



ESTIMATIVA DAS PERDAS DE SOLO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICASOB PROCESSO DE DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

Carla Deisiane de Oliveira Costa¹

Marlene Cristina Alves²

Antônio de Pádua Sousa³

Hélio Ricardo Silva²

Antonio Paz González⁴

José Manuel Mirás Avalos⁴

Samuel Beskow⁵

Artur Pantoja Marques⁶

RESUMO

As perdas de solo e a deposição de sedimentos têm sido a principal causa da degradação ambiental em bacias hidrográficas. Este trabalho teve por objetivo estimar as perdas de solo e a deposição de sedimentos na sub-bacia Jardim Novo Horizonte em diferentes eventos de precipitação, com o intuito de identificar as áreas com maior suscetibilidade à erosão, utilizando como ferramenta o modelo LISEM. Os solos da sub-bacia são o Latossolo Vermelho e o Argissolo Vermelho-Amarelo, ambos de textura média. Para as simulações, foi utilizado o modelo LISEM, sendo coletados dados de intensidade de precipitação dos anos de 2009 a 2012, o qual 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. Estas coletas foram realizadas em dez locais ao longo da sub-bacia, sob as diferentes formas de uso e ocupação do solo, sendo seis localizados no Latossolo e quatro no Argissolo. A sub-bacia Jardim Novo Horizonte apresenta uma alta suscetibilidade a processos erosivos. Há uma relação entre as perdas de solo e deposição de sedimentos com o escoamento superficial e a precipitação total. Os locais mais suscetíveis a processos erosivos correspondem às áreas cultivadas com pastagens, e isso ocorre devido à degradação do solo e manejo inadequado destas áreas. A utilização do modelo na sub-bacia Jardim

¹ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, UEMS – Unidade de Aquidauana, MS, Brasil. E-mail para correspondência: carladeisiane@uems.br.

² Depto. de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, UNESP/FEIS, SP, Brasil.

³ Depto. de Engenharia Rural, UNESP/FCA, SP, Brasil.

⁴ Universidade da Coruña, UDC, Espanha.

⁵ CDTec/Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, RS, Brasil.

⁶ Depto. de Engenharia Civil, UNESP/FEIS, SP, Brasil.

Novo Horizonte foi satisfatória, podendo-se afirmar que este é uma importante ferramenta para estudos diagnósticos de degradação ambiental em bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Erosão Hídrica; Sedimentação; Assoreamento; Degradação dos Recursos Hídricos.

ABSTRACT

Estimate loss of soil and sediment deposition in a sub-basin river in process of environmental degradation. Soil loss and sediment deposition has been the main cause of environmental degradation in sub-basin river. This study aimed to estimate soil loss and sediment deposition in the sub-basin river Jardim Novo Horizonte in different precipitation events, in order to identify areas with higher susceptibility erosion using as a tool the model LISEM. The soils of the sub-basin river are the Oxisol Red and Alfisol Red-Yellow, both of medium texture. For the simulations was used the model LISEM, being collected data about rainfall intensity 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. These collections were made at ten sites along the sub-basin river, in the different forms of soil use and occupation, being six located in the Oxisol and four in the Alfisol. The sub-basin river Jardim Novo Horizonte presents high susceptibility to erosion process. There is a relation between soil loss and sediment deposition with the runoff and total precipitation. The locations more susceptible to erosion processes correspond to the areas cultivated with pasture, and this is due to soil degradation and inadequate management of these areas. The use of model in sub-basin Jardim Novo Horizonte was satisfactory, it can be said that this is an important tool for diagnostic studies of environmental degradation in watersheds.

Keywords: Water Erosion; Sedimentation; Siltation; Degradation of Hydric Resources.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica tem sido a principal causa da redução da capacidade produtiva dos solos, e, além disso, como efeito indireto, causa o assoreamento e a contaminação dos cursos de água devido à produção, transporte e deposição de sedimentos. Desta maneira, estudos realizados com o objetivo de prever tais efeitos e mitigar as suas consequências têm recebido grande importância na comunidade científica. Dentre estes, citam-se os trabalhos desenvolvidos por Beskow *et al.* (2009), Martins *et al.* (2003) e Hesselet *et al.* (2003a).

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 do solo, juntamente com as características topográficas e climáticas, irão determinar o balanço sedimentar da bacia hidrográfica. Além disso, de acordo com Moro (2011), a estimativa da produção de sedimentos, tanto na escala de pequenas como de grandes bacias, é uma informação de fundamental importância para auxiliar na gestão dos recursos naturais, especialmente para fins de qualidade dos cursos de água.

