

PRODUÇÃO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA COM SOLOS SUSCETÍVEIS À EROSÃO

**CARLA DEISIANE DE OLIVEIRA COSTA¹; MARLENE CRISTINA ALVES²;
ANTÔNIO DE PÁDUA SOUSA³; HÉLIO RICARDO SILVA²; ANTONIO PAZ
GONZÁLEZ⁴ E JOSÉ MANUEL MIRÁS AVALOS⁴**

1 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, UEMS/Aquidauana. carladeisiane@uems.br.

2 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP/FE/IS. mcalves@agr.feis.unesp.br; hrsilva@agr.feis.unesp.br.

3 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP/FCA. padua@fca.unesp.br.

4 Universidade da Coruña, UDC, La Coruña, España. tucho@udc.es; jmirasa@udec.es.

1 RESUMO

A degradação do solo traz como consequência a sua erosão, causando o assoreamento e a contaminação dos cursos de água. Este trabalho teve por objetivo estimar as perdas de solo e a deposição de sedimentos na sub-bacia Dois Córregos, localizada no município de Selvíria, MS, com o intuito de identificar as áreas com maior suscetibilidade a estes processos, utilizando como ferramenta o modelo LISEM. Os solos da sub-bacia são o Latossolo Vermelho e o Argissolo Vermelho-Amarelo, ambos de textura arenosa. Para as simulações foi utilizado o modelo LISEM, sendo coletados dados de intensidade de precipitação dos anos de 2009 a 2012. Foram selecionados 10 eventos com maiores intensidades de precipitação para o período avaliado. Para obtenção dos parâmetros de entrada necessários, foram coletadas amostras de solos. As coletas foram realizadas em dez locais da sub-bacia, sob os diferentes usos e ocupação do solo. O eucalipto propicia proteção aos solos da sub-bacia. Os sedimentos produzidos ficam depositados nos leitos da sub-bacia, ocasionando o assoreamento dos cursos de água. O modelo LISEM se mostrou eficiente para a localização de áreas suscetíveis aos processos erosivos na sub-bacia estudada, porém, quanto à quantificação das perdas de solo, não simula o escoamento subsuperficial, o que pode ter subestimado estes processos.

Palavras-chave: degradação ambiental, perdas de solo, assoreamento.

**COSTA, C.D.O.; ALVES, M.C.; SOUSA, A.P.; SILVA, H.R.; GONZÁLEZ, A.P.;
AVALOS, J.M.M.**

**PRODUCTION AND DEPOSITION SEDIMENT IN A SUB-BASIN RIVER WITH
SUSCEPTIBLE SOILS TO EROSION**

2 ABSTRACT

Soil degradation brings erosion as consequence, causing siltation and contamination of watercourses. This study aimed to estimate soil loss and sediment deposition in the sub-basin of Dois Córregos river, located in Selvíria municipality, MS, Brazil, in order to identify areas with higher susceptibility to these processes, using the LISEM model tool. The sub-basin river soils are Red Oxisol and Red-Yellow Alfisol, both with sandy texture. For the

simulations the LISEM model was used, with data collected from rainfall intensity between the years 2009-2012. Ten events were selected with higher rainfall intensities for the study period. To obtain the required input parameters, soil samples were collected. The collections were made at ten sites of the river sub-basin, in the different forms of soil use and occupation. The eucalyptus provides protection to the river sub-basin soils. The produced sediments are deposited in the beds of the river sub-basin, causing the silting of waterways. The LISEM model is efficient for locating the areas susceptible to erosion processes in the river sub-basin studied, however, in the quantification of soil loss, it does not simulate the runoff subsurface, which may have caused underestimation of these processes.

Keywords: environmental degradation, soil loss, siltation.

3 INTRODUÇÃO

As perdas de solo em bacias hidrográficas têm como principal causa a degradação dos mesmos devido ao seu manejo inadequado, sendo os principais contribuintes para esse processo as práticas agrícolas intensivas, a falta de manejo em áreas cultivadas com pastagens e o desmatamento. De acordo com Martins et al. (2003), a avaliação das perdas de solo é de fundamental importância na adoção de práticas que visem minimizar a degradação do solo, uma vez que o uso e a ocupação deste, juntamente com as características topográficas e climáticas, irão determinar o balanço sedimentar da bacia hidrográfica.

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta em estudos diagnósticos de perdas de solo e deposição de sedimentos. Estes modelos de predição destes fenômenos vêm sendo utilizados com o intuito de prever sua ocorrência em uma bacia hidrográfica. De acordo com Merritt, Letcher e Jakeman (2003), existem inúmeros modelos para a estimativa de perdas de solos e produção de sedimentos e geralmente estes se distinguem em termos de complexidade, processos e parâmetros considerados e dados requeridos para uso, sendo que o mais adequado dependerá da finalidade e das características da área de estudo.

De acordo com Jetten (2002), o LISEM (Limburg Soil Erosion Model) é um modelo conceitual, espacialmente distribuído, de base física, desenvolvido na Holanda. O modelo LISEM simula o escoamento superficial direto e o transporte de sedimentos após um evento de precipitação, gerando, além dos dados de perdas de solo e deposição, mapas pontuais dos locais com maior suscetibilidade aos processos erosivos, sendo uma importante ferramenta de estudo.

O modelo LISEM necessita de diversos parâmetros de entrada para a realização das simulações, como dados de solo, cobertura vegetal da bacia hidrográfica e mapas bases. De acordo com estudos realizados por alguns autores, ele é sensível a algumas variáveis de entrada, assim como outros modelos de simulação hidrológica. Hessel et al. (2003) e Takken et al. (1999) observaram que a condutividade hidráulica e o teor de água atual são as variáveis mais sensíveis do modelo e pequenas mudanças nos seus valores podem superestimar ou subestimar os resultados.

