando-se a carga de arraste com aquela em suspensão, observa-se que a primeira é superior a segunda, variando entre 7 e 57 vezes. Na estrada principal, a carga de arraste é cerca de 50 vezes superior àquela da carga em suspensão.



**Figura 3 - Vazões e concentrações na estrada principal**



**Figura 4 - Vazões e concentrações na estrada de acesso**

**Tabela 3 - Características hidráulicas médias dos escoamentos nas simulações na estrada principal e na de acesso**

Características hidráulicas	Estrada principal		Estrada de acesso	
	P = 136 mm h <sup>-1</sup>	P= 173 mm h <sup>-1</sup>	P = 136 mm h <sup>-1</sup>	P= 173 mm h <sup>-1</sup>
Vazão (L s <sup>-1</sup> )	0,0361	0,0425	0,0442	0,0432
Altura da lâmina de água (mm)	0,535	0,590	0,461	0,454
Velocidade (m s <sup>-1</sup> )	0,0675	0,072	0,0958	0,0948
Tensão de cisalhamento (Pa)	0,650	0,716	0,645	0,636
Potência do escoamento (kgf m s <sup>-1</sup> )	1,94x10 <sup>-5</sup>	2,51x10 <sup>-5</sup>	2,04x10 <sup>-5</sup>	1,97x10 <sup>-5</sup>

**Tabela 4 – Características dos sedimentos produzidos nas estradas**

Características dos sedimentos	Estrada Principal		Estrada de acesso	
	P = 136 mm h <sup>-1</sup>	P=173 mm h <sup>-1</sup>	P = 136 mm h <sup>-1</sup>	P= 173 mm h <sup>-1</sup>
Concentração em suspensão (g L <sup>-1</sup> )	7,238	3,564	15,929	6,117
Carga em suspensão (g)	24,130	13,849	80,726	23,697
Carga de arraste (g)	1158,853	795,280	540,780	571,910
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	674,560	642,380	113,930	260,480
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	269,940	268,620	621,570	534,020
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	55,500	89,000	264,500	205,500

A taxa de produção estimada de sedimentos na estrada principal foi de 5,40 e 5,71 t ha<sup>-1</sup>. Na estrada de acesso, os valores encontrados foram de 7,95 e 11,59 t ha<sup>-1</sup>. Ramos-Scharrón e MacDonald (2005) conduziram um experimento em que a produção de sedimento foi relacionada com o total de precipitação e a declividade dos segmentos de estradas, e encontraram taxas de produção anual de sedimentos para estradas tipicamente niveladas e não niveladas com 10% de declividade e uma precipitação anual de 115 cm ano<sup>-1</sup> de 110 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 64 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Esses autores concluíram que a taxa de produção de sedimento para estradas niveladas aumenta exponencialmente com o aumento da declividade do segmento. MacDonald *et al.* (2001) estudaram a perda de sedimentos em parcelas instaladas em encostas vegetadas, em estradas e em taludes. Nos ensaios de estradas, o escoamento superficial ocorreu quando a precipitação excedeu 6 mm. Os autores observaram, ainda, a produção de sedimentos na estrada e a estimativa foi de 1 a 74 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Destaca-se também que na estrada principal, o percentual de areia foi superior a 64%, enquanto na estrada de acesso, esta fração foi inferior a 26%. Na estrada de acesso, o silte foi a fração de sedimentos com maior percentual, 62% para a precipitação com intensidade de 136 mm h<sup>-1</sup> e de 53% para a precipitação com intensidade de 173 mm h<sup>-1</sup>. A diferença nas composições granulométricas dos sedimentos transportados pode estar relacionada ao grau de consolidação do leito da estrada. Na estrada principal, o leito é mais consolidado e gerou sedimentos mais grosseiros. Na estrada de acesso, o leito é menos consolidado e o transporte foi de sedimentos mais finos. Os resultados da composição granulométrica corroboram com Reid e Dunne (1984), que afirmam que a maior porção do sedimento produzido na superfície das estradas é de tamanho inferior a 2 mm.

