



APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO MODIFICADA (MEUPS) NA AVALIAÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA DO SOLO EM UMA MICRO BACIA HIDROGRÁFICA COM SOLOS PREDOMINANTEMENTE ARGILOSOS

Edvania Aparecida Corrêa^(a), Isabel Cristina Moraes^(b), Antonio Aparecido Couto Junior^(c), Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto^(c)

^(a) Departamento de Geografia (DeGeo), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), edvania.alves@ufpel.edu.br

^(b) Departamento de Planejamento e Ordenamento da Aquicultura (DPOA), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, bel.moraes.geo@gmail.com.

^(c) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento (DEPLAN), Universidade Estadual Paulista, IGCE/UNESP/Rio Claro, acjunior_2003@hotmail.com, sanjos@rc.unesp.br.

Eixo: GEOTECNOLOGIAS E MODELAGEM ESPACIAL EM GEOGRAFIA FÍSICA

Resumo

Erosão hídrica é uma das formas mais agressivas de degradação dos solos, sendo o uso de modelos preditivos uma ferramenta para estimativas de perdas de solo. A Equação Universal da Perda de Solo Modificada – MEUPS (WILLIAMS, 1975) integra parâmetros ambientais, pode ser implementada em Sistemas de Informação Geográfica – SIG, e prevê o aporte de sedimentos em bacias hidrográficas. Assim, este trabalho objetivou-se na aplicação da MEUPS para avaliação de erosão hídrica de solos predominantemente argilosos da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga, Rio Claro (SP/Brasil). As estimativas de perda obtidas variaram entre 0 e 50 t ha⁻¹ano⁻¹. Verificou-se maiores perdas em setores de declividade superior a 12% associada a cultivos de cana-de-açúcar, 7,5 a 20 t ha⁻¹ano⁻¹, e em menor escala, em áreas de solo exposto, superior a 40 t ha⁻¹ano⁻¹. A distribuição espacial das estimativas de perda de solo contribui para adequação do uso da terra em bacias hidrográficas.

Palavras chave: Erosão hídrica. Modelos preditivos. Geoprocessamento. Uso da terra.

1 Introdução

Nas últimas décadas, as atividades relacionadas ao uso e ocupação da terra têm revelado uma nova dinâmica de apropriação do território, e os efeitos de manejo de atividades agropastoris sem planejamento prévio alteram a paisagem e degradam os solos, em velocidade e intensidade superiores à capacidade de renovação do sistema ambiental e à resiliência do solo. A erosão é uma das principais causas de degradação dos solos, em função da remoção da matéria orgânica e nutrientes da camada superior, tendo conseqüente redução da produção de alimentos e da qualidade da água.

Nos estudos de erosão hídrica dos solos, modelos preditivos tornam-se uma expressão aproximada da realidade, e têm sido amplamente utilizados por possuírem a característica de reaplicabilidade em diversos cenários (CHRISTOFOLETTI, 1999). Dentre as aplicações de modelos preditivos nos estudos de erosão do solo no cenário mundial e especialmente no Brasil, destacam-se aqueles relacionados à utilização da Equação Universal de Perda de Solo – EUPS (Universal SoilLossEquation



- USLE - WISCHMEIER e SMITH, 1978) e à Equação Universal de Perdas de Solo Modificada proposta por Williams (1975) e ajustada ao cenário brasileiro por Lombardi Neto et al. (1994).

Enquanto o modelo EUPS prevê os transportes e perdas anuais de solo por erosão hídrica, a MEUPS prevê a produção de sedimentos oriundos de pequenas e médias bacias hidrográficas e em determinado exutório (talvegue, córrego ou reservatório), com a vantagem de sua aplicação em eventos isolados de precipitação, sendo um modelo menos generalista que a EUPS em função da variável runoff que favorece a exatidão das estimativas (WILLIAMS, 1975). A aplicação destes modelos exige um baixo número de parâmetros, e permite implementação em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com relativa facilidade (SAVABI, 1993 e CHAVES, 1991). Tais modelos tornam-se importantes ferramentas para a prática da conservação do solo e do adequado planejamento do uso da terra em bacias hidrográficas agrícolas.

