

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências

Exatas Campus de Rio Claro

ISABEL CRISTINA MORAES

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO  
DA EROÇÃO HÍDRICA MEUPS E WEPP:  
CONTRIBUIÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Sergio dos Anjos Ferreira Pinto

Rio Claro - SP

2016

ISABEL CRISTINA MORAES

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO  
DA EROÇÃO HÍDRICA MEUPS E WEPP:  
CONTRIBUIÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geografia.

**Comissão Examinadora**

Prof. Dr. Sergio dos Anjos Ferreira Pinto (**Orientador**)  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP/Rio Claro

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cenira Maria Lupinacci  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP/Rio Claro

Prof. Dr. Gilberto José Garcia  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP/Rio Claro

Prof. Dr. Antônio Marcos Machado de Oliveira  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU/Uberlândia

Prof. Dr. Ronalton Evandro Machado  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/Limeira

Resultado Final - APROVADO

Rio Claro (SP), 07 de março de 2016.

551.42 Moraes, Isabel Cristina  
M827a Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica  
MEUPS e WEPP : contribuição em bacias hidrográficas /  
Isabel Cristina Moraes. - Rio Claro, 2016  
191 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Sergio dos Anjos Ferreira Pinto

1. Geomorfologia. 2. Erosão hídrica laminar. 3.  
Modelagem ambiental. 4. Parcelas experimentais. I. Título.

### **Agradeço:**

A Deus, força primeira do Universo, por me permitir realizar esta jornada.

Ao prof. Sergio dos Anjos, por todos os anos de trabalho, estudo e dedicação, pela generosidade de compartilhar seus conhecimentos, e por trilhar comigo parte do meu caminho de construção profissional e pessoal.

À prof<sup>a</sup>. Cenira, por participar ativamente das etapas deste trabalho, além de toda a dedicação, carinho e disponibilidade. Suas conversas e contribuições foram, sem dúvida, agradáveis e edificantes.

À FAPESP, pelo apoio financeiro e incentivo à tese e ao grupo de pesquisa. Este fomento foi essencial para o desenvolvimento do projeto, aos inúmeros trabalhos de campo, ao apoio técnico e ao aperfeiçoamento profissional.

À minha família! Por todo amor, carinho, incentivo, apoio e paciência. Por acreditarem no meu trabalho, por unirem esforços, e se envolverem nesta pesquisa. A eles, dedico minhas conquistas.

À Edvania Corrêa, pela amizade de todos esses anos, por compartilhar do mesmo sonho, da mesma luta, e da mesma dedicação. Por todo incentivo, confiança e disponibilidade, e por me motivar nos momentos mais necessários.

Ao amigo Ricardo Jordão, pelo incentivo, dedicação e disponibilidade em ajudar, sempre.

Aos colegas de trabalho, por todo carinho, auxílio, confiança, paciência, e apoio dentro e fora de campo: Luiz Henrique Pereira, Antônio Coutinho Jr., Edvaldo Guedes Jr., Eder Paulo Spatti, Milla Leite, Estevão Stefanuto, Camila Barbosa, Elias Meyer, prof. Fabiano e prof. Rodrigo.

Ao apoio técnico de queridos amigos: Carlos Burigo, Álvaro Ferreira, Lucimari Rossetti, Magali, Sueli, Arnaldo, Bira, Bete, Cássia e Hias.

Ao apoio de campo e logística: pessoal da manutenção da UNESP/Rio Claro, pessoal da Prefeitura Municipal de Ipeúna, Eng<sup>o</sup>Luiz Scotton e CATI de Ipeúna.

Ao Sr. Edson e Rafael pela disponibilidade de suas propriedades, e apoio.

Por toda amizade e convivência, e que tornaram o dia-a-dia sempre especial: Daniel Menino Limeira, Chéu, Quelzinha, Michele Barbosa, Janine, Mayra, Day, Lady, Pamela Freitas, Ronny, Tati Maslowa, Clarisse Lacerda e Matheus Godoy.

## RESUMO

A intensificação do uso das terras torna-se cada vez mais evidente em função da crescente produção de alimentos à população humana. A aplicação de práticas inadequadas às múltiplas funcionalidades do solo tem provocado a erosão hídrica acelerada como um dos principais processos de degradação deste recurso. No esforço de colaborar em estudos de conservação dos solos, avaliaram-se os modelos preditivos de erosão hídrica MEUPS – Equação Universal de Perda de Solo Modificada (Williams, 1975) e WEPP – *Water Erosion Prediction Project* (Lafren, 1991) por meio da comparação das estimativas de perda de solo com dados empíricos de parcelas experimentais de pinos de erosão. A variabilidade de parâmetros envolvidos nas simulações motivou a definição de duas bacias hidrográficas de características hidrossedimentológicas distintas, as bacias do ribeirão Jacutinga (Rio Claro – SP) e do córrego do Monjolo Grande (Ipeúna - SP), para avaliar o comportamento erosivo em solos oriundos de argilitos e arenitos, respectivamente. No período experimental de junho/2013 a agosto/2014, parcelas experimentais de 1 m<sup>2</sup> foram monitoradas em diferentes condições de declividade, posição topográfica, forma da vertente e cobertura vegetal – pastagem, cana-de-açúcar, e vegetação ripária, e em solo descoberto. Nos Argissolos e Cambissolos de textura argilosa foram registradas perdas de 0,018 a 0,066 ton/ha.ano<sup>-1</sup>, e deposição entre 0 e 0,026 ton/ha.ano<sup>-1</sup>, e nos Neossolos Quartzarênicos e Argissolos de textura arenosa, houve predomínio deposicional, entre 0,004 e 0,085 ton/ha.ano<sup>-1</sup>, e perdas de 0,002 a 0,11 ton/ha.ano<sup>-1</sup>. As maiores perdas estão associadas a maiores porções das frações de areia fina e silte, e fraca agregação pelos baixos teores de argila e matéria orgânica. O maior percentual de cobertura vegetal foi determinante para as menores perdas, evidenciando maior fator de proteção do solo por plantio direto que por plantio convencional. As simulações foram realizadas para o ano experimental e para eventos específicos de chuva: Evento 1 - intensidade superior a 50 mm/h, e Evento 2 – intensidade inferior a 14 mm/h. A avaliação dos modelos foi dada pelos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), de Pearson (PR<sup>2</sup>) e de Nash-Sutcliffe (COE), sendo o último o mais eficiente. A MEUPS foi simulada com obtenção do comprimento de rampa (L) pelo método automático (Desmet e Govers, 1996) e manual (distância linear). As estimativas foram satisfatórias a muito boas (COE médio > 0,7) principalmente nos solos argilosos com predomínio das perdas, e com fator L manual. No WEPP, foram realizadas simulações pelo módulo vertente (software WEPP) e bacia (GeoWEPP – versão do WEPP em SIG). Em todas as simulações do WEPP vertente foram obtidos resultados insatisfatórios (COE < 0). No GeoWEPP, as estimativas dadas em classes de perda e deposição apresentaram classes coincidentes aos registros das parcelas, entre 20% e 90% em solos argilosos e entre 40% e 50% nos solos arenosos. As melhores estimativas ocorreram para chuvas de baixa intensidade, evidenciando a inadequação do modelo em eventos extremos e em condições tropicais. Ressalta-se que o período experimental representa um ano atípico de chuva, com baixos índices pluviométricos em comparação às médias anuais históricas. Considerando os valores superestimados do WEPP e GeoWEPP, apenas a MEUPS mostrou-se adequada como ferramenta para estudos de erosão hídrica, evidenciando a contribuição deste modelo na gestão do uso da terra e no planejamento de sistemas agrícolas e práticas conservacionistas.

Palavras-chave: erosão hídrica laminar; modelagem ambiental; MEUPS; WEPP; parcelas experimentais.

## ABSTRACT

The land use intensification becomes more and more evident due the growing of food production and supply to the human population. The application of inadequate practices to the multiple functions has shown the accelerated water erosion as a major degradation processes for this resource. In an effort to collaborate for soil conservation studies, this research aimed to evaluate the predictive models of erosion MUSLE – Modified Universal Soil Loss Equation (Williams, 1975) and WEPP – Water Erosion Prediction Project (Laflen, 1991) by comparing the estimated soil loss and empirical data from pins experimental plots. The variability of simulated parameters led the definition of two watersheds with different hydrossedimentological characteristics, watershed of stream Jacutinga (Rio Claro – SP/Brazil) and stream Monjolo Grande (Ipeúna – SP/Brazil) to assess the erosive behavior in soils derived from mudstones and sandstones, respectively. In the experimental period of June/2013 to August/2014, experimental plots of 1 m<sup>2</sup> were monitored in different conditions of slope, topographic position, slope shape and vegetation cover - grazing, sugarcane, riparian vegetation and bare soil. In Lixisols and Cambisols clayey the losses registered were 0.018 to 0.066 ton/ha.year<sup>-1</sup> and deposition between 0 and 0.026 ton/ha.year<sup>-1</sup>, and in Quartzarenic Neosols and Lixisols of sandy texture, where dominated depositional process, between 0.004 and 0.085 ton/ha.year<sup>-1</sup>, and the losses were 0.002 to 0.11 ton/ha.year<sup>-1</sup>. The greatest losses are associated with the largest portion of fine sand and silt fractions, and weak aggregation by low levels of clay and organic matter. The highest percentage of vegetation cover was crucial for smaller losses, showing greater soil protection factor for direct plantation which in conventional tillage. The simulations were performed for the experimental year and specific rainfall events: Event 1 - intensity greater than 50 mm/h, and Event 2 - intensity less than 14 mm/h. The evaluation of the models was given by the coefficients of determination (R<sup>2</sup>), Pearson (PR<sup>2</sup>) and Nash-Sutcliffe (COE), the latest being the most eficiente one. The MUSLE was simulated obtaining the ramp length (L) by the automatic method (Desmet and Govers, 1996) and manual (linear distance). Estimates were satisfactory to very good (average COE > 0.7) especially in clay soils with predominance of soil losses, and manual factor L. For WEPP, the simulations were performed by hill module (WEPP software) and watershed (GeoWEPP – GIS version for WEPP). In all aspects, WEPP simulations have obtained unsatisfactory results (COE < 0). In GeoWEPP, the estimatives given in loss and deposition classes showed coincidence of classes and records of the plots between 20% and 90% in clayey soils, and between 40% and 50% in sandy soils. The best estimates occurred for low intensity rains, pointing out the inadequacy of this model in extreme events and in tropical conditions. It is emphasized that the rain in the experimental period atypical, with low rainfall compared to historical annual averages. Considering the overestimated values of WEPP and GeoWEPP, only MUSLE was adequate as a tool to water erosion studies, especially for the contribution of this model in land use management, in the planning of agricultural systems and conservation practices.

Keywords: water erosion; environmental modeling; MUSLE; WEPP; experimental plots.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das áreas de estudo: bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande.....	32
Figura 2. Quadro geológico das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande.....	34
Figura 3. Mapa topográfico das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande.....	37
Figura 4. Mapa pedológico da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.....	39
Figura 5. Mapa pedológico da bacia hidrográficas do córrego Monjolo Grande.....	40
Figura 6. Comparação das precipitações no período experimental e da média histórico dos postos D4-016 (Graúna/Rio Claro-SP), D4-036 (Itirapina-SP) e D4-012 (Rio Claro-SP). .....	43
Figura 7. Fixação do infiltrômetro.....	49
Figura 8. Registro da alteração do nível da água no infiltrômetro .....	49
Figura 9. Uso do penetrômetro de impacto .....	50
Figura 10. Registro da resistência mecânica do solo.....	50
Figura 11. Fluxograma de elaboração dos mapas pedológicos. ....	51
Figura 12. Organograma de elaboração dos mapas de forma de vertente. ....	52
Figura 13. Pino de erosão fixado na terra. ....	53
Figura 14. Esquema de distribuição dos pinos de erosão em parcelas de 1 x 1 m. ....	53
Figura 15. Localização das parcelas experimentais na bacia do ribeirão Jacutinga.....	55
Figura 16. Localização das parcelas experimentais na bacia do córrego Monjolo Grande.....	56
Figura 17. Parcelas em cana-de-açúcar: (a) JC3 em estágio inicial; (b) JC4 intermediário.....	57
Figura 18. Parcela em cana-de-açúcar: MC3 em estágio adulto. ....	57
Figura 19. Parcela experimental em pastagem: JP2. ....	58
Figura 20. Parcela experimental em pastagem: MP2. ....	58
Figura 21. Parcela experimental em solo exposto: JSE (carreador). ....	58
Figura 22. Parcela em vegetação ripária: JM1. ....	58
Figura 23. Parcela em vegetação ripária: MM1. ....	58
Figura 24. Fluxograma dos procedimentos relativos a estruturação e implementação da MEUPS.....	70
Figura 25. Aquisição de fotos do solo em Nadir, a uma distância de 2 m, e tendo como referência um quadrante de 1 m <sup>2</sup> , para obtenção do percentual de cobertura vegetal.....	72
Figura 26. Fotos da bacia do ribeirão Jacutinga, adquiridas conforme o método mostrado na Figura 25.....	72
Figura 27. Fotos da bacia do córrego Monjolo Grande, adquiridas conforme o método mostrado na Figura 25. ....	72
Figura 28. Fluxograma dos procedimentos relativos a estruturação .....	76
Figura 29. Fluxograma do segmento de integração da pesquisa. ....	80
Figura 30. MDE para as bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande .....	84
Figura 31. Mapas hipsométricos das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande.....	85
Figura 32. Topografia suave da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.....	86
Figura 33. Vista da nascente do ribeirão Jacutinga (cota 740 m). Ao fundo, os relevos residuais associados às <i>cuestas</i> arenito-basálticas, da bacia do córrego do Monjolo Grande.....	86
Figura 34. Vista da parcela experimental MP3 e dos morros do Bizigueli e da Guarita, na bacia do córrego do Monjolo Grande.. .....	87

Figura 35. Mapas de declividade das bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. ....	88
Figura 36. Mapa pedológico da bacia do ribeirão Jacutinga, pontos de tradagem e respectivas classes de solo. ....	91
Figura 37. Análise da capacidade de infiltração da bacia do ribeirão Jacutinga: (a) topossequência 1; (b) topossequência 2; (c) topossequência 3. Os pontos 8a e 8b correspondem às parcelas JM2 e JM1, respectivamente. ....	95
Figura 38. Análise da resistência à penetração na bacia do ribeirão Jacutinga: (a) Número de impactos por profundidade e (b) Índice de Penetração (número impacto/dm <sup>-1</sup> ). O ponto 8a corresponde à parcela JM2. ....	96
Figura 39. Início da formação de enxurrada próximo à parcela JC4. ....	98
Figura 40. Mapa pedológico da bacia do córrego Monjolo Grande, pontos de tradagem e respectivas classes de solo. ....	100
Figura 41. Análise da capacidade de infiltração da bacia do córrego Monjolo Grande: (a) topossequência 1; (b) topossequência 2; (c) topossequência 3; ....	104
Figura 42. Análise da resistência mecânica à penetração da bacia do córrego do Monjolo Grande: (a) Número de impactos por profundidade e (b) Índice de Penetração (número impacto/dm <sup>-1</sup> ). ....	104
Figura 43. Afloramento da formação Corumbataí, soleira do canal de primeira ordem, no setor das parcelas experimentais JP1, JP2 e JSE. ....	107
Figura 44. Feições de abatimento de superfície no setor próximo às parcelas experimentais JP1 e JP2. ....	108
Figura 45. Sulcos erosivos associados à caminho de gado. ....	109
Figura 46. Sulcos erosivos associados à caminho de gado em pastagem degradada. ....	109
Figura 47. Abatimento de superfície e sulcos erosivos ....	109
Figura 48. Exposição da rocha (form. Pirambóia) e feições lineares pela concentração de enxurrada no carreador. ....	109
Figura 49. Ravinamento no carreador, entre cultivos por pastagem e cana-de-açúcar. ....	110
Figura 50. Feição linear no carreador, com aprofundamentos pontuais por turbilhamento. ....	110
Figura 51. Braços de avanço de voçoroca ....	110
Figura 52. Sulcos profundos associados à ocorrência de voçoroca. ....	111
Figura 53. Mapeamento de forma da vertente das bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. ....	113
Figura 54. Registro pluviométrico do período experimental das bacias hidrográficas (BH) do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. ....	115
Figura 55. Remobilização de areia fina na parcela MC1 ....	119
Figura 56. Acúmulo de areia fina próximo à parcela MC4. ....	119
Figura 57. Transporte de frações finas no carreador, próximo à parcela MC2. ....	119
Figura 58. Alteração mensal da superfície do solo das parcelas da bacia do Jacutinga para as coberturas: a. Cana-de-açúcar, b. Pastagem e c. Vegetação ripária. ....	122
Figura 59. Alteração mensal da superfície do solo nas parcelas da bacia do Monjolo Grande para as coberturas: a. Cana-de-açúcar, b. Pastagem e c. Vegetação ripária. ....	123
Figura 60. Comparação da presença de resíduo vegetal: (a) manutenção dos resíduos vegetais na parcela JC3 e (b) plantio convencional na parcela MC1. ....	125
Figura 61. Fator Topográfico (fT) das bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego do Monjolo Grande. ....	129
Figura 62. Mapa de cobertura e uso da terra (cenário 2013), para as bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. ....	132
Figura 63. Fator <i>runoff</i> para as bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande ...	135



Figura 64. Predisposição ao risco de erosão (ton/ha) para a bacia do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande .....	137
Figura 65. Gráficos de dispersão amostral do modelo MEUPS simulado em SIG e manualmente, para a bacia do Jacutinga (a e b) e do Monjolo Grande (c e d).....	141
Figura 66. Mapa de perdas e deposição gerados pelo GeoWEPP. ....	152
Figura 67. Aporte de sedimentos (ton/ha) do período experimental relativo à extrapolação dos registros das parcelas das bacias do Jacutinga e do Monjolo Grande.. ....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Formações geológicas das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e córrego Monjolo Grande.....	35
Tabela 2. Classes de declividade (%) e respectivas classes de relevo.....	47
Tabela 3. Esquema das parcelas experimentais na bacia do córrego do Jacutinga. ....	55
Tabela 4. Esquema das parcelas experimentais na bacia do ribeirão Monjolo Grande.....	56
Tabela 5. Índices de permeabilidade (P) para cada classe textural de solo. ....	60
Tabela 6. Distribuição do número de amostras por classe de solo em cada área de estudo, para o cálculo da erodibilidade.....	61
Tabela 7. Classes temáticas, definição e descrição dos elementos de fotointerpretação.....	63
Tabela 8. Classes temáticas, definição e descrição dos elementos de fotointerpretação.....	64
Tabela 9. Classes de declividade e valores obtidos para P. ....	65
Tabela 10. Grupos hidrológicos de solo (SCS, 2007) e correspondência com classe de solo. ..	67
Tabela 11. Valores da Curva-Número (CN) para diferentes usos da terra e grupos hidrológicos de solo*.....	68
Tabela 12. Eventos de chuva levantados e simulados. ....	78
Tabela 13. Distribuição das áreas das bacias hidrográficas (BHs) estudadas para cada classe hipsométrica.....	86
Tabela 14. Distribuição das áreas das bacias hidrográficas (BHs) estudadas para cada classe de declividade.....	89
Tabela 15. Caracterização dos perfis de solo da bacia do ribeirão Jacutinga, e respectivas descrições.....	92
Tabela 16. Distribuição das frações granulométricas dos solos das tradagens realizadas na bacia do ribeirão Jacutinga, e classificação no 1º nível categórico.....	93
Tabela 17. Análise química de amostras da bacia do ribeirão Jacutinga. ....	94
Tabela 18. Umidade antecedente média da bacia do ribeirão Jacutinga (%). ....	94
Tabela 19. Distribuição das frações granulométricas dos solos das tradagens realizadas na bacia do córrego Monjolo Grande, e classificação no 1º nível categórico. ....	100
Tabela 20. Análise química de amostras da bacia do córrego Monjolo Grande. ....	102
Tabela 21. Umidade antecedente média da bacia do córrego Monjolo Grande (%). ....	102
Tabela 22. Classes de solo e respectivas áreas de ocorrência na bacia do ribeirão Jacutinga. .	106
Tabela 23. Classes de solo e respectivas áreas de ocorrência na bacia do córrego Monjolo Grande. ....	106
Tabela 24. Distribuição de forma de vertente das áreas de estudo.....	114
Tabela 25. Resultado da soma das perdas, soma da deposição e aporte das parcelas experimentais na bacia do córrego do Jacutinga .....	116
Tabela 26. Resultado da soma das perdas, soma da deposição e aporte das parcelas experimentais na bacia do córrego Monjolo Grande.....	117
Tabela 27. Valores de erodibilidade (K) para as principais classes de solos .....	127
Tabela 28. Fatores L (metros) e fT (adimensional) obtidos em SIG e manualmente para as bacias hidrográficas. ....	130
Tabela 29. Distribuição das classes de uso da terra nas bacias hidrográficas. ....	133
Tabela 30. Fatores S (declividade), K (erodibilidade), C (cobertura e uso da terra) e P (práticas conservacionistas) da MEUPS, das parcelas experimentais das bacias hidrográficas .....	138
Tabela 31. Parâmetros L, fT, Y e perdas de solo estimadas pela MEUPS pelo método em SIG e manual, registro do aporte e perdas de solo das parcelas experimentais e COE, para a bacia do ribeirão Jacutinga.....	139

Tabela 32. Parâmetros L, fT, Y e perdas de solo estimadas pela MEUPS pelo método em SIG e manual, registro do aporte e perdas de solo das parcelas experimentais e COE, para a bacia do córrego Monjolo Grande. ....	140
Tabela 33. Análise da MEUPS por classes de uso da terra. ....	143
Tabela 34. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 1, para a bacia do ribeirão Jacutinga. ....	145
Tabela 35. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 2, para a bacia do ribeirão Jacutinga. ....	146
Tabela 36. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 1, para a bacia do córrego Monjolo Grande. ....	146
Tabela 37. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 2, para a bacia do córrego Monjolo Grande. ....	147
Tabela 38. Percentuais de cobertura vegetal, cobertura seca e ausência de cobertura. ....	149
Tabela 39. Valores do Índice de Área Foliar (IAF) e desvio padrão amostral no Cenário 1 para as duas bacias. ....	150
Tabela 40. Valores de IAF e desvio padrão amostral no Cenário 2 para as duas bacias. ....	150
Tabela 41. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP (vertente), para a bacia do ribeirão Jacutinga. ....	153
Tabela 42. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP (vertente), para a bacia do córrego Monjolo Grande. ....	153
Tabela 43. Resultados do WEPP (vertente) para os eventos simulados, para as duas bacias. .	155
Tabela 44. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 1, bacia do Jacutinga.	156
Tabela 45. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 2, bacia do Jacutinga.	156
Tabela 46. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 1, bacia do Monjolo Grande. ....	157
Tabela 47. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 2, bacia do Monjolo Grande. ....	157

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- $\beta$  = coeficiente de turbulência induzida pelo impacto da gota de chuva (assume-se 0,5)  
 $\Theta$  = conteúdo da água no solo na zona radicular (m)  
 $\tau$  = tensão cisalhante do escoamento superficial sobre a partícula ( $\text{N m}^{-2}$ )  
 $\tau_c$  = tensão cisalhante necessária para a ocorrência da liberação de partículas ( $\text{N m}^{-2}$ )  
 $A$  = área da parcela experimental ( $\text{m}^2$ )  
 $A_{i,j}$  = área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) ( $\text{m}^2$ )  
 $C$  = fator de uso e manejo do solo (adimensional)  
 $CN$  = Curva-Número  
 $C_i$  = parâmetro que considera a cobertura vegetal na erosão entressulco (adimensional)  
 $CEAPLA$  = Centro de Análise e Planejamento Ambiental (IGCE/UNESP/Rio Claro/SP)  
 $COE$  = Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe  
 $D$  = tamanho da grade de células (m);  
 $D$  = perda acumulada de água (m)  
 $D_i$  = taxa de liberação de sedimentos nas áreas entressulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )  
 $DMP$  = diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2 mm (mm)  
 $Dr$  = taxa de liberação de sedimentos em sulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )  
 $D_s$  = densidade aparente do solo ( $\text{ton/m}^3$ )  
 $ET$  = evapotranspiração (m)  
 $fT$  = fator topográfico (adimensional)  
 $G$  = carga de sedimento ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )  
 $Ge$  = parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo na erosão entressulcos (adimensional)  
 $h$  = altura da alteração da superfície do solo (m)  
 $h$  = lâmina de escoamento (m)  
 $h$  = diferença entre altura do nível de água no cilindro e altura registrada no minuto anterior (cm)  
 $i_i$  = intensidade instantânea da precipitação ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $I$  = Intensidade da chuva (mm/h)  
 $I$  = interceptação da precipitação pela vegetação (m)  
 $IAF$  = Índice de Área Foliar  
 $IP$  - Índice de Penetração (número de impacto/ $\text{dm}^{-1}$ )  
 $I_p$  = intensidade da precipitação ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $K$  = fator de erodibilidade do solo ( $\text{t.ha.h.MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ )  
 $K_i$  = parâmetro de erodibilidade entressulco ( $\text{kg.m}^{-4} \text{s}$ )  
 $K_r$  = parâmetro de erodibilidade em sulco ( $\text{m}^{-1} \text{s}$ )  
 $L$  = comprimento de rampa (m)  
 $LS$  = extensão de vertente (m);  
 $M$  = novo silte x (novo silte + nova areia), sendo o *novo silte* a soma do fração areia muito fina (%) + fração silte (%) e a *nova areia* a soma das frações com diâmetros entre 2,0 e 0,1 mm;  
 $m$  = parâmetro de ajuste que varia em função da declividade da rampa (adimensional)  
 $n$  = número de impactos  
 $NDVI$  = Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada  
 $P$  = fator de práticas conservacionistas (adimensional)  
 $P$  = precipitação (mm)  
 $P$  = perda de solo (ton/ha)  
 $P$  = código da permeabilidade do solo  
 $p$  = profundidade de impacto (dm)  
 $PR^2$  = Coeficiente de Determinação de Pearson  
 $Q$  = volume de escoamento superficial ( $\text{m}^3$ )

$q$  = vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ( $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )  
 $Q_d$  = escoamento lateral subsuperficial (m)  
 $q_p$  = vazão pico do escoamento superficial ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $R$  = fator de erosividade da chuva ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ )  
 $r$  = raio do cilindro de infiltração (cm)  
 $R^2$  = Coeficiente de Determinação  
 $REL$  = multiplicação do teor de matéria orgânica (%) pelo teor da nova areia (%)  
 $RP$  = resistência mecânica do solo à penetração (MPa).  
 $Runoff$  = produção de sedimentos de um evento de chuva ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $S$  = declividade (%)  
 $S_a$  = parâmetro de retenção da água no solo pelas características de superfície do terreno  
 $SAVI$  = Índice de Vegetação Ajustada ao Solo  
 $S_f$  = fator de ajuste relativo à declividade (adimensional)  
 $SIG$  = Sistemas de Informação Geográfica  
 $SCS$  = Soil Conservation Service (atual *National Resource Conservation Service* – NRCS/USDA)  
 $t$  = tempo (s)  
 $T_c$  = capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento ( $\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ )  
 $TFSA$  = Terra Fina Seca ao Ar  
 $TI$  = taxa de infiltração média dada em  $\text{cm/s}$ ;  $\text{cm/min}$ ;  $\text{mm/s}$ ;  $\text{mm/m}$  ou  $\text{mm/h}$ ;  
 $T_i$  = taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ )  
 $V$  = volume de água infiltrada por minuto  
 $vol$  = volume total infiltrado  
 $V_f$  = velocidade efetiva da deposição para o sedimento ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $X$  = distância percorrida pelo escoamento superficial  
 $X_{i,j}$  = valor da direção do fluxo  
 $Y$  = fornecimento de sedimentos para uma determinada chuva (toneladas)

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	ix
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1. Fundamentação teórica .....	4
2.2. Contexto ambiental da erosão hídrica dos solos .....	6
2.2.1. Fatores envolvidos nos processos erosivos .....	7
2.2.2. Análise multiescalar .....	11
2.3. Modelos preditivos de erosão hídrica .....	12
2.3.1. MEUPS ( <i>Modified Universal Soil Loss Equation</i> – Equação Universal de Perda de Solo Modificada).....	16
2.3.2. WEPP ( <i>Water Erosion Prediction Project</i> -Projeto de Predição de Erosão Hídrica).....	17
2.3.3. Avaliação e validação dos modelos preditivos de erosão hídrica .....	21
2.4. Contribuição das Geotecnologias .....	25
2.4.1. Sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) aplicados à modelagem .....	25
2.4.2. Levantamento e mapeamento de solos.....	27
2.4.3. Mapeamento de forma de vertente .....	29
<b>3. ÁREAS DE ESTUDO .....</b>	<b>31</b>
<b>4. MATERIAIS E ABORDAGEM METODOLÓGICA .....</b>	<b>44</b>
4.1. Segmento analítico.....	45
4.1.1. Base cartográfica, MDE, hipsometria e declividade .....	45
4.1.2. Caracterização e mapeamento de solos .....	47
4.1.3. Mapeamento de forma da vertente .....	52
4.1.4. Determinação da alteração da superfície do solo a partir de pinos de erosão .....	53
4.1.5. Parâmetros da MEUPS .....	59
4.1.5.1. Fator de erodibilidade do solos (fator K).....	59
4.1.5.2. Fator topográfico (fT) .....	61
4.1.5.3. Fator de cobertura e uso da terra (fator C).....	63
4.1.5.4. Fator de práticas conservacionistas (fator P).....	65

4.1.5.5. Fator de escoamento superficial direto ( <i>runoff</i> ) .....	66
4.1.6. WEPP e GeoWEPP .....	70
4.2. Segmento de integração .....	77
4.2.1. Comportamento erosivo do período experimental .....	77
4.2.2. Comportamento erosivo em eventos específicos de chuva .....	77
4.2.3. Análise estatística .....	78
4.2.4. Síntese do aporte de sedimentos .....	81
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>83</b>
5.1. MDE, hipsometria e declividade .....	83
5.2. Caracterização pedológica das bacias hidrográficas .....	90
5.3. Mapa de forma da vertente .....	112
5.4. Alteração da superfície do solo a partir de pinos de erosão .....	114
5.5. Avaliação da MEUPS .....	127
5.5.1. Parâmetros da MEUPS .....	127
5.5.1.1. Fator de erodibilidade do solo (fator K) .....	127
5.5.1.2. Fator topográfico (fT) .....	128
5.5.1.3. Fator de cobertura vegetal (fator C) .....	131
5.5.1.4. Escoamento superficial (fator <i>runoff</i> ) .....	133
5.5.2. Predisposição ao risco de erosão gerado pela MEUPS .....	136
5.5.2.1. Eventos específicos de chuva - MEUPS .....	145
5.6. Avaliação do WEPP .....	149
5.6.1. Parâmetros do WEPP e GeoWEPP: cobertura vegetal e IAF .....	149
5.6.2. Aporte de sedimentos gerado pelo WEPP e GeoWEPP .....	151
5.6.2.1. Eventos específicos de chuva - WEPP .....	154
5.7. Representação do aporte de sedimentos do período experimental das bacias .....	158
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>161</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>163</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com uma população mundial de mais de 7 bilhões de pessoas em 2015, e estimativa de 9,5 bilhões para 2050, projeta-se a necessidade de aumento da produção de alimentos em aproximadamente 70% entre 2005 e 2050. No entanto, caracterizada pelo declínio da qualidade dos solos em termos de suas múltiplas funcionalidades como produção e ecossistema, inclusive por processos de erosão acelerada, a degradação dos solos é uma das maiores problemáticas ambientais globais do século XXI (VAN PHAM e SMITH, 2014; IFAD, 2010).

Estimativas indicam que a degradação dos solos, seja de ordem física, química ou mecânica, já reduziu, entre 1950 e 2010, cerca de 60% das funções dos solos enquanto ecossistema (vegetação, manutenção da água no ambiente, reciclagem de nutrientes, habitat de organismos e matéria-prima). Neste sentido, há relatos de perdas de solo de aproximadamente 500 milhões de hectares nos trópicos e cerca de 33% da superfície terrestre afetada por algum tipo de degradação (FAO, 2011).

Além dos impactos negativos diretos na queda do crescimento econômico proporcionado pela atividade agrícola, principalmente em países como o Brasil, a degradação dos solos afeta diretamente a qualidade do principal recurso natural, a água. Assim, causa assoreamento e polui mananciais, reduzindo a capacidade produtiva do solo e comprometendo a segurança alimentar (LEON et al., 2014, BINI, 2009, LAMB et al, 2005; SCHERR, 2001 apud LAL, 2015).

De todo o solo do planeta, cerca de 12% vem sendo utilizado para cultivos, o que representa aproximadamente 16 milhões de km<sup>2</sup>, distribuídos em sua maioria nos trópicos úmidos (FAO, 2011). No Brasil, as áreas destinadas à produção agrícola atual são ocupadas predominantemente com milho (44,8 %), soja (40%), cana-de-açúcar (14,5%) e café (6%) (IBGE, 2012). No contexto estadual, São Paulo caracteriza-se pela alta produtividade da cana-de-açúcar, sendo o maior produtor sucroalcooleiro do país. Em 2012, sua produtividade canavieira dominou 51,82% de toda a produção nacional (CONAB, 2012). Quanto à atividade pecuária, o estado é o terceiro maior produtor de carne bovina do país, e o primeiro em exportação (IBGE, 2013), haja vista as amplas áreas de pastagem destinadas à pecuária extensiva.

Nas últimas décadas, as atividades relacionadas ao uso e ocupação da terra, tanto no âmbito rural como urbano, têm revelado uma nova dinâmica de apropriação do território. A



alteração da cobertura vegetal e os efeitos de manejo de atividades agropastoris sem planejamento prévio alteram a paisagem e degradam os solos. Também a exploração deste recurso nem sempre é acompanhada de técnicas e práticas adequadas. A velocidade e a intensidade das atividades antrópicas tornam-se superiores à capacidade de renovação do sistema ambiental e à resiliência do solo.

Neste sentido, no Brasil, são perdidas a cada ano em torno de 600 milhões de toneladas de solo agricultável, sendo que para o estado de São Paulo este valor é estimado em 194 milhões de toneladas de solo por ano (VEIGA FILHO, 1992). Some-se a isso a necessidade crescente da população pelo aumento da produção agrícola, seja pela exploração de novas áreas, seja pela intensificação da agricultura em áreas de cultivo já estabelecido (LEPSCH, 2011).

Tendo em vista que a erosão é a forma mais prejudicial de degradação dos solos (COGO et al., 2003), principalmente a erosão hídrica nas regiões tropicais, há a necessidade de investigação de seu impacto. A obtenção de dados quantitativos sobre o assunto, bem como aproximações metodológicas, auxiliam na adequação de sistemas de manejo e práticas conservacionistas dada sua importância na manutenção e preservação do solo e da água para a sustentabilidade humana.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram estabelecidas hipóteses:

- a. Modelos preditivos de erosão apresentam diferentes estimativas quanto à perda de solo;
- b. A Complexidade dos diferentes parâmetros de entrada dos modelos preditivos refletem a adequação/inadequação dos mesmos às condições edafoclimáticas brasileiras;

Fundamentada na abordagem sistêmica, e a partir das hipóteses estabelecidas, objetivou-se avaliar a erosão hídrica nas bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego do Monjolo Grande por meio da aplicação dos modelos MEUPS – Equação Universal de Perda de Solo Modificada (Williams, 1975) e WEPP – *Water Erosion Prediction Project* (Laflen, 1991) e avaliar esses modelos de simulação de perdas de solo por meio de dados empíricos de parcelas experimentais de pinos de erosão em vertente específica.

A complexidade e variabilidade de parâmetros de análise dos modelos matemáticos de simulação e predição de cenários, e as contribuições de dados experimentais para o desenvolvimento metodológico da modelagem, motivou a escolha de duas bacias

hidrográficas de características hidrossedimentológicas distintas como unidades de análise. Foram selecionadas a bacia do ribeirão Jacutinga com o predomínio de solos advindos de argilitos da formação Corumbataí, e a bacia do córrego do Monjolo Grande, com o predomínio de solos arenosos oriundos da formação Pirambóia.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Avaliar o comportamento de diferentes modelagens de bacias hidrográficas em solos derivados de argilitos e arenitos;
- b. Avaliar a adequação de modelos preditivos e as perdas obtidas em parcelas experimentais de pinos de erosão;
- c. Avaliar a interferência do uso da terra na ocorrência dos processos erosivos;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Fundamentação teórica

No século XX, Bertalanffy (1973, p.28) aponta uma tendência à organização filosófica do conceito de sistemas, e posteriormente à Segunda Guerra Mundial, suas ideias ganham repercussão com a Teoria Geral dos Sistemas. Nela, o autor pressupunha uma *episteme* complexa e de essência comum para todas as áreas do conhecimento. Com a inserção da perspectiva sistêmica nas ciências geográficas e a aplicação da Teoria Geral dos Sistemas, juntamente com a incorporação desta perspectiva às ciências naturais exercida pela escola germânica (Dokoutchaev e Sotchava, 1977), definiu-se o conceito de Geossistema (VICENTE e PEREZ FILHO, 2003).

Para Sotchava (1977), a principal concepção de geossistemas é a conexão da natureza com a sociedade, salientando o caráter de sistemas dinâmicos, flexíveis, abertos e hierarquicamente organizados. Neste contexto, os sistemas ambientais físicos, ou geossistemas, representam a “organização espacial resultante da interação dos elementos componentes físicos da natureza”, clima, topografia, água, rocha, vegetação, animais e solos, representando um sistema (organizado) composto por elementos, e funcionando por meio dos fluxos de energia e matéria (CHRISTOFOLETTI, 1999, p.42).

A organização espacial dos geossistemas é absorvida pelas ciências geográficas: “a expressão concreta na superfície terrestre constitui a relevância espacial para a análise geográfica” (Christofoletti, 1999, p.45). Neste sentido, destacam-se a contribuição de tecnologias, produtos de sistemas sensores, e a modelagem na investigação dos componentes dos geossistemas. Soma-se a isso, as contribuições da abordagem holística como elemento norteador da estruturação e análise dos sistemas ambientais. Na noção de totalidade e de dinâmica de funcionamento dos sistemas (fluxos e interações), na qual o fenômeno pode ser apreendido pelo pesquisador de modo abrangente, a abordagem holística torna-se um viés pelo qual se busca compreender a totalidade do fenômeno mais que suas partes componentes (CHRISTOFOLETTI, 1999, p.45-47).

Considerando a perspectiva sistêmica, a presente pesquisa parte da investigação estrutural e comportamental do sistema bacia hidrográfica como unidade de análise. Conforme Christofoletti (1980), uma bacia hidrográfica funciona como um sistema aberto, onde cada um dos elementos: atmosfera, vegetação, solos, corpos d’água, matéria e energia,

apresentam uma função própria, e, ao mesmo tempo, encontram-se estruturados e relacionados entre si. Essa interação é passível de quantificação, e nos permite estudar e representar os impactos das atividades antrópicas. Deste modo, essa abordagem subsidia a investigação da erosão hídrica enquanto fenômeno geográfico.

Em termos metodológicos, a investigação dos processos dinâmicos envolvidos na erosão hídrica refere-se à questão da experimentação e da modelagem. Cunha (1997, p. 56) constatou que a quantificação da erosão laminar é dada por dois processos: um indutivo, representado pela realização dos experimentos, e outro dedutivo, representado pelos modelos. Tais processos são dependentes um do outro e se complementam. Na quantificação dos processos erosivos laminares, a abordagem indutiva é representada pela utilização de experimentos que se constituem em medições dos fatos desordenados da realidade, e que torna possível estabelecer leis gerais que dão origem aos modelos (CUNHA, 1997, p. 57).

Nesta perspectiva, propôs-se o método experimental de monitoramento de parcelas de pinos de erosão. Assim, os resultados obtidos permitem a análise das perdas de solo em setores representativos das bacias hidrográficas de interesse. Segundo Borges (2009, p.48), os experimentos contribuem no desenvolvimento dos modelos, sendo também utilizados para comprovar sua eficácia. Constata-se assim que, para a quantificação dos processos erosivos, os experimentos são pontos de ligação entre o mundo real e os modelos.

Na abordagem dedutiva, por sua vez, é atribuída a quantificação das perdas de solo por erosão hídrica por meio da modelagem. Os modelos buscam aproximar-se da realidade, ajustando-se a experiências empíricas:

“constitui procedimento teórico envolvendo um conjunto de técnicas com a finalidade de compor um quadro simplificado e inteligível do mundo, como atividade de reação do homem perante a complexidade aparente do mundo que o envolve” (CHRISTOFOLETTI, 1999, p.19)

Tendo em vista tais premissas, o presente estudo desenvolve-se pautado nos trabalhos referentes a erosão hídrica e a modelagem de sistemas, tendo como principais autores: Tricart (1968), Wishmeier e Smith (1978), Williams (1975), Christofolletti (1980), (1979) e (1999), Donzeli et al. (1992), Lombardi Neto et al. (1994), Pinto (1996), Cunha (1997), Bertoni e Lombardi Neto (2008), Pereira e Pinto (2007) e Florenzano (2008).

## 2.2. Contexto ambiental da erosão hídrica dos solos

Solo é o mais básico de todos os recursos naturais. Seu processo de formação, de desenvolvimento biológico, e de fertilidade em termos produtivos, é lento e medido apenas no tempo da escala geológica (LAL, 1990, p.3). A priori, o conceito de solo era pautado pela ideia de um corpo natural, produto da natureza, inserido na concepção de ser meramente uma camada de rocha fragmentada e intemperizada (BUCKMAN e BRADY, 1968, p.21).

A concepção de solos tal como conhecida hoje, se deu a partir dos trabalhos de Dokuchaiev (1980), em que se reconheceu a dinamicidade da gênese dos solos, a complexidade da interação de inúmeros fatores como a rocha originária, clima, topografia e organismos. Deste modo, surge o solo como objeto de estudo e com método de investigação próprio. A partir de tais contribuições, chega-se ao entendimento atual de perfil de solo e do relacionamento entre seus horizontes (VERDADE, 1972, p.5).

Em termos gerais, a erosão do solo implica na remoção física do material de superfície do solo por diversos agentes, incluindo o impacto da gota de chuva, os fluxos de água em superfície e os fatores envolvidos nos eventos climáticos (LAL, 1990, p.3). Galetti (1973) define erosão como sendo a desagregação e o transporte do solo, subsolo e rochas em decomposição, pelas águas, ventos ou geleiras. Bradford e Huang (1996, p. 60) e Morgan (1997, p.33) destacam que a erosão do solo pela água é um processo de interações complexas estabelecidas em duas fases: a de desprendimento das partículas do solo; e a de transporte de material por agentes erosivos, como o impacto da gota de chuva, e a formação de enxurradas e fluxos de água. Quando a energia dos agentes de transporte não é suficiente há uma terceira fase, a deposição.

O desprendimento e o arraste das partículas do solo causado pela água ou pelo vento, pode tornar-se um processo acelerado a partir da remoção da cobertura vegetal pelo homem. Conforme o SCS (1948 apud PINTO, 1991), a erosão acelerada é resultado de um desequilíbrio, em geral provocado pela atuação antrópica, que se desencadeia num lapso de tempo curto a partir da modificação de algum componente da paisagem. Desta maneira, observa-se sempre uma forte sinergia entre a dinâmica da ocupação das terras e processos de erosão hídrica dos solos (PINTO, 1991).

O conhecimento sobre os diferentes usos da terra torna possível a adequação de medidas que favoreçam a conservação dos solos e que minimizam efeitos de manejo mal implantados, como a erosão dos solos, a poluição de mananciais, o assoreamento de rios, a

lixiviação e o esgotamento dos solos. No intuito de serem evitadas tais consequências, o “planejamento ambiental surge como prerrogativa, principalmente vinculando-se à busca por soluções que promovam a manutenção da exploração econômica dos recursos” (FOLADORI, 1999, apud SARAIVA, 2005, p.85).

Apesar de ampla bibliografia, a discussão da temática contribui com novas perspectivas acerca dos processos erosivos em ambientes tropicais, especialmente em território brasileiro (GUERRA, 2009, p. 197-198).

### **2.2.1. Fatores envolvidos nos processos erosivos**

Conforme Guerra (2012), para evitar a erosão é necessário compreender a dinâmica erosiva. O início da erosão é dado pelo *splash*, ou erosão por salpicamento. O impacto da gota de chuva provoca tanto a ruptura do agregado, quebrando-o em tamanhos menores, quanto o transporte das partículas. O efeito *splash* pode variar tanto com a resistência do solo ao impacto da gota de chuva, quanto com sua própria energia cinética - habilidade da chuva em causar erosão-, determinando assim a interferência do vento e da variação espaço-temporal do potencial erosivo da chuva, atribuído ao parâmetro de erosividade. Morgan (2005) destaca que valores de 10 mm/h ( $Ke > 10$ ) de chuva como suficientes para gerar erosão.

Em função dos processos físicos de ruptura do agregado e destacamento e transporte de partículas, além das trocas catiônicas e obstrução de poros pela remobilização de silte e argila nos espaços intergranulares, o impacto da gota de chuva provoca o selamento e encrostamento da superfície do solo. Interações entre solo e água resultam em processos de compactação, destacamento, arrastamento e deposição das partículas, especialmente em superfícies descobertas, com baixa densidade ou ausência de cobertura vegetal. Neste processo, forma-se uma camada fina de maior densidade na superfície, que caracteriza-se por maior resistência, redução da taxa de infiltração e de condutividade hidráulica, e aumento do escoamento superficial direto, induzindo à erosão do solo (ZEJUN et al., 2002).

No processo de ruptura do agregado, diversos fatores interferem em sua estabilidade, como a textura, densidade aparente, porosidade, estrutura, cobertura vegetal, erosividade e uso e manejo dos solos. No entanto, a maior parte dos estudos referentes à erodibilidade do solo, ou seja, ao potencial do solo em ser erodido, apontam o teor de matéria orgânica como fator de maior interferência na estabilidade do agregado. A redução do teor de matéria orgânica aumenta a instabilidade do agregado. De Ploey e Poesan (1985) e Greenland et al. (1975)

indicam respectivamente, valores menores que 2% e 3,5% de matéria orgânica como limítrofes com relação à capacidade dos solos em resistirem ao impacto da gota de chuva.

A melhor correlação que expressa o potencial erosivo da chuva é dada por Wischmeier e Smith (1958). Uma vez que os demais fatores envolvidos no processo erosivo são mantidos constantes, com exceção da chuva, a perda de solo por unidade de área em terreno com ausência de cobertura vegetal é diretamente proporcional à energia cinética da chuva com intensidade máxima por 30 minutos.

Em determinado evento chuvoso, a água que chega ao solo pode infiltrar, contribuindo para aumentar a capacidade de armazenamento de água no solo. A capacidade de infiltração é influenciada pelas propriedades do solo, características da chuva, superfície do terreno, topografia, cobertura vegetal e manejo do solo. À medida que a porosidade do solo é preenchida com água, as forças de capilaridade decrescem e a taxa de infiltração - índice que mede a velocidade com que a água da chuva se infiltra no solo - decai.

Associado ao efeito do selamento provocado pelo *splash*, o pisoteamento de gado, tráfego de máquinas, preparo inadequado do solo, reduzem sua porosidade. Há a saturação do solo e início da formação de poças nas microdepressões da superfície irregular do solo. Os fluxos de água passam a intercomunicar-se, e inicia-se a geração da enxurrada (*runoff*). Este escoamento superficial a princípio é difuso, podendo evoluir para fluxos concentrados (HORTON, 1945; MORGAN, 2005).

O escoamento superficial ocorrido de forma difusa provoca a erosão laminar (em lençol), e de forma concentrada, provoca feições lineares em sulcos, ravinas e voçorocas. Apesar de os fluxos lineares apresentarem maior capacidade de transporte de partículas, sua abrangência é relativamente pequena, sendo a erosão laminar de maior abrangência em área, e responsável pelas maiores perdas, principalmente em países de clima tropical. A erosão laminar define-se pela remoção de camadas finas da superfície do solo, arrastando primeiramente as partículas menores, mais ricas em nutrientes, culminando no decréscimo da fertilidade. Esta forma de erosão é menos perceptível na paisagem, identificada visualmente pela ocorrência de pedestais, que são o acúmulo de partículas em obstáculos encontrados pelo escoamento superficial, e em planícies e depressões dos setores a jusante (SANTOS et al., 2010; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010; NRCS, 2001).

A interferência topográfica é representada pela declividade e comprimento da rampa, fatores que influenciam diretamente o volume e velocidade da enxurrada. Caso o declive do terreno aumente em quatro vezes, a velocidade do *runoff* aumentará em duas vezes, sendo

quadruplicada sua capacidade erosiva. E, caso a velocidade do escoamento duplique, a quantidade de material transportado aumenta em 32 vezes, e o tamanho das partículas, em 64 vezes. Quanto ao comprimento de rampa, fator que se refere ao caminho percorrido pela enxurrada, seu aumento proporciona maior volume de enxurrada, sendo que a maior energia resultante provoca maiores perdas de solo. Quanto maior sua extensão, maior tende a ser a velocidade do escoamento superficial no terço final da vertente. Em condições tropicais, a duplicação do comprimento de rampa gera quase o dobro das perdas. Já o aumento em 4 vezes do comprimento de rampa proporciona quase o quádruplo do volume de perdas de solo (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2010, p.56). Em declividades mais acentuadas, as perdas são maiores principalmente quando o preparo do solo se dá de forma convencional em relação a quando é feito por semeadura direta (COGO et al., 2003).

As características de rugosidade da superfície do solo, determinadas pelo microrrelevo, também interferem nos processos mecânicos da erosão hídrica. O aumento da rugosidade da superfície do solo leva ao aumento de tempo para o início do escoamento. Quando a rugosidade do terreno apresenta valores baixos, inferiores a 6 mm por exemplo, há um acréscimo das taxas de infiltração e redução do escoamento. No entanto, quando a rugosidade do terreno se eleva, com valores superiores a 6 mm por exemplo, há maior tendência à ruptura dos agregados, com ocorrência de depósitos nas microdepressões e processos de selamento, contribuindo consideravelmente com o aumento do escoamento superficial iniciado em menor tempo (VERMANG et al., 2015).

De acordo com Morgan (2005), o grau de desprendimento e capacidade de transporte das partículas depende da resistência do solo à penetração, do diâmetro da gota de chuva e da velocidade e profundidade dos fluxos. Para que haja capacidade de destacamento e de escoamento para transporte é necessária uma chuva erosiva. Uma vez que a energia de transporte não é suficiente, ocorre a deposição das partículas.

A textura e a estrutura dos solos, ambas, influenciam sua suscetibilidade à erosão. Solos de textura média a fina, com baixo conteúdo de matéria orgânica e fraco desenvolvimento da estrutura são mais suscetíveis à erosão. Também, apresentam taxas de infiltração reduzidas, aumento do volume dos fluxos superficiais, e menos água é disponibilizada à vegetação. Em solos de erosão moderada, há a absorção de 10 a 300 mm menos de água por hectare/ano, ou cerca de 7 a 44% do total da chuva que os solos não erodíveis. Além da deficiência hídrica, a erosão do solo causa escassez de nutrientes para as



plantas, como nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio, além da remoção das partículas finas do solo e de matéria orgânica, essenciais para a produção agrícola (PIMENTEL, 1995).

A estabilidade dos agregados eleva a porosidade e as taxas de infiltração, reduzindo o *runoff*, proporcionando a redução da erosão por *splash*. A redução dos teores de matéria orgânica aumenta a ruptura dos agregados, favorecendo a formação de crostas na superfície do solo. Tal fator, associado à atividade agrícola, aumenta a compactação dos solos. Neste sentido, na medida em que ocorre o aumento da densidade aparente e redução da porosidade, há a redução da capacidade de infiltração, favorecendo o *runoff* e os processos erosivos. Associado à redução do pH dos solos, por sua vez, há deficiência em cálcio, e por conseguinte, redução da retenção do carbono, favorecendo ruptura dos agregados, sendo a redução do pH diretamente correlacionada a solos com maior tendência a erodibilidade (WISHMEIER e MANNERING, 1969; GUERRA, 1991).

Os trabalhos desenvolvidos por Wischmeier e Mannering (1969), Farmer (1973), Emerson (1977), Poesan (1981) e Guerra (1991) relatam maior remoção de sedimentos na fração areia fina e silte, mais suscetíveis à erosão. Já as argilas são mais resistentes à erosão, principalmente quando apresentam-se em agregados. A presença de matéria orgânica é o melhor agente agregador, proporcionando maior estabilidade aos agregados que as argilas. Nas argilas, a matéria orgânica liga-se à sua superfície externa, evitando a ruptura dos agregados. A quantidade de matéria orgânica no solo é inversamente proporcional a erodibilidade, em especial em solos arenosos e siltosos, sendo menos notório nos solos argilosos.

De forma integrada e em escala global, Morgan (2005) evidencia que há uma relação entre perda de solo e clima, na medida em que o aumento da precipitação ocasiona maiores taxas de erosão. No entanto, o incremento da precipitação possibilita o crescimento da cobertura vegetal, resultando em melhor proteção da superfície do solo, sendo que, com uma maior densidade da cobertura vegetal, a perda de solo diminui mesmo com o aumento da precipitação.

Alterações na cobertura vegetal e uso da terra transformam consideravelmente as funções hidrológicas em ecossistemas tropicais, incluindo os ciclos de evapotranspiração, infiltração e escoamento de superfície, tendo efeito significativo nos fluxos de água fluvial e produção de sedimentos. Mudanças relativamente pequenas na cobertura e uso da terra podem ter grandes implicações na dinâmica hidrológica e no aporte de sedimentos em escala de bacia, sendo que a cobertura vegetal exerce um controle não linear nestes processos

geomorfológicos. A remoção de vegetação mais densa aumenta os fluxos fluviais por causa da diminuição nas taxas de infiltração. Na medida em que há a retomada de vegetação mais alta e densa, tem-se o aumento das taxas de infiltração e a diminuição dos fluxos fluviais (MOLINA et al., 2012; MOLINA et al., 2009; VANACKERS e GOVERS, 2007).

A substituição de vegetação nativa por agricultura aumenta o volume dos fluxos de superfície como resultado da redução da transpiração e interceptação pela vegetação (RUPRECHT e SCHOFIELD, 1989 apud MOLINA et al., 2012). Um aumento entre 10 e 25% de cobertura vegetal pode levar à redução, em curto prazo, de cerca de 60% dos sedimentos (MOLINA et al., 2008 apud MOLINA et al., 2012). Inclusive, a presença de resíduos vegetais prolonga a permanência da rugosidade e resulta na redução das taxas de erosão (BERTOL, 1995).

Por sua vez, a capacidade de armazenamento de água no solo possui elevada relação com a densidade da cobertura vegetal e com as características de declividade do terreno. Assim, áreas mais íngremes tendem a apresentar solos mais rasos, reduzindo seu gradiente de armazenamento de água. Nestas condições, a vegetação apresenta-se mais esparsa, com menor efeito de interceptação (KIRKBY et al., 2002).

A grande quantidade e complexidade dos fatores envolvidos na avaliação da erosão hídrica acelerada e a mensuração do volume e extensão das perdas esbarra na deficiência de métodos que considerem a variabilidade temporal e espacial dos elementos dinâmicos da paisagem, como fatores antrópicos de uso da terra, cultivo e manejo. Neste sentido, a modelagem preditiva colabora na investigação quantitativa das perdas de solo, visando contemplar a variabilidade espaço-temporal dos cenários de interesse, de forma a servir como elemento norteador às questões de planejamento territorial.

### **2.2.2. Análise multiescalar**

A diversidade de elementos envolvidos na evolução do modelado, como a variação temporo-espacial dos fluxos de enxurrada, e agradação e degradação do terreno, requerem diferentes tipos de recursos e escalas de estudo. Assim, a avaliação da erosão hídrica do solo pode ser realizada a nível pontual, de vertente ou de bacia hidrográfica.

Bacia hidrográfica é um sistema físico com entradas e saídas de matéria e energia e que permite relacionar diversos componentes (atmosfera, vegetação natural, solos, substrato rochoso e corpos d'água), que reflete os impactos das atividades antrópicas (KARMANN,

2001; ANDREOZZI, 2005). Nesta escala de análise, onde a variabilidade espacial do fenômeno de interesse é grande, são abrangidas interações complexas das características físicas da paisagem e/ou uso e manejo da terra.

Vertentes, por sua vez, correspondem às formas do terreno modeladas pelos processos denudacionais de movimentos de massa e escoamento superficial ocorridos em tempos atuais ou pretéritos. Esta unidade, predominante no relevo da maioria das regiões, apresenta início e fim de processos erosivos *stricto sensu*, ou seja, em sentido restrito, caracterizando processos denudacionais intrínsecos à própria vertente (TRICART, 1957 e DILIK, 1968 apud. CASSETI, 2005). Esta escala permite a avaliação de processos erosivos em maior detalhe quando comparada a bacia hidrográfica, possibilitando análise localizada da desagregação, transporte e deposição das partículas de solo. Em escala de análise pontual, Momoli (2011, p. 30-32) evidencia o maior detalhamento das perdas e deposição de sedimentos por meio de atribuições de características micromorfológica de amostras, como granulometria, agregação, porosidade e densidade do solo.

No que se refere à melhor escala de experimentação, vertentes compõem a unidade de análise mais adequada para a compreensão do fenômeno da perda de solo. No entanto, a abordagem por bacia e sub-bacia hidrográfica refere-se à escala de implementação de práticas e políticas de manejo e conservação do solo e água (SILVA, M.L.N., 2015) (informação verbal)<sup>1</sup>.