O modelo LISEM, além de simular as perdas de solo e deposição de sedimentos em uma bacia hidrográfica, gera dados de interceptação da vegetação, infiltração de água no solo, escoamento superficial, desagregação pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo. De acordo com Gomes (2008), a interceptação depende das características do evento, porém a vegetação é a componente que exerce maior influência. Trancoso, Carneiro Filho e Tomasella (2007) afirmam que a retenção de água pela vegetação reduz a energia cinética da gota de

chuva e retarda a sua chegada à superfície do solo, escoando por galhos e troncos, desta forma reduzindo a possibilidade de escoamento superficial direto.

A infiltração de água no solo é de grande importância para a disponibilidade de água. De acordo com Brandão et al. (2006), a água que infiltra no solo reabastece os aquíferos subterrâneos, da qual depende a vazão dos cursos de água no período de estiagem, o que torna a melhoria das condições de infiltração essencial para o aumento da disponibilidade hídrica favorecida pela cobertura foliar, pois esta amortece parte da água que atingiria o solo por meio da interceptação pelas folhas, liberando lentamente a água para a superfície do solo.

A cobertura do solo também o protege da desagregação e conseqüentemente do escoamento superficial. Para estes componentes, as propriedades do solo e o manejo dado a ele também são de grande importância. De acordo com Nunes e Cassol (2008), a ação de resistência à desagregação está relacionada com fatores que conferem a estabilidade dos agregados do solo. O uso e o manejo adequados constituem o principal meio de aumentar sua resistência à erosão, uma vez que eles impõem condições físicas à superfície do solo que irão interferir na ação dos agentes erosivos (VOLK, COGO e STRECK, 2004).

De acordo com Pruski (2010), a energia cinética das gotas de chuva tem sido a variável mais comumente associada com a formação do selamento superficial. Bertoni e Lombardi Neto (2010) afirmam que as gotas de chuva causam uma ação de compactação ao solo, causando rapidamente a perda de sua capacidade de infiltrar água, e isso ocasiona grande volume de enxurrada durante as chuvas mais intensas. Os mesmos salientam que o volume e a velocidade do escoamento dependem da intensidade, duração e frequência da precipitação, sendo a intensidade o fator pluviométrico mais importante na erosão.

De acordo com Costa (2013), a sub-bacia Dois Córregos apresenta problemas ambientais, como erosão do solo e o assoreamento dos rios, além da escassez de vegetação nativa. Todos estes problemas foram ocasionados pela falta de planejamento ambiental e pelo manejo inadequado dos recursos naturais. A área onde se encontra a nascente da sub-bacia Dois Córregos apresenta processos erosivos em estágio avançado, que levaram a formação de uma voçoroca e alguns leitos secos, conseqüência do manejo inadequado das áreas cultivadas com pastagens.

Nesse sentido, observa-se a importância dos estudos realizados nesta sub-bacia, visando quantificar as perdas de solo pelo escoamento superficial e a deposição de sedimentos, para que se possa tomar medidas de manejo e conservação do solo nas áreas suscetíveis e minimizar tais problemas. Assim, este trabalho teve por objetivo estimar as perdas de solo e a deposição de sedimentos na sub-bacia Dois Córregos, com o intuito de identificar as áreas com maior suscetibilidade a estes processos, utilizando como ferramenta o modelo LISEM.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A sub-bacia Dois Córregos está localizada no município de Selvíria no estado de Mato Grosso do Sul, tem 2.636 ha, situa-se entre as latitudes 20° 12' 26,41" S e 20° 16' 28,32" S e entre as longitudes 51° 43' 15,18" O e 51° 49' 26,3" O, a uma altitude média de 335 m.

A classificação climática da região, de acordo com Köppen, é Aw, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. As médias anuais são de 24,5°C de temperatura, 1.232 mm de precipitação pluvial, e a umidade relativa do ar de 64,8% (HERNANDEZ, LEMOS FILHO e BUZZETTI, 1995), sendo a vegetação original da região o Cerrado.

Esta região apresenta degradação ambiental. Há um processo intensivo de degradação dos solos, o que levou a formação de uma voçoroca, com 50 m de profundidade em alguns pontos e assoreamento dos canais de drenagem, possuindo vários leitos secos. Além disso, apresenta outra voçoroca em formação em área cultivada com pastagens degradadas. O processo de assoreamento na foz da sub-bacia também tem sido observado nos últimos anos.

Os solos de maior ocorrência na sub-bacia Dois Córregos, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), são o Latossolo Vermelho distrófico e o Argissolo Vermelho distrófico. Com relação às classes de uso e ocupação dos solos, a sub-bacia Dois Córregos é ocupada em 50% de sua extensão por eucalipto, apresentando pequenas áreas com pastagens e vegetação nativa.

Foram realizadas amostragens de solos para análise de algumas variáveis de entrada necessárias ao modelo, como textura, condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade e teor de água atual. Estas amostragens foram realizadas em dez locais ao longo da sub-bacia, sendo oito localizados no Latossolo Vermelho distrófico e dois no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico.

Os usos e ocupações amostrados foram três locais com pastagem (P_1 , P_2 , P_3), sendo (P_1) e (P_3) no Argissolo e (P_2) no Latossolo, três locais com eucalipto de 5 anos (E_1 , E_2 , E_3) e quatro locais com eucalipto aos 6 meses recém-transplantado (EN_1 , EN_2 , EN_3 , EN_4), todos localizados no Latossolo. Para cada uso e ocupação do solo foram realizadas coletas, nas profundidades de 0,0 a 0,10 e de 0,10 a 0,20 m, e a avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado.