Assim, o objetivo deste artigo foi o de avaliar a distribuição espacial das perdas de solo por meio da MEUPS, em uma bacia hidrográfica rural de pequeno porte, a do ribeirão Jacutinga, considerando o predomínio de solos argilosos associados a relevo ondulado, considerando a crescente expansão dos cultivos de cana-de-açúcar.

2 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga está localizada no município de Rio Claro/SP, no centro-leste do estado de São Paulo, sendo tributária da bacia do rio Corumbataí, no baixo curso do Rio Piracicaba (SP), com área aproximada de 28,9 km² (Figura 1).

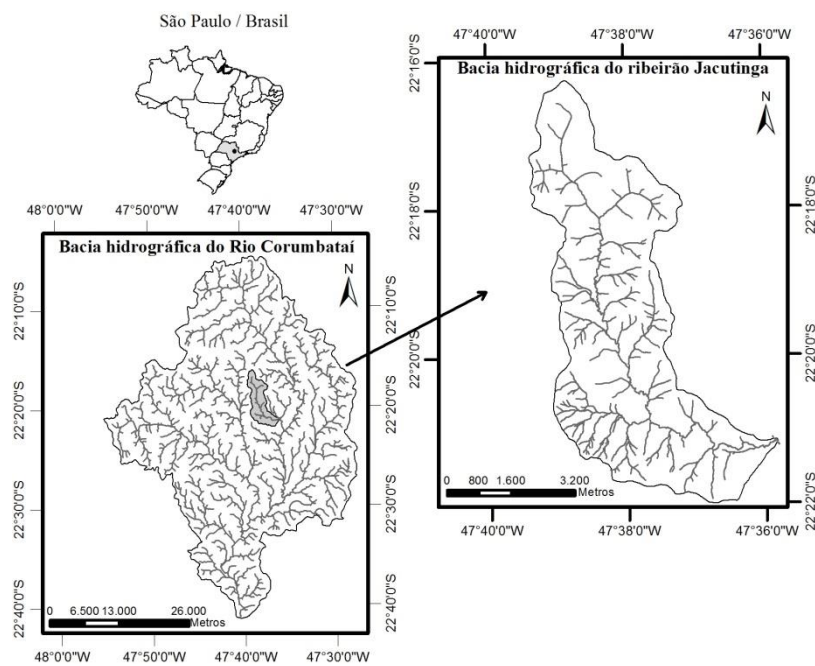


Figura 1 - Localização da área de estudo



A área de estudo está inserida na província geomorfológica denominada Depressão Periférica Paulista e apresenta topografia pouco acidentada, com altitudes predominantes variando de 600 a 720 m, relevo formado por colinas, interflúvios com áreas de 1 km² a 4 km², e topos aplainados e vertentes com perfis convexos e retilíneos.

Conforme a classificação zonal de Köppen, a bacia enquadrada no tipo climático Cwa, podendo ser associado ao clima subtropical, com inverno seco e verão chuvoso. Há o predomínio de Argissolos Vermelho Amarelos de texturas média e argilosa e Cambissolos Háplicos, textura argilosa, os quais possuem como material de origem os argilitos da formação Corumbataí localizados predominantemente no médio e baixo curso. Em menor expressão tem-se a ocorrência dos Neossolos Quartzarênicos tendo como material de origem os arenitos de granulação fina e média da formação Pirambóia no setor de alto curso (CORRÊA, 2016).

Como em todo o estado de São Paulo, a área de estudo tem sido submetida à intensa ocupação antrópica, particularmente resultante da expansão do cultivo da cana-de-açúcar e de áreas de pastagens, como indicado em Pereira e Pinto (2007). Couto Junior (2014) identificou na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga, 53,5% e 16,4% de ocupação por pastagem e cana-de-açúcar, respectivamente, indicando a elevada importância destes usos no cenário econômico local.

3 Metodologia

3.1 Elaboração da base cartográfica

Por meio da digitalização das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), na escala de 1:10.000, procedeu-se com georreferenciamento em ambiente SIG, na projeção UTM, fuso 23, datum WGS 84, considerando o padrão de exatidão cartográfico A (BRASIL, 1984). Em SIG, foi realizada a vetorização das feições cartográficas, e gerado o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDET) com grade celular de 3 metros, a partir das curvas de nível, pontos cotados e hidrografia.