### **2.3. Modelos preditivos de erosão hídrica**

A construção de modelos de sistemas ambientais representa a expressão de uma hipótese científica, que necessita ser avaliada por testes de hipóteses, e pode ser considerada como um instrumento metodológico da pesquisa científica. A modelagem caracteriza-se por sua seletividade de informações e relevância dos valores concebidos para serem integrados; o aspecto da estruturação, onde elementos da realidade são explorados em suas conexões; o caráter enunciativo, que refere-se à existência de comportamento padrão de determinado fenômeno (relação sistêmica); o aspecto da simplicidade, uma vez que os modelos são uma expressão aproximada da realidade; e a característica da reaplicabilidade, pois possibilita sua aplicação em diversos casos de mesma categoria, e é, portanto, pré-requisito das ciências empíricas (CHRISTOFOLETTI, 1999, p. 19-22).

---

<sup>1</sup> Informação fornecida por Marx Leandro Naves Silva, durante o XXXV CBCS em Natal – RN, 2015.

Dentre as funções da modelagem, resalta-se dois aspectos essenciais, que justificam sua ampla difusão em termos metodológicos e motivam sua aplicabilidade nas ciências ambientais: a previsibilidade e a simulação de cenários. A previsibilidade refere-se às características dos modelos em propiciar uma previsão que será comparada com a ocorrência do fenômeno em outro local ou período. A simulação de cenários possíveis pode ser feita por projeção ou tendência para sistemas complexos em sua distribuição espacial. Portanto, a simulação apresenta-se como função dos modelos para servir como instrumento no planejamento (CHRISTOFOLETTI, 1999, p. 23).

A modelagem deve considerar interações espaço-temporais complexas, resultantes dos processos dinâmicos da natureza. A complexidade dos fenômenos pode apresentar comportamento não linear, e portanto, na busca de representação do fenômeno ambiental buscaram-se modelos matemáticos. Assim, “nos modelos matemáticos as propriedades ambientais são tratadas como variáveis do modelo enquanto que suas inter-relações são representadas por operações aritméticas ou lógicas” (FELGUEIRAS, 2001, p.39-40).

As representações matemáticas do sistema físico, que tem “propriedade estrutural importante do sistema físico real” são denominadas modelos conceituais, e podem ser baseadas em tratamento teórico ou empírico em termos dos mecanismos que influenciam este sistema físico real. Os modelos empíricos “omitem as leis da Física [...] e usam dados observados para formular as relações do sistema”, enquanto que “modelos teóricos usam leis físicas para desenvolver um grupo de algoritmos para o sistema físico idealizado” (WOOLHISER e BRAKENSIEK, 1972 apud MACHADO, 2002, p. 7-9).

Os modelos matemáticos podem ser categorizados entre empírico/estatístico, conceitual, e de base física. A categoria depende dos processos físicos a serem simulados, como o modelo estabelece os processos, e sua dependência de dados. Os modelos podem ainda ser considerados híbridos entre duas categorias. A busca de representação das respostas de dados observados é base dos modelos empíricos, que são mais simples e de baixa exigência computacional em relação aos demais modelos. Tais modelos sofrem críticas por aplicarem suposições irreais ao “extrapolar” as características das áreas observadas para não observadas, desconsiderando a heterogeneidade da bacia e a não linearidade dos processos envolvidos no fenômeno investigado. Apesar de estes modelos assumirem condição espaço-temporal estática, são amplamente difundidos e utilizados, uma vez que os modelos conceituais e de base física, que se apresentam dinâmicos e complexos, nem sempre têm dados suficiente para atender os parâmetros e garantir o bom desempenho da modelagem (AMORIM, 2004, p. 11-

14). Os modelos de base física baseiam-se em equações físicas para a descrição da “geração de escoamento e sedimento em uma bacia hidrográfica” (MERRIT et al, 2003 apud AMORIM, 2004, p. 11-12).

Ainda, os modelos teóricos classificam-se em determinísticos e não determinísticos. Enquanto os modelos não determinísticos são probabilísticos ou estocásticos, os modelos determinísticos não sofrem interferência da aleatoriedade, ou seja, apenas um grupo de saídas é possível para determinado grupo de entrada. Estes modelos determinísticos podem ser categorizados em concentrados e distribuídos. Quando se trata de modelagem concentrada, a prioridade é dada para a variação temporal, sendo a variação espacial negligenciada, desconsiderando as características heterogêneas do sistema, sendo portanto, bastante generalista (BEVEN, 1985; TUCCI, 1998; MOORE et al., 1993; MACHADO, 2002).

Por sua vez, os modelos determinísticos distribuídos incorporam aspectos da variabilidade temporal e espacial, sendo adequados à modelagem de parâmetros ambientais e à investigação dos processos dinâmicos dos fenômenos. Em especial, são adequados para a análise dos efeitos do uso da terra nos processos hidrossedimentológicos e de evolução do relevo. Amplamente utilizada na predição da erosão, a modelagem é uma metodologia capaz de integrar a complexidade de dados que representam o mundo real. Pautada em um conjunto de procedimentos de simulação, apresenta caráter preditivo, contribuindo tanto no planejamento territorial preventivo como no controle de problemáticas já instaladas.

O modelo consagrado mais utilizado na determinação de taxas de erosão é o modelo empírico EUPS – Equação Universal de Perda de Solo (WISHMEIER e SMITH, 1978), o qual quantifica o transporte e perda de solo por erosão hídrica. Também existem outros modelos na bibliografia, destacando-se: CREAMS – *Chemical and Runoff Erosion from Agricultural Management System* (KNISEL, 1980), que avalia a qualidade de água e práticas agrícolas; ANSWERS – *Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation* (BEASLEY et al., 1980), modelo distribuído de erosão e simulação hidrológica; AGNPS – *Agricultural Non Point Source* (YOUNG et al., 1989), modelo distribuído que simula transporte de sedimentos; EUROSEM – *European Soil Erosion Model*, modelo preditivo de erosão hídrica de solo; SWAT – *Soil and Water Assessment Tool e WEPP – Water Erosion Prediction Project* (LANE et al., 1992) para a estimativa da produção de sedimentos e volume do escoamento superficial (CHRISTOFOLETTI, 1999; AKSOY et al., 2005; HARTWIG, 2009;).

Os trabalhos iniciais sobre perda de solo por erosão hídrica tiveram início com Cook (1936) e Ellison (1947), entre 1930 e 1940, a partir da definição dos principais fatores envolvidos: erodibilidade, erosividade, escoamento superficial e cobertura vegetal.. Os primeiros trabalhos sobre comprimento de rampa e declividade são de Zingg (1940) e Smith (1941 e 1947). Outros trabalhos sobre quantificação dos processos erosivos foram realizados por Laws (1940), Strahler (1956), Tricart e Cailleux (1956) (WISHMEIER e SMITH, 1978). Entre 1940 e 1960, nos EUA, iniciaram os primeiros trabalhos experimentais, e por meio de revisões, foi definido o modelo empírico EUPS. Desenvolvida por Wishmeier e Smith (1978), pesquisadores do Dpto. de Agricultura (USDA – *United States Department of Agriculture*), Serviço de Conservação do Solo (SCS) e a Universidade de Purdue, a EUPS é um dos modelos de predição mais conhecidos e utilizados atualmente (AMORIM, 2004; HARTWIG, 2009).

Difundido na Brasil por Bertoni e Lombardi Neto (1985), este modelo proporciona a “análise conjunta de fatores condicionantes da erosão [...] pela ação do escoamento das águas pluviais em superfície, com ênfase nos processos de erosão laminar” (PINTO e GARCIA, 2005). Conforme proposto por Wishmeier e Smith (1978), a perda anual de solo pelo modelo EUPS é expressa na equação 1:

$$Y = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Onde: Y – é a perda de solo por ano ( $\text{ton. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ); R – fator R, função da erosividade da chuva ( $\text{MJ.mm. ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ); K – fator K, função da erodibilidade do solo, que determina sua susceptibilidade à erosão ( $\text{ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ); L e S - fator LS (adimensional), função do relevo, envolvendo o comprimento ou extensão da vertente (fator L), em metros, e a declividade ou grau de declive (fator S), em %; C – fator C, função da cobertura vegetal, uso da terra e seu manejo (adimensional); P – fator P, que se refere às práticas conservacionistas (adimensional) (WISHMEIER e SMITH, 1978; PINTO e GARCIA, 2005; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

A partir da observação de mais de 10.000 parcelas experimentais de perda de solo, o modelo EUPS foi projetado para servir de ferramenta de conservação do solo, de modo que cada fator fosse representado por apenas um número, calculado a partir de dados meteorológicos, pedológicos e parcelas de erosão, e livre de base geográfica. E mesmo que generalista, a predição de perda torna-se mais valiosa para a seleção de práticas quando se

conhece as principais interações entre os fatores (WISHMEIER e SMITH, 1978; AMORIM, 2004).

Tais aspectos evidenciam sua ampla aplicabilidade, além de sua fácil compreensão, precisão razoável e sua estrutura fatorial, que possibilita identificar erros em cada segmento de análise (SILVA, M.L.N., 2011<sup>2</sup>). O uso do modelo em Sistemas de Informação Geográfica – SIGs colabora na simplificação e ampla utilização, com destaque aos trabalhos realizados por Morgan e Nalepa (1982), Pinto (1983 e 1991), Bertoni e Lombardi Neto (1985 e 1990), Castro e Zobeck (1986), IPT (1986), Donzeli et al. (1992), Lima (2000), Moretti (2001), Pinto et al. (2002) e Amorim (2004).

No entanto, a falta de disponibilidade de dados limita a sua aplicação. Observações em vertentes e deposição de sedimentos levaram à conclusão de que erosões significativas estavam associadas a eventos intensos de baixa frequência. O fator de erosividade da EUPS, usado para estimar perdas de solo médias anuais, deveria incluir o efeito cumulativo de várias chuvas moderadas, bem como o efeito de eventos de chuva severos (WISHMEIER e SMITH, 1978). A equação prediz apenas o total de perdas de solo nas áreas de sulcos e entressulcos, mas não a distribuição da deposição, aporte de sedimentos e processos de erosão linear. Tais limitações levaram não apenas à revisão e modificação da EUPS como ao desenvolvimento de novos modelos (SILVA, M.L.N., 2011<sup>2</sup>; OZCAN et al., 2008).

### **2.3.1. MEUPS (*Modified Universal Soil Loss Equation* – Equação Universal de Perda de Solo Modificada)**

A EUPS, por apresentar limitações em seu modelo original, sofreu modificações, como a exemplo a MEUPS – Equação Universal de Perda de Solo Modificada, e a RUSLE – Equação Universal de Perda de Solo Revisada. Também serviu de base para a elaboração de diversos modelos, como o CREAMS e o WEPP (FEITOSA, 2006).

A necessidade em se desenvolver modelos matemáticos que abordassem ainda a questão do aporte de sedimentos foi expressa pelo trabalho de Williams (1975), onde o autor propõe MEUPS para a predição da produção de sedimentos em bacias hidrográficas. A MEUPS contempla os mesmos fatores da EUPS, com a substituição do fator R pelo *runoff* (Williams, 1975), dado pela equação 2.

---

<sup>2</sup> Data provável de publicação.

$$runoff = 89,6 * (Q * qp)^{0.56} \quad (2)$$

Onde: *runoff* - produção de sedimentos de um evento de chuva (m<sup>3</sup>/s); Q - volume de escoamento superficial (m<sup>3</sup>); qp - vazão pico do escoamento superficial (m<sup>3</sup>/s).

Este modelo prevê o aporte de sedimentos, advindo de pequenas e médias bacias hidrográficas, em determinado exutório. No entanto, não necessita de relações empíricas, tendo como principal vantagem a sua aplicação em eventos isolados de precipitação. Assim, é um modelo menos generalista que a EUPS. O uso da variável *runoff* na simulação favorece a exatidão das estimativas (WILLIAMS, 1975).

Chaves (1991) destaca que há um grande potencial da aplicação da MEUPS no Brasil devido à grande difusão da EUPS, à simplicidade de sua estrutura fatorial, ao número de parâmetros relativamente baixo, além da facilidade de calibração e aplicação.

Aplicando a MEUPS em pequenas bacias hidrográficas do tabuleiro costeiro brasileiro, Avanzi et al., (2008) conclui que “a modelagem semi-empírica para o deflúvio e vazão de pico com base nas características de precipitação mostrou boa acurácia, podendo ser aplicada para simulação [de cenários]”. No entanto, parâmetros não contemplados pela MEUPS, como a umidade antecedente do solo, é também fator de interferência, sendo importante na interpretação dos processos erosivos (AVANZI et al., 2008, p.569-567).

### **2.3.2. WEPP (*Water Erosion Prediction Project* – Projeto de Predição de Erosão Hídrica)**

A EUPS foi utilizada extensivamente para a predição da média anual de perda de solo a longo prazo, porém seus resultados não acompanham as necessidades crescentes de conservação e manejo. Preocupações com assoreamento e poluição em cursos d’água e reservatórios contribuem para o desenvolvimento de modelos matemáticos com finalidade de também prever o aporte de sedimentos em pontos específicos de uma bacia hidrográfica (CHAVES, 1991). Somado a isso, a EUPS é incapaz de estimar o *runoff* e de gerar dados de deposição e produção de sedimento em bacia hidrográfica. Assim, o modelo de simulação WEPP foi desenvolvido na busca de direcionamento de tais necessidades, tornando-se uma tecnologia de base empírica para a predição de erosão (FLANAGAN et al., 2007).

O desenvolvimento do modelo WEPP envolveu engenheiros e cientistas na criação de um modelo lógico, conduzido em experimentos de laboratório e em campo, e esforços para tratar questões de parametrização e interface de banco de dados. Iniciado em 1985, com sua primeira fase de desenvolvimento até 1995, o modelo simulou chuva em mais de 50 locais de



experimentos. O aspecto único do WEPP seria a separação entre processo erosivo e destacamento de partícula em sulco e entressulco, e simulação de transporte e deposição de sedimento e distribuição do tamanho de partículas. Embora pequenas bacias tivessem apenas algumas vertentes e canais, de fácil configuração, em áreas maiores há o aumento da complexidade e dificuldade das simulações (FOSTER e LANE, 1987; NEARING et al., 1989; FLANAGAN e NEARING, 1995; FLANAGAN et al., 2007).

Nearing et al., (2005) destaca que o WEPP é um modelo para cálculo de erosão segmentado entre escoamento em áreas de sulcos e entressulcos. Aksoy et al., (2005) detalha que a erosão em sulco ocorre se a tensão de cisalhamento exercida pelo fluxo excede a tensão cisalhante crítica, e enquanto a carga de sedimentos do fluxo é menor que sua capacidade de transporte. A erosão entressulco é considerada proporcional à intensidade da chuva ao quadrado, e fornece sedimento para as áreas de sulcos.

O modelo WEPP caracteriza-se principalmente pela capacidade de parametrização detalhada dos dados de entrada, ou seja, maior número de variáveis. Trata-se de um modelo dinâmico com base nos princípios físicos do processo erosivo, onde a estimativa de perda de solo é gerada em função do estado atual do solo, da cobertura vegetal e da umidade antecedente. Na ocorrência de chuvas, caso haja escoamento superficial, o modelo estima desagregação, transporte e deposição das partículas. No entanto, não contempla a erosão em grandes voçorocas e cursos d'água perenes (LAFLEN, et al. 1991; LANE et al., 1992 apud GONÇALVES, 2008).

A implementação do WEPP se dá em três versões: vertente/encosta, bacia hidrográfica e malha/grade. Para as três versões, há sua segmentação em diversos componentes: erosão do solo, hidrologia, crescimento de planta e decomposição dos resíduos, balanço hídrico, hidráulica do escoamento superficial e solo. Os componentes do modelo WEPP são descritos a seguir, com base nos trabalhos de Flanagan et al., (1995), Amorim (2004) e Gonçalves (2008).

No componente *erosão* do solo ocorre a quantificação do processo de desprendimento, transporte e deposição das partículas, onde as equações descrevem a sequência de movimento das partículas na vertente, dada pela equação 3:

$$G / X = D_i + D_r \quad (3)$$

Onde:  $G$  - a carga de sedimentos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ );  $X$  - distância percorrida pelo escoamento superficial (m);  $D_i$  - taxa de liberação de sedimentos entressulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ); e  $D_r$  - taxa de sedimentos em sulcos ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

Estes parâmetros são estimados a partir de dados de entrada que caracterizam a área: efeito da cobertura vegetal, ajuste de declividade, intensidade da precipitação, erodibilidade do solo, tensões de cisalhamento do escoamento superficial, e capacidade de transporte dos sedimentos. No que tange ao transporte de sedimentos, o modelo tem como referência a equação de Yalin (1963). Com base nos dados obtidos dos atributos do solo, como granulometria e matéria orgânica, o modelo utiliza os parâmetros  $K_i$  – erodibilidade entressulco,  $K_r$  – erodibilidade em sulco, e  $\tau_c$  – tensão cisalhante (LAFLEN et al., 1991).

Os sedimentos da erosão entressulcos ( $D_i$ ) são considerados independentes de  $X$ , e sempre positivos. Enquanto que, a erosão em sulco ( $D_r$ ) pode ser positiva no caso de desprendimento, e negativa se houver deposição. Sendo  $D_i$  expresso pela equação 4, e  $D_r$  expresso pela equação 5. Quanto a carga de sedimentos a ser carregada é maior que a capacidade do escoamento, dá-se a deposição, expressa pela equação 6 (FLANAGAN et al., 1995):

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (4)$$

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (5)$$

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (6)$$

Onde:  $C_i$  - parâmetro que considera a cobertura vegetal na erosão entressulco (adimensional);  $K_i$  - parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo entressulco ( $\text{Kg m}^{-4} \text{s}$ );  $S_f$  - fator de ajuste relativo à declividade (adimensional);  $I_p$  - intensidade da precipitação ( $\text{m s}^{-1}$ );  $G_e$  - parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo na erosão entressulco (adimensional);  $K_r$  - parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo no sulco ( $\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $\tau$  - tensão cisalhante do escoamento superficial sobre a partícula ( $\text{N m}^{-2}$ );  $\tau_c$  - tensão cisalhante necessária para a ocorrência da liberação de partículas ( $\text{N m}^{-2}$ );  $G$  - carga de sedimentos (adimensional);  $T_c$  - capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento ( $\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ );  $\beta$

- coeficiente de turbulência induzida pelo impacto da gota de chuva (assume-se 0,5);  $V_f$  - velocidade efetiva da deposição para o sedimento ( $m s^{-1}$ ); e  $q$  - vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ( $m^3 m^{-1} s^{-1}$ ).

Conforme Laflen et al., (1991), o componente *hidrológico* consiste nos cálculos das forças e energias envolvidas no processo hidrológico que tem como resultado direto o processo erosivo, sendo o mais importante módulo do WEPP. No componente climático, os dados de entrada são relativos à precipitação, quantidade, duração, intensidade, temperatura máxima e mínima, velocidade e direção do vento. Com os componentes climático, e com o apoio do gerador climático CLIGEN (*Climate Generator* - gerador climático estocástico), há a possibilidade de estimar o volume da lâmina de escoamento. Os parâmetros de infiltração incluem características de hidrologia de superfície e sub-superfície, e são determinados pela equação de Green-Ampt modificada por Mein Larson (GAML). A diferença entre a intensidade da precipitação, a taxa de infiltração e o volume de armazenamento superficial é considerada, então, escoamento superficial. A taxa do pico de escoamento é determinada pela equação de ondas cinemáticas (Stone et al., 1995), dada pela equação 7 (GONÇALVES, 2008):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_i - T_i \quad (7)$$

Onde:  $h$  - lâmina de escoamento (m);  $t$  - tempo (s);  $i_i$  - intensidade instantânea da precipitação ( $m s^{-1}$ ); e  $T_i$  - taxa de infiltração de água no solo ( $mm h^{-1}$ ).

No componente *crescimento de planta e decomposição dos resíduos*, os parâmetros de entrada envolvem altura e cobertura da copa, biomassa de material vegetal vivo e morto em superfície e subsuperfície, índice de área foliar, área basal da planta, práticas de manejo e uso do solo e datas em que as atividades foram executadas (LAFLEN et al., 1991). O componente *balanço hídrico*, onde estão envolvidas a conjunção de dados de infiltração e escoamento superficial, estimativas de evapotranspiração e evaporação da água no solo, é calculado segundo a equação 8, de Savabi e Williams (1995), citado por Amorim (2004):

$$\theta = \theta_m + (P - I) \pm S - Q - ET - D - Q_d \quad (8)$$

Onde:  $\theta$  - conteúdo da água no solo na zona radicular (m);  $P$  - precipitação acumulada (m);  $I$  - interceptação da precipitação pela vegetação (m);  $S$  - conteúdo da água em forma de neve

(m); Q - escoamento superficial acumulado (m); ET – evapotranspiração (m); D - perda acumulada de água (m); e  $Q_d$  - escoamento lateral subsuperficial (m).

No componente *hidráulica* é calculado o valor de tensão cisalhante do escoamento que atua no solo, causando o desprendimento das partículas. Este valor é proporcional à taxa de coeficiente de atrito para o solo. Este parâmetro inclui o coeficiente de rugosidade de superfície que interfere na energia do escoamento superficial e em sua capacidade de transporte. E, no processo do cálculo do componente *solo*, são consideradas as propriedades que influenciam as taxas de infiltração e geração do escoamento superficial, e portanto, o processo erosivo. Consideram-se alterações temporais nas propriedades do solo associadas a efeitos do uso da terra, formas de cultivo e práticas de manejo como a rugosidade randômica, densidade do solo, condutividade hidráulica, tensão cisalhante e fatores de erodibilidade nos sulcos e entressulcos (LAFLEN et al., 1991; AMORIM, 2004).

Tendo em vista a revisão quanto aos trabalhos desenvolvidos de modelagem, verificou-se que tanto os modelos de base empírica quanto os de base física foram desenvolvidos com parâmetros direcionados às condições de clima temperado. No entanto, muitos trabalhos evidenciam o desenvolvimento de projetos de modelagem em condições de clima tropical.

No Brasil, os principais trabalhos desenvolvidos sobre a geração de escoamento superficial e perda de solo pelo modelo WEPP são levantados por Guerra e Silva (2011): Chaves, (1990, 1994), Garcia (2001), Machado et al., (2003), Martins Filho et al. (2004), Gonçalves (2007), além de outros como os de Amorim (2004) e Paiva (2008). Apesar dos trabalhos envolvidos nesta temática, em especial para as condições edafoclimáticas brasileiras, há ainda deficiência no que se refere ao conhecimento do desempenho dos modelos de perda de solo comparados a dados experimentais obtidos em campo, como referências de desempenho e confiabilidade dos resultados estimados.

### **2.3.3. Avaliação e validação dos modelos preditivos de erosão hídrica**

Experimentos de campo para a avaliação da perda de solo possibilitam a “determinação do efeito de práticas conservacionistas e de manejo na produção de culturas (...) sem grandes problemas de custos operacionais” (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2010, p. 273). Para tal, devem ser obtidos os registros dos totais de chuva para o cálculo de intensidades, permitindo associação direta com as perdas de solo. As parcelas devem ter

dimensões iguais, para serem passíveis de comparação. A determinação das áreas experimentais deve ser representativa, uma vez que deve ser considerada a possibilidade de extrapolação dos resultados para áreas maiores (GUERRA, 2005).

Conforme Lombardi Neto (2010, p. 281), os métodos indiretos “são os baseados nos vestígios deixados no solo ou nas diferenças apresentadas em relação ao solo não erodido” e “são mais imprecisos que os baseados no estudo do material erodido [método direto], mesmo porque quase sempre outros fatores se associam à erosão”. O monitoramento das parcelas experimentais possibilita a análise da evolução temporal em função das alterações do relevo do solo. Determina-se a profundidade de solo perdida em dado espaço de tempo, ou mesmo, a tonelada de solo arrastado por unidade de área, uma vez conhecida a densidade do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

Os pinos de erosão devem ser cravados no solo. Podem ser vergalhões ou pregos, que devem ser graduados, numerados, e plotados em diagrama, para o conhecimento de sua distribuição espacial. A área deve ser cercada com o intuito de evitar perturbações. O monitoramento varia conforme o interesse do pesquisador, sendo dada preferência após cada evento chuvoso significativo (GUERRA, 2005).

Após um tempo determinado (um ou dois anos, por exemplo), é possível verificar a taxa de rebaixamento do solo pelos pinos instalados e monitorados (...). Além do rebaixamento, se a densidade aparente do solo for determinada, é possível estimar com um razoável grau de precisão a perda de solo, em toneladas por hectare (GUERRA, 2005, p.34).

Assim, os experimentos auxiliam o desenvolvimento dos modelos, sendo utilizados também para comprovar seu desempenho, eficácia, aplicabilidade e confiabilidade. A avaliação de um modelo de perda de solo pode ser considerada como ferramenta para consolidação da predição do processo erosivo, tendo como um de seus principais objetivos sua validação pela análise comparativa entre dados estimados e obtidos empiricamente. Esses últimos são os valores e taxas de perda reais, e, portanto, permitem o estabelecimento de limiares de confiabilidade da modelagem.

Por sua vez, a validação de um modelo deve considerar a alta variabilidade dos parâmetros envolvidos na dinâmica erosiva, sendo necessário um grande número de dados para resultados de simulações mais precisos. Neste sentido, diversos trabalhos foram conduzidos no intuito de avaliar e validar a confiabilidade dos resultados estimados. Conforme Williams (1975), no processo de desenvolvimento, estruturação e validação da

MEUPS, sua aplicação obteve resultados acurados quando da análise comparativa com testes aferidos em bacias hidrográficas. A média anual da produção de sedimentos foi o meio usado para conferências, com resultados razoáveis em áreas não aferidas.

Smith et al., (1984) avaliaram valores preditos da MEUPS e medidas de produção de sedimentos em eventos individuais em bacias hidrográficas. Tanto para áreas de cultivo como de pastagem, o coeficiente de correlação foi de 0,8. Entre os valores médios de perda de solo preditos e medidos, os dados obtidos foram bastante próximos, de 58 e 74 kg/ha/evento, respectivamente. Com base em 27 eventos chuvosos, Pongsai et al. (2010) apontam que os resultados obtidos pela MEUPS em comparação com as perdas de solo medidas para eventos de precipitação individuais, demonstraram que a modelagem teve desempenho bastante satisfatório. No entanto, apesar da MEUPS ter desempenhado melhor que a EUPS, houve redução da precisão em declividades superiores a 35% de inclinação. Schultz et al. (2013), utilizando o ArcMUSLE para integração da MEUPS em SIGs, evidencia que apesar do modelo superestimar em 8,81% e 30,02% a geração do escoamento superficial e a produção de sedimentos, respectivamente, os resultados foram satisfatórios, reforçando a necessidade de validação das simulações com dados observados.

Em análise comparativa entre os modelos EUPS, RUSLE e WEPP e parcelas de erosão na área experimental da Universidade Federal de Viçosa, Amorim (2004) conclui que o WEPP foi o que apresentou melhor comportamento quanto aos desvios, sendo de 45% a estimativa mais precisa das condições simuladas, seguido da RUSLE, 42%, e EUPS 12%. Os parâmetros mais sensíveis foram os de lâmina total precipitada, erodibilidade, tensão cisalhante, condutividade hidráulica e rugosidade randômica.

Tiwari et al. (2002), comparando os modelos EUPS, MEUPS e WEPP com parcelas experimentais, atribuíram a eficiência dos modelos em 0,80, 0,72 e 0,71, respectivamente. O desempenho inferior do WEPP foi atribuído à falta de dados de parâmetros de entrada mais refinados. Silva, M.L.N. [2011?<sup>3</sup>] relata algumas características desfavoráveis à sua utilização: a necessidade de grandes quantidades de dados de entrada, a complexidade de sua estruturação e implementação, subprocessos importantes não explicitados, e maior ênfase nos fatores hidrológicos que pedológicos.

Para a avaliação da modelagem WEPP, Paiva et al., (2009) primeiramente determinaram os principais parâmetros de análise, como erodibilidade, tensão de cisalhamento e condutividade hidráulica. A simulação se deu em três bacias hidrográficas do semi-árido

---

<sup>3</sup> Data provável de publicação.

nordestino. Em geral, a estimativa da lâmina de escoamento teve resultados satisfatórios, mas quando da estimativa da produção de sedimentos, o modelo apresentou limitações de precisão. Para a produção de sedimentos inferiores a 50 kg/ha, o valor estimado foi de 0, e entre 50 e 100 kg/ha, a estimativa foi de 100 kg/ha. Como o valor mínimo estimado pela modelagem é de 100 kg/ha, os eventos com baixa produção de sedimentos não são computados. Assim, a precisão da modelagem passa a ser relativamente superior quando os cenários passam a apresentar maiores perdas reais.

Em análise comparativa de parcelas experimentais de parcelas de solo com os dados obtidos pelo WEPP, Gonçalves (2007) concluiu que, para o grupo dos Cambissolos, o modelo tende a superestimar os valores de erodibilidade nos sulcos e entressulcos, subestimando a tensão cisalhante crítica e a condutividade hidráulica. Para os Argissolos, o modelo superestimou a erodibilidade entressulco e a tensão cisalhante, e subestimou a erodibilidade no sulco e a condutividade hidráulica efetiva. A utilização de dados obtidos experimentalmente como dados de entrada aos parâmetros de solo melhorou em 306% a estimativa das perdas.

Sobre a variação do fator de declividade e o WEPP, Garcia (2011) aponta que, em declividades inferiores a 1%, os valores simulados de lâmina de escoamento e perda de solo foram superiores em comparação aos experimentos de 20 e 40 m de comprimento de rampa. Em declividade de 7%, em conformidade com os experimentos, a diferença de perda de solo entre a simulação e a parcela foi de 6,7% para comprimento de rampa de 20 m. No entanto, nessas condições, porém com comprimento de rampa de 40 m, os resultados da modelagem foram bem menores que os medidos.

Guerra e Silva (2011), em suas compilações dos principais trabalhos envolvendo o WEPP aplicado às condições climáticas brasileiras, concluem que há uma necessidade em se utilizar dados locais como parâmetros de entrada para otimizar a precisão dos resultados de simulação, especialmente os parâmetros de propriedades do solo. A falta de acurácia dos dados, como a intensidade da chuva, por exemplo, pode causar erros consideráveis principalmente quando comparados aos valores medidos e estimados. No que se refere ao clima tropical, que normalmente apresenta solos com maiores teores de argila que solos europeus ou norte-americanos, há uma tendência de superestimar os valores de geração do escoamento superficial e de perda de solo quando comparado com os dados medidos.

## 2.4. Contribuição das Geotecnologias

### 2.4.1. Sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) aplicados à modelagem

A modelagem em sistemas ambientais visa conter grande variedade de elementos a fim de aproximar-se à dinâmica real do fenômeno geográfico. Tendo em vista a complexidade da parametrização dos modelos, as geotecnologias surgem como instrumento robusto de sua implementação. O uso de produtos de sensoriamento remoto e SIGs remonta a meados da década de 60, sendo o último concebido como um sistema capaz de extrair dados adequados a partir de bancos de dados e análises de mapas.

“Como a espacialidade é característica inerente aos sistemas ambientais, obviamente ressalta a significância dos SIGs para os procedimentos de modelagem”. Assim, os SIGs são utilizados para processamentos de dados, elaboração de mapas diretamente relacionados aos *inputs* dos modelos, e na própria elaboração dos modelos (CHRISTOFOLETTI, 1999, p.28-29).

Tendo em vista tais considerações, Florenzano (2008) evidencia que “o desenvolvimento crescente de modelos preditivos e das geotecnologias amplia as possibilidades de estudos morfodinâmicos”. Assim, o uso de geotecnologias contribui na obtenção de informações e valores sobre a topografia, declividade, comprimento da vertente, uso e cobertura vegetal, e manejo dos solos (FLORENZANO, 2008).

Tendo em vista a necessidade de se obter um banco de dados consistente, exigido na implementação da modelagem e na análise comparativa das diferentes metodologias propostas, diversos autores têm contribuído para os estudos referentes ao uso de geotecnologias e de produtos cartográficos, como Rao (1975), Verstappen (1977), Pinto (1983, 1991 e 1996), Valério Filho (1994), Piroli (2002), Florenzano (2008) e Pereira (2010). A modelagem dos fatores componentes da EUPS em SIGs permite inferir que este é um modelo atual no contexto das geotecnologias. Diversos trabalhos apontam sua simulação em ambiente de SIG: Pinto e Garcia (2005), Hlaing et al., (2008) e Beskow et al. (2009). Destacam-se também os trabalhos utilizando modelos digitais do terreno (MDT), como aqueles desenvolvidos por Cavaliéri (1996), Kuntschilk (1996), Valeriano (1999), Wu et al., (2005), Feitosa (2006), Royall, (2006), Pereira (2011) e Corrêa (2011).



Neste contexto, Valério Filho (1994) e Valério Filho et al. (1997 apud Piroli et al., 2002) evidenciam o uso de geotecnologias como ferramentas úteis no monitoramento da dinâmica do uso da terra, devido à maior frequência na atualização de dados, agilidade no processamento, e viabilidade econômica. Wu (2005) tratou de diversas resoluções espaciais dos MDTs nas estimativas da EUPS, e constatou que as variáveis, como o fator LS, são sensíveis ao tamanho da célula (pixel), sendo este efeito menor para resoluções espaciais melhores, inferiores a 10 m.

Zhang et al., (2009) desenvolveram a ferramenta ArcMUSLE com o intuito de implementação e aplicação da MEUPS em bacias hidrográficas, e concluíram que SIGs e técnicas de geoprocessamento contribuem na estruturação dos parâmetros da modelagem, e são um incremento metodológico em análise ambiental. Beskow et al., (2009) implementaram a EUPS ao SIG PCRaster, no intuito de modelar o sistema dinâmico de simulação distribuída de perda de solo. Os autores evidenciaram que a metodologia “apresentou precisão aceitável e permitiu a identificação das áreas mais suscetíveis à erosão hídrica. Constituindo-se em uma importante ferramenta de predição dos solos e manutenção ambiental” (BESKOW et al., 2009, p.58, tradução nossa)<sup>4</sup>. Os resultados demonstraram que a perda de solo excedeu o limite de tolerância esperado para cerca de metade da área (bacia do Rio Grande-MG), sugerindo a necessidade de adequação do uso da terra e práticas de manejo. Os autores concluem que a aplicação do modelo implementado ao SIGs contribui como ferramenta de planejamento.

Por sua vez, a integração do modelo WEPP à interface do SIG, dada pelo GeoWEPP, apresenta poucos trabalhos, com destaque aos resultados publicados por Yu et al. (2010), onde a performance do modelo demonstrou ser satisfatória, com produção de sedimento e *runoff* apresentando erros inferiores a 30%, coeficiente de correção acima de 0,9 e coeficiente de Nash-Suttcliffe acima de 0,8. No Brasil, Silva, B.P.C. (2015) evidencia a utilização do GeoWepp apresentando resultados inferiores aos estimados pelo modelo MUSLE na avaliação de sistemas florestais.

É válido ressaltar o potencial das ferramentas de geotecnologias para o levantamento, análise e integração dos diversos elementos do meio físico associados ao mapeamento do uso da terra. Essas ferramentas também contribuem para a compreensão dos processos erosivos, e para a consolidação do conhecimento no âmbito da implementação dos modelos.

---

<sup>4</sup> “[...] showed acceptable precision and allowed for identification of the most susceptible areas to water erosion. It constitutes an important predictive tool for soil and environmental management”

#### 2.4.2. Levantamento e mapeamento de solos

No que se refere ao caráter tridimensional dos solos, os primeiros estudos foram desenvolvidos por Boulet (1988), em sua crítica à noção de *catena*, com destaque a todo o *continuum* do solo e não apenas como coleções ou mosaicos isolados de perfis. A busca era de uma abordagem dos solos sob uma perspectiva mais ampla da paisagem, e uma das formas de integração dos fatores elementares do desenvolvimento das superfícies geomórficas é a relação entre os fluxos d'água, solos e topografia. A compreensão da pedogênese foi constatada por meio da análise lateral da dinâmica de vertente, sendo esta uma contínua redistribuição de matéria e energia, um fator essencial na evolução do relevo (QUEIROZ NETO, 2000).

Para essa análise tridimensional, destacam-se as contribuições dos produtos do sensoriamento remoto no mapeamento e levantamento de solos. Principalmente após a segunda Guerra Mundial, o uso de fotografias aéreas nos estudos das ciências ambientais tornou-se mais difundido, com grande estímulo para as áreas de geomorfologia e pedologia. Tal fato justifica-se pela visualização direta das formas da superfície terrestre, e menos diretamente, vegetação, estrutura geológica, hidrologia e solos, que podem ser indiretamente inferidos. Por meio de fotografias aéreas a paisagem pode ser descrita pela combinação dos elementos relevo, declividade e/ou forma da vertente, e drenagem (YOUNG, 1972. p.5).

O uso de fotos aéreas permite que o pesquisador localize sua posição no mapa com maior rapidez, facilitando a indicação dos limites do solo com maior precisão e com ampla visão do contexto geral do terreno, ou seja, relacionando os solos com as características topográficas da área (BUCKMAN e BRADY, 1968, p.366-369).

Na execução de estudos de solo a interpretação de aerofotografias é facilitada pela técnica de visão estereoscópica, de efeito tridimensional. A fotointerpretação dedicada a estudos de solo é denominada fotopedologia. As fotografias aéreas podem servir de base cartográfica preliminar, auxiliando nos trabalhos de campo, bem como na separação das unidades de solo (AMARAL, 1972, p.429). Logo:

“a Fotopedologia é um meio, e não um fim, ou seja, é uma arma de trabalho da Pedologia. (...) *a priori* não permite, por exemplo, distinguir um Latossolo e um Podzol [Argissolo]. O que ela possibilita, sem maiores dificuldades, é diferenciar uma unidade de solo de outra, separando-se cada uma das demais por aspectos distintos possíveis de se constar pela fotointerpretação. Posteriormente então após as correlações de campo, poder-se-á diferenciar

grandes grupos, sempre porém dentro da região de estudo” (AMARAL, 1972, p.430)

Os métodos de fotointerpretação de solos estudam a superfície da terra considerando padrões de relevo e rede de drenagem. Esses padrões possuem elevada correspondência com as diferentes classes de solo existentes, visto que refletem seus atributos internos e limites. (LUEDER, 1959; BURINGH, 1960; GOSSEN, 1968; apud DEMATTÊ, 1993 e DEMATTÊ, 2011).

A partir da identificação de rupturas de relevo em diferentes posições da vertente, associada a características de drenagem e declividade, são definidas preliminarmente unidades fotopedológicas. A determinação destas unidades em classes de solo parte da relação infiltração – deflúvio no sistema vertente, considerando o sistema de drenagem do solo como fator da pedogênese, bem como as classes de relevo e a posição na vertente. Posteriormente, o refinamento deste mapeamento é realizado a partir do levantamento de solos, com a obtenção de dados em campo e análises de laboratório, resultando na sua classificação. Estes procedimentos objetivam a otimização da amostragem, pois uma vez que uma unidade de solo é classificada, a mesma classe de solos pode ser atribuída para unidades de solo semelhantes (DEMATTÊ, 2010).

Quanto à posição topográfica, elaborou-se também uma relação entre a drenagem interna do solo e sua formação: solos de drenagem interna muito pobre são comuns em posição topográfica de baixada, sendo estes ricos em matéria orgânica e material de natureza turfosa; solos de drenagem interna pobre, com prevalência de condições anaeróbicas sobre as aeróbicas. Solos de drenagem moderada são normalmente mais profundos; solos de boa drenagem não apresentam camadas de impedimento, e apresentam profundidade superior a 150 cm; e solos de drenagem excessiva são derivados de sedimentos arenosos e espessos (RANZANI, 1965, p.47-48).

Resende (1995, p.133-135) refere-se ao relevo associado ao fator tempo na gênese do solo. As partes rejuvenescidas correspondem normalmente a áreas mais baixas e mais acidentadas, com solos mais novos. Comumente, Latossolos estão em elevações de superfície suave (regular e sem descontinuidade), enquanto solos com B Textural encontram-se em superfícies menos elevadas, mas principalmente, em superfícies irregulares (com descontinuidades e rupturas de relevo).

A fotointerpretação pedológica possibilita a obtenção de um mapa do terreno, identificando tipo e fase do solo, mas também informações quanto à declividade, incidência

de erosão e sugestão de práticas quanto ao uso da terra para fins agrícolas (BUCKMAN e BRADY, 1968). O uso de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de fotointerpretação no mapeamento de unidades pedológicas, aliados ao levantamento de solos, contribuem para a análise das características da paisagem em um contexto integrado. A aplicação de tais procedimentos metodológicos apresenta como principal vantagem a redução do tempo dedicado a trabalhos de campo e custos de levantamento.

### **2.4.3. Mapeamento de forma de vertente**

O modelado é produto do ajustamento entre materiais e processos: “as formas [de relevo] e seus atributos apresentam valores dimensionais de acordo com a influência exercida pelo ambiente, que controla a qualidade e a quantidade de matéria e energia a fluir pelo sistema” (CHRISTOFOLETTI, 1980). Segundo Wischmeier e Smith (1978), a forma das vertentes afeta as perdas de solo. No entanto, os segmentos não devem ser analisados como “vertentes independentes”, já que o comportamento do escoamento superficial de um setor influencia o setor seguinte.

Sob a perspectiva da fisiologia da paisagem, são atribuídas aos contornos côncavos as denominadas “encostas coletoras de água” e para contornos convexos “encostas distribuidoras de água” (BLOOM, 1970). Inserido nos parâmetros do fator topográfico (fT), a forma do declive, côncava, convexa, homogênea ou deformada, pode interferir nas perdas de solo por erosão. Apesar da pouca disponibilidade de dados, uma vez que os efeitos das formas das vertentes são por muitas vezes negligenciados, sabe-se que “o uso do gradiente médio de um comprimento de rampa pode subestimar as perdas de solo de declives convexos, e superestimar as dos côncavos” (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2010, p.58-59).

No que concerne aos processos geomorfológicos, Christofolletti (2009, p.420) indica que sua “abordagem consiste em reconhecer a incidência espacial dos processos e sua intensidade e mudanças ao longo das vertentes”. O autor indica que o mapeamento das formas da vertente representa instrumento importante para o estudo da paisagem e alocação das culturas, avaliação do uso agrícola e manejo, e escoamento superficial e controle da erosão dos solos.

Conforme a proposta de cartografia geomorfológica de Ross (1992), a classificação taxonômica do relevo fundamenta-se no aspecto fisionômico, gênese, idade, forma, tamanho, morfogênese, e influências estruturais e esculturais do relevo. O mapeamento do tipo de

vertente, contemplado pelo 5º Táxon da classificação, propõe a identificação de cada forma de relevo, discriminando as unidades em vertentes côncavas, convexas e retilíneas.

Borges (2009) acrescenta que a carta de forma de vertente possibilita individualizar os diferentes segmentos e suas formas diversificadas. A elaboração deste documento cartográfico pode se dar por meio da interpretação da configuração das curvas de nível existentes na base cartográfica, com acompanhamento por fotografias aéreas e trabalho de campo.

A crescente utilização de procedimentos metodológicos em meio digital na cartografia geomorfológica, cooperam para a realização do mapeamento de forma das vertentes por meio de geotecnologias. Ressaltam-se os estudos sobre mapeamento geomorfológico e de forma da vertente em ambiente de SIG, evidenciando a disponibilidade de imagens de diversos sistemas sensores, inclusive o próprio recurso estereoscópico e dos MDTs, com destaque aos trabalhos de Valeriano (2004) e Florenzano (2008).

### 3. ÁREAS DE ESTUDO

A complexidade e variabilidade de parâmetros de simulação de perda de solo e o uso de parcelas experimentais motivou a escolha de duas bacias hidrográficas de características hidrossedimentológicas distintas, a bacia do ribeirão Jacutinga, com o predomínio de solos advindos de argilitos da formação Corumbataí, e a bacia do córrego do Monjolo Grande, com o predomínio de solos arenosos oriundos da formação Pirambóia.

Em termos gerais, as bacias localizam-se no setor centro-leste do estado de São Paulo, mais especificamente na unidade morfológica da Depressão Periférica Paulista, entre as coordenadas geográficas de 22° 16' e 22° 23' de latitude sul, e 47° 39'30" e 47° 48' de longitude oeste de Greenwich, fuso 23S. A bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga é tributária da bacia do rio Corumbataí, setor de baixo curso do rio Piracicaba (SP), com área de 28,95 km<sup>2</sup>. Com área de 28,87 km<sup>2</sup>, a bacia do córrego Monjolo Grande é tributário do rio Passa Cinco, afluente da bacia do rio Corumbataí (Figura 1).

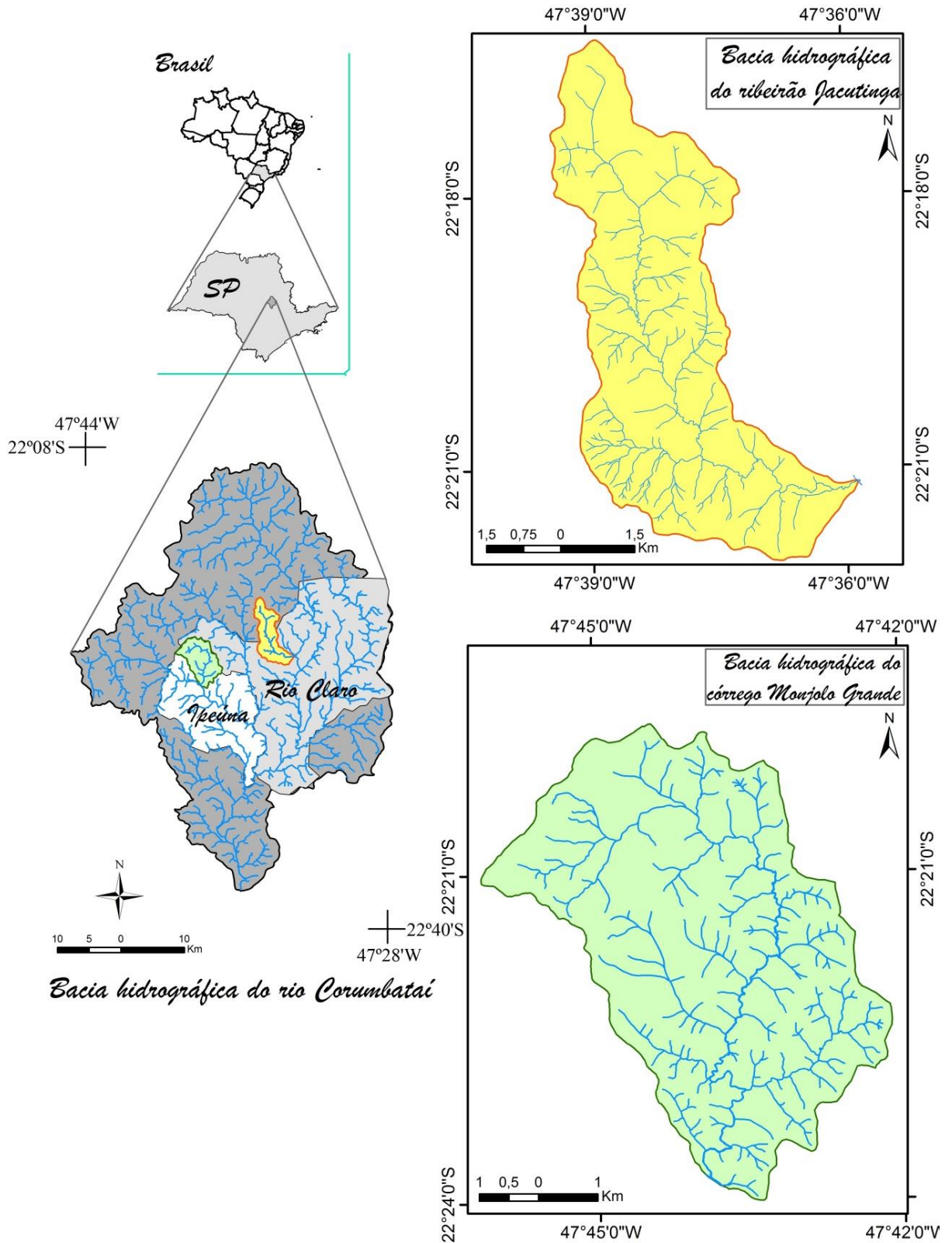


Figura 1. Localização das áreas de estudo: bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Organizado por: o autor.

As áreas de estudo situam-se na Bacia Sedimentar do Paraná. Considerada uma bacia intracratônica, foi alvo de incursões marinhas e recebeu sedimentos provindos das áreas mais elevadas, sendo preenchida por pacotes de rochas sedimentares e vulcânicas (SCHOBENHAUS, 1984). A Bacia abrange terrenos sedimentares com idades desde o Devoniano ao Cretáceo, além de extensas ocorrências vulcânicas básicas e ácidas do Jura-Cretáceo. Seu contato com as depressões do entorno se dá por escarpas, denominadas frentes de *cuestas*.

As depressões são resultados de “processos erosivos circundenudacionais” (ROSS, 1985, p.31) atuantes entre as bordas da bacia e maciços antigos, pela alternância de ciclos secos e úmidos entre o Terciário Superior e Quaternário Inferior. Em especial, a Depressão Periférica Paulista (da Borda Leste da Bacia do Paraná) “está quase que totalmente esculpida nos sedimentos Páleo-mesozóicos” e “apresenta características de modelado diverso em função de influência tectônica, variação litológica e graus de atuação dos processos morfodinâmicos” associados a paleoclimas (ROSS, 1985, p.36).

Em termos gerais, as bacias são compostas pelos afloramentos de rochas:

- Formação Corumbataí (Paleozóica);
- Formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral e Itaqueri (Mesozóicas); e
- Formação Rio Claro e depósitos aluvionais (Cenozóicas).

A bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga é composta por depósitos aluvionais, e pelas formações Rio Claro, Pirambóia e Corumbataí. A bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande é composta pelas formações Itaqueri, Serra Geral, Botucatu, Pirambóia, Corumbataí (

Figura 2).

Baseados em diversos trabalhos, sendo os principais desses os estudos de Almeida e Barbosa (1953), Almeida (1964, 1981), Björberg e Landim (1966), Landim (1970), Fúlfaro (1979), Cottas (1983), Zaine (1994) e Perinotto e Lino [2005?<sup>5</sup>], são apresentadas as formações geológicas, segundo a ordem cronológica de sua gênese, descritas na Tabela 1.

---

<sup>5</sup> Data provável de publicação



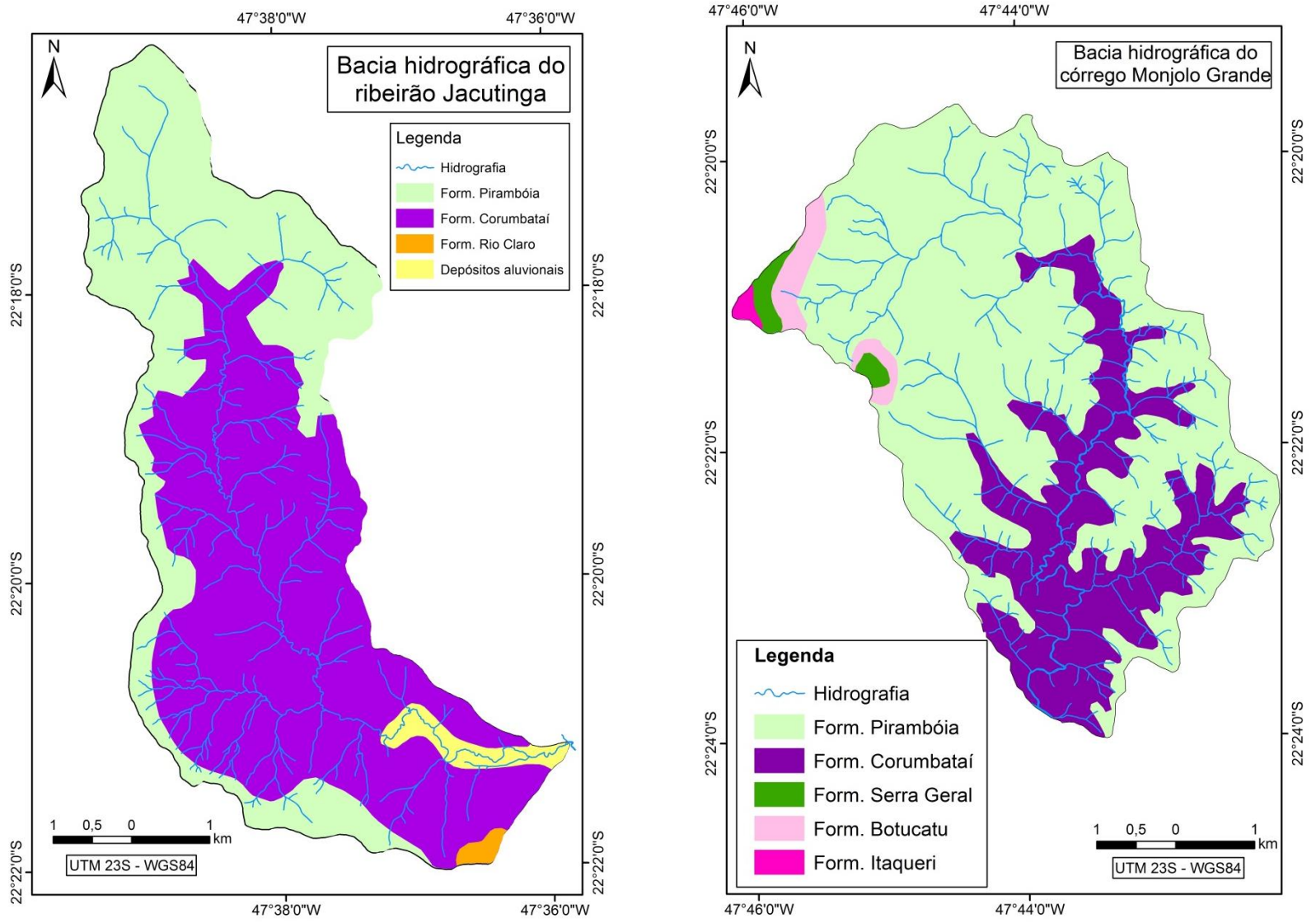


Figura 2. Quadro geológico das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Fonte: CEAPLA/UNESP - Rio Claro (SP). Organizado por: o autor.

Tabela 1. Formações geológicas das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e córrego Monjolo Grande.

Formação Geológica	Características básicas
<b>Depósitos Aluvionais</b>	Composto por sedimentos arenosos e argilosos, de coloração acinzentada a avermelhada, originados da recente atuação do rio Corumbataí e ribeirão Jacutinga (FREDERICE, et al., 2010).
<b>Formação Rio Claro</b>	Constitui-se de arenitos inconsolidados finos e médios, de coloração amarelada com intercalações de argilitos isolados, e depósitos coluvionares de cor marrom (COTTAS, 1983). Esta formação é considerada o registro mais significativo, e, provavelmente, o mais antigo do Cenozóico na Depressão Periférica Paulista (ZAINÉ, 1994), sendo o arenito Botucatu indicado como o principal fornecedor para a sedimentação (BJÖRBERG e LANDIM, 1966).
<b>Formação Itaqueri</b>	Constituída de arenitos e conglomerados, e marcantes por silicificação e estratificação cruzada, além de crostas ferruginosas, folhelhos e conglomerados que predominam na porção basal. De principal ocorrência no setor de reverso das <i>cuestas</i> , seu ambiente de sedimentação refere-se aos leques aluviais correspondentes à reativação do soerguimento da Serra do Mar (PERINOTTO e LINO, 2005 <sup>6</sup> ; ALMEIDA e BARBOSA, 1953).
<b>Formação Serra Geral</b>	Compreende um conjunto de derrames tabulares de basaltos toleíticos, entre os quais se intercalam arenitos. Seu afloramento se dá no topo e no reverso da <i>cuesta</i> arenito-basáltica e em morros testemunhos (COSTA, 2005). Esta formação é constituída por basaltos de textura afanítica, coloração cinza escura a preta, com desenvolvimento de juntas verticais e horizontais de origem tectônica, e por resfriamento, associadas a intrusões (diques e sills).
<b>Formação Botucatu</b>	Composta por arenitos bem selecionados, de granulação fina a média, amarelos, róseos e avermelhados, com marcantes características de estratificação cruzada, principalmente de grande porte. Sua origem está associada aos desertos do final do Jurássico e início do Cretáceo (PERINOTTO e LINO, 2005 <sup>6</sup> ; IPT, 1981).
<b>Formação Pirambóia</b>	Caracteriza-se por uma sucessão de espessos bancos arenosos, avermelhados, rosados ou amarelados, constituídos por arenito de granulação fina e média, com estratificação cruzada de porte variado. Também há uma proporção de fração argilosa na porção inferior, siltitos argilosos de coloração avermelhada intercalados por níveis de argilito, folhelhos e arenitos argilosos de cores variadas. Datadas do Triássico, interpreta-se que tais rochas foram originadas em ambientes flúvio-desérticos, com migração de dunas de areia e regiões úmidas interdunas (KOFFLER, 1994; PERINOTTO e LINO, 2005 <sup>6</sup> ).
<b>Formação Corumbataí</b>	Formada por argilitos de coloração arroxeadada ou avermelhada, com intercalações de lentes de arenitos muito finos e xistos argilosos de vasta ocorrência no vale do rio Corumbataí (LANDIM, 1967, KOFFER, 1994). As características sedimentológicas indicam deposição em condições litorâneas sob o domínio de correntes de maré, ambiente raso e oxidante, ocorrendo fácies de lamitos cinzas relativos a condições mais profundas, de infra-maré, e lamitos arroxeadados, em que as condições são de inter-maré, relativamente afastada de suprimento terrígeno, e caracterizadas pelo aumento da energia deposicional. A sucessão de fácies indica interrupção da regressão marinha por pequenas transgressões, onde foram geradas intercalações em condições mais profundas, representadas pelas lentes de arenitos muito finos e xistos argilosos, e mais rasas, representadas por argilitos arroxeadados. Tais flutuações impedem a subdivisão da formação geológica em questão. O contato desta formação

<sup>6</sup> Data provável de publicação.

	com a formação Pirambóia é, reconhecidamente erosivo (GAMA Jr. 1979 apud TOMASSI, 2009).
--	--

Do ponto de vista geomorfológico, a Depressão Periférica Paulista é recoberta por uma densa rede de drenagem, em especial alguns rios consequentes. Esses mantêm seu antigo traçado para noroeste, em direção ao eixo da bacia do rio Paraná, a partir de uma superfície de aplainamento antiga, estando superimpostas às estruturas paleozóicas e mesozoicas, rompendo as *cuestras* basálticas (PENTEADO, 1976). O sistema de relevo característico é de colinas amplas e médias, além de morrotes alongados e espigões (este geralmente situa-se em áreas de grandes interflúvios, ou zonas de embasamento rochoso heterogêneo de fácies sedimentares e argilosas). A drenagem mostra-se bem organizada, na forma dendrítica, com média a baixa intensidade (IPT, 1981).

A bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande encontra-se na transição entre a província geomorfológica da Depressão Periférica e o relevo de *cuestras* arenito-basáltica. O relevo é sustentado, predominantemente, por rochas da formação Botucatu e seus arenitos silicificados, e lavas basálticas. Tais condições proporcionam relevo diversificado e de estruturas resistentes, evidenciadas por ressaltos topográficos e formas residuais como o morro da Guarita e Bizigueli, e uma drenagem no setor de *cuestras* mais densa, bem desenvolvida e entalhada. A bacia do ribeirão Jacutinga, inserida na Depressão Periférica, apresenta topografia pouco acidentada, com relevo formado por colinas, topos aplainados e vertentes com perfis convexos e retilíneos (IPT, 1981 e 1999), conforme a Figura 3.

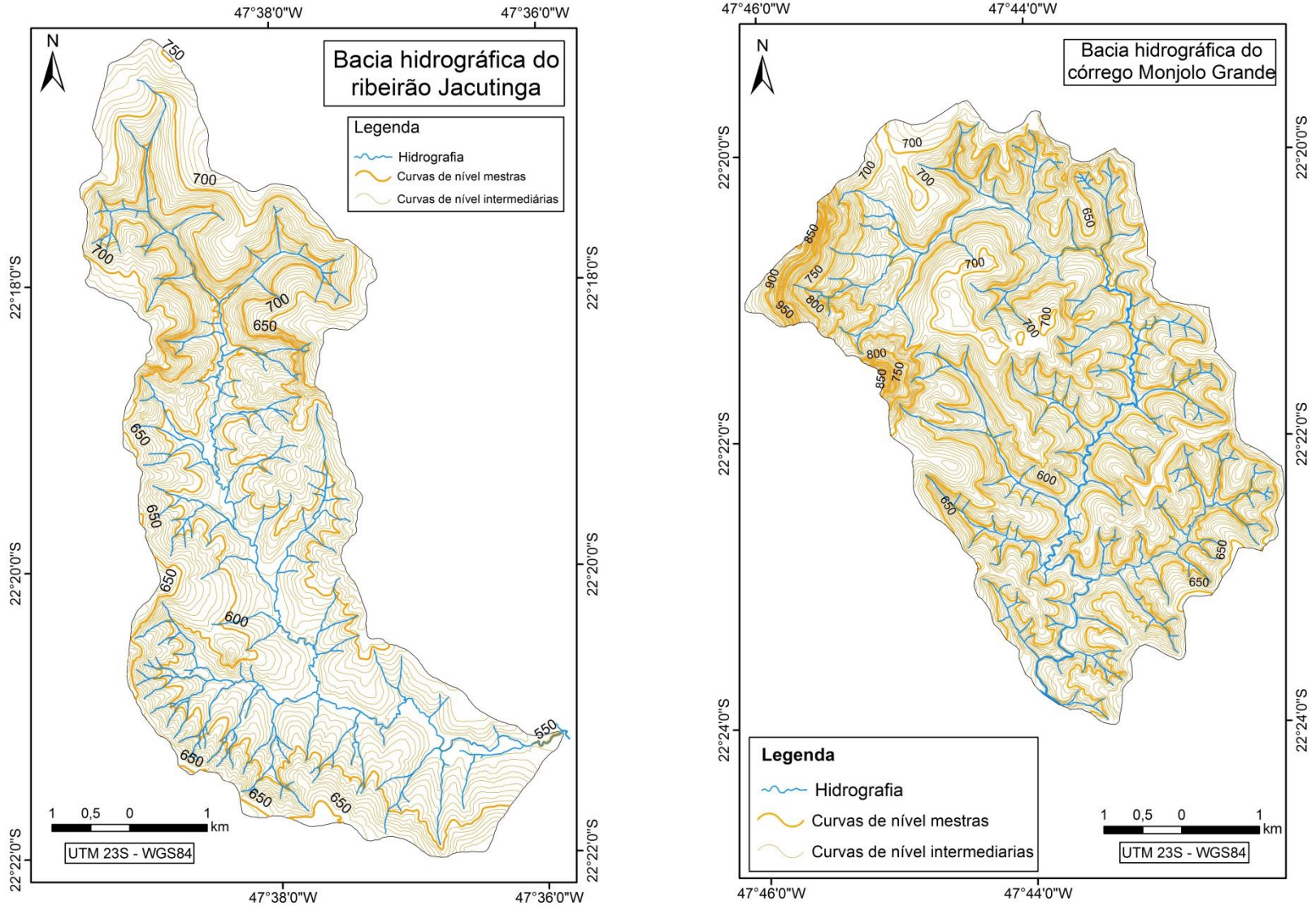


Figura 3. Mapa topográfico das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Organizado por: o autor.

Tendo como base a caracterização descritiva dos mapeamentos realizados por Oliveira e Prado (1984) referentes à Carta Pedológica da Quadrícula São Carlos, em escala de 1:100.000, a bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande apresenta principalmente solos do tipo Latossolo Vermelho Amarelo e Neossolo Quartzarênico profundo, tendo como material de origem as formações Botucatu e Pirambóia e, na transição com as *cuestas*, há a ocorrência de Neossolo Litólico relacionados às Formações Serra Geral e Botucatu (alto curso). Há também a presença de Argissolo Vermelho Amarelo. Por sua vez, na bacia do ribeirão Jacutinga, tem-se a ocorrência do Neossolo Quartzarênico profundo associado à formação Pirambóia nas áreas do alto curso. Em maior proporção há os Argissolo Vermelho Amarelo associado à formação Corumbataí (OLIVEIRA e PRADO, 1984).

Em termos gerais, os Neossolos Quartzarênicos foram caracterizados por areias quartzosas profundas e predominância de caráter álico, com horizonte A moderado. As características do material de origem, que atenuam a ação dos processos pedogenéticos resultaram em perfis pouco diferenciados, e espessura de solo superior a 200 cm, e de consistência friável, de baixa pegajosidade e plasticidade. Os teores de argila são baixos, próximos a 9% em superfície e 12% em subsuperfície, havendo o predomínio de textura média no horizonte B com ou sem horizonte A arenoso. A estrutura do horizonte A é granular pequena fraca associada a grãos simples, com cores entre vermelho-acinzentado, bruno-avermelhado-claro e bruno-escuro. O horizonte C não dispõe de organização estrutural definida, ou às vezes apresenta estrutura subangular fraca. Os solos apresentam baixo valor da soma de bases e a média de saturação por bases indica solos bastante distróficos (OLIVEIRA e PRADO, 1984, p. 155-167). E, o grupo dos Argissolos Vermelho Amarelo, que caracteriza-se por horizonte B textural (Bt) não hidromórfico, e individualização dos horizontes devido à acentuada diferenciação de textura, cor e estrutura, sendo a sequência de horizontes A (A1, A2 e/ou A3), Bt e C. Estes solos apresentam normalmente transição clara ou abrupta entre horizonte A e Bt, e gradiente textural elevado. Quanto à espessura, podem ser classificados como moderadamente profundos a profundos (JACOMINE, 1979 apud OLIVEIRA e PRADO, 1984, p. 106). As características apresentadas, juntamente aos materiais pré-existentes como o mapa pedológico da quadrícula São Carlos (escala de 1:100.000) e técnicas de fotopedologia pelo aerolevanteamento de 1972 (escala aproximada de 1:25.000), possibilitou a realização do mapeamento de unidades pedológicas, que associadas a classes de solos, gerou mapas pedológicos de semi-detulhe, em escala de 1:25.000, conforme a Figura 4 e a Figura 5.

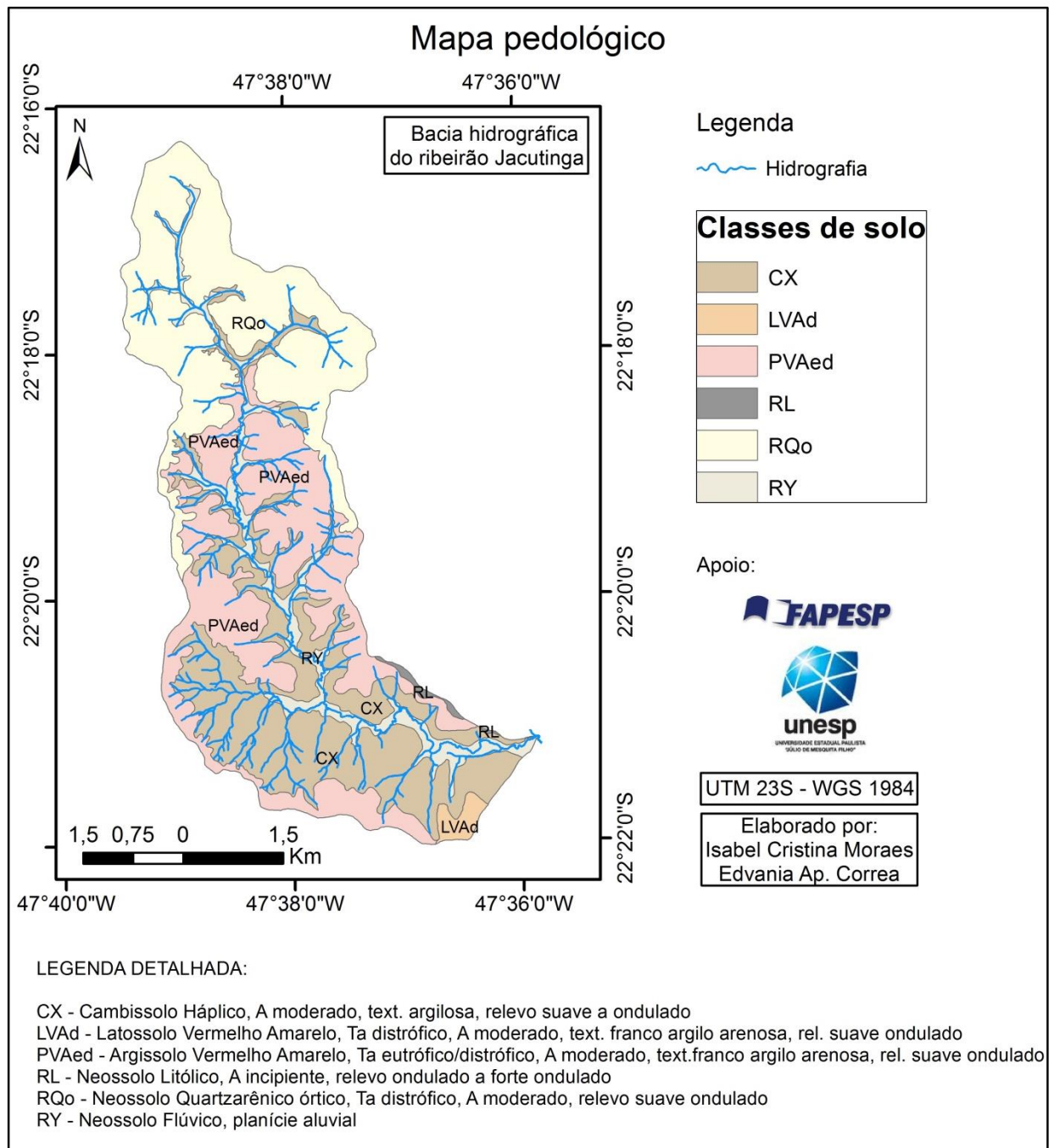


Figura 4. Mapa pedológico da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.

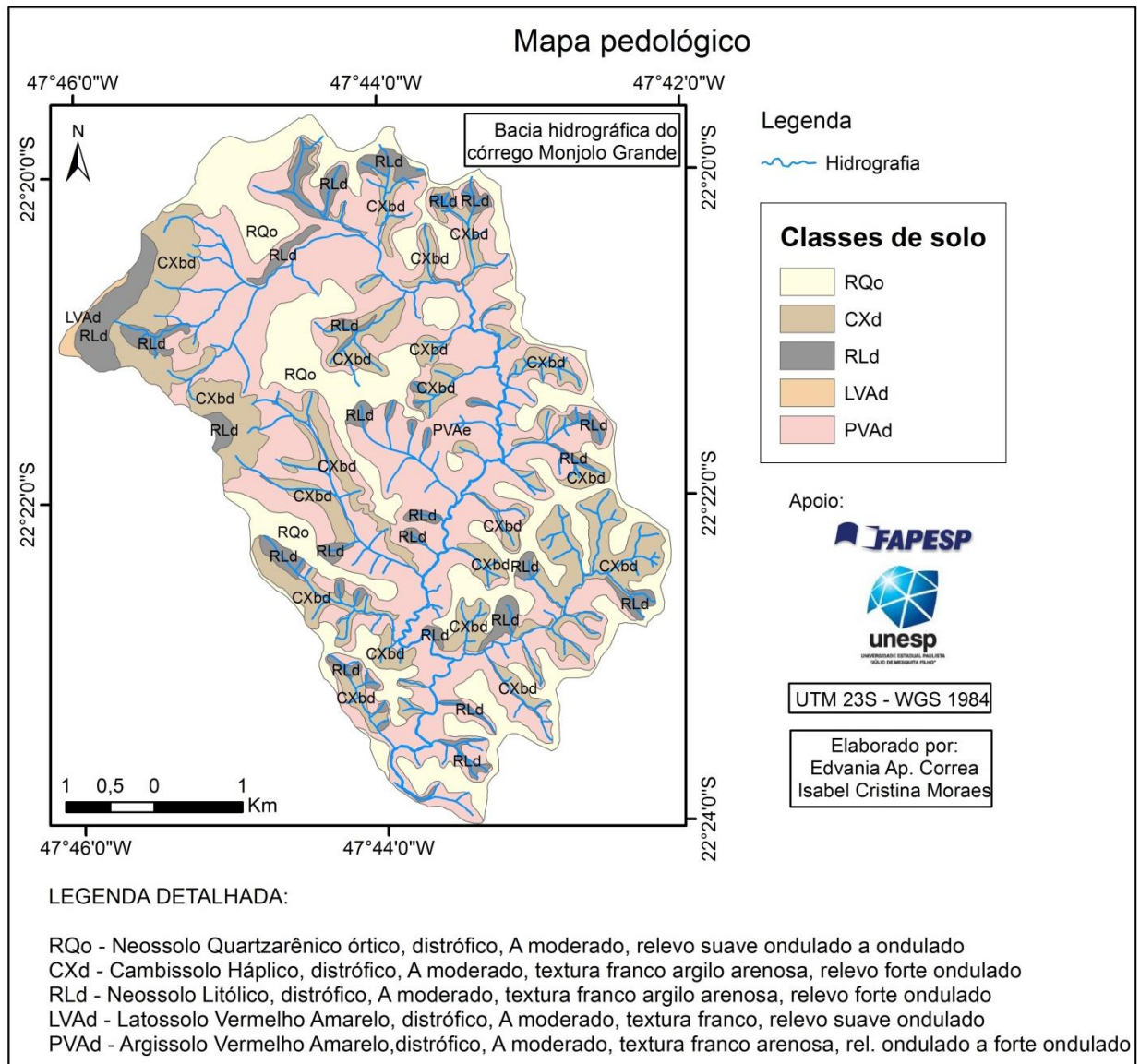


Figura 5. Mapa pedológico da bacia hidrográficas do córrego Monjolo Grande.

O mapa pedológico da bacia do ribeirão Jacutinga caracteriza-se pelo predomínio de solos argilosos, representados pelas unidades de Argissolos e Cambissolos, ambas associadas à formação Corumbataí. Com menor expressividade, observamos as ocorrências de Neossolo Quartzarênico derivado da formação Pirambóia, e dos Latossolos associados à formação Rio Claro. A ocorrência dos Argissolos Vermelho Amarelos são representados pelas unidades Santa Cruz e Olaria associadas a Neossolos Litólicos no baixo curso. Estas unidades estão comumente associadas ao relevo ondulado dissecado esculpido pelos rios Passa Cinco, Corumbataí, e ribeirão Claro e seus afluentes, no grupo Passa Dois – abaixo da cota dos 650 metros.

A unidade Santa Cruz caracteriza-se por argilas de atividade baixa, relação textural acentuada e/ou abrupta devido ao acréscimo de argila em profundidade, distrófico ou álico, e relativamente elevada capacidade de troca catiônica. São comumente moderadamente profundos a rasos, inferior a 1,5 m e chegando a 60 cm. O horizonte A raramente ultrapassa 30 cm, e tem textura bastante variável, de média a muito argila, e sua estrutura varia de granular e subangular, consistência dura, firme e plástica. A transição de horizonte A para B (B1t e B2t) é abrupta e plana, com estrutura bem desenvolvida do tipo subangular, cerosidade de alta a forte, e textura muito argilosa. A unidade Olaria assemelha-se às características da unidade Santa Cruz, diferenciando-se apenas quanto a diferenciação entre horizontes, mais discreta, e de relação textural pouco acentuada, com textura de média a argilosa. Nas áreas de baixo cursos, a ocorrência destas unidades encontra-se associada a neossolos litólicos do substrato de sedimentos finos do Permiano.

O mapa pedológico da bacia do córrego Monjolo Grande caracteriza-se pelo predomínio de solos arenosos, representados pelas unidades de Argissolos, Neossolo Quartzarênico e Cambissolos, associadas à formação Botucatu-Pirambóia, e com menor expressividade, os Neossolos Litólicos em áreas de declive mais acidentado.

Na bacia do ribeirão Monjolo Grande e o setor de médio curso do ribeirão Jacutinga, há ocorrência dos Argissolos Vermelho Amarelos representados pela unidade Serrinha, associada aos Neossolos Litólicos do substrato arenítico Botucatu-Pirambóia. Esta unidade caracteriza-se por argilas de baixa atividade, abrupto, distrófico ou álico, com A moderado e textura arenosa/média. Alguns perfis apresentam mosqueamento, sendo este elemento provavelmente resultante do maior umedecimento decorrente da diminuição da permeabilidade nesta camada. No que se refere às características analíticas, o pH indica tratar-se de um solo ácido, e apesar da ocorrência de saturação de bases superior a 70%, a média foi de apenas 30%, mostrando o caráter distrófico destes solos (OLIVEIRA e PRADO, 1984, p. 116). Apenas na bacia do ribeirão Monjolo Grande verifica-se em menor escala a ocorrência de Latossolos Vermelho Amarelo e Neossolo Litólico, relativos à formação Botucatu, e intrusões da formação Serra Geral.

Considerando a distribuição das chuvas e as variações de temperatura, são atribuídos às áreas de estudo o tipo climático CWa (clima sub-tropical, com inverno seco e verão chuvoso), conforme a classificação zonal de Köppen. Tendo em vista as características climáticas históricas, no período seco, distribuídos nos meses de março a setembro, há menos de 20% das chuvas anuais, e o restante (mais de 80%) está distribuído nos outros 6 meses. As



temperaturas mais elevadas ocorrem entre dezembro e março, e as mais baixas entre junho e julho (TROPMAIR e MACHADO, 1974).

Inicialmente, para a caracterização pluviométrica das bacias de estudo, foram determinados os postos pluviométricos tendo em vista o maior intervalo histórico das precipitações, com baixa ocorrência de falhas, e a proximidade com as bacias em questão. No contexto regional, foi escolhido o posto, de prefixo DAEE, D4-016, que representa a bacia hidrográfica do Corumbataí. Em contexto local, a bacia do córrego Monjolo Grande teve seu histórico de precipitação caracterizado pelo posto D4-036 - Graúna, localizado em Itirapina, e para a bacia do ribeirão Jacutinga, utilizou-se os dados do posto D4-012, em Rio Claro.

Para a caracterização pluviométrica do ano experimental, houveram dificuldades de instalação e coleta de dados dos equipamentos meteorológicos instalados nas proximidades das parcelas experimentais, e também muitas falhas nas séries obtidas. Esses problemas levaram à utilização dos registros do posto D4-112 (CEAPLA – município de Rio Claro), para a representação da bacia do ribeirão Jacutinga. Para o ano experimental da bacia do córrego do Monjolo Grande (julho de 2013 a agosto de 2014), foram utilizados os registros da estação meteorológica DAVIS Vantage Pro2 Plus, instalada nas proximidades (cerca de 200m) das parcelas experimentais. Os registros do posto D4-074 (Laticínio – município de Ipeúna) serviu de apoio para a correção de falhas desta estação.

Para caracterização dos registros pluviométricos do ano experimental, comparou-se o histórico da média total mensal das precipitações (postos D4-016, D4-036 e D4-012, médias de 1.554,433, 1.590,554 e 1.501,4 mm, respectivamente) com o período de chuvas de junho 2013 a agosto de 2014 (postos D4-074 e D4-112). Para os meses que se repetiram (junho, julho e agosto) foram obtidas médias simples do total mensal, conforme segue na Figura 6.

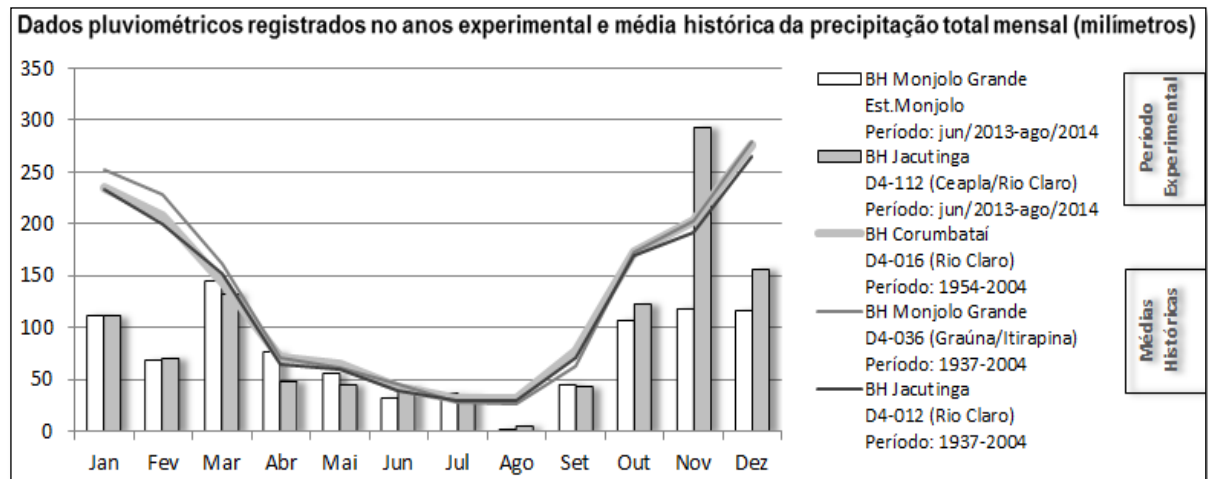


Figura 6. Comparação das precipitações no período experimental e da média histórico dos postos D4-016 (Graúna/Rio Claro-SP), D4-036 (Itirapina-SP) e D4-012 (Rio Claro-SP).

Notadamente, o período de monitoramento das parcelas experimentais teve característica pluviométrica atípica. Os valores pluviométricos do ano experimental foram inferiores à média histórica, com destaque principalmente aos meses mais chuvosos, entre outubro e fevereiro. Nos meses de janeiro e fevereiro de 2014, por exemplo, as alturas registradas foram inferiores à metade das obtidas pela média histórica. A partir dos registros apresentados, as características pluviométricas sugerem valores inferiores de perda de solo pelas medidas obtidas das parcelas de pinos de erosão em relação a um ano de chuva padrão.

#### 4. MATERIAIS E ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas as estruturas dos laboratórios de Geotecnologia e Cartografia - GEOCARTO, de Geomorfologia – LAGEO e de Geoquímica Ambiental – LAGEA, do Dpto. de Planejamento Ambiental e Geoprocessamento – DEPLAN/IGCE/UNESP. A pesquisa contou com o apoio da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, por meio da Casa da Agricultura de Ipeúna (SP), e do projeto intitulado “Avaliação da erosão hídrica, química e mecânica entre arenitos e argilitos: uma contribuição à evolução geomorfológica da bacia do Rio Corumbataí (SP)”, fomentada pela FAPESP (processo n. 2012/19935-7). Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Imagens orbitais provenientes do satélite IKONOS (imagens PAN/MS – out./2013), no formato digital.
- Foto aéreas do aerolevanteamento do ano de 1972 e 1988 (formato de papel fotográfico, sendo que de 1972 em escala aproximada de 1:25.000, e de 1988 em escala de 1:40.000, ambas no formato 230mm x 230mm (BASE Aerolevanteamento S.A).
- Documentação cartográfica:
  - Mapas base: cartas topográficas nas escalas de 1:50.000 (IBGE, 1978) e 1:10.000 (IGC, 1979).
  - Mapas temáticos: geológico em escala 1:100.000 (SOUSA, 2002); pedológico em escala de 1:100.000 (OLIVEIRA e PRADO, 1984 ; IAC, 1984 e 1989).
  - Banco de dados cartográficos do CEAPLA (2001) – Rio Claro ([www.ceapla.rc.unesp.br](http://www.ceapla.rc.unesp.br)).
- Softwares de tratamento digital de imagens, geoprocessamento e SIGs: SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, v. 5.3; ENVI – *Environmente of Visualizing Images*, v. 4.6; QuantumGis v. 1.8, ArcGis v. 10;
- Softwares estatísticos e computacionais: Excel versão 2010;
- Equipamentos: GPS Trimble (XM 2008, precisão de 0,5m); mesa de luz; estereoscópio de bolso e de espelho; clinômetro; trena manual e trena a laser; conjunto de trados; infiltrômetro; penetrômetro.

Quanto aos procedimentos metodológicos, a pesquisa foi desenvolvida com base na abordagem proposta por Christofolletti (1999), a qual propõe os segmentos de análise e de

integração de dados. A etapa analítica refere-se à aquisição de dados primários e estruturação de banco de dados robusto em ambiente de SIG. O segmento de integração visa a implementação da modelagem ambiental, e inclui uma análise comparativa de integração dos resultados gerados pelos modelos de simulação e dos registros obtidos experimentalmente.

#### **4.1. Segmento analítico**

##### **4.1.1. Base cartográfica, MDE, hipsometria e declividade**

Para a elaboração da base cartográfica da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga foram utilizadas as folhas SF-23-Y-A-I-4-NO-B, SF-23-Y-A-I-4-NO-D, SF-23-Y-A-I-4-NO-F, SF-23-Y-A-I-4-NE-C e SF-23-Y-A-I-4-NE-E, na escala de 1:10.000 em formato analógico (IGC, 1979). Para a bacia do córrego do Monjolo Grande foram utilizadas as folhas SF-Y-A-I-3-NE-D, SF-Y-A-I-3-NO-C, SF-Y-A-I-3-NE-F, SF-Y-A-I-3-NO-E, SF-Y-A-I-3-SE-B e SF-Y-A-I-3-SO-A, na escala de 1:10.000 em formato analógico (IGC, 1979), com articulação descrita por Pereira (2010).

As cartas topográficas em formato analógico foram transpostas para o meio digital a partir de scanner A0, em formato *tiff* e resolução de 300 dpi. A etapa seguinte consistiu no georreferenciamento das cartas em ambiente de SIG, software QuantumGis versão 1.8. O parâmetro de ajuste do georreferenciamento teve como base o Erro Admissível descrito pelo IBGE (1983), onde a menor grandeza (M) medida no terreno capaz de ser representada cartograficamente equivale a 1/5 de milímetro da escala considerada, sendo  $E_t = 0,0002 * M$  (m). Fixado esse limite, determinou-se que o  $E_t$  do georreferenciamento para as 5 folhas das cartas topográficas, de escala 1:10.000, é de no máximo 2m, sendo  $E_t = 0,0002 * 10000$ , e portanto  $E_t = 2m$ .

Na interface do SIG ArcGis v.10, foram utilizadas ferramentas de edição e a extensão *ArcScan* para a extração de dados em formato vetorial dos seguintes elementos: curvas de nível (com equidistância de 5 metros), pontos cotados, rede de drenagem, estradas e área de contribuição da bacia hidrográfica.

No processo de edição vetorial foi dada atenção especial ao número de vértices, para que as feições não se tornassem demasiadamente angulosas ou generalizadas, permitindo a geração de geometrias de superfícies suavizadas nas fases de interpolação de dados. A inspeção dos erros dos dados vetoriais se deu a partir do banco de dados gerado, em extensão

.*gbd*, e regras topológicas realizadas no SIG ArcGis 10. A correção automática e/ou supervisionada para feições de linhas foi verificada a partir do comando *must not intersect* e *must have dangles*, onde são indicados erros de intersecção e pontos sem conectividade, e para as feições poligonais a rotina se estabeleceu pelos comandos *must not overlap*, *must have dangles* e *must not have gaps*, a qual indicou áreas onde houve sobreposição e regiões ou pontos sem conectividade, garantindo a consistência dos dados vetoriais.

Nesta etapa de estruturação da base de dados cartográfica, o componente de erro mais explorado refere-se à incerteza quanto a aspectos de localização. A exatidão do posicionamento é dada pelo erro da posição com relação ao sistema de referência da base. Neste sentido, realizou-se a retificação cartográfica visando minimizar erros planimétricos associados à escala do mapa e a erros de medição das coordenadas dos pontos de controle por GPS (D'ALGE, 2003).

Por meio de excursão a campo, uso de GPS (Trimble XM 2008) e do software *GPS Pathfinder Office*, os dados adquiridos foram extraídos a partir da ferramenta de *Transferência de Dados*. Conforme IBGE (1991), o uso de dados de GPS para fins geodésicos e topográficos implica no uso do método relativo, em que ao menos uma estação de coordenadas conhecidas é ocupada simultaneamente à ocupação da estação com os pontos de interesse.

Como referência de estação fixa, foram utilizados os dados da Rede de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC, e a estação mais próxima, SPCA 0771.13° (na data de 15/03/2013), da cidade de Campinas. Para tal, utilizou-se a ferramenta de *Correção Diferencial* do software *GPS Pathfinder Office*. Posteriormente, os pontos de controle corrigidos foram integrados à interface ArcGis 10 para a realização de procedimentos de retificação cartográfica. Por meio da ferramenta *Spatial Adjustment/Rubber Sheeting* foram utilizados 12 pontos de controle dos quais 9 foram coletados em campo. Tais procedimentos cooperaram na estruturação de uma base cartográfica mais consistente e fidedigna.

Para a elaboração do MDE – Modelo Digital de Elevação do Terreno foram utilizadas técnicas de geoprocessamento para a geração de uma superfície contínua a partir da interpolação dos valores de altimetria. O MDE é representado comumente por uma matriz (formato *raster*), onde para cada unidade elementar (denominada célula ou pixel) é atribuído um valor de elevação (BURROUGH e McDONNEL, 1998). Utilizaram-se cartas topográficas na escala de 1:10.000 (IGC, 1979) em meio digital com os planos de informação (elementos altimétricos), curvas de nível (equidistância de 5m), drenagem, pontos cotados e limite das

bacias. A partir da ferramenta *Topo to raster* no ArcGis v.10.1, foram elaborados MDEs das bacias hidrográficas de estudo, com resolução espacial de 3 x 3 m.

A partir do MDE realizou-se a reclassificação dos valores altimétricos para a caracterização hipsométrica das áreas de estudo, com intervalos definidos a cada 50 m. E, tendo o MDE como *input* para a determinação das classes de declividade, utilizou-se a ferramenta *slope*, na interface do ArcGis 10, para a geração do mapa de declividade. As classes de declividade foram definidas conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1979 e 1999), com adaptação da mesma pela subdivisão da terceira classe (8 a 20 %), e as respectivas classes de relevo, conforme a Tabela 2, sendo essa a representação mais adequada para as características das áreas de estudo.

Tabela 2. Classes de declividade (%) e respectivas classes de relevo.

Declividade (%)	0 ÷ 3	3 ÷ 8	8 ÷ 13	13 ÷ 20	20 ÷ 45	45 ÷ 75	> 75
Relevo	Plano	Suave ondulado	Ondulado		Forte Ondulado	Montanhoso	Escarpado

#### 4.1.2. Caracterização e mapeamento de solos

Para a elaboração do mapa de solos foram utilizados os seguintes materiais de apoio: a. base cartográfica do IGC (SP) (escala de 1:10.000, 1979); b. os trabalhos do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC em convênio com a EMBRAPA, desenvolvidos por Oliveira e Prado (1984); e c. levantamento pedológico da quadrícula São Carlos (FS.23-Y-A-I), com escala de publicação de 1:100.000 (IAC, 1984 e 1989).

Considerando como fundamentação metodológica as técnicas de fotopedologia, propostas por Amaral (1972), e a classificação das unidades pedológicas mapeadas conforme Demattê (2010), procedeu-se com a geração do esboço fotopedológico das bacias de estudo, utilizando fotografias do aerolevante de 1972, em escala aproximada de 1:25.000, além de técnicas de estereoscopia e fotointerpretação. A partir da identificação de rupturas de relevo em diferentes posições da vertente são definidas preliminarmente unidades fotopedológicas.

Posteriormente, o refinamento deste mapeamento foi realizado a partir do levantamento dos solos. O planejamento deste levantamento partiu da identificação de topossequências complexas, áreas nas quais são atribuídas um grande número de unidades fotopedológicas. Por meio de excursões a campo, procedeu-se à identificação de perfis de solo

e coleta de amostras por gradagem, a cada 20 cm até a profundidade de 80 a 120 cm (EMBRAPA, 1999).

A classificação de perfis de solo e obtenção das características físico-químicas de amostras de solo em laboratório possibilitou a classificação dos solos, conforme IBGE (2007). Uma vez que as unidades pedológicas tornam-se classes de solos, os resultados são extrapolados para áreas não amostradas, mas com unidades idênticas quanto ao material de origem, tipo de solos, declividade e posição na vertente, atribuindo-se classe de solo semelhante. A atribuição de classes de solos às unidades fotopedológicas resultou no mapa de semi-detalle (Figura 4 e Figura 5).

Em função da similaridade de padrões de ocorrência das unidades, durante a elaboração do esboço fotopedológico foram identificadas confusões entre as unidades de Neossolos Quartzarênicos e Latossolo Vermelho Amarelo na bacia do Monjolo Grande, e nas unidades de Cambissolos e Argissolos Vermelho Amarelos, na bacia do córrego do Jacutinga. Com o intuito de corrigir e minimizar estes equívocos, além da classificação por meio do levantamento de solos e análise físico-química de amostras, a caracterização pedológica das bacias contou com o apoio das análises da capacidade de infiltração e de resistência mecânica à penetração.

A análise das taxas de infiltração foi realizada por meio do uso de cilindros de infiltração, ou infiltrômetros, um método popular de mensuração da penetração e determinação da taxa máxima de entrada de água no solo. O cilindro proposto por Hills (1970) apresenta vantagens como o tamanho reduzido do equipamento, sua reprodução simples e de baixo custo, e aplicabilidade com uso de pequena quantidade de água (RODRIGUES, 2005). No entanto, o método apresenta limitações, como as perturbações no solo devido ao próprio processo de instalação, o diâmetro do cilindro, mas principalmente a falta de controle do movimento lateral da água, denominado “efeito de borda”. O aumento da precisão para aquisição da taxa de infiltração real ou vertical é dado pela eliminação dos valores exagerados pelas perdas laterais de infiltração abaixo do cilindro, o que resultaria, por meio de algoritmos, na capacidade de infiltração (TRICKER, 1978).

O infiltrômetro é composto por um cilindro (secção de cano de PVC) com 15 cm de altura por 10 cm de diâmetro, com escala interna de 10 cm. O equipamento é fixado no solo e enterrado 5cm, enquanto que a parte exposta do cilindro deve ser abastecida com água até completar seu volume, chegando à marca da escala de 10 cm, conforme as Figura 7 e Figura 8. O nível da água deve ser registrado a cada 30 segundos (nos primeiros dois minutos) e a

cada minuto (nos 28 minutos restantes), contabilizando 30 minutos de medição (GUERRA, 1996; BARBOSA, 2010).



Figura 7. Fixação do infiltrômetro. Fonte: o autor.



Figura 8. Registro da alteração do nível da água no infiltrômetro. Fonte: o autor.

Para a aquisição da taxa de infiltração, calcula-se o volume de água infiltrada por minuto, conforme a equação 9:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (9)$$

Onde: V – volume de água infiltrada por minuto; r – raio do cilindro; h - diferença entre altura do nível de água e altura registrada no minuto anterior.

Posteriormente calculada a taxa de infiltração média, conforme segue (equação 10):

$$TI = \text{vol} / t \quad (10)$$

Onde: TI - taxa de infiltração média dada em cm/s; cm/min; mm/s; mm/m ou mm/h; vol – volume total infiltrado; t - tempo, em minutos, de duração do experimento.

As amostragens foram distribuídas em pontos semelhantes aos estabelecidos para o levantamento de solos, com registros obtidos entre 17 e 18 de dezembro de 2013. Também foram coletadas amostras deformadas, e devidamente pesadas em condições de umidade de campo e TFSA (terra fina seca ao ar), a fim de conhecer as condições de umidade antecedente no momento de aquisição das taxas de infiltração. E, apesar das perdas laterais abaixo do



cilindro, o experimento contribuiu na obtenção de resultados relativos e satisfatórios para a caracterização das classes de solo mapeadas.

Para a análise da resistência mecânica do solo à penetração foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar – Stolf, com peso de 7 Kg, em curso livre. Este equipamento constitui-se de uma haste com um cone na extremidade inferior, com peso de curso constante na haste superior, provocando a penetração da haste no solo por impacto. A leitura é feita na própria haste, graduada em centímetros. Além da fácil obtenção de dados, o equipamento não exige calibração, é relativamente leve (entre 6 a 9 kg) e seus resultados não variam em função do usuário. Os valores de resistência à penetração podem variar em função da umidade do solo, não servindo para análise em termos absolutos. A variação da umidade ao longo do perfil pode interferir nos resultados, porém, com gradiente pequeno, abaixo dos 20 cm, não há o comprometimento de resultados (STOLF et al., 1983).

Considerando a interferência na relação infiltração-escoamento superficial, a avaliação se deu nas camadas superficiais e de subsuperfície, com no mínimo 30 cm e até 70 cm de profundidade - Figura 9 e Figura 10. Para cada ponto, foram realizadas de 3 a 4 amostragens, visando minimizar as discrepâncias nos dados por meio de repetições (BARBOSA, 2010).



Figura 9. Uso do penetrômetro de impacto. Fonte: Edvania Ap. Corrêa.



Figura 10. Registro da resistência mecânica do solo. Fonte: Edvania Ap. Corrêa.

O Índice de Penetração (IP) foi a medida relativa de resistência mecânica dos solos, obtido conforme a equação 11. Posteriormente, os dados foram transformados para

megapascal (Mpa), conforme Stolf (1991 apud TAVARES FILHO et al., 2008; LIMA et al., 2013), descrito na equação 12.

$$IP = n_i / p \quad (11)$$

$$RP = (5,6 + 6,98 IP) * 0,098 \quad (12)$$

Onde: IP - índice de penetração (número de impacto/dm<sup>-1</sup>); n<sub>i</sub> - número de impactos; p - profundidade (dm); RP - resistência mecânica do solo à penetração (MPa).

Os procedimentos para a caracterização e mapeamento de solos são sintetizados pelo organograma da Figura 11.

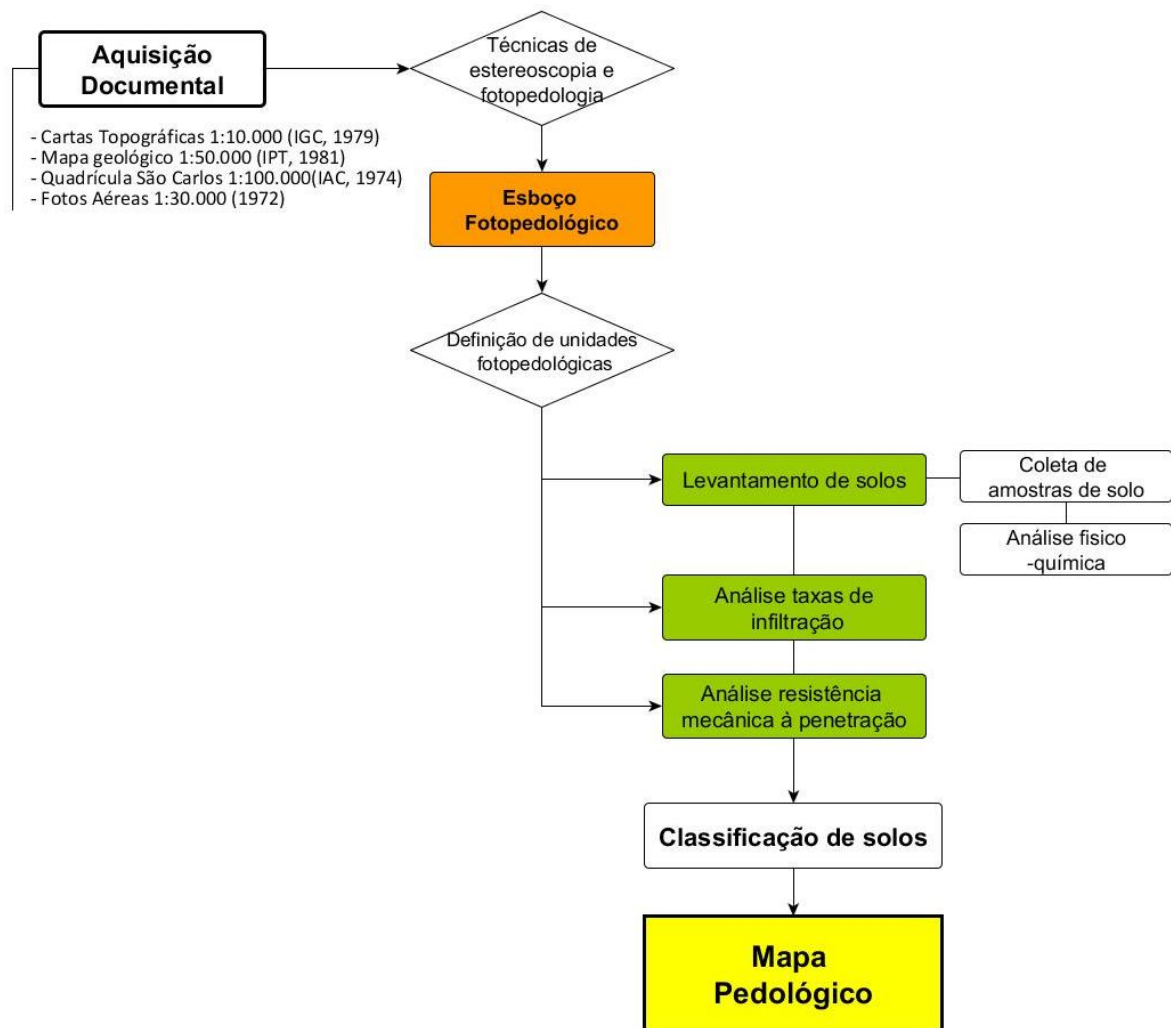


Figura 11. Fluxograma de elaboração dos mapas pedológicos.

#### 4.1.3. Mapeamento de forma da vertente

Procedeu-se com a estruturação de um banco de dados em SIG composto por camadas ou planos de informação: a. base cartográfica digitalizada, especialmente com a visualização das curvas de nível com equidistância de 5 metros e escala de 1:10.000; b. MDE, com efeitos de sombreamento para simular a superfície hipsométrica em 3D, evidenciando as formas do modelado; c. produto referente à curvatura vertical de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), do banco de dados topográficos TOPODATA, com resolução espacial de 30 metros e escala de 1:100.000 (INPE, 2008).

A partir da sobreposição dos planos de informações e associação com conhecimento de campo das áreas de estudo, utilizou-se de técnicas de interpretação visual em interface digital, com escala fixa de 1:5.000, para o mapeamento de forma das vertentes. Este mapeamento foi realizado por meio de procedimentos de vetorização manual, no qual atribuiu-se aos polígonos de forma da vertente as classes Topo, Côncava, Convexa, Retilínea e Planície. As etapas deste procedimento encontram-se no organograma da Figura 12.

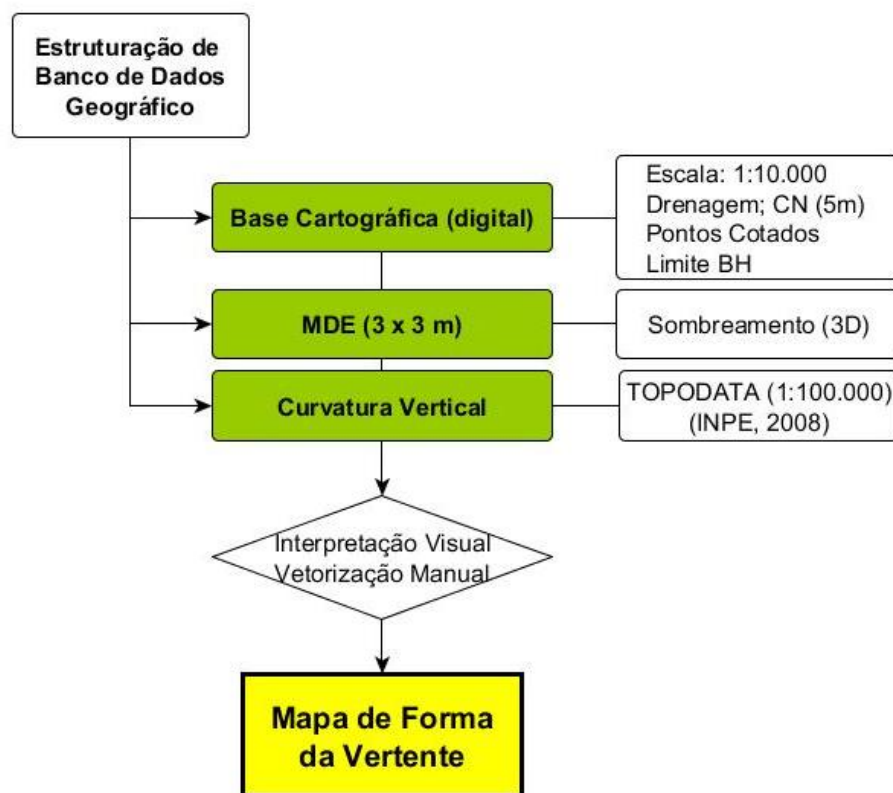


Figura 12. Organograma de elaboração dos mapas de forma de vertente.

#### 4.1.4. Determinação da alteração da superfície do solo a partir de pinos de erosão

Para a determinação da alteração da superfície do solo por erosão hídrica laminar foram implantadas parcelas experimentais de pinos de erosão, sob condição de chuva natural, visando quantificar os processos de perda e deposição de sedimentos em função da variação das irregularidades da superfície do terreno. Os pinos são vergalhões de metal (bitola de 8 mm), de 40 cm de comprimento, cravados no solo até a profundidade de 30 cm, sendo 10 cm exposto em superfície (Figura 13). Visou-se avaliar não apenas processos de perdas de solo, uma vez que os pinos expostos acima da superfície permitem estimar eventuais processos deposicionais.

Cada parcela experimental foi dimensionada em 1 x 1 m, com 25 pinos dispostos no sentido da declividade, com alinhamento intercalado, evitando a interferência das linhas superiores nas linhas inferiores (Figura 14). Como os pinos tornam-se um obstáculo ao transporte de sedimentos, as partículas de terra tendem a acumular-se ao seu redor, provocando o denominado efeito de borda. Tal efeito foi desconsiderado durante a aquisição das medições.



Figura 13. Pino de erosão fixado na terra.

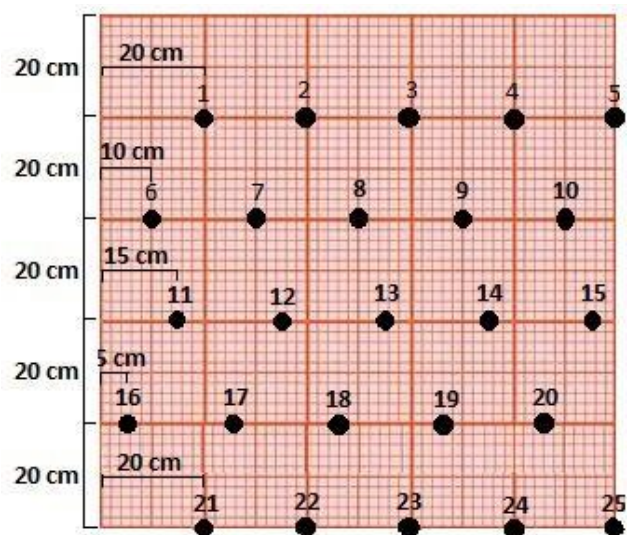


Figura 14. Esquema de distribuição dos pinos de erosão em parcelas de 1 x 1 m.

A determinação da perda de solo é estabelecida indiretamente, pela mudança da superfície do solo, conforme metodologia proposta por Bertoni e Lombardi Neto (2010), calculada de acordo com a expressão 13.

$$P = h \cdot A \cdot Ds \quad (13)$$

Em que: P - perda de solo (ton/ha); h - média de alteração de nível da superfície do solo (m); A - área da parcela (m<sup>2</sup>); Ds - densidade aparente do solo (ton/m<sup>3</sup>).

Para obtenção dos valores de perda, necessita-se conhecer a Ds, referida como densidade aparente. Este parâmetro considera indiretamente a estrutura e grau de compactação do solo, pois inclui o espaço poroso e constitui-se no volume do solo ao natural, correspondendo à massa do solo seco por volume (LEPSCH, 2011, p.131-134). A densidade aparente foi obtida pelo método do torrão parafinado, o qual provoca a impermeabilização do torrão com parafina fundida ou resina SARAN e mergulho em água ou outro líquido para aferição do volume da amostra (EMBRAPA, 1979). Devido à ausência de estruturas de algumas amostras arenosas na bacia do Monjolo Grande, foi necessária a obtenção da Ds pelo método da proveta (EMBRAPA, 1999). As análises de Ds foram realizadas pelo Laboratório de Física do Solo da Univ. Federal de Viçosa - MG.

Considerando que a escala de análise das parcelas experimentais é localizada, sua implantação priorizou atender variáveis representativas das condições das bacias. Para a determinação das áreas destinadas às parcelas, optou-se por:

- a. Áreas que atendam o maior número de parâmetros possível para que os resultados das parcelas experimentais sejam de representatividade e, portanto, passíveis de extrapolação;
- b. Áreas experimentais em classes de declividade e tipos de solos de maior ocorrência em cada bacia, considerando ainda, o material de origem, posição e forma da vertente, e uso da terra;
- c. Alocar as parcelas em solos distintos: solos de textura arenosa oriundos da formação Pirambóia na bacia do córrego Monjolo Grande, e de textura argilosa, originados da formação Corumbataí, na bacia do ribeirão Jacutinga;
- d. Avaliar o grau de proteção das coberturas vegetais pela alocação das parcelas com uso da terra por cana-de-açúcar, pastagem, solo exposto e vegetação ripária;
- e. Implantar as parcelas em locais de fácil acesso, devido ao monitoramento mensal, e com baixa probabilidade de riscos de pisoteio do entorno e dos pinos;

f. Alocar as parcelas em função da disponibilidade das propriedades rurais particulares, e autorização das usinas de açúcar e álcool arrendatárias, Raízen e Cosan.

Tendo em vista a representatividade das bacias, foram determinadas duas classes de declividade de maior ocorrência: de 3 + 8 e de 8 + 13%, totalizando 56% da bacia do ribeirão Jacutinga, e de 13 + 20 e de 20 + 45%, somando 64% da bacia do córrego do Monjolo Grande. Para cada uma das classes foram atribuídos diferentes tipos de uso da terra e forma de vertente para a avaliação da perda e deposição de sedimentos - Tabela 3 e Tabela 4, espacializadas conforme as Figura 15 e Figura 16.

Tabela 3. Esquema das parcelas experimentais na bacia do córrego do Jacutinga.

Área	Classe de declividade (%)	Forma da vertente	Uso da terra	Classe De Solo	Parcela
BH córrego Jacutinga	3 - 8	Côncava	Cana-de-açúcar	PVA	JC1
		Convexa	Cana-de-açúcar	PVA	JC4
		Retilínea	Pasto	PVA	JP3
		Retilínea	Solo Exposto	PVA	JSE
		Vale	Vegetação ripária	PVA	JM1
	8 - 20	Côncava	Cana-de-açúcar	PVA	JC2
		Convexa	Cana-de-açúcar	CX	JC3
		Convexa	Pasto	CX	JP1
		Côncava	Pasto	CX	JP2
		Vale	Vegetação ripária	CX	JM2

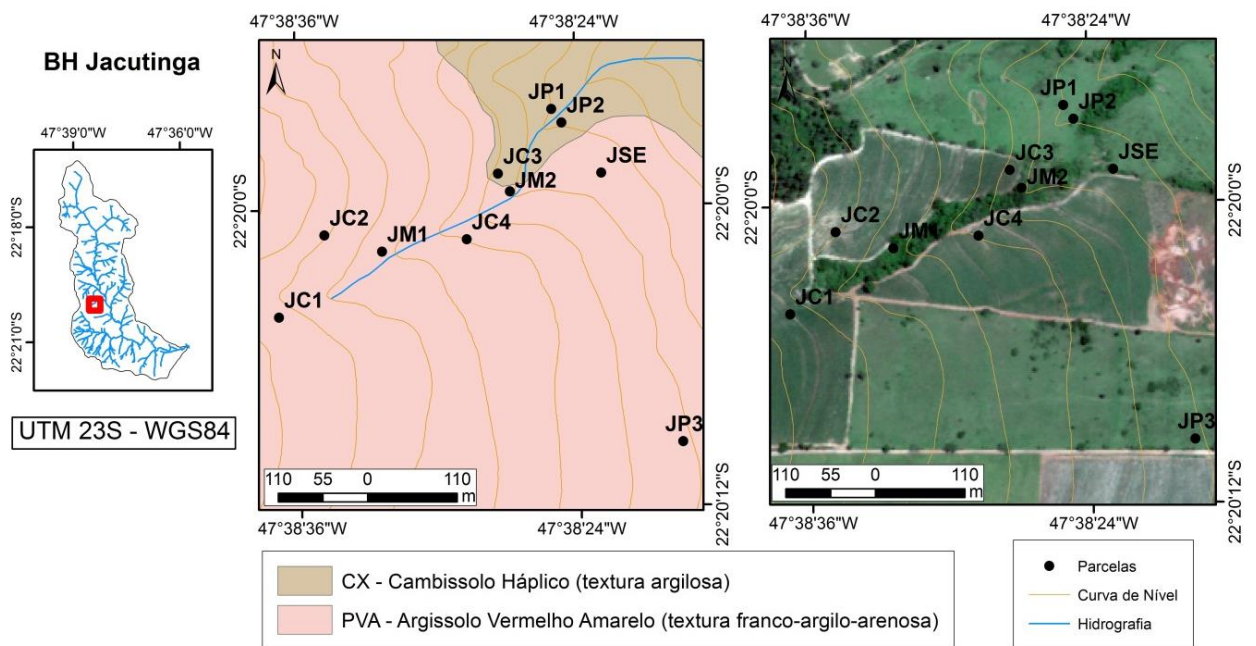


Figura 15. Localização das parcelas experimentais na bacia do ribeirão Jacutinga.

Tabela 4. Esquema das parcelas experimentais na bacia do ribeirão Monjolo Grande.

Área	Classe de declividade (%)	Forma da Vertente	Uso da terra	Classe De Solo	Nomenclatura
BH ribeirão Monjolo Grande	13 - 20	Côncava	Cana-de-açúcar	RQo	MC1
		Convexa	Cana-de-açúcar	RQo	MC4
		Côncava	Pasto	RQo	MP1
		Convexa	Pasto	PVA	MP2
		Vale	Solo Exposto	PVA	MSE
		Vale	Vegetação ripária	PVA	MM2
	20 - 45	Côncava	Cana-de-açúcar	PVA	MC3
		Convexa	Cana-de-açúcar	PVA	MC2
		Côncava	Pasto	RQo	MP3
		Convexa	Pasto	RQo	MP4
		Vale	Vegetação ripária	PVA	MM1

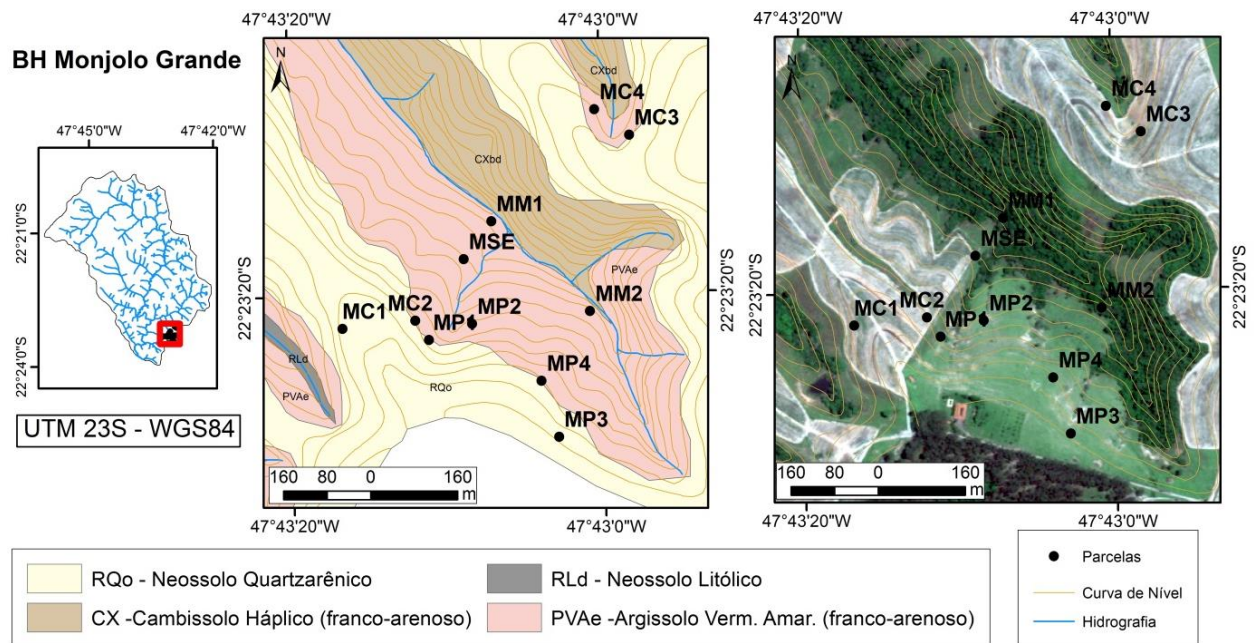


Figura 16. Localização das parcelas experimentais na bacia do córrego Monjolo Grande.

