UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

VLADIMIR DE SOUZA

ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS PERDAS DE SOLO POR EROSÃO LAMINAR
E DO REGIME DE VAZÃO FLUVIAL NA BACIA DO RIO JACARÉ GUAÇÚ (SP)

(Versão Corrigida)

São Paulo
2016

VLADIMIR DE SOUZA

Análise multitemporal das perdas de solo por erosão laminar e do regime de vazão
fluvial na bacia do rio Jacaré Guaçú (SP)

(Versão Corrigida)

Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Geografia Física da
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências
Humanas da Universidade de São Paulo
(USP) como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciências
(Geografia Física).

Orientador: Prof. Dr. Emerson Galvani

De acordo: _____

São Paulo
2016

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

S719a Souza, Vladimir
Análise multitemporal das perdas de solo por erosão laminar e do regime de vazão fluvial na bacia do rio Jacaré Guaçú (SP) / Vladimir Souza ; orientador Emerson Galvani. - São Paulo, 2016.
101 f.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. Uso da terra. 2. Perdas de Solo. 3. Vazão Fluvial. 4. Sistema de Informação Geográfica. 5. Sensoriamento Remoto. I. Galvani, Emerson, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

À USP (Universidade de São Paulo) pela infraestrutura e capacitação oferecida por meio do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física.

Ao Professor Dr Emerson Galvani pelo apoio e orientação para a realização do presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo (Processo 141662/2013-1).

À minha esposa Marcela pelo companheirismo e apoio incondicional.

Aos meus pais e irmãos por sempre apoiarem minhas decisões.

Ao Professor Dr Ailton Luchiari pelas valiosas dicas sobre Sensoriamento Remoto.

Aos Professores Dr Nelson Gasparetto e Dr^a Marta Luzia de Souza pela amizade e discussões sobre Geociências.

RESUMO

Um aumento considerável da área de cultivo da cana de açúcar na região central do estado de São Paulo foi verificado durante os últimos anos. A ampliação destas áreas sobre outras formas de uso e ocupação das terras na referida região proporcionam diversas alterações nos ambientes, sobretudo relacionados aos processos geomorfológicos e hidrológicos das bacias hidrográficas. Nesse sentido, estudos fundamentados em modelos matemáticos, estruturados em SIG (Sistema de Informação Geográfica) e que visem analisar o comportamento de fenômenos ambientais frente à expansão da cultura canavieira podem auxiliar órgãos públicos e privados responsáveis pelo gerenciamento e manutenção das atividades agropecuárias na região. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos das alterações do uso e ocupação das terras sobre processos hidrológicos e geomorfológicos na bacia do rio Jacaré Guaçú, localizada na região central do Estado de São Paulo. Mais precisamente, verificou se as mudanças ocorridas no uso e ocupação das terras entre 1987, 2004 e 2013 influenciaram no aumento ou diminuição das perdas de solos por erosão laminar e no regime de vazão fluvial da rede de drenagem do rio Jacaré Guaçú. Dados hidrológicos, pedológicos e de Sensoriamento Remoto foram usados para estruturar em SIG o modelo matemático EUPS (Equação Universal de Perdas de Solo) e estimar as perdas de solo por erosão laminar. Técnicas de estatística foram usadas para verificar a significância nas mudanças de tendência dos dados históricos de vazão fluvial. Os resultados confirmam aumento de perdas de solo por erosão laminar acima de 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ entre 1987, 2004 e 2013. Esses valores ocorreram devido ao aumento de locais destinados à cultura temporária e com solo exposto, ambos vinculados ao cultivo da cana de açúcar. Entre o mesmo período ocorreu a diminuição de locais classificados com perdas de solo compreendidas entre 0 e 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹ atrelada, sobretudo a redução de locais destinados às pastagens e com vegetação arbórea na bacia hidrográfica. As perdas de solo classificadas entre 3 e 5, 5 e 10 e 10 e 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ aumentaram entre 1987 e 2004 e diminuíram entre 2004 e 2013. A análise estatística comparativa dos dados fluviométricos evidenciou que não ocorreram mudanças significativas nos padrões de vazões médias, mínimas e máximas mensais entre 1987, 2004 e 2013.

Palavras-chave: Uso da terra, Perdas de solo, Vazão fluvial, Sistema de Informação Geográfica, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

A substantial expansion of sugarcane area in the central region of São Paulo State (Brazil) occurred in last years. The increase of sugarcane cultivation over other forms of land use implies in several changes in the environment mainly related to the geomorphological and hydrological processes in watersheds. Grounded studies on mathematical models, structured in GIS (Geographic Information System) can assist in understanding environmental changes arising the increase of sugarcane cultivation. This data can assist public and private institutions responsible for management and maintenance agricultural activities in this region. Therefore, this study aimed at evaluating the effects of changes in land use about hydrological and geomorphological processes in Jacaré Guaçu stream basin (São Paulo State - Brazil). More precisely, were analyzed the effects of changes in land use between 1987, 2004 and 2013 about laminar erosion process and Jacaré Guaçu river flow. Soil, rainfall and Remote Sensing data were used to structure the mathematical model USLE (Soil Loss Equation Universal) in the GIS (Geographic Information System) and to estimate soil loss by laminar erosion. Statistical techniques were used to evaluate changes in trends from historical data of Jacaré Guaçu river flow. The results confirmed an increase of soil loss by laminar erosion bigger then $15 \text{ t. ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ between 1987, 2004 and 2013 within the study area. The increase in local places with temporary culture and exposed soil, both linked to the expansion of sugarcane areas, contributed to these results. Between the same period (1987, 2004 and 2013) there was a decrease in classified locations with soil loss between $0 - 3 \text{ t. ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ because of area reduction with pastures and tree vegetation in hidrographic basin. Soil losses classified between 3-5, 5-10 and 10-15 $\text{t. ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ increased between 1987 and 2004 and decreased between 2004 and 2013. Statistical analysis showed no significant variation average, maximum and minimum of Jacaré Guaçu river flow between 1987, 2004 and 2013.

Key words: Land use, Soil loss, River flow, Geographic Information System, Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Evolução da área de plantio de cana de açúcar no Estado de São Paulo.....	1
Figura 2	Estrutura, delimitação e principais subsistemas da bacia hidrográfica.....	4
Figura 3	Fases de processo erosivo de natureza pluvial.....	6
Figura 4	Modelo básico de precipitação, saturação de água no perfil de solo e escoamento superficial na vertente.....	7
Figura 5	Localização da área de estudo, MDE (Modelo Digital de Elevação) da bacia e de seu entorno.....	22
Figura 6	Municípios que compõem a bacia do rio Jacaré Guaçú.....	23
Figura 7	Substrato geológico da área de estudo.....	25
Figura 8	Afloramentos do substrato rochoso da bacia do rio Jacaré Guaçú.....	25
Figura 9	Modelo tridimensional com indicação das principais formas de relevo presentes na área de estudo.....	27
Figura 10	Principais rios que compõem a bacia do rio Jacaré Guaçú sobreposto ao Modelo Digital de Elevação da área de estudo.....	27
Figura 11	Principais formas de relevo e características do sistema de drenagem da área de estudo.....	28
Figura 12	Principais formas de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica.....	31
Figura 13	Visão geral do SPRING 5.2.3 e de suas ferramentas de criação e definição de banco de dados.....	33
Figura 14	Localização dos postos pluviométricos presentes na área de estudo e em seu entorno.....	36
Figura 15	Influência areal dos postos pluviométricos na bacia e em seu entorno.....	37
Figura 16	Mosaico das imagens de satélites usadas no projeto com as respectivas órbita/ponto.....	40
Figura 17	Imagens do alto curso da bacia do rio Jacaré Guaçú com procedimentos de PDI.....	42
Figura 18	Principais padrões geométricos, espectrais e texturais apresentados na composição colorida dos canais 3, 4 e 5 do sistema sensor Landsat 5.....	43
Figura 19	Imagem do baixo curso da bacia do rio Jacaré Guaçú com procedimentos de PDI.....	44
Figura 20	Localização dos postos pluviométricos e fluviométrico na área de estudo.....	46

Figura 21	Fluxograma com estrutura do banco de dados e rotinas de programação desenvolvidas no editor de modelos LEGAL.....	48
Figura 22	Distribuição espacial do índice de erosividade da área de estudo.....	50
Figura 23	Comprimento de rampa (L) na bacia do rio Jacaré Guaçú.....	51
Figura 24	Classes de declividade verificadas na área de estudo.....	53
Figura 25	Distribuição espacial do índice topográfico da bacia hidrográfica.....	55
Figura 26	Classes de solos verificadas na área de estudo.....	56
Figura 27	Uso e ocupação das terras em 1987 na bacia do rio Jacaré Guaçú.	58
Figura 28	Uso e ocupação das terras em 2004 na bacia hidrográfica.....	59
Figura 29	Distribuição espacial das classes de uso e ocupação das terras em 2013.....	60
Figura 30	Variação em porcentagem de áreas das classes de uso e ocupação das terras entre 1987, 2004 e 2013 na bacia hidrográfica.....	61
Figura 31	Distribuição espacial das classes de uso das terras que sofreram alterações em 1987.....	62
Figura 32	Espacialização das classes que tiveram novo uso das terras em 2004.....	63
Figura 33	Distribuição espacial das classes de uso das terras que sofreram alterações em 2004.....	64
Figura 34	Espacialização das classes que tiveram novo uso das terras em 2004.....	65
Figura 35	Perdas de solo anual em 1987 na bacia do rio Jacaré Guaçú.....	67
Figura 36	Perdas de solo anual em 2004 na área de estudo.....	69
Figura 37	Distribuição espacial das classes de perdas de solo por erosão laminar em 2013 na área de estudo.....	70
Figura 38	Comparação em porcentagem de área das classes de perdas de solo por erosão laminar entre 1987, 2004 e 2013 na bacia do rio Jacaré Guaçú.....	72
Figura 39	Distribuição espacial das classes de perdas de solo que sofreram alterações e as que não se alteraram em 1987.....	72
Figura 40	Distribuição espacial da dinâmica erosiva laminar entre 1987 e 2004.....	73
Figura 41	Distribuição espacial das classes de perdas de solo que sofreram alterações e as que não se alteraram em 2004.....	75
Figura 42	Distribuição espacial da dinâmica erosiva laminar entre 2004 e 2013.....	76

