

Simulação de perdas de solo em função de cenários de adequação ambiental em microbacias agrícolas

Simulation of soil losses according to environmental adequacy law scenarios in agricultural catchments

Silvio Frosini de Barros Ferraz¹, Matheus Fernando Pereira², Felipe Rosetti de Paula³, Carlos Alberto Vettorazzi⁴ e Clayton Alcarde Alvares⁵**Resumo**

A retirada da cobertura florestal e introdução de culturas agrícolas no Estado de São Paulo vêm aumentando os processos de perdas de solo, principalmente em locais de solos susceptíveis em que não são adotadas práticas conservacionistas. A adequação de propriedades com o reflorestamento das Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal é considerada como potencial fator de redução das perdas de solo e baseando-se nisto, este projeto teve como objetivo a avaliação das perdas de solo em função de diferentes cenários de adequação ambiental. Foram realizadas simulações de processos erosivos em 15 microbacias pertencentes à bacia do rio Corumbataí, SP, considerando a situação atual do uso e cobertura do solo e diferentes cenários de reflorestamento, visando a analisar o potencial benefício obtido pela aplicação parcial do Código Florestal vigente. Os cenários incluem a restauração florestal em Áreas de Proteção Permanente (APP), Áreas Hidrologicamente Sensíveis (AHS) e dois cenários com a restauração florestal da Reserva Legal em 20% de cada microbacia, sendo um deles estabelecido para as áreas mais críticas em termos de erosão e o outro aleatoriamente distribuído na paisagem. Observou-se que para as condições testadas, os estabelecimentos de APP e de AHS ofereceram pequena contribuição para o controle dos processos erosivos, implicando em uma redução de 10% e 7,4%, respectivamente, enquanto que a restauração da Reserva Legal em áreas críticas resultou na expressiva redução de 69,8%. O cenário aleatório, por sua vez, implicou em redução de 21,4%. Os resultados obtidos indicam que a restauração de florestas nas propriedades pode reduzir as perdas de solos, mas estudos prévios de priorização de áreas e planejamento aumentam significativamente a sua eficiência neste processo.

Palavras-chave: Erosão; Recomposição florestal; EUPS

Abstract

In São Paulo state, deforestation and agriculture activities are increasing soil losses processes, especially in areas of susceptible soils where soil conservation practices are not adopted. Environmental adequacy at property level regarding Permanent Protection Areas and Legal Reserves is considered a potential factor for reducing soil losses and it was based on this fact that we assessed soil losses of different scenarios of environmental adequacy. Simulations of erosive processes were carried out in 15 catchments of the Corumbataí river basin, with different forest restoration scenarios, as well as the current situation of land use/land cover. The scenarios include reforestation of Permanent Preservation Areas (PPA); the reforestation hydrological sensitive areas; and two scenarios, the Legal Reserve installation in 20% of each catchment, being one of them for most critical areas in terms of erosion and the other at random. It was observed that the establishment of PPA and the reforestation of hydrological sensitive areas (HSA), offered a small contribution to the control of the erosive process, resulting in a reduction of 10% and 7.4%, respectively, while the legal reserve in critical areas has the significant reduction of 69.8%. The random scenario, in turn, resulted in a reduction of 21.4% of erosion. Results show that reforestation can reduce soil losses, but previous studies of land prioritization and planning could significantly increase its efficiency.

Keywords: Erosion; reforestation; USLE

¹Professor Doutor. USP – Universidade de São Paulo, ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Florestais. Av. Pádua Dias 11, Agronomia, 13488-900, Piracicaba/SP. Email: silvio.ferraz@usp.br

²Engenheiro Ambiental. UNESP - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro. Av. 24 A, 1515 - 13506-900, Rio Claro - SP

³Estudante de pós-graduação. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro. Av. 24 A, 1515 - 13506-900, Rio Claro - SP

⁴Professor Associado. Universidade de São Paulo, ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Engenharia Rural. Av. Pádua Dias 11, Agronomia, 13488-900, Piracicaba/SP. Email: cavettor@usp.br

⁵Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) e Forest Productivity Cooperative (FPC).. Avenida Comendador Pedro Morgante, 3500. 13415-000, Piracicaba – SP. e-mail: clayton@ipef.br

INTRODUÇÃO

Diversas atividades humanas aceleram o processo erosivo de maneira significativa, ao deixar o solo exposto após a remoção da cobertura vegetal natural, ou alterar o fluxo de águas superficiais pela construção de obras. O agravamento do processo erosivo gera conseqüências para o ambiente como o assoreamento e a poluição de cursos d'água (JULIEN, 2010). Além disso, existem outros danos decorrentes do aumento na intensidade dos processos erosivos, tais como comprometimento da capacidade produtiva do solo e prejuízos na produção de alimentos (DAILY *et al.*, 1998; MORETI, 2003).

Várias medidas preventivas podem ser tomadas para evitar processos erosivos, como o plantio em nível, terraceamento, construção de estruturas para desvio da água de estradas, preservação da vegetação nativa nas áreas declivosas e margens de cursos d'água (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; GONÇALVES, 2002). Outros recursos têm sido importantes também para minimizar o problema, como a adubação verde (DERPSCH *et al.*, 1990), preparo reduzido do solo e semeadura direta (COGO *et al.*, 2003; AMARAL *et al.*, 2008).

No entanto, uma das principais medidas de controle da erosão hídrica consiste no aumento da biomassa vegetal, tanto na superfície, aumentando a infiltração (OLIVEIRA *et al.*, 2001), e subterrânea, com o aumento da estabilidade da ligação das partículas de solo (VOLK; COGO, 2008). O aumento da vegetação pode ser obtido pela implementação de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reservas Legais (RL), obrigatórias segundo o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 1965). Outras áreas também são consideradas sensíveis ao processo erosivo, como as Áreas Hidrológicamente Sensíveis (AHS), que são zonas dinâmicas de saturação hídrica, sendo, portanto, sujeitas aos processos de escoamento superficial (AGNEW *et al.*, 2006).