Para realizar as simulações foi utilizado o modelo LISEM. Os mapas de entrada básicos utilizados foram: Modelo Digital de Elevação (MDE), Mapa de Uso do Solo, Mapa de Solo e Mapa de Drenagem, e por meio destes, foram feitos os demais mapas necessários como dados de entrada do modelo.

Os parâmetros de entrada analisados foram a condutividade hidráulica saturada, o teor de água atual, o teor de água na saturação e o D_{50} (diâmetro mediano das partículas do solo). A tensão na frente de molhamento foi calculada através da fórmula proposta por Rawls, Brakensiek e Soni (1983), que leva em consideração a porosidade total e os teores de areia e argila. Os outros parâmetros necessários como dados de entrada referentes ao solo, como o coeficiente de Manning, coesão do solo e a rugosidade relativa, e aqueles correspondentes à vegetação foram obtidos na literatura. Os valores utilizados como dados de entrada do modelo estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Dados de entrada do modelo LISEM para a sub-bacia Dois Córregos.

Parâmetros	Usos do solo		
	Pastagem	Eucalipto com 5 anos	Eucalipto aos 6 meses
Profundidade das avaliações (mm)	200	200	200
*Condutividade hidráulica saturada (mm h ⁻¹)	6,28	5,97	11,10
* Teor de água atual (cm ³ cm ⁻³)	0,058	0,047	0,080
*** Diâmetro mediano (D ₅₀) (µm)	223,37	223,51	220,63
*Teor de água na saturação (cm ³ cm ⁻³)	0,353	0,372	0,361
** Índice de área foliar (IAF) (m ² m ⁻²)	2,93	2,75	1,58
**Altura da vegetação (m)	0,20	21,17	0,68
**Fração do solo coberto por vegetação	1,00	0,82	0,10
**Coesão das raízes (kPa)	3,32	10,0	3,32
**Rugosidade (cm)	0,70	1,36	0,70
**Coef. de Manning	0,23	0,30	0,23
**Coesão do solo (kPa)	3,55	12,4	3,55
***Tensão na frente de molhamento (cm)	5,43	4,70	5,02

*Parâmetros avaliados

**Parâmetros pesquisados na literatura

***Parâmetro calculado

Com relação aos resultados gerados pelo modelo, a interceptação é determinada pela estimativa da capacidade de armazenamento máximo da vegetação (S_{max}), que ocorrerá durante o evento de precipitação, sendo estimada pela equação de Von Hoyningem-Huene (JETTEN, 2002).

$$S_{max} = 0,935 + 0,498 \cdot IAF - 0,00575 \cdot IAF^2 \quad (1)$$

Em que IAF é o índice de área foliar, sendo definido como a área de folhas por unidade de área de terreno (m² m⁻²). A interceptação acumulada durante a precipitação é simulada pela equação de Aston (1979).

$$S = C_p \cdot S_{max} \cdot [1 - e^{-k \frac{P_{acum}}{S_{max}}}] \quad (2)$$

Em que S é a interceptação acumulada em mm; C_p é a fração de cobertura da vegetação, adimensional; S_{\max} é a capacidade máxima de interceptação em mm; k é o fator de correção da densidade de vegetação ($1 - 0,046 \cdot \text{IAF}$), adimensional; e P_{acum} é a precipitação acumulada em mm. De acordo com Gomes (2008), o fator k simula a interceptação acumulada antes do armazenamento máximo nas folhas ser alcançado.

Para a infiltração de água no solo foi utilizado o modelo proposto por Green-Ampt. Sua seleção é devida à disponibilidade de informações sobre a condutividade hidráulica e o teor de água atual no solo, os quais foram determinados, havendo uma maior confiabilidade nos dados obtidos, uma vez que estes dois parâmetros têm mostrado considerável sensibilidade em diversos estudos. De acordo com Brandão et al. (2006), o modelo de Green e Ampt exprime a infiltração em função da condutividade hidráulica do solo saturado, do potencial matricial do solo antes da infiltração e dos teores de água atual e de saturação.

Para a simulação do escoamento superficial são utilizados como dados de entrada o coeficiente de Manning, a declividade e a direção dos canais de drenagem (JETTEN, 2002), sendo este determinado pela equação 3.

$$Q = \frac{A}{\eta} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Em que Q é a descarga líquida em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; A é a seção transversal úmida em m^2 ; η é o coeficiente de Manning, adimensional; R é o raio hidráulico em m; e S é a declividade do fundo do canal em m m^{-1} .

A simulação da desagregação é baseada em processo de erosão-deposição, no qual é assumido que a capacidade de transporte do escoamento reflete um balanço entre os processos de erosão e deposição. A erosão é a soma da desagregação pelo impacto das gotas de chuva e desagregação pelo escoamento (MORO, 2011). Assim, os sedimentos em suspensão são calculados por:

$$e = D_s + D_f - D_p \quad (4)$$

Em que e é sedimentos em suspensão em g s^{-1} ; D_s é a desagregação pelo impacto da gota de chuva em g s^{-1} ; D_f é a desagregação pelo escoamento em g s^{-1} ; e D_p é a deposição de sedimentos em g s^{-1} .