Aquisição dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MEUPS)

Visando a estimativa de predisposição aos riscos de erosão, foi utilizada a Equação Universal de Perdas de Solo modificada (MEUPS) proposta por Williams (1975), ajustada e apresentada por Lombardi Neto et al. (1994):

$$Y = [89,6 (Q.qp)^{0,56}] \cdot K \cdot [0,00984 (L^{0,63} \cdot S^{1,18})] \cdot C.P \quad (1)$$

Em que: Y - fornecimento de sedimentos para uma determinada chuva (toneladas); Q - volume de escoamento superficial (m³); qp - vazão pico do escoamento superficial (m³/s); K - erodibilidade do



solo (ton/ha); LS - extensão de vertente (m) e declividade (%); C – cobertura vegetal e manejo, associado ao uso da terra (adimensional); P - práticas de conservação (adimensional).

O fator erodibilidade (fator K) foi obtido pelo levantamento fotopedológico realizado por Corrêa (2016) e Moraes (2016), onde as unidades pedológicas mapeadas foram associadas aos valores do fator K (figura 2a) e tolerância de perdas de solo (T) (Tabela 1), disponíveis em Corrêa et al. (2015):

Tabela 1. Valores do fator erodibilidade (K) tolerância de perdas dos solos e para os solos estudados.

Solos	Erodibilidade t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Tolerância t ha ⁻¹ ano ⁻¹
Argissolo Vermelho Amarelo, Ta distrófico, textura média, relevo suave ondulado	0,0282	4
Argissolo Vermelho Amarelo, eutrófico, textura argilosa, relevo suave ondulado	0,0402	6,4
Cambissoloháplico Tb distrófico, textura argilosa, relevo suave ondulado	0,0475	4
Neossolo Quartzarênico órtico, típico, relevo suave ondulado a ondulado	0,1192	10

Para a aquisição do Fator L foi utilizado o algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996), o qual emprega o conceito de área de contribuição para o cálculo automático do comprimento de vertente (SILVA, 2003) (figura 2b). Utilizando o MDET e o SIG ArcGis 10.1, primeiramente foi obtido o mapa de Direção de Fluxo, sendo este composto por oito direções distintas: 1 (Leste), 2 (Sudeste), 4(Sul), 8 (Sudoeste), 16 (Oeste), 32 (Noroeste), 64 (Norte) e 128 (Nordeste). Posteriormente, foi obtido o Mapa de Fluxo Acumulado, o qual define o número de células a montante que contribuem para uma determinada célula a jusante. Esse mapa é um dos componentes do parâmetro de “Área de contribuição” ($A_{i,j} - in$) utilizado para gerar o mapa de extensão de vertentes.

Para a aquisição do parâmetro “Direção de Fluxo” ($X_{i,j}$), foi realizada a reclassificação do Mapa de Direção de Fluxo: os valores 1, 4, 16 e 64, representantes dos pontos cardeais – L, S, O, N -, reclassificados para o valor de 0,5; e os valores de 2, 8, 32, e 128, representantes dos pontos colaterais – SE, SO, NO e NE -, reclassificados para 0,354. Com a definição dos parâmetros provenientes da declividade, da direção de fluxo e da área de contribuição representada pelo fluxo acumulado para cada célula, o fator L foi obtido através da equação:

$$L_{i,j} = \frac{[(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}]}{(D^{m+2}) * (x_{i,j}^m) * (22,13)^m} \quad (2)$$