A implementação das áreas de APP e RL tem sido impulsionada pela pressão exercida pelos órgãos públicos, disponibilização de recursos pelos comitês de bacias e cobrança pelo uso da água (BRASIL, 1997). Além disso, o investimento em novos empreendimentos de produção de álcool e as perspectivas de exportação de biocombustíveis têm levado as usinas a aumentar o investimento na área ambiental, priorizando projetos de adequação ambiental (JACOVINE *et al.*, 2009). A aplicação de tais

medidas na bacia do Corumbataí, a princípio, parece ser promissora, uma vez que, de acordo com CBH-PCJ (2004) e Silva *et al.* (2007; 2011), a sua área é classificada como crítica em relação aos processos erosivos.

A predição de processos erosivos por meio de modelos numéricos iniciou-se em 1940, quando Zingg (1940) propôs uma equação que relacionava as perdas de solo com a declividade e o comprimento da vertente. Em seguida, foram acrescentados os fatores de influência da cobertura do solo e de práticas conservacionistas e, posteriormente, o fator chuva, os solos e o seu manejo (CORRÊA, 2005). Com base nessas variáveis Wischmeier e Smith (1978) desenvolveram a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), com a qual estimam-se as perdas anuais de solo pela multiplicação dos fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, relevo, uso do solo e práticas conservacionistas. Trata-se de um modelo empírico, baseado em um grande número de estudos nos Estados Unidos, e relatos indicando que ele é o mais utilizado para se prever a erosão decorrente da ação da chuva (KINNELL, 2004). A adoção de modelos matemáticos para a predição de processos erosivos visa à determinação das medidas preventivas, sendo que a possibilidade de análise de cenários distintos tem sido útil para uma melhor compreensão dos processos em função de mudanças no uso do solo (MACHADO *et al.*, 2003).

Apesar de conhecidos os benefícios da restauração florestal para conter os processos erosivos, ainda faltam estudos mais detalhados sobre a influência da distribuição espacial da cobertura florestal na redução dos processos erosivos. A modelagem espacial de processos erosivos tem se intensificado nas últimas décadas, apoiada em Sistemas de Informações Geográficas (MITASOVA *et al.*, 1996), e com a elaboração de modelos especialmente desenvolvidos para modelagem hidrológica, como o SWAT, que permite a simulação de diferentes processos físicos em bacias hidrográficas, visando a analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e qualidade da água em bacias hidrográficas (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).

A geração de cenários de uso e cobertura do solo, úteis como entrada em modelos hidrológicos, bem como de mapas de áreas prioritárias, sensíveis, de risco etc., tem sido bastante facilitada pela utilização de Sistema de Informação Ge-

ográfica (SIG). Vettorazzi (2006) analisou o emprego da Avaliação Multicritérios, em ambiente SIG, na geração de mapas de áreas prioritárias à restauração florestal, na bacia do rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos, por meio da redução do processo erosivo.

Considerando a potencialidade da restauração das Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal para redução de processos erosivos, o objetivo deste trabalho foi avaliar as perdas de solo em microbacias hidrográficas, em função de diferentes cenários de adequação ambiental.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia do rio Corumbataí possui uma área de aproximadamente 171 Km², localizada na porção centro-leste do Estado de São Paulo, entre as latitudes 22° 04'46" S e 22° 41'28" S e entre os meridianos 47° 26'23" W e 47° 56'15" W. A precipitação anual na bacia varia de 1300 mm a 1390 mm (Figura 1) (Brasil, 1992).

Os solos predominantes são os Argissolos (46,21%), Latossolos (30,14%) e Neossolos (22,66%) (Vettorazzi, 2006). As principais categorias de uso e cobertura do solo na bacia são a cana-de-açúcar (25,7%) e a pastagem (43,7%) (Valente e Vettorazzi, 2005). A cobertura florestal nativa é composta por diferentes tipos fitofisionômicos, como floresta estacional semi-decidual, florestas ripárias, florestas paludosas,

floresta estacional decidual e cerrado (RODRIGUES, 1999; IF, 2005). Entretanto, observa-se um elevado nível de fragmentação e degradação da cobertura florestal original, em função de um processo desordenado de uso e ocupação do solo iniciado no final do século XVIII. Desse modo, os remanescentes florestais encontram-se bastante degradados e fragmentados, ocupando apenas 11% da área da bacia, sendo neste pequeno percentual que se encontram as matas ripárias, restritas às áreas de terreno declivoso e próximas aos corpos d'água (VALENTE; VETTORAZZI, 2005). Para este estudo foram selecionadas 15 microbacias de terceira ordem (Figura 1), em diversas situações de cobertura com vegetação natural (Tabela 1).

Base cartográfica

Para cada microbacia foram realizados mapeamentos detalhados baseados em mapas planialtimétricos (Instituto Geográfico e Cartográfico - SP, escala 1:10.000) por meio da vetorização das curvas de nível com equidistância vertical de 5 metros, pontos cotados do terreno, cursos d'água e nascentes. As microbacias foram delimitadas por análise visual das curvas de nível.

Utilizando fotografias aéreas (Instituto Florestal - SP, escala 1:30.000, ano de 2002) foram realizadas correções no traçado da hidrografia e foram digitalizados os polígonos de uso do solo delimitados por meio de fotointerpretação (PAULA et al., 2011).

Tabela 1. Características da distribuição de áreas nas microbacias estudadas: Áreas de Preservação Permanente (APP), Reserva Legal (RL) e áreas de floresta natural em cada um desses locais. Os valores de áreas de Reserva Legal (RL) foram obtidos considerando-se 20% da área da microbacia

Table 1. Characteristics of the area distribution of studied catchments: Permanent Preservation Areas (APP), Legal Reserves (RL) and natural forest areas at each location. Area values of Legal Reserves (RL) were obtained considering 20% of catchment area. Calculated areas for catchments; Permanent Preservation Area and Legal Reserves; as well as areas of natural forest, in each of those locations.