A desagregação pelo impacto das gotas de chuva é simulada em função da estabilidade dos agregados do solo, energia cinética da precipitação e a altura da lâmina de água superficial. A energia cinética é decorrente da precipitação direta e da precipitação interceptada pela vegetação ("throughfall") (MORO, 2011). A desagregação pelo impacto das gotas é calculada pela seguinte equação:

$$D_s = \frac{2}{A_s K_e \cdot \exp(-1,48 h) + 2,96} \cdot P \cdot A \quad (5)$$

Em que D_s é a desagregação pelo impacto da gota de chuva em g s^{-1} ; A_s é a estabilidade de agregados, adimensional; K_e é a energia cinética em J m^{-2} ; h é a altura da lâmina de água em mm; P é a precipitação em mm; e A é a superfície sobre a qual ocorre o

impacto da gota da chuva em m^2 . A energia cinética da precipitação (K_{ep}) e da interceptação pela vegetação (K_{et}) são respectivamente:

$$K_{ep} = 8,95 + 44 \cdot \log(I) \quad (6)$$

$$K_{et} = 15,8 \cdot (h^{0,5}) - 5,87 \quad (7)$$

Em que I é a intensidade da precipitação, $mm \ h^{-1}$; e h é a altura da planta em m. A desagregação pelo fluxo e a deposição são dadas pela equação 8:

$$D = Y(T_c - C) \cdot V_s \cdot w \cdot dx \quad (8)$$

Em que D é o D_f ou D_p em $g \ s^{-1}$; Y é o fator de eficiência, adimensional; T_c é a capacidade de transporte em $kg \ m^{-3}$; C é a concentração de sedimentos em $kg \ m^{-3}$; V_s é a velocidade de queda das partículas em $m \ s^{-1}$; w é a largura do escoamento em m; e dx é a largura de célula em m. O Y é calculado pela equação:

$$Y = \frac{1}{0,89 + 0,56 \cdot Coh} \quad (9)$$

Em que Y é a velocidade de cisalhamento crítica para formar um sulco em $cm \ s^{-1}$; e Coh é a coesão do solo úmido em kPa.

A capacidade de transporte é calculada com base na potência do escoamento (GOVERS, 1990). A equação 10 estima a capacidade de transporte de sedimentos total, ou seja, sedimentos em suspensão e no leito.

$$T_c = 2650 \cdot c \cdot (V \cdot S \cdot 10 - 0,4)^d \quad (10)$$

Em que T_c é a capacidade de transporte em $kg \ m^{-3}$; V é a velocidade do escoamento em $m \ s^{-1}$; S é a declividade em %; e c e d são coeficientes experimentais que dependem do diâmetro mediano (D_{50}) do material, determinados pelas equações 11 e 12.

$$c = \frac{D_{50} + 5}{0,32} - 0,6 \quad (11)$$

$$d = \frac{D_{50} + 5}{300} - 0,25 \quad (12)$$

Os dados climáticos foram obtidos a partir da estação meteorológica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP/FE/IS, cuja distância da sub-bacia em estudo é de aproximadamente 40 km.

Foram coletados dados de intensidade de precipitação dos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012, em intervalo de 30 min, sendo selecionados 10 eventos registrados, correspondendo aos períodos com maiores intensidades de precipitação para o período avaliado, que estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Eventos selecionados para as simulações para o período de 2009 a 2012.

Eventos de precipitação	Intensidades de precipitação I (mm h⁻¹)	Precipitações totais (mm)	Durações (h)
15/01/2009	28,96	58,05	3,0
28/03/2009	23,47	42,41	5,0
10/12/2009	21,64	56,64	7,0
01/01/2010	26,67	62,26	10,0
20/05/2010	34,90	59,46	3,0
20/11/2010	27,74	73,94	6,0
08/03/2011	19,36	76,17	14,0
12/04/2011	23,62	72,89	5,0
12/03/2012	19,05	57,18	3,0
28/05/2012	106,68	384,09	8,0
Média		94,31	

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores valores observados de interceptação, infiltração e escoamento superficial foram para o evento do dia 28/05/2012 (Tabela 3), que corresponde à maior intensidade de precipitação, igual a 106,68 mm h⁻¹, e precipitação acumulada de 384,09 mm, com duração de 8 h (Tabela 2).

Tabela 3. Principais componentes do ciclo hidrológico, perdas de solos e deposição de sedimentos simulados pelo modelo LISEM.

Eventos de P*	INT	IN (mm)	ES	DGC	DF (t/ha)	DEP	PS
15/01/2009	1,71	54,47	1,47	0,79	0,67	1,46	0,00
28/03/2009	1,62	40,40	0,01	0,40	0,01	0,41	0,00
10/12/2009	1,70	54,21	0,12	0,57	0,11	0,68	0,00
01/01/2010	1,72	57,47	3,04	0,79	1,66	2,44	0,01
20/05/2010	1,71	53,05	4,29	0,89	3,19	4,08	0,00
20/11/2010	1,74	66,47	4,15	1,10	2,86	3,96	0,00
08/03/2011	1,74	73,72	0,73	0,57	0,23	0,80	0,00
12/04/2011	1,74	67,87	2,36	0,96	1,03	1,98	0,01
12/03/2012	1,70	53,99	0,05	0,47	0,02	0,49	0,00
28/05/2012	1,76	148,59	233,69	7,37	360,31	353,40	14,30
Média	1,71	67,02	24,99	1,39	37,01	36,97	1,43

*Eventos referentes às maiores intensidades de precipitação para o período de 2009 a 2012.

P = Precipitação, INT = Interceptação total, IN = Infiltração total, ES = Escoamento superficial total, DGC = Desagregação pela gota de chuva, DF = Desagregação pelo fluxo, DEP = Deposição, PS = Perda de solo.

A interceptação média observada para os eventos analisados foi de 1,71 mm. As interceptações simuladas pelo modelo LISEM apresentaram valores próximos em todos os eventos, sendo o maior valor observado para o evento de maior intensidade de precipitação. Observa-se que esta variável está diretamente relacionada com a precipitação acumulada.

A infiltração média observada foi de 67,02 mm, sendo o maior valor observado para o evento do dia 28/05/2012, com 148,59 mm, e o menor valor para o evento do dia 28/03/2009, com 40,4 mm, correspondendo ao evento com menor precipitação acumulada. Mesmo para os eventos com menor precipitação acumulada, observa-se altos valores de infiltração, devido os solos da sub-bacia Dois Córregos serem arenosos.