Figura 43	Hidrograma de vazões médias mensais entre 1987 e 2013 do posto 5C-013....	78
Figura 44	Variação da precipitação pluvial média em 1987, 2004 e 2013.....	79
Figura 45	Variação do uso da terra na área de abrangência do posto fluviométrico 5C-013 em 1987, 2004 e 2013.....	80
Figura 46	Distribuição espacial dos dados de uso da terra em 1987, 2004 e 2013 na área de abrangência do posto fluviométrico 5C-013	81
Figura 47	Comportamento da vazão em função da precipitação média mensal em 1987.	82
Figura 48	Comportamento da vazão em função da precipitação média mensal em 2004.	83
Figura 49	Comportamento da vazão em função da precipitação média mensal em 2013.	83
Figura 50	Variabilidade da vazão média mensal em 1987, 2004 e 2013.....	84
Figura 51	Variabilidade da vazão média mínima mensal em 1987, 2004 e 2013.....	85
Figura 52	Variabilidade da vazão média máxima mensal em 1987, 2004 e 2013.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Identificação e atributos geográficos dos postos pluviométricos usados no trabalho.....	35
Tabela 2	Características dos dados orbitais usados no trabalho.....	40
Tabela 3	Análise das amostras usadas para a classificação das imagens de 1987, 2004 e 2013 do sistema/sensor Landsat 5 e 8 e índice de coeficiente TAU para o algoritmo Battacharya.....	44
Tabela 4	Média anual da precipitação pluviométrica e do índice de erosividade dos postos pluviométricos.....	49
Tabela 5	Área ocupada pelas classes do índice de erosividade.....	50
Tabela 6	Área ocupada pelas classes de solos na bacia e seus respectivos fatores de erodibilidade em t.ha/ (Mj/ha.mm/h).....	53
Tabela 7	Área ocupada pelas classes de comprimento de rampas.....	54
Tabela 8	Área ocupada pelas classes de declividade.....	55
Tabela 9	Área ocupada pelas classes do índice do fator topográfico.....	57
Tabela 10	Fatores C e P da EUPS e área ocupada pelas classes de uso dos solos em 1987.....	58
Tabela 11	Área ocupada pelas classes de uso dos solos em 2004 e seus respectivos fatores C e P	59
Tabela 12	Área ocupada e índices dos fatores C e P das classes de uso da terra em 2013	61
Tabela 13	Tabulação cruzada em km ² entre as classes de uso da terra identificadas em 1987 (linhas) e 2004 (colunas)	64
Tabela 14	Tabulação cruzada em km ² entre as classes de uso da terra identificadas em 2004 (linhas) e 2013 (colunas).....	66
Tabela 15	Área ocupada pelas classes de perdas de solo por erosão em 1987.....	68
Tabela 16	Área ocupada pelas classes de perdas de solo por erosão em 2004.....	68
Tabela 17	Área ocupada pelas classes de perdas de solo por erosão em 2013.....	71
Tabela 18	Tabulação cruzada em km ² entre as classes de perdas de solo por erosão laminar 1987 (linhas) e 2004 (colunas)	74
Tabela 19	Tabulação cruzada em km ² entre as classes de perdas de solo por erosão laminar 2004 (linhas) e 2013 (colunas)	77
Tabela 20	Valores estatísticos obtidos para a vazão média mensal para os anos de 1987, 2004 e 2013.....	85

Tabela 21	Valores estatísticos obtidos para a vazão média mínima mensal para os anos de 1987, 2004 e 2013.....	86
Tabela 22	Valores estatísticos obtidos para a vazão média máxima mensal para os anos de 1987, 2004 e 2013.....	87
Tabela 23	Valores estatísticos e teste t obtido para comparação entre a vazão média mensal (1987, 2004 e 2013) e para a média do período (1987 a 2005).....	88
Tabela 24	Valores estatísticos e teste t obtido para comparação entre a vazão média máxima mensal (1987, 2004 e 2013) e para a média máxima do período (1987 a 2005).....	88
Tabela 25	Valores estatísticos e teste t obtido para comparação entre a vazão média máxima mensal (1987, 2004 e 2013) e para a média máxima do período (1987 a 2005).....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Hipótese.....	2
1.2	Objetivos.....	2
2	EMBASAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL.....	4
2.1	Bacia hidrográfica: uma unidade espacial sistêmica.....	4
2.2	Erosão dos solos: conceitos básicos e abordagens de estudo.....	5
2.3	A equação universal de perdas de solos e seus fatores.....	8
2.3.1	Erosividade da chuva (R).....	9
2.3.2	Erodibilidade dos solos (K).....	10
2.3.3	Comprimento de rampa (L) e Declividade (S).....	11
2.3.4	Uso e manejo do solo (C).....	12
2.3.5	Prática Conservacionista (P).....	13
2.4	Dados de Sensoriamento Remoto para análise dos fatores da EUPS.....	13
2.5	Geoprocessamento e SIG para a aplicação da EUPS.....	17
2.6	Alterações no uso da terra e comportamento da vazão fluvial.....	19
3	ÁREA DE ESTUDO.....	22
3.1	Localização.....	22
3.2	Geologia.....	23
3.3	Geomorfologia.....	26
3.4	Solos.....	29
3.5	Clima.....	29
3.6	Vegetação e uso da terra.....	30
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	32
4.1	Revisão Bibliográfica.....	32
4.2	Construção e organização do banco de dados geográfico.....	32
4.3	Determinação das variáveis do modelo matemático.....	34
4.3.1	Fator erosividade da chuva (R).....	34
4.3.2	Erodibilidade dos solos (K).....	37
4.3.3	Fator topográfico (LS).....	38
4.3.4	Análise multitemporal do uso e ocupação do solo – Fatores C e P...	39
4.3.4.1	Aquisição dos dados e rotinas de pré-processamento.....	39

4.3.4.2 Rotinas de realce, composição colorida e fusão de bandas	41
4.3.4.3 Rotinas de segmentação, classificação e pós classificação.	42
4.4 Cálculo das perdas de solo por erosão laminar.....	45
4.5 Análise dos dados de vazão fluvial.....	46
4.6 Elaboração dos produtos cartográficos.....	47
5 RESULTADOS.....	49
5.1 Fator R da EUPS.....	49
5.2 Fator K da EUPS.....	51
5.3 Fatores LS da EUPS.....	53
5.4 Integração dos Fatores LS da EUPS.....	56
5.5 Fatores C e P da EUPS.....	57
5.6 Dinâmica de uso e ocupação das terras (1987, 2004 e 2013).....	61
5.7 Distribuição espacial e quantificação da EUPS para 1987, 2004 e 2013.....	66
5.8 Dinâmica de perdas de solo (1987, 2004 e 2013).....	71
5.9 Vazão fluvial, precipitação e uso da terra no alto e médio Jacaré Guaçú.....	78
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	90
7 CONCLUSÃO.....	96
8 REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Um aumento considerável da área de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ocorreu nos últimos anos. De acordo com Rudorf et al. (2010) as regiões central, norte e oeste do Estado foram as que apresentam maior ampliação na área de plantio desta cultura (Fig. 1).

Figura 1 – Evolução da área do plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. A – Safra 2003/2004 (Área - 3.002.676 ha) e B - Safra 2009/2010 (Área - 5.242.488 ha) – Adaptado de Canasat/ INPE (2012) – Elaborado pelo autor.

A região central do Estado de São Paulo, que sempre se destacou pela diversidade agropecuária, áreas com remanescentes do Cerrado e da Floresta Estacional, convive atualmente com uma transformação considerável na paisagem.

Pode-se dizer que o aumento da área de cultivo da cana no Estado está associado, dentre outros fatores, aos interesses econômicos relacionados com o consumo interno e a exportação dos produtos extraídos desse vegetal como o etanol e o açúcar. É uma atividade agrícola de suma importância, que possui uma representatividade significativa na balança comercial brasileira e na economia local paulista.

No entanto, a substituição de outras formas de uso da terra para o cultivo da cana pode provocar alteração na dinâmica de processos geomorfológicos e hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. Durante o plantio, manejo e colheita desta cultura, há períodos em que o solo fica totalmente exposto à erosividade da chuva o que acarreta na

modificação dos atributos relacionados ao transporte e deposição de sedimentos que ocorre ao longo das vertentes (processo geomorfológico) e no regime de vazão fluvial dos rios (processo hidrológico). O desequilíbrio na dinâmica desses processos proporciona impactos sobre o meio físico e biológico uma vez que compromete a fertilidade dos solos, a estabilidade das encostas e a qualidade da água (MARTINELLI, FILOSO, 2008). Os prejuízos ocasionados por esses eventos são significativos, sobretudo para o Poder Público e a sociedade de um modo geral.

Diante desta contextualização, surgiu o interesse em desenvolver um estudo multitemporal (1987 – 2004 - 2013), com auxílio de modelagem matemática e de técnicas de Geoprocessamento para avaliar os efeitos das alterações no uso e ocupação do solo sobre processos hidrológicos e geomorfológicos na bacia do rio Jacaré Guaçu, localizada na região central do Estado de São Paulo.

Mais precisamente, verificou se as mudanças ocorridas no uso e ocupação das terras no período citado acima estão influenciando no aumento ou diminuição das perdas de solos por erosão laminar e no regime de vazão fluvial da rede de drenagem do rio Jacaré Guaçu.