Microbacia	Área Total (ha)	Área Florestal Total (ha)	APP (ha)	Área de floresta na APP (ha)	Déficit de floresta na APP (ha)	Área de RL potencial (ha)	Área deflorestada na RL (ha)	Déficit Floresta RL (ha)
60	216,0	18,3	50,1	8,6	41,5	43,2	9,7	33,5
76	300,5	59,0	72,7	33,2	39,5	60,1	25,8	34,3
88	194,0	27,9	58,1	18,5	39,6	38,8	9,4	29,4
142	215,2	30,8	46,1	9,7	36,5	43,0	21,1	21,9
315	229,7	92,1	31,9	24,1	7,8	45,9	68,0	-22,1
403	289,0	64,9	54,2	25,2	29,0	57,8	39,7	18,1
413	444,1	103,6	71,5	29,6	41,8	88,8	73,9	14,9
485	472,7	149,2	86,7	46,3	40,3	94,5	102,9	-8,3
508	301,3	157,1	74,9	56,6	18,3	60,3	100,5	-40,3
634	256,3	67,7	44,5	31,7	12,8	51,3	36,0	15,3
648	586,7	252,2	158,6	106,4	52,2	117,3	145,8	-28,5
999	98,8	24,9	29,0	15,9	13,0	19,8	9,0	10,8
1003	284,1	128,4	73,9	50,2	23,8	56,8	78,2	-21,4
1015	537,2	141,0	113,0	49,7	63,2	107,4	91,3	16,1
1026	404,3	94,9	80,6	18,5	62,1	80,9	76,4	4,5

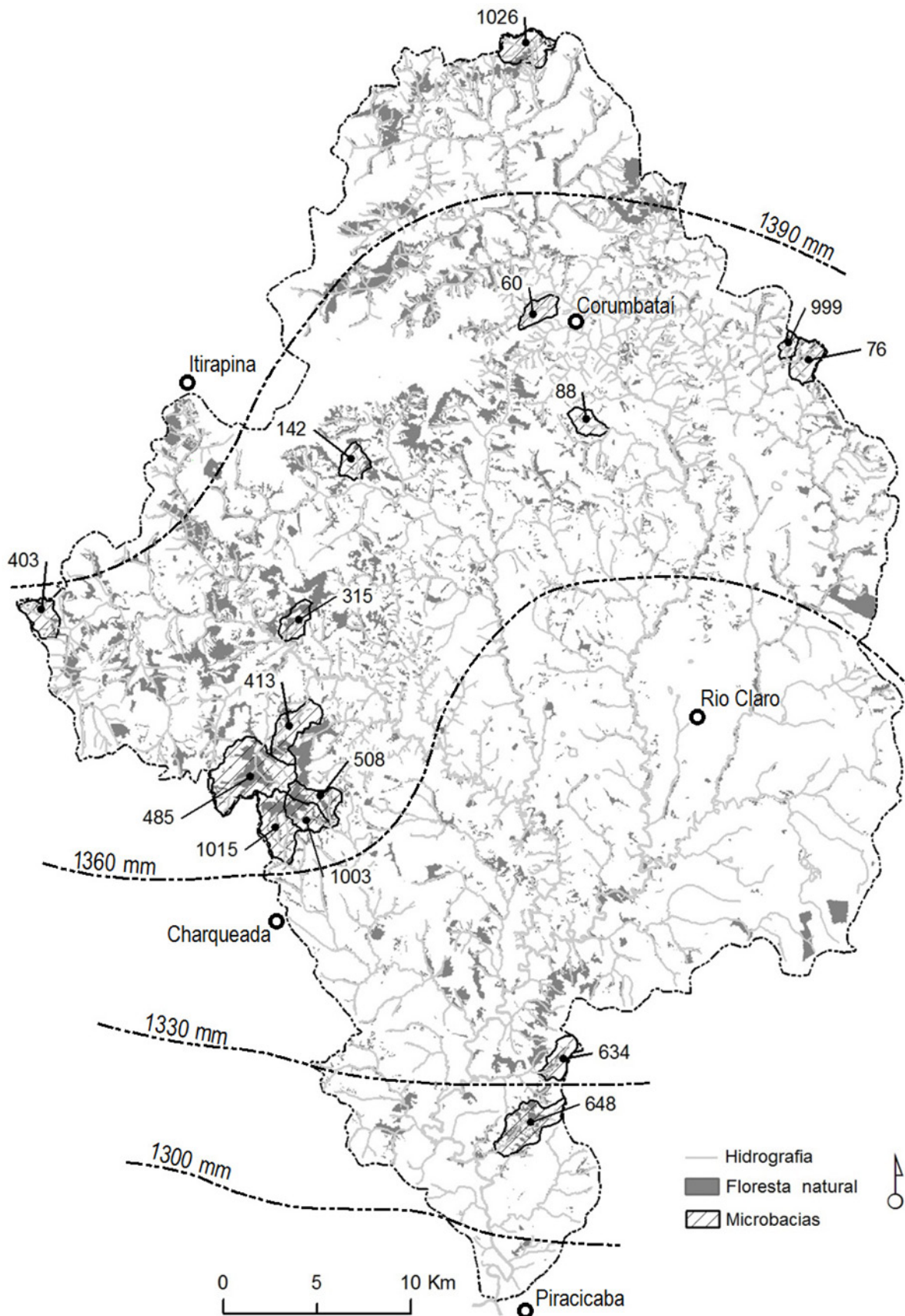


Figura 1. Bacia do rio Corumbataí, destacando-se as áreas de floresta natural remanescentes (VALENTE e VETTORAZZI, 2005), as isoietas anuais, sede dos principais municípios e os limites das 15 microbacias estudadas.
Figure 1. Corumbataí River Basin, highlighting the areas of remaining natural forest (VETTORAZZI and VALENTE, 2005), annual precipitation, main municipalities and limits of 15 studied catchments.

Para a obtenção dos tipos de solo da região, foram utilizadas as quadrículas de São Carlos (PRADO et al., 1981), Araras (OLIVEIRA et al., 1982) e Piracicaba (OLIVEIRA; PRADO, 1991), do Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo.

Toda a manipulação dos mapas foi realizada com auxílio do ArcGIS 9.2, sendo todos os mapas padronizados no sistema de coordenadas UTM 23S. Com base no mapa de altimetria foi produzido um Modelo Digital do Terreno (MDT), por meio de rede irregular de triângulos (TIN), o qual foi convertido para o formato *raster* (resolução espacial de 5 metros), para a obtenção dos mapas de declividade (%) e aspecto, necessários para o cálculo do fator topográfico.