A infiltração também é dependente das variáveis, condutividade hidráulica, tensão na frente de molhamento, teores de água inicial e de saturação. Os solos da sub-bacia são de textura arenosa, o que proporciona uma alta permeabilidade. Além disso, os baixos valores de tensão na frente de molhamento caracterizam um solo seco, apresentando baixos teores de água atual, o que proporciona uma tendência a um valor máximo de infiltração em todos os eventos.

Gomes (2008) observaram valor de infiltração média igual a 24,44 mm em estudo em uma microbacia com solos de textura argilosa, sendo este valor menor que os observados para os solos da sub-bacia Dois Córregos e menor que o valor verificado para o evento do dia 28/03/2009, com menor infiltração, de 40,4 mm, confirmando a importância da textura na infiltração de água no solo. Com exceção ao evento com maior intensidade de precipitação, para todos os outros foram observados maiores valores de infiltração em relação ao escoamento superficial.

O escoamento superficial é dependente da intensidade e duração da precipitação e também da precipitação acumulada, apresentando um maior valor para o evento do dia 28/05/2012, com 233,69 mm. Observam-se baixos valores de escoamento superficial para os outros eventos, devido às altas taxas de infiltração. O escoamento superficial médio observado para os 10 eventos foi de 24,99 mm, sendo maior que os valores observados por Gomes (2008) e Moro (2011), de 1,86 e 3,73 mm, respectivamente.

A sub-bacia Dois Córregos possui maior área que as microbacias citadas acima e, portanto, maior área de contribuição. Rodrigues (2011), avaliando os processos hidrológicos em uma bacia e sub-bacia, observou que o escoamento superficial foi maior para a bacia em relação à sub-bacia, e que estes resultados estão relacionados à área de contribuição das mesmas. De acordo com Silva Júnior et al. (2004), o escoamento oriundo de bacias menores tende a aflorar mais a jusante, proporcionando aumento no escoamento superficial nas bacias maiores.

O escoamento superficial é dependente, além da precipitação, dos dados de coeficiente de Manning, que expressa a resistência que a superfície do solo oferece ao escoamento superficial. Gomes (2008) salienta que há relação inversamente proporcional deste coeficiente com a velocidade do fluxo, ou seja, quanto menor o coeficiente, maior será a velocidade de deslocamento da água sobre as vertentes da bacia hidrográfica. Os valores de coeficiente de Manning utilizados neste trabalho foram semelhantes e próximos aos utilizados por outros autores para a cobertura vegetal de florestas, mostrando para este parâmetro de entrada uma boa proteção aos solos quanto ao escoamento superficial.

Para que ocorra escoamento superficial, a intensidade de precipitação tem que ser maior que a capacidade de infiltração de água do solo. Como os solos da sub-bacia Dois Córregos apresentam boa permeabilidade, os eventos analisados geraram baixo escoamento superficial, devido estes apresentarem intensidade de precipitação abaixo ou próxima à capacidade de infiltração do solo. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2010), os solos arenosos, com espaços porosos grandes, durante uma precipitação de pouca intensidade pode absorver toda a água, não havendo nenhum dano.

Por isso, apesar da degradação de algumas propriedades físicas dos solos da sub-bacia Dois Córregos, esta apresentou baixos valores de escoamento superficial devido à boa

permeabilidade dos solos e, além disso, à implantação do eucalipto na área próxima à voçoroca há 5 anos, estabilizou os processos erosivos que ocorriam naquela área.

Para a desagregação, perdas de solos e deposição de sedimentos estimados pelo modelo LISEM, observa-se que os maiores valores foram para o evento do dia 28/05/2012, sendo o mesmo evento em que foram observados os maiores valores de escoamento superficial (Tabela 3). A desagregação pelo impacto das gotas de chuva é dependente da estabilidade de agregados do solo, da interceptação pela vegetação e do evento de precipitação. Observa-se que os valores de desagregação pelas gotas de chuvas estão próximos em todos os eventos, com exceção ao evento de maior intensidade e precipitação total, o qual gerou os maiores valores de todas as variáveis simuladas. Assim, verifica-se a relação desta variável com a interceptação, que apresentou valores próximos em todos os eventos analisados.

A desagregação pelo fluxo é dependente da coesão e do diâmetro mediano do material (D_{50}). Com relação a estes dados, a coesão do solo apresenta valores altos, principalmente para a área cultivada com eucalipto de 5 anos, havendo uma menor tendência à desagregação pelo fluxo. Por isso apresenta valores semelhantes à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e baixos, com exceção ao evento de maior escoamento superficial, tendo um comportamento diferente dos demais eventos.

Além disso, apresenta altos valores de D_{50} devido aos solos serem de textura arenosa, ou seja, quanto maior a percentagem de areia do solo, maior será o seu diâmetro mediano, causando uma menor estabilidade das partículas do solo à desagregação pelo fluxo, sendo estas carregadas com maior facilidade. De acordo com Menezes e Pejon (2010), materiais finos costumam ser menos erodíveis que os grossos, pois a destacabilidade de suas partículas é dificultada pelas forças de coesão. No caso dos solos grossos, dificilmente existem forças de coesão, no máximo uma coesão aparente que não obsta a destacabilidade dos grãos. Por isso, no evento do dia 28/05/2012, com maior precipitação acumulada e intensidade, apresentou maior desagregação pelo fluxo.

A desagregação média pelas gotas de chuva, observada para os 10 eventos, foi de 1,39 t ha⁻¹, e para a desagregação média pelo fluxo foi observado valor de 37,01 t ha⁻¹. Para os eventos dos dias 15/01/2009, 28/03/2009, 10/12/2009, 08/03/2011 e 12/03/2012, o processo de erosão dominante na vertente da sub-bacia estudada foi a desagregação pelas gotas de chuva, devido aos maiores valores em relação à desagregação pelo fluxo, correspondendo aos eventos com menores intensidades de precipitação. Nos outros eventos a desagregação pelo fluxo foi dominante.