1.1. Hipótese

Com base nas informações apresentadas na introdução do trabalho apresentam-se as seguintes hipóteses para questionamento e consequente desenvolvimento da pesquisa:

- a) As alterações ocorridas entre 1987, 2004 e 2013 nas formas de uso e ocupação da terra na bacia do rio Jacaré Guaçu estão influenciando no aumento das perdas de solo por erosão laminar existentes nas vertentes da referida área de estudo?
- b) O regime de vazão fluvial da rede de drenagem do rio Jacaré Guaçu apresentou alteração significativa devido às mudanças ocorridas no uso e ocupação da terra no período citado acima (1987, 2004 e 2013)?

1.2. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar de forma multitemporal (1987, 2004 e 2013) os efeitos das mudanças no uso e ocupação da terra na bacia do rio Jacaré Guaçu sobre processos hidrológicos e geomorfológicos. Especificamente, foram avaliadas as

consequências dessas alterações sobre as perdas de solo por erosão laminar e o regime de vazão da rede de drenagem da bacia hidrográfica. Em termos gerais, foi usada como base metodológica a análise e estimativa de dados do meio físico e antrópico, modelagem ambiental e estudos conduzidos por simulações computacionais. Para atingir tal meta, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

1. Elaborar o mapeamento multitemporal (1987, 2004 e 2013) do uso e ocupação da terra da área de estudo;
2. Levantar e determinar as variáveis que serão utilizadas no modelo matemático para a estimativa de perdas de solo por erosão laminar, ou seja: erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, declividade e comprimento das vertentes, uso e ocupação da terra e práticas conservacionistas adotadas nas propriedades rurais;
3. Construir um banco de dados geográfico que contemple a estruturação espacial das informações que compõem as variáveis do modelo ambiental e dos dados de vazão fluvial da área de estudo;
4. Estimar em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), com auxílio de técnicas de Geoprocessamento e de modelo ambiental os valores de perdas de solo por erosão laminar para os anos de 1987, 2004 e 2013;
5. Identificar a dinâmica de perdas de solo por erosão e de uso das terras entre os períodos 1987 2004 e 2004 e 2013;
6. Realizar o levantamento e tratamento estatístico dos dados de vazão fluvial do rio Jacaré Guaçú;
7. Analisar o comportamento multitemporal dos valores de perdas de solo por erosão laminar e do regime de vazão fluvial do rio Jacaré Guaçú em função das alterações de uso e ocupação das terras na bacia hidrográfica do referido recurso hídrico.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL

2.1. Bacia hidrográfica: uma unidade espacial sistêmica

Estudos relacionados ao meio físico normalmente são desenvolvidos em bacias hidrográficas. Isso ocorre, dentre outros fatores, pelo fato dessas unidades espaciais representarem sistemas abertos que apresentam interações entre elementos naturais e antrópicos e cuja principal matéria de circulação é a água. No geral, as bacias hidrográficas recebem água da atmosfera (*input*) que determinam os processos físicos e químicos sobre os elementos que compõem os principais subsistemas envolvidos como as vertentes, planícies de inundação e os canais fluviais (Fig. 2). A interação entre esses processos irão influenciar determinar e interferir diretamente no fluxo de energia e matéria de uma rede de drenagem, que representa a principal via de saída (*output*) do sistema (GREGORY, WALLING, 1973).

Figura 2 – Estrutura, delimitação e principais subsistemas da bacia hidrográfica. Adaptado de <http://www.blackcreekwatershed.org/>.

Portanto, a bacia hidrográfica apresenta características biogeofísicas e socioeconômicas que proporcionam o desenvolvimento de estudos interdisciplinares com propósito conservacionista do solo, da água, da vegetação e dos ecossistemas.

Além disso, é unidade espacial definida para a implantação de projetos de gerenciamento da água integrado com o uso do solo, conforme define a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

As mudanças quantitativas e qualitativas na composição e disposição dos fatores naturais e antrópicos que formam as bacias podem provocar alterações em sua dinâmica hidrológica e geomorfológica ao longo do tempo e espaço (COELHO NETO, 2012). Naturalmente, a bacia hidrográfica como um sistema aberto, tende a se ajustar às alterações ocorridas nos elementos que a constitui (CHORLEY, KENNEDY, 1971).

A atividade humana pode influenciar no aumento ou redução da quantidade de água escoada superficialmente nas encostas, provocar a desestabilização de vertentes, alterar a composição química da água dos rios, o regime de vazão fluvial e o transporte de sedimentos (CARSON, KIRKBY, 1975). Como resultado dessas ações tem-se a perda da fertilidade natural dos solos e o impacto nos ecossistemas terrestre e fluviais (LAL, 2000).

Nesse sentido, estudos que identifiquem as alterações multitemporais no uso da terra e os consequentes ajustes naturais de processos hidrológicos e geomorfológicos de bacias hidrográficas são de fundamental importância para o planejamento territorial e gestão dos recursos naturais (WALLING, 2005).

Os valores de perdas de solo por erosão laminar que ocorrem nas vertentes e a alteração no regime de vazão da rede de drenagem são exemplos desses processos.

Diversos trabalhos que avaliaram as mudanças temporais e espaciais no uso da terra e os consequentes ajustes de processos hidrológicos e/ou geomorfológicos podem ser encontrados na literatura, como por exemplo: Guimarães (2000), Martínez-Casasnovas, Sánchez-Bosch (2000), Paranhas Filho et al. (2003), Bakker et al. (2008), Cabecauer e Hofierka (2008), Jabur (2010).

2.2. Erosão dos solos: conceitos básicos e abordagens de estudo

A erosão é o processo natural de desgaste da superfície da Terra que vem ocorrendo por milhões de anos (TOY, et. al. 2002). Basicamente, o fenômeno ocorre pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo e/ou organismos (IPT, 1985). Contudo, como o processo erosivo é um fenômeno relativamente complexo e amplo, uma classificação quanto a sua natureza faz-se necessário. Zachar (1982) apresenta a seguinte divisão: erosão geológica, condicionada somente pelos fatores

naturais, sem a influência das atividades humanas e erosão acelerada, oriunda da ação integrada dos fenômenos físicos com os condicionantes antrópicos locais como os desmatamentos, as atividades agropecuárias e ocupação desordenada do território. Essa forma de erosão deve ser identificada e controlada para promover a conservação dos recursos naturais e a diminuição dos danos ambientais decorrentes dos processos envolvidos.

Na região tropical úmida da Terra ocorre o predomínio de processos erosivos acelerados de origem pluvial (erosão hídrica) sobre a cobertura superficial que é formada principalmente por solos profundos e ferralíticos (GUERRA, 1999).

O fenômeno ocorre com o impacto inicial das gotas das chuvas (energia cinética) sobre os terrenos. Esse impacto desagrega as partículas do solo, as transporta por alguns centímetros por meio do salpicamento das gotas e contribui para a diminuição da taxa de infiltração (Fig. 3).

Figura 3 – Fases de processo erosivo de natureza pluvial. I – Impacto da gota sobre o terreno; II – Desagregação das partículas dos solos; III – Obstrução dos poros e IV – Transporte das partículas pelo escoamento superficial. Adaptado de Derpsh (1990).

Se a intensidade da chuva exceder essa capacidade de infiltração de água no perfil e saturar o solo ocorrerá o escoamento de parte desse montante hídrico sobre a superfície (HORTON, 1945; BEVEN, KIRKBY, 1979). As atividades humanas irão atuar como um agente potencializador do processo uma vez que a substituição da cobertura vegetal para a prática das atividades agropecuárias irá expor a superfície do solo à ação direta das chuvas.

A figura 4 exhibe um modelo básico de precipitação pluviométrica, saturação de água no perfil de solo e consequente escoamento superficial no sistema vertente.

Figura 4 – Modelo básico de precipitação, saturação de água no perfil de solo e escoamento superficial na vertente. Adaptado de Casseti (2005).

Quanto a característica do escoamento superficial, esse pode ser classificado em difuso e concentrado. A erosão por fluxo concentrado resulta em pequenas feições na superfície do terreno como sulcos e ravinas que podem evoluir para geoformas maiores. A erosão provocada pelo escoamento superficial difuso precede esses processos anteriores e é classificada como laminar ou em lençol (CARSON, KIRKBY, 1975).

A erosão laminar tem como principal característica a remoção de camadas delgadas do solo sobre uma área (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999). A identificação de locais onde ocorre esse tipo de erosão é importante, pois nesse estágio inicial de desenvolvimento há grande possibilidade de ser recuperar as áreas atingidas e evitar que o processo evolua para outros níveis (BARCELOS, 2005). Além disso, o processo de perda de solo por esse tipo de erosão traz prejuízo financeiro ao produtor rural e ao Poder Público. Com a remoção e transporte da camada superficial o agricultor terá que investir em técnicas que recomponham os nutrientes do solo. Já o Poder Público terá que adotar medidas que recupere a qualidade da água provocada pelo assoreamento dos mananciais.

O estudo desse tema normalmente é realizado por meio de métodos diretos e indiretos. O monitoramento de processos e atributos em campo e a execução de ensaios experimentais em laboratório faz parte dos métodos diretos enquanto que o uso de modelagem matemática constituem os métodos indiretos.

De forma geral, os modelos matemáticos buscam exprimir uma tentativa de representação da realidade por meio do relacionamento sistêmico e dinâmico dos fatores

que influenciam o fenômeno (LANBIN, 1994). Os modelos apresentam características diferentes, de acordo com os propósitos que foram desenvolvidos. Não existe o melhor modelo, mas sim aquele mais adequado ao objetivo do estudo e a disponibilidade dos dados requeridos (MINELLA et. al. 2010). Outro fato importante a se considerar é que todo modelo de predição de erosão apresenta limitações em termos de representação dos processos envolvidos, com isso, sempre haverá um nível de incerteza nos resultados alcançados (NEARING, et. al., 2005).

No caso das perdas de solo por erosão laminar, os modelos buscam relacionar os processos ligados a erosividade das chuvas, a cobertura vegetal ou uso da terra, a topografia e os tipos de solos (BISSIONAIS et. al.; 2001; MORGAN, 1995).