Cálculo da perda potencial de solos

A estimativa de perda anual de solos (A) foi obtida por meio da multiplicação de quatro fatores, conforme a Equação Universal da Perda de Solos (WISCHMEIER; SMITH, 1978):

$$A = R \times K \times LS \times CP$$

sendo:

A = taxa de perda de solo ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$)

R = fator de erosividade da chuva ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$);

K = fator de erodibilidade do solo ($t\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$);

LS = fator topográfico (adimensional);

CP = fatores de uso e conservação do solo (adimensional).

O fator de erosividade da chuva foi calculado através da equação (LOMBARDI NETO; MOLDENHAUER, 1992):

$$R = 68,73 \times (r^2/p)^{0,841}$$

sendo:

R = média mensal do índice de erosão ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$);

r = precipitação média mensal (mm);

P = precipitação média anual (mm).

Foram utilizados dados pluviométricos provenientes do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH-SP) para um período de 40 anos nos municípios de Rio Claro, Piracicaba, Charqueada, Analândia, Corumbataí, Ipeúna, Itirapina e Santa Gertrudes, sendo adotado para a microbacia o valor da estação mais próxima. O valor anual da erosividade

para cada município foi obtido, através da soma dos valores de EI de cada mês.

Os valores do fator de erodibilidade do solo (Fator K) utilizados foram extraídos do banco de dados sobre a erodibilidade dos solos paulistas elaborado por Silva e Alvares (2005). Os solos predominantes na bacia são os Argissolos e os Latossolos. Os Argissolos apresentam valores mais elevados do fator K, devido à textura arenosa da camada superficial e à maior concentração de argila no horizonte sub-superficial, aliado aos baixos teores de matéria orgânica e à alta porcentagem de argila dispersível em água. Os Latossolos, por apresentarem um estágio de intemperismo bem avançado, não sofrem tanta ocorrência de processos erosivos, apresentando, portanto, valores mais baixos de erodibilidade.

Já para a obtenção do fator LS, foram gerados os mapas de declividade e aspecto a partir do Modelo Digital do Terreno, os quais foram reclassificados e combinados, gerando um mapa de rampas homogêneas. Este foi agrupado em polígonos para a geração do mapa de rampas segundo proposto por Fornelos e Neves (2007) e, em seguida, o comprimento da rampa C, foi obtido a partir da seguinte expressão:

$$C = h/\text{sen}\alpha$$

sendo:

h = diferença de altura da rampa (m);

α = declividade média do polígono (graus)

O fator LS foi obtido a partir da equação (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990):

$$LS = 0,00984 \times C^{0,63} \times D^{1,18}$$

onde:

C = Comprimento da rampa do terreno (m);

D = grau do declive (graus)

O fator CP foi obtido a partir da multiplicação entre os fatores de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas do solo (P) (FORNELOS; NEVES, 2007). Para o primeiro, foi utilizado o mapeamento do uso e cobertura da terra, e os valores propostos por Bertoni e Lombardi Neto (1990) e Castro (1992).

Já o fator P, por sua vez, foi obtido de acordo com a prática conservacionista adotada. Para as áreas, onde não há nenhuma prática, havendo maior suscetibilidade à erosão, foi adotado valor 1. Os valores de C e P foram considerados em conjunto.

Simulação de perda de solos para cenários de adequação ambiental

Visando comparar as perdas de solos para o uso atual do solo e possíveis cenários de restauração florestal foram calculadas as perdas potenciais de solo para a situação atual das microbacias (ATUAL) e outros quatro possíveis cenários de reflorestamento, envolvendo Áreas de Preservação Permanente (APP), Reserva Legal (RL) e áreas como maior probabilidade de saturação, também conhecidas como Áreas Hidrológicamente Sensíveis (AHS) (AGNEW *et al.*, 2006). Foi considerada a existência de uma floresta madura para todos os cenários de reflorestamento. No Cenário APP consideraram-se as áreas com declividade superior a 100%, faixas de 30 metros ao longo de ambas as margens dos riachos e 50 metros ao redor das nascentes. Para o cenário AHS utilizou-se o modelo HydroTools 1.0 (SCHÄUBLE, 1999) e operações algébricas com mapas para aplicação do índice topográfico (BEVEN, 1984). O cenário RL foi feito considerando a proporção existente de floresta em RL até completar 20% da área da microbacia de duas maneiras, selecionando aleatoriamente regiões topográficas (rampas) (RL_{ALE}) e selecionando rampas com alta suscetibilidade à erosão (RL_{SUE}), em ambos os casos. A partir da soma dos cenários APP e

RL, foi possível a obtenção dos cenários Código Florestal (CF) para ambas situações avaliadas de RL (CF_{ALE} e CF_{SUE}).

A perda de solos média foi comparada entre a situação atual e cada um dos cenários propostos, por meio de teste t de Student (não pareado, bi-caudal). Considerando a situação e os cenários, também se comparou a perda de solos entre dois grupos de microbacias: menor percentual atual de floresta (microbacias 60, 76, 88, 142, 413, 1015 e 1026) e o outro (microbacias 485, 508, 634, 648, 999, 1003) onde há maior percentual de floresta. Para a realização do teste t, verificou-se previamente a variância e a normalidade dos dados, os quais foram submetidos à transformação Box-Cox quando necessário.

Para avaliar a relação custo/benefício da implantação de floresta, calculou-se a relação entre a área a ser reflorestada em cada cenário (ha) e a redução na perda de solos (t ha⁻¹ ano⁻¹), resultando na eficiência do reflorestamento para redução de perdas de solos (em t ha⁻² ano⁻¹). A expectativa de perda de solo foi interpretada conforme as classes propostas por Silva *et al.* (2003): < 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ (nula a pequena), 10-15 t ha⁻¹ ano⁻¹ (moderada), 15-50 t ha⁻¹ ano⁻¹ (média), 50-120 t ha⁻¹ ano⁻¹ (média a forte), 120-200 t ha⁻¹ ano⁻¹ (forte) e > 200 t ha⁻¹ ano⁻¹ (muito forte).

Tabela 2. Classes de solo, usos predominantes do solo e fatores obtidos para o cálculo da perda potencial de solos para a situação atual nas microbacias.