Os modelos de predição de perdas de solos e produção de sedimentos vêm sendo utilizados com o intuito de prever estes fenômenos em uma bacia. Hessel *et al.* (2003a) e Hölzel e Diekkrüger (2012) utilizaram modelos hidrológicos para tal finalidade. De acordo com Merritt *et al.* (2003), existem inúmeros modelos para a estimativa de perdas de solos e produção de sedimentos; geralmente, estes se distinguem em termos de complexibilidade, processos e parâmetros considerados, e dados requeridos para uso, calibração e validação do modelo, sendo que a escolha do mais adequado dependerá da finalidade e das características da área de estudo.

Dentre os modelos que vêm sendo utilizados, pode-se dar destaque ao LISEM (Limburg Soil Erosion Model). De acordo com De Roo *et al.* (1996) e Jetten (2002), 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.* (2003a), Takken *et al.* (1999) e De Roo e Jetten (1999) observaram que a condutividade hidráulica e o teor de água antecedente 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 *et al.* (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.* (2009), a água que infiltra no solo reabastece os aquíferos subterrâneos, da qual dependem 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. De acordo com Pinese Júnior *et al.* (2008), a infiltração de água das chuvas é 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 consequente escoamento superficial, e, 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 (Volkert *et al.*, 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.

A sub-bacia Jardim Novo Horizonte apresenta grande importância, pois está localizada nas proximidades da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, Estado de São Paulo. Esta região apresenta problemas ambientais, como erosão do solo e assoreamento dos rios, além da escassez de cobertura vegetal e mata ciliar. Todos estes problemas foram ocasionados pela falta de planejamento ambiental e pelo manejo inadequado dos recursos naturais desde a construção desta usina hidrelétrica (Costa, 2010).

Este trabalho teve por objetivo estimar as perdas de solo e a deposição de sedimentos na sub-bacia Jardim Novo Horizonte em diferentes eventos de precipitação, com o intuito de identificar as áreas com maior suscetibilidade à erosão utilizando como ferramenta o modelo LISEM.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na sub-bacia hidrográfica Jardim Novo Horizonte, que está localizada no município de Ilha Solteira, noroeste do Estado de São Paulo. Esta sub-bacia possui área de 2.200 ha e altitude média de 320 m, e está localizada entre as coordenadas geográficas 20°22'45,17" e 20°25'47,68" de latitude Sul, e 51°19'9,66" e 51°22'7,17" de longitude Oeste de Greenwich.

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 23°C de temperatura, 1.370 mm de precipitação pluvial e a umidade relativa do ar está entre 70 e 80% (Vanzela, 2003). A

vegetação original da região é de cerrado.

Os solos mais representativos da sub-bacia são: Latossolo Vermelho distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico, representando 70 e 30% da área total (Figura 1A), respectivamente (Queiroz, 2008), ambos de textura média. Quanto à drenagem da sub-bacia, é do tipo dendrítica (Figura 1B).

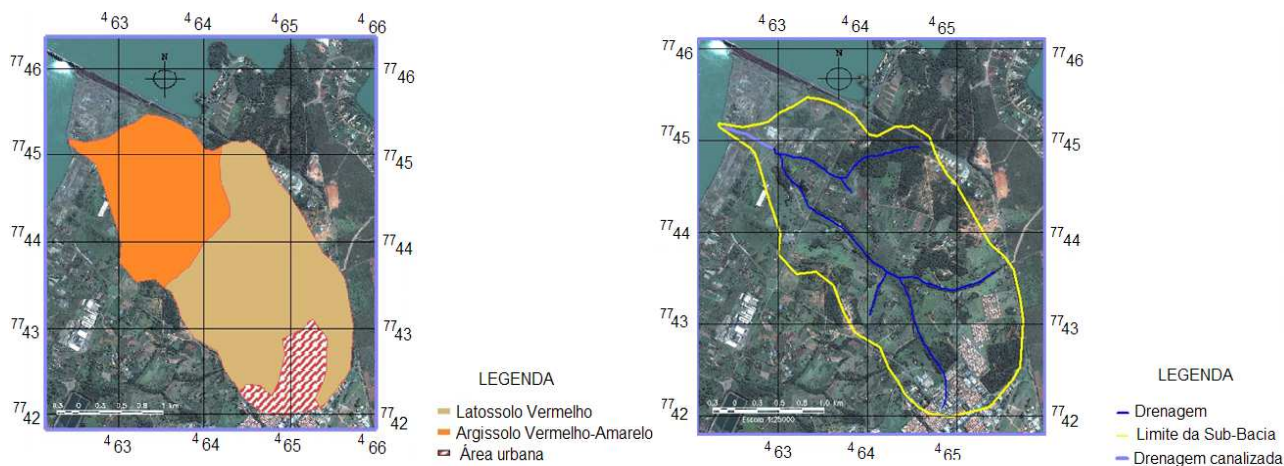


Figura 1. Mapa de solos (A) e Mapa de Drenagem (B) da sub-bacia Jardim Novo Horizonte.