Nestes eventos de menores intensidades de precipitação e curta duração a desagregação pelas gotas de chuva é maior, mas à medida que aumenta a precipitação acumulada e a intensidade de precipitação, a desagregação causada pelo fluxo tende a predominar, devido ao aumento na taxa de desagregação das partículas de solo, aumentando o volume e a velocidade do fluxo, e assim, maior desagregação causada por este. Além disso, ocorre a saturação da camada superficial do solo diminuindo assim, a infiltração de água, e consequentemente, aumentando o escoamento superficial.

De acordo com Oliveira, Martinez e Pruski (2005), o impacto das gotas que ocorre na fase inicial da erosão hídrica, fornece energia cinética capaz de desestruturar as partículas de solo, mas possui baixa capacidade de transporte de sedimentos. A segunda fase da erosão hídrica é marcada pela remoção de camada superficial do solo, sendo esta associada ao escoamento superficial, que possui pequena capacidade de desestruturação e alta capacidade de transporte.

Estes maiores valores observados para a desagregação pelas gotas de chuva são devidos à cobertura do solo, pois a sub-bacia Dois Córregos é ocupada em sua maior parte por eucalipto, cerca de 50% do total de sua área, sendo 4 locais com eucalipto recém transplantado, o que proporcionou uma menor cobertura, pois o solo havia sido recém preparado e as plantas estão em estágio inicial de desenvolvimento.

De acordo com Pruski (2010), em áreas com menor cobertura vegetal, a maior parte da desagregação ocorre pelo impacto das gotas das chuvas, sendo a quantidade de solo desestruturado aumentada com a intensidade da precipitação, a velocidade e o tamanho das gotas. Além disso, Silva et al. (2011) analisando diferentes sistemas de manejo observaram que os sistemas com eucalipto apresentaram perdas de solo maiores nos primeiros anos de sua implantação, decrescendo durante os anos. Assim, períodos iniciais após o plantio são mais críticos, devendo-se ter maiores cuidados com o manejo do solo nesse período.

As perdas de solo correspondem ao somatório entre a desagregação pelo impacto da gota de chuva e pelo fluxo, e estão diretamente relacionadas ao escoamento superficial, observando maiores valores de perdas de solo aos eventos com maior escoamento superficial. Foi observada uma perda de solo média de $1,43 \text{ t ha}^{-1}$, sendo o maior valor observado para o evento do dia 28/05/2012, com $14,30 \text{ t ha}^{-1}$.

As maiores perdas de solo observadas para o evento do dia 28/05/2012 é consequência do maior escoamento superficial, desagregação pelas gotas de chuva e pelo fluxo. De acordo com a classificação de Moro (2011), as perdas de solo observadas para os solos da sub-bacia Dois Córregos foram altas para o evento do dia 28/05/2012. Para os eventos dos dias 01/01/2010 e 12/04/2011 foram muito baixas, abaixo de 1 t ha^{-1} , e para os outros eventos não houve perda de solo.

A sub-bacia Dois Córregos é ocupada em maior parte por eucalipto, e no estudo sobre perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais realizado por Martins et al. (2003), observaram menores perdas de solo para o eucalipto quando comparadas a outros cultivos. Os mesmos complementam que isso ocorre devido à proteção que este uso proporciona ao solo, interceptando as gotas de chuva pela copa e também pela serapilheira, e ao menor revolvimento do solo, e estas perdas de solo diminuem com o avanço da idade das plantas.

Silva et al. (2011) observaram que, os usos pastagem e eucalipto foram favoráveis no controle da erosão hídrica, sendo a pastagem menos eficiente que o eucalipto na redução das perdas de solo, contudo, mais promissora na retenção e infiltração de água. Pires et al. (2006) avaliando diferentes sistemas de manejo de uma floresta de eucalipto, observaram que todos os sistemas de manejo de eucalipto apresentaram perdas de solo muito inferiores ao valor limite de tolerância.

A deposição de solo é dependente, assim como a desagregação pelo fluxo, da coesão e do diâmetro mediano do material (D_{50}). Conforme já comentado, os usos presentes na sub-bacia apresentam altos valores de coesão do solo e altos diâmetros medianos, caracterizando menor produção de sedimentos, devido a sua menor suscetibilidade à erosão.

Com relação à deposição de sedimentos, foi observado um valor médio igual a $36,97 \text{ t ha}^{-1}$, sendo o maior valor observado para o evento do dia 28/05/2012, de $353,40 \text{ t ha}^{-1}$, devido aos maiores valores de desagregação dos solos observados para este evento. De acordo com a classificação de Moro (2011), para quatro eventos, dos dias 28/03/2009, 10/12/2009, 08/03/2011 e 12/03/2012, a deposição foi baixa. Para cinco eventos foi média, nos dias 15/01/2009, 01/01/2010, 20/05/2010, 20/11/2010 e 12/04/2011. E para o evento do dia 28/05/2012 foi classificada como muito alta. Assim, verifica-se que a maior parte da produção