Table 2. Soil classes, predominant land-uses and factors obtained for potential soil losses for the calculation of current situation in catchments.

Microbacia	Solos predominantes	Uso(s) predominante(s)	Fator R	Fator K	Fator LS	Fator CP
			MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹	t MJ ⁻¹ mm ⁻¹	adimensional	adimensional
60	Argissolos	Mata	7351,3	0,041	5,640	0,009
76	Argissolos	Mata e pasto	7351,3	0,042	5,267	0,026
88	Argissolos	Mata	7351,3	0,041	5,518	0,010
142	Argissolos	Pasto	7269,2	0,031	4,952	0,019
315	Cambissolos, Argissolos e NeossolosLitólicos	Mata	7249,0	0,032	5,452	0,006
403	Cambissolos	Cana	7269,2	0,024	7,223	0,078
413	Neossolos	Pasto	7249,0	0,018	7,279	0,020
485	Cambissolos	Mata e pasto	6514,9	0,021	13,809	0,030
508	Latossolos	Mata e pasto	7249,0		5,666	0,014
634	NeossolosLitólicos	Cana e pasto	6298,3	0,026	5,647	0,0568
648	Argissolos e NeossolosLitólicos	Cana e pasto	6298,3	0,038	7,737	0,042
999	Argissolos	Mata	7351,3	0,046	4,483	0,009
1003	Latossolos	Mata e pasto	7249,0	0,019	5,656	0,007
1015	Argissolos e Neossolos	Cana e pasto	6514,9	0,024	6,180	0,043
1026	NeossolosLitólicos	Mata	7141,8	0,020	8,968	0,011
	Média		7047,19	0,030	6,632	0,025
	Desvio padrão		407,84	0,01	2,31	0,02
	Coeficiente de variação (%)		6	21	35	85

RESULTADOS

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de cada fator calculado para as microbacias analisadas. Observa-se que para erosividade da chuva (Fator R), os maiores valores obtidos correspondem às áreas de precipitação mais elevada, localizadas nas cabeceiras da bacia do rio Corumbataí. As microbacias próximas ao município de Piracicaba (por exemplo, 634 e 648) possuem menor valor de R ($6298,3 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), e as microbacias pertencentes ao município de Corumbataí, como as microbacias 60, 76, 88 e 999, apresentaram R de $7351,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Os valores de erosividade acompanham o gradiente de precipitação anual apresentado na Figura 1. Com relação aos tipos de solo das microbacias, nota-se que aquelas com predominância de Argissolos apresentam valores do fator K mais elevados, devido à textura extremamente arenosa da camada superficial e à maior concentração de argila no horizonte sub-superficial, aliado aos baixos teores de matéria orgânica e à alta porcentagem de argila dispersível em água.

A influência da declividade pode ser observada nos valores mais elevados de fator LS obtidos em bacias mais declivosas (por exemplo, a microbacia 485), decorrente da maior facilidade para o transporte de sedimentos em áreas inclinadas, enquanto que áreas mais planas (por exemplo, a microbacia 142) apresentam valores mais baixos do fator LS.

O fator CP, por sua vez, foi o que apresentou a maior variabilidade dos fatores avaliados ($CV = 85\%$). As diferenças no uso do solo nas 15 microbacias implicaram em uma expressiva variação na obtenção do fator CP, variando desde 0,006 na microbacia 315, onde há uma área muito expressiva de floresta, até 0,078 na microbacia 403, onde há dominância de cana-de-açúcar.

Na Figura 2, como exemplo, são apresentados os mapas dos cenários obtidos para a microbacia 403. Nessa microbacia a mata ciliar está presente somente em alguns trechos da microbacia (Figura 2A). Além disso, a área de floresta além da APP (39,7 ha) não atinge a área de 20% exigida por lei, referente a RL (57,8 ha). Caso fosse reflorestada toda a área de APP (Figura 2B)

Tabela 3. Perda de solo estimada ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para cada microbacia nos diferentes cenários estudados. Comparação dos resultados de produção de sedimentos, redução na produção de sedimentos, área a ser reflorestada e eficiência para a situação atual e cenários de reflorestamento.

Table 3. Estimated soil loss ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) obtained for each catchment for different scenarios studied. Comparison of sediment yield; reduction in sediment yield; area to be reforested and efficiency, to the current situation and scenarios for reforestation.

Microbacia	Cenário						
	ATUAL	APP	RL _{ALE}	RL _{SUE}	AHS	CF _{ALE}	CF _{SUE}
Perda de solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)							
60	14,7	12,2	12,0	11,1	12,8	10,6	7,5
76	19,0	16,2	15,7	7,6	17,1	13,9	5,1
88	15,8	12,8	12,0	7,5	13,8	10,6	5,1
142	12,1	10,1	9,0	6,2	11,2	8,0	4,2
315	6,4	6,0	5,5	2,9	6,2	4,9	2,0
403	89,1	79,5	63,7	36,4	79,5	56,3	24,6
413	57,1	56,4	53,5	3,0	56,6	47,3	2,0
485	49,6	47,8	44,2	4,5	47,3	39,0	3,0
508	14,2	13,5	12,6	1,6	13,8	11,1	1,1
634	36,6	35,2	25,0	12,6	35,7	22,1	8,5
648	62,8	55,4	58,7	12,0	56,1	51,9	8,1
999	13,5	10,2	12,2	5,8	12,2	10,8	3,9
1003	2,8	2,4	2,3	0,9	2,6	2,0	0,6
1015	7,9	6,7	4,6	2,8	7,1	4,1	1,9
1026	8,7	7,4	4,2	4,7	7,7	3,7	3,2
Média	27,4	24,8	22,3	8,0	25,3	19,7	5,4
Probabilidade de diferença estatística do cenário ATUAL (teste t)		0,71	0,42	<0,01	0,75	0,19	<0,01
Redução ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	-	2,6	5,1	19,4	2,1	7,7	22
Redução (%)	-	9,5	18,6	70,8	7,7	28,1	80,3
Área reflorestada (ha)	-	34,7	19,9	19,9	-	54,6	54,6
Eficiência ($\text{t ha}^{-2} \text{ ano}^{-1}$)	-	0,07	0,26	0,97	-	0,14	0,40
Eficiência (%/ha)	-	0,27	0,93	3,56	-	0,51	1,47