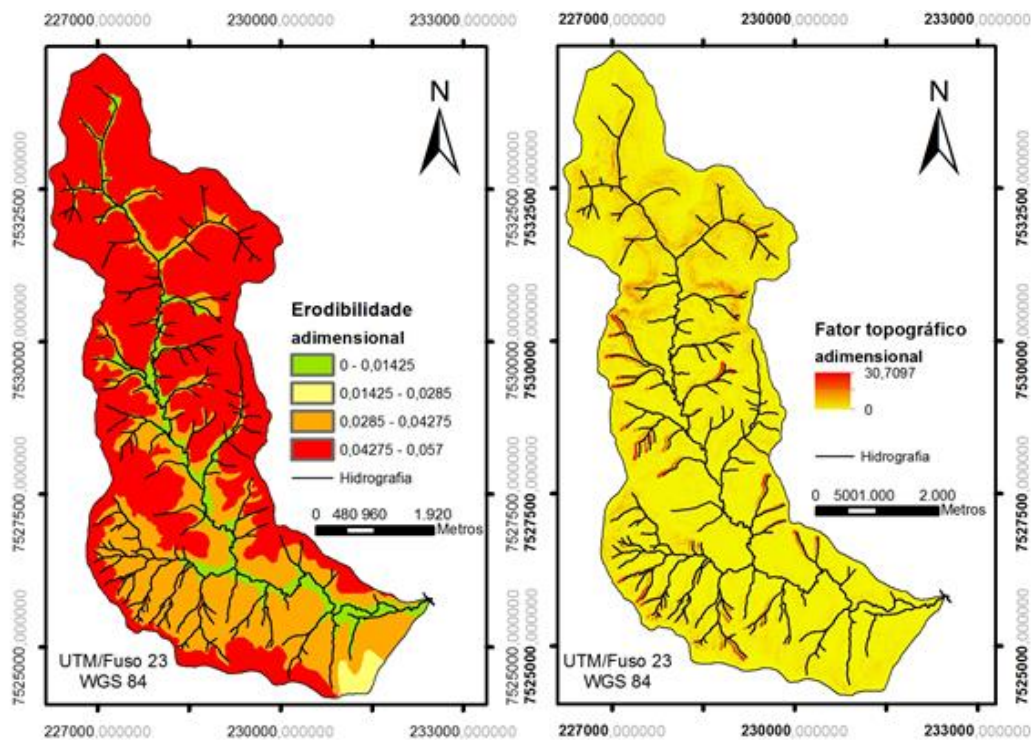
Onde: $L_{i,j}$ = fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j); $A_{i,j} - in$ = área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j); D: tamanho da grade de células (m); $X_{i,j}$: valor da direção do fluxo; m: coeficiente que assume os valores: 0,5 se $s \geq 5\%$ (s é o grau de declividade);



0,4 se $3\% \leq s \leq 5\%$; 0,3 se $1\% \leq s \leq 3\%$, 0,2 se $s < 1\%$. E, Os dados de declividade foram obtidos com o apoio do MDET. Com os dados de declividade (%) e os dados do fator L obtidos pela equação 2, foi gerado o mapa de fator topográfico (ft) tomando como base a formulação apresentada por Bertoni e Lombardi Neto (2010):

$$ft = 0,00984 * L^{0.63} * S^{1.18} \quad (3)$$

Onde: ft = Fator topográfico (adimensional); L = Comprimento de vertente (metros); S = Fator declividade (%).



Figuras 2a 2b. Mapas do fator erodibilidade e do fator topográfico da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.