Nesse sentido, a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) proposta por Wischmeier e Smith (1978) corresponde a um dos modelos mais usados para o estudo desse fenômeno. Dentre outros fatores, a EUPS apresenta grande vantagem em relação aos outros métodos devido à sua simplicidade de aplicação e por usar variáveis relativamente fáceis de obter (CABECAUER, HOFIERKA, 2008).

No Brasil, país de grande atividade agropecuária, a EUPS pode ser considerada como um guia para o planejamento conservacionista do uso da terra (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999). Bertoni et. al. (1975) foram os primeiros a desenvolver trabalhos com a EUPS no Estado de São Paulo. Após isso, vários trabalhos que aplicaram a equação ou parte dela em território nacional podem ser encontrados na literatura, como: Paranhas Filho et al. (2003), Bueno e Stein (2004), Pedro e Lorandi (2004), Prado e Nóbrega (2005), Tomazoni e Guimarães (2005) e Souza e Gasparetto (2012).

2.3. A equação universal de perdas de solos e seus fatores

A Equação (1) apresenta a fórmula desenvolvida para o cálculo da EUPS:

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

Onde:

A = Perda de solo calculada em unidade de área - t/ha.ano;

R = Fator erosividade da chuva – MJ.mm/ha.h.ano;

K = Fator erodibilidade do solo – t/ha (MJ/ha.mm/h);

L = Fator comprimento de rampa (adimensional);

S = Fator grau de declive do terreno (adimensional);

C = Fator uso e manejo do solo (adimensional);

P = Fator prática conservacionista (adimensional).

2.3.1. Erosividade da chuva (R)

A erosividade é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva em causar erosão em uma área sem proteção ao solo (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999). Como o fator R da EUPS define o potencial erosivo de eventos pluviométricos, a melhor forma de expressar essa variável é por meio de um índice baseado na energia cinética da chuva (KIRKBY, MORGAN, 1980; MORGAN, 1995).

Para Wischmeier e Smith (1978), a perda de solo é diretamente proporcional ao parâmetro de duas características da chuva, ou seja, a energia cinética e a intensidade máxima em 30 minutos. Essas características, de forma integrada, representam a consequência de como o processo erosivo por meio do impacto das gotas das chuvas, salpico e turbulência se combinam com o escoamento superficial para transportar as partículas de sedimentos. Nesse sentido, Wischmeier e Smith (1978) por meio da relação entre a energia cinética total da chuva (E_c) e sua intensidade em 30 minutos (I_{30}), desenvolveram as seguintes equações para determinar o fator R da EUPS. Para a determinação da energia cinética (E_c) usa-se a seguinte equação:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I \quad (2)$$

Onde:

E_c = Energia cinética da chuva em $Mj/ha.mm$;

I = intensidade da chuva em mm/h .

A obtenção da intensidade máxima da chuva em trinta minutos (I_{30}) é estipulada pela seguinte fórmula:

$$EI_{30} = E_c \cdot I_{30} \quad (3)$$

Onde:

EI_{30} = Índice de erosão expresso em $Mj.mm/ha.h$

E_c = Energia cinética da chuva em $Mj/ha.mm$;

I_{30} = intensidade da chuva em mm/h .

A soma dos valores do EI de cada chuva proporciona a determinação numérica do fator R da EUPS para um determinado período seja ele diário, sazonal ou anual. A

média ponderada dos valores pode ser usada para determinar o fator R para área com grande número de registros pluviográficos.

Os pluviógrafos, equipamentos responsáveis pelo registro da energia cinética e intensidade das chuvas são escassos em território nacional. Além disso, a análise dos diagramas desses equipamentos para a energia cinética das chuvas é extremamente morosa (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999).

Nesse sentido, Lombardi Neto e Moldenhauer (1980), por meio de análise estatística de dados de coeficiente de chuvas e índice de erosão do município de Campinas – SP propuseram calcular o índice de erosividade tendo como base valores médios de precipitação pluviométrica com série histórica mínima de trinta anos, conforme descrito na equação 2:

$$EI = 67,355 (r^2/P)^{0,85} \quad (4)$$

Sendo:

EI = média mensal do índice de erosão expressa em Mj.mm/ha.h

r = precipitação média mensal em milímetros (mm);

P = precipitação média anual em milímetros (mm);

Para a determinação do valor anual do índice R somam-se os resultados dos valores mensais conforme indicado na Equação (5):

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI_{30j} \quad (5)$$

2.3.2. Erodibilidade dos solos (K)

A erodibilidade pode ser conceituada como a potencialidade natural do solo em sofrer erosão a partir de mecanismos que causam destacamento e transporte de suas partículas (MORGAN, 1995; BRYAN, 2000). Essa capacidade de desprendimento e arraste das partículas está relacionada à composição física e química de cada solo, além de outros atributos como textura, permeabilidade, estabilidade dos agregados, coesão das partículas e teor de matéria orgânica (GREENLAND, 1977).

A quantificação da propriedade erodibilidade é tarefa complexa, sobretudo pelas inúmeras variáveis envolvidas (SUMMERFIELD, 1991). Os métodos e técnicas desenvolvidos para a estimativa dessa propriedade podem ser diretos e indiretos. A instalação de equipamentos que monitorem a taxa de solo perdida em unidade de área

em função da erosividade chuva simulada ou natural corresponde ao método direto (WISCHIMEIR, SMITH, 1978). O método indireto consiste na estimativa do fator K da EUPS por meio de equações matemáticas que tem como base atributos físicos e químicos dos solos. O nomógrafo de Wischmeier e Smith (1978) e o modelo proposto por Denardin (1990) são exemplos desses métodos indiretos.

No Estado de São Paulo, Lombardi Neto & Bertoni (1975), determinaram o fator K da EUPS para 66 classes de solos. A partir disso, diversos pesquisadores vêm trabalhando com essa temática e estimando a erodibilidade dos solos no Estado de São Paulo, a saber: Bueno (1994), Fiorio (1998), Cerri (1999), Ranieri (2000), Moretti (2001), e Fujihara (2002).

Silva e Alvares (2005) organizaram um banco de dados com informações sobre a erodibilidade das classes de solos presentes no mapa pedológico do Estado de São Paulo elaborado por Oliveira et. al. (1999). Por meio da análise bibliográfica desses dados, os autores estipularam a média ponderada dos valores do fator K da EUPS para cada tipo de solo existente no Estado.

2.3.3. Comprimento de rampa (L) e Declividade (S)

A influência do relevo no processo erosivo de origem hídrica ocorre pelo grau de declive e comprimento das vertentes (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999). Essas variáveis topográficas, representadas na equação pelas letras L (*length*) e S (*slope*), são obtidas por métodos distintos e determinadas com unidades de medidas também variadas, como por exemplo, metros (m) para comprimento de rampa, grau (°) e/ou porcentagem (%) para a declividade.

Contudo, para Valeriano (1999), a integração entre os dois fatores torna-se necessário na aplicação da EUPS principalmente por se tratar de uma relação entre perdas de solo na condição real e em determinada condição padrão (declive de 9% e comprimento de 25m). Nesse sentido, o fator LS da EUPS quando integrado, não apresenta unidade específica, é adimensional, considerado uniforme e expresso como índice do fator topográfico. Assim, desconsideram-se as características geomórficas específicas das vertentes como concavidade e convexidade.

Foster et. al. (1981) definiram a seguinte equação (6) para determinar o fator topográfico com uso de grau de declive e comprimento de rampa em combinações definidas:

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} (1,36 + 0,97S + 0,1385 S^2) \quad (6)$$

Onde:

LS = Fator topográfico

L = Comprimento da rampa em metros

S = grau de declive em porcentagem

Bertoni (1959) por meio de análise de dados de perdas de solos em parcelas experimentais com diferentes graus de declive e comprimento de rampa nas principais classes pedológicas do interior paulista elaborou um modelo (Equação 7) que possibilita o cálculo para variadas combinações do fator LS da EUPS.

$$LS = 0,00984 C^{0,63} D^{1,18} \quad (7)$$

Onde:

LS = Fator topográfico

C = Comprimento da rampa em metros

D = grau de declive em porcentagem

2.3.4. Uso e manejo do solo (C)

O fator C da EUPS corresponde a um índice que estipula o efeito combinado dos atributos que protegem o solo durante o processo erosivo hídrico. Esses atributos devem ser avaliados de forma integrada e referem-se ao tipo de cobertura vegetal que ocupa o terreno, ao sistema de cultivo que pode ser temporário ou permanente e as práticas específicas de manejo adotadas, ou seja, relacionadas ao preparo do solo para o plantio (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999). Além disso, deve ser incorporado na determinação desse índice o estágio de desenvolvimento das culturas ao longo do calendário agrícola, uma vez que a variação das características biofísicas das plantas influencia na proteção do solo durante o processo de erosivo.

Bertoni e Lombardi Neto (1999) por meio da análise de dados obtidos junto a experimentos em parcelas de campo estabeleceram o índice do fator C da EUPS para diferentes tipos de cultura e forma de manejo variada praticada no Estado de São Paulo.

2.3.5. Prática Conservacionista (P)

O fator P da EUPS exprime a relação de perdas de solo esperadas em um terreno cultivado com adoção de algumas práticas de conservação e aqueles em que o cultivo está sendo realizado sem métodos conservacionistas, no sentido do declive (BERTONI, LOMBARDI NETO, 1999). Nesse sentido, o fator P é expresso por um índice que representa a prática conservacionista adotada pelas propriedades como, por exemplo, plantio morro abaixo, em contorno e direto.

Bertoni e Lombardi Neto (1999) por meio de pesquisas experimentais junto ao IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) estipularam índices do fator P da EUPS para compor o cálculo de perdas de solos por erosão. Grande parte das pesquisas que aplicaram a EUPS em território nacional utilizaram esses dados.