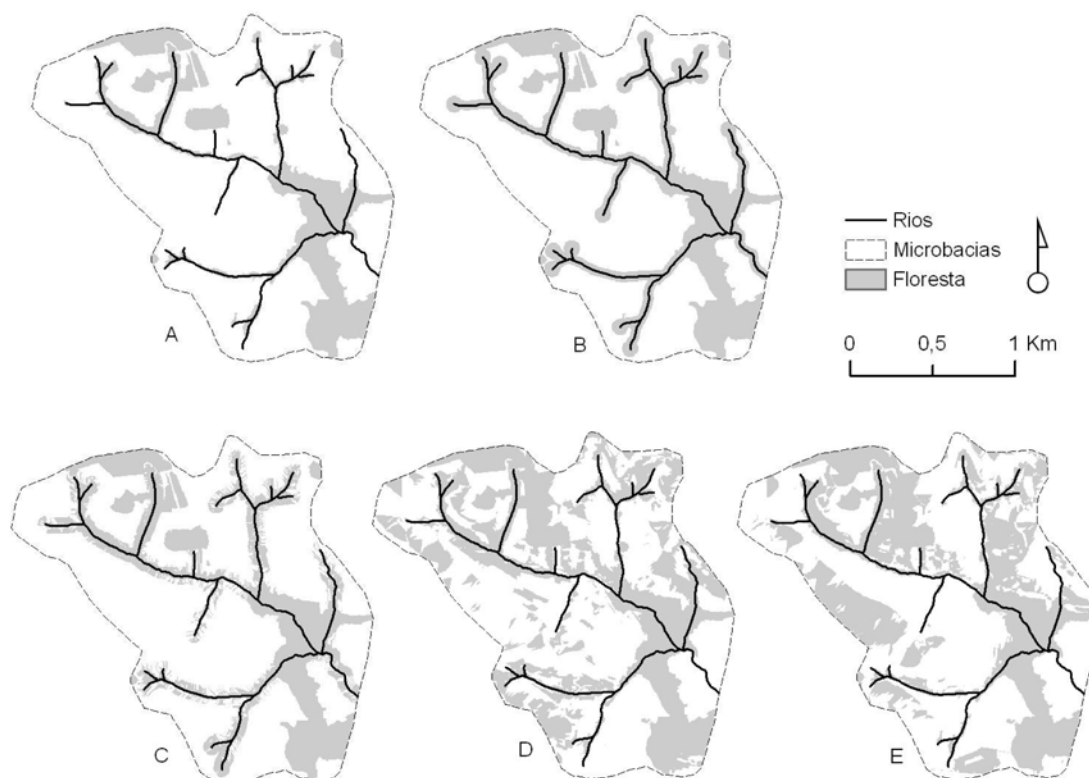


Figura 2. Áreas de mata para a microbacia 403 na situação atual e para os cenários de restauração florestal - A: situação atual (ATUAL); B: Área de Preservação Permanente (APP); C: Área Hidrologicamente Sensível (AHS); D: Reserva Legal aleatória (RL_{ALE}); E: Reserva Legal em áreas mais críticas (RL_{SUE}).

Figure 2. Forest areas for catchment 403 in the current situation and for scenarios of forest restoration - A: Current situation (ATUAL), B: Permanent Preservation Area (APP) C: Hydrological Sensitive Area (AHS), D: Legal Reserve Randomized (RL_{ALE}) E: Legal Reserve in critical areas (RL_{SUE})

haveria um acréscimo de 29 ha. Para o reflorestamento das Áreas Hidrologicamente Sensíveis (AHS - Figura 2C), haveria uma extensão inferior ao simulado pela implementação da APP. A instalação da Reserva Legal até atingir 20% da microbacia traria um acréscimo de 18,1 ha, no primeiro caso, aleatoriamente (Figura 2D), e, no segundo, considerando as áreas de maior potencial erosivo (Figura 2E).

Por meio das simulações foram obtidos os valores médios de A (perda potencial anual de solos) para cada microbacia na situação atual e com os cenários de restauração florestal (Tabela 3). O fator que mais influenciou na perda de solos foi o uso do solo, sendo que nas microbacias com predominância de cana-de-açúcar (403, 1015 e 648) foram observados os maiores valores potenciais de perdas de solo.

O valor médio de perda de solos para a situação atual foi de $29,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Em geral, o estabelecimento de APP reduziria a perda de solos em 9,5% (de $27,4$ para $24,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e o reflorestamento das AHS reduziria em 7,7% (de $27,4$ para $25,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) a produção de sedimentos nas microbacias, não sendo observada, de acordo com os testes t realizados para as 15

microbacias, diferença significativa na produção média de sedimentos. A pequena redução nos dois cenários provavelmente se deu em função das áreas mais próximas aos corpos d'água, que caracterizam principalmente as áreas de APP e que não são muito suscetíveis à erosão e também por que não foi contabilizado neste estudo o efeito de retenção de sedimentos pela faixa ripária. O estabelecimento aleatório da Reserva Legal apresentou uma redução um pouco maior que as de APP e AHS (redução de 18,6%), porém também não foi encontrada diferença significativa em relação à situação atual. Entretanto, com o estabelecimento da mesma em áreas mais críticas, em termos de processos erosivos, notou-se uma expressiva redução de 70,8% na taxa média de erosão. Para o teste t realizado com todas as microbacias na situação atual e com o estabelecimento da Reserva Legal em áreas críticas foi observada diferença significativa, indicando que a implementação adequada da mesma afetaria fortemente a produção de sedimentos. Para os cenários de atendimento ao Código Florestal (CF), somente o cenário que considerou APP e RL em áreas críticas (CF_{SUE}) apresentou diferença significativa (Tabela 3).

Para os testes t realizados entre microbacias com maior e menor presença de floresta não foram encontradas diferenças significativas na perda média de solos (Tabela 4), tanto na situação atual quanto nos cenários de restauração florestal, indicando que a diferença na proporção na cobertura vegetal pode não ser o fator principal influenciando a perda de solos nas microbacias avaliadas e sim a sua localização.