Devido à baixa frequência de ocorrência, não foram implantados experimentos em vertentes retilíneas na bacia do ribeirão Monjolo Grande. No que se refere à variabilidade do comprimento de rampa das parcelas experimentais, ressalta-se que, enquanto o cultivo de cana-de-açúcar encontrava-se predominantemente distribuído nas altas e médias vertentes, a cobertura por pastagem e solo exposto encontravam-se principalmente nas áreas de média e baixa vertente, e, portanto, estes últimos sofreram maiores contribuições, em termos de volume e velocidade, dos fluxos a montante.

Na bacia do ribeirão Jacutinga, as parcelas foram instaladas em maio de 2013 e monitoradas mensalmente, de julho de 2013 a agosto de 2014 para as parcelas em pastagem e em vegetação ripária, que somam total de precipitação de 1093,5 mm, e de julho de 2013 a

maio de 2014 para as parcelas de cana-de açúcar e solo exposto, com volume total de chuvas de 1068,5 mm. Na bacia do córrego do Monjolo Grande, as parcelas foram instaladas em junho e monitoradas mensalmente de agosto de 2013 a agosto de 2014 para as parcelas em pastagem e vegetação ripária, que somam total de precipitação de 855,4 mm, e de agosto de 2013 a junho de 2014 para as parcelas de cana-de-açúcar e solo exposto, com volume total de chuvas de 835,9 mm. As fotos abaixo demonstram as parcelas experimentais em diferentes tipos de uso da terra – Figura 17 a Figura 23.



Figura 17. Parcelas em cana-de-açúcar: (a) JC3 em estágio inicial; (b) JC4 intermediário.



Figura 18. Parcela em cana-de-açúcar: MC3 em estágio adulto.





Figura 19. Parcela experimental em pastagem: JP2.



Figura 20. Parcela experimental em pastagem: MP2.



Figura 21. Parcela experimental em solo exposto: JSE (carreador).



Figura 22. Parcela em vegetação ripária: JM1.



Figura 23. Parcela em vegetação ripária: MM1.

#### 4.1.5. Parâmetros da MEUPS

Desenvolvida a partir da EUPS, a MEUPS contempla os mesmos fatores com a substituição do fator R pelos fatores que abordam os processos hidrológicos (fator *runoff*). Conforme a abordagem de Williams (1975), o modelo pautou-se na busca de precisão da estimativa da perda de solo pela implementação do fator de energia dos fluxos superficiais. A formulação do modelo MEUPS, ajustada e apresentada por Lombardi Neto et al. (1994), é indicada na equação 14:

$$Y = [ 89,6 (Q.qp)^{0,56} ] \cdot K \cdot [0,00984 (L^{0,63} \cdot S^{1,18})] \cdot C.P \quad (14)$$

Em que: Y - fornecimento de sedimentos para uma determinada chuva (toneladas); Q - volume de escoamento superficial (m<sup>3</sup>); qp - vazão pico do escoamento superficial (m<sup>3</sup>/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). A obtenção dos parâmetros da MEUPS é descrita detalhadamente a seguir.

##### 4.1.5.1. Fator de erodibilidade do solos (fator K)

A erodibilidade se refere à capacidade de alguns solos serem mais erodíveis que outros em função de suas propriedades inerentes. Esta é influenciada por fatores como a velocidade da infiltração, permeabilidade, capacidade de armazenamento de água, resistência a forças de dispersão, salpico, abrasão, transporte e escoamento. Alguns tipos de solo tornam-se menos erodíveis pela diminuição da fração silte, independente do aumento respectivo na fração areia ou argila. O teor de matéria orgânica, relacionado à distribuição de tamanho das partículas, torna-se um indicador de erodibilidade. No entanto, a erodibilidade é função das complexas interações de um número significativo de propriedades físicas e químicas do solo, e que muitas vezes varia dentro de uma mesma classe textural padrão (WISCHMEIR e SMITH, 1978, p.8-9; BERTONI E LOMBARDI NETO, 2010, p.258-259).

Há diversos métodos de obtenção do fator K. A forma mais direta, utilizando parcelas experimentais em campo, é dada pelos trabalhos realizados por Wischmeir e Smith (1978), os quais resultaram na organização do nomograma, método mais utilizado, e que permite a estimativa indireta do valor de K de forma gráfica, a partir das propriedades do solo (textura, percentual de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade). No entanto, Laflen

(1982 apud LIMA, 2007) destaca um tempo mínimo dos experimentos de 5 anos, na busca de contemplar a variabilidade do fenômeno estudado. Para a obtenção do fator K de modo indireto destacam-se também os trabalhos de van der Knijff et al. (1999) e Denardin (1990) (LIMA et al. 2007).

Devido ao tempo demandado e custos consideráveis para a determinação direta do fator K, optou-se pelo método indireto. Trabalhos como o de van der Knijff (1999), por exemplo, tendem a uma certa simplificação dos parâmetros envolvidos, baseado apenas em classes texturais. Deste modo, foi utilizado o método proposto por Denardin (1990), tido como o menos impreciso para as estimativas de erodibilidade em solos brasileiros (SILVA et al., 1994; CORRECHEL, 2004), contemplado pela equação 15:

$$K = 0,00000748(M) + 0,00448059(P) - 0,06311750(DPM) + 0,01039567 (REL) \quad (15)$$

Sendo: K - erodibilidade estimada, em t.ha.h/ha.MJ.mm; M - novo silte x (novo silte + nova areia), sendo o *novo silte* a soma do fração areia muito fina (%) + fração silte (%) e a *nova areia* a soma das frações com diâmetros entre 2,0 e 0,1 mm; P - código da permeabilidade do solo; DMP - diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2 mm, expresso em mm; REL - multiplicação do teor de matéria orgânica (%) pelo teor da nova areia (%).

O índice de permeabilidade utilizado para cada classe textural, conforme a classificação de Carsel e Parrish (1988), é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Índices de permeabilidade (P) para cada classe textural de solo.

Classes texturais	P
Arenosa, Areia Franca, Franco Arenosa	2
Franco Argilo Arenosa, Franca, Franco Siltosa	3
Argilosa, Muito Argilosa, Franco Argilo Siltosa, Franco Argilosa, Argilo Arenosa, Siltosa	4
Argilo Siltosa	5

\* Os valores obtidos do fator K foram reclassificados conforme Mannigel et al. (2002): extremamente alto (> 0,0600 t.ha.h/ha.MJ.mm); muito alto (0,0450 † 0,0600 t.ha.h/ha.MJ.mm); alto (0,0300 † 0,0450 t.ha.h/ha.MJ.mm); médio (0,0150 † 0,0300 t.ha.h/ha.MJ.mm); baixo (0,0090 † 0,0150 t.ha.h/ha.MJ.mm) e muito baixo (< 0,0090 t.ha.h/ha.MJ.mm).

O cálculo da erodibilidade foi realizado por Corrêa et al. (2015). Os autores coletaram amostras de solo distribuídas em 14 pontos nas bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e córrego do Monjolo Grande. O número de amostras distribuído para cada classe de solo em cada área de estudo é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Distribuição do número de amostras por classe de solo em cada área de estudo, para o cálculo da erodibilidade.

Bacia hidrográfica	Classes de solo	Nº de amostras
Jacutinga	Argissolos Vermelho Amarelos	3
	Cambissolos Hápicos	3
	Neossolos Quartzarênicos	1
Monjolo Grande	Cambissolos Hápicos	3
	Neossolos Quartzarênicos	4

#### 4.1.5.2. Fator topográfico (fT)

O cálculo do fator topográfico – fT é estabelecido a partir dos fatores L (comprimento de rampa) e S (declividade). Tendo em vista o fator L como um dos principais gargalos de modelos preditivos de erosão hídrica, optou-se pela análise de dois métodos de obtenção do fator L para avaliação da MEUPS. O primeiro método é dado pela implementação do modelo em ambiente de SIG, onde o fator L é calculado automaticamente conforme Desmet e Govers (1996), em escala de análise de bacia hidrográfica. O segundo método refere-se à mensuração do comprimento de rampa linear, obtido manualmente a partir da identificação dos caminhos preferenciais do escoamento superficial na base cartográfica digital, em escala de análise de vertente.

Para a obtenção do fator L automático foi utilizado o algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996), o qual emprega o conceito de área de contribuição, contendo em sua formulação o fluxo acumulado para o cálculo automático do comprimento de vertente. Em ambiente de SIG, calcula-se para cada pixel a declividade, a direção dos fluxos e o acúmulo dos fluxos dos pixels à montante (SILVA, 2003). Conforme salientaram Jenson e Domingues (1988), na obtenção da direção do fluxo, verifica-se nos MDE a existência de uma célula com valores altimétricos inferiores aos das células adjacentes, formando depressões que se comportam como elemento de interrupção do fluxo. As depressões devem sofrer processos de preenchimento. Assim, aplicou-se no MDE a ferramenta *Fill*, da extensão *Hydrology* (ArcGis 10).

O mapa de Direção de Fluxo foi obtido, sendo este composto por oito direções distintas para cada célula (pixel) central: 1 (Leste), 2 (Sudeste), 4 (Sul), 8 (Sudoeste), 16 (Oeste), 32 (Noroeste), 64 (Norte) e 128 (Nordeste). Conforme Silva (2003), para a obtenção do parâmetro “Direção de Fluxo” (Xi,j) tornou-se necessária 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.

Posteriormente, com base no mapa de Direção de Fluxo, foi obtido o Mapa de Fluxo Acumulado, o qual define o número de células à montante que contribuem para uma determinada célula à 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 proposto por Desmet e Govers (1996). Ainda com base no MDE, foi obtido um mapa de declividade (%) e o mesmo reclassificado conforme os valores para a obtenção do parâmetro  $m$ : 0,5 se  $s \geq 5\%$  ( $s$  é o grau de declividade); 0,4 se  $3\% \leq s < 5\%$ ; 0,3 se  $1\% \leq s < 3\%$ ; 0,2 se  $s < 1\%$ .

Com a definição dos parâmetros provenientes da declividade, da direção de fluxo e da área de contribuição representada pelo fluxo acumulado para cada célula, e, utilizando o SIG ArcGis 10, foi obtido o fator L da MEUPS, conforme Desmet e Govers (1996) – equação 16:

$$L_{i,j} = \frac{[(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}]}{(D^{m+2}) * (x_{i,j}^m) * (22,13)^m} \quad (16)$$

Onde:  $L_{i,j}$  - fator de comprimento de vertente ( $i, j$ );  $A_{i,j-in}$  - área de contribuição de uma célula com coordenadas ( $i, j$ ), em  $m^2$ ;  $D$  - 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  $3\% \leq s < 5\%$ ; 0,3 se  $1\% \leq s < 3\%$ , 0,2 se  $s < 1\%$ .

Para a obtenção do fator L manual foi realizada a medição linear do comprimento de rampa apenas para as vertentes onde foram instaladas as parcelas experimentais. Com o apoio da base cartográfica digital, para cada parcela experimental foram traçados os caminhos preferências do escoamento superficial, seguindo o sentido do declive, com a realização de três amostragens (traçados) para a obtenção dos valores finais pelo cálculo de média simples.

Assim, tanto para o fator L automático quanto para o fator L manual, o  $fT$  foi calculado com base na equação 17, proposta por Bertoni e Lombardi Neto (2010):

$$fT = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18} \quad (17)$$

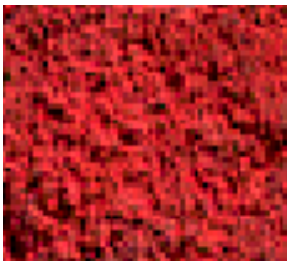
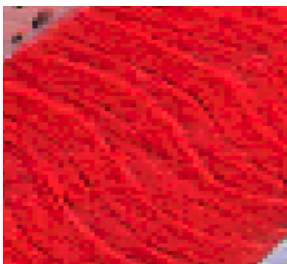
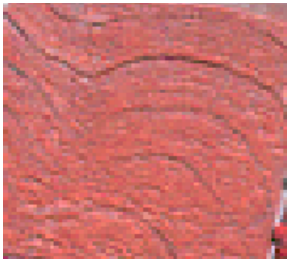
Onde:  $fT$  - fator topográfico (adimensional);  $L$  - comprimento de vertente (metros);  $S$  - fator declividade (%).

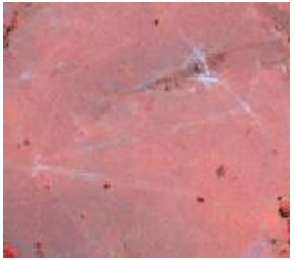


#### 4.1.5.3. Fator de cobertura e uso da terra (fator C)

Para a determinação do fator C, tornou-se necessário o mapeamento temático das áreas de estudo. Primeiramente optou-se pela indicação das classes temáticas e definição da terminologia empregada para cada uma das classes, conforme IBGE (2006), visando facilitar a segunda etapa do mapeamento, o procedimento de fotointerpretação visual.

Para proceder com as técnicas de fotointerpretação visual das classes temáticas foram utilizadas técnicas indicadas pelos autores Ricci e Petri (1965) e Anderson (1982). Utilizou-se elementos de reconhecimento básicos para leitura e interpretação de alvos em produtos de sensoriamento remoto: tonalidade/cor, forma e tamanho, padrão, textura, associação e sombra. No intuito de ajudar na redução da subjetividade da interpretação dos alvos, foram estabelecidos, juntamente com as classes temáticas e a definição das mesmas, os elementos básicos da fotointerpretação visual (Tabela 7).

Tabela 7. Classes temáticas, definição e descrição dos elementos de fotointerpretação.

Classe	Feição	Definição (IBGE, 2006)	Elementos de fotointerpretação
<b>Vegetação Arbórea e ripária (Áreas de vegetação natural)</b>		Cobertura arbórea/arbustiva de diferentes densidades, incluindo remanescentes primários e estágios de recomposição florestal, mata ciliares e matas de encosta (3 a 20 m).	Alvos em tonalidade escura, forma irregular, alta rugosidade, cobertura heterogênea, altura significativa (devido ao sombreamento) e associada à proximidade a cursos d'água.
<b>Reflorestamento</b>		Formação de maciços com espécies florestais nativas ou exóticas. Visa-se enriquecimento e/ou recuperação de florestas, podendo ser fornecedora de matéria-prima (pinus e eucalipto).	Alvos em tonalidade média a escura, forma regular a geométrica (associada a cultivo antrópico), rugosidade de média a alta, cobertura homogênea, altura significativa (devido a sombreamento) .
<b>Cana-de-açúcar</b>		Cultura semi-perene de média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, e que após a produção (corte), deixa o terreno livre pra um novo plantio.	Alvos em tonalidade média, forma regular a geométrica (associada à cultivo antrópico), rugosidade baixa, cobertura homogênea, altura baixa a média (devido a sombreamento).

<b>Pastagem</b>		Formação de forragens perenes, onde o solo está coberto por vegetação de gramíneas a leguminosas, cuja altura pode variar de decímetros a alguns metros.	Alvos em tonalidade clara a média, formas irregulares e regulares (associadas a pecuária e plantio), rugosidade média, altura de baixa a média, cobertura homogênea para pastagens manejadas, e heterogêneas, para pastagem degradada.
<b>Solo exposto</b>		Ausência de cobertura vegetal, exceto para áreas descobertas devido ao ciclo de replantio de culturas temporários ou semi-perenes.	Alvos em tonalidade clara a média (associado aos componentes minerais do solo, como refletância maior nas areias e menor nas argilas), textura suave, forma variada, com predomínio de padrão linear associado a estradas, carreadores e manejo.
<b>Corpos d'água</b>		Cursos de água naturais, lagos e reservatórios.	Tonalidade escura a muito escura, textura suave a lisa, associada a proximidade à vegetação ripária.

O mapeamento temático das áreas de estudo foi realizado a partir da imagem orbital IKONOS (sensores PAN e MS), com passagem na data de 01/08/2013, georreferenciadas. Como trata-se de áreas predominantemente rurais, com alvos associados a coberturas vegetais, optou-se pela composição 3R4G2B: banda 3 – vermelho, associada à cor vermelha; banda 4 - infravermelho próximo, associada à cor verde; e banda 2 – verde, associada à cor azul. O mapeamento temático foi realizado manualmente em meio digital, no ambiente de SIG ArcGis v.10, e elaborado por Couto Jr. (2013).

A partir do estabelecimento das classes temáticas, foram atribuídos os valores do fator C, conforme Donzeli et al.(1992), organizados na Tabela 8.

Tabela 8. Classes temáticas, definição e descrição dos elementos de fotointerpretação.

<b>Classes temáticas</b>	<b>Fator C</b>
Vegetação arbórea e ripária	0,00004
Reflorestamento	0,0001
Cana-de-açúcar (manejo incorporando palha)	0,0500
Pastagem	0,0100
Solo exposto	1

Fonte: Donzeli et al. (1992, p.108). Organizado por: o autor.

#### 4.1.5.4. Fator de práticas conservacionistas (fator P)

O fator P é dado é dado pela relação entre a intensidade de perdas com determinada prática conservacionista e quando a cultura está plantada no sentido de declive (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010, p.266). A melhoria das práticas de manejo, rotações de culturas, tratamentos de fertilidade, e maiores quantidades de resíduos de plantio contribuem significativamente para o controle da erosão, e frequentemente fornecem maior controle no campo. Deste modo, estas práticas são consideradas nos parâmetros de cultivos e de conservação, incluídos no fator C (WISCHIMEIER e SMITH, 1978).

A declividade é tida como fator limitante a práticas de conservação de solo, e como parâmetro base de P. Para sua obtenção, optou-se pela utilização do modelo desenvolvido por Wishmeier e Smith (1978) e ajustado por Bertoni e Lombardi Neto (1990), conforme apresentada pela equação 18.

$$P = 0.69947 - 0.08991 * S + 0.01184 * S^2 - 0.000335 * S^3 \quad (18)$$

Optou-se pelas propostas metodológicas de EMBRAPA (1999), para a definição dos intervalos das classes de declividade. Ramalho e Beek (1995, p.31-33) estabeleceram graus de limitação de suscetibilidade à erosão baseados na declividade, e por conseguinte, com limitação ao desenvolvimento de culturas agrícolas. Tal metodologia encontra-se detalhada por Pereira (2010, p.59-60), com uma reclassificação das classes e atribuição do valor do fator P, conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Classes de declividade e valores obtidos para P.

Classes de declividade (%)		Classes de relevo (EMBRAPA, 1999)	Grau de limitação por suscetibilidade à erosão (RAMALHO E BEEK, 1995)	Fator P (PEREIRA, 2010)
0 -	3	Plano	Nulo (N)	0,24
3 -	8	Suave ondulado	Ligeiro (L)	0,27
8 -	13	Ondulado	Moderado (M)	0,51
13 -	20		Forte (F)	0,57
20 -	45	Forte ondulado	Muito Forte (MF)	0,62
45 -	100	Montanhoso	Extremamente forte (EF)	0,67
>	100	Escarpado		0,80



#### 4.1.5.5. Fator de escoamento superficial direto (*runoff*)

De acordo com o trabalho de Williams (1975) a precisão da previsão da EUPS foi aumentada pela substituição do fator R pelo fator *runoff*. Para estimar a produção de sedimentos a longo prazo pode-se calcular a frequência das taxas de sedimentos utilizando a MEUPS. A frequência de eventos de escoamento superficial de ocorrência individual pode ser obtida a partir de medição direta ou calculada com modelos matemáticos, partindo-se do conceito de eventos extremos de baixa frequência como fator significativo para o processo erosivo e produção de sedimentos (WILLIAMS, 1974, p.106).

O fator *runoff* contempla o impacto antrópico na produção de sedimentos, expressa pelo uso da terra, manejo de cultivos e práticas de controle de erosão através fator C. Indiretamente, a equação para a determinação dos valores de *runoff* inclui informações de extensão da vertente e declividade. De acordo com Williams (1975) e Donzeli et al. (1994), pode-se determinar o fator *runoff* pela equação 2.

O cálculo para a obtenção do fator Q, é dado pelo método de abstração (SCS, 1973), indicado em Williams (1975), Chaves (1991) e Lombardi Neto et al. (1994), por meio da equação 19.

$$Q_{i,j} = \frac{(P - 0,2 Sa)^2}{(P + 0,08 Sa)} \quad (19)$$

Em que:  $Q_{i,j}$  - volume do escoamento superficial em uma célula com coordenadas (i, j), para um determinado evento chuvoso ( $m^3$ ); P - quantidade máxima do volume de precipitação (mm); Sa - parâmetro de retenção da água no solo pelas características de superfície do terreno.

Ressalta-se que para a simulação das perdas de solo por evento de chuva, P é substituído diretamente pela quantidade de precipitação máxima num determinado período de tempo, conforme Williams (1975). No entanto, a MEUPS não foi elaborada para a realização de simulações de perdas médias em um ano. Neste sentido, Williams [1986?<sup>7</sup>] descreve esta limitação e revisa por meio de dados empíricos o fator *runoff*, sugerindo a aquisição das perdas médias anuais pela substituição de P para o total anual das precipitações, com ajuste pela calibração do tempo de concentração médio representativo para a bacia hidrográfica de interesse.

---

<sup>7</sup> Data provável da publicação.

O parâmetro Sa é determinado em função da relação entre: (a) classes/tipos de solo, uso da terra e manejo e declividade; e (b) tempo, em função do conteúdo de água no solo; é derivado o índice número da curva ou curva número (CN). O SCS, atualmente *National Resource Conservation Service* – NRCS, do USDA, sugeriu em 1972 um modelo empírico para estimar a chuva excedente com base no potencial de absorção de umidade do solo. Foi estabelecida uma relação empírica que relaciona a capacidade de armazenamento das precipitações na bacia a um índice denominado CN (CANHOLI, 2005). A estimativa da CN baseia-se em características do tipo de solo, uso da terra e grau inicial de saturação do solo. Sob as mesmas condições de precipitação, baixos valores de CN indicam que a superfície tem um alto potencial de retenção de água, enquanto valores de CN mais altos indicam potencial de retenção mais baixo. Assim, os valores de CN variam de 0 a 100, correspondendo respectivamente de uma cobertura permeável, até uma cobertura totalmente impermeável (SCHAFER et al., 2011).

Para a determinação do CN nas áreas de estudo, buscou-se relacionar as classes de solo aos grupos hidrológicos de solo correspondente pelo método do SCS (1986). Os grupos hidrológicos A, B, C e D são determinados a partir das propriedades do solo, como saturação hidráulica, condutividade hidráulica, e profundidade das camadas impermeáveis e do lençol freático. No presente estudo, a textura dos solos foi o parâmetro utilizado para a classificação dos grupos hidrológicos. Com base em SCS (2007), os parâmetros de classificação segundo a textura e correspondência das classes de solo das bacias são descritos na Tabela 10.

Tabela 10. Grupos hidrológicos de solo (SCS, 2007) e correspondência com classe de solo.

<b>Grupos hidrológicos (SCS, 2007)</b>		<b>Classe de solo</b>
<b>A</b>	Solos com teor de argila menor que 10% e mais que 90% de areia, baixo potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos, e a água transita no perfil livremente. Não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m.	RQ RY
<b>B</b>	Solos com teor de argila entre 10 e 20% e de 50 a 90% de areia, baixo a moderado potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos, e não há impedimento de água nas camadas do solo. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m.	LVA
<b>C</b>	Solos com teor de argila entre 20 e 40% e menos que 50% de areia, de moderado a alto potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos, e a percolação da água no perfil é restrita. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.	PVA

<b>D</b>	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 ou muito restrita. Camada densificada a uns 50 cm de profundidade ou com camada quase impermeável, por argila ou contato lítico, ou horizonte de seixos rolados.	CX RL
----------	--	----------

Uma vez estabelecida a correspondência entre os grupos hidrológicos e as unidades pedológicas, foram obtidos os valores da CN para diferentes tipos de uso da terra e cobertura de superfície para áreas rurais, conforme SCS (2004), indicados na Tabela 11.

Tabela 11. Valores da Curva-Número (CN) para diferentes usos da terra e grupos hidrológicos de solo\*.

<b>Classes de uso da terra e cobertura vegetal</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Vegetação arbórea e ripária (boas condições)	30	55	70	77
Reflorestamento (vegetação 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). Adaptado por: o autor.

Para a espacialização dos valores da CN, procedeu-se com a intersecção entre as classes de uso da terra e unidades pedológicas, para atribuição dos valores de cada tipo e respectivos grupos hidrológicos. No ArcGis v.10.1, foi utilizado o módulo *Geoprocessing*, ferramenta *Intersect*. Posteriormente, atribuíram-se os valores da CN para cada novo atributo gerado pela intersecção.

A seguir, o cálculo para determinação dos valores de retenção de água pelas características de superfície do terreno ( $S_a$ ), obtido para cada pixel, é descrito pela equação 20:

$$S_a = 254 (100/CN - 1) \quad (20)$$

Por fim, para a determinação da vazão pico ( $q_p$ ), a qual representa a vazão máxima que ocorre com um dado evento chuvoso e configura-se como um indicador da força erosiva das chuvas intensas, utilizou-se o modelo matemático elaborado pelo SCS (1973) com a seguinte formulação (21):

$$q_p = 0,0028 * A * (Q / T_c) \quad (21)$$

Em que:  $q_p$  - vazão de pico derivada de um hidrograma triangular hipotético ( $m^3/s$ );  $Q$  -

volume do escoamento superficial ( $m^3$ ); A - área da bacia hidrográfica (ha) - (considerou-se a área do pixel); Tc - tempo de concentração da bacia (h).

O Tc para uma determinada bacia hidrográfica pode ser definido como o tempo do percurso da água, desde o ponto mais afastado da bacia até o exutório, a partir do início da precipitação (CANHOLI, 2005, p. 94). Como neste caso o Tc é dado pixel a pixel, o tempo do percurso da água é calculado da parte superior de cada pixel até chegar à saída deste mesmo pixel e começar a contribuir para o pixel seguinte. Para a sua determinação optou pelo método descrito por Genovez (1993), que contempla a extensão da vertente (L) para a determinação do tempo do percurso da água, relacionado à declividade (S) e ao grau de permeabilidade da cobertura de superfície (CN), descrito pela seguinte equação (22):

$$T_c = \frac{L^{0,8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7}}{1900 * S} \quad (22)$$

Os procedimentos relativos à estruturação e implementação da MEUPS foram esquematizados pelo fluxograma da Figura 24.

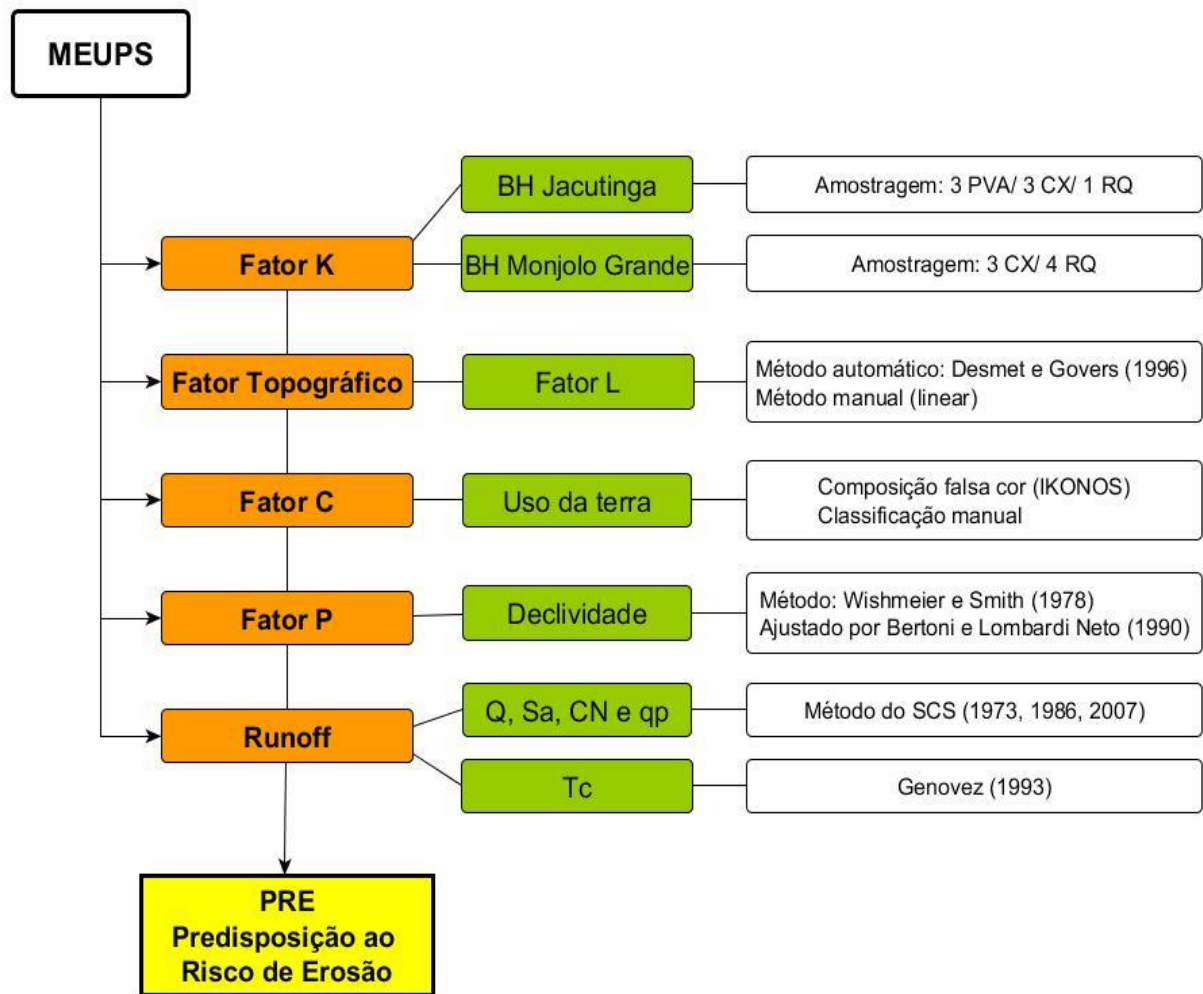


Figura 24. Fluxograma dos procedimentos relativos a estruturação e implementação da MEUPS.

#### 4.1.6. WEPP e GeoWEPP

Para a realização das simulações do modelo WEPP foram utilizados o *módulo bacia* e o *módulo vertente*. Para o *módulo bacia*, optou-se pela utilização da ferramenta de extensão GeoWEPP, interface do WEPP em SIG e integrada ao ArcGis v.10.1 (RENSCHLER, 2002), desenvolvida pelo Dpto. de Geografia da Universidade de Buffalo/NY. Para o *módulo vertente*, utilizou-se o WEPP para Windows. Para os dois módulos, foi necessária a estruturação de um banco de dados nas extensões do WEPP. Em termos gerais, o banco de dados segmentou-se em 4 grupos: a. Climático, b. Solos, c. Uso da terra e manejo e d. Topográfico.

Os parâmetros climáticos foram estruturados a partir do gerador climático CLIGEN integrado à interface WEPP. Tendo como referência o ano experimental, os dados

meteorológicos utilizados foram médias diárias de precipitação, temperaturas máximas e mínimas, e médias mensais de radiação solar e ponto de orvalho. A partir destes parâmetros, o banco de dados foi complementado com probabilidade de dias de chuva seguido de dias com chuva e sem chuva, gerando arquivos climáticos de extensões *.cli* e *.par*.

Para a estruturação do banco de dados de solos, utilizaram-se os resultados das análises físico-química de modo que cada classe de solo, para cada uma das bacias, fosse composta de um arquivo de caracterização com extensão *.sol*. Foram utilizados os dados de granulometria, matéria orgânica e CTC para cada um dos horizontes, condutividade hidráulica efetiva, erodibilidade entresulco e umidade antecedente (estimada entre 10 e 25% em função das umidades obtidas nas amostras de TFSA). Devido a dificuldades de obtenção de alguns parâmetros *in loco*, a erodibilidade em sulco e tensão crítica de cisalhamento foram estimadas baseadas no extenso banco de dados do WEPP, em unidades de solo de características semelhantes.

O banco de dados de uso da terra e práticas de manejo – arquivos de extensão *.rot*, mostrou-se mais complexo quanto a estruturação e implementação, principalmente em função dos numerosos parâmetros, dos estágios fenológicos dos cultivos, e variação sazonal da vegetação (densidade, percentual de cobertura e biomassa).

Por meio de aquisição de dados em campo e uso de imagens de satélite, os parâmetros obtidos para as áreas de estudo foram: percentual de cobertura vegetal, percentual de cobertura seca, Índice de Área Foliar – IAF como indicador de biomassa, grau de senescência, densidade aparente do solo, declividade média do terreno e espaçamento médio das linhas de plantio para cultivos de cana-de-açúcar. Para estimativa dos parâmetros não obtidos em campo, utilizou-se o banco de dados pré-definido do WEPP. Para as classes de coberturas vegetais semelhantes às encontradas neste banco de dados, atribuiu-se valores dos seguintes parâmetros: diâmetro do caule, dossel, crescimento das raízes e rugosidade superficial.

Para a obtenção das proporções de cobertura vegetal, cobertura seca e residual foi realizada a aquisição amostral de fotografias verticais, especialmente para as áreas de cana-de-açúcar e de pastagem. Definiu-se os Cenários 1 e 2, referente à tomada de cena em 23/10/2013 e 21/05/2014, respectivamente. As fotografias digitais foram obtidas em Nadir, tendo como referência um quadrante de 1 m<sup>2</sup> e uma distância aproximada de 2 m da superfície, como pode ser visto na Figura 25. As fotos das bacias do Jacutinga e Monjolo Grande são apresentadas respectivamente nas Figura 26 e Figura 27, sendo o Cenário 1: (a) e

(e) para cana-de-açúcar e (c) e (g) para pastagem, e Cenário 2: (b) e (f) para cana-de-açúcar, e (d) e (h) para pastagem. Para a cana-de-açúcar adulta de altura entre 2 e 2,5 m, foram feitas fotos com distância de 2 m do dossel. A proporção de cobertura vegetal e seca foi dada em SIG por meio de classificação supervisionada das fotografias, realizada por Corrêa (2015).



Figura 25. Aquisição de fotos do solo em Nadir, a uma distância de 2 m, e tendo como referência um quadrante de 1 m<sup>2</sup>, para obtenção do percentual de cobertura vegetal (Fonte: Edvania Ap. Corrêa).



Figura 26. Fotos da bacia do ribeirão Jacutinga, adquiridas conforme o método mostrado na Figura 25.



Figura 27. Fotos da bacia do córrego Monjolo Grande, adquiridas conforme o método mostrado na Figura 25.

Para a estimativa do IAF das classes de cana-de-açúcar, pastagem, vegetação ripária e reflorestamento, foram utilizadas imagens dos sensores MS/PAN (multiespectrais e pancromáticos) do satélite IKONOS em 06/10/2013 para a caracterização do Cenário 1, e do satélite GeoEye de 23/04/2014 para a caracterização do Cenário 2. As imagens foram tratadas a partir de procedimentos de pré-processamento, correção radiométrica e geométrica, e mosaicagem, realizadas na interface do ENVI v.5.0 por Corrêa (2015).

Conforme Jensen (2011, p.388-391), o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada), desenvolvido por Rouse et al. (1974), é altamente correlacionado ao IAF. O NDVI é amplamente utilizado, pois permite análise das variações sazonais e interanuais da vegetação, como padrões fenológicos e de biomassa. No entanto, o autor ressalta que durante períodos máximos de IAF a correlação pode não ser tão forte, em função da saturação do NDVI. O NDVI poderia ter menor variação em alta biomassa, como florestas, e ter maior variação em áreas de pastagens, ocorrendo o inverso para a razão simples. Além disso, o NDVI é bastante sensível à interferência do substrato sob o dossel, sendo seus valores mais altos em solos mais escuros.

A princípio, testou-se o método de obtenção do IAF pelo SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index* – Índice de Vegetação Ajustada ao Solo, elaborado por Huete (1988)), conforme proposto por Allen et al. (2002). No entanto, os resultados obtidos não foram coerentes com valores referidos pela bibliografia, além de que a variação da resposta espectral dos solos poderia interferir na maior variabilidade entre os IAF das bacias. Assim, para a extração do IAF, foram obtidos o NDVI – equação 23 – das imagens, e o IAF conforme método ajustado por Xavier e Vetorazzi (2004) – equação 24. Por meio do ENVI 5.0, obteve-se os IAF para as classes de cobertura vegetal e uso da terra, e definidos valores amostrais representativos a partir de regiões de interesse (*Regions of Interest* - ROI).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} \quad (23)$$

$$\text{IAF} = 4,546 \text{NDVI}^{3,496} \quad (24)$$

Assim, enquanto que para as classes de uso da terra pastagem, vegetação arbórea e ripária, e reflorestamento foram atribuídos dois cenários para a caracterização da cobertura de superfície, o solo exposto caracterizou-se pela ausência de cobertura vegetal e residual ao



longo do período experimental. E, para a caracterização do cultivo de cana-de-açúcar, foram estabelecidos 6 estágios:

- Condições iniciais: caracterização pós-colheita em função do 3º ciclo de “cana soca” na bacia do Jacutinga e solo limpo para o primeiro plantio na bacia do Monjolo Grande; densidade do solo, percentual de cobertura e dossel;
  - Início do plantio em nível: definição de declividade média e espaçamento médio das linhas de plantio;
  - Cobertura inicial: percentual de resíduo e de área manejada, e rugosidade superficial, sendo plantio direto com resíduo de palha na bacia do Jacutinga e plantio convencional sem resíduo de palha na bacia do Monjolo Grande;
  - Cenário 1 - primeiro semestre de cultivo: características de percentual de cobertura vegetal e seca, IAF, biomassa, dossel, crescimento de raízes e grau de senescência;
  - Cenário 2 - segundo semestre de cultivo: caracterizando alteração do Cenário 1;
- Operações de colheita: número de dias e caracterização do tipo do manejo e colheita.

Por fim, a caracterização dos parâmetros topográficos no *módulo bacia hidrográfica* foi compilado em ambiente de SIG pela GeoWEPP utilizando o MDE. Neste módulo, o projeto é definido por três arquivos *raster*: 1. MDE; 2. Solo: determinam-se as classes pedológicas e pela conexão com arquivos gerados de extensão *.sol* atribuem-se as características dos solos; e 3. Uso da terra: determinam-se as classes e atribuem-se características pela conexão com os arquivos gerados de extensão *.rot*. Nesta etapa, a lógica do geoprocessamento é dada pela geração de sub-bacias, sendo que cada sub-bacia é composta por determinado número de encostas/vertentes. Assim, no processo de compilação dada vertente a vertente, ocorrem generalizações, ou seja, mesmo com a ocorrência de mais de uma classe de solo e/ou uso, haverá a simulação apenas das classes predominantes na vertente.

Para a definição da melhor resolução espacial do projeto do GeoWEPP, foram realizados diversos testes buscando otimizar o nível de detalhamento de dados. Foram testados projetos em resoluções espaciais de 3x3 m, 5x5 m, 10 x 10 m, 15 x 15 m, e 30x30 m. Optou-se pela resolução de 30x30 m, pois foi a única que contemplou toda a área da bacia, incluindo a simulação do canal principal. Esta resolução espacial satisfaz perfeitamente as escalas das bases cartográficas disponíveis e condiz com as resoluções das imagens orbitais e SRTM.

Para a aquisição das características topográficas no *módulo vertente* foi utilizado o software do WEPP para a elaboração de um modelo de vertente para cada uma das parcelas experimentais. Cada modelo foi segmentado de modo a compor um conjunto de setores com atribuição de características específicas, contemplando as variações de sua extensão, e proporcionando maior nível de detalhamento. Com o apoio do ArcGis 10.1, foram obtidos os parâmetros relativos ao comprimento de rampa (método linear), a declividade (%) e a forma da vertente. Neste módulo, as características topográficas compõem a camada *Slope*, e integra o banco de dados de clima, solo, e condições de uso e manejo, dado pelas camadas *Climate*, *Soil* e *Manager*, respectivamente.

Os procedimentos relativos a estruturação e implementação do WEPP e GeoWEPP foram esquematizadas conforme o fluxograma da Figura 28.

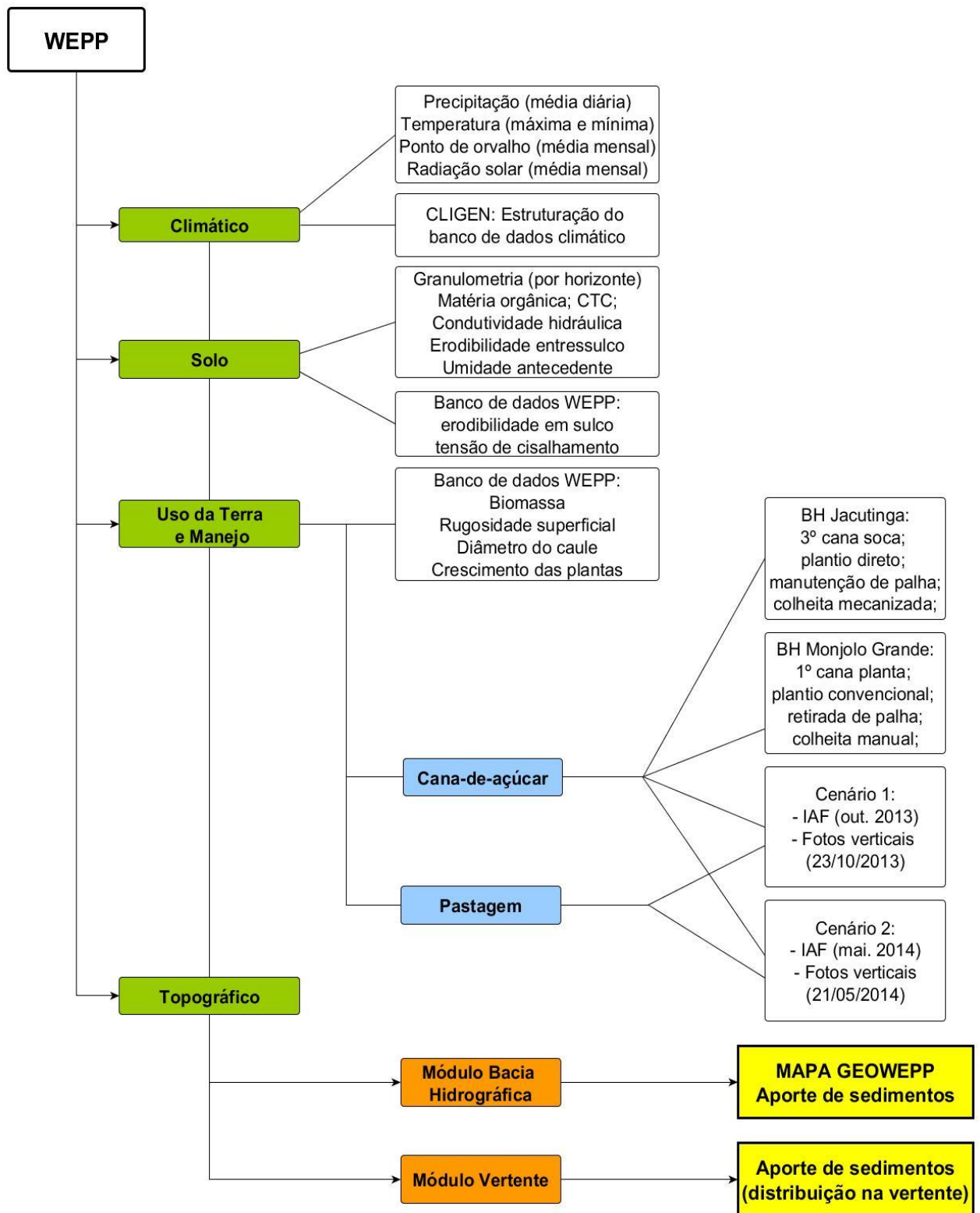


Figura 28. Fluxograma dos procedimentos relativos a estruturação e implementação do WEPP e GeoWEPP.

## **4.2. Segmento de integração**

### **4.2.1. Comportamento erosivo do período experimental**

Em escala de análise de bacia hidrográfica, tendo em vista as simulações para todo o ano experimental, os resultados das modelagens são apresentados em mapas temáticos de síntese, representando:

- MEUPS - mapa de Predisposição ao Risco de Erosão (PRE) representando perda de solo ( $\text{ton/ha.ano}^{-1}$ );
- GeoWEPP – mapa de perdas e deposição do WEPP em SIG ( $\text{ton/ha.ano}^{-1}$ ).

Em escala de análise de vertente, buscou-se avaliar os modelos MEUPS e WEPP pela comparação dos resultados estimados com os valores obtidos pelas parcelas experimentais de pinos de erosão. Num primeiro momento, a análise dos modelos é dada pela comparação dos resultados do mesmo modelo por diferentes métodos:

- MEUPS (SIG) x MEUPS (Manual) x Pinos;
- GeoWEPP (SIG) x WEPP (Vertente) x Pinos.

Em um segundo momento, utilizando os métodos que obtiveram os melhores resultados, realizou-se a análise pela comparação entre modelos e os resultados dos experimentos de campo: MEUPS x WEPP x Pinos.

### **4.2.2. Comportamento erosivo em eventos específicos de chuva**

Foram avaliados diversos eventos de chuva específicos, tendo em vista parâmetros de precipitação (mm), duração (h), intensidade (mm/h) e pico (%), conforme a Tabela 12.

Tabela 12. Eventos de chuva levantados e simulados.

BH	Eventos levantados	Eventos simulados	Data	Precipitação (mm)	Duração (h)	Intensidade (mm/h)	Pico (%)
<b>Jacutinga</b> (Estação meteor. Ceapla)	A	<b>Evento1</b>	<b>17/11/2013</b>	<b>125,8</b>	<b>01:50</b>	<b>70,16</b>	<b>20</b>
	B		04/01/2014	24,4	00:30	48,8	50
	C		23/02/14	7	00:20	21	50
	D	<b>Evento2</b>	<b>01/03/2014</b>	<b>29,8</b>	<b>03:30</b>	<b>8,5</b>	<b>25</b>
	E		22/04/2014	22,4	02:30	9	50
	F		23/05/2014	37,8	12:10	3,56	10
<b>Monjolo Grande</b> (Estação Meteor. Monjolo)	A*		17/11/2013	125,8	01:50	70,16	20
	B	<b>Evento1</b>	<b>04/01/2014</b>	<b>90,8</b>	<b>01:35</b>	<b>57,37</b>	<b>35</b>
	C		16/02/2014	60	19:30	3,07	50
	D		27/02/2014	6,8	00:15	27,2	50
	E	<b>Evento2</b>	<b>01/03/2014</b>	<b>28,6</b>	<b>02:10</b>	<b>13,3</b>	<b>20</b>
	F*		22/04/2014	22,4	02:30	9	50
	G*		23/05/2014	37,8	12:10	3,56	10

\* Uso de dados da estação CEAPLA, devido à ausência de registros a cada 5 ou 10 minutos da estação Monjolo.

Tendo em vista a comparação das bacias hidrográficas optou-se pela simulação de dois eventos por bacia hidrográfica, sendo o Evento 1 de maior intensidade, superior a 57 mm/h, e o Evento 2 de intensidade inferior a 14 mm/h. Nesta etapa, foram avaliados os modelos WEPP (vertente), MEUPS (SIG) e MEUPS (manual).

A comparação dos modelos com os valores obtidos pelos experimentos foi dada pelos registros mensais dos pinos de erosão. Para a bacia do ribeirão Jacutinga:

- Evento 1 – registro de 12/12/2013 (intervalo de 12/11 a 12/12/2013);
- Evento 2 – registro de 13/03/2014 (intervalo de 13/02 a 13/03/2013).

Para a bacia do Monjolo Grande:

- Evento 1 - registro de 14/01/2014 (intervalo de 10/12/2013 a 14/01/2014);
- Evento 2 – registro de 13/03/2014 (intervalo de 13/02 a 13/03/2014).

#### 4.2.3. Análise estatística

O desempenho dos modelos é comumente avaliado por meio de medidas estatísticas. A validação estatística foi realizada comparando-se os resultados estimados pelos modelos e os valores obtidos pelas parcelas experimentais de pinos de erosão, por meio de três coeficientes, o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), o Coeficiente de Determinação de Pearson ( $PR^2$ ) e o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE).

O  $R^2$  é um índice qualitativo do ajuste de um modelo estatístico linear. Os valores variam de 0 a 1, sendo próximo a 1 o melhor ajustamento do modelo aos dados. O  $PR^2$  mede a associação linear entre duas variáveis, variando de -1 (associação perfeita inversa) a 1 (associação perfeita), dado pela equação 25.

$$PR^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (25)$$

Em que:  $x_i$  - valores observados;  $x_m$  - média desses valores;  $y_i$  - valores calculados pelo modelo;  $y_m$  - média; e  $n$  - número de eventos.

Um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos, hidrossedimentológicos e de produção de sedimentos é o COE (Nash e Sutcliffe, 1970), conforme ASCE (1993). É também recomendado por Moriasi et al. (2007) em seu guia sobre a sistemática de quantificação da acurácia das simulações em processos em solo e água, além das referências de Machado e Vettorazzi (2003), Silva et al. (2011), Amorim et al. (2010) e Baltokolski et al. (2010). O COE é calculado por meio da equação 26.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \overline{E_s})^2} \quad (26)$$

Em que:  $E_m$  - evento observado;  $E_s$  - evento simulado pelo modelo;  $\overline{E_s}$  - média do evento observado no período de simulação; e  $n$  - o número de eventos. O COE pode variar entre negativo infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste (ASCE, 1993).

Moriasi et al. (2007) determinam quatro classes de avaliação do desempenho dos modelos: a. Muito boa, com COE entre 0,75 e 1; b. Boa: com COE entre 0,65 e 0,75; c. Satisfatória: com COE entre 0,5 e 0,65; e d. Insatisfatória: COE inferior a 0,5. Silva et al. (2011) complementam que o desempenho do modelo é considerado bom quando o valor de COE e  $R^2$  são superiores a 0,75, aceitável entre 0,36 e 0,75, e inaceitável quando inferior a 0,36. Do mesmo modo, Krysanova et al. (1998) elucida que valores entre 0,7 a 0,8 indicam bom ajuste.

Assim, o segmento de integração encontra-se esquematizado pelo fluxograma da Figura 29.

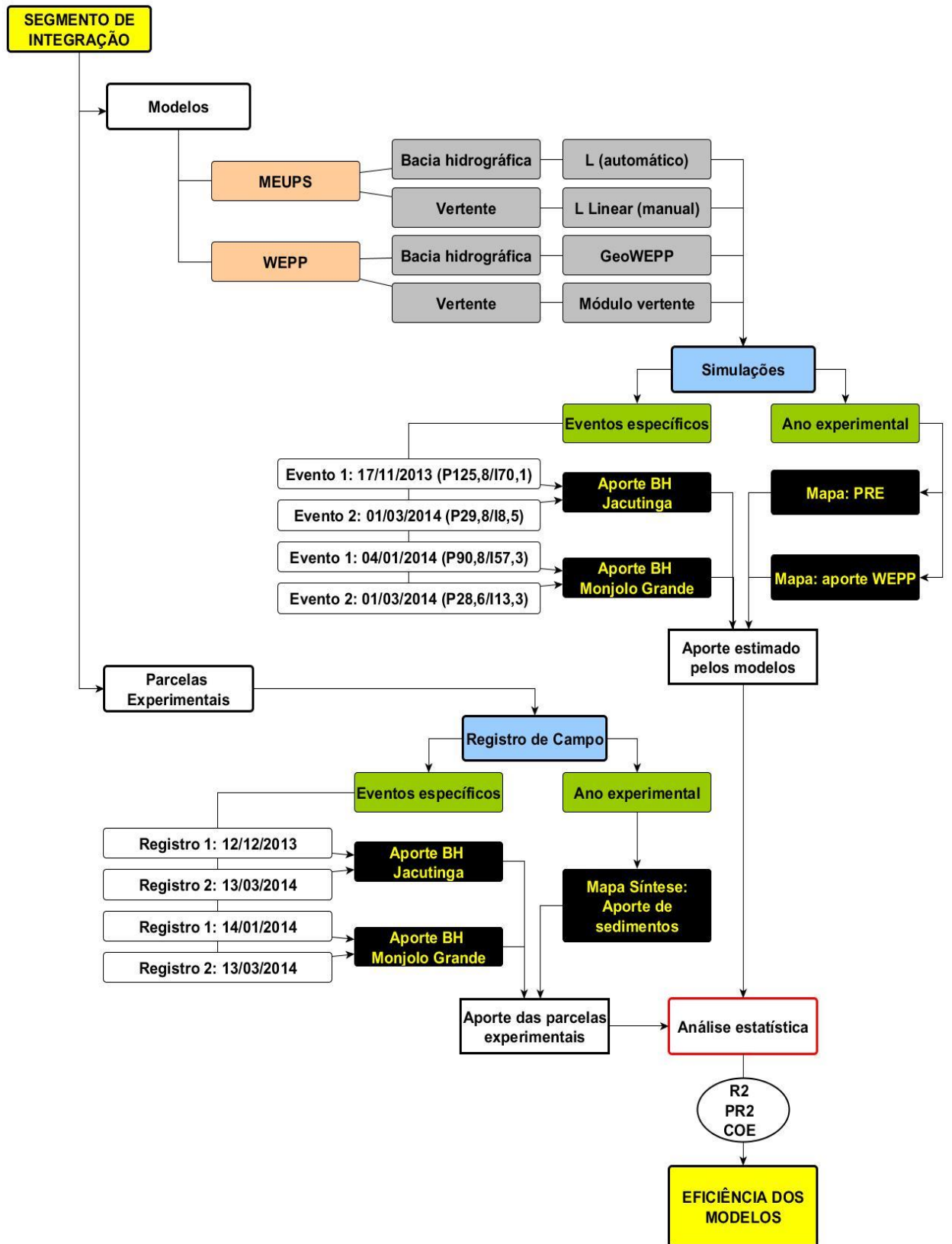


Figura 29. Fluxograma do segmento de integração da pesquisa.

#### 4.2.4. Síntese do aporte de sedimentos

Os registros obtidos pelas parcelas experimentais contemplaram diversos condicionantes para análise dos processos erosivos. Estes resultados colaboraram na extrapolação do aporte de sedimentos mensurados pelos pinos de erosão para áreas não experimentais de condições semelhantes. Os planos de informação Declividade, Uso da terra, Solos e Formas de vertente foram utilizados a partir de reclassificações, de modo com que as classes desses mapas fossem semelhantes às características das parcelas experimentais.

Os mapas de declividade foram reclassificados para as duas classes de maior representatividade, de 3 a 8% e de 8 a 20% para a bacia do ribeirão Jacutinga, e de 13 a 20% e de 20 a 45%, para a bacia do córrego Monjolo Grande. Visando atender as mesmas classes utilizadas para as parcelas experimentais, os mapas de uso da terra mantiveram as classes de cana-de-açúcar, pastagem, solo exposto e vegetação ripária. Como não foram realizados experimentos em reflorestamento, esta classe foi incorporada à categoria vegetação ripária. Os mapas de forma da vertente mantiveram suas classes de topo, vertente côncava, convexa, retilínea e planície.

Quanto aos tipos de solo, nem todas as classes presentes nas áreas de estudo foram contempladas pelos experimentos. No entanto, como trata-se de uma aproximação entre dados mensurados e a extrapolação para áreas não experimentais, optou-se por englobar mais de um tipo de solo em cada classe. Assim, para a bacia do ribeirão Jacutinga, os registros das parcelas em Argissolos Vermelho Amarelos foram mantidos para a mesma classe, e os registros obtidos em Cambissolos Háplicos também foram extrapolados para os Neossolos Litólicos e Neossolos Flúvicos. Os registros das parcelas em Neossolo Quartzarênico da bacia do córrego Monjolo Grande foram extrapolados também para os Neossolos Quartzarênicos e Latossolos Vermelho Amarelos das duas bacias de estudo. Para a bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande, os registros obtidos em Argissolos Vermelho Amarelos foram também extrapolados para os Neossolos Litólicos e Cambissolos Háplicos, de ocorrência na mesma bacia.

Tendo definidos os planos de informações com suas respectivas feições representadas por polígonos, foram realizados processos de sobreposição e intersecção destes para a geração de um plano de informação de síntese. Por meio da ferramenta *intersect* do ArcGis 10.1, foram gerados polígonos de intersecções entre as classes de declividade, uso da terra, tipo de solo e forma da vertente. Os resultados correspondem à feições de síntese, no



qual cada polígono passa a representar um conjunto de informações. Por exemplo, a geração de uma feição poligonal representada por declividade entre 3 e 8%, em área de pastagens com solos do tipo Argissolo Vermelho Amarelo em forma de vertente convexa. Em condições semelhantes, os valores dos registros das parcelas experimentais são atribuídos a esta feição. A atribuição dos valores registrados nos experimentos aos polígonos de características análogas resultou no mapa síntese do aporte de sedimentos das bacias hidrográficas.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. MDE, hipsometria e declividade

Os MDEs e mapas hipsométricos das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande são apresentados nas Figura 30 e Figura 31, respectivamente. A primeira apresenta amplitude altimétrica de 200 m, variando entre as cotas de 550 a 750 m, enquanto a segunda bacia apresenta amplitude de 430 m, variando entre 560 e 990 m. A amplitude altimétrica é um índice morfométrico relacionado à energia potencial disponível para a gota de chuva. Quanto maior este índice, maior é a energia potencial da chuva e maior capacidade erosiva do relevo (CREPANI et al., 2001). Neste sentido, a bacia do Monjolo Grande mostra um relevo de maior capacidade erosiva.