Com relação às classes de uso e de ocupação dos solos, de acordo com Queiroz (2008), aproximadamente 50% do total da área estão ocupadas com pastagens, em pequenas percentagens, com apenas 3,82% encontrando-se com vegetação ciliar; além disso, também em pequenas percentagens, se encontram as culturas anuais (milho) e as culturas perenes (manga), que juntas perfazem 10,8%, área com vegetação nativa de cerrado, com 19,41%, uma pequena área com vegetação natural degradada, com 1,41%, área de propriedade da CESP, com 1,9%, e a área urbana, que representa 10,6%.

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 seis locais no Latossolo Vermelho distrófico e quatro no Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico.

Os usos e ocupações amostrados no Latossolo foram: um local com a cultura da manga (M), quatro locais com pastagens (P_1 , P_2 , P_3 e P_4) e a cultura anual (CA) com solo preparado para a implantação da cultura do milho. No Argissolo, os usos e ocupações foram: dois locais com pastagens (P_{arg1} e P_{arg2}), a cultura anual (CA_{arg}) com solo preparado para a implantação da cultura do milho e área com fragmento de mata (FM) que se encontra em uma área de transição entre o Argissolo e o 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 saturada.

Para realizar as simulações, foi utilizado o modelo LISEM, que simula para um evento de precipitação, as perdas de solo e o transporte de sedimentos. 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 LISEM.

Os parâmetros de entrada analisados foram a condutividade hidráulica, 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 *et al.*(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 Jardim Novo Horizonte.

Parâmetros	Usos do solo			
	Pastagem	Milho	Fragmento de mata	Manga
Profundidade das avaliações (mm)	200,00	200,00	200,00	200,00
*Condutividade hidráulica (mm h^{-1})	1,76	2,78	0,80	0,80
*Umidade antecedente (cm cm^{-3})	0,154	0,163	0,145	0,155
*Diâmetro médio ponderado (D_{50}) (μm)	161,53	186,17	169,63	145,57
*Umidade de saturação (cm cm^{-3})	0,392	0,398	0,43	0,34
**Índice de área foliar (IAF) (m m^{-2})	2,93	2,69	2,80	2,38
**Altura da vegetação (m)	0,20	1,82	6,00	3,55
**Fração do solo coberto por vegetação	1,00	0,35	1,00	0,63
**Coesão das raízes (kPa)	3,32	0,22	1,45	2,08
**Rugosidade (cm)	0,70	1,43	1,36	0,73
**Coef. de Manning	0,23	0,10	0,30	0,30
**Coesão do solo (kPa)	3,55	3,00	12,40	3,73
***Tensão na frente de molhamento (cm)	10,59	6,24	12,50	11,50

*Parâmetros avaliados

**Parâmetros pesquisados na literatura

***Parâmetro calculado

Estes dados foram obtidos dos trabalhos desenvolvidos por Takken *et al.* (1999) e Moro (2011) para coeficiente de Manning e coesão do solo, Takken *et al.* (1999) e Bertol *et al.* (2006) para rugosidade relativa, e de Fagundes *et al.* (2006), Silva (2004), Souza *et al.* (2011), Xavier (2000), Chaves *et al.* (2007) e Andrade Neto *et al.* (2013) para o índice de área foliar, Fagundes *et al.* (2006), Gilo *et al.* (2011), Ramos *et al.* (2001), Oliveira *et al.* (2009), Silva *et al.* (1997) e Moro (2011) para a altura da vegetação, Souza *et al.* (2011), Chaves *et al.* (2007) e Moro (2011) para fração do solo coberto por vegetação, Moro (2011) e Takken *et al.* (1999) para coesão das raízes.

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. A capacidade máxima de interceptação é estimada pela equação de Von Hoyningem-Huene (Jetten, 2002).

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

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

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

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 m^2 de folhas m^{-2} de terreno, k é o fator de correção da densidade de vegetação ($1 - 0,046 \cdot \text{LAI}$), adimensional, 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 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.* (2009), 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 inicial e de saturação.

Para a simulação do escoamento superficial, é utilizado como dados de entrada o coeficiente de Manning, a declividade e a direção dos canais de drenagem (Jetten, 2002), sendo este determinado pela fórmula a seguir.