DISCUSSÃO

Comparando-se as médias obtidas nas simulações com a classificação proposta por Silva et al. (2003) para o parâmetro "expectativa de perda de solos", observa-se a predominância das classes de erosão "média" para a situação atual, para o estabelecimento das APPs e para o reflorestamento das AHS. Com a instalação da Reserva Legal em áreas mais críticas, por sua vez, observa-se a predominância da classe "nula a pequena".

Deve-se notar que o modelo de avaliação de perdas de solo neste estudo não considera o movimento do sedimento na superfície e sua possível retenção. A adoção de modelos de perdas e movimentação de sedimentos poderia resultar em maiores reduções para os cenários de APPs, considerando que essas áreas são capazes de reter sedimentos, dependendo de suas características de relevo, solos e cobertura vegetal.

Machado et al. (2003) encontraram valores semelhantes aos observados neste trabalho para a microbacia do Ribeirão dos Marins, no município de Piracicaba, SP, em função do uso atual, da manutenção de mata ciliar na faixa de APP, e da substituição total das áreas de pastagem por vegetação florestal. Para o primeiro cenário de modificação no uso do solo, foi encontrada uma redução de 10,8%, enquanto que para o segundo, a mesma foi de 94,0%. No último caso, é interessante notar que o reflorestamento de toda a microbacia pode não representar redução nas perdas de solo muito diferente da obtida pela implementação da Reserva Legal em locais críticos,

já que neste trabalho obtivemos redução de 70,8% das perdas de solo nessas simulações.

A cobertura florestal, segundo este modelo adotado, é responsável pela redução na perda de solo, embora em alguns casos, mesmo com a implantação florestal, outros fatores podem ser determinantes nos processos erosivos, como por exemplo, nos plantios de eucalipto em Cambissolos, em que Silva et al. (2008) observaram os maiores valores de perdas de solo.

Embora a cobertura florestal reduza a perda de solo pela sua maior proteção, outras culturas perenes também representam boa proteção da superfície e são capazes de reduzir as perdas de solo. O estudo realizado por Prochnow et al. (2005), no município de Pindorama, SP, mostrou que, para as condições do estudo, cafezais oferecem um eficiente controle nas perdas de solo, diminuindo-as em 78% nos cinco primeiros anos e 99% do quinto ano em diante.

A comparação entre os cenários mostra a maior eficiência do reflorestamento da Reserva Legal planejado em áreas mais críticas, com redução nas perdas de solo de $0,97 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, cerca de três vezes mais eficiente que o reflorestamento da Reserva Legal sem planejamento ($0,26 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

A soma dos efeitos de redução do reflorestamento da APP e Reserva Legal com planejamento (cenário CF_{SUE'}, Tabela 3) tem potencial para reduzir 80,3% das perdas de solo, mostrando que a combinação das áreas legalmente protegidas pode trazer benefícios ainda maiores na redução de processos erosivos. No entanto, somente uma floresta bem estruturada e madura seria capaz de produzir os efeitos de redução estimados, sendo que florestas degradadas ou em estágios menos avançados de desenvolvimento teriam efeitos menores, não avaliados neste estudo.

Esses resultados mostram que os serviços ecossistêmicos oferecidos pelo reflorestamento apresentam diferentes níveis de eficiência, de acordo com a localização das áreas reflorestadas e, especialmente, com o critério e o planejamento adotado para sua implementação.

Tabela 4. Perda de solo estimada ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para grupos de microbacias com menor e maior cobertura florestal nos diferentes cenários estudados.

Table 4. Estimated soil loss ($\text{ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) of forest cover catchment groups for the different scenarios studied.

Grupos de microbacias	Cenário				
	ATUAL	APP	RL _{ALF}	RL _{SUE}	AHS
	Perda de solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)				
Menor cobertura (#60, #76, #88, #142, #403, #413, #1015 e #1026)	30,9	22,6	22,4	11,1	27,7
Maior cobertura (#315, #485, #508, #634, #648, #999 e #1003)	28,7	26,2	24,9	6,6	27,4
Probabilidade de diferença estatística entre os grupos (teste t)	p=0,87	p=0,76	p=0,81	p=0,28	p=0,98

CONCLUSÕES

As Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais apresentam diferentes capacidades de redução na perda de solo, sendo que a existência de uma floresta madura em 20% da propriedade em áreas críticas apresenta maior capacidade em reduzir as perdas de solo quando comparadas à implementação de florestas maduras em APP.

O planejamento adequado da Reserva Legal, com reflorestamento em áreas mais sensíveis à erosão, pode reduzir entre 20% e 70% as perdas de solo, dependendo da metodologia adotada para seleção das áreas a serem reflorestadas. A implementação conjunta de APP e Reserva Legal planejada tem potencial de reduzir cerca de 80% das perdas de solo em microbacias.

O estudo mostra que a eficiência dos serviços ambientais dos reflorestamentos pode ter variação significativa, em função da localização da área reflorestada na propriedade. A eficiência do planejamento adequado do reflorestamento da Reserva Legal pode aumentar em mais de três vezes a sua eficiência na redução das perdas de solo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (Processo: 2007-07413-8) e pelo Auxílio à Pesquisa (Processo: 2006/04723-3) e ao Departamento de Ecologia – IB/UNESP.

REFERÊNCIAS

AGNEW, L. J.; LYON, S.; GÉRARD-MARCHANT, P.; COLLINS, V. B.; LEMBO, A. J.; STEENHUIS, T. S.; WALTER M. T. Hydrologically Sensitive Areas: Bridging the gap between science and application. *Journal of Environmental Management*, New York, v. 78, n. 1, p.63-76. 2006.

AMARAL, A. J; BERTOL, I.; COGO, N. P.; BARBOSA, F. T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo de solo em um cambissolo húmico da região do planalto Sul-Catarinense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2145-2155, 2008.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 5ed. Piracicaba: Editora Ícone, 1990. 355 p.

BEVEN, K. J. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 69, n. 1-4, p. 119-143, 1984.

BRASIL. **Lei no. 9433, de 8 de Janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/19433.htm >. Acesso em: 27 mar. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas (1961-1990)**. BRASÍLIA: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.