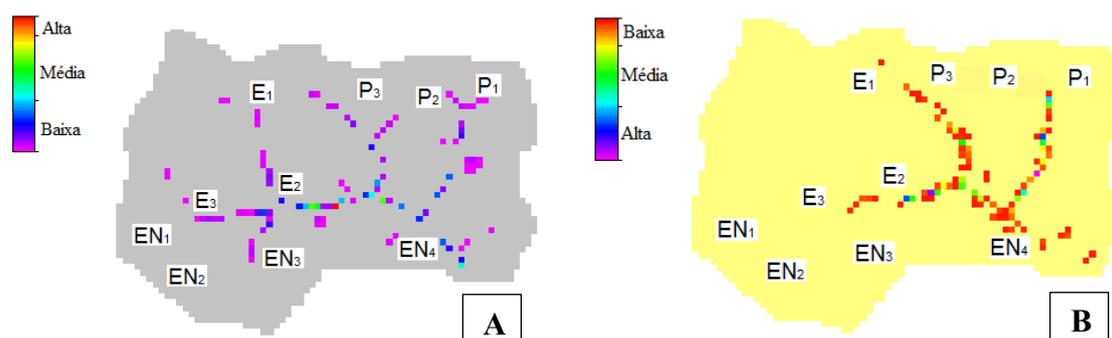
de sedimentos gerados pela desagregação fica depositada no leito dos cursos de água, sendo pequena parte perdida para fora dela.

Os maiores diâmetros medianos das partículas de solo se caracterizam por uma maior deposição, pois as partículas grandes após serem desagregadas pelo fluxo, ao atingirem os cursos de água tendem a se depositar nos seus leitos. De acordo com Volk e Cogo (2009), chuvas de grande intensidade originam maior capacidade de transporte, pois aumentam o volume e a velocidade do fluxo pelo escoamento superficial, favorecendo o transporte de partículas de maior tamanho, o que caracteriza esta maior deposição de sedimentos no evento do dia 28/05/2012.

Foi observada baixa produção de sedimentos para a maioria dos eventos. Somente para o evento com maior intensidade de precipitação, com $106,68 \text{ mm h}^{-1}$, a produção de sedimentos foi maior. A sub-bacia Dois Córregos é vegetada em sua maior parte com eucalipto, o que propiciou maior estabilidade para os solos desta área, refletindo nos menores valores observados. Com isso, observa-se que a implantação de eucalipto na área proporcionou estabilização aos processos erosivos, pois estes estão menos intensos. Apesar disso, o processo de deposição ainda é preocupante, devido todo o solo perdido ficar depositado nos leitos, podendo proporcionar mais leitos secos na região.

Na Figura 1A está o mapa de perdas de solo da sub-bacia Dois Córregos. Observa-se para todos os eventos que as áreas mais suscetíveis aos processos erosivos são as regiões próximas aos cursos de água. Foi observada baixa perda de solo na maior parte da sub-bacia e em pequeno ponto próximo à foz a perda de solo observada foi média, e entre média e alta em pequenos pontos à jusante da área cultivada com eucalipto (E_2) no Latossolo, próximo à voçoroca. Na Figura 1B está o mapa de deposição de sedimentos da sub-bacia Dois Córregos. Verifica-se que o processo de deposição predominou no canal fluvial e nas áreas próximas a este, sendo baixa na maior parte da sub-bacia, média e alta em alguns pontos próximos à pastagem (P_1) no Argissolo e ao eucalipto (E_2) no Latossolo.

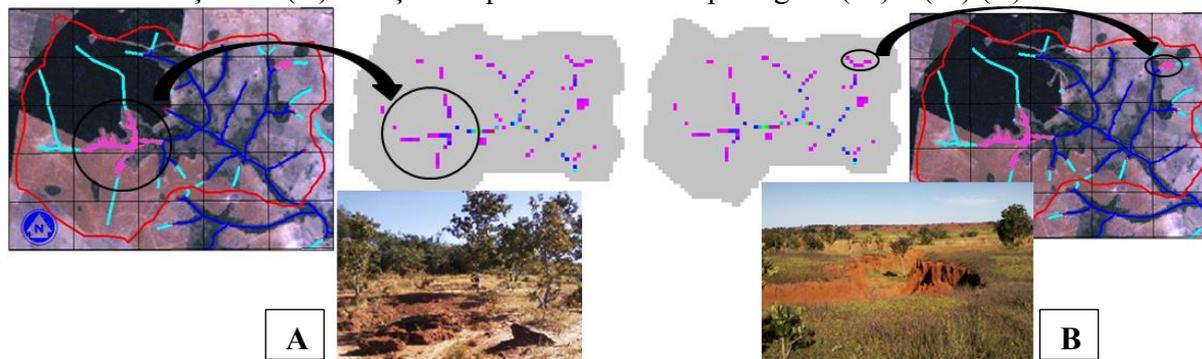
Figura 1. Mapas de perdas (A) e deposição de solos (B), dos resultados simulados pelo modelo LISEM.



*Legenda - Latossolo: P_2 = Pastagem, E_1 , E_2 e E_3 = Eucalipto aos 5 anos, EN_1 , EN_2 , EN_3 e EN_4 = Eucalipto aos 6 meses. Argissolo: P_1 e P_3 = Pastagem.

Observa-se que neste local, as perdas de solo são baixas, porém segue o traçado ramificado da voçoroca (Figura 2A). Esta baixa perda de solo apontada no mapa é devido ao eucalipto, pois a implantação deste melhorou as condições do solo, proporcionando menores perdas de solo.

Figura 2. Voçoroca apontada pelo mapa de perdas de solo e aspecto do ambiente dentro da voçoroca (A) e voçoroca presente entre as pastagens (P₁) e (P₂) (B).



Para a área cultivada com a pastagem (P₁) foi observado durante as coletas de campo, erosão laminar e em sulcos em diversos pontos. No mapa de perdas de solo, este local está classificado como baixa perda de solo, mas devido ao manejo inadequado da pastagem, a erosão está ocorrendo.

Verificou-se que, durante as coletas de campo, na região entre as pastagens (P₁) e (P₂) há uma voçoroca. Este local foi identificado pelo mapa de perdas de solo (Figura 2B), também sendo classificado como baixa perda de solo. Diante disso, observa-se que mesmo uma área que não apresenta suscetibilidade, se manejada de forma incorreta os processos erosivos iniciam.