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

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, S é a declividade do fundo do canal em m m^{-1} .

A simulação da desagregação é baseada em processo de erosão-deposição, onde 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:

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

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 $g\ s^{-1}$, 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:

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

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, A é a superfície sobre o 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, $mm\ h^{-1}$, h é a altura da planta em m.

A desagregação pelo fluxo e a deposição é dada pela equação:

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

Em que D é o D_f ou D_p em $g\ s^{-1}$, Y é o fator de eficiência, adimensional, Tc 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, 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} , Coh é a coesão do solo úmido em kPa.

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

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

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 %, c e d são coeficientes experimentais que dependem do diâmetro médio (D_{50}) do material, determinados pelas fórmulas a seguir.

$$C = \left[\frac{(D_{50}+5)}{0,32} \right] - 0,6 \quad (11)$$

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

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 7,5 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.

Evento de precipitação	Intensidade de precipitação I (mm h^{-1})*	Precipitação total (mm)	Duração (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	

*A intensidade de precipitação refere-se à intensidade máxima observada durante o evento selecionado.

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).

As interceptações simuladas pelo modelo LISEM apresentaram valores próximos em todos os eventos, sendo o maior e o menor valor observado para o evento de maior e menor precipitação total, respectivamente. Observa-se que esta variável está diretamente relacionada com a precipitação acumulada.

Como já comentado anteriormente, a interceptação é dependente, além da precipitação, dos dados de índice de área foliar (IAF) e da fração do solo coberto pela vegetação, observando os maiores valores destas variáveis para a pastagem, sendo esta, presente na sub-bacia em 50%, o que explica um nível máximo de interceptação em todos os eventos analisados.

Tabela 3. Principais componentes do ciclo hidrológico simulados pelo modelo LISEM.

Evento de precipitação*	Interceptação total	Infiltração total	Escoamento superficial	Escoamento/Precipitação
	(mm)	(mm)	(mm)	(%)
15/01/2009	2,02	27,12	28,88	49,74
28/03/2009	1,92	24,05	16,45	38,79
10/12/2009	2,01	31,15	23,47	41,44
01/01/2010	2,03	30,71	29,49	47,36
20/05/2010	2,02	24,26	33,16	55,77
20/11/2010	2,05	31,20	40,66	54,99
08/03/2011	2,06	48,07	26,05	34,20
12/04/2011	2,05	34,66	36,10	49,52
12/03/2012	2,01	28,91	26,22	45,85
28/05/2012	2,08	51,65	330,32	86,00
Média	2,03	33,18	59,08	50,37

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

Gomes (2008), estudando uma pequena bacia hidrográfica localizada em São João Del Rei - MG, cultivada com pastagem, café e milho, e uma área com mata, observou para quatro eventos analisados, uma média de interceptação igual a 1,18 mm, menor que a média observada para a sub-bacia Jardim Novo Horizonte, de 2,03 mm. De acordo com o mesmo, este contexto reflete as condições atuais da bacia hidrográfica, devido à taxa de uso e ocupação de seus solos, o estado de degradação de suas pastagens e a falta de mata de cabeceira no terço superior dos morros e entorno de suas nascentes, além da ausência de mata ciliar, ou seja, a microbacia estudada por ele apresenta maiores impactos, devido ao estado de degradação ambiental da mesma, o que caracteriza menor interceptação pela vegetação em relação à sub-bacia estudada.

Para a infiltração, o maior valor foi observado para o evento com maior intensidade de precipitação, precipitação acumulada e interceptação, pois mesmo para este evento com a maior

intensidade, a vegetação permite que maior lâmina de água seja interceptada e atinja a superfície do solo, havendo, por isso, maior infiltração.

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 média, o que proporciona alta permeabilidade. Além disso, os altos valores de tensão na frente de molhamento caracteriza um solo seco, apresentando baixos teores de água inicial, o que proporciona uma tendência a um valor máximo de infiltração em todos os eventos.

Gomes (2008), estudando uma bacia de 470 ha, com Latossolo, Cambissolo e solos hidromórficos, observou para quatro eventos analisados uma média de infiltração igual a 24,44 mm, menor que a média observada para a sub-bacia Jardim Novo Horizonte, de 33,18 mm. Isso ocorreu devido aos tipos de solos da microbacia estudada por Gomes (2008) serem diferentes desta sub-bacia, e, além disso, se enquadrarem entre textura argilosa a muito argilosa. Solos de textura argilosa possuem, em geral, menor quantidade de macroporos do que os de textura arenosa, apresentando menor permeabilidade.