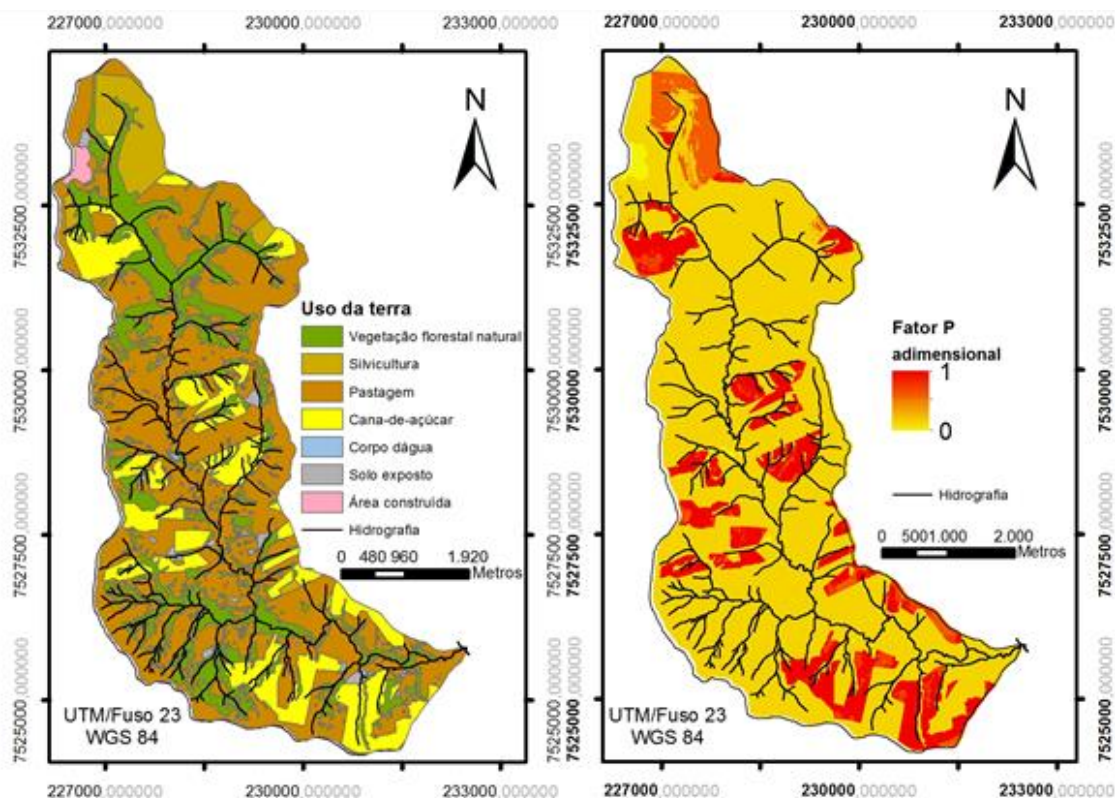
Para a elaboração do mapa de uso/cobertura da terra, foram utilizadas imagens do satélite Ikonos II de 01/08/2013, e no ArcGis 10.1 foram realizadas procedimentos de interpretação visual e vetorização manual para atribuição das classes temáticas (figura 3a), sendo associada aos valores do fator C conforme Donzelli et al. (1992). Para a obtenção do fator P, considerou-se a ausência de práticas conservacionistas nas áreas, adotando o valor de 1, exceto para as culturas de cana-de-açúcar, definido conforme a declividade e considerando o plantio em nível (DONZELLI et al., 1992) (Tabela 2 e figura 3b).



Tabela 2. Classes de declividade e valores do fator C e P.

Uso da Terra	Classes de declividade (%)	Fator C	Fator P
Cana-de-açúcar	0 - 3	0,0500	0,5
	3 - 6	0,0500	0,6
	6 - 12	0,0500	0,8
	>12	0,0500	1,0
Pastagem		0,0100	1
Vegetação florestal nativa		0,00004	1
Área construída		1	1

Adaptado de Donzelli et al. (1992)



Figuras 3a e 3b. Mapas de Uso da terra e fator P da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.

3.2 Integração dos dados

O fator Q é obtido pelo método da abstração, por meio da equação 4 (WILLIAMS, 1975; CHAVES, 1991):

$$Runoff = 89,6 (Q_{i,j} q_{p_{i,j}})^{0,56} \quad (4)$$

Sendo: $Q_{i,j}$ = volume do escoamento superficial em uma célula com coordenadas (i, j), para um determinado evento chuvoso (m³); I = é o volume de precipitação (mm); Sa = parâmetro de retenção da água pelas características de superfície do terreno.

Para o volume da precipitação (I), foi considerado o total de precipitação referente ao período de 06/2013 a 05/2014, totalizando 1093 mm. O parâmetro de retenção (Sa), determinado em função da classe de solo, uso e manejo da terra e declividade; tempo, em função do conteúdo de água no solo, foi



derivado do índice número da curva (CN) proposto por USDA-SCS (SoilConservation Service, 2004 e 2007), conforme tabela 3. Para a determinação do CN, relacionaram-se as classes de uso da terra com os grupos hidrológicos de solo (SCS, 1986), conforme tabela 4.