Em termos de representatividade, a bacia do ribeirão Jacutinga apresenta 74% de sua área com predomínio altimétrico entre 550 e 650 m, distribuídas principalmente nas médias e baixas vertentes (Figura 32). Na bacia do Monjolo Grande, 71% da área apresenta o predomínio de altitudes entre 600 a 700 m (Tabela 13). As maiores altitudes são relativas aos relevos residuais dos morros testemunhos Bizigueli e Guarita (Figura 33 e Figura 34).

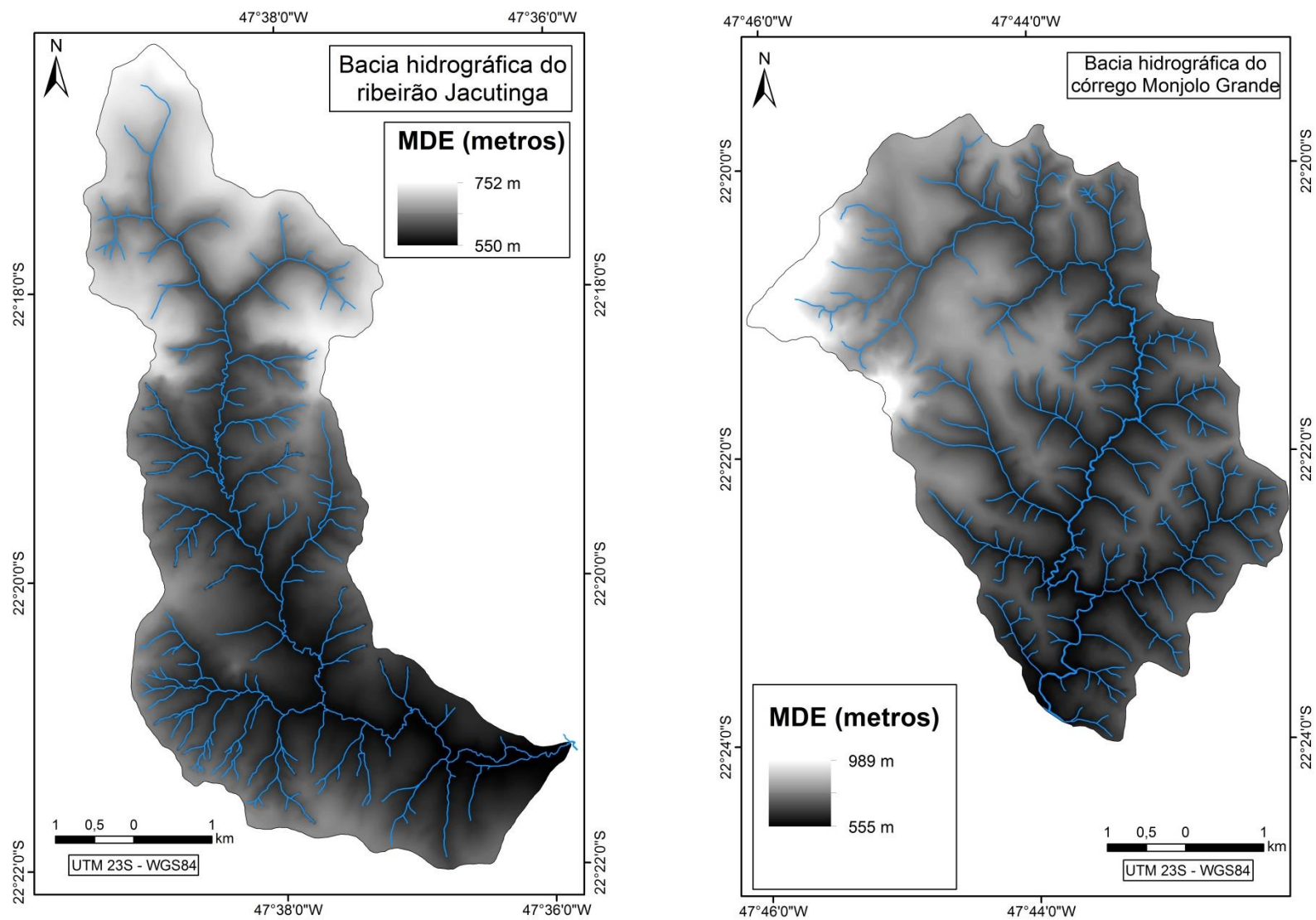


Figura 30. MDE para as bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.

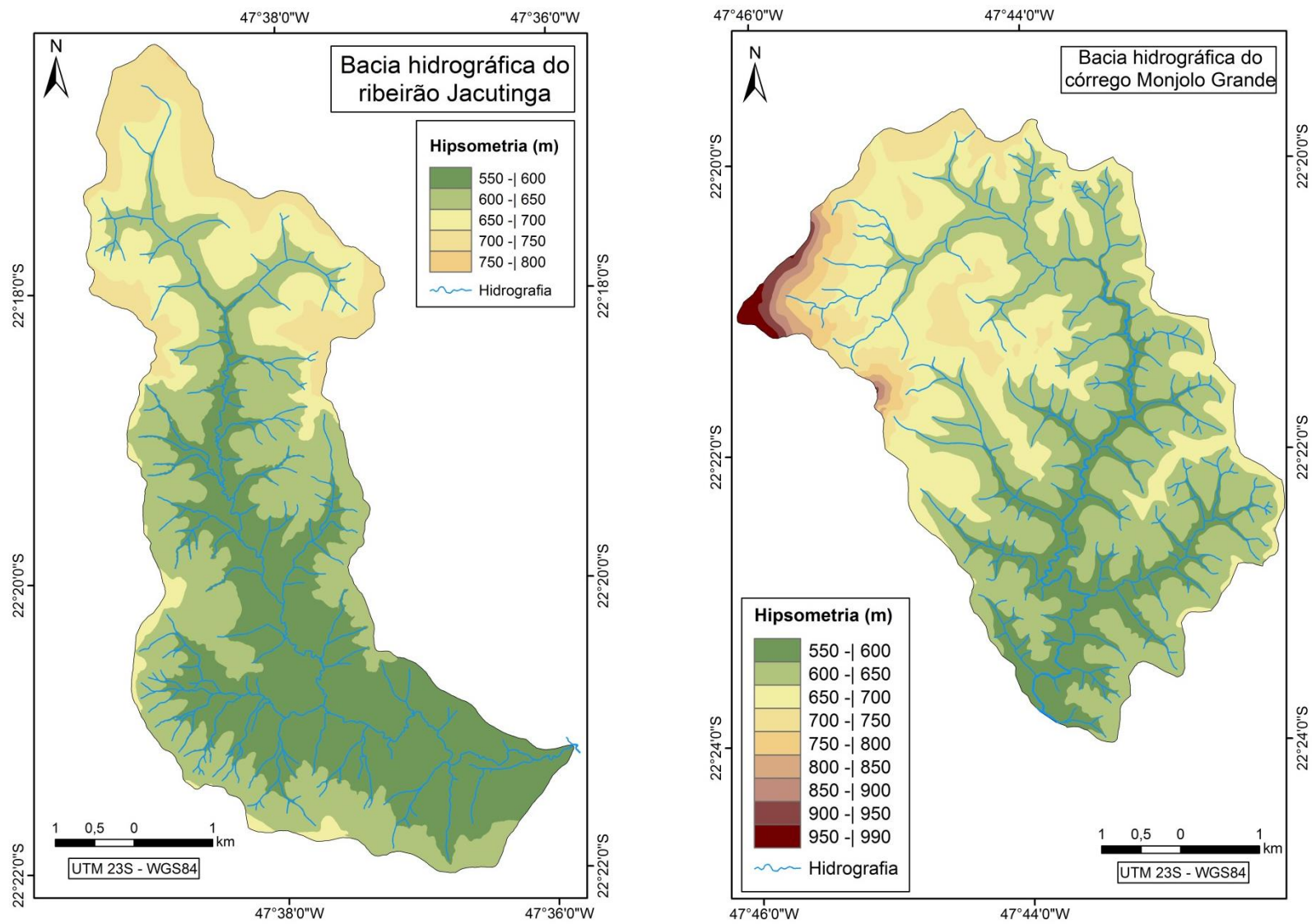


Figura 31. Mapas hipsométricos das bacias hidrográficas do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.

Tabela 13. Distribuição das áreas das bacias hidrográficas (BHs) estudadas para cada classe hipsométrica.

Classes hipsométricas (m)	Área (%)	
	BH Jacutinga	BH Monjolo
550 - 600	37,80	15,64
600 - 650	36,20	42,71
650 - 700	15,73	29,02
700 - 750	10,22	8,06
750 - 800	0,02	1,85
800 - 850	-	0,98
850 - 900	-	0,60
900 - 950	-	0,63
950 - 990	-	0,47



Figura 32. Topografia suave da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga. Fonte: o autor.



Figura 33. Vista da nascente do ribeirão Jacutinga (cota 740 m). Ao fundo, os relevos residuais associados às *cuestas* arenito-basálticas, da bacia do córrego do Monjolo Grande. Fonte: o autor.



Figura 34. Vista da parcela experimental MP3 e dos morros do Bizigueli e da Guarita, na bacia do córrego do Monjolo Grande. Fonte: o autor.

A caracterização da declividade das bacias, com classes estabelecidas conforme EMBRAPA (1999) e adaptadas pela subdivisão da terceira classe 8 a 20% para 8 a 13% e 13 a 20%, conforme Ramalho e Beek (1995), encontram-se na Figura 35, com distribuição em área apresentada na Tabela 14.

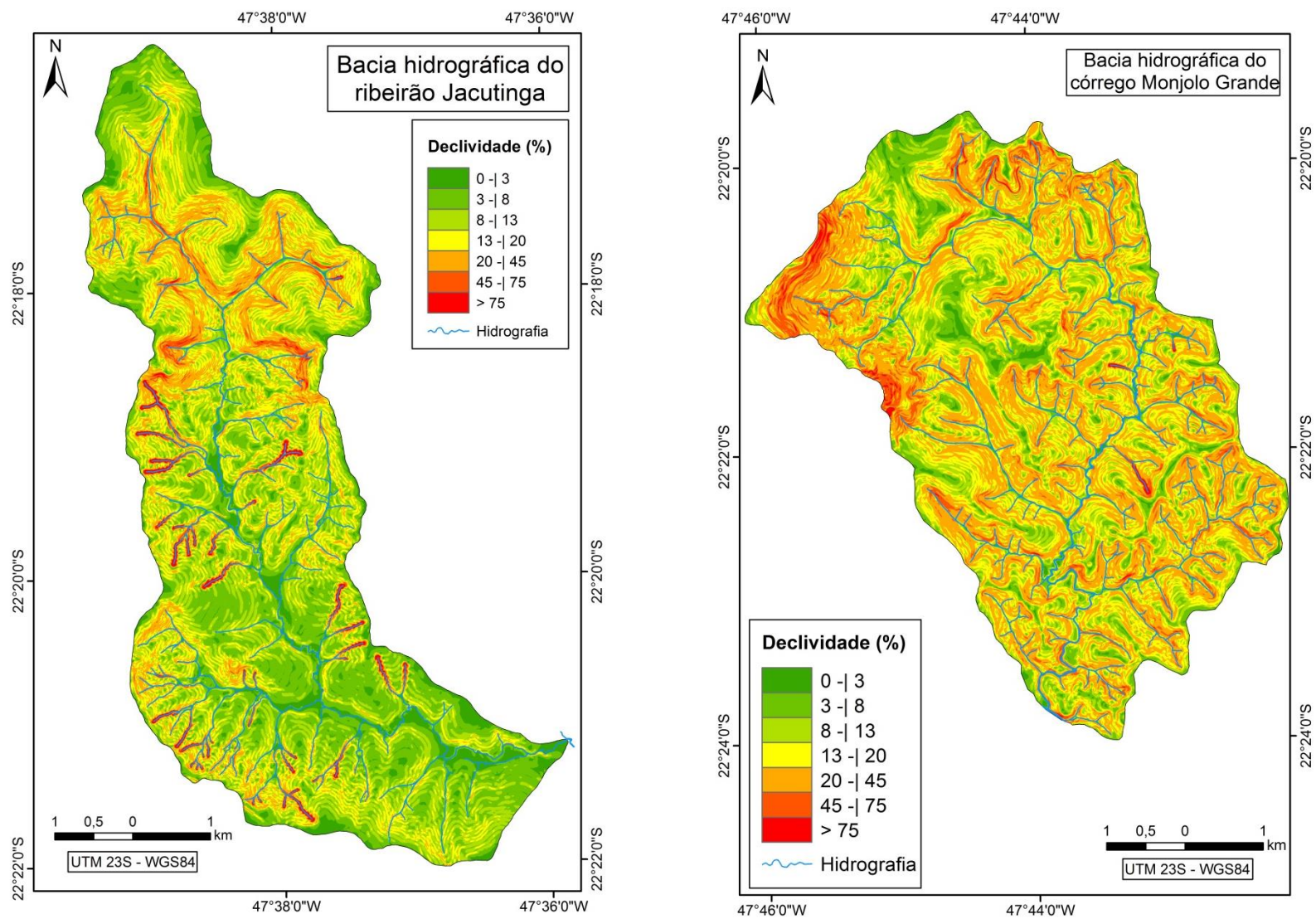


Figura 35. Mapas de declividade das bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.

Tabela 14. Distribuição das áreas das bacias hidrográficas (BHs) estudadas para cada classe de declividade.

Classes de declividade (%)	Grau de limitação (Ramalho e Beek, 1999)	BH – áreas (%)	
		Jacutinga	Monjolo Grande
0 ÷ 3	Plano	4,98	1,98
3 ÷ 8	Suave Ondulado	26,66	10,17
8 ÷ 13	Moderado ondulado	29,40	17,28
13 ÷ 20	Ondulado	21,81	26,06
20 ÷ 45	Forte Ondulado	13,97	38,02
45 ÷ 75	Montanhoso	2,01	5,72
> 75	Escarpado	1,17	0,76

A bacia do ribeirão Jacutinga é composta por declividades entre 3 e 20% em 77,8% de sua área, caracterizando relevo suave ondulado a ondulado. Desses 77,8%, 26,6% são relativos ao relevo suave ondulado, os quais apresentam ligeira limitação quanto ao cultivo agrícola e também quanto à suscetibilidade erosiva; 29,4% da bacia correspondem à ocorrência de relevo moderadamente ondulado, sendo sua suscetibilidade erosiva e limitação agrícola também moderadas; e 21,8% da área é classificada como relevo ondulado associado à forte suscetibilidade erosiva e limitação agrícola moderada.

Em menor escala, verifica-se 4,9% da área de relevo plano, apresentando suscetibilidade erosiva e limitação agrícola nulas. As declividades mais acentuadas concentram-se no setor a montante, sendo associadas ao contato das formações Pirambóia e Corumbataí, somando 13,9% da área com declives de 20 a 45%. Estes relevos classificados como forte ondulado apresentam forte impedimento à mecanização agrícola e suscetibilidade erosiva muito forte. O relevo escarpado, com declividades superiores a 75%, é de baixa frequência, concentrando-se nas nascentes dos canais de primeira ordem localizados nos setores de médio e baixo curso, sendo sua limitação ao cultivo agrícola e sua suscetibilidade erosiva entre muito forte e extremamente forte.

A bacia do córrego do Monjolo Grande tem 64% de sua área com declividades entre 13 e 45%, caracterizando relevo ondulado a forte ondulado. Tais declives apresentam grau de limitação ao cultivo agrícola entre forte a muito forte, sendo que 26 % caracteriza-se por suscetibilidade erosiva forte e 38% por suscetibilidade erosiva muito forte. Cerca de 29% da bacia apresenta declividades inferiores a 13%, localizadas principalmente no setor a montante e associadas à ocorrência da formação Pirambóia. Neste setor, a limitação quanto ao cultivo agrícola e suscetibilidade erosiva variam entre nula a moderada.



Em menor escala, verifica-se que 6,4% da bacia do Monjolo Grande é composta por relevo montanhoso a escarpado, de suscetibilidade erosiva e limitação à mecanização agrícola extremamente fortes. O relevo escarpado corresponde as áreas dos morros do Bizigueli e da Guarita, associados a formação das *cuestas* arenito-basálticas.

## **5.2. Caracterização pedológica das bacias hidrográficas**

Para a bacia do ribeirão Jacutinga, a distribuição espacial dos pontos amostrais é apresentada pela Figura 36, com descrição dos perfis na Tabela 15. Os resultados das análises físicas e químicas estão apresentados nas Tabela 16 e Tabela 17. A avaliação da capacidade de infiltração é mostrada na Figura 37, e a resistência à penetração é exibida na Figura 38. A umidade antecedente às análises é apresentada na Tabela 18.

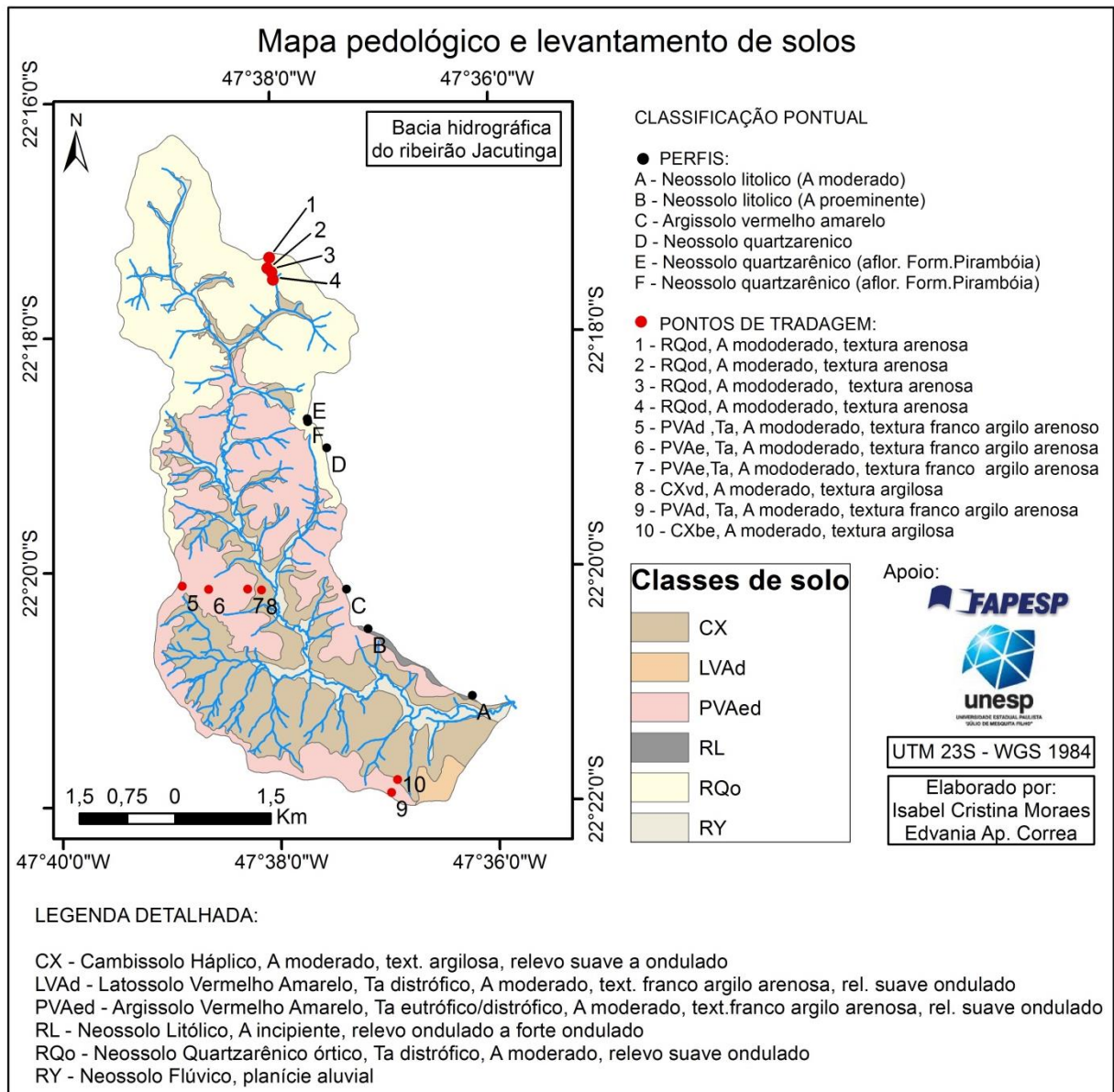


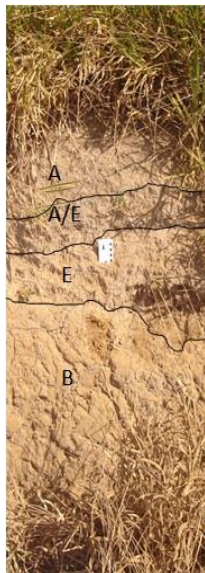


Figura 36. Mapa pedológico da bacia do ribeirão Jacutinga, pontos de tradagem e respectivas classes de solo.

Tabela 15. Caracterização dos perfis de solo da bacia do ribeirão Jacutinga, e respectivas descrições.

Perfis A/B	Perfil C	Perfis D/E/F
		
<p><u>Neossolos Litólicos:</u></p> <p>O perfil apresentou horizonte O com 5 cm e logo abaixo horizonte R oriundo da formação Corumbataí, sendo possível observar o maciço diaclasado, e desagregação em pastilhas de colorações esbranquiçada e arroxeada.</p>	<p><u>Argissolo Vermelho Amarelo:</u></p> <p>Horizonte O com 5 cm, A com 17 cm, estrutura colunar, cor 2.5YR 4/4. Horizonte B textural, de 1,30 m, estrutura maciça, plasticidade e pegajosidade média, cor 5YR 4/6 e presença de concreções de ferro. Horizonte C com ocorrência de material mineral inconsolidado oriundo da formação Corumbataí.</p>	<p><u>Neossolos Quartzartênicos:</u></p> <p>Área de afloramento da formação Pirambóia, horizonte A com 28 cm de espessura, textura arenosa, horizonte A/E e E, de 30 cm, estrutura maciça, textura arenosa e cor 10YR 5/3 (amostra úmida), o qual constitui horizonte de perda de óxidos de ferro e alumínio para o horizonte subjacente. Horizonte EB de 30 cm de espessura, cor 10YR 4/3 (amostra úmida) e B abaixo de 90 cm, textura arenosa, estrutura maciça, pouco/quase nula plasticidade e pegajosidade, cor 5YR 4/6 (amostra úmida).</p>

Conforme IBGE (2007), as frações granulométricas dos solos são classificadas conforme o tamanho das partículas, sendo de 2 a 0,2 mm para areia grossa, de 0,2 a 0,005 mm para areia, de 0,005 mm a 0,002 mm para silte, e inferiores a 0,002 mm para argila. Por meio da análise granulométrica atribui-se o agrupamento das classes texturais, conforme IBGE (2007), adaptado de Lemos e Santos (1984). A distribuição dos pontos de tradagem é indicada pela Figura 36.

Tabela 16. Distribuição das frações granulométricas dos solos das tradagens realizadas na bacia do ribeirão Jacutinga, e classificação no 1º nível categórico.

Ponto	Prof. (cm)	Frações granulométricas (%)					Classe textural (IBGE, 2007)	Classific. (1º nível)
		Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila		
1	0-20	92,63	45,681	46,95	1,07	6,3	Arenosa	RQ
	20-40	90,235	45,73	44,505	2,06	7,7		
	40-60	89,647	46,84	42,807	3,75	6,6		
	60-80	90,614	51,075	39,539	4,24	5,15		
2	0-20	90,432	40,35	50,082	2,17	7,4	Arenosa	RQ
	20-40	89,545	42,754	46,80	9,21	1,25		
	60-80	88,313	42,258	46,055	1,64	10,05		
	80-100	86,903	34,649	52,254	0,50	12,6		
3	0-20	93,972	39,576	54,396	0,68	5,35	Arenosa	RQ
	20-40	91,9	36,306	55,594	2,7	5,4	Média	
	40-60	72,082	28,053	44,029	11,42	16,5	Arenosa	
	60-80	88,638	30,293	58,345	4,912	6,45	Arenosa	
	80-100	87,336	27,715	59,621	2,064	10,6	Arenosa	
4	0-20	91,4	36,081	37	1,6	7	Arenosa	RQ
	20-40	90,486	31,677	58,809	5,764	3,75		
	60-80	90,235	28,758	61,477	2,865	6,9		
	80-100	90,113	29,486	60,627	5,887	4		
5	0-20	82,123	18,288	18,321	7,927	9,95	Arenosa	PVA
	20-40	74,003	18,588	55,415	13,547	12,45	Média	
	40-60	70,55	18,838	18,933	3,2	26,25		
	60-80	71,868	23,666	23,399	3,332	24,8		
	100-120	74,392	34,383	40,009	3,808	21,8		
6	0-20	70,978	23,641	47,337	9,872	19,15	Média	PVA
	20-40	63,328	20,845	42,483	6,972	29,7		
	40-60	58,285	21,18	37,105	10,715	31		
	60-80	58,054	20,748	37,306	8,296	33,65		
7	0-20	67,866	23,886	43,98	17,034	15,1	Média	PVA
	20-40	65,495	24,457	41,038	14,305	20,2		
	40-60	55,934	19,939	35,995	8,666	35,4		
	60-80	45,824	16,292	29,532	15,176	39		
8	0-20	36,136	11,388	24,748	31,864	32	Média	CX
	20-40	25,747	9,18	16,567	29,653	44,6	Argilosa	
9	0-20	75,127	19,308	55,819	3,223	21,65	Média	PVA
	20-40	73,973	21,102	52,871	9,527	16,5		
	40-60	71,625	19,275	52,35	1,375	27		
	60-80	71,324	19,419	51,905	10,176	18,5		
	80-100	70,618	18,643	51,975	4,132	25,25		
10	0-20	21,543	6,75	14,793	27,057	51,4	Argilosa	CX
	20-40	33,254	8,379	24,875	30,546	36,2		
	40-60	25,398	6,434	18,964	24,052	50,55		

	60-80	13,678	3,985	9,693	43,522	42,8		
	80-100	4,67	1,207	3,463	52,38	42,95		

Tabela 17. Análise química de amostras da bacia do ribeirão Jacutinga.

Bacia hidrográfica	Ponto	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO	CT	SB	CTC	V	m
		CaCl <sub>2</sub>	mg.dm <sup>-3</sup>	mmolc.dm <sup>-3</sup>						g.kg		mmolc.dm <sup>-3</sup>	%	
Jacutinga	1	5,2	8	3,3	6	3	1,8	16	18	10,3	12	28	44	13
	3	5	7	1,8	6	3	3,4	16	18	10,3	11	27	40	24
	5	4,6	6	1,5	6	3	4,6	22	13	7,5	10	32	33	30
	6	4,6	7	1,5	14	6	3,4	40	18	10,3	22	61	35	14
	8	4,3	9	2,2	23	9	7,6	20	27	15,6	34	54	63	18
	10	4	6	4,2	9	5	4,2	149	15	8,8	18	167	11	19

\*Classificação: muito baixo; baixo; médio; bom; muito bom e PH = acidez muito alta, acidez alta, acidez média, acidez baixa, acidez muito, baixa, neutro, alcalino, conforme LOPES. A. S. e GUIDOLIN. J.A. Interpretação de Análise de Solo - Boletim Técnico 2/ ANDA/Associação Nacional para Difusão de Adubos. 1989

A partir da análise das taxas de infiltração e IP obteve-se a Umidade Antecedente (UA) média de 10,03% (Tabela 18).

Tabela 18. Umidade antecedente média da bacia do ribeirão Jacutinga (%).

Pontos													
	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	8b	9	10	Média
UA (%)	6,12	5,34	8,2	7,06	8,26	8,72	13,5	13,7	9,61	12,0	15,1	12,9	10,03

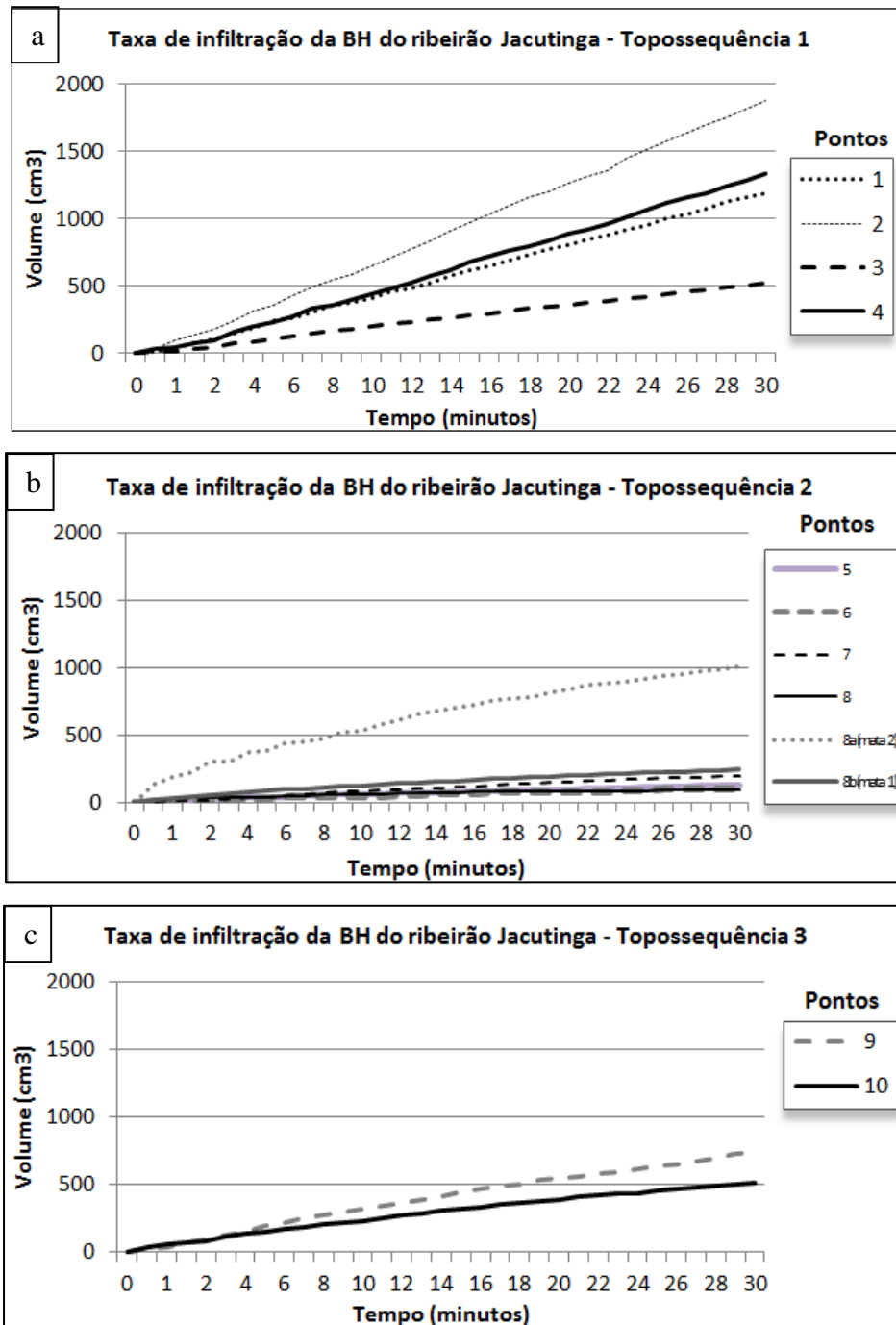


Figura 37. Análise da capacidade de infiltração da bacia do ribeirão Jacutinga: (a) topossequência 1; (b) topossequência 2; (c) topossequência 3. Os pontos 8a e 8b correspondem às parcelas JM2 e JM1, respectivamente.

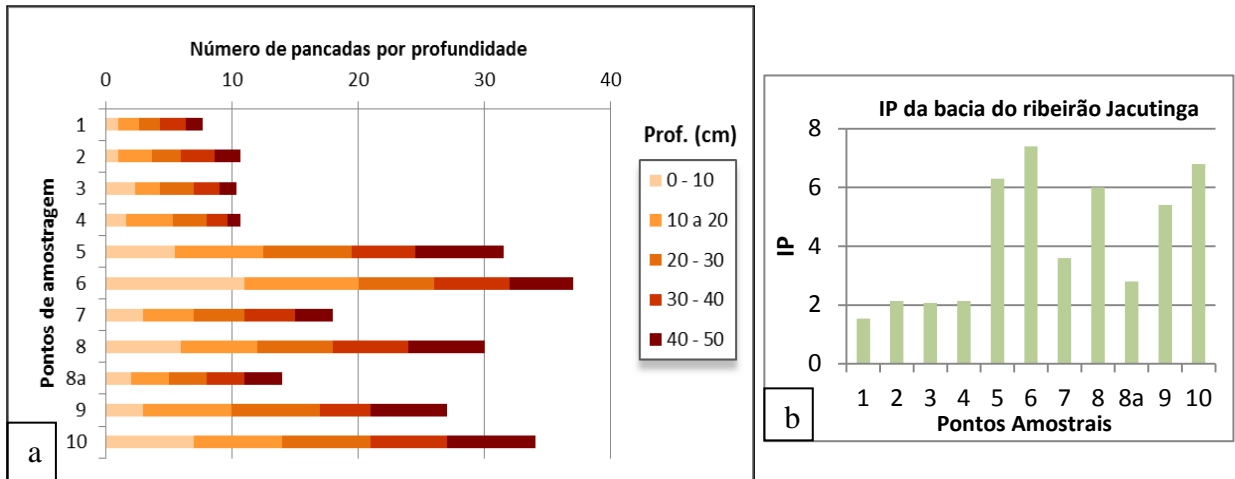


Figura 38. Análise da resistência à penetração na bacia do ribeirão Jacutinga: (a) Número de impactos por profundidade e (b) Índice de Penetração (número impacto/dm<sup>-1</sup>). O ponto 8a corresponde à parcela JM2.

Na bacia do ribeirão Jacutinga, o setor a montante é representado pelos pontos amostrais 1, 2, 3 e 4 (Figura 36), situados em áreas de pastagem, na classe de solo do Neossolo Quartzarênico associados à ocorrência da formação Pirambóia. De textura arenosa, com areia total acima de 85%, no sentido de média para baixa vertente (pontos 2, 3 e 4), há o aumento gradativo das frações de areia fina e silte, denotando maior suscetibilidade erosiva. Aliado à elevada quantidade da fração areia, são solos que apresentam alta friabilidade e fraca estrutura, sendo portanto, de alta fragilidade natural de erosão.

Os pontos 1 e 3 apresentam teores de matéria orgânica e bases classificados em baixo e muito baixo. Estas características concordam com a baixa ou inexistente coesão destes solos. As taxas de infiltração foram as maiores de toda a bacia, variando de 500 a 1.800 cm<sup>3</sup> em 30 min. Este comportamento se deve às características texturais e estruturais, aliada às baixas condições de UA, entre 5 e 8,2%. Os Neossolos Quartzarênicos verificados nos pontos 1 a 4 apresentaram baixa resistência a penetração, e baixo grau de compactação quando da comparação com os demais solos da bacia do Jacutinga, com média de 8 a 10 pancadas até a profundidade de 50 cm, e IP médio entre 1,5 e 2 pancadas a cada 10 cm. Estas características descrevem condições de perfis sem restrição quanto à circulação de água no solo. As altas taxas de infiltração e ausência de camadas adensadas e compactadas indicam maior tempo para a saturação do solo e geração de escoamento superficial direto. Apesar disso, como a retenção de água no solo é mínima, há baixa disponibilidade de água pelo predomínio de água gravitacional. Neste cenário, em que o solo apresenta maior macroporosidade, ele atinge seu ponto máximo de retenção após a circulação de água gravitacional, ocorrendo baixa tensão de

retenção de água e baixa disponibilidade de água capilar, restringindo o desenvolvimento vegetativo pleno dos cultivos.

A segunda topossequência corresponde à vertente das parcelas experimentais, e é representada pelos pontos amostrais 5, 6, 7 e 8 (Figura 36). Nos pontos 5, 6 e 7 foi verificada a ocorrência de Argissolos Vermelho Amarelos de textura média a franco-argilosa. Já o ponto 8 situa-se na classe de Cambissolo Háplico de textura argilosa. As características granulométricas avaliadas a cada 20 cm favoreceram a identificação de um horizonte B textural nos pontos 5, 6 e 7, visto o aumento das concentrações de argila nos horizontes subsuperficiais (Tabela 16). Tais características são evidenciadas pela restrição de circulação de água nos perfis, onde a capacidade de infiltração foi inferior à topossequência 1. Nestes solos a infiltração máxima variou de 50 a 280 cm<sup>3</sup> em 30 minutos, exceto no ponto 8a, referente à localização do ponto experimental JM2. Este ponto corresponde à área de planície aluvial (Neossolo Flúvico) apresentou capacidade de infiltração bastante superior, próxima 1.005 cm<sup>3</sup> em 30 minutos, semelhante ao comportamento dos pontos amostrais dos Neossolos Quartzarênicos. Também, os maiores teores de UA, entre 8,2 e 13,7%, evidenciam uma maior capacidade de retenção de água que na topossequência 1.

No sentido de média para baixa vertente, pontos amostrais 6 e 8, além do aumento dos teores de argila e de silte, a concentração de bases varia de baixo para K e P a médio para Ca e Mg, e os solos passam a ser mais rasos, estruturados e coesos. Estes fatores associados ao teor de matéria orgânica, de 18 e 27 g.kg<sup>-1</sup> para os pontos 6 e 8, respectivamente, favorecem a coesão das partículas, e o aumento da tensão de retenção de água no solo.

Em geral, solos com teores de argila superiores a 35% são caracterizados pela redução da permeabilidade, maior capacidade de retenção de água devido a uma maior coesão e, portanto, maior tensão capilar. Estas condições de solo indicam menor tempo para saturação e formação do escoamento superficial na vertente experimental. A Figura 39 evidencia a formação de enxurrada próximo à parcela experimental JC4, referente ao início da chuva de 15/01/2014, de 22,9 mm, sem eventos de chuva nos dias antecedentes.





Figura 39. Início da formação de enxurrada próximo à parcela JC4.

O adensamento das camadas pela concentração de argila também é observado na topossequência 3, pontos amostrais 9 e 10. Os pontos 5, 6, 7 e 9, distribuídos em Argissolos Vermelho Amarelos de textura média franco-argilosa, e os pontos 8 e 10, distribuídos em Cambissolo Háplico de textura argilosa, caracterizam-se por alta resistência à penetração. Conforme Taylor et al. (1966 apud BEUTLER, et al. 2007) e Casagrande (2001),  $IP > 2$  Mpa é indicador de compactação dos solos em geral, e limiar crítico ao crescimento radicular das plantas. Assim, em média, estes pontos amostrais apresentaram resistência entre 18 e 36 pancadas para 50 cm de profundidade, e IP médio entre 4 e 7 pancadas a cada 10 cm. Os IPs superiores a 2 MPa indicam compactação, inclusive nas camadas superficiais, e são responsáveis para a redução da capacidade de infiltração.

Ressalta-se que as concentrações de argila observadas pelas análises granulométricas, nos pontos de 5 a 10, tendem a ser maiores nas camadas subsuperficiais, especialmente após 30 cm de profundidade. No entanto, verifica-se que a maior resistência mecânica à penetração ocorreu entre as camadas de 0 a 30 cm de profundidade. Assim, atribui-se a maior compactação das primeiras camadas ao aumento das concentrações de argila e às características de uso da terra e condições de manejo. Este fato é evidenciado pela maior resistência mecânica à penetração na camada de 0 a 10 cm das amostras 5, 6 e 10, as quais situam-se em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Estas áreas, devido as atividades de preparo de solo e colheita (gradagem, rompimentos de estruturas do solo, exposição ao efeito do impacto direto das gotas de chuva, colheita mecanizada, etc.) apresentam maior suscetibilidade aos processos erosivos.

Os valores de CTC de 32, 61, 54 e 167  $\text{mmolc.dm}^{-3}$ , para os pontos 5, 6, 8 e 10, respectivamente, indicam tratar-se de argila expansiva do tipo 2:1. Aliado aos valores médios a bons dos teores de matéria orgânica e ao aumento da concentração de bases, principalmente Ca e Mg, verificados nos pontos 6, 8 e 10, sugerem o predomínio de argilas silicatadas. A participação da argila expansiva para o aumento da coesão pôde ser constatada em rachaduras da superfície do solo, principalmente nos períodos secos, o que contribui no aumento relativo da capacidade de infiltração pelas fissuras. Quando há altos teores de argila e alta coesão, estes solos passam a comportar-se como solos arenosos em função do aumento da macroporosidade. Este fato é confirmado pela maior capacidade de infiltração dos pontos 9 e 10, de 518 e 745  $\text{cm}^3$  em 30 minutos, mesmo em condições de UA acima da média amostral, de 15,1 e 12,9%, respectivamente.

Além de fatores relativos à circulação de água no solo, horizontes adensados e camadas de impedimento à drenagem dos perfis, as características de acidez, e teores médios de K, Ca e Mg contribuíram para a atribuição de uma classe de solo jovem, os Cambissolos Háplicos, onde situam-se os pontos 8 e 10. Estes pontos apresentaram perfis rasos (horizonte B incipiente) e homogêneos, com teores de argila superiores a 36%, com o predomínio de camadas com valores superiores a 42%, não caracterizando horizonte diagnóstico B textural.

Para a bacia do córrego do Monjolo Grande, a distribuição espacial dos pontos amostrais é representada pela Figura 40. Os resultados das análises físicas e químicas são apresentados nas Tabela 19 e Tabela 20. A avaliação da capacidade de infiltração é apresentada na Figura 41, e a resistência mecânica à penetração é dada pela Figura 42. A umidade antecedente às análises encontra-se descrita na Tabela 21.

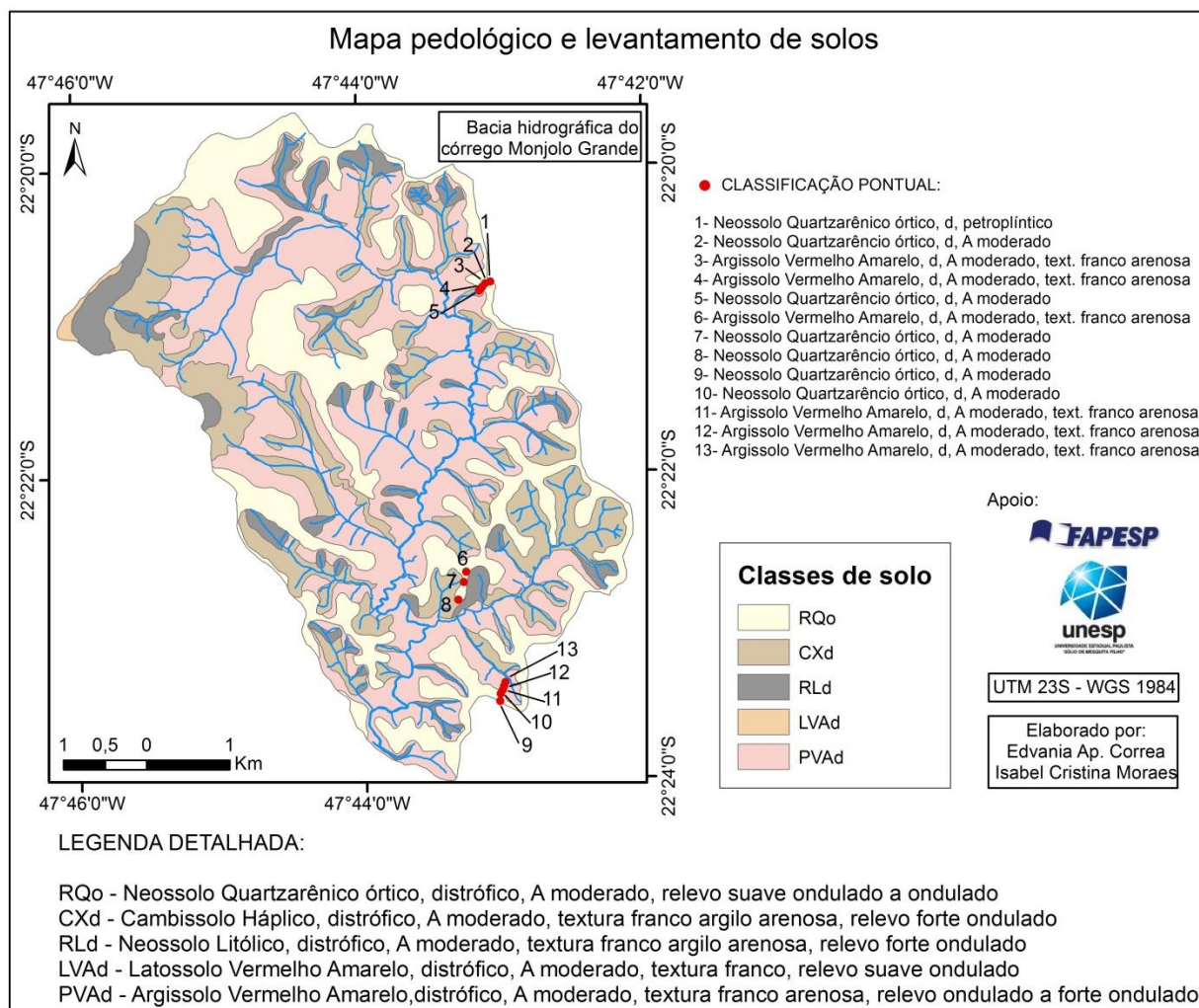


Figura 40. Mapa pedológico da bacia do córrego Monjolo Grande, pontos de tradagem e respectivas classes de solo.

Tabela 19. Distribuição das frações granulométricas dos solos das tradagens realizadas na bacia do córrego Monjolo Grande, e classificação no 1º nível categórico.

Ponto	Prof. (cm)	Frações granulométricas (%)					Classe textural (IBGE, 2007)	Classific. (1º nível)
		Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila		
1	0-20	79,05	6,984	72,06	19,05	1,9	Arenosa	RQ
	20-40	75,83	5,76	70,06	21,32	2,85		
	40-60	75,77	5,98	69,79	19,38	4,85		
	60-80	77,90	6,50	71,40	21,24	0,85		
	80-100	79,48	6,41	73,07	20,31	0,2		
	100-120	77,61	6,84	70,77	22,28	0,1		
2	0-20	74,97	39,44	35,53	22,38	2,65	Arenosa	RQ
	20-40	83,39	29,63	53,77	14,71	1,9		
	40-60	79,72	26,02	53,70	9,08	11,2		
	60-80	79,95	24,07	55,88	13,25	6,8		
	80-100	80,34	26,69	53,65	13,15	6,5		
	100-120	81,24	29,67	51,57	13,71	81,24		

3	0-20	73,68	38,88	34,80	20,97	5,35	Média	PVA
	20-40	75,3	39,97	35,33	15,45	9,25		
	40-60	78,33	46,73	31,59	10,62	11,05		
	60-80	77,62	39,10	38,51	11,03	11,35		
4	0-20	86,23	25,01	61,22	3,97	9,8	Arenosa	PVA
	20-40	78,95	23,91	55,04	6,65	14,4	Média	
	40-60	76,27	21,35	54,92	5,53	18,2		
	60-80	76,39	24,74	51,65	7,81	15,8		
	80-100	79,30	41,78	37,52	13,45	7,25	Arenosa	
5	0-20	91,93	38,15	53,78	1,22	6,85	Arenosa	RQ
	20-40	92,82	44,26	48,57	2,03	5,15		
	40-60	93,15	40,09	53,06	5,50	1,35		
	60-80	93,67	44,24	49,43	1,23	5,1		
	80-100	94,75	46,92	47,83	3,60	1,65		
	100-120	93,83	47,46	46,36	5,67	0,5		
6	0-20	81,43	15,43	66,00	6,87	11,7	Média	PVA
	20-40	82,11	0	82,11	1,06	16,95	Arenosa	
	40-60	67,47	7,31	60,16	5,131	27,4	Média	
	60-80	62,85	6,027	56,82	20,153	17		
	80-100	67,94	2,72	65,21	27,81	4,25		
	100-120	70,613	14,17	56,44	2,737	26,65		
7	0-20	86,86	0	86,86	1,01	12,15	Arenosa	RQ
	20-40	88,15	31,23	56,93	1,045	10,8		
	40-60	82,96	29,36	53,6	4,742	12,3		
	60-80	74,9	27,56	47,34	5,25	19,85	Média	
	80-100	74,76	29,06	45,70	5,79	19,45		
	100-120	66,60	13,79	52,81	13,90	19,5		
8	0-20	75,3	12,45	62,85	10,2	14,5	Média	PVA
	20-40	71,60	11,27	60,33	16,945	11,45		
	40-60	70,12	13,35	56,77	20,829	9,05		
	60-80	70,26	17,54	52,72	14,236	15,5		
	80-100	71,20	21,33	49,88	18,49	10,3		
	100-120	73,07	22,93	50,13	13,63	13,3		
9	0-20	84,18	27,91	56,26	14,42	1,4	Arenosa	RQ
	20-40	86,96	28,63	58,33	0,79	12,25		
	40-60	86,43	26,09	60,34	11,02	2,55		
	60-80	83,09	26,36	56,73	12,31	4,6		
	80-100	81,36	24	57,36	10,89	7,75		
10	0-20	87,26	20,51	66,75	7,89	4,85	Arenosa	RQ
	20-40	84,34	19,99	64,34	3,51	12,15		
	40-60	78,30	18,34	59,95	14,16	7,55		
	60-80	80,21	21,85	58,35	13,14	6,65		
	80-100	80,83	22,44	58,40	4,96	14,2	Média	
	0-20	78,39	23,81	54,57	4,21	17,4	Média	

11	20-40	84,29	26,88	57,41	4,81	10,9	Arenosa	PVA
	40-60	87,51	24,89	62,61	3,44	9,05		
	60-80	80,74	15,93	64,81	8,51	10,75	Média	
	80-100	77,66	7,94	69,72	11,73	10,6		
12	0-20	80,32	21,41	58,91	5,88	13,8	Média	PVA
	20-40	74,02	19,72	54,29	2,08	23,9		
	40-60	75,82	13,97	61,85	2,68	21,5		
	60-80	74,86	16,22	58,64	10,54	14,6		
	80-100	76,84	8,29	68,554	10,56	12,6		
13	0-20	78,19	22,84	55,35	2,86	18,95	Média	PVA
	20-40	75,48	22,70	52,77	7,02	17,5		
	40-60	72,47	22,63	49,83	4,68	22,85		
	60-80	77,04	42,19	34,85	17,11	5,85		
	80-100	78,58	35,89	42,69	11,72	9,7	Arenosa	

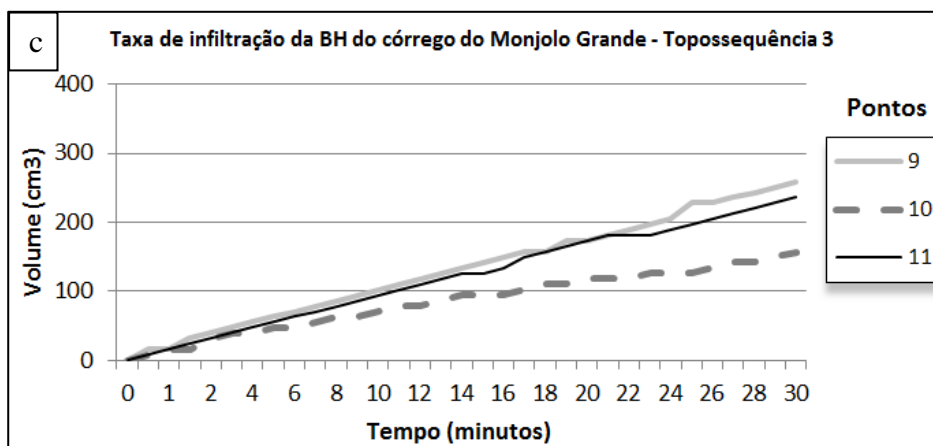
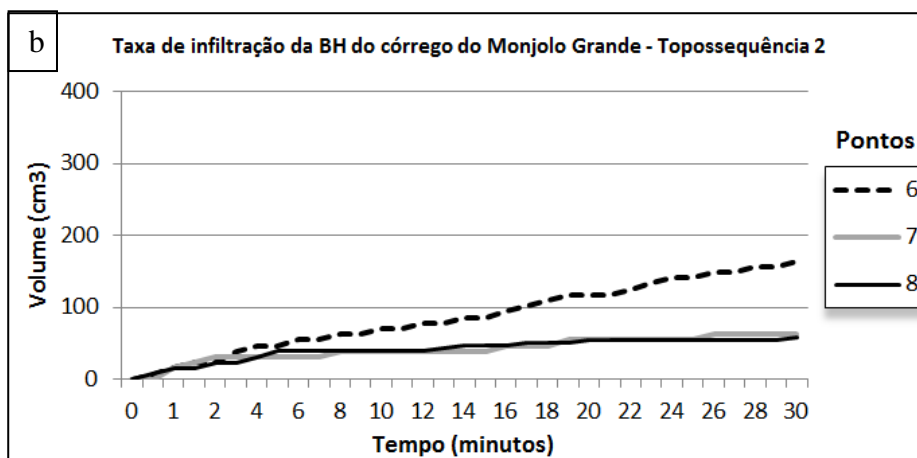
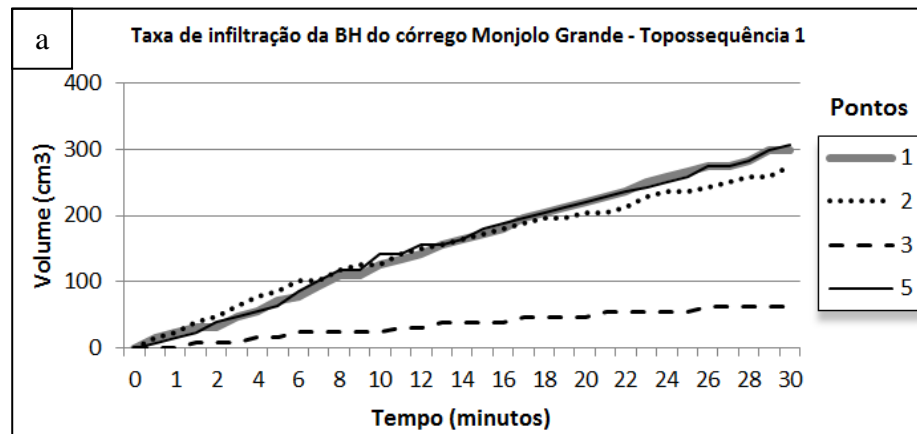
Tabela 20. Análise química de amostras da bacia do córrego Monjolo Grande.

Bacia hidrográfica	Ponto	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO	CT	SB	CTC	V	m
		CaCl <sub>2</sub>	mg.dm <sup>-3</sup>	mmolc.dm <sup>-3</sup>					g.kg		mmolc.dm <sup>-3</sup>	%		
Monjolo Grande	1	4,8	10	2,3	14	5	8,3	28	18	10,3	21	49	44	28
	3	3,9	8	2,4	7	3	3,2	116	16	9,6	12	128	10	20
	5	4,9	7	2,1	6	2	4,4	13	14	8,4	10	23	44	30
	6	5	8	2,7	8	3	6	17	20	11,8	14	31	44	30
	8	4	9	3,8	6	3	5	92	19	11	13	104	12	28
	9	4,5	8	2,3	7	3	4	32	16	9,2	12	44	28	24
	11	3,9	7	1,9	6	2	3,5	71	21	12,2	10	81	12	26
	13	3,9	8	2	8	3	3,2	174	22	12,6	13	187	7	20

\*Classificação: muito baixo; baixo; médio; bom; muito bom e PH = acidez muito alta, acidez alta, acidez média, acidez baixa, acidez muito, baixa, neutro, alcalino, conforme LOPES. A. S. e GUIDOLIN. J.A. Interpretação de Análise de Solo - Boletim Técnico 2/ ANDA/Associação Nacional para Difusão de Adubos. 1989

Tabela 21. Umidade antecedente média da bacia do córrego Monjolo Grande (%).

Pontos													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
UA (%)	6,98	8,69	9,7	13,3	13,5	11,0	19,4	15,5	9,89	13,7	7,71	8,74	11,51



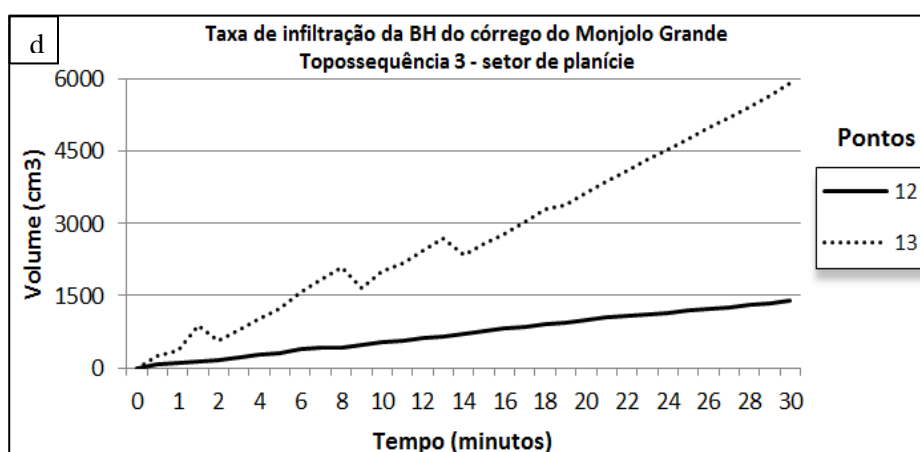


Figura 41. Análise da capacidade de infiltração da bacia do córrego Monjolo Grande: (a) topossequência 1; (b) topossequência 2; (c) topossequência 3; (d) topossequência 3 – setor de planície.