O escoamento superficial é dependente da intensidade e duração da precipitação e também da precipitação acumulada, apresentando um valor de 330,32 mm para o evento do dia 28/05/2012, sendo o maior valor observado para o período analisado. Foi observado um valor médio de escoamento superficial para os 10 eventos de 59,08mm.

Rodrigues (2011), utilizando o modelo LISEM para a simulação em uma pequena bacia localizada em Eldorado do Sul - RS, com área de 94,46 ha, com solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Planossolo, cultivada com povoamentos de eucalipto e áreas de preservação permanente, observou para seis eventos analisados, uma média de escoamento superficial igual a somente 3,74 mm, sendo inferior ao valor encontrado para a sub-bacia Jardim Novo Horizonte, podendo ser atribuído à cobertura vegetal, em que predominam cobertura florestal.

Além disso, a sub-bacia Jardim Novo Horizonte possui maior área que a microbacia estudada por Rodrigues (2011), e, portanto, maior área de contribuição. O mesmo, 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.

Há uma grande relação entre o escoamento superficial e a precipitação, sendo este bastante dependente da intensidade e do volume total precipitado, sendo a intensidade de precipitação o fator mais determinante. Rodrigues (2011) observou que o evento com maior precipitação total não resultou no maior escoamento superficial, e isso ocorreu devido à menor intensidade de precipitação

e pelo seu maior tempo de duração, sendo possível perceber que as precipitações mais intensas e mais concentradas são as que geram maiores escoamentos.

Em estudo realizado em três bacias da Holanda utilizando o modelo LISEM, Van Dijk e Kwaad (1996) observaram que os maiores valores de escoamentos nem sempre coincidem com períodos mais longos de precipitação, e isso depende da época do ano, do teor de água antecedente, das condições de solos e do tipo e grau de cobertura vegetal. Com isso, observa-se que os processos erosivos dependem de diversos fatores e não só de um de maneira isolada.

A maior intensidade de precipitação, com $106,68 \text{ mm h}^{-1}$, ocasionou maior percentagem de escoamento, com 86%, ou seja, do total precipitado, 86% escorre sobre a superfície do solo. A maior intensidade de precipitação promove menor infiltração, pois, sob precipitações intensas, o solo não consegue infiltrar toda a água precipitada. Além disso, a intensidade de precipitação influi na formação do selamento superficial, causado pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo. Quanto mais intensa for a precipitação, maior será este risco, devido ao maior diâmetro das gotas e, conseqüentemente, maior energia cinética.

Observam-se maiores percentagem de escoamento superficial em relação à infiltração de água no solo em três eventos, sendo estes os de maiores intensidades de precipitação e precipitação acumulada, caracterizando a grande relação entre o escoamento superficial e o evento de precipitação.

O escoamento superficial é dependente, além da precipitação, dos dados de coeficiente de Manning, que, de acordo com Hessel *et al.* (2003b), 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.

Observa-se que, para os usos presentes na sub-bacia estudada, os valores deste coeficiente foram próximos em todos os usos do solo, com exceção do milho que estava com solo recentemente preparado, por isso apresentando um menor valor. Os valores de coeficiente de Manning utilizados neste trabalho foram semelhantes e próximos aos utilizados por outros autores para a cobertura vegetal de florestas, em que Gomes (2008) utilizou o valor de coeficiente de Manning de 0,30, mostrando para este parâmetro de entrada uma boa proteção aos solos quanto ao escoamento superficial.

Para a desagregação, perdas de solo e deposição de sedimentos estimados pelo modelo LISEM, também se observam maiores valores para o evento do dia 28/05/2012 (Tabela 4), observando uma relação entre estas variáveis e o escoamento superficial.

Tabela 4. Perdas de solos e deposição de sedimentos simulados pelo modelo LISEM.

Evento de precipitação*	Desagregação pela gota de chuva	Desagregação pelo fluxo	Deposição de sedimentos	Perda de solo
	(t ha ⁻¹)			
15/01/2009	0,21	47,93	44,83	48,14
28/03/2009	0,14	28,25	26,86	28,39
10/12/2009	0,17	37,86	35,50	38,03
01/01/2010	0,19	48,20	44,85	48,39
20/05/2010	0,22	57,90	53,93	58,12
20/11/2010	0,28	63,10	58,40	63,38
08/03/2011	0,21	40,70	38,55	40,91
12/04/2011	0,25	55,13	51,19	55,38
12/03/2012	0,20	40,00	37,41	40,20
28/05/2012	1,18	416,16	364,86	417,34
Média	0,31	83,52	75,64	83,83

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

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 um nível máximo em todos os eventos analisados.