Tabela 3. Grupos hidrológicos de solo e correspondência com classe de solo.

Classe de solo	Características básicas	Grupos hidrológicos (SCS, 2007)
RQ/RV	Solos com teor de argila menor que 10% e mais que 90% de areia, sem restrição de percolação de água no perfil.	A
LVA	Solos com teor de argila entre 10 e 20% e de 50 a 90% de areia, sem pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m.	B
PVA	Solos com teor de argila entre 20 e 40% e menos que 50% de areia; percolação de água restrita, camadas densificadas a cerca de 60 cm, mas sem condições de impermeabilidade.	C
CX RL	Solos com teor de argila maior que 40% e menos que 50% de areia, alto potencial de escoamento superficial, e a transição da água no perfil é restrita, com camada densificada a uns 50 cm de profundidade ou com camada quase impermeável, por argila ou contato lítico.	D

Fonte: SCS (2007), organizado e adaptado por Moraes (2016).

Tabela 4. Valores da Curva-Número (CN) para diferentes usos da terra e grupos hidrológicos de solo.

Classes de uso da terra e cobertura vegetal	Grupos hidrológicos			
	A	B	C	D
Mata Ciliar (boas condições)	30	55	70	77
Reflorestamento (mata em condições médias)	36	60	73	79
Pastagem (condições médias)	49	69	79	84
Cana-de-açúcar (contorno e terraço – condições pobres)	66	74	80	82
Solo exposto	77	86	91	94
Área construída (100% impermeabilização)	98	98	98	98

Fonte: SCS (2007), organizado e adaptado por Moraes (2016).

A determinação dos valores de retenção de água pelas características de superfície do terreno (Sa), obtida para cada pixel, é descrita pela equação 5. O parâmetro vazão pico (qp) representa a vazão máxima que ocorre com um dado evento chuvoso, e configura um indicador da força erosiva das chuvas intensas (MORAES, 2016), estimado conforme proposto por SCS (1973) – equação 6. E, para a determinação do tempo de concentração (Tc), foi utilizado o método proposto por Genovez (1993) – equação 7.

$$Sa = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (5)$$

$$qp_{i,j} = 0,0028 * A * \left(\frac{Q_{i,j}}{T_c} \right) \quad (6)$$

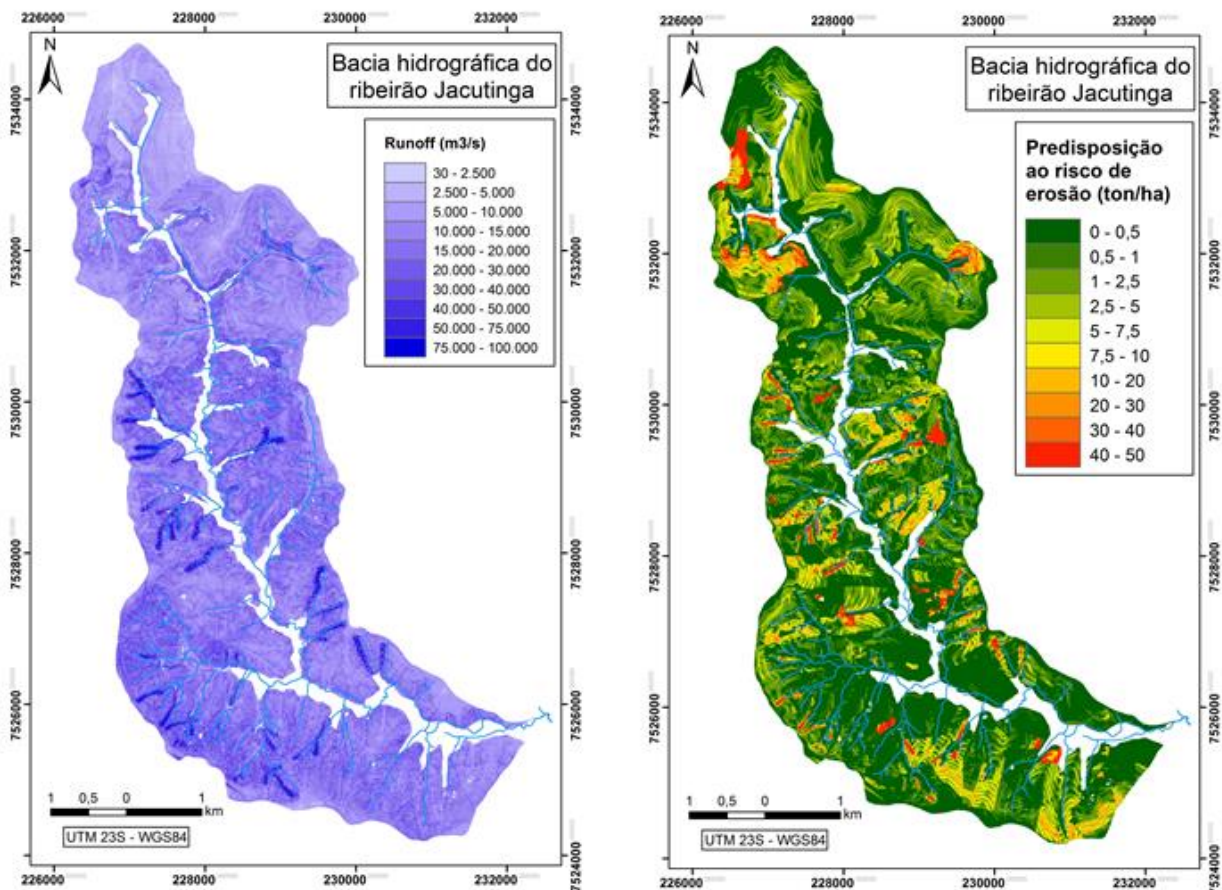
$$Tc = \frac{L^{0,8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{1900 * S} \quad (7)$$