A sub-bacia Dois Córregos apresentou baixos valores de perdas de solo para os eventos analisados. Vale ressaltar que estes resultados levam em consideração somente o escoamento superficial. Para Rodrigues (2000), as voçorocas são fenômenos de evolução complexa, em que tanto os fluxos superficiais quanto os subsuperficiais, bem como os diversos tipos de movimentos de massa podem atuar isolada ou conjuntamente na sua formação e evolução. Baccaro e Silva (1997) constataram a contribuição dos fluxos subsuperficiais no desencadeamento e avanço das frentes de erosão por voçorocamento.

O modelo LISEM não simula o escoamento subsuperficial, sendo uma limitação para analisar as perdas de solo da sub-bacia Dois Córregos, uma vez que, devido às características do solo desta, este escoamento tenha contribuído para a formação das voçorocas presentes na área. Devido a este fato, o modelo LISEM pode não haver simulado de forma adequada os processos erosivos, pois o escoamento subsuperficial pode ter contribuído de forma significativa para as perdas de solo nesta área, não sendo levado em consideração nestas condições.

Para os mapas de perdas de solo e deposição de sedimentos gerados pelo modelo, estes apontaram os locais suscetíveis à erosão de forma adequada, pois foram coerentes com as observações de campo. O modelo LISEM foi uma ferramenta de grande importância para a localização das áreas suscetíveis aos processos erosivos na sub-bacia Dois Córregos, porém para a quantificação das perdas de solos, devido este não simular o escoamento subsuperficial, o mesmo pode ter subestimado estes processos.

6 CONCLUSÕES

O eucalipto propicia proteção aos solos da sub-bacia Dois Córregos.

Os sedimentos produzidos ficam depositados nos leitos da sub-bacia, ocasionando o assoreamento dos cursos de água.

O modelo LISEM se mostrou eficiente para a localização de áreas suscetíveis aos processos erosivos na sub-bacia estudada, porém, quanto à quantificação das perdas de solo, não simula o escoamento subsuperficial, o que pode ter subestimado estes processos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTON, A.R. Rainfall interception by eight small trees. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.42, n.3-4, p.383-396, July 1979.

BACCARO, C.A.D.; SILVA, E.P. Os processos de voçorocamento na bacia do ribeirão Douradinho. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7. 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 1997. 1 CD-ROM.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone Editora, 2010. 355p.

BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 120p.

COSTA, C.D.O. **Perdas de solo e deposição de sedimentos em duas sub-bacias hidrográficas no entorno da usina hidrelétrica de Ilha Solteira-SP**. 2013. 151f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2013.

GOMES, N.M. **Aplicação do LISEM (Limburg Soil Erosion Model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical**. 2008. 191f. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

GOVERS, G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. In: PROCEEDINGS OF JERUSALEM WORKSHOP, 1987, Jerusalem. **Erosion, Transport and Deposition Processes...** Göttingen: IAHS Publ., n.189, p. 45-63, 1990.

HERNANDEZ, F.B.T.; LEMOS FILHO, M.A.F.; BUZETTI, S. **Software HIDRISA e o balanço hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: UNESP/FEIS – Área de Hidráulica e Irrigação, 1995. 45p. (Série Irrigação, 01).

HESSEL, R.; MESSING, I.; LIDING, C.; RITSEMA, C.; STOLTE, J. Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment. **Catena**, Amsterdam, v.54, n.1-2, p.289-302, Nov. 2003.

JETTEN, V.G. **LISEM: Limburg Soil Erosion Model User Manual Window version 2.x**. Utrecht: Utrecht University, 2002, 48p.

MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; MARQUES, J.J.G.S.M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na

região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.395-403, maio/jun. 2003.

MENEZES, M.B.M.; PEJON, O.J. Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**, São Paulo, v.29, n.2, p.211-228, abr./jun. 2010.

MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v.18, n.8-9, p.761-799, oct./nov. 2003.

MORO, M. **Avaliação do modelo LISEM na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do Rio Grande do Sul**. 2011. 123f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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, v.32, n.spe, p.2839-2845, out./dez. 2008.

OLIVEIRA, L.F.C.; MARTINEZ, M.A.; PRUSKI, F.F. Rotina computacional para a determinação da velocidade de sedimentação das partículas do solo em suspensão no escoamento superficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.126-136, jan./abr. 2005.

PIRES, L.S.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F.P.; BRITO, L.F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.4, p.687-695, abr. 2006.

PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010. 279p.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SONI, B. Agricultural management effects on soil water processes Part I: soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.26, n.6, p.1747-1752, Nov./Dec. 1983.

RODRIGUES, T.T. **Caracterização e Erodibilidade dos solos de uma voçoroca na região de Ouro Preto, Minas Gerais**. 2000. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

RODRIGUES, M.F. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no sul do Brasil**. 2011. 202f. Dissertação (Mestrado em Silvicultura) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SILVA JÚNIOR, O.B.; TUCCI, C.E.M.; CASTRO, N.M.R.; GOLDENFUM, J.A. Efeito do uso de solo nos eventos de cheia em micro e meso escalas: bacia do Potiribu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.9, n.1, p.153-164, jan./mar. 2004.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; LEITE, F. P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.21, n.4, p.765-776, out./dez. 2011.

TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, Amsterdam, v.37, n.3-4, p.431-447, Oct. 1999.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J. Amazônia, deflorestamento e água: A interação entre a floresta tropical e a maior bacia hidrográfica do planeta. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v.40, n.239, p.30-37, jul. 2007.

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P.; STRECK, E.V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n. 4, p.763-774, jul./ago. 2004.

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1459-1471, set./out. 2009.