A desagregação pelo fluxo é dependente da coesão e do diâmetro médio do material (D_{50}). Com relação a estes dados, a coesão do solo apresenta para os usos da sub-bacia estudada valores baixos, somente a área com fragmento de mata apresenta o maior valor, e, devido à sub-bacia possuir pouca cobertura florestal, há uma maior tendência à desagregação pelo fluxo.

Além disso, apresenta altos valores de D_{50} devido aos solos serem de textura média, ou seja, quanto maior a percentagem de areia do solo, maior será o seu diâmetro médio, 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.

Verificou-se em todos os eventos que o processo de erosão dominante na vertente da sub-bacia é a desagregação pelo fluxo devido aos maiores valores observados em relação à desagregação pelo impacto de gotas de chuva. A desagregação média pelas gotas de chuva observada para os 10 eventos foi de $0,31 \text{ t ha}^{-1}$, e a desagregação média gerada pelo fluxo foi de $83,52 \text{ t ha}^{-1}$.

Moro (2011) e Takken *et al.* (1999) também observaram maior desagregação pelo fluxo. Os mesmos observaram uma média de 0,25 e 0,43 t ha⁻¹ para a desagregação pela gota de chuva e 16,86 e 37,97 t ha⁻¹ pelo fluxo, respectivamente. Mas estas variáveis são bastante dependentes do uso e ocupação do solo, pois algumas coberturas vegetais proporcionam maior proteção ao solo e, conseqüentemente, menor desagregação pelas gotas de chuva, conforme observado nesta pesquisa e nos trabalhos citados.

Os resultados observados indicam que os agregados dos solos da sub-bacia Jardim Novo Horizonte são estáveis devido principalmente à presença de pastagens, que representam 50% da área da sub-bacia, o que ocasionou menores valores de desagregação pelo impacto da gota de chuva, pois a maior estabilidade dos agregados proporciona maior resistência ao impacto das gotas.

Com relação às perdas de solo, o valor médio observado para a sub-bacia Jardim Novo Horizonte foi de 83,83 t ha⁻¹. As perdas de solo correspondem ao somatório entre a desagregação pelo impacto da gota de chuva e pelo fluxo, e está diretamente relacionada ao escoamento superficial, conforme já relatado, observando maiores valores de perdas de solo aos eventos com maior escoamento superficial.

Moro (2011) classificou as perdas de solo para cada evento analisado pelo modelo LISEM, sendo considerado que perdas de solo menor que 1 t ha⁻¹ é baixa, de 1 a 10 t ha⁻¹ é média, de 10 a 100 t ha⁻¹ é alta e maior que 100 t ha⁻¹ é muito alta. Considerando esta classificação, observa-se para as perdas de solo da sub-bacia Jardim Novo Horizonte que estas foram altas para nove dos dez eventos analisados, e muito alta para o evento do dia 28/05/2012.

Para a deposição, foi observado, para a sub-bacia Jardim Novo Horizonte, um valor médio igual a 75,64 t ha⁻¹. A deposição de solo é dependente, assim como a desagregação pelo fluxo, da coesão e do diâmetro médio do material (D₅₀). Conforme já comentado, os usos presentes na sub-bacia apresentam baixos valores de coesão do solo e altos diâmetros médios, caracterizando maior produção de sedimentos devido a sua maior suscetibilidade à erosão.

Estes maiores diâmetros médios das partículas de solo se caracterizam como 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.

De acordo com a classificação de Moro (2011) para a deposição de sedimentos, observa-se que, na sub-bacia Jardim Novo Horizonte, assim como para as perdas de solo, esta foi alta para nove dos dez eventos analisados, e muito alta para o evento do dia 28/05/2012, correspondendo aos maiores valores de desagregação dos solos neste evento, observando a relação entre as perdas de solo e a deposição de sedimentos.

Pode se observar para a sub-bacia estudada altos valores de deposição, mesmo para os eventos de baixa intensidade de precipitação, confirmando o fato do assoreamento dos cursos de água desta. Verifica-se que a maior parte dos solos perdidos pela erosão ficam depositados nos leitos dos cursos de água da sub-bacia durante o transporte, e pequena parte continua sendo transportado, o que caracteriza o estado de assoreamento dos seus corpos de água.