Em que: $q_{pi,j}$ = vazão pico derivada de um hidrograma triangular hipotético (m³/s); $Q_{i,j}$ = volume do escoamento superficial (m³); A = área (considerou-se a área do pixel em ha); T_c = tempo de concentração da bacia (hora); L = extensão de vertente (adimensional); CN = valores do índice da Curva Número; e S = grau de declividade (%).

4 Resultados

Os valores de T_c obtidos pelo método proposto por Genovez (1993), o qual contempla elementos como L , S e o grau de permeabilidade pela CN , variaram entre 0,1 e 15,24 (h). Tendo em vista a precipitação total de 1.093 mm referente ao período de 06/2013 a 05/2014, o fator runoff é apresentado na Figura 4a, e o resultado dado pela MEUPS dado pelo mapa de predisposição ao risco de erosão – Figura 4b.



Figuras 4a e 4b. Fator *Runoff* e predisposição aos riscos de erosão do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.

Observou-se que os baixos valores de runoff coincidem com a ocorrência de solos de menor erodibilidade e maior permeabilidade, e em áreas com relevo plano a suave ondulado. Enquanto que as maiores taxas de escoamento superficial estão localizadas junto aos canais de primeira ordem



(conforme classificação de Strahler, 1957) cujas declividades são superiores a 12%, coincidindo com ocorrência de solos rasos e de maior erodibilidade, como os Cambissolos Háplicos e Argissolos Vermelho Amarelos com textura argilosa.

O mapa de predisposição ao risco de erosão apresentou valores de perda entre 0 e 50 t ha⁻¹ano⁻¹. Em áreas cuja vegetação ripária encontra-se preservada, associada a declives inferiores a 12%, as perdas de solos estimadas foram inferiores a 0,5 t ha⁻¹ano⁻¹. Observou-se que muitas áreas localizadas em declives superiores a 12% de declividade, mesmo com usos da terra de menor impacto, apresentaram perdas superiores a 5 t ha⁻¹ano⁻¹. Quando verificadas as regiões cujo uso é com cana-de-açúcar, verificam-se perdas variando de a 7,5 a 20 t ha⁻¹ano⁻¹, valores estes superiores aos limites toleráveis de perdas referentes aos Argissolo Vermelho Amarelo, textura argilosa e Cambissoloháplico, textura argilosa. Também, em áreas de solo exposto ou área construída, os valores de perda são superiores a 40 t ha⁻¹ano⁻¹.