Os fatores C e P da EUPS representam as ações humanas sobre o uso da terra e influenciam diretamente no processo de erosão hídrica (MORGAN, 1995). Portanto, é necessário que se identifique de forma minuciosa o uso e ocupação das terras, bem como as práticas conservacionistas adotadas pelas propriedades para atribuir de forma correta os valores dessas variáveis.

2.4. Dados de Sensoriamento Remoto para análise dos fatores da EUPS

Os dados obtidos por Sensoriamento Remoto têm sido muito usados para estudos relacionados ao levantamento e monitoramento de informações do meio físico. Conceituado por Florenzano (2007) como a tecnologia que permite obter imagens e dados por meio da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície da Terra, o Sensoriamento Remoto constitui uma ferramenta que facilita a observação de processos dinâmicos do planeta pela repetitividade própria dos sistemas sensores (LILLESAND, KIEFER, 1979).

Os sensores remotos, normalmente instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões e aviões) ou orbitais (satélites artificiais), produzem dados matriciais (imagens) que constituem uma das principais fontes de informação de entrada em SIG's e permite a elaboração de diferentes tipos de produtos cartográficos (ARNOFF, 1989).

Diversos sistemas sensores passivos operando em nível orbital são usados para o monitoramento territorial e ambiental do planeta, com destaque para o sino brasileiro

CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*), o francês SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) e o norte americano LANDSAT.

A série de satélites LANDSAT constitui um dos mais antigos programas espaciais voltados para o monitoramento dos recursos terrestres. O lançamento do primeiro sistema sensor da série LANDSAT ocorreu em 1972 e partir de então, sete novos satélites foram lançados. O sistema *Multispectral Scanner System (MSS)*, com quatro canais de operação (dois no visível e dois no infravermelho próximo) e resolução espacial de 80m equipou a série dos três primeiros satélites. As versões Landsat 4 e 5, lançados na década de 1980, foram equipados com o sensor *TM (Thematic Mapper)* além do MSS das versões anteriores. O dispositivo *TM* possui sete canais espectrais com resolução espacial de 30m, exceto para a banda 6 que é de 120m. Três canais operam na região do visível (bandas 1, 2 e 3), dois no infravermelho médio (bandas 5 e 7), um no infravermelho próximo (banda 4) e um no infravermelho termal (banda 6).

Em 1993 foi lançado o Landsat 6 que foi considerado perdido por não atingir sua órbita. Em 1999, equipado com sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM⁺)*, foi lançado o Landsat 7, com os mesmos canais espectrais do sensor *TM*. A resolução espacial da banda 6 é de 60m e houve a inclusão de uma banda (8) da região do visível e infravermelho próximo com resolução espacial de 15 metros. No entanto, devido a falhas de operação, desde 2003, o Landsat 7 não envia mais imagens.

Equipado com o sensor espectral *OLI (Operational Land Imager)* e o termal *TIRS (Thermal Infrared Sensor)* o último satélite da série, o Landsat 8, foi lançado em fevereiro de 2013. Possui onze canais espectrais com resolução espacial de 30m para as bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 9, 15m para a banda 8 (pancromática) e 100m para as bandas 10 e 11 (termais).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza em seu endereço eletrônico um acervo com imagens de diversos satélites. O banco de imagens do sistema sensor Landsat 5/TM é um dos que possuem a maior série temporal (1984 a 2011). Nesse sentido, a extração de informações das imagens desse satélite pode proporcionar um conhecimento significativo sobre a dinâmica de uso e ocupação da terra em algumas regiões, sobretudo, devido a sua abrangência de imageamento (185 x 185 km), resolução temporal (16 dias aproximadamente), espacial (30 x 30 m na maioria dos canais), radiométrica (0 a 255 níveis de cinza) e espectral (7 bandas).

As técnicas de processamento digital de imagens (PDI) executadas em SIG's auxiliam na identificação e extração das informações que compõem os dados orbitais. O

pré-processamento, o realce, a composição colorida, a fusão de bandas, a segmentação, a classificação e a pós-classificação fazem parte dos procedimentos relacionados ao PDI. Grande parte das notificações descritas a seguir sobre essas técnicas tiveram como base as informações presentes no Sistema de ajuda *on line* do SPRING disponibilizado pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do INPE (2012).

O pré-processamento consiste na transformação dos dados iniciais brutos em informações corrigidas em termos geométricos e radiométricos para a entrada no sistema geográfico de informação. A retificação geométrica corresponde a um dos principais procedimentos do pré-processamento e tem como objetivo adequar a imagem inicial às propriedades de escala e projeção de um mapa específico por meio do relacionamento matemático entre pontos correspondentes dos dados (RICHARDS, 1993).

Os procedimentos relacionados ao realce de contraste visam facilitar a identificação visual dos dados contidos na imagem bruta. Por meio da equalização do padrão de distribuição dos *pixels*, é possível aumentar o contraste da imagem que naturalmente apresenta valores de níveis de cinza concentrados em uma parte específica do histograma de distribuição. Uma das principais vantagens desse procedimento é que ele não altera o padrão de resposta do histograma original, simplesmente expande suas extremidades (CRÓSTA, 1993).

A associação e integração dos canais espectrais a filtros coloridos correspondem a outra forma de ganho visual das imagens orbitais. As bandas podem ser associadas a esses filtros de acordo com o propósito de estudo do usuário, ou seja, não há regras específicas para esse procedimento.

Outra técnica de processamento digital de imagens bastante difundida é a de fusão de dados multiespectrais. Por meio desse procedimento é possível combinar imagens de um único sensor ou de satélites diferentes com distintas resoluções espaciais e espectrais (WALD et. al., 1997). Em termos práticos, integra-se uma banda com determinado comprimento de onda e maior resolução espacial com outras de características espectrais diferentes e menor resolução geométrica. Como resultado obtém uma imagem fusionada colorida com a resolução espacial mais alta dos canais utilizados na metodologia. Como exemplo, pode se citar a integração da banda pancromática (B8) presentes nos sensores Landsat 7 e 8 com resolução espacial de 15m com outros canais espectrais desses mesmos satélites de resolução 30m.

A técnica de segmentação consiste em localizar e particionar regiões com atributos espectrais similares na imagem (MOREIRA, 2001). Por meio desse procedimento é possível agrupar *pixels* semelhantes e definir padrões de classes específicos nos dados orbitais de acordo com interesse do usuário. O algoritmo crescimento de regiões corresponde ao um dos métodos mais usados nesse procedimento. Basicamente, essa técnica consiste no agrupamento dos dados por meio de medidas estatísticas dos valores de níveis de cinza dos *pixels* (HARALICK, SHAPIRO, 1985). Para a execução dessa metodologia é necessário que o usuário defina os valores de similaridade espectral e área para a agregação dos *pixels*. A segmentação normalmente é usada quando o usuário possui um conhecimento inicial sobre o uso e ocupação da terra de sua área de estudo.

A classificação é o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos que são utilizados para mapear regiões da superfície terrestre (MATHER, 1993). Pode ser dividida em supervisionada, quando o usuário possui informação prévia sobre alguns aspectos da área e as identifica durante o processo classificatório e não supervisionada, quando o classificador não possui esse conhecimento e utiliza algoritmos específicos para reconhecer possíveis padrões presentes na imagem (JAMES, 1985). Normalmente, a classificação supervisionada é precedida pelo processo de segmentação. Nessa estratégia, durante o processo de treinamento, os temas de uso da terra definidos previamente pelo usuário são associados aos polígonos identificados na segmentação e classificados posteriormente por meio de algoritmos especializados.

O processo de pós-classificação é utilizado para corrigir áreas associadas a temas que não correspondem às classes pré-estabelecidas (SCHOWENGERDT, 2006). Uma imagem com aparência uniforme é obtida nesse procedimento que pode ser executado de forma automática ou manual no sistema de informação geográfica.

Outros dados importantes obtidos por Sensoriamento Remoto que são muito utilizados para estudos relacionados ao meio físico são os da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A utilização de bases topográficas digitais obtidas por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a carência de mapeamentos, sobretudo na África, Oceania e América do Sul (VALERIANO, 2004).

A missão SRTM foi realizada em fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial *Endeavour* com objetivo de obter informações tridimensionais da superfície terrestre entre as latitudes 54° S e 60° N por meio de interferometria (van ZYL, 2001; RABUS et

al., 2003) . Para isso, as bandas principais do sistema (C e X) receberam suporte de antenas de transmissão instaladas em um mastro de 60m do veículo espacial (VALERIANO, 2004). O projeto foi realizado em parceria entre as agências espaciais americanas NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), a italiana ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*), a alemã DLG (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) e o Departamento de Defesa dos Estados Unidos – DoD (*Department of Defense*).

O processamento e edição dos dados obtidos pela missão resultaram na formação de um Modelo Digital de Elevação (MDE) mundial com resolução espacial de 30m para os EUA e 90m para os demais países. O Serviço Geológico Americano - USGS (*United States Geological Survey*) é responsável pela disponibilização pública desses dados.

As informações obtidas por meio dos dados de Sensoriamento Remoto auxiliam de forma significativa na ponderação e determinação dos fatores da EUPS. Os fatores C e P da EUPS podem ser associados às classes de uso e ocupação das terras obtidas por meio dos dados dos sistemas sensores. Já os dados da missão SRTM podem ser usados para determinar inúmeras variáveis topográficas como, por exemplo, os fatores topográficos (L e S) da Equação Universal de Perdas de Solo.

2.5. Geoprocessamento e SIG para a aplicação da EUPS

Com o desenvolvimento dos SIG's houve um aumento na aplicação e desenvolvimento dos modelos de predição de perdas de solos (POIRAUD, A. 2014). Isso ocorre, dentre outro fatores, pelo fato dos Sistemas de Informação Geográfica reunir um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real (BURROUGH, 1987). Essas ferramentas, que realizam o tratamento da informação geográfica, têm como base metodológica alguns procedimentos matemáticos e computacionais que são definidas por Camara e Davis (2000) como Geoprocessamento. Pode-se dizer que as técnicas de Geoprocessamento, disposta nos SIG's, agem como uma ponte entre a concepção teórica sistêmica dos modelos e a prática da pesquisa ambiental (XAVIER DA SILVA, 2007).