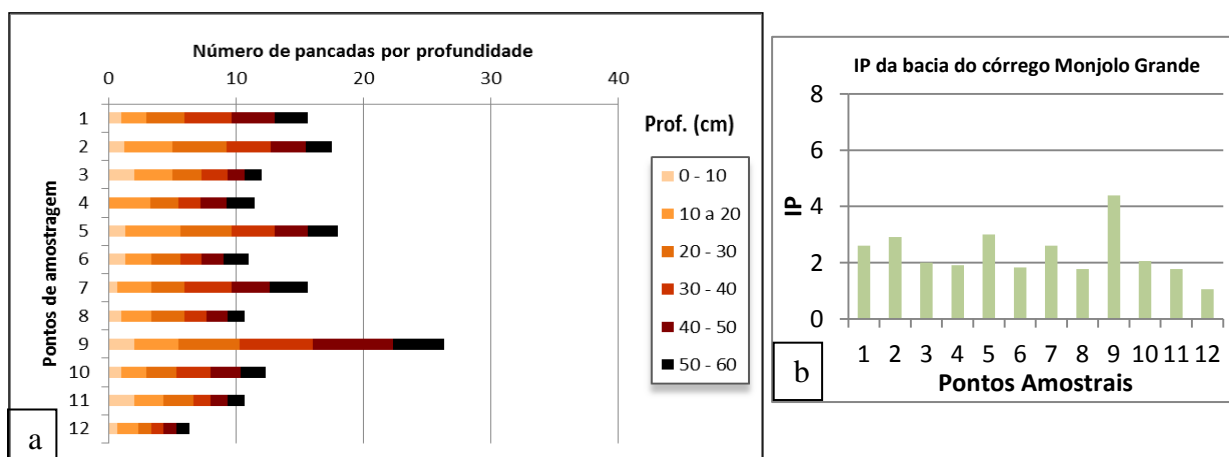


Figura 42. Análise da resistência mecânica à penetração da bacia do córrego do Monjolo Grande: (a) Número de impactos por profundidade e (b) Índice de Penetração (número impacto/dm<sup>-1</sup>).

Os solos analisados da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande apresentaram valores superiores a 70% de areia e inferiores a 20% de argila. São solos de textura arenosa e média arenosa, tendo o predomínio das frações de areia fina e silte. Estas frações são mais leves que as de areia grossa e de menor agregação que as de argila, sendo portanto, as partículas de silte e areia fina as que apresentam maior suscetibilidade frente ao destacamento pelas gotas de chuva e transporte pelo escoamento superficial (KNAPEN et al., 2007).

Em termos gerais, as amostras apresentaram perfis homogêneos, com textura variando de média a arenosa. Foram estabelecidas as classes de Neossolo Quartzarênico, nos pontos amostrais 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9 e 10, e Argissolo Vermelho Amarelo de textura franco-

arenosa para os pontos 3, 6, 11, 12 e 13. Estes solos são derivados principalmente da formação Pirambóia e em menor escala da formação Corumbataí.

As características de baixo pH, que denotam caráter ácido à muito ácido, de baixos teores de matéria orgânica, de bases e de granulometria arenosa, contribuem para a existência de solos de estruturas do tipo grão solto, de fraca coesão e alta friabilidade. Nestes solos, há tendência ao predomínio de macroporos, os quais, apesar de favorecerem a circulação de água e ar no sistema, contribuem para a presença de água gravitacional, de rápida saída do sistema. Assim, a baixa retenção de água é um fator limitante aos cultivos agrícolas nas áreas de estudo.

Em função das características intrínsecas dos solos arenosos, como alta macroporosidade e baixa capacidade de retenção e saturação de água, esperava-se taxas de infiltração mais elevadas do que as obtidas. Com exceção dos pontos 12 e 13 situados em planície aluvial, os quais obtiveram taxas de 1.000 e 6.000 cm<sup>3</sup>/30 min., os demais pontos experimentais tiveram infiltração inferiores a 310 cm<sup>3</sup>/30 min. As taxas de infiltração inferiores a 100 cm<sup>3</sup>/30 min, presentes nos pontos 3, 7 e 8, se devem a posição topográfica. Estes solos, por estarem localizados nas porções médias das vertente e em declives superiores a 13%, são solos rasos e que possuem menor capacidade de infiltração. Já os solos presentes nos pontos 1, 2, 6, 9, 10 e 5, por estarem localizados nas áreas de alta vertentes e em planícies aluviais, são solos profundos, os quais apresentam maior capacidade de infiltração (100 e 300 cm<sup>3</sup>/30 min). Na bacia do Monjolo Grande, as baixas taxas de infiltração relacionam-se a solos pouco profundos e a processos de selamento/encrostamento da superfície. Os Neossolos Quartzarênicos localizados no setor a montante da bacia do Jacutinga (pontos 1 a 4) apresentaram taxas de infiltração superiores às da bacia do Monjolo Grande, entre 500 e 1.800 cm<sup>3</sup>/30 min.

É válido ressaltar que nos setores de ocorrência dos Argissolos Vermelho Amarelos de posição topográfica de média vertente e declives mais acentuados, como no ponto 3, as perdas das camadas superficiais de solo por erosão hídrica (Figura 45 a Figura 52) fazem com que os solos apresentem caráter câmbico. Estes solos tornam-se cada vez mais rasos, exibindo menor capacidade de infiltração e maior potencial erosivo. Os pontos 11, 12 e 13, devido às suas posições topográficas de baixa vertente, transicionam de Argissolos Vermelho Amarelos para o setor de planície aluvial. Neste setor, verificou-se *in loco*, pacote deposicional espesso entre 4 e 9 m de profundidade. Este pacote deposicional e a unidade pedológica correspondente foram negligenciados em função da escala de mapeamento.



Assim, a partir dos mapeamentos pedológicos das áreas de estudo, apresentados nas Figura 4 e Figura 5, a análise da distribuição dos solos nas bacias hidrográficas é dada pelas Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22. Classes de solo e respectivas áreas de ocorrência na bacia do ribeirão Jacutinga.

<b>Bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga</b>	<b>Área</b>	
	<b>(Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
<b>Classes de solo</b>		
Neossolo Quartzarênico Órtico, distrófico, A moderado, relevo suave ondulado	8,86	30,41
Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico/distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo suave ondulado	8,38	28,94
Neossolo Flúvico	2,51	8,69
Neossolo Litólico, A incipiente, relevo ondulado a forte ondulado	0,12	0,43
Cambissolo Háptico eutrófico/distrófico, A moderado, textura argilosa, relevo suave a ondulado	8,81	30,41
Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo suave ondulado	0,33	1,13
<b>TOTAL</b>	<b>28,96</b>	<b>100</b>

Tabela 23. Classes de solo e respectivas áreas de ocorrência na bacia do córrego Monjolo Grande.

<b>Bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande</b>	<b>Área</b>	
	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>
<b>Classes de solo</b>		
Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, A moderado, textura franco arenosa, relevo ondulado a forte ondulado.	12,76	44,0
Neossolo Quartzarênico Órtico, distrófico, A moderado, relevo suave ondulado/ondulado	7,3	25,16
Cambissolo Háptico, distrófico, A moderado, textura franco arenosa, relevo forte ondulado.	6,41	22,11
Neossolo Litólico, distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado a montanhoso	2,44	8,42
Latossolo Vermelho Amarelo, distrófico, A moderado, textura franco, relevo suave ondulado	0,09	0,31
<b>TOTAL</b>	<b>29,00</b>	<b>100</b>

Na bacia do ribeirão Jacutinga, 59,3% da área é composta por solos derivados dos argilitos da formação Corumbataí. Desses, 30,4% associada ao Cambissolo Háptico, e 28,9% aos Argissolos Vermelho Amarelos. A porção norte concentra 30,41 % dos Neossolos Quartzarênicos da bacia, relativo à formação Pirambóia.

Os Cambissolos, com posição topográfica indo desde média até baixa vertente, se caracterizaram por profundidade inferior a 60 cm, sendo um solo raso, de alta cerosidade e teores de argila elevados (superior a 40%). Os perfis homogêneos com estruturas preservadas em relação à sua litologia se diferenciaram dos Argissolos pela ausência de gradiente textural. Seguindo para o setor sul da bacia, a faixa de ocorrência dos Cambissolos se alarga, sendo estes observados nas altitudes mais baixas. Verificou-se em campo a classe de Cambissolos

distribuída em faixas estreitas, associada a declividades mais acentuadas, no contato com a planície fluvial. No entanto, apesar da constatação destas unidades, não foram representadas no mapa em função da escala.

Em menor expressão encontram-se os Neossolos Flúvicos (aproximadamente 8,7% da área), diretamente associados às redes de drenagens, observados em locais de baixa declividade e em largas planícies de inundação, as quais possuem maior ocorrência no médio e baixo curso do ribeirão Jacutinga. Também encontramos os Latossolos Vermelho Amarelos (1,13%), diretamente associados às características geológicas da formação Rio Claro, e os Neossolos Litólico (0,43%), identificados em setores de declividades acentuadas, próximos aos canais de drenagens, uma vez que a formação Corumbataí é soleira dos cursos d'água inclusive dos canais de primeira ordem, também não foi representada no mapa pedológico em função da escala, como é apresentada na Figura 43. Evidencia-se também feições de abatimento de superfície, como exemplo a Figura 44, setor próximo às parcelas experimentais JP1 e JP2.



Figura 43. Afloramento da formação Corumbataí, soleira do canal de primeira ordem, no setor das parcelas experimentais JP1, JP2 e JSE.



Figura 44. Feições de abatimento de superfície no setor próximo às parcelas experimentais JP1 e JP2.

Na bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande predominam os solos arenosos com ocorrência em mais de 90% da área, representados expressivamente pelas classes pedológicas dos Argissolos Vermelho Amarelos – fase arenosa (44%), dos Neossolos Quartzarênicos (25,16%), e dos Cambissolos Háplicos (22,11%). Estes solos são oriundos da formação Pirambóia, e em menor escala, da formação Botucatu.

As características de relevo ondulado a fortemente ondulado, declividades superiores a 13%, e o predomínio de vertentes convexas, associados aos gradientes texturais obtidos pelo levantamento de solos e análise física de amostras, atribuíram à 44% da área total da bacia solos do tipo Argissolos franco-arenosos.

A princípio, muitas das unidades pedológicas foram associadas aos Neossolos Quartzarênicos. No entanto, após excursões a campo, verificou-se que muitas destas unidades deveriam compor a classe dos Cambissolos Háplicos, em função do predomínio de declividades superiores a 20% e profundidades inferiores 60 cm, especialmente em topografias de média e baixa vertente. Apesar de homogêneos, alguns perfis apresentaram ausência de horizonte A, indicando superfície arrasada por processos erosivos. Em menor expressão, identificou-se a ocorrência de Neossolos Litólicos (8,4%), evidenciada pela associação a declividades acentuadas, superiores a 40%, principalmente nos relevos residuais do setor noroeste da bacia.

Ressalta-se a identificação de feições erosivas lineares com destaque para àquelas distribuídas na vertente específica das parcelas experimentais na bacia do Monjolo Grande, no setor coincidente à transição entre Neossolo Quartzarênico e Argissolos - fase arenosa, foram

identificados processos de abatimento de superfície e sulcos erosivos associados a caminho de gado, conforme as Figura 45, Figura 46 e Figura 47. Na baixa vertente, a concentração dos fluxos pelo carreador situado entre os cultivos de pastagem e cana-de-açúcar provocou o aprofundamento acelerado de ravinamentos, inclusive com pontos de afloramento rochoso, vide as Figura 48, Figura 49 e Figura 50. Além da ocorrência de voçoroca, conforme as Figura 51 e Figura 52.



Figura 45. Sulcos erosivos associados à caminho de gado. Fonte: Edvania Ap. Corrêa.



Figura 46. Sulcos erosivos associados à caminho de gado em pastagem degradada. Fonte: o autor.



Figura 47. Abatimento de superfície e sulcos erosivos. Fonte: Laudimilla Leite.



Figura 48. Exposição da rocha (form. Pirambóia) e feições lineares pela concentração de enxurrada no carreador. Fonte: Edvania Ap. Corrêa.



Figura 49. Ravinamento no carregador, entre cultivos por pastagem e cana-de-açúcar.  
Fonte: o autor.



Figura 50. Feição linear no carregador, com aprofundamentos pontuais por turbilhonamento.  
Fonte: Edvania Ap. Corrêa.



Figura 51. Braços de avanço de voçoroca. Fonte: o autor.



Figura 52. Sulcos profundos associados à ocorrência de voçoroca. Fonte: o autor.

Verificou-se ainda que, apesar da formação Corumbataí ocupar parte representativa na bacia do ribeirão Monjolo Grande, sendo soleira da maior parte dos canais de primeira ordem, esta é recoberta por espessos pacotes deposicionais. Os vales encaixados são contornados por amplos depósitos, suavizando o relevo das planícies de inundação pelo acúmulo de sedimentos soltos.

A análise da capacidade de infiltração e da resistência mecânica à penetração foi significativa na compreensão do comportamento erosivo das bacias, principalmente no que se refere à dinâmica de circulação de água no solo. O aumento das concentrações de argila nas camadas de subsuperfície foi o principal responsável pela maior resistência à penetração na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga.

Por meio da análise da capacidade de infiltração, os cultivos de cana-de-açúcar e pastagens degradadas indicaram serem as principais coberturas responsáveis pela redução das taxas de infiltração. Além das práticas de manejo inadequadas, colheita mecanizada e sem pousio, e a ausência ou baixa densidade de cobertura de superfície durante o início do desenvolvimento das culturas anuais, como é o caso da cana-de-açúcar, favorecem processos de selamento e encrostamento, reduzindo a capacidade de infiltração de água no solo.

### **5.3. Mapa de forma da vertente**

Conforme a proposta de cartografia geomorfológica de Ross (1992), foi realizado o mapeamento do tipo de vertente pelo 5º Táxon da classificação. Este mapeamento, da bacia do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande, é apresentado na Figura 53. A distribuição das áreas para cada forma de vertente é apresentada na Tabela 24.

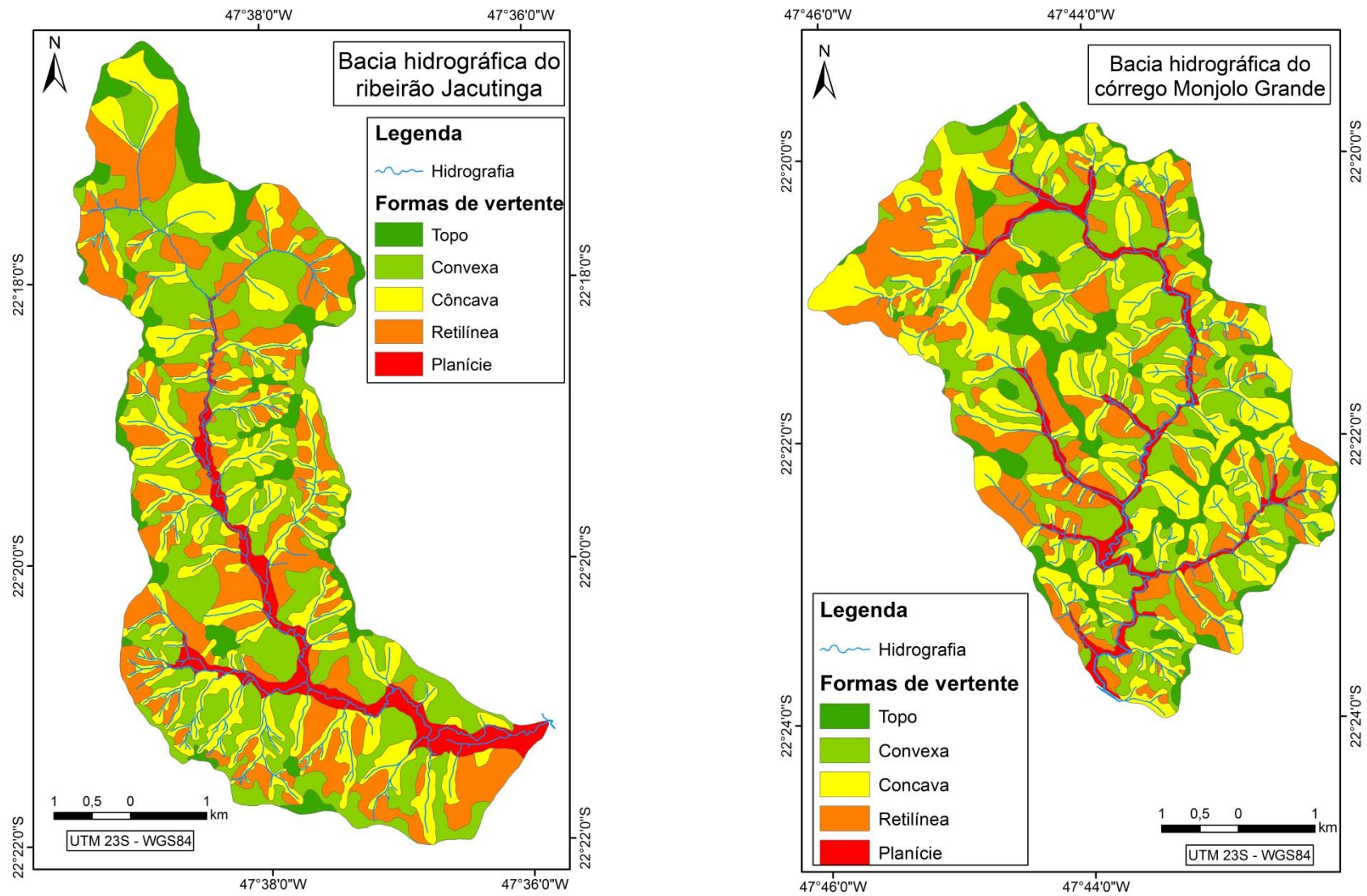


Figura 53. Mapeamento de forma da vertente das bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.



Tabela 24. Distribuição de forma de vertente das áreas de estudo.

Formas de vertente	Bacia do ribeirão Jacutinga		Bacia do córrego Monjolo Grande	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Topo	4,04	13,05	2,73	9,34
Convexa	8,86	28,63	7,74	26,49
Côncava	8,39	27,11	10,45	35,76
Retilínea	7,71	24,91	6,59	22,55
Planície	1,95	6,30	1,71	5,85

Em termos gerais, a bacia do ribeirão Jacutinga apresenta áreas com vertentes convexas, côncavas e retilíneas em proporções similares, de 28,63%, 27,11% e 24,91%, respectivamente. Enquanto que a configuração da bacia do Monjolo Grande apresenta predomínio de vertentes côncavas, distribuída em 35,76% da área. Em seguida há proporções das vertentes convexas de 26,49%, e vertentes retilíneas de 22,55% da área, menores áreas em relação a bacia do Jacutinga. As áreas de topo e planície são superiores na bacia do Jacutinga, com 13,05% e 6,3%, em comparação com a bacia do Monjolo Grande, com 9,34% e 5,85%, respectivamente. Em ambas as bacias, as áreas de planície são distribuídas de forma irregular, com faixas de ocorrência que tendem a se alargarem no sentido jusante.

#### 5.4. Alteração da superfície do solo a partir de pinos de erosão

As parcelas experimentais na bacia do Jacutinga foram monitoradas mensalmente de junho/2013 a maio/2014 em cana-de-açúcar e solo exposto, e de junho/2013 a agosto/2014 em pastagem e vegetação ripária. Na bacia do córrego do Monjolo Grande as medições foram de julho/2013 a junho/2014, em cana-de-açúcar e solo exposto, e de julho/2013 a agosto/2014 em pastagem e vegetação ripária. As chuvas registradas no ano experimental são apresentadas na Figura 54.



Figura 54. Registro pluviométrico do período experimental das bacias hidrográficas (BH) do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande.

Por meio do monitoramento das parcelas experimentais, a partir dos registros da alteração do nível da superfície do terreno, buscou-se avaliar o comportamento erosivo de Argissolos Vermelho Amarelos e Cambissolos Háplicos da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga, e de Neossolos Quartzarênicos e Cambissolos Háplicos da bacia do córrego Monjolo Grande.

A determinação da alteração da superfície do solo, com as respectivas classes de declividade, uso da terra, forma de vertente, média de alteração da superfície do solo (h), densidade aparente do solo (Ds), bem como a soma das perdas, a soma da deposição e o aporte de sedimentos (ton/ha), é dada pela Tabela 25 para a bacia do ribeirão Jacutinga, e pela Tabela 26 para a bacia do córrego Monjolo Grande. Os valores negativos foram atribuídos às perdas e os positivos à deposição. O balanço entre perdas e deposição foi determinado pelo aporte de sedimentos (aporte).

Tabela 25. Resultado da soma das perdas, soma da deposição e aporte das parcelas experimentais na bacia do córrego do Jacutinga, com as respectivas classes de declividade (%), extensão da vertente L (m), forma de vertente, uso da terra, período experimental, precipitação total (mm), alteração média da superfície do solo h (cm) e densidade aparente Ds (kg/dm<sup>3</sup>).

Nome	Classe Decliv. (%)	L linear (m)	Forma da vertente	Uso da terra	Período Experim.	Prec. Total (mm)	h média (cm)	Ds (kg/dm <sup>3</sup> )	Soma das Perdas (ton/ha)	Soma da Deposição (ton/ha)	Aporte (ton/ha)
JC1	3 - 8	456	Côncava	Cana	Jul/2013 – mai/2014	1.068	0,268	1,55	<b>-0,02176</b>	<b>0,025916</b>	<b>0,004154</b>
JC2	8-20	130	Côncava	Cana	Jul/2013 – mai/2014	1.068	-0,904	1,55	<b>-0,01872</b>	<b>0,004712</b>	<b>-0,01401</b>
JC3	8-20	454	Convexa	Cana	Jul/2013 – mai/2014	1.068	-1,72	1,59	<b>-0,03091</b>	<b>0,003562</b>	<b>-0,02735</b>
JC4	3 - 8	700	Convexa	Cana	Jul/2013 – mai/2014	1.068	-2,012	1,6	<b>-0,03251</b>	<b>0,00032</b>	<b>-0,03219</b>
JP1	8-20	531	Convexa	Pasto	Jul/2013 – ago/2014	1.093	-1,288	1,45	<b>-0,02181</b>	<b>0,003132</b>	<b>-0,01868</b>
JP2	8-20	536	Côncava	Pasto	Jul/2013 – ago/2014	1.093	-3,868	1,45	<b>-0,05609</b>	<b>0</b>	<b>-0,05609</b>
JP3	3 - 8	948	Retilínea	Pasto	Jul/2013 – ago/2014	1.093	-1,304	1,51	<b>-0,045</b>	<b>0,025308</b>	<b>-0,01969</b>
JSE	3 - 8	190	Retilínea	Solo Exp.	Jul/2013 – mai/2014	1.068	-1,396	1,57	<b>-0,02499</b>	<b>0,003077</b>	<b>-0,02192</b>
JM1	3 - 8	174	Vale	Veg. ripária	Jul/2013 – ago/2014	1.093	-4,45654	1,5	<b>-0,06685</b>	<b>0</b>	<b>-0,06685</b>
JM2	8-20	475	Vale	Veg. ripária	Jul/2013 – ago/2014	1.093	-2,39891	1,5	<b>-0,03598</b>	<b>0</b>	<b>-0,03598</b>

Tabela 26. Resultado da soma das perdas, soma da deposição e aporte das parcelas experimentais na bacia do córrego Monjolo Grande, com as respectivas classes de declividade (%), extensão da vertente L (m), forma de vertente, uso da terra, período experimental, precipitação total (mm), alteração média da superfície do solo h (cm) e densidade aparente Ds (kg/dm<sup>3</sup>).

Nome	Classe Decliv. (%)	L linear (m)	Forma da vertente	Uso da terra	Período Experim.	Prec. Total (mm)	h média (cm)	Ds (kg/dm <sup>3</sup> )	Soma das Perdas (ton/ha)	Soma da Deposição (ton/ha)	Aporte (ton/ha)
MC1	13 - 20	70	Côncava	Cana	Ago/2013 – jun/2014	1.057	-6,748	1,64	<b>-0,1148</b>	<b>0,004133</b>	<b>-0,11067</b>
MC2	20 - 45	93	Convexa	Cana	Ago/2013 – jun/2014	1.057	-3,02	1,59	<b>-0,05336</b>	<b>0,005342</b>	<b>-0,04802</b>
MC3	20 - 45	70	Côncava	Cana	Ago/2013 – jun/2014	1.057	1,128	1,57	<b>-0,06764</b>	<b>0,085345</b>	<b>0,01771</b>
MC4	13 - 20	55	Convexa	Cana	Ago/2013 – jun/2014	1.057	0,056	1,55	<b>-0,01438</b>	<b>0,015252</b>	<b>0,000868</b>
MP1	13 - 20	92	Côncava	Pasto	Ago/2013 – ago/2014	1.076	-1,336	1,15*	<b>-0,03441</b>	<b>0,019044</b>	<b>-0,01536</b>
MP2	13 - 20	150	Convexa	Pasto	Ago/2013 – ago/2014	1.076	0,232	1,15*	<b>-0,01058</b>	<b>0,013248</b>	<b>0,002668</b>
MP3	20 - 45	41	Côncava	Pasto	Ago/2013 – ago/2014	1.076	2,632	1,43	<b>-0,00206</b>	<b>0,039697</b>	<b>0,037638</b>
MP4	20 - 45	102	Convexa	Pasto	Ago/2013 – ago/2014	1.076	0,432	1,43	<b>-0,02997</b>	<b>0,037066</b>	<b>0,007098</b>
MSE	13 - 20	220	Mista	Solo Exp.	Ago/2013 – jun/2014	1.057	1,620522	1,64	<b>-0,00447</b>	<b>0,031046</b>	<b>0,026577</b>
MM1	20 - 45	310	Vale	Veg. ripária	Ago/2013 – ago/2014	1.076	-4,748	1,33*	<b>-0,07592</b>	<b>0,012768</b>	<b>-0,06315</b>
MM2	13 - 20	243	Vale	Veg. ripária	Ago/2013 – ago/2014	1.076	-2,684	1,27*	<b>-0,04135</b>	<b>0,007264</b>	<b>-0,03409</b>

\*Densidade do solo pelo método da proveta

Em termos gerais, as parcelas experimentais da bacia do Jacutinga registraram ao longo do período experimental perdas variando entre 0,01 a 0,066 ton/ha, deposição entre 0 a 0,025 ton/ha, enquanto o balanço entre perdas e deposição determinado pelo aporte variou entre +0,004 a -0,066 ton/ha, apresentando amplitudes de 0,056, 0,025 e 0,07, respectivamente. A bacia do Monjolo Grande apresentou variação de perdas entre 0,004 e 0,1 ton/ha, deposição entre 0,004 e 0,085, e aporte de +0,00086 a -0,11 ton/ha. Nesta bacia, a amplitude das classes foi de 0,096, 0,081 e 0,1108.

Tendo como referência todo o período experimental, constatou-se maior dinâmica nos processos de desprendimento e transporte de partículas nos solos da bacia do ribeirão Monjolo Grande, evidenciada pela maior amplitude dos valores registrados nas parcelas experimentais, em termos de perdas, deposição e aporte. Este comportamento é motivado pela composição granulométrica dos Neossolos Quartzarênicos e Argissolos Vermelho Amarelos – fase arenosa da referida bacia.

A análise granulométrica da vertente experimental apresentada na Tabela 19, identificada pelos pontos amostrais 9, 10, 11, 12 e 13, obtiveram 57,8, 61,5, 61,8, 58,4, e 47% da fração de areia fina, e 9,8, 8,7, 6,5, 6,3, e 8,6% de silte, respectivamente. Por sua vez, na comparação com a composição granulométrica da vertente experimental da bacia do ribeirão Jacutinga, dada pela Tabela 16, que apresenta os pontos amostrais 5, 6, 7 e 8, as frações de areia fina e silte foram respectivamente de 31, 41, 37 e 20% e 5, 9, 13,8 e 30,7%.

Com exceção da fração silte do ponto 8, de 30,7%, todas as amostras da bacia do Jacutinga apresentam composição de areia fina e argila bastante inferiores quando comparadas à composição granulométrica da vertente experimental do Monjolo, corroborando a apreciação da maior suscetibilidade erosiva desta última. Enquanto as partículas mais grosseiras de areia resistem ao transporte, a fração argila tende a resistir ao desprendimento, de modo que, as frações de areia fina e muito fina, e também a composição por silte, tornam os solos mais erodíveis, frágeis e suscetíveis à dinâmica erosiva. As Figura 55, Figura 56 e Figura 57 ilustram a presença de grãos soltos e mobilização de areia fina.



Figura 55. Remobilização de areia fina na parcela MC1. Fonte: o autor.



Figura 56. Acúmulo de areia fina próximo à parcela MC4. Fonte: o autor.



Figura 57. Transporte de frações finas no carreador, próximo à parcela MC2. Fonte: o autor.

A média de perdas, deposição e aporte na bacia do Jacutinga, foi respectivamente de -0,04, 0,01 e -0,03 ton/ha, enquanto na bacia do Monjolo Grande esses valores foram de -0,04, 0,02 e -0,02 ton/ha. Constatou-se que a média de perda de solo foi semelhante para as duas bacias, no entanto, os maiores valores de deposição nas parcelas da bacia do Monjolo Grande evidenciam uma maior amplitude dos registros, denotando maior dinâmica nos processos hidrosedimentológico nesta bacia. Estes valores também evidenciam uma maior suscetibilidade erosiva desta bacia, justificada principalmente pela granulometria predominante de areia fina, baixa estruturação e alta friabilidade. Aliado a estes fatores, declividades mais elevadas e baixos teores de matéria orgânica, o vigor de vegetação na bacia do Monjolo Grande é menor.

Nas parcelas localizadas em cana-de-açúcar, verificou-se um aporte entre -0,01 a -0,03 ton/ha (amplitude de 0,02) na bacia do Jacutinga, e de +0,0008 a -0,11 ton/ha (amplitude de 0,1108) na bacia do córrego do Monjolo. Neste cultivo, o maior potencial natural de erosão dos solos arenosos é destacado pelo aumento da suscetibilidade erosiva em cerca de 5 vezes em relação aos solos argilosos. Aliado às condições de solos mais erodíveis das unidades de Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Vermelho Amarelos – fase arenosa e Cambissolos Háplicos – fase arenosa da bacia do Monjolo Grande, as características de maior declividade e menores comprimentos de rampa (variando entre 55 a 93 m enquanto no Jacutinga esteve entre 130 e 700 m) favorecem um maior aporte de sedimentos. O preparo do solo e o manejo convencional da cana-de-açúcar, com ausência de cobertura morta, e as condições intrínsecas do solo indicaram menor desenvolvimento vegetativo, e contribuíram para uma maior dinâmica erosiva no Monjolo Grande.

Neste sentido, Corrêa (2015), aplicando o método da fotocomparação nas mesmas parcelas experimentais, concluiu que as parcelas localizadas na bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande apresentaram menor percentagem de cobertura vegetal pela cana-de-açúcar quando da comparação com as parcelas localizadas na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga. Este fato é evidenciado pela maior percentagem de área descoberta das parcelas, sendo para os Cenários 1 (novembro/13) e 2 (abril/14) de 70 e 6,7% para a bacia do córrego Monjolo Grande, e de 33% e 0,7% para a bacia do ribeirão Jacutinga, respectivamente. A densidade de cobertura e o percentual de superfície vegetada confirmam o maior grau de proteção do solo a processos erosivos.

No entanto, quando comparados aos resultados obtidos nas áreas de pastagem, a diferença do aporte de sedimento entre as bacias torna-se menos evidente. Enquanto que na bacia do Jacutinga o aporte variou entre -0,018 a -0,056 ton/ha (amplitude de 0,038), na bacia do Monjolo a variação foi de +0,002 a -0,015 ton/ha (amplitude de 0,017). Apesar das características erosivas das áreas de pastagem no Monjolo Grande, principalmente dada por feições lineares apresentadas nas Figura 45, Figura 46 e Figura 49, o aporte de sedimento neste cultivo foi inferior. Acredita-se que as condições de manejo tenham favorecido tais resultados. Enquanto nesta bacia foi realizado manejo entre 2004 e 2005, com curvas de nível e controle de manejo de gado por lote, a bacia do Jacutinga não apresenta registros de manejo em pasto.

Nas áreas de vegetação ripária, o aporte de sedimentos das bacias demonstrou comportamento erosivo bastante semelhante. A bacia do Jacutinga representou aporte entre -

0,035 e -0,066 ton/ha, e a do Monjolo de -0,03 e -0,063 ton/ha. Respectivamente, a amplitude dos registros foi de 0,031 e 0,033, com comportamento predominantemente erosivos. As parcelas de solo exposto, por sua vez, apresentaram aporte de sedimentos de 0,021 e de 0,026 ton/ha.ano, para a bacia do Jacutinga e Monjolo, respectivamente. Porém, enquanto na bacia do Jacutinga houve o predomínio de perdas, no Monjolo esse valor está associado à ocorrência de deposição, conforme elucidou a Figura 57.

Os registros mensais das parcelas experimentais e das chuvas totais mensais (mm) são comparados nas Figura 58, para a bacia do Jacutinga, e Figura 59 para a bacia do Monjolo Grande.



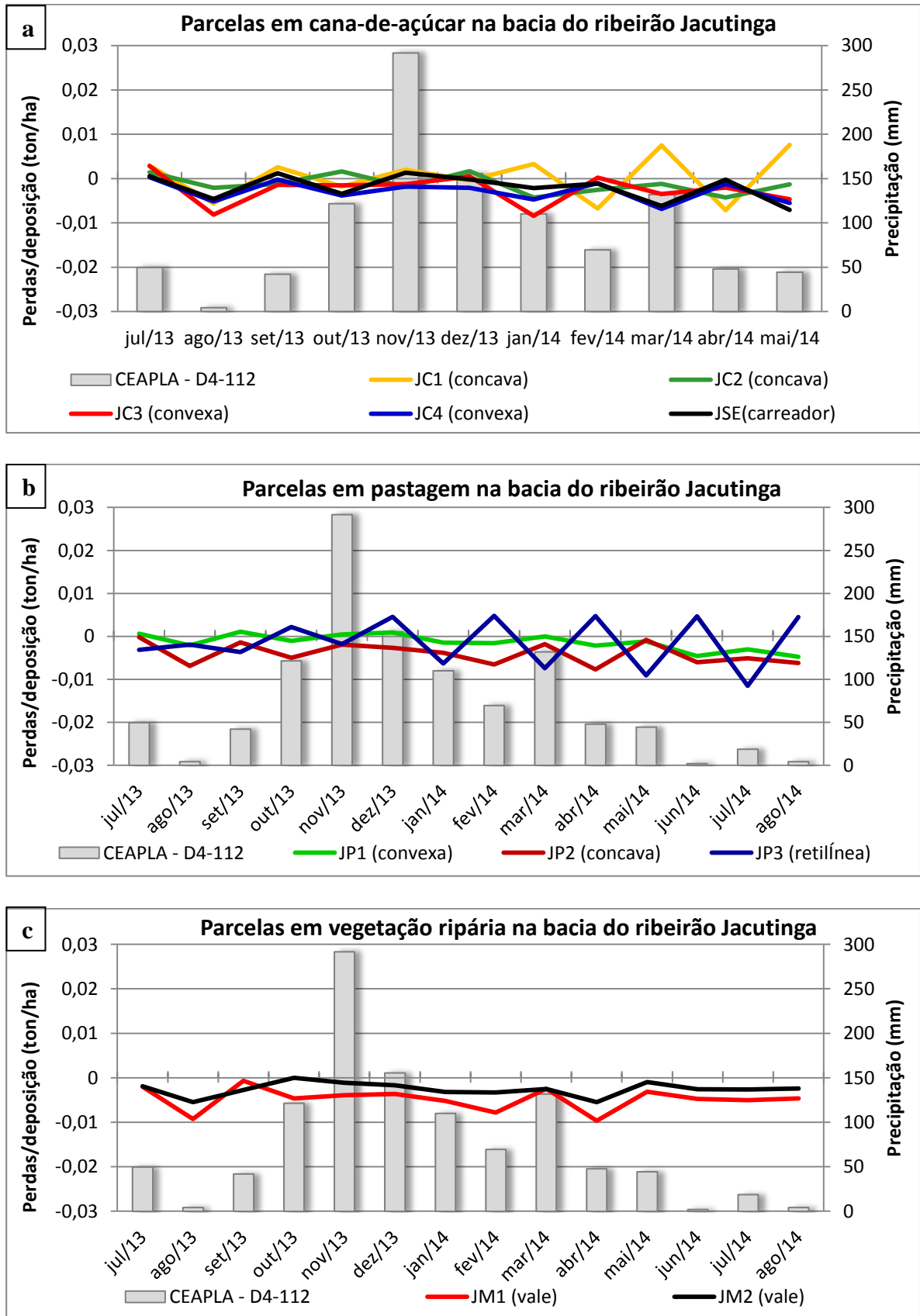


Figura 58. Alteração mensal da superfície do solo das parcelas da bacia do Jacutinga para as coberturas: a. Cana-de-açúcar, b. Pastagem e c. Vegetação ripária.

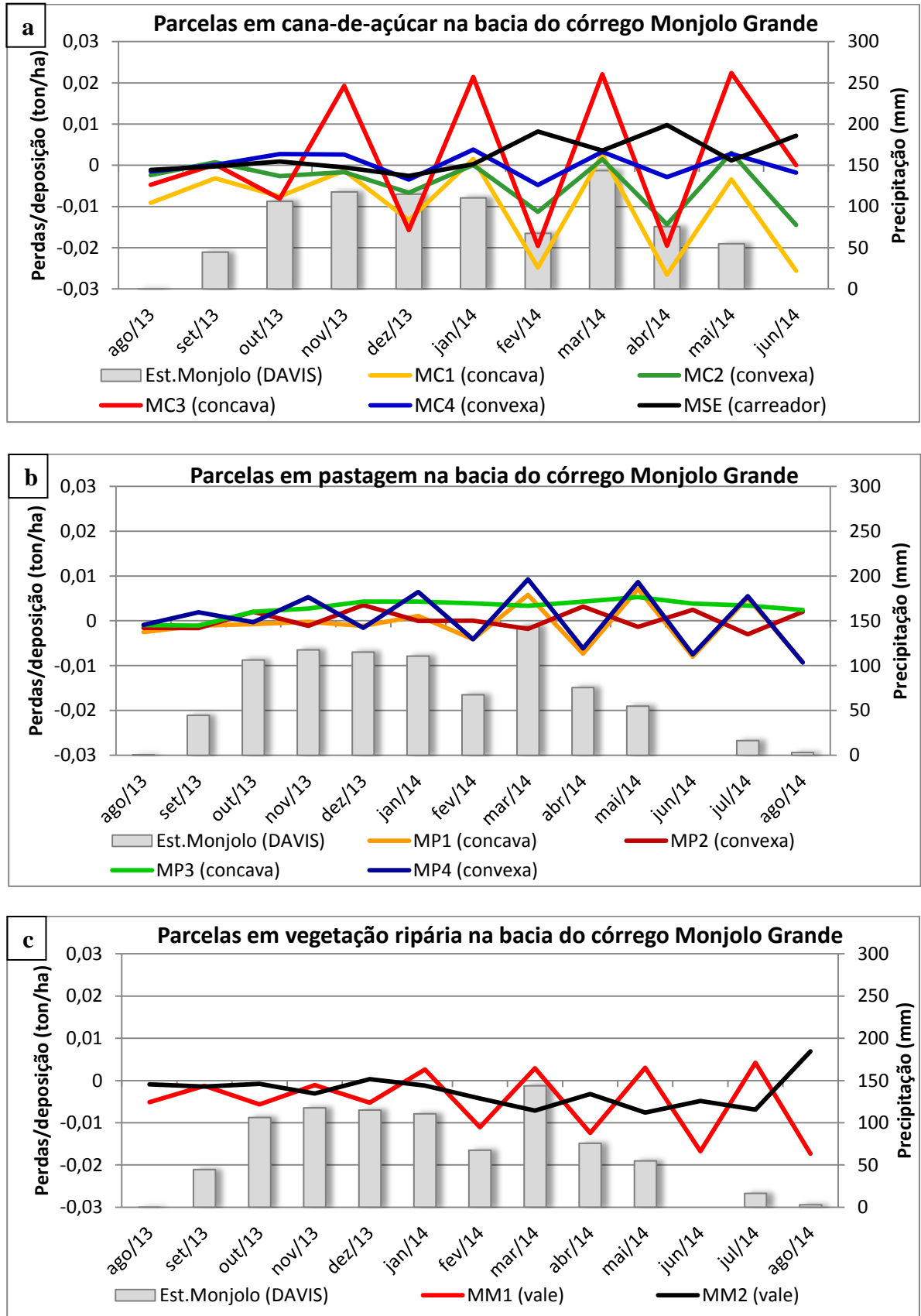


Figura 59. Alteração mensal da superfície do solo nas parcelas da bacia do Monjolo Grande para as coberturas: a. Cana-de-açúcar, b. Pastagem e c. Vegetação ripária.

Quando da comparação dos diferentes usos da terra na bacia do ribeirão Jacutinga, as perdas registradas em cana-de-açúcar foram superiores nas vertentes convexas, enquanto que nas vertentes côncavas ocorreram maiores deposições. A parcela JC4, apesar do declive suave na classe entre 3 e 8%, é a parcela de maior comprimento de rampa (700 m) neste cultivo, e foi a que apresentou os maiores registros de perda e aporte de sedimentos, e os menores valores de deposição. Estes resultados evidenciam a maior interferência do fator L em relação a S ou à forma de vertente no aporte de sedimentos. Ao longo do ano os registros mantiveram-se regulares. Este comportamento está associado às características de superfície regular ocorrentes nos estágios iniciais de crescimento da “cana planta”. O cultivo por plantio direto (“cana soca” 3º ciclo), com resíduo de palha em superfície configurou maior regularidade da superfície, mesmo nos meses iniciais de desenvolvimento fenológico.

Nas áreas de pastagem ocorreu o oposto, a maior perda se deu em JP2 de vertente côncava, e sem registro de deposição. A parcela JP3, em vertente retilínea com declive na classe de 3 a 8% e de maior comprimento de rampa de todos os experimentos (948 m), apresentou registros bastante irregulares, com a soma das perdas e da deposição acima da média apesar do aporte ter sido inferior à parcela JP1. As perdas registradas foram crescentes especialmente de janeiro a agosto de 2014, coincidindo com a ocorrência de chuvas de maior frequência, mas de menor volume e intensidade. Muitas vezes, os registros das maiores perdas não coincidem com a ocorrência de eventos erosivos intensos. Isso se deve à capacidade de desagregação das partículas em evento erosivo intenso, resultando em grãos soltos em superfície. O transporte dessas partículas é provocado pelo próximo evento erosivo, que pode ser de menor intensidade.

Os resultados obtidos nas áreas com vegetação ripária da bacia do Jacutinga concordam com observações realizadas em campo, na qual os sedimentos carreados ao longo da vertente cultivada por cana-de-açúcar ficam em grande parte retidos no início da vegetação ripária apesar da planície estreita, registrando exclusivamente perdas. As características de baixa declividade e presença de serapilheira mostraram condições estáveis e de distribuição regular das perdas ao longo do período. Tais características fortalecem a importância da adequação de técnicas de manejo e cultivos ao longo da vertente e da preservação da vegetação ripária.

Diferentemente da bacia do Jacutinga, na bacia do Monjolo Grande houve o predomínio de deposição, ocorrendo em 6 das 11 parcelas. Os resultados obtidos nas parcelas de cana-de-açúcar não apresentaram padrão regular de ocorrência em função da declividade,

comprimento de rampa ou forma de vertente. Este fato se deve à heterogeneidade do microrrelevo. Como o plantio de cultivo por cana-de-açúcar na bacia do Monjolo Grande foi realizado pelo método convencional, com ausência de resíduos vegetais e com recente reforma dos talhões, observou-se grande rugosidade na superfície do solo. A diferença de cobertura vegetal seca das bacias é apresentada na Figura 60.



Figura 60. Comparação da presença de resíduo vegetal: (a) manutenção dos resíduos vegetais na parcela JC3 e (b) plantio convencional na parcela MC1.

Assim, a irregularidade da superfície em função das características de manejo provocou as maiores variações de perda e deposição e ausência de padrão de ocorrência. A variação registrada entre as linhas de pinos evidencia estas características, e na medida em que a cultura se desenvolve, e juntamente com a ocorrência das chuvas, esta superfície passa a ser suavizada.

A distribuição das perdas e deposições em cana-de-açúcar durante o período experimental foi irregular, principalmente em função das características granulométricas, sendo evidenciado nas parcelas MC1 e MC3 situadas em áreas côncavas. A parcela MC4, de menor comprimento de rampa (L de 55 m) apresentou o menor aporte, de +0,000868 ton/ha. Nesta parcela os valores de perda e deposição tem se mostrado equilibrados, havendo pequeno predomínio de deposição.

Nas áreas de pastagem, as declividades inferiores (13 – 20%) das parcelas MP1 e MP2 apresentaram menores registros de deposição devido à localização em relevo com declives variando entre 13 a 20%. No entanto, nesta cobertura vegetal, verificou-se maior interferência do comprimento de rampa, onde as parcelas MP2 e MP4, que apresentam os maiores valores de L, foram os que tiveram menor aporte de sedimentos. Inversamente, a parcela MP3, localizada no menor comprimento de rampa (41 m), foi o que apresentou melhor regularidade de registros ao longo do período e maior aporte de sedimentos em pastagem (oposto ao que ocorreu em MC4), de +0,037 ton/ha, predominando a deposição. As

pastagens nas áreas convexas sofrem menor deposição e menor aporte de sedimentos. Nas áreas de vegetação ripária foi registrada a ocorrência de processos deposicionais, porém com o predomínio de perdas entre 0,03 e 0,063 ton/ha. Em MP1, que caracteriza-se por maior declividade e comprimento de rampa, verifica-se maior dinâmica hidrossedimentológica, e portanto, maior amplitude entre os valores de perda e deposição, com aporte de -0,06 ton/ha.

Os resultados evidenciam o fator de comprimento de rampa como sendo o principal elemento de interferência no aporte de sedimento das bacias. A questão da forma de vertente não teve interferência direta no padrão de ocorrência das perdas e deposição nas parcelas experimentais, possivelmente em função da maior suscetibilidade erosiva da bacia do Monjolo Grande. No entanto, na bacia do ribeirão Jacutinga, as vertentes côncavas, devido à maior concentração de fluxos de enxurrada, apresentam maiores registros de processos erosivos. Assim, em solos argilosos, a forma de vertente é um dos fatores responsáveis pelo comportamento do aporte de sedimentos.

No que se refere à tolerância à perda de solo, índice que reflete a perda máxima admissível tendo em vista a manutenção da produtividade do solo, Mannigel et al. (2002) calcularam para o estado de São Paulo valores extremos de tolerância de perda de 3 ton/ha.ano para Argissolos de textura média a arenosa, de 11,2 para Argissolos de textura média argilosa a muito argilosa, e de 14,7 para Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos. Bertol e Almeida (2000) calcularam para o estado de Santa Catarina os valores limite para a tolerância à perda, 0,81, 0,91 e 0,32 ton/ha.ano<sup>-1</sup> para Argissolos Vermelho Amarelo, Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos, respectivamente. Corrêa et al. (2015) calcularam para a bacia do Jacutinga valores de tolerância de 8 ton/ha.ano<sup>-1</sup> para os Argissolos, e de 5 e 10 ton/ha.ano<sup>-1</sup> para Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos, respectivamente. Para o Monjolo foram obtidos valores de tolerância de 6,3 e 10 ton/ha.ano<sup>-1</sup> para Argissolos/Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos, respectivamente.

As perdas máximas nas parcelas experimentais na bacia do Jacutinga foram de 0,066 ton/ha.ano<sup>-1</sup> (JM1) em Argissolo Vermelho Amarelo de textura média a argilosa e de 0,056 ton/ha.ano<sup>-1</sup> (JP2) em Cambissolo de textura argilosa a muito argilosa. Nas parcelas experimentais da bacia do Monjolo Grande, a perda máxima registrada foi de 0,07 ton/ha.ano<sup>-1</sup> (MM1) em Argissolo Vermelho Amarelo de textura média a arenosa, e de 0,11 ton/ha.ano<sup>-1</sup> (MC1) em Neossolo Quartzarênico. Os valores obtidos nas parcelas experimentais no período experimental são inferiores aos limites de tolerância à perda referenciados pela bibliografia. Porém, os valores de perda e deposição registrados nos experimentos podem ter sido

inferiores às perdas médias históricas das bacias, principalmente pelos índices inferiores de precipitação do referido período em comparação com as médias anuais históricas.

A metodologia de uso de parcelas experimentais de pinos de erosão para avaliação da alteração da superfície do solo apresenta limitações em função da graduação manual dos vergalhões, a técnica de obtenção dos registros, a interferência externa e a própria simplificação do método. Apesar das críticas quanto à imprecisão das estimativas, estas parcelas são de fácil implantação e monitoramento, e contribuem especialmente na avaliação da interferência do comprimento de rampa nos processos erosivos laminares.

## 5.5. Avaliação da MEUPS

### 5.5.1. Parâmetros da MEUPS

#### 5.5.1.1. Fator de erodibilidade do solo (fator K)

O cálculo da erodibilidade se deu conforme o método indireto proposto por Denardin (1990). A partir dos trabalhos realizados por Corrêa et al. (2015), e utilizando os mesmos resultados das análises granulométricas descritas nas Tabela 16 e Tabela 19, os autores analisaram 14 pontos amostrais distribuídos nas mesmas bacias de estudo. O valor médio do fator K para cada classe de solo de cada uma das bacias é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27. Valores de erodibilidade (K) para as principais classes de solos das áreas de estudo.

<b>Bacia hidrográfica</b>	<b>Classes de solo</b>	<b>K (t.ha.h/ha.MJ.mm)</b>
Jacutinga	Argissolos Vermelho Amarelos	0,0428
	Cambissolos Háplicos	0,0240
	Neossolos Quartzarênicos	0,1192
Monjolo Grande	Cambissolos Háplicos	0,0483
	Neossolos Quartzarênicos	0,0573

Fonte: Corrêa et al. (2015). Adaptado por: o autor.

Os valores de erodibilidade variaram entre 0,0240 e 0,1192 t.ha.h/ha/MJ.mm para a bacia do ribeirão Jacutinga, e de 0,0483 a 0,0573 t.ha.h/ha/MJ.mm para a do córrego Monjolo Grande. Considerando que a bacia do ribeirão Jacutinga é composta por 59,3% de Argissolos Vermelho Amarelos e Cambissolos Háplicos de textura argilosa, a média do valor de erodibilidade desta área é de 0,0334 t.ha.h/ha/MJ.mm, e 30,4% da área é composta por

Neossolos Quartzarênicos, com o valor mais elevado de erodibilidade de todo o conjunto amostral, de 0,1192 t.ha.h/ha/MJ.mm. Por sua vez, a bacia do córrego do Monjolo Grande tem 90% de sua área composta por solos arenosos, sendo atribuída média de erodibilidade de 0,0528 t.ha.h/ha/MJ.mm, denotando maior suscetibilidade erosiva destes solos.

Para as classes de solos sem o cálculo da erodibilidade, foram atribuídos valores de K das classes de solo amostradas. Assim, para a bacia do Jacutinga, as classes de Latossolo Vermelho Amarelo e Neossolo Flúvico receberam valores semelhantes aos estimados para os Neossolos Quartzarênicos, e para a classe de Neossolo Litólico, atribuiu-se os valores de K dos Cambissolos Háplicos de textura argilosa. Para a bacia do córrego Monjolo Grande, os Latossolos Vermelho Amarelos e Neossolos Litólicos receberam os valores de K dos Neossolos Quartzarênicos.

#### **5.5.1.2. Fator topográfico (fT)**

O cálculo do fT realizado a partir dos valores de L automático, conforme Desmet e Govers (1996), resultou nos mapas apresentados pela Figura 61. Para tornar os valores do fT mais representativos para as bacias hidrográficas, optou-se pela distribuição das classes por intervalo geométrico, com a definição desses intervalos de classes em função da frequência de ocorrência dos valores. Assim, para os valores com maior frequência de ocorrência foram atribuídos maior número de classes com menores intervalos. Para os valores com baixa frequência de ocorrência, principalmente referente às últimas classes, optou-se por intervalos de classe mais amplos.

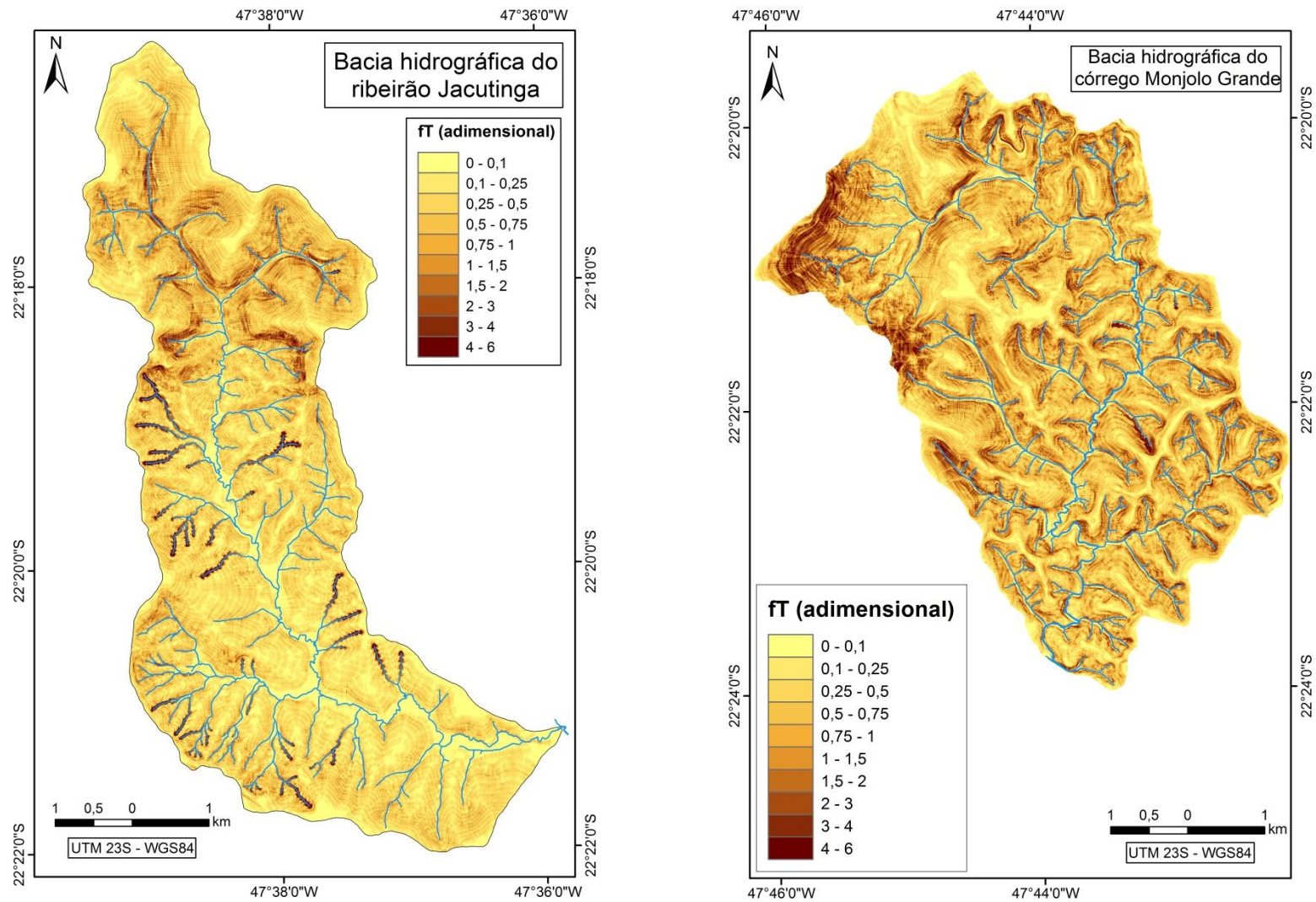


Figura 61. Fator Topográfico (fT) das bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego do Monjolo Grande.

Elaborado por: o autor.



Em escala de análise de vertente, para cada uma das parcelas experimentais foi realizado o cálculo do fT a partir dos valores de L manual, obtido por mensuração linear, com resultados apresentados na Tabela 28. Para análise comparativa, também são apresentados nesta tabela os valores de L e fT obtidos pelo método automático calculado em SIG .

Tabela 28. Fatores L (metros) e fT (adimensional) obtidos em SIG e manualmente para as bacias hidrográficas.