Reineck e Singh (1980) observaram que, para materiais grosseiros, o início da movimentação depende da velocidade. Entretanto para materiais finos ( $d < 0,1$  mm), devido à ação de forças coesivas, essa relação não é válida e a energia ne-



cessária para iniciar a movimentação dos grãos aumenta com a redução do tamanho deles. Estes autores relatam, ainda, que as partículas iniciam o seu movimento quando as forças produzidas pelo escoamento excedem as forças, gravitacional e coesiva, destas partículas. Desta forma, alguns solos argilosos necessitam de mais energia para que suas partículas iniciem a movimentação do que solos arenosos, porém, uma vez em movimento, a areia será sedimentada mais rapidamente do que a argila.

## CONCLUSÕES

A simulação de chuva e de escoamento sobre superfícies de estradas rurais permite estabelecer algumas conclusões apresentadas a seguir.

1. Em canais, as cargas de sedimentos transportadas por arraste foram muito superiores àquelas transportadas em suspensão, sendo da ordem de 100 vezes. A areia constituiu-se na principal fração da composição granulométrica dos sedimentos transportados por arraste.
2. As concentrações e as cargas em suspensão transportadas nas parcelas implantadas na estrada de acesso foram superiores àquelas da estrada principal. No entanto, em relação ao transporte por arraste, as quantidades foram invertidas. Isso resultou em taxas de produção de sedimentos na estrada de acesso cerca de 1,7 vezes superior aquela da estrada principal.
3. A areia constituiu-se na maior fração granulométrica presente no sedimento em suspensão da erosão laminar na estrada principal enquanto na estrada de acesso foi o silte.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESC, através do termo de outorga 1344/2010-7, pelo financiamento de pesquisa e pela bolsa do primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

ARRUDA, P.R.R. Uma contribuição ao estudo ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São

Bartolomeu, Viçosa, Minas Gerais. Viçosa: UFV, 1997.

BACK, A. J. Chuvas intensas e chuvas de projeto de drenagem superficial no estado de Santa Catarina. Epagri Florianópolis – SC (Epagri Boletim Técnico, 123), 2002, 65 p.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. Estradas rurais: técnicas adequadas de manutenção. Florianópolis: Departamento Estadual de Infraestrutura, 2003. 236 p.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; BERTOL, I.; ROLLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. Rev. Bras. Ci. Solo, 31: 781-792, 2007.

BERTOLINI, D.; DRUGOWICH, M. I.; LOMBARDI NETO, F.; BELINAZZI, Jr, R. Controle de Erosão em Estradas Rurais. Boletim técnico Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. Campinas. 1993. 37p.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. Rev. Bras. Ci. Solo, 23: 711-721, 1999.

CANTALICE, J.R.B; CASSOL, E. A.; REICHERT, J.M.; BORGES, A.L.O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. Rev. Bras. Ci. Solo. 29 (4): 597-607, 2005.

CAO, L.; ZHANG, K.; ZHANG, W. Detachment of road surface soil by flowing water. Catena. 76 (2): 155-162. 2009.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J.R.B; REICHERT, J.M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. Pesquisa Agrop. Bras., 39 (7): 685-690, 2004.

CORRÊA, C.; DEDECEK, R. Erosão real e estimada através da rusle em estradas de uso florestais, em condições de relevo plano a suave ondulado. Floresta, 39 (2): 381-391, 2009.

ELLIOT, W. J., HALL, D. E. Water erosion prediction (WEPP) Forest Applications. Ogden. UT:

Rocky Mountain Research Station, 1997. (General Technical Report, 365).

FRANTI, T.G.; LAFLEN, J.M.; WATSON, D.A. Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow, *Transactions of the ASAE*, 42 (2): 329–335, 1999.

GARCIA, A. R.; MACHADO, C. C.; SILVA, E.; SOUZA, A. P.; PEREIRA, R. S. Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. *R. Árvore, Viçosa-MG*, v.27, n.4, p.535-542, 2003.