Para Star e Estes (1990) o SIG deve contemplar cinco elementos essenciais em sua composição, ou seja: aquisição de dados, pré-processamento, administração, manipulação/análise e geração de produtos.

A aquisição é o processo inicial onde ocorre a coleta dos dados demandados de acordo com o propósito da pesquisa. O pré-processamento consiste na etapa de manipulação das informações coletadas para a introdução no sistema. A conversão no formato dos arquivos e a correção geométrica dos dados são exemplos de procedimentos realizados nessa etapa. A administração consiste nas funções relacionadas à entrada, atualização, supressão e recuperação da base de dados do sistema. A etapa relacionada à manipulação e análise consiste nas operações analíticas realizadas pelo sistema sobre a base de dados. Nessa fase, novas informações são geradas por meio da integração dos dados de entrada. A fase final, constituída pela geração de produto, consiste na saída dos dados processados pelo SIG. Relatórios estatísticos, gráficos, imagens, modelos numéricos espaciais e mapas são exemplos desses produtos.

A estimativa de perdas de solos por erosão laminar com auxílio de técnicas de Geoprocessamento se baseia em operações lógicas e analíticas entre planos de informação (PI) determinados dentro dos SIG's (VALERIANO, 1999). Esses PI's armazenam dados em formatos variados como grades numéricas, imagens no formato raster (matrizes), informações temáticas, cadastrais e objeto (CAMARA, et. al., 1996).

Especificamente no caso da aplicação da EUPS em ambiente SIG, cada variável do modelo pertencerá a um plano de informação numérico, disposto dentro de uma categoria específica. Mesmo as categorias determinadas em um primeiro momento como temática, como as classes de solos e uso e ocupação das terras, são transformadas em dados numéricos. Nesse caso, de forma prática, atribuem-se os valores numéricos de erodibilidade, uso, manejo da terra e prática conservacionista aos polígonos mapeados. Com isso, têm-se todas as variáveis da equação dispostas em grades numéricas do terreno o que possibilita uma flexível integração e modelagem entre os dados e resulta na aquisição de novas informações de forma relativamente rápida e automática.

A Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) é a ferramenta responsável pela integração dos dados e a execução do modelo EUPS no SPRING, *software* nacional livre adotado no presente trabalho.

Basicamente, os operadores matemáticos da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico atuam sobre os modelos numéricos das categorias através

da álgebra de mapas. A execução desses operadores é realizada por meio da elaboração de sentenças previamente definidas por regras gramaticais que irão descrever os procedimentos que serão realizados sobre os dados espaciais. Nesse sentido, para a determinação de cada variável do modelo EUPS será desenvolvida e executada uma programação computacional específica, assim como para o cálculo da própria equação.

2.6. Alterações no uso da terra e comportamento da vazão fluvial

Em uma bacia de drenagem o processo de escoamento superficial é controlado pela fisiografia da área, condicionantes climáticos e uso da terra. Algumas mudanças nos padrões de deflúvio, sobretudo na vazão fluvial, podem ser observadas devido às modificações desses fatores controladores (TUCCI, 2002).

Nessa perspectiva, em uma escala de tempo relativamente pequena, as modificações no uso e cobertura da terra tendem a ocorrer de forma mais rápida quando comparada aos demais fatores e impactar nos processos hidrológicos das bacias. A variabilidade nos padrões da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo condicionada pela urbanização são exemplos dessas alterações (GUIMARÃES, 2000).

Em algumas regiões do Brasil esse dinamismo de uso e cobertura da terra pode ser observado pelas frequentes alterações de locais destinados às pastagens, silvicultura ou com vegetação arbórea para áreas com cultivo agrícola temporário. Em termos hidrológicos, o aumento do escoamento superficial e consequentemente da vazão fluvial em detrimento do processo de interceptação, evapotranspiração e infiltração de água no solo podem ocorrer no período de exposição das terras existentes entre as safras das lavouras temporárias (TUCCI, 2002).

A avaliação das mudanças no uso das terras e os impactos no regime de descarga fluvial podem ser analisados por meio de estudos de correlação, em bacias pareadas e em uma única bacia hidrográfica (McCULLOCH, ROBINSON, 1993). Os estudos de correlação tem como base a comparação entre vazões fluviais em bacias com características morfometrias semelhantes, mas com uso e cobertura vegetal distinta. No estudo de bacias pareadas monitora-se a vazão de duas bacias semelhantes em termos fisiográficos e vegetacionais. Após um determinado período altera-se propositalmente o uso e a cobertura da terra em uma das bacias e aplica-se a análise comparativa dos dados de vazão fluvial para as duas unidades, ou seja, a alterada e a sem alteração.

Os estudos que se baseiam na análise de uma única bacia hidrográfica (ou de parte dela) consiste em verificar o comportamento da descarga fluvial em períodos anteriores e posteriores às mudanças ocorridas no uso e cobertura das terras. A análise, quantificação e comparação estatística multitemporal de dados de uso da terra e de vazão fluvial são exemplos metodológicos desenvolvidos nesse tipo de estudo.

A quantificação da variabilidade de uso e ocupação da terra pode ser feita por meio de análise, interpretação e classificação de dados orbitais conforme descrito no item 2.4. A verificação da existência de diferença significativa entre as médias históricas de vazão fluvial pode ser realizada por meio da análise da estatística descritiva dos dados associada à aplicação de testes paramétricos como, por exemplo, o *t* de *Student*.

O teste *t* pode ser aplicado para as seguintes situações: quando se presume variâncias da amostra equivalentes, diferentes ou quando duas amostras representam observações do mesmo assunto antes e depois de um determinado evento (DEVORE, 1995).

Em estudos hidrológicos, usualmente, o teste *t* é aplicado para comparar médias de duas populações normais com variâncias diferentes ao longo de um determinado período (NAGUETTINI, PINTO, 2007).

Para a aplicação do referido procedimento (Teste *t*), em um primeiro momento, deve-se estabelecer as hipóteses que serão testadas e o intervalo de confiança do teste. No caso da análise da mudança de valores médios de vazão fluvial as hipóteses estabelecidas são em função dos atributos da bacia de interesse (fisiografia, precipitação e/ou uso da terra). Essa fase servirá de base para determinar se as alterações observadas nas médias das amostras são significativas ou não de acordo com o intervalo estabelecido.

A equação 8 exhibe as variáveis usadas para a determinação do teste *t* de *Student*:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{m} + \frac{S_2^2}{n}}} \quad (8)$$

Onde:

t – teste *t* de *Student*;

$\bar{x}$ – média das amostras;

S – Desvio padrão das médias das amostras;

m e n – número de amostras.

O resultado alcançado no modelo anterior deve ser comparado aos valores previamente estabelecidos em uma tabela específica com valores críticos do teste t. O uso de uma tabela de valores críticos para teste t é usual em estatística para evitar o cálculo integral envolvido nas fórmulas mais gerais (LEITE, RINO, 2009).

Para verificar qual valor da tabela do teste t deve ser usado para comparação deve-se calcular o grau de liberdade das amostras conforme descrito na Equação 9:

$$df = \frac{\left(\frac{S_1^2}{m} + \frac{S_2^2}{n}\right)^2}{\frac{(S_1^2/m)^2}{m-1} + \frac{(S_2^2/n)^2}{n-1}} \quad (9)$$

Onde:

df – grau de liberdade

S – Desvio padrão das médias das amostras;

m e n – número de amostras.

Caso o valor de t alcançado pela equação 8 for maior que o valor crítico encontrado na tabela, então as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas. O mesmo raciocínio deve ser usado para valores menores que os obtidos na tabela, ou seja, considera-se sem variabilidade significativa de média.

Diante desses valores, é possível determinar qual das hipóteses pré-estabelecidas no início da análise deve ser descartada e qual deve ser adotada.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

A área de estudo escolhida para essa pesquisa compreende a bacia do rio Jacaré Guaçu, localizada à margem direita do rio Tietê na região central do Estado de São Paulo (Fig. 5).

Figura 5 – Localização da área de estudo, MDE (Mode Digital de Elevação) da bacia e de seu entorno – Dados da missão *SRTM* (*Shuttle Radar Topographic Mission*) - 2000 da *NASA* (*National Aeronautics and Space Administration*). Organizado e elaborado pelo autor.

Com uma área aproximada de 4 057 km² a bacia do rio Jacaré Guaçu abrange os municípios de Nova Europa e Gavião Peixoto e parte dos municípios de São Carlos, Brotas, Analândia, Ribeirão Bonito, Araraquara, Ibaté, Matão, Ibitinga, Itirapina, Tabatinga, Trabiçu, Dourado e Boa Esperança do Sul (Fig. 6).

Figura 6 – Municípios que compõem a bacia do rio Jacaré Guaçu.

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Organizado pelo autor.

3.2. Geologia

A área de estudo está sustentada por rochas vulcânicas e sedimentares da bacia Fanerozoica do Paraná. As principais formações geológicas que ocorrem na bacia do rio Jacaré Guaçu são: Corumbataí, Pirambóia, Botucatu, Serra Geral, Vale do Rio do Peixe, Itaqueri, além de depósitos aluvionares e colúvio elúvionares (PERROTA et al., 2005).

A Formação Corumbataí pertence a sequência Carbonífero-Eotriássica do Grupo Passa Dois (MILANI, et al., 1994). Apresenta argilitos, folhelhos e siltitos roxos e/ou vermelhos intercalados de bancos de calcários maciço ou laminado (PERINOTTO et al., 2008). Na área de estudo a referida Formação ocorre no alto curso da bacia no município de Analândia.