BH Jacutinga		SIG		MANUAL		BH Monjolo		SIG		MANUAL	
Parcela	S (%)	L (m)	fT	L (m)	fT	Parcela	S (%)	L (m)	fT	L (m)	fT
JC1	10	6,5963	0,4851	456	6,999	MC1	11	1,232	0,1831	70	2,334
JC2	8	2,1385	0,1932	130	2,569	MC2	27	3	0,9607	93	8,359
JC3	12	2,5416	0,3278	454	8,597	MC3	31	1,465	0,7199	70	8,226
JC4	4,5	3,5373	0,1226	700	3,430	MC4	16	1,465	0,3298	55	3,238
JP1	15	2,2767	0,3892	531	12,077	MP1	16,5	12,38	1,3123	92	4,643
JP2	18	2,8695	0,5872	536	15,842	MP2	17,5	3,94	0,6838	150	6,772
JP3	6,	3,7861	0,1938	948	6,311	MP3	21,5	3,41	0,7959	41	3,813
JSE	8,5	1,968	0,1882	190	3,347	MP4	20	4,098	0,8205	102	6,218
JM1	12	0,6188	0,204	174	4,867	MSE	15	5,6	0,7226	220	7,299
JM2	19	3,0075	0,6372	475	15,463	MM1	22	2,76	0,7158	310	14,015
						MM2	19	0,61	0,2297	243	9,987

Enquanto que para a bacia do Jacutinga o fator L (SIG) variou entre 0,6 e 6,6 m, para a bacia do Monjolo Grande, os valores estimados variaram entre 0,6 e 12,4 m. Quando da comparação com o método manual estes valores variaram entre 130 e 950 m, para a bacia do Jacutinga, e de 40 a 310 m, para a bacia do Monjolo Grande. Tais resultados evidenciam a presença de vertentes mais longas na bacia do Jacutinga. As declividades inferiores da bacia do Jacutinga provocaram valores de fT estimados em SIG entre 0,1 e 0,6, e pelo método manual entre 2,5 e 15,9. Para a bacia do Monjolo Grande estes valores variaram entre 0,1 e 1,3 em SIG, e entre 2,3 e 14 pelo modo manual.

Os valores de fT obtidos são coerentes com as referências de trabalhos realizados em SIG, como os Desmet e Govers (1996) e Silva (2003) com valores entre 0 e 50, e de Corrêa (2012) com valores entre 0 e 12,26, e realizados manualmente como Pinheiro (2012), com valores entre 0 e 50, e Borges (2009), com fator L entre 30 e 70 m, e fT entre 0,1 e 2,6. Ressalta-se que a variação dos valores de L e fT se deve tanto às características das bacias como aos métodos de análise, que apontaram a interferência destes parâmetros no

desempenho dos modelos, dado pela validação com as perdas registradas em campo e coeficientes estatísticos, descritos a frente.

#### **5.5.1.3. Fator de cobertura vegetal (fator C)**

Para a obtenção do fator C foi utilizado o mapeamento do uso da terra de imagens orbitais IKONOS (01/08/2013) realizado por Couto Jr. (2013), conforme Figura 62. A distribuição das classes de uso da terra nas bacias hidrográficas é dada pela Tabela 29.

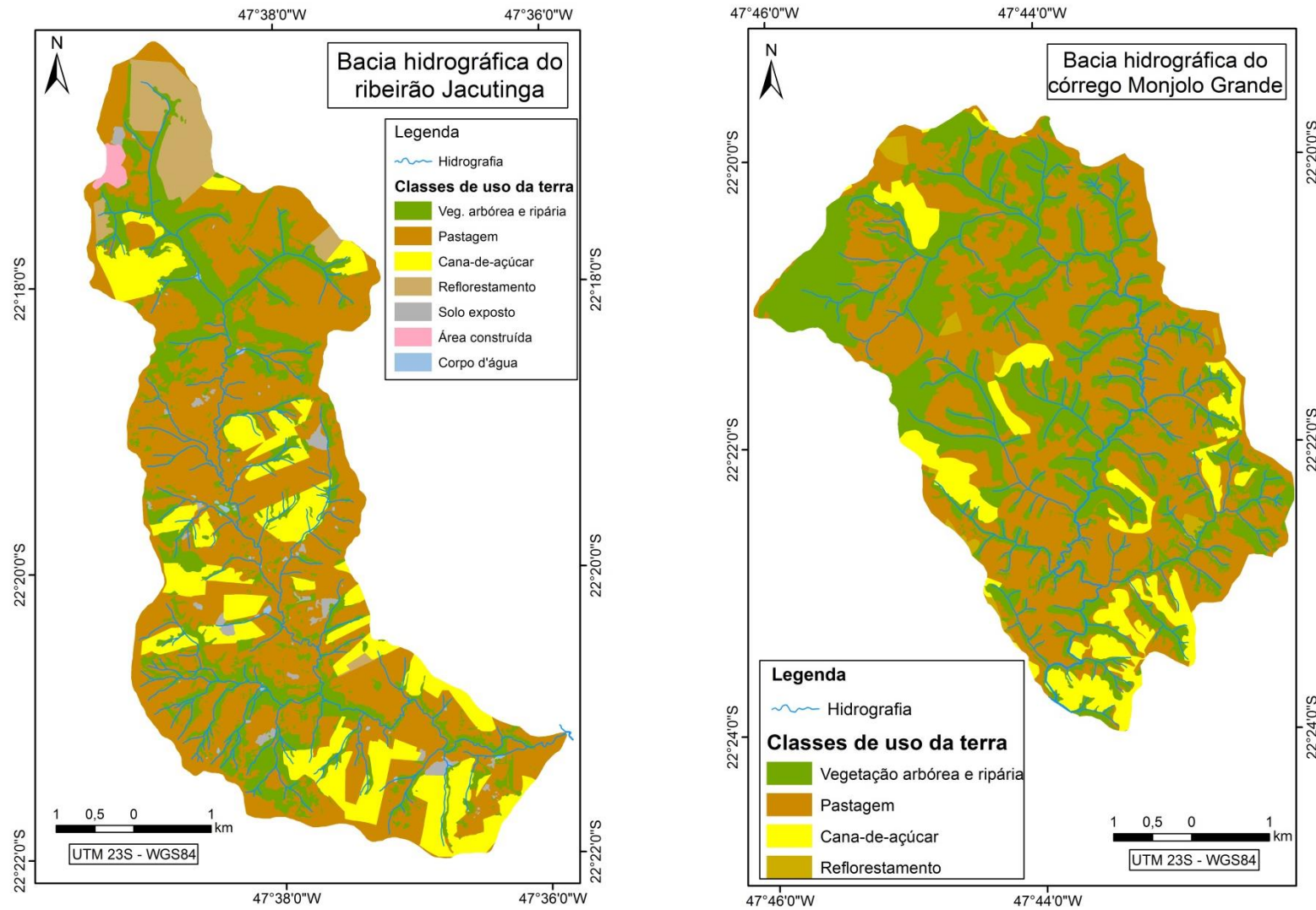


Figura 62. Mapa de cobertura e uso da terra (cenário 2013), para as bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: Antônio Coutinho Jr. Organizado por: o autor.

Tabela 29. Distribuição das classes de uso da terra nas bacias hidrográficas.

Classes temáticas	BH Jacutinga		BH Monjolo Grande	
	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Vegetação arbórea e ripária	6,54	22,79	11,74	40,61
Cana-de-açúcar	4,76	16,58	2,79	9,65
Pastagem	15,63	54,46	14,02	48,56
Reflorestamento	1,45	5,05	0,33	1,13
Solo exposto	0,33	1,15	0	0
Área construída	0,1472	0,50	-	-
Corpo d'água	0,089	0,30	-	-
<b>Total</b>	<b>28,95</b>	<b>100</b>	<b>28,87</b>	<b>100</b>

Verifica-se a partir da análise da distribuição das classes temáticas que na bacia do Monjolo Grande suas condições topográficas limitam práticas de cultivo e manejo, com área de cana-de-açúcar de 9,65% e pastagem em 48,56% da área. Da mesma forma, as declividades acentuadas contribuem para a manutenção das vegetações arbórea e ripária, distribuídas em 40,61% da área. As declividades menos acentuadas da bacia do Jacutinga possibilitam outros usos, cultivos e práticas de manejo, como é o caso das áreas de pastagem e cana-de-açúcar, com 54,5% e 16,58%, respectivamente. Em comparação com a bacia do Monjolo Grande, a bacia do Jacutinga apresenta vegetação arbórea e ripária reduzida, com apenas 22,79% de sua área.

Também, na bacia do Jacutinga foram identificadas classes menos representativas, com 0,8% da área ocupada por corpos d'água e área construída. Devido a este baixo percentual, a classe área construída foi incorporadas à classe de solo exposto, e a classe corpos d'água foi incorporada à classe de vegetação arbórea e ripária para a atribuição dos valores do fator C.

#### 5.5.1.4. Escoamento superficial (fator *runoff*)

A aquisição dos valores de *runoff* foi precedida pela obtenção dos parâmetros Tc, Sa e Q além da atribuição dos valores da CN (SCS, 1976) para as bacias em estudo em função da correspondência dos grupos hidrológicos de solo e tipos de cobertura e uso da terra.

Ressalta-se que os valores de Tc obtidos pelo método proposto por Genovez (1993), o qual contempla elementos como L, S e o grau de permeabilidade pela CN, tornam-se comuns para as simulações realizadas para o período experimental como para os eventos específicos de chuva. Os Tc obtidos variaram entre 0,1 e 15,24 (h), coerente com os

resultados referenciados por Almeida et al. (2013), os quais testaram diversos métodos de obtenção de  $T_c$  em bacias hidrográficas de porte médio, com valores estimados entre 7,9 e 43,25 (h). Tendo em vista as precipitações totais de 1.093 e 1.063 mm para as bacias do Jacutinga e do Monjolo, respectivamente, o fator *runoff* é apresentado na Figura 63.

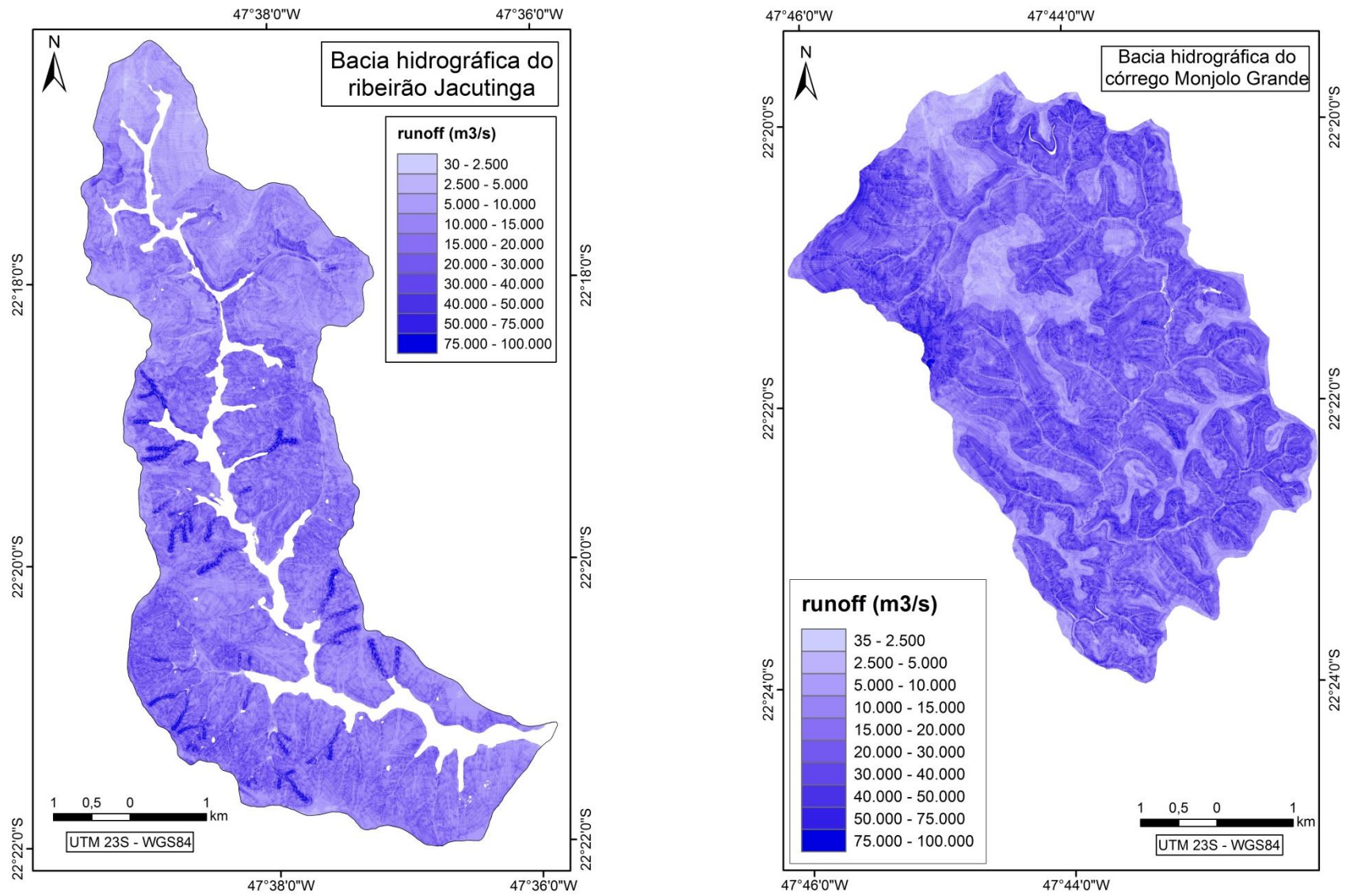


Figura 63. Fator *runoff* para as bacias do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.

No que se refere à distribuição da relação infiltração-escoamento, dada pelos valores da CN, a bacia do Jacutinga teve valores inferiores e mais homogêneos em relação à bacia do Monjolo Grande. Esta última apresentou menor grau de permeabilidade e infiltração conferidos aos valores mais elevados da CN nas áreas de Cambissolos e Argissolos, que caracterizam impedimento de drenagem. Apesar dos valores inferiores de precipitação, as características de menor comprimento de rampa e declividades mais acentuadas, fatores que compõem o cálculo do Tc, corroboraram para que a bacia do Monjolo Grande obtivesse valores de escoamento superficial predominantemente entre 15.000 e 40.000 m<sup>3</sup>/s, superiores aos obtidos na bacia do Jacutinga, entre 5.000 e 20.000 m<sup>3</sup>/s.

A ocorrência de valores de *runoff* mais elevados na bacia do Jacutinga está associada principalmente aos vales encaixados dos canais de primeira ordem nas áreas de Argissolos e Cambissolos de textura média a muito argilosa. Na bacia do Monjolo Grande, os valores de escoamento superficial se elevam principalmente no quadrante noroeste, de maior amplitude altimétrica, relativos às localidades do morro da Guarita e Bizigueli.

### **5.5.2. Predisposição ao risco de erosão gerado pela MEUPS**

Em escala de análise de bacia hidrográfica, os resultados das modelagens são apresentados em mapa temático de síntese, representando as perdas de solo para a MEUPS ao longo do ano experimental, conforme a Figura 64.

Em escala de análise de vertente, buscou-se avaliar o desempenho da MEUPS estimada em SIG e manualmente, comparando os resultados estimados com os valores obtidos pelas parcelas experimentais de pinos de erosão. Nestes dois métodos, os fatores S, K, C e P foram idênticos, conforme a Tabela 30.

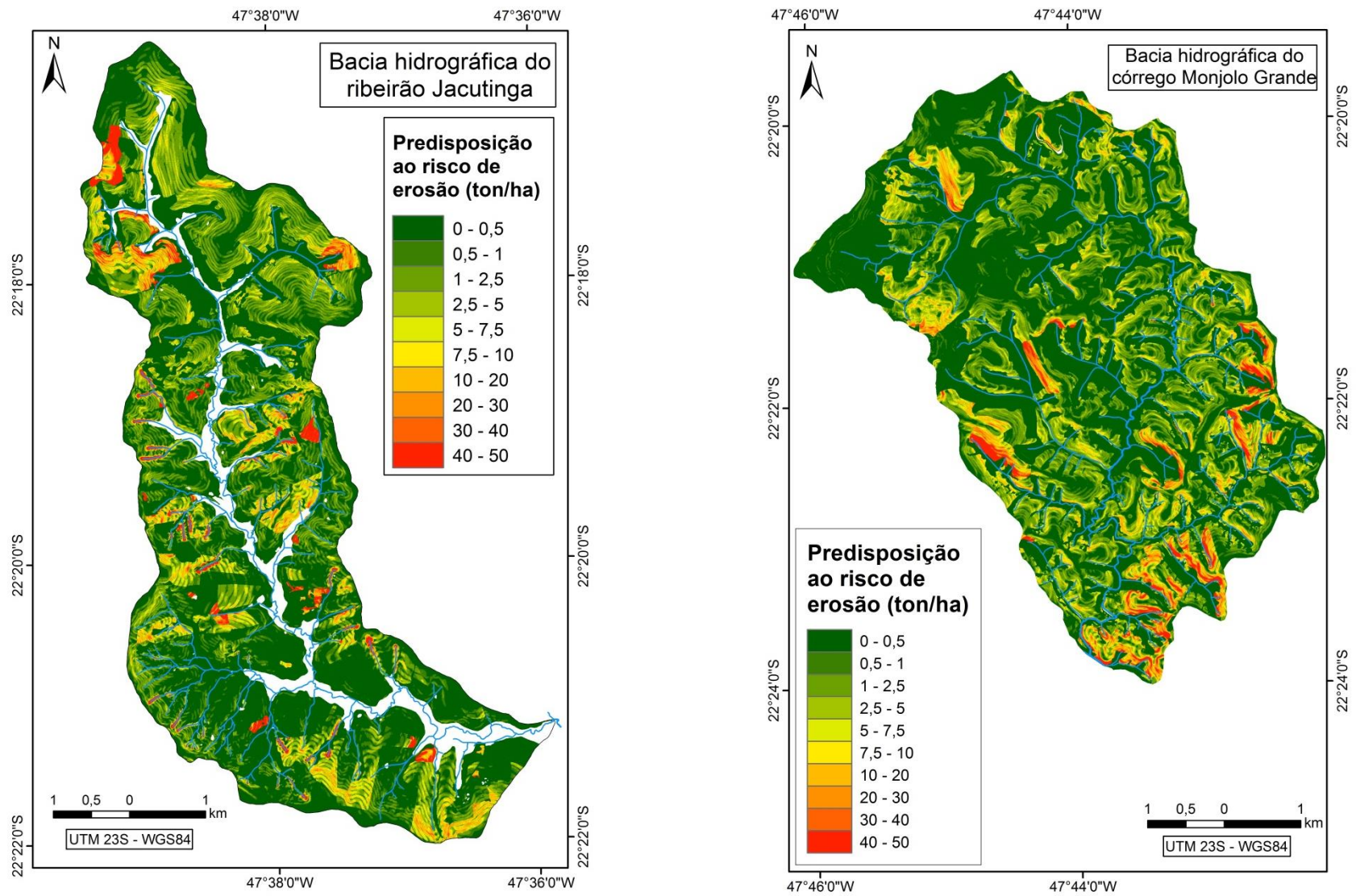


Figura 64. Predisposição ao risco de erosão (ton/ha) para a bacia do ribeirão Jacutinga e do córrego Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.



Tabela 30. Fatores S (declividade), K (erodibilidade), C (cobertura e uso da terra) e P (práticas conservacionistas) da MEUPS, das parcelas experimentais das bacias hidrográficas estudadas.

<b>Bacia hidrográfica do Jacutinga</b>						<b>Bacia hidrográfica do Monjolo Grande</b>					
Parcela	S (%)	K (t.ha.h/ha.MJ.mm)	CN	C	P	Parcela	S (%)	K (t.ha.h/ha.MJ.mm)	CN	C	P
JC1	9,94	0,04643	80	0,05	0,51	MC1	10,7	0,06975	66	0,05	0,51
JC2	8,31	0,04643	80	0,05	0,51	MC2	27	0,06975	66	0,05	0,62
JC3	11,9	0,02403	82	0,05	0,51	MC3	31	0,042795	80	0,05	0,62
JC4	4,32	0,04643	80	0,05	0,27	MC4	16	0,042795	80	0,05	0,62
JP1	14,5	0,02403	84	0,005	0,57	MP1	16,5	0,06975	49	0,005	0,62
JP2	18,2	0,02403	84	0,005	0,57	MP2	17,5	0,042795	79	0,005	0,57
JP3	6,16	0,04643	79	0,005	0,27	MP3	21,5	0,06975	49	0,005	0,57
JSE	8,49	0,04643	80	0,05	0,51	MP4	20	0,06975	49	0,005	0,62
JM1	12,2	0,04643	70	0,0001	0,51	MSE	15,2	0,0427	70	0,01	0,57
JM2	19,0	0,04643	70	0,0001	0,57	MM1	22	0,0427	70	0,0001	0,62
						MM2	18,8	0,0427	70	0,0001	0,62

A análise dos métodos utilizados foi dada pela comparação entre estimativas da MEUPS, e os valores do aporte de sedimentos e das perdas de solo registrados em campo, por meio do COE, conforme Tabela 31 e Tabela 32. Os gráficos de dispersão auxiliam na interpretação do grau de correlação amostral na comparação com o modelo simulado - Figura 65.

Tabela 31. Parâmetros L, fT, Y e perdas de solo estimadas pela MEUPS pelo método em SIG e manual, registro do aporte e perdas de solo das parcelas experimentais e COE, para a bacia do ribeirão Jacutinga.

Parcela	MEUPS SIG			MEUPS MANUAL			PERDAS (ton/ha)		PINOS (ton/ha)		COE		
	L	fT	Y	L	fLS	Y	MEUPS SIG	MEUPS MANUAL	APORTE	PERDAS	MEUPS SIG x APORTE	MEUPS MANUAL x APORTE	MEUPS MANUAL x PERDAS
JC1	6,596	0,4851	1135,889	456	6,999369	0,155225	-0,65239	-0,001286352	<b>0,004154</b>	-0,02176	-705,1877914	<b>0,95151</b>	<b>0,87195895</b>
JC2	2,139	0,1932	1702,444	130	2,569855	0,246361	-0,38942	-0,000749583	-0,01401	-0,01872	-75,67626929	<b>0,904303</b>	<b>0,889955708</b>
JC3	2,542	0,3278	2000,667	454	8,597263	0,186199	-0,40186	-0,000980917	-0,02735	-0,03091	-43,39574434	<b>0,779947</b>	<b>0,79665345</b>
JC4	3,537	0,1226	942,1	700	3,42987	0,080336	-0,0724	-0,000172711	-0,03219	-0,03251	<b>0,566331356</b>	<b>0,724942</b>	<b>0,773639395</b>
JP1	2,277	0,3892	2521,222	531	12,07766	0,210079	-0,0672	-0,000173765	-0,01868	-0,02181	-0,042088973	<b>0,848503</b>	<b>0,857288479</b>
JP2	2,87	0,5872	2578,111	536	15,84222	0,237281	-0,10368	-0,00025744	-0,05609	-0,05609	<b>0,686107653</b>	<b>0,568056</b>	<b>0,628093217</b>
JP3	3,786	0,1938	1120,88	948	6,310875	0,082307	-0,01362	-3,25581E-05	-0,01969	-0,045	<b>0,984345472</b>	<b>0,83606</b>	<b>0,687665998</b>
JSE	1,968	0,1882	1837,111	190	3,347503	0,211336	-0,40935	-0,000837595	-0,02192	-0,02499	-57,21747921	<b>0,827659</b>	<b>0,840330067</b>
JM1	0,619	0,204	2400,667	174	4,867267	0,144581	-0,00116	-1,66634E-06	-0,06685	-0,06685	<b>0,5289351</b>	<b>0,51218</b>	<b>0,573089622</b>
JM2	3,008	0,6372	1985,667	475	15,4639	0,118187	-0,00335	-4,84E-06	-0,03598	-0,03598	<b>0,746700086</b>	<b>0,692136</b>	<b>0,746390082</b>
											-87,80069535	0,76453	0,766506497

Tabela 32. Parâmetros L, fT, Y e perdas de solo estimadas pela MEUPS pelo método em SIG e manual, registro do aporte e perdas de solo das parcelas experimentais e COE, para a bacia do córrego Monjolo Grande.

Parcela	MEUPS SIG			MEUPS MANUAL			PERDAS (ton/ha)		PINOS (ton/ha)		COE		
	L	fLS	Y	L	fLS	Y	MEUPS SIG	MEUPS MANUAL	APORTE	PERDAS	MEUPS SIG x APORTE	MEUPS MANUAL x APORTE	MEUPS MANUAL x PERDAS
MC1	1,232	0,183161	2179,089	70	2,33432	0,113634888	-0,69624	-0,00047	-0,11067	-0,1148	-20,2876	<b>0,376251971</b>	<b>0,460201</b>
MC2	3	0,960707	2730,711	93	8,35889	0,168366205	-5,01444	-0,00304	-0,04802	-0,0533604	-5970,71	<b>0,657754947</b>	<b>0,7145</b>
MC3	1,465	0,719912	4605,789	70	8,226473	0,67951759	-4,47639	-0,00742	0,01771	-0,0676356	-9480198	-4,07751969	<b>0,691644</b>
MC4	1,465	0,329864	2823,767	55	3,238062	0,52271719	-1,23556	-0,00225	0,000868	-0,014384	-6460,14	<b>0,987628548</b>	<b>0,951633</b>
MP1	12,38	1,312321	559,9444	92	4,643148	0,515600703	-0,00194	-0,00052	-0,01536	-0,034408	<b>0,819816</b>	<b>0,887300069</b>	<b>0,796994</b>
MP2	3,94	0,683821	1495,611	150	6,772008	0,337360547	-0,19663	-0,00028	0,002668	-0,01058	-214,324	<b>0,987343372</b>	<b>0,959818</b>
MP3	3,41	0,79599	1157,8	41	3,813522	0,858890519	-0,1841	-0,00065	0,037638	-0,0020592	-106,487	-18,0278561	<b>0,998921</b>
MP4	4,098	0,820599	1008,867	102	6,217683	0,548306456	-0,17437	-0,00074	0,007098	-0,02996832	-392,123	<b>0,870383226</b>	<b>0,829434</b>
MSE	5,6	0,722652	1575,456	220	7,299562	0,147076607	-0,0025	-0,00026	0,026577	-0,00446935	-6,902821	-137,138646	<b>0,991363</b>
MM1	2,76	0,715858	2366,922	310	14,0156	0,155146941	-0,00509	-5,76E-06	-0,06315	-0,0759164	<b>0,465284</b>	<b>0,529032911</b>	<b>0,577071</b>
MM2	0,61	0,229752	6845,444	243	9,98696	0,1584504	-0,01154	-4,19E-06	-0,03409	-0,0413512	<b>0,799448</b>	<b>0,706830766</b>	<b>0,746747</b>
											-863033	-13,9310451	0,792575

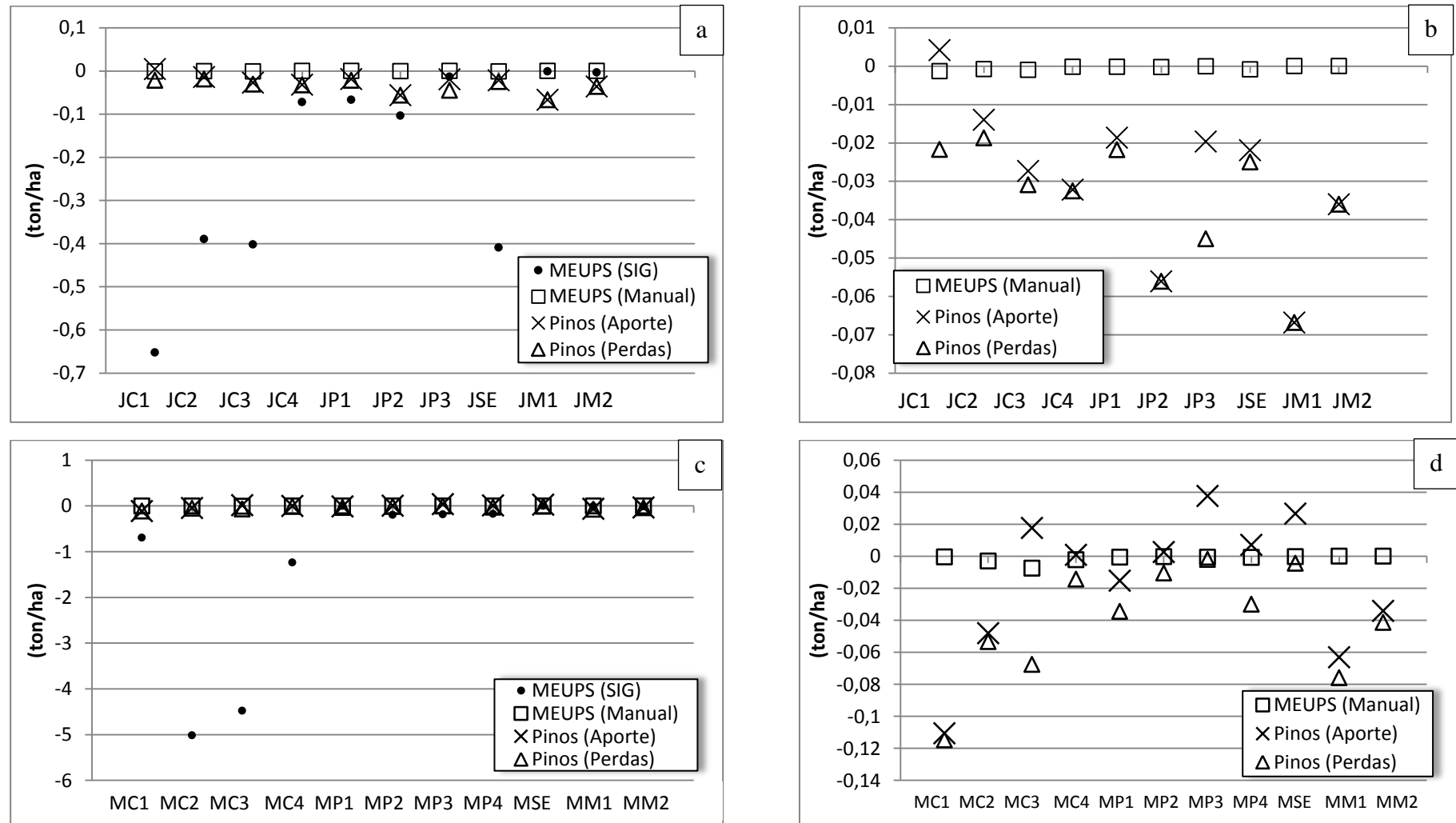


Figura 65. Gráficos de dispersão amostral do modelo MEUPS simulado em SIG e manualmente, para a bacia do Jacutinga (a e b) e do Monjolo Grande (c e d).

Para análise das simulações do modelo MEUPS, foi utilizado o COE. Em termos gerais, constatou-se que nas duas bacias o cálculo da MEUPS pelo método manual foi satisfatório, e com COEs bastante superiores em comparação com a MEUPS simulada em SIG. Tendo em vista a diferença de aquisição do fator L, sendo fT o parâmetro alterado entre os dois métodos, pode-se inferir alta sensibilidade desses parâmetros em comparação aos demais fatores da MEUPS.

Na bacia do Jacutinga, a MEUPS SIG avaliada com os registros de aporte das parcelas experimentais, teve valores do COE classificados como ‘muito bom’ apenas para 20% das parcelas (JP3 e JM2), ‘bom’ para 10% (JP2), ‘satisfatório’ para 10% (JC4), e ‘insatisfatório’ em 50% das amostras, com COEs negativos. Em comparação com a MEUPS manual obteve-se COE superior, com 60% das amostras avaliadas como ‘muito boa’, 20% ‘boa’, e 20% ‘satisfatória’, com COE médio de 0,76.

Como a MEUPS prevê perdas apenas, foi realizado o cálculo do COE não só para o aporte de sedimento das parcelas, mas também para a soma das perdas registradas. Principalmente devido ao predomínio de perdas e baixos valores de deposição na bacia do Jacutinga, o COE médio de perda de solo foi semelhante ao de aporte, de 0,76. Em 70% das amostras estimou-se COE ‘muito bom’, 20% ‘bom’, e 10% ‘satisfatório’, demonstrando a MEUPS como modelo adequado, principalmente com os cálculos de L e fT manuais.

Quando da análise da bacia do Monjolo Grande, ressalta-se o predomínio de processos deposicionais, que divergem da proposta de previsibilidade de perdas da MEUPS. Na comparação entre os valores obtidos da MEUPS em SIG e o aporte de sedimentos estimados nas parcelas com pinos de erosão, o COE de 20% das parcelas foi ‘muito bom’, 10% ‘insatisfatório’ e 70% ‘insatisfatório’ com valores negativos. Enquanto isso, na análise da MEUPS manual, apenas 30% foi ‘insatisfatório’ com COE negativo, 10% ‘insatisfatório’, 10% ‘satisfatório’, 20% ‘bom’, e 40% ‘muito bom’, especialmente nas áreas de pastagem, onde foram obtidos os maiores índices de correlação.

Aliado ao desempenho mais satisfatório da MEUPS com a aquisição manual de L e fT, em comparação apenas com os registros de perda das parcelas experimentais do Monjolo Grande, o COE médio foi de 0,79, classificado em ‘muito bom’. Em 70% das amostras analisadas pelo COE foram classificadas como ‘muito bom’, coincidindo principalmente com as áreas de pastagem, 10% ‘bom’, 10% ‘satisfatório’ e 10% ‘insatisfatório’ (MC1).

Ressaltam-se estas características de correlação em função da distribuição amostral dos registros das parcelas e dos resultados das simulações. Em ambas as bacias, a MEUPS

SIG superestima as perdas, principalmente nas áreas cultivadas por cana-de-açúcar e carreador (solo exposto), e em solos arenosos da bacia do Monjolo Grande. Quando da exclusão dos resultados da MEUPS SIG (Figura 65 a e c), evidencia-se a dispersão dos registros com a MEUPS Manual (Figura 65 b e d). Em termos gerais, apesar da MEUPS manual ter apresentado resultados mais satisfatórios, este método subestima as perdas para todos os tipos de uso da terra, tendo as perdas reais apresentado maior amplitude de valores.

Tomando por base o agrupamento das parcelas experimentais por classes de uso da terra para a análise dos métodos de simulação da MEUPS, utilizou-se as medidas estatísticas  $R^2$ , o  $PR^2$  e o COE, conforme Tabela 33.

Tabela 33. Análise da MEUPS por classes de uso da terra.

	Cana-de-açúcar			Pastagem			Veg. ripária			Todos		
	$R^2$	$PR^2$	COE	$R^2$	$PR^2$	COE	$R^2$	$PR^2$	COE	$R^2$	$PR^2$	COE
<b>BH Jacutinga</b>												
MEUPS (SIG) x Pinos (Aporte)	0,93	0,98	-205,92	0,35	0,79	0,40	0,58	-1	0,64	0,64	0,04	-87,8
MEUPS (Manual) x Pinos (Aporte)	0,90	-0,77	0,84	0,48	0,77	0,71	0,57	-1	0,60	0,68	-0,64	0,76
MEUPS (Manual) x Pinos (Perda)	0,88	-0,51	0,83	0,81	0,17	0,72	0,57	-1	0,66	0,76	-0,60	0,77
	Cana-de-açúcar			Pastagem			Veg. ripária			Todos		
<b>BH Monjolo</b>	$R^2$	$PR^2$	COE	$R^2$	$PR^2$	COE	$R^2$	$PR^2$	COE	$R^2$	$PR^2$	COE
MEUPS (SIG) x Pinos (Aporte)	0,28	-0,43	-23731	0,48	-0,69	-178,03	0,62	-1	0,63	0,48	0,04	-86303
MEUPS (Manual) x Pinos (Aporte)	0,28	-0,77	-0,51	0,30	-0,38	-3,82	0,57	1	0,61	0,01	-0,22	-13,93
MEUPS (Manual) x Pinos (Perda)	0,39	-0,20	0,70	0,33	0,23	0,90	0,57	1	0,66	0,20	0,21	0,79

Os coeficientes de determinação  $R^2$  e  $PR^2$  não foram determinantes para análise dos modelos por avaliar apenas correlações lineares, evidenciadas pelos valores negativos ou relações inversas como em  $PR^2$  nas áreas de cana-de-açúcar e vegetação ripária. Ressalta-se também a falsa determinação dos níveis de correlação, como por exemplo  $R^2$  e  $PR^2$  nas áreas de cana-de-açúcar do Jacutinga, para a MEUPS SIG.

Para as áreas de cana-de-açúcar na bacia do Jacutinga, na análise da MEUPS em SIG,  $R^2$  e  $PR^2$  próximos a 1 apresentam falsa correlação, pois além de verificados os valores bastante dispersos, o COE foi alto e negativo. Porém, quando avaliada a MEUPS Manual pelo  $R^2$  e COE, estes estimaram valores próximos, entre 0,83 e 0,9, e relação inversa dada por  $PR^2$ .

Na bacia do Monjolo Grande, a baixa relação deste cultivo é representada pelos valores de 0,28 de  $R^2$  e -0,43 de  $PR^2$ , e COE negativos. Quando avaliadas apenas as perdas essa relação aumenta para 0,38 para o  $R^2$  (insatisfatório), e para 0,7 para o COE (boa correlação), enquanto o  $PR^2$  de -0,20 indica baixa relação inversa. Para as áreas de cana-de-açúcar houve desempenho inferior da MEUPS, sendo favorável o uso do modelo em áreas predominantemente ocupada por cultivos como pastagem ou vegetação ripária.

Nas áreas de vegetação ripária, as duas bacias registraram perdas de solo durante o período experimental, o COE esteve entre 0,60 e 0,66, o  $PR^2$  de 1 ou -1, e o  $R^2$  entre 0,57 e 0,62, sendo atribuída classificação ‘satisfatória’ pelos coeficientes, e portanto, contribuindo para a indicação destes modelos nestes tipos de cobertura vegetal. Nas áreas de pasto, o COE da bacia do Jacutinga variou entre 0,4 e 0,72, com classificação ‘satisfatória’ também para o  $R^2$  e o  $PR^2$ , principalmente na comparação apenas com as perdas, com  $R^2$  de 0,81. Na bacia do Monjolo Grande, por sua vez, todos os índices estatísticos obtiveram resultados ‘insatisfatórios’ ou ‘baixos’, com exceção do COE quando da comparação apenas com as perdas. Neste caso, o COE foi de 0,8, ‘muito bom’, demonstrando que este coeficiente é adequado na análise comparativa de modelos.

Os resultados mostraram-se pertinentes, principalmente quando da obtenção manual do comprimento de rampa (L), obtido pela média da distância linear, onde as estimativas apresentadas pelas simulações da MEUPS, quando comparadas apenas aos registros de perdas das parcelas experimentais das bacias, obteve resultados classificados pelo COE entre ‘bons’ e ‘muito bons’.

Como a MEUPS não prevê estimativas de deposição, não atende as simulações em áreas de predomínio deposicional. Para a bacia do Monjolo Grande, os valores estimados neste modelo quando comparados apenas aos registros de perdas das parcelas experimentais, o COE médio de 0,79 indica classificação ‘muito boa’. Porém, quando da comparação com os registros do aporte de sedimentos, o COE classifica a relação como ‘insatisfatória’. Indica-se, pois, o uso do modelo MEUPS em áreas/bacias onde predominam as perdas, uma vez que a mesma não contempla a compensação entre os processos de perdas e deposição para as suas estimativas.

Assim, este modelo não é indicado em condições predominantes de processos deposicionais, ou onde a dinâmica erosão/deposição é nítida, pois a superestimativa das perdas se torna mais evidente. Os resultados da análise da MEUPS não indicou sua utilização

em condições de solos de alta erodibilidade, como os Neossolos Quartzarênicos e Cambissolos de textura franco arenosa a arenosa.

### 5.5.2.1. Eventos específicos de chuva - MEUPS

Além das simulações realizadas ao longo do período experimental, foram avaliados diversos eventos de chuva específicos, tendo em vista parâmetros de precipitação (mm), duração (h), intensidade (mm/h) e pico (%). Para a bacia do ribeirão Jacutinga, o Evento 1 refere-se a data de 17 de novembro de 2013, com precipitação de 125,8 mm, e intensidade de 70,16 mm/h, evento mais erosivo de todo o mês, e registros das parcelas em 12 de dezembro de 2013 – dado pela Tabela 34. O Evento 2 refere-se à precipitação em 1º de março de 2014, de 29,8 mm e intensidade de 8,5 mm/h, e registro das parcelas experimentais em 13 de março de 2014 – Tabela 35.

Tabela 34. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 1, para a bacia do ribeirão Jacutinga.

Parcela	MEUPS em SIG (ton/ha)	MEUPS manual (ton/ha)	Pinos (Aporte) (ton/ha)	COE MEUPS em SIG x Pinos (Aporte)	COE MEUPS Manual x Pinos (Aporte)
JC1	-6,41476	-0,00036	-0,00043	-74328670,7	<b>0,990147</b>
JC2	-3,82905	-0,00021	<b>0,001674</b>	-7887385,36	-0,90753
JC3	-3,79406	-7,3E-06	<b>0,000509</b>	-364327146	-5,74083
JC4	-0,71183	-4,8E-05	-0,00211	-85865,4912	<b>0,274025</b>
JP1	-0,6367	-4E-05	<b>0,000928</b>	-1064541,24	-1,45585
JP2	-0,98226	-6E-05	-0,00267	-108202,773	<b>0,233033</b>
JP3	-0,12819	-1,6E-05	<b>0,00453</b>	-988,174228	-0,16029
JSE	-3,91918	-0,00023	-0,00019	-61828977,1	<b>0,991842</b>
JM1	-0,00913	-9,2E-06	-0,00366	-0,90031817	<b>0,15435</b>
JM2	-0,02637	-2,7E-05	-0,00168	-152,948573	<b>0,309813</b>
		<b>Média</b>	<b>-0,00031</b>	<b>-50963193,1</b>	<b>-0,53113</b>



Tabela 35. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 2, para a bacia do ribeirão Jacutinga.

Parcela	MEUPS em SIG (ton/ha)	MEUPS manual (ton/ha)	Pinos (Aporte) (ton/ha)	COE MEUPS SIG x Pinos (Aporte)	COE MEUPS Manual x Pinos (Aporte)
JC1	-0,40978	-0,00687	<b>0,007502</b>	-6788,92	-7,05074
JC2	-0,2446	-0,004	-0,001178	-4530,75	<b>0,390405</b>
JC3	-0,28973	-0,00353	-0,003498	-2324,15	<b>0,999973</b>
JC4	-0,04547	-0,00092	-0,006848	-16,3004	<b>0,592735</b>
JP1	-0,05684	-0,00039	-3,703E-19	-542,635	<b>0,973784</b>
JP2	-0,0877	-0,00058	-0,001798	-410,196	<b>0,917979</b>
JP3	-0,00741	-0,00021	-0,0074292	<b>0,999998</b>	<b>0,464342</b>
JSE	-0,25036	-0,00445	-0,0061544	-806,75	<b>0,960664</b>
JM1	-0,00012	-4,9E-05	-0,00246	<b>0,771638</b>	<b>0,757727</b>
JM2	-0,00034	-0,00014	-0,00252	<b>0,807507</b>	<b>0,770082</b>
		<b>Média</b>	<b>-0,0024384</b>	<b>-1541,71</b>	<b>-0,02231</b>

Para a bacia do córrego Monjolo Grande, o Evento 1 refere-se a data de 04 de janeiro de 2014, com precipitação de 90,8 mm, e intensidade de 57,4 mm/h, evento mais erosivo de todo o mês, e registros das parcelas em 14 de janeiro de 2014 – dado pela Tabela 36. O Evento 2 refere-se à precipitação em 1º de março de 2014, de 28,6 mm e intensidade de 13,3 mm/h, e registro das parcelas experimentais em 13 de março de 2014 – Tabela 37.

Tabela 36. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 1, para a bacia do córrego Monjolo Grande.

Parcela	MEUPS em SIG (ton/ha)	MEUPS manual (ton/ha)	Pinos (Aporte) (ton/ha)	COE MEUPS SIG x Pinos (Aporte)	COE MEUPS Manual x Pinos (Aporte)
MC1	-0,04542	-0,01231	<b>0,0015088</b>	-479,437	-40,6674
MC2	-0,36297	-0,07395	<b>6,36E-05</b>	-10245,3	-424,882
MC3	-0,28147	-0,00733	<b>0,0214148</b>	-289,692	-1,61868
MC4	-0,07907	-0,00203	<b>0,003782</b>	-393963	-1936,22
MP1	-1,2E-05	-0,01244	<b>0,001058</b>	<b>0,829736</b>	-26,115
MP2	-0,00782	-0,00034	-4,6E-05	-3,42864	<b>0,993586</b>
MP3	-0,00066	-0,01435	<b>0,00429</b>	-58,9317	-847,204
MP4	-0,00065	-0,01547	<b>0,00644056</b>	-5,45509	-60,6571
MSE	-0,01738	-0,00234	<b>0,0002624</b>	-26,1241	<b>0,410109</b>
MM1	-0,00028	-5,1E-05	<b>0,0026068</b>	-6,6649	-5,49075
MM2	-0,00026	-3,7E-05	-0,0012192	<b>0,961287</b>	<b>0,941053</b>
		<b>Média</b>	<b>0,00365107</b>	<b>-36825,1</b>	<b>-303,682</b>

Tabela 37. Análise das simulações da MEUPS para o Evento 2, para a bacia do córrego Monjolo Grande.

Parcela	MEUPS em SIG (ton/ha)	MEUPS manual (ton/ha)	Pinos (Aporte) (ton/ha)	COE MEUPS SIG x Pinos (Aporte)	COE MEUPS Manual x Pinos (Aporte)
MC1	-0,01246	-0,040001786	<b>0,002624</b>	-99,1255	-799,052
MC2	-0,09953	-0,240245854	<b>0,0014628</b>	-1431,57	-8205,3
MC3	-0,07718	-0,048064611	<b>0,0221056</b>	-29,5109	-14,2401
MC4	-0,02168	-0,013291826	<b>0,003286</b>	-872,028	-383,895
MP1	-0,0002	-0,031648221	<b>0,005796</b>	-11,9737	-504,756
MP2	-0,00215	-0,001959258	-0,001794	<b>0,996483</b>	<b>0,999222</b>
MP3	-0,00023	-0,036508363	<b>0,0033176</b>	-18,0431	-2396,31
MP4	-0,00023	-0,039363438	<b>0,00926652</b>	-2,41706	-88,6683
MSE	-0,00477	-0,008307143	<b>0,003565217</b>	-215,815	-439,327
MM1	-7,7E-05	-0,000180936	<b>0,002926</b>	-5,21126	-5,64799
MM2	-7,2E-05	-0,000131409	-0,007112	<b>0,607871</b>	<b>0,614504</b>
		<b>Média</b>	<b>0,004131249</b>	<b>-244,008</b>	<b>-1166,87</b>

O Evento 1 se refere ao maior evento erosivo registrado nas bacias em todo o período experimental. Na bacia do Jacutinga, em todas as amostras os valores dos COEs obtidos indicam desempenho ‘insatisfatório’ da MEUPS em SIG. Quando dado pelo método manual, 60% das amostras obtiveram COE positivo, sendo 20% ‘muito bom’ (JC1 e JSE) e 40% ‘insatisfatório’ (JC4, JP2, JM1 e JM2). Quando da simulação do Evento 2, de menor intensidade, a MEUPS em SIG teve resultados 70% ‘insatisfatórios’ (negativos) e 30% ‘muito bons’, relativos às parcelas JP3, JM1 e JM2, as quais registram perdas acima da média. Pelo método manual, 70% das amostras obtiveram resultados ‘satisfatórios’, 60% ‘muito bons’, 10% ‘bom’, e 20% ‘insatisfatório’ mas de valores positivos.

O baixo desempenho da MEUPS SIG no Jacutinga se deveu, no Evento 1, aos registros deposicionais de algumas parcelas. Para os dois eventos, houve superestimativa das perdas em SIG. Quando da comparação das estimativas da MEUPS pelo método manual, o modelo estimou valores mais próximos aos registros das parcelas, principalmente em função do predomínio de processos de perda de solo na bacia do Jacutinga. A comparação dos eventos individuais foi em relação aos registros mensais de perdas e deposição avaliados nas parcelas. Assim, as perdas registradas em vários eventos de baixa intensidade se correlacionam com a MEUPS manual de forma satisfatória (em 70% das amostras), mas indicam a tendência da MEUPS em superestimar as perdas mesmo em eventos de baixa intensidade.

Em função do predomínio de processos deposicionais, o desempenho da MEUPS para a bacia do Monjolo Grande foi inferior ao da bacia do Jacutinga, indicando a inadequação do modelo em determinadas localidades. No Evento 1, 80% das simulações em SIG obtiveram correlação insatisfatória (negativa), e apenas 20% de correlação muito boa (MP1 e MM2). Pelo método manual, 30% das amostras obtiveram resultados positivos, sendo apenas 20% classificado como ‘muito bom’ (MP2 e MM2), que foram as parcelas coincidentes com registros de perdas. No Evento 2, apenas 20% das parcelas registraram perdas, sendo obtidos resultados classificados em ‘muito bom’ para MP2 e ‘satisfatório’ para MM2.

Em todos os casos, os valores de correlação negativos ocorreram nas parcelas que registram processos deposicionais, indicando que apesar da MEUPS apresentar resultados adequados na modelagem de processos erosivos, ela não contempla ou compensa processos deposicionais, não sendo indicada como modelo preditivo de erosão principalmente em bacias de predomínio deposicional. Este aspecto é evidenciado pela não indicação do modelo onde a dinâmica hidrossedimentológica é semelhante às condições do Monjolo Grande, de solos friáveis e rasos, especialmente em áreas de Cambissolos e Argissolos de textura média a arenosa. Ressalta-se a necessidade de se repensar a aplicação deste modelo de forma cautelosa, visto a inadequação da MEUPS em determinadas localidades.

Apesar da notoriedade da aplicação da MEUPS para simulação de eventos específicos de chuva, constatou-se uma superestimativa das perdas. Para simulações de todo o período experimental, no qual pode ser atribuído o total de chuva para a estimativa da vazão total e vazão de pico, o modelo estimou resultados mais pertinentes. E mesmo incluindo parâmetros importantes, como a Curva-Número (CN), vazão total (Q) e vazão de pico (qp) para o cálculo do *runoff*, negligencia a intensidade das chuvas. Os valores médios do COE de 0,76 para a bacia do Jacutinga, e de 0,79 para a do Monjolo Grande evidenciam desempenho superior do modelo para as simulações de todo o período em comparação às simulações de eventos específicos de chuva, tanto em áreas de solos arenosos quanto argilosos.

## 5.6. Avaliação do WEPP

### 5.6.1. Parâmetros do WEPP e GeoWEPP: cobertura vegetal e IAF

Para a realização das simulações do modelo WEPP foram obtidos os parâmetros de percentual de cobertura e de IAF. As proporções de cobertura vegetal, cobertura seca e ausência de cobertura, realizadas por tomadas de fotografias verticais em 23/10/2013 (Cenário 1) e 21/05/2014 (Cenário 2) e classificação supervisionada (CORRÊA, 2015), são apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38. Percentuais de cobertura vegetal, cobertura seca e ausência de cobertura.

Bacia hidrográfica	Cultivo	23/10/2013			21/05/2014		
		Vegetação +sombra (%)	Vegetação seca (%)	Solo exposto (%)	Vegetação +sombra (%)	Vegetação seca (%)	Solo exposto (%)
Jacutinga	Cana-de-açúcar	45,61	21,21	33,17	64,36	34,93	0,71
	Pastagem	63,07	35,96	0,97	81,45	18,55	0
Monjolo Grande	Cana-de-açúcar	24,62	2,19	70,77	42,97	50,35	6,68
	Pastagem	70,13	29,17	0,70	86,78	13,21	0

No Cenário 1, os cultivos de cana-de-açúcar na bacia do ribeirão Jacutinga estavam em maior estágio de desenvolvimento fenológico, e, portanto, o percentual de cobertura vegetação+sombra foi de 45,6%, enquanto na bacia do Monjolo Grande foi de 24,6%. Em função do plantio direto, a bacia do Jacutinga apresentou 21% de vegetação seca (residual) e 33% de solo exposto, enquanto que, na bacia do Monjolo, o plantio convencional proporcionou cobertura seca de apenas 2%, e 70% de solo descoberto. No Cenário 2 a vegetação verde+sombra foi de 64,3%, 34% de vegetação seca, e 0,7% de solo descoberto na bacia do Jacutinga, enquanto que na do Monjolo estes índices foram respectivamente de 43%, 50% e 6,7%.

A ausência de cobertura vegetal seca em função do plantio convencional (cana nova) e a baixa capacidade de desenvolvimento deste cultivo nos solos arenosos contribuíram para uma vegetação menos desenvolvida e mais degradada. Assim, para os dois cenários avaliados, as áreas de cana-de-açúcar demonstraram maior suscetibilidade erosiva na bacia do Monjolo Grande.

Em contrapartida, a bacia do Jacutinga apresentou maior potencial erosivo nas áreas de pastagem, pois enquanto esta apresentou vegetação verde+sombra de 63% (cenário 1) e

81,4% (cenário 2), este índice foi de 70% e 86,8%, no Monjolo, respectivamente. Da mesma forma, a vegetação seca foi de 36% e 18%, para os cenários 1 e 2 na bacia do Jacutinga, enquanto que para a do Monjolo foi de 29,1% e 13,2%, respectivamente. Estes resultados implicam numa maior tendência erosiva nas áreas de pastagem, que apresentaram-se mais degradadas em função da menor área de cobertura e menor densidade vegetal na bacia do que Jacutinga que na bacia do Monjolo Grande.

Para a estimativa do IAF foram utilizadas imagens dos sensores MS/PAN do satélite Ikonos referente a data de 06/10/2013 (Cenário 1) e do satélite GeoEye de 23/04/2014 (Cenário 2), das quais extraiu-se o NDVI para a derivação de IAFs conforme método ajustado por Xavier e Vetorazzi (2004). No ENVI 5.0 foram extraídos os valores amostrais representativos a partir de ROI, apresentadas nas Tabela 39 e Tabela 40.

Tabela 39. Valores do Índice de Área Foliar (IAF) e desvio padrão amostral no Cenário 1 para as duas bacias.

Cenário 1 - Outubro/2013		Classe de solo	IAF mín. médio	IAF max. médio	IAF médio	Desvio Padrão
BH	Classe de uso da terra					
Jacutinga	Veg. arbórea e ripária	RQ	0,405719	2,919171	2,393433	0,199033
	Reflorestamento	RQ	0,199381	3,071445	2,176847	0,476476
	Cana-de-açúcar	RQ	0,499527	2,381059	1,534466	0,331403
	Pastagem	RQ	0,099767	1,911217	0,469598	0,338574
	Veg. arbórea e ripária	PVA/CX	0,972518	2,723769	2,041423	0,283042
	Cana-de-açúcar	PVA/CX	0,016862	1,408547	0,346758	0,294838
	Pastagem	PVA/CX	0,043194	2,41174	0,505897	0,215353
Monjolo	Veg. arbórea e ripária	RQ	0,988639	3,296739	2,43097	0,220601
	Cana-de-açúcar	RQ	0,001597	2,010426	0,372793	0,41552
	Pasto	RQ	0,195836	1,561631	0,655392	0,184519

Tabela 40. Valores de IAF e desvio padrão amostral no Cenário 2 para as duas bacias.

Cenário 2 - Abril/2014		Classe de solo	IAF mín. médio	IAF max. médio	IAF médio	Desvio Padrão
BH	Classe de uso da terra					
Jacutinga	Veg. arbórea e ripária	RQ	0,081945	3,025045	1,970476	0,469373
	Reflorestamento	RQ	0,081058	3,072817	2,052967	0,354805
	Cana-de-açúcar	RQ	0,304493	2,332107	1,441623	0,361413
	Pastagem	RQ	0,276502	3,152896	1,719166	0,868549
	Veg. arbórea e ripária	PVA/CX	0,972518	2,723769	2,041423	0,283042
	Cana-de-açúcar	PVA/CX	0,319878	2,132129	1,432913	0,27868
	Pastagem	PVA/CX	0,386622	2,729359	1,377233	0,396734
Monjolo	Veg. arbórea e ripária	RQ	0,003126	3,334657	2,204204	0,433317
	Cana-de-açúcar	RQ	0,015019	2,321528	1,502206	0,330604
	Pastagem	RQ	0,006079	2,575607	1,140789	0,394478

Os valores de IAF médios estimados variaram entre 1,1 e 2,2, coerente com valores estimados por Xavier et al. (2004) entre 0,47 a 4,48, e os máximos estimados, de 3,3 e 4,0 por Nassif (2010) e Oliveira et al. (2007), respectivamente.

Ainda, para o banco de dados de uso da terra e manejo foram requeridas a média da densidade aparente dos solos, percentagem de porosidade e a condutividade hidráulica efetiva, respectivamente de 1,47 kg/dm<sup>3</sup>, 1,57% e 55,5 mm/h para a bacia do Jacutinga, e de 1,1 kg/dm<sup>3</sup>, 1,58% e 91,4 mm/h, para a do Monjolo Grande.

Para as duas bacias, com o apoio do banco de dados pré-existente do WEPP, foram estimados para cana-de-açúcar e pastagem, respectivamente, os parâmetros de biomassa de 35 e 15kg/MJ, rugosidade de 4 e 2 cm, profundidade máxima de raízes de 150 e 30 cm, e diâmetro do caule de 2 cm (Cenário 1) e 3 cm (Cenários 2), e 0,22 cm para os Cenários 1 e 2. Para áreas de vegetação arbórea e ripária e reflorestamento são requisitados menos parâmetros, estimados com o apoio do banco de dados para matas e florestas do tipo perene.

### **5.6.2. Aporte de sedimentos gerado pelo WEPP e GeoWEPP**

Em escala de análise de bacia hidrográfica, os resultados das simulações WEPP em SIG – GeoWEPP – representam as perdas e deposição de solo ao longo do período experimental, apresentados pelo mapa síntese da Figura 66.