GONÇALVES, J. L. M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J. L.; STAPE, J. L. (Ed). *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 2, p. 47-129.

GONÇALVES, F.A. Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa. 2008. 130 p. (Tese de doutorado).

HANSON G.J., SIMON A., Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrol. Processes*, v.15, n.1, p. 23–38, 2001.

KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYSSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, v. 80, n. 1-2: 75-109, 2007.

LUCE, C. H. Effectiveness of Road Ripping in Restoring Infiltration Capacity of Forest Roads. *Restoration Ecology*, 5 (3): 265-270, 1997.

LUCE, C. H.; BLACK, T. A. Sediment Production from Forest Roads in Western Oregon, *Water Resour. Res.*, 35, 8, 2561–2570, 1999.

MacDONALD, L. H.; SAMPSON, R. W.; ANDERSON, D. M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St. John, US Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chichester, 26: 251–272, 2001.

MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 22: 100-103, 1979.

MORI, H.F.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; DIECKOW, J.; SANTOS, W.L. Perda de água, solo

e fósforo com aplicação de dejetos líquido bovino em Latossolo sob plantio direto e com chuva simulada. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 33: 186-198, 2009.

OWOPUTI, L.O.; STOLTE, W.J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review, *Transactions of the ASAE*, 38 (4): 1099–1110, 1995.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MacDONALD, L.H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chichester, 30: 1283–1304, 2005.

RAUWS, G. The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. *Catena Verlag, Cremlingen-Destedt*, suppl. n. 8, p. 1-15, 1987.

REINECK, H. E. e SINGH, I. B. *Depositional sedimentary environments*. Berlin: Springer Verlag, 1980.

SANTOS, A.R.; PASTORE, E.L.; AUGUSTO, F.; CUNHA, M.A. Estradas vicinais de terra: manual técnico para conservação e recuperação. São Paulo, IPT, 1985, 140 p.

SANTOS, C.A.G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; SRINIVASAN, V.S. Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 1, p. 92-96, 2000.

SEMMELMANN, F. R. Determinação da Energia Cinética de Chuvas Simuladas. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 4, Anais. Rio de Janeiro. 1991.

SCHOENINGER, E. R. Uso de redes neurais artificiais para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de uma floresta ombrófila densa. Universidade Federal do Paraná. 2006. 146 p. (Tese de doutorado)

SILVEIRA, R. C. da.; SALVADOR, N. Uso de um simulador de chuvas no estudo de perdas de solo e água em parcelas com resíduos culturais de milho. *Ciênc. Agrotec.*, Lavras, MG, v.24, n.3, p.718-729, 2000.

TUCHY, E. Forestry ecology in mountains areas. In: *LOGGING IN MOUNTAINS FORESTS*. Rome, FAO, 9-14, 1982.

ZIEGLER, A.D.; GIAMBELLUCA, T.W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. *Journal of Hydrology*, 196, 204–229, 1997.

***Estimation Of Sediment Yield On Rural Roads Under Simulated Rainfall And Runoff Conditions***

**ABSTRACT**

*Unpaved rural roads can be an important source of sediment generation in a watershed. In this study, the soil erosion caused by rainfall and runoff was simulated. Erosion runoff was simulated on plots with distributed flows and in channels with concentrated flows. For the plots, a rainfall simulator was employed and the channel flows were generated with controlled outflow. The hydraulic characteristics of the flows, such as water depth, shear stress and flow power, were measured. With respect to the sediments, the suspended solids concentrations, the suspended and drag loads and the granulometric composition of sediments transported by drag were determined. The concentrations of erosion on the plots and in the channels were of the same order of magnitude. The loads carried by drag were much higher than those carried in suspension. In terms of the composition of the carried sediment, the highest percentage of sand was observed in the concentrated flow. In the distributed erosion, the composition varied according to the type of road. This study provides important physical elements for modeling soil erosion in watersheds.*

**Key-words:** Road erosion, rainfall simulation, sediment transport.