BRASIL. **Lei n.4771, de 15 de setembro de 1965.** Código Florestal. Disponível em: < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-4771-15-setembro-1965-369026-publicacaooriginal-1-pl.html> >. Acesso em: 27 mar. 2013.

CASTRO, A. G. **Técnicas de sensoriamento remoto e sistemas geográficos de informações no estudo integrado de bacias hidrográficas**. 1992. 145 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

CBH-PCJ - COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. **Plano de bacia hidrográfica 2000-2003 (Síntese do Relatório Final)**. São Paulo: Fehidro - Fundo Estadual de Recursos Hídricos, 2004, 61p.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n. 4, p. 743-753, 2003.

CORRÊA, C. M. C. **Perdas de solo e a qualidade da água procedente de estrada de uso florestal no planalto catarinense**. 2005. 155 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

- DAILY G; DASGUPTA P; BOLIN B; CROSSON P; du GUERNY J; EHRLICH P; FOLKE C; JANSSON A-M; JANSSON B-O; KAUTSKY N; KINZIG A, LEVIN S; MALER K-G; PINDSTRUP-ANDERSEN P; WALKER B. Food production, population growth, and environmental security. *Science*, Washington, v. 281, p. 1291-1292, 1998.
- DERPSCH, C. H.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KÖPE, U. **Controle da Erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de Cobertura do Solo, Plantio Direto e Preparo Conservacionista do Solo**. Paranaíba: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1990. 276 p.
- FORNELOS, L. F.; NEVES, S. M. A. S. Uso de modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na estimativa de perdas de solo. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 1, n. 59, p. 25-33, 2007.
- GONÇALVES, J. L. M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. (Org.) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 47-129.
- I.F. - INSTITUTO FLORESTAL. **Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo**. São Paulo. SMA/IF/Imprensa Oficial, 2005. 200 p.
- JACOVINE, L. A. G.; VIANA, W. D.; ALVES, R. R.; WALTER, M. K. C.; SILVA, M. L.; VALVERDE, S. R. Environmental approach of companies within the pulp/paper, metallurgical and sugar/alcohol sectors. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 66, n. 1, p.1-7, 2009.
- JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation**. New York: Cambridge University Press, 2010. 385 p.
- KINNELL, P. I. A. Letter to the Editor on "The Mathematical Integrity of Some Universal Soil Loss Equation Variants". *Soil Science Society of America Journal*, Ann Arbor, v. 68, n.1, p. 336-7, 2004.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: Sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, Campinas, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992.
- MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 4, p.727-733, 2003.
- MITASOVA, H.; HOFIERKA, J.; ZLOCHA, M.; IVERSON, L. R. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographycal Information Science*, London, v.10, n. 5, p. 629-641, 1996.
- MORETI, D.; CARVALHO, M. P.; MANNIGEL, A. R.; MEDEIROS, L. R. Importantes características de chuva para a conservação do solo e da água no município de São Manuel (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 4, p.713-725, 2003.
- OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Piracicaba**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1991. 1 Mapa. Escala 1:100.000.
- OLIVEIRA, M. F.; ALVARENGA, R. C.; OLIVEIRA, A. C.; CRUZ, J. C. Efeito da palha e da mistura atrazine e metolachlor de controle de plantas daninhas na cultura do milho em sistemas de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasil*, Brasília, v. 26, n. 1, p. 37-41, 2001.
- OLIVEIRA, J. B.; MENK, J. R. F.; BARBIERI, J. L.; ROTA, C. L.; TREMOCOLDI, W. **Levantamento pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: quadrículas de Araras**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1982.
- PAULA, F. R.; FERRAZ, S. F. B.; GERHARD, P.; VETTORAZZI, C. A.; FERREIRA, A. Large woody debris input and its influence on channel structure in agricultural lands of Southeast Brazil. *Environmental Management*, New York, v. 48, n. 4, p. 750-763, 2011.
- PRADO, H.; OLIVEIRA, J. B; ALMEIDA, C. L. A. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de São Carlos**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1981. 1 Mapa. Escala 1:100.000
- PROCHNOW, D.; DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; VIEIRA, S. R. Razão de perdas de terra e fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 91-98, 2005.
- RODRIGUES, R. R. A vegetação de Piracicaba e municípios de entorno. *Circular Técnica IPEF*, Piracicaba, n.189, p. 1-18, 1999.

- SCHÄUBLE, H. **Simulation of soil erosion with GIS and EDP - Comparison of different concepts considering a silt-dominated landscape.** 1999. Tese (Mestrado em Geografia) – Institute of Geography, University of Tübingen, Tübingen, 1999.
- SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Erodibilidade dos solos paulistas: levantamento de informações e estruturação de um banco de dados. **Geociências**, Rio Claro, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005.
- SILVA, A.M.; ALVARES, C.A.; WATANABE, C. Natural Potential for Erosion for Brazilian Territory. In: GODONE, D.; STANCHI, S. (Org.) **Soil Erosion Studies**. Rijeka: InTech - Open Access Publisher, p. 1-22, 2011.
- SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; CURTI, N.; OLIVEIRA, P. M. Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de Latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.2125-2134, 2008.
- SILVA, A. M.; NALON, M. A.; KRONKA, F. J. N.; ALVARES, C. A.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A. Historical land-cover/use in different slope and riparian buffer zones in watersheds of the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 325-335, 2007.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Carlos: RiMA, 2003, 138 p.
- SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, Washington, v.30, n. 3, p.453-462, 1994.
- VALENTE, R. O. A.; VETTORAZZI, C. A. Avaliação da estrutura florestal na Bacia do Rio Corumbataí, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p.45-57, 2005.
- VETTORAZZI, C.A. **Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos.** 2006. 150 p. Tese (Livre-docência), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- VOLK, L. B.; COGO, N. P. Inter-relação biomassa vegetal subterrânea – estabilidade de agregados-erosão hídrica em solos submetidos a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n. 4, p.1713-1722, 2008.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting a rainfall erosion losses – a guide to conservation planning.** Washington: USDA/ARS, 1978. 58 p. (Agricultural Handbook nº 573).
- ZINGG, A. W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. **Agricultural Engineering**, v.21, n. 1, 59-64, 1940.

Recebido em 02/05/2012
Aceito para publicação em 30/04/2013