A Formação Pirambóia faz parte do Grupo São Bento do período Triássico da era Mesozóica. Arenitos com grãos arredondados, esféricos, vermelhos, brancos e laranjas com estratificação cruzada e plana paralela compõem essa Formação (IPT, 1981). O substrato rochoso dessa Formação está associado ao alto curso da bacia do rio Boa Esperança e médio Jacaré Guaçu, sobretudo no município de Ribeirão Bonito.

Assim como a Formação Pirambóia, a Formação Botucatu também faz parte do Grupo São Bento, porém, é atribuída ao período Jurássico do Mesozóico (SOARES, LANDIM, 1975). Fazem parte dessa Formação arenitos bem selecionados com grãos esféricos, avermelhados, de granulação fina a média e estratificação cruzada de médio e grande porte. Ocupa vasta área na bacia hidrográfica, desde o alto Jacaré Guaçú no município de Itirapina até o baixo curso do rio, próximo a confluência com o Tietê.

Desenvolvida nos períodos Jurássico e Cretáceo, também pertencente ao Grupo Bauru, a Formação Serra Geral é formada por basaltos, andesitos basálticos, riolitos e riodacitos de coloração cinza a negra e textura afanítica (MELFI et al., 1988). Vesículas e amidas podem ocorrer na parte superior dos derrames enquanto que geodos podem aparecer nos setores mais profundos das camadas. Na área de estudo as rochas dessa Formação ocorrem em diversos municípios, sobretudo vinculadas ao terço inferior das vertentes, as escarpas do relevo de cuevas e ao leito dos rios.

Datada do Cretáceo Superior, a Formação Vale do Rio do Peixe corresponde a um dos estratos sedimentares depositados sobre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, classificada por Fernandes (1992) como constituinte da Bacia Bauru e classificada por Almeida et al. (1980) como Formação Adamantina. É formada praticamente por estratos de arenitos muito fino a fino, marrom, rosa e laranja de boa seleção. Abrange grande parte da bacia do rio Jacaré Guaçú, sobretudo nos setores norte e oeste, junto aos municípios de Araraquara, Matão, Gavião Peixoto, Nova Europa, Tabatinga e Ibitinga.

A Formação Itaqueri é atribuída ao final dos períodos Cretáceo do Mesozóico e Terciário do Cenozoico. É constituída por arenitos conglomeráticos, silicificados, muito fino a grosso. Folhelhos e conglomerados com clastos de basaltos, quartzo, quartizitos e calcedônias também são verificados (PERROTA et al., 2005). Na área de estudo a referida Formação ocorre no alto curso da bacia, em partes dos municípios de Itirapina, São Carlos, Ibaté e Analândia.

Os depósitos cenozoicos colúvio elúvionares situam-se no alto curso da bacia hidrográfica junto aos municípios de São Carlos, Itirapina e Ibaté. Apresentam constituição variada de seixos, areia, silte e argila. Os materiais são oriundos dos processos erosivos atuante nas escarpas do entorno, próximas à Depressão Periférica (CHRISTOFOLETTI, QUEIROZ NETO, 1966). Já os depósitos aluvionares são compostos por areia, areia quartzosa, cascalheiras, silte e argila e ocorrem junto ao vale

do rio Jacaré Guaçu em seu baixo curso. A figura 7 exhibe a distribuição espacial das Formações Geológicas presentes na área de estudo.

Figura 7 – Substrato geológico da área de estudo.

Na figura 8 é possível observar o afloramento dos arenitos da Formação Itaqueri intercalados aos depósitos colúvio elúvionares cenozóicos no município de Itirapina (A). Na foto ao lado aparecem os basaltos da Formação Serra Geral, associados ao leito do rio Jacaré Guaçu em seu alto curso (B).

Figura 8 – A - Afloramento dos arenitos da Formação Itaqueri intercalado com depósitos cenozóicos colúvio elúvionares. B - Basaltos da Formação Serra Geral.

3.3. Geomorfologia e hidrografia

Em relação à geomorfologia, dentro do contexto da bacia sedimentar do Paraná (morfoestrutura), a área de estudo localiza-se na unidade morfoescultural denominada Planalto Ocidental Paulista, subunidades Planalto Residual de São Carlos e Planalto Centro Ocidental (ROSS, MOROZ, 1997).

O Planalto Ocidental Paulista, com área aproximada de 120 000 km², apresenta uma vasta extensão de chapadões areníticos de vertentes predominantemente convexas suaves e de relevos tubuliformes (AB'SABER, 1969). Derrames basálticos intercalados ou sobrepostos às unidades sedimentares também são verificados nessa unidade geomorfológica (ALMEIDA, 1965). Delimitado a leste pela Depressão Periférica Paulista, ao sul, norte e oeste pelos rios Paranapanema, Grande e Paraná respectivamente, o Planalto Ocidental Paulista apresenta altitudes que variam de forma decrescente entre 1100m no alto das cuestas e 250m nos terraços dos rios.

Em contato com a Depressão Periférica aparecem os relevos escarpados, constituídos principalmente por rochas vulcânicas e sedimentares. Correspondem as áreas iniciais mais próximas do reverso da cuesta, com predomínio de morros testemunhos, amplos, mesas basálticas, encostas sulcadas por vales paralelos e encostas não escarpadas com cânions locais (IPT, 1981). Na área de estudo, essas formas de relevo são verificadas no setor central, leste e sudeste, associadas ao Planalto Residual de São Carlos.

No restante da bacia prevalecem as colinas amplas e médias, com vertentes do tipo convexas, com topos planos e longos e baixa amplitude altimétrica vinculadas ao compartimento Planalto Centro Ocidental. Mesas basálticas com topos planos ou arredondados com vertentes retilíneas são verificadas no médio e baixo curso da bacia hidrográfica. Pequenas planícies e terraços fluviais aparecem junto ao rio Jacaré Guaçu, principalmente em seu baixo curso.

A figura 9 exibe um modelo tridimensional da bacia do rio Jacaré Guaçu produzido por meio de dados da missão SRTM. Na imagem são indicadas as principais formas de relevo presentes na área de estudo de acordo com a classificação do IPT (1981).

Figura 9 – Modelo tridimensional com indicação das principais formas de relevo presentes na área de estudo: I – Colinas Médias, II – Planície Fluvial, III – Colinas Amplas, IV – Escarpas Festonadas, V – Mesas Basálticas, VI – Encostas não Escarpadas com Cânions Locais, VII – Encostas Sulcadas por Vales Paralelos, VIII – Morros Arredondados e IX – Morros Amplos.

A figura 10 exibe os principais rios que formam a bacia do rio Jacaré Guaçu sobrepostos ao modelo digital de elevação proveniente dos dados *SRTM*.

Figura 10 – Principais rios que compõem a bacia do rio Jacaré Guaçu sobreposto ao Modelo Digital de Elevação da área de estudo.

O sistema de drenagem da bacia é controlado, sobretudo, pelos condicionantes estruturais geomórficos. O rio Jacaré Guaçu da nascente até o seu médio curso bem como o rio Boa Esperança apresentam alinhamento estrutural semelhante ao rio Tietê, com orientação SE – NW. Tal alinhamento constitui a mesma direção do caimento das camadas das rochas da bacia sedimentar do Paraná que sustentam a área de estudo. O rio das Cruzes, Chibarro, São João, Itaquerê, Monjolinho, ribeirão do Feijão e rio Jacaré Guaçu de seu médio curso até a confluência com o rio Tietê demonstram alinhamento estrutural NE – SW.

A figura 11 exibe algumas imagens referentes às principais formas de relevo e do sistema de drenagem presentes na área de estudo.

Figura 11 – Principais formas de relevo e características do sistema de drenagem da área de estudo. A – Morro arredondado; B – Mesa Basáltica; C – Escarpa Festonada ao fundo e rio Jacaré Guaçu em seu alto curso; D – Morro Amplo; E – Colinas Amplas e F – Planície fluvial no baixo Jacaré Guaçu.

3.4. Solos

As particularidades litológicas da área de estudo aliadas às características do relevo, tempo, atividades biológicas e condições climáticas permitiram o desenvolvimento de diferentes tipos de solos.

De acordo com Oliveira et al. (1999) ocorrem na área de estudo as seguintes classes de solos: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Gleissolo Háplico, Planossolo Háplico e Organossolo Háplico. Esses tipos pedológicos estão associados, sobretudo, ao substrato geológico, as características do relevo e ao posicionamento que se encontram nas vertentes. Os Latossolos possuem maior representatividade na área de estudo, seguido pelo Argissolo Vermelho Amarelo e Neossolo Quartzarênico. O Neossolo Litólico, Planossolo Háplico, Gleissolo Háplico e Organossolo Háplico estão associados, sobretudo às características geomorfológicas da bacia hidrográfica. O primeiro ao relevo escarpado com declividades acentuadas e os três últimos vinculam-se às pequenas e médias planícies de inundação no alto e médio Jacaré Guaçu e médio Ribeirão do Feijão.

O mapa com a distribuição espacial das classes de solos na bacia hidrográfica mais a descrição das características morfológicas desses materiais é apresentado no item 5.4 do tópico fator K da EUPS.

3.5. Clima

A área de estudo apresenta o clima tropical alternadamente seco e úmido controlado por massas equatoriais, tropicais e com influência geomorfológica regional da Serra de São Carlos. (MONTEIRO, 1973). A atuação da corrente perturbadora do sul, associada a Frente Polar, também influencia o tempo e o clima na bacia do rio Jacaré Guaçu, sobretudo durante o inverno. Esse sistema promove a queda da temperatura do ar e provoca grande parte das chuvas no Estado de São Paulo (SANT'ANNA NETO 1995).

A variação da temperatura média do ar da área de estudo está condicionada, dentre outros fatores, pela latitude, estação do ano e altitude. O mês mais quente apresenta temperatura média acima de 22° C e no mês mais frio as médias térmicas variam entre 15° C e 18° C (IBGE, 2002). No entanto, devido à variação altimétrica da

bacia (1060 a 380m), os setores mais altos tendem a apresentar temperaturas abaixo dessa média tanto no verão quanto no inverno.