Isso pode ser observado na figura 2, na qual são apresentados os mapas de perdas de solo e deposição de sedimentos da sub-bacia Jardim Novo Horizonte. De acordo com os mapas, pode-se observar que os processos erosivos ocorrem em regiões próximas aos cursos de água, e que a deposição predominou no canal fluvial e nas áreas próximas a este. Moro (2011) também observou que os mapas distribuídos de perdas de solo e deposição de sedimentos indicaram que os valores mais elevados estão próximos ao canal fluvial.

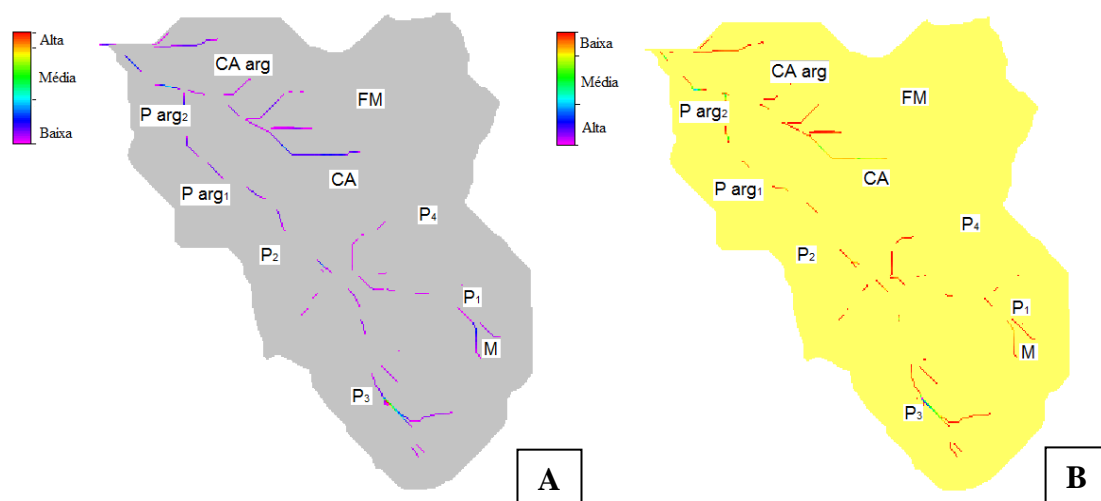


Figura 2. Mapa de perdas de solo (A) e de deposição de sedimentos (B) simulados pelo modelo LISEM. Latossolo: M = Cultura da manga, P₁, P₂, P₃ e P₄ = Pastagem, e CA = Cultura anual. Argissolo: FM = Área com fragmento de mata, P_{arg1} e P_{arg2} = Pastagem e CA_{arg} = Cultura anual.

Para todos os eventos, os processos que causam baixas perdas de solo ocorrem em toda a sub-bacia, os que causam médias perdas de solo ocorrem em pequenas áreas próximas à foz no Argissolo. Na parte superior, no Latossolo, nas proximidades da nascente, ocorrem entre média e alta perda de solo.

Observa-se que o mapa de deposição apresentou semelhanças com o mapa de perdas de solos, sendo a deposição baixa na maior parte da sub-bacia, entre média e alta em pequenas áreas próximas à foz, e alta na parte superior próxima à nascente.

Estes pontos com média e alta perdas de solo e deposição de sedimentos correspondem às áreas cultivadas com pastagens, e isso ocorre devido à degradação da pastagem e manejo

inadequado destas áreas. Com isso, observa-se a necessidade de adoção de medidas quanto ao manejo destas, uma vez que as pastagens representam 50% da área total da sub-bacia.

CONCLUSÕES

A sub-bacia Jardim Novo Horizonte apresenta uma alta suscetibilidade a processos erosivos, pois apresentou altas perdas de solo e deposição de sedimentos, mesmo nos eventos de menor intensidade de precipitação. Observa-se a relação existente entre as perdas de solo e deposição de sedimentos com o escoamento superficial e a precipitação em todos os eventos analisados.

Os locais apontados pelos mapas gerados pelo modelo como mais suscetíveis a processos erosivos correspondem às áreas cultivadas com pastagens, e isso ocorre devido à degradação do solo e manejo inadequado destas áreas, observando a necessidade de adoção de medidas de manejo e conservação do solo nestas áreas.

A utilização do modelo na sub-bacia Jardim Novo Horizonte foi satisfatória, pois os resultados obtidos estão coerentes com o que foi observado durante as coletas de campo. Além disso, os mapas gerados pelo modelo apontaram de forma adequada e coerente os locais suscetíveis aos processos erosivos, podendo-se afirmar que este é uma importante ferramenta para estudos diagnósticos de degradação ambiental em bacias hidrográficas, devido ao fato de refletir resultados para um evento isolado de precipitação.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, V. R. et al. 2013. Índice de área foliar em mudas clonais de *Eucalyptus* sp. **Scientific Electronic Archives**, 2:6-9.
- ASTON, A. R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. **Journal of Hydrology**, 42:383-396.
- BERTOL, I. et al. 2006. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:543-553.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 2010. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 355p.
- BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. 120p.
- CHAVES, R. A. et al. 2007. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Árvore**, 31:989-998.