5 Conclusão

A documentação cartográfica, o uso de imagens de satélite, a aplicação da MEUPS e a integração dos dados em ambiente SIG foram essenciais para a modelagem da erosão hídrica do solo na área de estudo. A aplicação da MEUPS possibilitou a indicação das áreas mais frágeis e propensas à erosão, e aportes de sedimento na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga. Também, a avaliação das variáveis ambientais do modelo, bem como a distribuição espacial das estimativas de perdas de solo, possibilita a compreensão de cenários e apontamentos para adequação do uso da terra em nível de bacias hidrográficas.

6 Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processo 2012/19935-7), à Prefeitura Municipal de Ipeúna e à Coordenadoria de Assistência Técnica Integral - CATI.

7 Bibliografia

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

CHAVES, H.M.L. Análise Global da sensibilidade dos parâmetros da equação universal de perda de solo modificada (MUSLE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p.345-350, 1991.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999. 236 p.



CORRÊA, E. A. **Perdas de solo e índices de vegetação: proposta metodológica para a determinação do fator C (MEUPS) em pastagens e cana-de-açúcar.** Tese de Doutorado, 2016. (Doutorado em Geografia). Rio Claro, Universidade Estadual Paulista.

CORREA, E. A.; PINTO, S. dos A. F., COUTO JUNIOR, A. Espacialização temporal das perdas de solos em uma microbacia hidrográfica com predomínio de solos arenosos. **Geografia**, v. 40, n. 1, p. 101-118, 2015.

COUTO JUNIOR, A. A. **Erosão hídrica e transporte sedimentos na Bacia do Ribeirão Cachoeirinha (Rio Claro, SP).** Universidade Estadual Paulista, Relatório interno, 2014.

DESMET, P. J. J.; G. GOVERS. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51 n. 5, p. 427-433, 1996.

DONZELI, P. L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S. A. F.; NOGUEIRA, F. P.; ROTTA, C. L.; LOMBARDI NETO, F. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para o planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. Campinas, **Documentos IAC**, v. 29, p.91-119, 1992.

GENOVEZ, A. M. **Métodos de Estimação de Vazões de Enchentes Para Pequenas Bacias.** 1983. 96 f. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra.** 3. ed., Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

LOMBARDI NETO, F, PINTO, S.A.F.; DONZELI, P.L.; VALÉRIO FILHO, M.; VALERIANO, M. M. Análise comparativa da aplicação dos modelos MUSLE e USLE, com o suporte de técnicas de geoprocessamento. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, 10, 1994, Florianópolis. **Anais...** Campinas: SBCS, 1994. p. 127.

MORAES, I. C. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica MEUPS e WEPP: contribuição em bacias hidrográficas.** 2016. Doutorado (Doutorado em Geografia). Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

PEREIRA, L. H.; PINTO, S.A.F., 2007. Utilização de imagens aerofotográficas no mapeamento multitemporal do uso da terra e cobertura vegetal na bacia do rio Corumbataí – SP, com o suporte de sistemas de informações geográficas. In: **Simpósio Brasileira de Sensoriamento Remoto**, 13, INPE, São José dos Campos, **Anais...** pp. 1321-1328.

SAVABI, M.R. Modeling subsurface drainage and surface runoff with WEPP. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, 119:801-813, 1993.

SILVA, V. C. da. Cálculo automático do fator topográfico (LS) da EUPS, na bacia do rio Paracatu. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 33, n. 1, p.29-34, 2003.



SCS - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, **Chapter 9. Hydrologic Soil-Cover Complexes**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. July, 2004.

SCS - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, **Chapter 7. Hydrologic Soil Groups**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. May, 2007.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, p. 913-920, 1957.

VAN OOST, K.; GOVERS, G.; DESMET, P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. **Landscape Ecology**, v.15, n. 6, p. 579- 591, 2000.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: United States Department of Agriculture, 1978, 57 p. (Agriculture Handbook, n. 537).

WILLIAMS, J. R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. USDA-ARS Handbook S-40, 1975. 118-124 p.