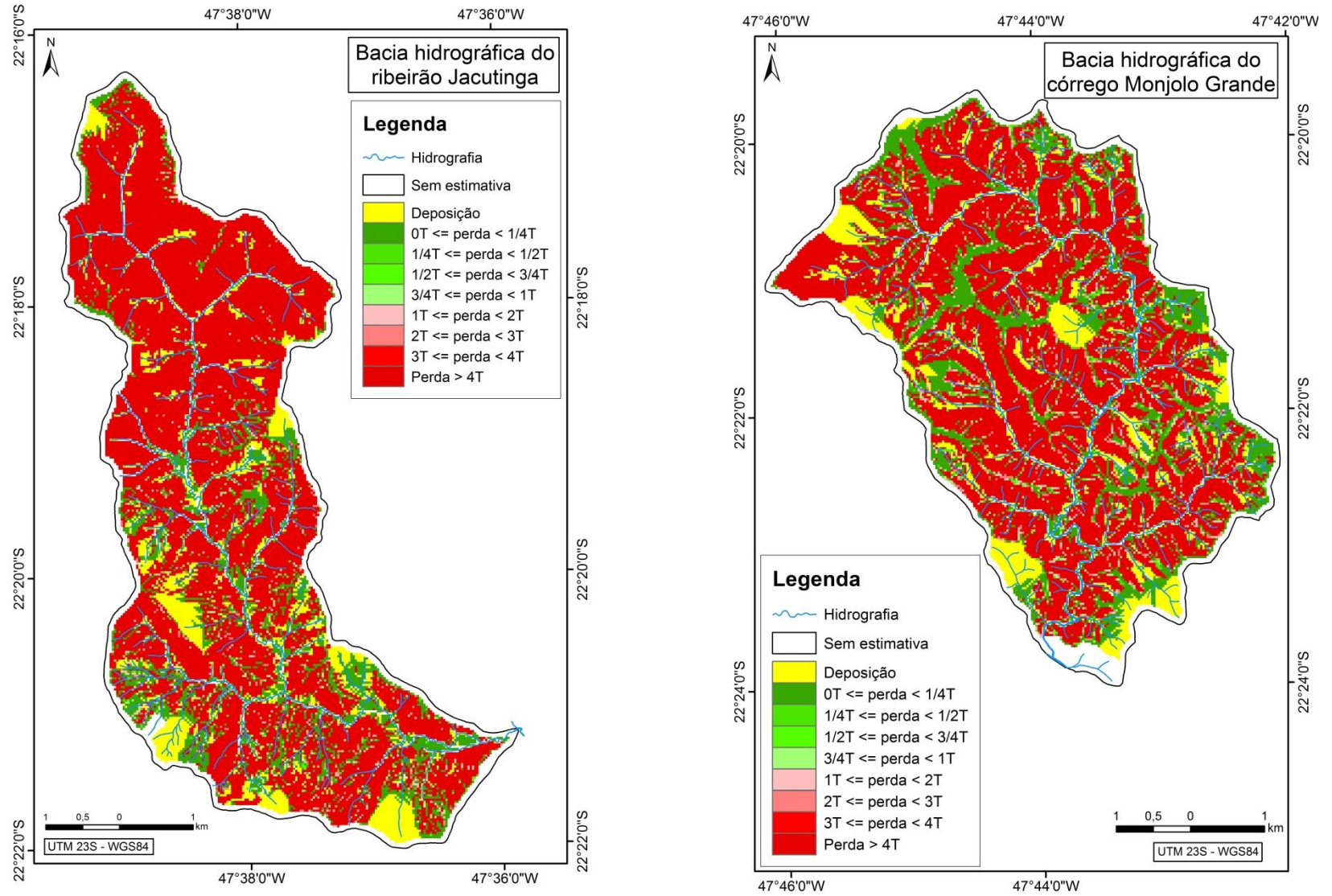


Figura 66. Mapa de perdas e deposição gerados pelo GeoWEPP. Elaborado por: o autor.

Em escala de análise de vertente, foram avaliados o WEPP em SIG (GeoWEPP) e no módulo vertente (WEPP vertente), comparando os resultados obtidos aos estimados pelas parcelas experimentais de pinos de erosão. A análise comparativa utilizou o COE, conforme as Tabela 41 e Tabela 42.

Tabela 41. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP (vertente), para a bacia do ribeirão Jacutinga.

Parcela	L (m)	GEOWEPP (ton/ha)	WEPP (ton/ha)	Pinos (Aporte) (ton/ha)	COE WEPP x Pinos (Aporte)
JC1	456	Deposição	-2	<b>0,004154</b>	-6584,806202
JC2	130	Deposição	-71	-0,014012	-2742838,523
JC3	454	<b>Perdas 0 - 0,25</b>	-168	<b>-0,027348</b>	-8933782,798
JC4	700	Perdas > 4t	-51	-0,032192	-697162,1171
JP1	531	Deposição	-280	-0,018676	-34705282,67
JP2	536	Deposição	+2	-0,056086	-585,0017908
JP3	948	Perdas > 4t	-71	-0,0196904	-2138301,171
JSE	190	Perdas > 4t	-288	-0,0219172	-32177510,19
JM1	174	Deposição	-21	-0,066848159	-47846,81151
JM2	475	Deposição	+212	-0,035983636	-10695924,69
			<b>Média</b>	<b>-0,02885994</b>	<b>-9214581,877</b>

Tabela 42. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP (vertente), para a bacia do córrego Monjolo Grande.

Parcela	L (m)	GEOWEPP (ton/ha)	WEPP (ton/ha)	Pinos (Aporte) (ton/ha)	COE WEPP x Pinos (Aporte)
MC1	110	<b>Perda 0-0,25</b>	-34	<b>-0,1106672</b>	-71309,50516
MC2	73	Deposição	-40	-0,048018	-386563,751
MC3	50	Perda 0-0,25	-55	0,0177096	-1401543967
MC4	30	Perda 0-0,25	-10	0,000868	-423266,2228
MP1	76	Deposição	-18	-0,015364	-323830,5797
MP2	160	<b>Deposição</b>	-80	<b>0,002668</b>	-34747313,01
MP3	50	<b>Deposição</b>	-26	<b>0,0376376</b>	-1480719,287
MP4	113	<b>Deposição</b>	-87	<b>0,00709776</b>	-90574120,13
MSE	242	Perda 0-0,25	-566	<b>0,026576557</b>	-2998623073
MM1	300	<b>Perda 0-0,25</b>	+10	<b>-0,0631484</b>	-16066,69784
MM2	277	Deposição	+32	-0,0340868	-405158,5333
			<b>Média</b>	<b>-0,016247898</b>	<b>-411690489,8</b>

Notadamente, o WEPP (vertente) teve resultado insatisfatório em função dos valores de COE negativos. Apesar do alto nível de detalhamento do módulo WEPP vertente, os resultados não fortalecem a indicação do software para a predição do aporte de sedimentos.



Este modelo superestimou as perdas e deposição e apresentou COE insatisfatório em todas as situações simuladas. Os parâmetros de tensão de cisalhamento e de erodibilidade não foram obtidos em campo, mas estimados com base no banco de dados pré-existente do WEPP para grupo de solos semelhantes. Esta forma de aquisição pode contribuir para os resultados insatisfatórios do WEPP, uma vez que estes parâmetros são descritos como sendo uns dos mais sensíveis do modelo.

Apesar da utilização do mesmo banco de dados para as simulações do GeoWEPP, esta apresentou perdas e deposição com valores bastante inferiores. Os resultados do GeoWEPP são apresentados por classes de perda e deposição, não sendo possível avaliar o desempenho estatístico do modelo. Para sua avaliação, verificou-se a coincidência entre os valores registrados pelas parcelas experimentais e a os valores atribuídos às classes de perda e deposição estimadas pelo modelo. Deste modo, foi possível inferir que apesar do GeoWEPP também superestima as perdas e deposições, assim como o WEPP, suas estimativas estiveram mais próximas dos valores registrados nas parcelas experimentais que o WEPP.

Para a bacia do ribeirão Jacutinga, apenas 20% dos valores estimados pelas classes do GeoWEPP foram coincidentes aos registros dos experimentos, especificamente para as parcelas JC1 e JC3. Assim, para solos de textura média a argilosa, 80% das estimativas não foram compatíveis aos valores registrados. Quando da comparação com as simulações na bacia do córrego Monjolo Grande, 50% das classes estimadas pelo GeoWEPP foram compatíveis aos valores registrados nos experimentos, especificamente para as parcelas MC1, MP2, MP3 e MP4 e MM1.

#### **5.6.2.1. Eventos específicos de chuva - WEPP**

Além das simulações relativas ao período experimental, foram realizadas simulações para análise do desempenho do WEPP em eventos específicos de chuva. Primeiramente, foram selecionados diversos eventos erosivos de variados volumes e intensidades de chuva. Na medida em que a intensidade das chuvas eram menores, verificou-se que o modelo não gerava estimativa de perdas ou deposição. Deste modo, avaliou-se a proporção dos resultados gerados ao longo da vertente simulada, e também no ponto específico correspondente a localização da parcela experimental, conforme a Tabela 43.

Tabela 43. Resultados do WEPP (vertente) para os eventos simulados, para as duas bacias.

Bacia Hidrográfica	Eventos simulados	DATA	Precip.	Duração	Intens.	Pico	Gerou perdas e deposição na vertente		Gerou perdas e deposição na posição da parcela	
			mm	h	mm/h	%	Razão	%	Razão	%
Jacutinga	1	17/11/2013	<b>125,8</b>	01:50	70,16	20	10/10	100	10/10	100
	2	04/01/2014	24,4	00:30	48,8	50	10/10	100	10/10	100
	3	23/02/14	7	00:20	21	50	76/10	60	2/10	20
	4	01/03/2014	<b>29,8</b>	03:30	8,5	25	6/10	60	2/10	20
	5	22/04/2014	22,4	02:30	9	50	5/10	50	3/10	30
	6	23/05/2014	37,8	12:10	3,56	10	4/10	40	0/10	0
Monjolo	1*	17/11/2013	125,8	01:50	70,16	20	11/11	100	11/11	100
	2	04/01/2014	<b>90,8</b>	01:35	57,37	35	11/11	100	11/11	100
	3	16/02/2014	60	19:30	3,07	50	0/11	0	0/11	0
	4	27/02/2014	6,8	00:15	27,2	50	1/11	9	0/11	0
	5	01/03/2014	<b>28,6</b>	02:10	13,3	20	1/11	9	1/11	9
	6*	22/04/2014	22,4	02:30	9	50	1/11	9	1/11	9
	7*	23/05/2014	37,8	12:10	3,56	10	0/11	0	0/11	0

\* Simulação com dados da estação CEAPLA (D4-112M), devido a ausência de registros a cada 5 e 10 minutos da estação Monjolo.

Quando da interpretação dos resultados das simulações, são retratados dois tipos de comportamento. O primeiro comportamento refere-se à geração de resultados estimados para a vertente como um todo. E, o segundo comportamento, refere-se à verificação de ocorrência de estimativas no ponto da vertente que corresponde à localização da parcela experimental.

Constatou-se que no módulo vertente do WEPP há maior sensibilidade do parâmetro de intensidade da chuva (mm/hr) do que de volume total de chuvas (mm). Os eventos 1 e 2 simulados para ambas as bacias, obtiveram geração de estimativas em todas as amostras, com intensidades de chuva acima de 48 mm/h. Porém, quando da simulação dos eventos 6 (Jacutinga) e 3 e 7 (Monjolo Grande), apesar do total de precipitações entre 37 e 60 mm não serem os menores volumes de chuvas simulados, as intensidade são as menores, entre 3 e 3,56 mm/h, não sendo gerados resultados destas simulações. As simulações dos eventos 5 (Jacutinga) e 6 (Monjolo Grande), apesar do volume de precipitação inferior aos citados, não são os eventos de menor intensidade, e, portanto, o modelo gerou resultados apenas para algumas das parcelas simuladas.

Para a análise comparativa entre o GeoWEPP (WEPP em SIG) e WEPP (módulo vertente) foram escolhidos eventos similares de chuva para as duas bacias. Para a bacia do Jacutinga, optou-se pelo Evento 1 (17/11/2013) de 125,8 mm e intensidade de 70,16 mm/h, associado aos registros de 12/12/2013 - Tabela 44, e Evento 2 (01/03/2014) de 29,8 mm e 8,5

mm/h, associados aos registros das parcelas de 13/03/2014 - Tabela 45. Para a bacia do Monjolo Grande, optou-se pelo Evento 1 (04/01/2014) de 90,8 mm e intensidade de 57,37 mm/h (evento mais erosivo de todo o mês), e registros das parcelas em 14/01/2014 - Tabela 46, e Evento 2 (01/03/2014) de 29,8 mm e 8,5 mm/h, associados aos registros das parcelas em 13/03/2014 - Tabela 47.

Tabela 44. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 1, bacia do Jacutinga.

**Evento 1 - 17/11/2013**

Parcelas	GeoWEPP (ton/ha)	WEPP (ton/ha)	Aporte WEPP* (ton/ha)	Pinos (12/12/2013) (ton/ha)	COE WEPP x Pinos
JC1	<b>Deposição</b>	-1	17.9	<b>0,001984</b>	-1804998,5
JC2	Deposição	-38	15.16	-0,00186	-776205498
JC3	<b>Perda 0 e 0,25</b>	-85	46.27	-0,00127	-1,828E+11
JC4	<b>Perda 0 e 0,25</b>	-49	10.7	-0,00179	-409266731
JP1	<b>Deposição</b>	-58	30	<b>0,000464</b>	-8,808E+09
JP2	Deposição	-10	28.7	-0,00191	-11269867
JP3	Perda 3 e 4	-12	8.3	-0,00181	-8092176,9
JSE	Perda 0 e 0,25	-2750	7.8	<b>0,001319</b>	-3,044E+13
JM1	Deposição	-2	16.9	-0,0039	-252863,58
JM2	<b>Perda 0 e 0,25</b>	73	43.7	-0,00114	-1,346E+09
<b>MÉDIA</b>	-	<b>-293,2</b>	<b>22,543</b>	<b>-0.00031</b>	<b>-3.064E+12</b>

\*Aporte WEPP refere-se à média estimada do balanço perdas/deposição (ton/ha) de toda a vertente.

Tabela 45. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 2, bacia do Jacutinga.

**Evento 2 - 01/03/2014**

Parcelas	GeoWEPP (ton/ha)	WEPP (ton/ha)	Aporte WEPP* (ton/ha)	Pinos (13/03/2014) (ton/ha)	COE WEPP x Pinos
JC1	Perda 0 e 0,25	0	0	<b>0,007502</b>	<b>0,999980353</b>
JC2	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,00118	<b>0,99999952</b>
JC3	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,0035	<b>0,999995783</b>
JC4	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,00685	<b>0,999983903</b>
JP1	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	1.1	-3,7E-19	<b>1</b>
JP2	<b>Perda 0 e 0,25</b>	17	1	-0,0018	-98,80991508
JP3	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,00743	<b>0,999981068</b>
JSE	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,00615	<b>0,999986988</b>
JM1	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,00246	<b>0,999997912</b>
JM2	<b>Perda 0 e 0,25</b>	0	0	-0,00252	<b>0,999997809</b>
<b>MÉDIA</b>	-	<b>1,7</b>	<b>0,21</b>	<b>-0.00244</b>	<b>-8.980999175</b>

\*Aporte WEPP refere-se à média estimada do balanço perdas/deposição (ton/ha) de toda a vertente.

Tabela 46. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 1, bacia do Monjolo Grande.

<b>Evento 1 - 04/01/2014</b>					
Parcelas	GeoWEPP (ton/ha)	WEPP (ton/ha)	Aporte WEPP* (ton/ha)	Pinos (14/01/2014) (ton/ha)	COE WEPP x Pinos
MC1	Perda 0 e 0,25	-26	1.5	<b>0,001509</b>	-147325209
MC2	<b>Deposição</b>	-33	2.3	<b>6,36E-05</b>	-84619400
MC3	Perda 0 e 0,25	-36	0.4	<b>0,021415</b>	-4111967,5
MC4	Perda 0 e 0,25	-11	4	<b>0,003782</b>	-7,056E+09
MP1	<b>Deposição</b>	-10	1.1	<b>0,001058</b>	-14876023
MP2	Deposição	-25	2.6	-4,6E-05	-45727716
MP3	<b>Deposição</b>	-8	3.3	<b>0,00429</b>	-156907575
MP4	<b>Deposição</b>	-26	5.4	<b>0,006441</b>	-86914135
MSE	Perda 0 e 0,25	2	23.8	<b>0,000262</b>	-348260,46
MM1	Perda 0 e 0,25	10	2.3	<b>0,002607</b>	-91665553
MM2	Deposição >1t	10	5.4	-0,00122	-4217083,5
<b>MÉDIA</b>	-	<b>-13,9091</b>	<b>4,736364</b>	<b>0,003651</b>	<b>-699312123</b>

\*Aporte WEPP refere-se à média estimada do balanço perdas/deposição (ton/ha) de toda a vertente.

Tabela 47. Análise comparativa da GeoWEPP e WEPP para o Evento 2, bacia do Monjolo Grande.

<b>Evento 2 - 01/03/2014</b>					
Parcelas	GeoWEPP (ton/ha)	WEPP (ton/ha)	Aporte WEPP* (ton/ha)	Pinos (13/03/2014) (ton/ha)	COE WEPP x Pinos
MC1	Perda 0 e 0,25	0	0	<b>0,002624</b>	<b>0,999098131</b>
MC2	<b>Deposição</b>	0	0	<b>0,001463</b>	<b>0,999727028</b>
MC3	Perda 0 e 0,25	0	0	<b>0,022106</b>	<b>0,893992473</b>
MC4	Perda 0 e 0,25	0	0	<b>0,003286</b>	<b>0,998563993</b>
MP1	<b>Deposição</b>	0	0	<b>0,005796</b>	<b>0,995262041</b>
MP2	Deposição	0	0	-0,00179	<b>0,999618041</b>
MP3	<b>Deposição</b>	0	0	<b>0,003318</b>	<b>0,998535173</b>
MP4	<b>Deposição</b>	0	0	<b>0,009267</b>	<b>0,986825747</b>
MSE	Perda 0 e 0,25	1	1,2	<b>0,003565</b>	-131,8986808
MM1	Perda 0 e 0,25	0	0	<b>0,002926</b>	<b>0,998870798</b>
MM2	Deposição	0	0	-0,00711	<b>0,994636631</b>
<b>MÉDIA</b>	-	0,090909	0,109091	0,004131	-11,09395916

\*Aporte WEPP refere-se à média estimada do balanço perdas/deposição (ton/ha) de toda a vertente.

Em situação de chuvas de alta intensidade como no caso do Evento 1, o mais erosivo de todo o período experimental para ambas as bacias, o WEPP superestima (em dezenas de vezes em alguns casos) as perdas e deposições. Quando da aquisição de valores na posição correspondente às parcelas experimentais, as estimativas médias dos eventos 1 e 2 foram respectivamente de -293,2 e 1,7 ton/ha, para a bacia do Jacutinga, e de -13,9 e 0,09 ton/ha,

para a do Monjolo. Os valores estimados para o aporte de sedimentos de toda a vertente das parcelas experimentais foram de 22,5 e 0,21 ton/ha, e de 4,7 e 0,1 ton/ha, para o Jacutinga e Monjolo, respectivamente. Deste modo, as médias do aporte de sedimentos evidencia que o WEPP superestimou valores de perdas e deposição, principalmente nos solos de textura média-argilosa, e de maior comprimento de rampa, associada à bacia do Jacutinga.

No que se refere ao Evento 1, as superestimativas do WEPP (vertente) são evidenciadas pelo COE ‘insatisfatório’ para as duas bacias. Enquanto que as atribuições das classes de perda e deposição do GeoWEPP foram coincidentes em 50% das amostras da bacia do Jacutinga e em 40% das parcelas do Monjolo Grande. Para o Evento 2, as simulações que não geraram resultados evidenciam que o WEPP atribui o valor zero em situações de perdas baixas, conferindo COE ‘satisfatório’ para 90% da amostragem em ambas as bacias, uma vez que os registros obtidos em campo são também bastante baixos e próximos a zero. Por sua vez, enquanto na bacia do ribeirão Jacutinga o GeoWEPP obteve resultados coincidente em 90% das parcelas experimentais, este acerto foi em apenas 40% das parcelas da bacia do Monjolo Grande. Nesta bacia, com experimentos de predomínio deposicional, o GeoWEPP atribuiu classe de perda de 0 a 0,25 ton/ha, principalmente nas áreas de cana-de-açúcar e solo exposto.

### **5.7. Representação do aporte de sedimentos do período experimental das bacias hidrográficas**

O aporte de sedimentos das bacias, em consonância aos registros obtidos durante o período experimental, foi retratado pelo mapa síntese da Figura 67.

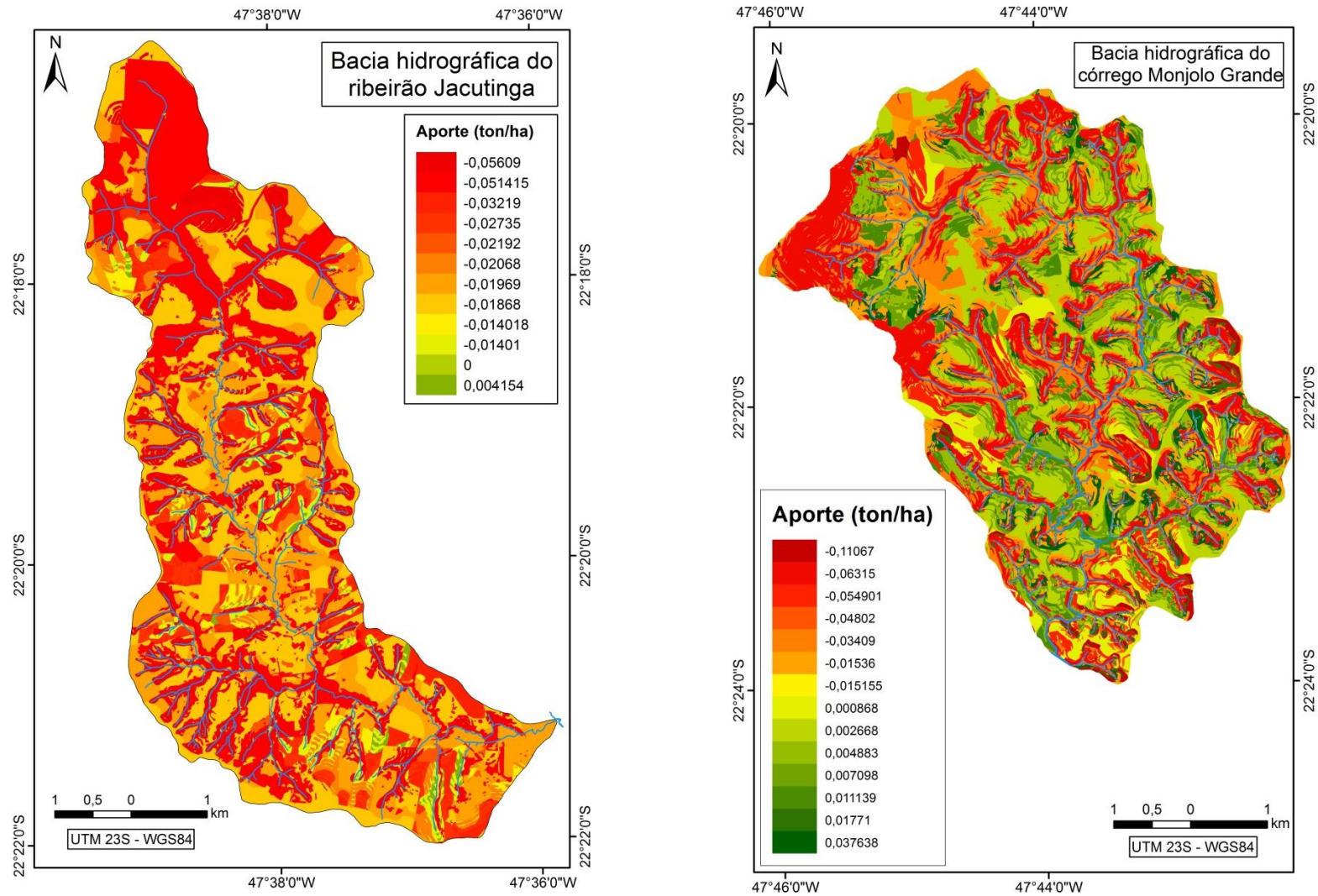


Figura 67. Aporte de sedimentos (ton/ha) do período experimental relativo à extrapolação dos registros das parcelas das bacias do Jacutinga e do Monjolo Grande. Elaborado por: o autor.

A distribuição das classes de perda e deposição das bacias mostra uma maior mobilidade de sedimentos nos solos arenosos da bacia do Monjolo, evidenciado também por uma maior amplitude das classes. Nesta bacia, as áreas deposicionais distribuíram-se principalmente nas médias vertentes retilíneas e convexas, predominantemente nas áreas de pastagem. Na bacia do Jacutinga, por sua vez, houve o predomínio de perdas exceto para cultivo de cana em área côncava. No entanto, acredita-se que isto está mais associado com a rugosidade do microrrelevo neste cultivo do que com a dinâmica erosiva da bacia.

As maiores perdas de solo encontram-se nas maiores declividades, associadas à forma de vertente côncava. Este fato é reforçado pelas elevadas perdas em vegetação ripária, cobertura vegetal coincidente com as áreas de vales encaixados, declives acentuados e côncavos. As perdas concentraram-se principalmente nas áreas de cultivo por cana-de-açúcar na bacia do Monjolo Grande, enquanto que na bacia do Jacutinga a distribuição das perdas foram mais uniformes em todos os tipos de uso. As características das pastagens da bacia do Jacutinga, com menor percentual de cobertura verde e maior cobertura seca, contribuíram para que essas áreas também atingissem valores relativamente elevados.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As parcelas experimentais de pinos de erosão possibilitaram a avaliação dos diversos fatores de interferência nos processos de perda de solo e deposição, especialmente dos fatores de comprimento de rampa, uso da terra e forma de vertente. Os experimentos indicaram que, principalmente em solos argilosos de maior resistência erosiva, houve padrão de ocorrência de perdas e deposição em função dos diferentes usos da terra, comprimentos de rampa e formas de vertente. Nos solos arenosos, de menor resistência erosiva, os registros de perdas e deposição não apresentaram padrão de ocorrência para estes parâmetros, principalmente em função das características intrínsecas destes tipos de solo.

Considerando a dinâmica erosiva e os registros das parcelas experimentais, principalmente nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar nos solos arenosos da bacia do Monjolo Grande, a reposição de matéria orgânica seria uma alternativa para melhorar as condições físicas do solo, reduzindo as perdas do material de superfície. Deve-se considerar práticas de manejo como terraços vegetados, períodos de pousio e pousio com cultivo de leguminosas.

A avaliação da densidade da cobertura vegetal por meio da classificação automática de fotos verticais permitiu verificar a degradação de cultivos de cana-de-açúcar, e a relação direta entre a densidade vegetal e as perdas de solo. Os cultivos mais degradados, de menor vigor vegetativo, e as superfícies desprovidas de coberturas vegetais residuais, coincidiram com as maiores perdas registradas pelas parcelas experimentais. Os resultados demonstraram que o plantio direto favoreceu a proteção do solo em relação ao plantio convencional, confirmando o plantio direto como prática de cultivo mais adequada.

Modelos preditivos de erosão apresentam diferentes estimativas quanto à perda de solo. A MEUPS obteve melhor desempenho em comparação com o WEPP. Tanto o WEPP como o GeoWEPP superestimaram os valores de perda e deposição em ambas as bacias, sendo os valores de COE ‘insatisfatórios’ para este modelo. E apesar de algumas estimativas apresentarem coincidência com os registros de campo, os resultados indicaram a inadequação do modelo aos cenários simulados. No entanto, o GeoWEPP é pouco difundido no Brasil, integra ambiente de SIG e incrementa tanto perdas quanto deposição. Acredita-se que a maior disponibilidade de dados e novos trabalhos utilizando o modelo possam favorecer sua indicação como instrumento à predição de erosão hídrica.

A complexidade dos diferentes parâmetros de entrada dos modelos preditivos refletiram na sua adequação/inadequação às condições edafoclimáticas brasileiras. Tanto a



MEUPS quanto o WEPP e GeoWEPP mostraram maior eficiência nas simulações de eventos de chuva de menor intensidade, evidenciando a inadequação às condições climáticas tropicais. A baixa densidade de redes pluviométricas é uma das principais dificuldades no estudo de erosão hídrica de solos no Brasil, especialmente pela dificuldade de estruturação e implementação dos modelos preditivos de erosão.

Tendo em vista a ampla aplicação de modelos preditivos de erosão hídrica, destaca-se a necessidade de avaliação destes por meio da utilização de experimentação de campo. O uso de parcelas experimentais permite a identificação do quão adequado encontra-se cada modelo para condições ambientais diversas. Assim, os modelos preditivos de perdas de solo apresentam-se não como um fim, mas um meio à simulação de cenários visando a compreensão da dinâmica erosiva em bacias hidrográficas.

A relevância desta temática esbarra na atual conjuntura econômica, na qual a pressão antrópica na produção agrícola interfere diretamente nos processos de erosão hídrica acelerada, e como a negligência dos impactos negativos pode comprometer os recursos solo e água.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSOY, H., KAVVAS, M.L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. Catena, v. 64, n. 2-3, dez. 2005.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho implementation. Idaho: Waters Consulting: University of Idaho: WaterWatch, Inc. 2002. 97 p. (Advanced Training and Users Manual, version 1.0).

ALMEIDA, F. F. M.; BARBOSA, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. Boletim Divisão Geologia e Mineralogia/DNPM, São Paulo, n. 143, 96 p., 1953.

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. Boletim Instituto Geográfico e Cartográfico do estado de São Paulo - IGC, n. 41, p. 169-263, 1964.

ALMEIDA, I. K. ; ANACHE, J. A. A. ; ALMEIDA, V. R. ; ALVES SOBRINHO, T. . Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves, RS. Anais..., 2013.

AMARAL, A.Z.; AUDI, R. Fotopedologia. In: MONIZ, A.C. (Ed.) Elementos de pedologia. São Paulo: EDUSP/Polígono, 1972. p. 429-442.

AMORIM, R. S. S. Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras. 2004. 143 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa – MG, 2004.

AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1046-1049, 2010.

ANDERSON, P. S. Fundamentos para Fotointerpretação. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1982. 140 p.

ANDREOZZI, S. L. Planejamento e Gestão de Bacias Hidrográficas: uma abordagem pelos caminhos da sustentabilidade sistêmica. 2005. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro -SP, 2005.

ASCE. Criteria for evaluation of watershed models. J. Irrigation Drainage Eng., v. 119, n.3, p. 429-442, 1993.

AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N; CURI, N.; MELLO, C.R.; FONSECA, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma bacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. Campina Grande – PR. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n.6, p. 563-569, 2008. Disponível em:<[www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n6/v12n06a01.pdf](http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n6/v12n06a01.pdf)>. Acesso em: 24 out. 2013.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.T.; MACHADO, R.E.; OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelos para a simulação de vazão de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro, Pato Branco (PR). Revsta Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa - MG, v. 34, p. 253-261, 2010.

BARBOSA, C. Planejamento urbano sustentável: diretrizes de urbanização embasadas nas características geomorfológicas/pedológicas de vertentes. 2010. 123 f. Dissertação (mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2010.

- BERTALANFFY, L. Teoria Geral dos Sistemas. Petrópolis: Editora Vozes, 1973. 351 p.
- BERTOL, I. Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo. 1995. 185 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa - MG, v.24, n.3, p. 657-668, 2000.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 7ª ed. São Paulo: Editora Ícone, 1990. 365 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 7ª ed. São Paulo: Editora Ícone, 2010. 355 p.
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L. D. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. Catena, v.79, n. 1, p. 49-59, 2009.
- BEUTLER, A.N. CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.1, p.146-151, jan./abr. 2007.
- BEVEN, K.J. Distributed modeling. In: ANDERSON, M.G.; BURT, T.P. (Eds). Hydrological Forecasting. Wiley: Chichester, UK, 1985. p. 405-435.
- BJÖRNBERG, A.J.S.; LANDIM, P.M.B. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (Neocenoico). Boletim Sociedade Brasileira Geologia, v. 15, n. 4, p. 43-67, 1966.
- BLOOM, A. Superfície da Terra. São. Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970.
- BORGES, P. A evolução dos processos erosivos na bacia do ribeirão Alam Grei – SP: uma contribuição ao planejamento ambiental. 2009. 121 f. Dissertação (mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2009.
- BRADFORD, J.M., HUANG, C. Splash and detachment by waterdrops. In: AGASSI, M. Soil erosion, conservation, and rehabilitation. 1996. p. 61-76.
- BUCKMAN, H.O.; BRADY, N.C. Natureza e propriedades dos solos. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1968. 594 p.
- BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. Principles of Geographical Information Systems. London: Taylor e Francis, 1998, 333 p.
- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, 302 p.
- CARSEL, R. F. e R. S. PARRISH. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, v.24, n.5, p. 755-769, 1988.
- CASAGRANDE, A. A. Compactação e manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. Qualidade física do solo: métodos de estudo - sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p.150-97.
- CASTRO, C.D.; ZOBECK, T.M. Evaluation of the topographic factor in the universal soil loss equation on irregular slopes. Journal of Soil and Water Conservation, v. 41, n. 2, p. 113-116, 1986.

- CASSETI, V. Geomorfologia. [S.l.]. [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 12 jun.2015.
- CEAPLA – Centro de Análise e Planejamento Ambiental. Atlas ambiental da bacia do rio Corumbataí. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2001. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlas.swf>> Acesso em: 20 jun. 2014.
- 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. Geomorfologia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1974. 149 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1980. 149 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999. 236 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. A aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, A. J, T.; CUNHA. S.B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 9ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p. 415-442.
- COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declives e níveis de fertilidade do solo. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 27, p. 743-753, 2003.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Levantamento de Safra 2012-2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253et=2>>. Acesso em: abr.2013.
- CORRÊA, E.A. Caracterização da cobertura vegetal na Equação Universal de perda de solo (Fator C) por meio de geotecnologias. 2011. 165 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2011.
- CORRÊA, E.A. Dados multisensor integrados na extração do fator C (USLE) em pastagens e cana-de-açúcar. 2015. 165 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2015.
- CORRÊA, E. A.; MORAES, I.C.; PINTO, S.A.F. Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas em solos oriundos de arenitos e argilitos da região Centro Leste Paulista. Geociências (Online), 2015. (Aceito para publicação).
- CORRECHEL, V. Avaliação de Índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “fallout” do C. 2003. 79f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- COSTA, A. L. C. Estudo da vulnerabilidade à erosão com aplicação da Equacao Universal de perdas de solo na alta Bacia Hidrográfica do rio Jacaré Pepira, utilizando SIG/SPRING. 2005. 168f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2005.
- COTTAS, L.R. Estudos Geológico-Geotécnicos Aplicados ao Planejamento Urbano de Rio Claro. 1983. 2 v. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

COUTO JÚNIOR, A.A. Avaliação do fator runoff da MEUPS em duas bacias hidrográficas de diferentes características morfo-pedológicas. Iniciação Científica em Geografia – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2013. Relatório Interno.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; FILHO, P.H.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico econômico e ao ordenamento do território. Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos (SP). 2001. 103 p.

CUNHA, C. M. L. Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária. 1997. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro –SP, 1997.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para Geoprocessamento. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2003. P. 6-32. Disponível em: < [www.dpi.inpe.br/gilberto/introd/index.html](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/introd/index.html)>. Acesso em: 02 nov. 2013.

DE PLOEY, J.; POESAN, J. Aggregatc stability, runoff generation and intertill erosion. In: RICHARDS, K.S.; AMETT, R.R.; ELLIS, S. (eds.). Geomorphoiogy and soils. London: George Allen, 1985.

DEMATTÊ, J.A.M.; BORGES, M.H.; PFEIFER, R.M. Aerofotos convencionais e imagens orbitaisTM/Landsat no mapeamento morfo-pedológico em Santa Bárbara do Oeste (SP). Revista Scientia Agricola, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 372-382, out./dez. 1993.

DEMATTÊ, J.A.M. Fotointerpretação e Fotopedologia (Capítulo 2). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, 2010, p.111. Apostila.

DEMATTÊ, J.A.M.; FERREIRA, F.P.; ALVES, M.R.; CAMPOS, R.C. Fotopedologia e pedologia espectral orbital associadas no estudo de solos desenvolvidos de basalto. Bragantia [online], v. 70, n.1, 2011.

DENARDIN, J.E. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. 1990. 113 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. 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. Documentos IAC, Campinas, v. 29, p. 91-119, 1992.

DONZELI, P.L.; PINTO, S.A.F.; LOMBARDI NETO, F.; VALÉRIO FILHO, M.; VALERIANO, M.M. Modelo MUSLE e sistemas de informações geográficas aplicados ao estudo de pequenas bacias hidrográficas. Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 10., Florianópolis-SC. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Resumos, p.140, 1994.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula 10: Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro: 1979. 83p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2 ed. Rio de Janeiro: 1999. 212 p.

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. Notícia: Escassez e degradação dos solos e da água ameaçam segurança alimentar. Disponível em: <<https://www.fao.org/edsaasa.asp>>. Acesso em: 02 fe.2015.

FEITOSA, M.V. Variação temporal do índice de vegetação (NDVI) correlacionada ao uso e manejo do solo para estimativa da erosão. 2006. 143 f. Dissertação (mestrado) - Instituto Agronômico de Campinas – IAC, Campinas, 2006.

FELGUEIRAS, C.A.; MONTEIRO, A.M.V.; FUCKS, S.D.; CAMARGO, E.C.G. Uso de simulação estocástica não linear para inferências de atributos espaciais numéricos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE e Sociedad de Especialistas Latino-americanos en Percepción Remota, 2001. p.437-446.

FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana. 1995.

FLANAGAN, D.C.; GILLEY, J.E.; FRANTI, T.G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 5, p. 1603-1612, 2007.

FLORENZANO, T.G. Sensoriamento Remoto para a Geomorfologia. In: FLORENZANO, T.G. (org.). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p.318.

FOSTER, G. R.; LANE, L. J. 1987. User requirements: USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 1. West Lafayette, Indiana. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.

FREDERICE, A. et al. Diagnóstico Ambiental do rio Corumbataí em trecho urbano do município de Rio Claro, SP. Geociências. São Paulo [online], v. 29, n.4, p. 643-657, 2010.

GALETI, P. A. Práticas de controle á erosão. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, São Paulo, 1973.

GARCIA, A.R. Uso do Modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado para estimar taxas de erosão em estradas florestais. 2001. 96 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2001.

GENOVEZ, A. M. Métodos de estimação de vazões de enchente para pequenas bacias. Campinas: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Saneamento. 1993. 96 p.

GONÇALVES, F.A. Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa – MG. 2007. 130 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2007.

GREENLAND, D.J. Soil management and soil degradation. Journal of Soil Science, v.32, n. 3, p. 301-322, set. 1981. Publicação online em: jul. 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01708.x/pdf>>. Acesso em: 10 out. 2014.

GUERRA, A.J.T. Soil characteristics and erosion, with particular reference to organic matter content. 1991. 441 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Londres, 1991.

GUERRA, A.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: CUNHA, S.B. da; GUERRA, A.T. (Orgs.) Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações. 1996, p.139 – 155.

GUERRA, A.J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. Revista do Departamento de Geografia, v.16, n. 32, p. 32-37, 2005.

GUERRA, A.T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J, T.; CUNHA. S.B. (Orgs.) Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 9ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p.149-210.

GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. Predicting soil loss and runoff from forest roads and seasonal cropping system in Brazil using WEPP. Handbook of Erosion Modelling, p. 186-194, 2011.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J, T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Org.). Erosão e conservação de solos. 7ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p.17-56.

HARTWIG, M.P. Modelagem da geração de sedimentos, por meio da MEUPS, na microbacia do ribeirão dos Marins, em Piracicaba/SP. 2009. 128 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

HORTON, R.E. Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America, Colorado, v. 56, p. 275-370, 1945.

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas. Levantamento Pedológico Semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula São Carlos II. Memorial Descritivo. Campinas, 1984.

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas. Carta Pedológica Semi-Detalhado Estado de São Paulo: Folha de São Carlos (SF.23-Y-A-IV), escala 1:100.000, 1989.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas Base: cartas topográficas 1:50.000. 1978.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos. Boletim de Serviço nº 1602, Res. PR, n. 22, 1983.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rede de monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>>. Acesso em: abr. 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Noções básicas de cartografia. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. 128 p. 2ª ed.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de uso da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 95 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 7, 2ª ed.).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de pedologia. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 4, 2ª ed.).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores IBGE - 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>>. Acesso em: abr. 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estatística da Produção Pecuária - Março de 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>>. Acesso em: abr. 2013.

IFAD. The Rural Poverty Report 2011; International Fund for Agricultural Development: Rome, Italy, 2010. 3. Leon, J.; Osorio, N. Role of Litter Turnover in Soil Quality in Tropical Degraded Lands of Colombia. Sci. World J. 2014, 13, doi:10.1155/2014/693981.

IGC – Instituto Geográfico e Cartográfico. Mapa Base: Cartas topográficas 1:10.000. 1979.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométrico do Brasil. 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo - bacia do Peixe - Paranapanema. São Paulo, IPT- Relatório Técnico n.23, p. 739, 1986.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1999.

JENSEN, J.R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução de J.C.N. EPIPHANIO (Coord.)... et al. 2ª. Ed. São José dos Campos: Parênteses, 2011. p. 357-403.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W. et al. (org.). Decifrando a Terra. São Paulo: USP e Oficina de Textos, 2002, p. 624.

KIRKBY, M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion. Catena, v. 46, n. 2, p. 89-102, 2002.

KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYSSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review original research article. Earth Science Reviews, v. 80, p.75–109, 2007.

KOFFLER, N.F. Sistema de análise ambiental para planejamento agrícola. Versão 2.0. Rio Claro: CEAPLA/UNESP, 1993. 35p.

KRYSAKOVA, V.; BECKER, A.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.I. Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds. Ecol. Modelling, v. 106, p. 261–289, 1998.

LAFLEN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. The water erosion prediction project – a new generation of erosion prediction technology. Journal of Soil and Water Conservation, v.46, n.1, p.34-38, 1991.

LAL, R. Soil erosion in the Tropics: principles and management. New York: McGraw-Hill, Inc., 1990. 580p.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. Sustainability, The Ohio State University, Columbus. Mai. 2015. Disponível em; <[www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability)>. Acesso em: 05 abr. 2015.



LANDIM, P. M. B. O grupo Passa Dois (P) na Bacia do rio Corumbataí (SP). 1967. 98 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1967.

LANE, L.J.; RENARD K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M. Development and application of modern soil erosion prediction technology. Australian Journal of Soil Research, v.30, n.6, 1992.

LEPSCH, I.F. 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LIMA, E.R.V. Análise espacial de indicadores da erosão do solo através de técnicas estatísticas e de geoprocessamento, com apoio do modelo EUPS. 2000. 296 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2000.

LIMA, J.E.F.W. et al. Desenvolvimento e verificação de métodos indiretos para a estimativa da erodibilidade dos solos da bacia experimental do alto do rio Jardim – DF. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.8, n.2, p.23-36, 2007.

LIMA, R.P.; LEÓN, M.J.; SILVA, A.R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. Revista Ceres, Viçosa – MG, v.60. n.1, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-737X2013000100003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-737X2013000100003)>. Acesso em: 05 jun. 2014.

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.

MACHADO, R.E. Simulação de escoamento e de produção de sedimento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. 166 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, C.C.; GARCIA, A.R.; SILVA, E.; FONTES, A.M. Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. Sociedade de Investigações Florestais. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.295-300, 2003.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 27, p. 735-741, 2003.

MANNIGEL, A.R.; CARVALHO, M.P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L.R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. Acta Scientiarum. Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARTINS FILHO, M.V.; ENGLER, M.P.C. IZIDORO, R. COTRIN, F.B.; SERRA, E.A.; AMARAL, N.S.; SOUZA, Z.M. Modelos para estimativa do subfator cobertura-manejo (C) relativo à erosão entressulcos. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 24, n.3, p.603-611, set./dez. 2004.

MOLINA, A.; GOVERS, G.; CISNEROS, F.; VANACKER, V. Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage on gully beds in a degraded mountain area Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage. Earth Surface Process and Landforms, v.34, p. 755–767, 2009.

- MOLINA, A.; VANACKER, V.; BALTHAZAR, V.; MORA, D.; GOVERS, G. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. Journal of Hydrology, v. 472–473, p. 25–35, 2012.
- MOMOLI, R. S. Dinâmica da sedimentação em solos sob matas ciliares. 2011. 190 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- MORETTI, L.R. Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais. 2001. 128 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MORGAN, K.M.; NALEPA, R. Application of aerial photograph and computer analysis to the USLE for areawide erosion studies. Journal of Soil and Water Conservation, v. 34, n. 6, p. 59-374, 1982.
- MORGAN, R.P.C. Soil Erosion and Conservation. 2ª Ed. Essex: Longman Group, UK Ltd, London, 1995, p. 1-191.
- MORGAN, R.P.C. Erosión y conservación del suelo. 2ª Ed. Ed. Mundi-Prensa. 1997.
- MORGAN, R.P.C. Soil erosion and conservation. 3ª Ed. Blackwell. 2005.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; van LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D. e VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. of the Am. Soc. Agric. e Biol. Eng., v. 50, p. 885-900, 2007.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. J. Hydrol., v. 10, p. 282-290, 1970. Catena [online]: 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>>. Acesso em: 22 ago. 2015.
- NASSIF, D. S. P. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; FINKNER, S.C. A process base soil erosion model for USDA water erosion prediction project. Transactions of the ASAE, v.32, n.5, p. 1587-1593, 1989.
- NEARING, M.A.; JETTEN, V.; BAFFAUT, C.; CERDAN, O., COUNTURIER, A.; HERNANDEZ, M.; LE BESSONNAIS, Y.; NICHOLS, M.H.; NUNES, J.P.; RENSCHLER, C.S.; SOUCHÈRE, V.; VAN OOST, K. Modeling reponse of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. Catena, v.61, p.131-154, 2005.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Information Sheet Rangeland Soil Quality. Water Erosion USDA, May 2001. Disponível em: <[http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf)>. Acesso em: 02 Fev. 2015.
- OLIVEIRA, J. B., PRADO, H. Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de São Carlos. II Memorial Descritivo, Campinas: Instituto Agrônomo, 1984. 118p.
- OLIVEIRA, R. A. de; DAROS, E.; ZAMBON, J. L.C.; WEBER, H.; IDO, O. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná: taxas de crescimento. Scientia Agraria, v.6, p. 71-76, 2007.
- OZCAN, A.U.; ERPUL, G.; BASARAN, M.; ERDOGAN, H.E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass–Çankiri, Turkey. Environmental Geology, v. 53, p. 1731–1741, 2008.

PAIVA, F. M. L. Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região sem-árida paraibana. 2008. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2008.

PENTEADO, M.M. Geomorfologia do setor centro-ocidental da depressão periférica paulista. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, Série Teses e Monografias 22, 1976. 86 p.

PEREIRA, L. H.; PINTO, S.A.F. 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, 2007 Florianópolis (SC), Anais...., São José dos Campos – SP: INPE. p. 1321-1328, 2007.

PEREIRA, L.H. Caracterização da erosão hídrica laminar do solo em bacia hidrográfica com base na malha fundiária, por meio de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro -SP, 2010.

PERINOTTO, J. A.e LINO, I. C. Geologia, recursos minerais e passivos ambientais. 2005?. Disponível em: <<http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/geologia.php>>. Acesso em: 30 jun. 2012.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D. McNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITOON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. Environment and economics cost of soil erosion and conservation benefits. Science, v.265, p.6, 1995.

PINHEIRO, L.S. A dinâmica erosiva da bacia do córrego Ibtinga – Rio Claro (SP): uma abordagem empírico-dedutiva. 2012. 139 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2012.

PINTO, S.A.F. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a caracterização de erosão do solo no sw do estado de São Paulo. 1983. Dissertação (mestrado) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, 1983.

PINTO, S. A. F. Sensoriamento Remoto e integração de dados aplicados no estudo da erosão de solos: contribuição metodológica. 1991. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

PINTO,S.A.F. Contribuição metodológica para análise de indicadores da erosão do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelo predictivo.1996, 136 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 1996.

PINTO, S.A.F.; KOHLER, H.C.; AQUINO, L.H.M. de; PELLEGRIN, L.A.; BORTOLOZZI, A. Caracterização de indicadores da erosão do solo na bacia do rio Pará (MG). In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Ouro Preto, 25 a 28 de agosto de 2002. Belo Horizonte, Anais...., 2002.

PINTO, S. A. F.; GARCIA, G.J. Experiências de aplicação de geotecnologias e modelos na análise de bacias hidrográficas. Revista do Departamento de Geografia, v. 17, p. 30-37, 2005.

PIROLI, E.L.; BECKER, E.L.S.; BOLFE, E.L.; PEREIRA; R.S. Análise do uso da terra na microbacia do Arroio do Meio – Santa Maria – RS, por Sistemas de Informações Geográficas e imagem de satélite. Ciência Rural, Santa Maria – RS, v. 32, n.3., 2002.

PONGSAI, S.; VOGT, D.S.; SHRESTHA, R.P.; CLEMENTE, R.S.; EIUMNOH, A. Calibration and validation of the Modified Universal Soli Loss Equation for estimating sediment yield on sloping

plots: A case study in Khun Satan catchment og northern Thailand. Canadian Journal of Soil Science, v.90, p. 585-596, 2010.

QUEIROZ NETO, J.P. Geomorfologia e pedologia. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 1, p. 59-67, 2000.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK , K. J. Sistema de Avaliação da aptidão Agrícola das terras. Rio de Janeiro: Embrapa –CNPS, 1995. 78 p.

RANZANI, G. Manual de levantamento de solos. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1965.

RENSCHLER, C.S. GeoWEPP: The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project WEPP. 2002. Disponível em: <<http://www.geog.buffalo.edu/~rensch/geowepp>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. Pedologia: base para distinção de ambientes. 1ª Ed. Viçosa: NEPUT, 1995.

RICCI, M.; PETRI, S. Princípios de Aerofotogrametria e Interpretação Geológica. São Paulo: USAID, 1965.

RODRIGUES, M. Uso da infiltrabilidade como indicador de reabilitação de área de empréstimo. 2005. 29 p. Monografia (Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, 2005.

ROSS, J.L.S. Relevo Brasileiro: Uma nova proposta de classificação. Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/USP, São Paulo, n.4, 1985.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos Geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/USP, n.º 6, p. 17-29, 1992.

SANTOS, G.G.; NORI, P.G.; OLVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.14, n.2, 2010.

SARAIVA, F. Considerações acerca da pesquisa em Geografia Física aplicada ao Planejamento Ambiental a partir de uma perspectiva sistêmica. Revista RA'E GA, Curitiba, n.9, p.83-93, 2005.

SCHOBENHAUS, C. Geologia do Brasil. Brasília: DNPM, 1984, p. 501.

SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. D. Avaliação do ARCMUSLE para estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do alto rio negro, região sul brasileira. Boletim de Geografia, v.31, p.131-141, 2013.

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.

SHAFER, A.G.; NOGUEIRA, R.E.; SLUTER, C.R. Desenvolvimento de um banco de dados geográfico para a estimativa do potencial de retenção em áreas de drenagem. In: Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto - SBSR, 15, 2011, Curitiba, PR. Anais..., Curitiba, PR, INPE, 2011, p.8709.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; OLIVEIRA, M.S.; FERREIRA, M.M. e LOMBARDI NETO, F. Comparação de métodos direto e indiretos para determinação da erodibilidade em latossolos sob cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.29, n.11, p.1751-1761, 1994.

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

SILVA, A.M., SCHULZ, H.E., CAMARGO, P.B. Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas. 2ª Ed. São Carlos: Editora Rima, 2007, 153 p.

SILVA, C.R.; MARINHO, H. Calibração e validação da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos locais. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 35, p. 1431-1439, 2011.

SILVA, M.L.N. Modelagem da erosão hídrica (Aula 5). UFLA - Pós-graduação em Conservação do solo (2011?). Disponível em: <[http://www.dcs.ufla.br/site/\\_adm/upload/file/pdf/Prof%20Marx/Aula%205/Aula%205.pdf](http://www.dcs.ufla.br/site/_adm/upload/file/pdf/Prof%20Marx/Aula%205/Aula%205.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2013.

SILVA, B. P. C. Medição e modelagem da erosão hídrica em sub-bacia hidrográfica com sistemas florestais. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SILVA, M.L.N. Desafios e inovações tecnológicas nos estudos de erosão hídrica no Brasil (Palestra). Natal, Rio Grande do Norte: 35º Congresso Brasileiro de Ciências do Solo – CBCS, 2015. (Informação verbal).

SMITH, S.; WILLIAMS, R.G.; MENZEL, R.G.; COLEMAN, G.A. Prediction of Sediment Yield from Southern Plains Grasslands with the Modified Universal Soil Loss Equation. Journal of Range Management, v.34, n.4, p. 295- 297, 1984.

SOUSA, M. O. L. Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia - Centro do Estado de São Paulo. 2002, 206 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2002.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 9p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n. 1. Disponível em: <<http://www.cca.ufscar.br/~rubismar/>>. Acesso em: 12 abri.2013.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A.A. Resistência do solo a penetração em relação ao número de amostras e ao tipo de amostragem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 3, p.487-494, 2008. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n2/03.pdf>>. Acesso em: 05 jun.2014.

TIWARI, A.K.; RISSE, L.M.; NEARING, M.A. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. Transactions of the ASAEm., St Joseph, v. 5, n.43, p. 1129-1135, 2000.

TOMASSI, H.Z. Taxonomia, tafonomia e paleoecologia de ostracodes (Crustacea) da Formação Corumbataí, Permiano da bacia do Paraná, Estado de Goiás, Brasil. 2009. 58 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília, 2009.

TRICKER, A.S. The infiltration cylinder: some comments on its use. Journal of Hydrology, v.36, p. 383-391, 1978.

TROPPEMAIR, H.; MACHADO, M.L.A. Variação da estrutura da mata-galeria na bacia do rio Corumbataí (SP), em relação a água no solo, de tipo de margem e do traçado de rio. Série Biogeografia n.8. Instituto de Geografia, USP, São Paulo, 1974.

TUCCI, C.E.M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Ed. UFRGS ABRH, 1998. 652 p.

VALERIANO, M. de M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos: INPE, 2004. 72 p.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. p. 223-242. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Solos altamente suscetíveis a erosão. FCAV/UNESP, Jaboticabal, Soc. Bras. De Ciências do Solo, 1994.

VANACKER, V., GOVERS, G. Introduction to land use change and geomorphic, soil and water processes in tropical mountain areas. Geomorphology, v. 87, p. 1–3, 2007.

VAN PHAM, L.; SMITH, C. Drivers of agricultural sustainability in developing countries: A review. Environ. Syst. Decis, v. 34, n. 2, p. 326–341, 2014.

VEIGA FILHO, A. A.; SOUZA, M. V. M.; MARTINS, N. B.; YANAGISHI, C. T.; MATSUNAGA, M. Análise de investimentos em adoção de tecnologias e conservação do solo no estado de São Paulo. Agricultura em São Paulo, v. 39, n. 1, p. 133-154, 1992.

VERDADE, F. da C. Conceito de solo e evolução da pedologia. In : MONIZ, A. C. (Coord.) Elementos da Pedologia. V.1. São Paulo: Polígono/USP, 1972. p. 1-8.

VERMANG, J. NORTON, L.D.; HUANG, C. CORNELIS, W.M.; SILVA, A.M.; GABRIELS, D. Characterization of Soil Surface Roughness Effects on Runoff and Soil Erosion Rates under Simulated Rainfall. Soil Science Society of America Journal, v. 79, p. 903–916, jul. 2015.

VICENTE, L.E.; PEREZ FILHO, A. Abordagem sistêmica e geografia. Geografia, Rio Claro, v. 28, n. 3, p. 323-344, set./dez. 2003.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. International Journal of Remote Sensing, v.25, n.9, p.1661-1672, 2004.

XAVIER, A.C.; VETTORAZZI, C.A.; MACHADO, R.E. Relação entre índices de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/LANDSAT. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.2, p.421-430, maio/ago. 2004.

WILLIAMS, J.R. Predicting sediment yield frequency for rural basins to determine man's effect on long-term sedimentation. In: Effects of man on the interface of the hydrological cycle with the physical environment. Inter. Assoc. of Hydrologic Science. 1974. p.105-108. Disponível em: <[http://hydrologie.org/redbooks/a113/iahs\\_113\\_0105.pdf](http://hydrologie.org/redbooks/a113/iahs_113_0105.pdf)>. Acesso em: 12 set. 2013.

WILLIAMS, J.R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and perspective technology for predicting sediment yields and sources. US Dept of Agriculture Publ. ARS-540, p. 244-252, 1975.

WILLIAMS, J.R.; GEBHARDT, K.; HAVEREN, B.P. VAN. Use of the Modified Universal Soil Loss Equation for average annual sediment yield estimates on small rangeland drainage basins. 1986?. Disponível em: <[https://www.academia.edu/3228507/Use\\_of\\_the\\_Modified\\_Universal\\_Soil\\_Loss\\_Equation\\_for\\_average\\_annual\\_sediment\\_yield\\_estimates\\_on\\_small\\_rangeland\\_drainage\\_basins](https://www.academia.edu/3228507/Use_of_the_Modified_Universal_Soil_Loss_Equation_for_average_annual_sediment_yield_estimates_on_small_rangeland_drainage_basins)>. Acesso em: 15 jan. 2014.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. Transactions of the American Geophysical Union, Washington, v. 39, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. Soil Science Society of America. Proceedings, Madison, v.33, n.1, p.131-137, Jan./Feb. 1969.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook, n.537. Washington: US Department of Agriculture, 1978.

WU, S.; LI, J.; HUANG, G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. Environmental Modeling and Assessment, v.10, p.33-42, 2005.

YOUNG, A. Slopes. London, Longman, 1972. 288p.

YU, X.; ZHANG, X.; NIU, L. Simulated multi-scale watershed runoff and sediment production based on GeoWEPP model. International Journal of Sediment Research, v. 24, n. 4, p. 465–478, dec.2009.

ZAINE, J. E. Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP). 1994. 98 f. Dissertação (mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 1994.

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAM, R. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS Framework to assess soil erosion risk. Land Degradation e Development, v.20, p.84-91, 2009.

ZEJUN, T.; TINGWU, L.; QINGWEN, Z.; JUN, Z. The sealing process and crust formation att soil surface under the impacts of raindrop and polycrylamine. ISCO Conference, 12. Anais... China Agriculture University, Beijing, 2002.