- COSTA, C. D. O. 2010. **Escoamento superficial e risco de erosão do solo na sub-bacia Jardim Novo Horizonte, Município de Ilha Solteira-SP**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, 88p.
- DE ROO, A. P. J. et al. 1996. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. **Hydrological Processes**, **10**:1107-1117.
- DE ROO, A. P. J.; JETTEN, V. 1999. Calibrating and validating the LISEM model for data sets from the Netherlands and South Africa. **Catena**, **37**:477-493.
- FAGUNDES, J. L. et al. 2006. Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, **35**:21-29.
- GILO, E. G. et al. 2011. Comportamento de híbridos de milho no cerrado sul-matogrossense, sob diferentes espaçamentos entre linhas. **Bioscience Journal**, **27**:908-914.
- GOMES, N. M. 2008. **Aplicação do LISEM (LimburgSoilErosionModel) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, 191p.
- GOVERS, G. 1990. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. **IAHS**, **189**:45-63.
- HESSEL, R. et al. 2003a. Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment. **Catena**, **54**:289-302.
- HESSEL, R.; JETTEN, V.; GUANCHUI, Z. 2003b. Estimating Manning's for steep slopes. **Catena**, **54**:77-91.
- HÖLZEL, H.; DIEKKRÜGER, B. 2012. Predicting the impact of linear landscape elements on surface runoff, soil erosion, and sedimentation in the Wahnbach catchment, Germany. **Hydrological Processes**, **26**:1642-1654.
- JETTEN, V. 2002. **LISEM user manual**, version 2.x. Netherlands: Utrecht University, 48p.
- MARTINS, S. G. et al. 2003. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **27**:395-403.
- MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. 2010. Análise da influência do teor de umidade na absorção de água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**, **29**:211-228.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, **18**:761-799.
- MORO, M. 2011. **Avaliação do modelo LISEM na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do Rio**

Grande do Sul. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 123p.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. 2008. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **32**:2839-2845.

OLIVEIRA, T. K. et al. 2009. Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, **60**:1-9.

PINESE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, L. M.; RODRIGUES, S. C. 2008. Monitoramento de erosão laminar em diferentes usos da terra. **Revista Sociedade Natureza**, **20**:157-175.

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

QUEIROZ, H. A. 2008. **Caracterização fisiográfica e de alguns atributos físicos e químicos dos solos da microbacia Jardim Novo Horizonte, em Ilha Solteira, SP.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho", 61p.

RAMOS, V. H. V.; PINTO, A. C. Q.; GOMES, A. C. 2001. Avaliação de sete porta-enxertos mono e poliembriônicos sob quatro cultivares de mangueira no cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, **23**:622-629.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SONI, B. 1983. Agricultural management effects on soil water process Part I: Soil water retention and green and ampt infiltration parameters. **Transactions American Society Agricultural Enginner**, **26**:1747-1752.

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

SILVA, W. et al. 1997. Altura e diâmetro de *Eucalyptus citriodora* e *E. grandis*, submetidos a diferentes teores de água em convivência com *Brachiaria brizantha*. **Floresta**, **27**:3-16.

SILVA JÚNIOR, O. B. et al. 2004. Efeito do uso de solo nos eventos de cheia em micro e meso escalas: bacia do Potiribu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, **9**:153-164.

SILVA, F. A. M. 2004. **Parametrização e modelagem do balanço hídrico em sistema de plantio direto no cerrado brasileiro.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 193p.

TAKKEN, I. et al. 1999. Spation evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, **37**:431-447.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J. 2007. Amazônia, deflorestamento e água. **Ciência Hoje**, **40**:31-37.

VAN DIJK, P. M.; KWAAD, F. J. P. M. 1996. Runoff generation and soil erosion in small agricultural catchments with loess-derived soils. **Hydrological Processes**, **10**:1049-1059.

VANZELA, L. S. 2003. Caracterização da microbacia do cinturão verde de Ilha Solteira – para fins de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2003, Goiânia. CD/ROM.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. 2009. 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**, **33**:1459-1471.

XAVIER, A. C. 2000. **Estimativa da dinâmica do índice de área foliar em uma microbacia hidrográfica por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 111p.