A precipitação média anual da região central do Estado de São Paulo está entre 1.100 e 2.000mm. De acordo com Sant'anna Neto (1995) verifica-se uma variabilidade espacial dos totais pluviométricos na região da bacia do rio Jacaré Guaçu vinculada a dois compartimentos geomorfológicos. O primeiro, com médias pluviométricas anuais entre 1500 e 2.000mm, está associado ao relevo cuestasiforme de altitudes elevadas (1060 a 800m) da Serra de São Carlos. Já o segundo, com totais pluviométricos que variam entre 1100 e 1500 mm ocupam maior área na bacia hidrográfica e vincula-se ao Planalto Centro Ocidental, onde a altitude varia entre 800 e 380m. Ainda, segundo o autor, os maiores volumes pluviométricos estão concentrados entre outubro e março e o período de menor precipitação ocorre entre abril e setembro.

3.6. Vegetação e Uso da terra

A vegetação natural da área de estudo era o Cerrado e a Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 1992). Durante a ocupação efetiva da região, que ocorreu no século XIX, a formação vegetal original foi substituída parcialmente por cultura de cana de açúcar, pastagens, café e agricultura de subsistência (FERREIRA, ALVES, 2009). Atualmente a bacia hidrográfica possui grande importância no contexto econômico do Estado de São Paulo, com destaque para as atividades relacionadas ao setor agropecuário. Grande parte da área de estudo é destinada ao cultivo da cana de açúcar, laranja, café e silvicultura. Locais destinados às pastagens, à preservação permanente da vegetação original e a área urbana dos municípios também são verificados.

A figura 12 demonstra algumas formas de uso e ocupação da terra presentes na área de estudo. As imagens são provenientes de diversos locais da bacia hidrográfica e foram obtidas em trabalho de campo realizado no mês de outubro de 2014.

Figura 12 – Principais formas de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica. A – Vegetação arbórea (Floresta Estacional) associada ao fundo de vale do rio Jacaré Guaçu no município de Gavião Peixoto; B – Silvicultura no município de Itirapina; C – Campos associado à vegetação arbórea (Cerrado) no alto Jacaré Guaçu; D – Solo exposto para o plantio da cana no município de Tabatinga; E – Cultura anual (laranja) à esquerda e Cultura temporária (Cana) à direita entre os municípios de Araraquara e Gavião Peixoto e F – Pastagem no município de São Carlos.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foram desenvolvidas as seguintes atividades para o desenvolvimento do trabalho:

- Revisão bibliográfica referente aos temas que subsidiam a pesquisa;
- Construção do banco de dados geográfico no SPRING versão 5.2.3;
- Levantamento e determinação das variáveis que compõem o modelo matemático EUPS;
- Processamento digital das imagens de satélite do ano de 1987, 2004 e 2013;
- Cálculo das perdas de solos por erosão laminar para os anos de 1987, 2004 e 2013;
- Elaboração de produtos cartográficos e gráficos das variáveis do modelo EUPS e das perdas de solos por erosão laminar (1987, 2004 e 2013);
- Aquisição e tratamento estatístico de dados de vazão fluvial do posto 5C-013 (Prefixo DAEE) para os anos de 1987, 2004 e 2013.

4.1. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi realizada com base nos seguintes temas: caracterização geográfica geral da área de estudo, processos hidrológicos e geomorfológicos em bacias hidrográficas, características gerais e processamento digital de imagens orbitais, erosão de solos, EUPS (Equação Universal de Perdas de Solo), uso de técnicas de Geoprocessamento e SIG (Sistema de Informação Geográfica) para o estudo de perdas de solos por erosão, alterações no uso da terra e comportamento da vazão fluvial.

4.2. Construção e organização do banco de dados geográfico

Para a estruturação, armazenamento e modelagem dos dados foi utilizado o *software* SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido e idealizado pelo (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) INPE (CAMARA, et. al., 1996).

A etapa inicial deste procedimento consistiu na criação do banco de dados e definição de seu sistema de gerenciamento das informações. Devido à compatibilidade com o Windows 32 bits, sistema operacional adotado na elaboração deste trabalho, definiu-se como gerenciador o driver *Access*.

Após essa etapa, criou-se o projeto denominado “Dr” com as informações geodésicas da área de estudo. Definiu-se como UTM o sistema de projeção cartográfica e o datum SAD 69 como modelo da Terra.

A etapa seguinte consistiu na definição e escolha dos modelos de dados e das categorias que foram usadas no projeto. O processo de modelagem de dados no SPRING consiste em desenvolver um conjunto de procedimentos para definir os tipos de dados que se pretende usar na pesquisa e associar essas informações as categorias e planos de informações criados no ícone “Modelo de Dados”. Basicamente, esta ferramenta funciona como um aglomerado de instrumentos conceituais cujo objetivo é estruturar as informações no sistema computacional para que seja manipulado pelo usuário. Os modelos de dados disponíveis no SPRING são: Imagem, MNT, Temático, Cadastral, Objeto, Rede e Não Espacial. A figura 13 exibe o *layout* do SIG e suas ferramentas para criação e definição das etapas descritas anteriormente.

Figura 13 – Visão geral do SPRING 5.2.3 e de suas ferramentas de criação e definição de banco de dados, projeto, sistema de gerenciamento, atributos cartográficos e modelo de dados.

Na sequência, foi introduzida a base de dados essenciais do projeto. Essas informações foram associadas aos modelos e categorias definidas. Por exemplo, os dados altimétricos da missão SRTM, as imagens orbitais do sistema/sensor Landsat 5 e 8 foram vinculados ao modelo de dados Imagem. Os mapas geológico e pedológico do Estado de São Paulo foram associados ao modelo Temático. Os dados de precipitação pluviométrica e erosividade das chuvas foram associados a pontos amostrais editados no modelo MNT.

Por fim, por meio do emprego de modelagem matemática e de diversas técnicas de Geoprocessamento sobre os dados iniciais básicos do projeto foram determinadas as informações espaciais e quantitativas referente à erosividade das chuvas, variáveis topográficas, uso da terra e perdas de solos por erosão laminar.

As técnicas matemáticas e computacionais adotadas nos procedimentos realizados são descritas especificamente nos itens a seguir.

4.3. Determinação das variáveis do modelo matemático

Para a determinação das variáveis do modelo EUPS foram utilizadas as seguintes metodologias:

4.3.1. Fator erosividade da chuva (R)

O cálculo do fator R da EUPS foi realizado de acordo com a proposta de Lombardi Neto e Moldenhauer (1980), conforme demonstrado nas Equações 4 e 5.

Os dados de precipitação pluviométrica usado para determinar o fator R da EUPS foram coletados junto ao Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH) no endereço eletrônico <http://www.sigrh.sp.gov.br>. A tabela 1 exhibe o prefixo de identificação dos postos, sua localização geográfica e altitude. O critério de escolha dos postos foi sua série histórica de trinta e um anos, no caso, 1968 a 1998.

Tabela 1 – Identificação e atributos geográficos dos postos pluviométricos usados no trabalho.

Identificação	Prefixo	Localização	Altitude (m)
1	D4 – 014	S 22° 14' O 47° 48'	790
2	D4 – 040	S 22° 14' O 47° 59'	780
3	D5 – 076	S 22° 04' O 48° 04'	580
4	D5 – 053	S 22° 06' O 48° 18'	690
5	C4 – 021	S 21° 57' O 47° 42'	840
6	C4 – 092	S 21° 52' O 47° 48'	610
7	C5 – 074	S 21° 36' O 48° 21'	560
8	C5 – 035	S 21° 57' O 48° 00'	830
9	C5 – 101	S 21° 51' O 48° 48'	490
10	C5 – 038	S 21° 47' O 48° 51'	510
11	C5 – 081	S 21° 49' O 48° 48'	420
12	C5 – 048	S 21° 48' O 48° 36'	490
13	C5 – 016	S 21° 51' O 48° 30'	480
14	C5 – 050	S 21° 47' O 48° 10'	670
15	C5 – 056	S 21° 55' O 48° 11'	560
16	C5 – 055	S 21° 59' O 48° 48'	500

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

Os postos 4, 7, 8 e 16 apresentaram falhas em seus bancos de dados. Para o preenchimento dessas lacunas foi usado o método da média aritmética proposto por Bertoni e Tucci (1993).

A Figura 14 exhibe a localização dos postos na bacia e em seu entorno. É possível verificar que dos 16 postos pluviométricos escolhidos 5 localizam-se fora da área de estudo e 11 dentro da bacia hidrográfica. Os postos são identificados com o prefixo estipulado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).

Figura 14 – Localização dos postos pluviométricos presentes na área de estudo e em seu entorno.

Com o objetivo de verificar o raio de abrangência dos postos pluviométricos sobre a área de estudo utilizou-se a proposta da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1994). O Órgão internacional definiu que para as áreas continentais a densidade mínima dos postos pluviométricos é de 575 km^2 . Correa (2012), com base no cálculo da área do círculo, estimou em $13,5 \text{ km}^2$ o raio de abrangência de um posto pluviométrico para a bacia do rio Piquiri no Estado do Paraná. Com base nesse valor, determinou-se a área de influência dos postos pluviométricos na bacia hidrográfica (Fig. 15). Pode-se observar que boa parte da bacia é abrangida pela área de alcance dos postos pluviométricos. Em termos numéricos, 83,2% da bacia está coberta pelos postos pluviométricos utilizados enquanto que o restante, ou seja, 16,8% não sofre influência de alcance das estações.

Figura 15 – Influência areal dos postos pluviométricos na bacia e em seu entorno representada pela cor azul – Organizado pelo autor.

Após o cálculo das médias mensais e anuais de precipitação pluviométrica e da erosividade das chuvas, atribui-se os valores aos pontos plotados no editor vetorial da categoria MNT do SIG. Por meio do interpolador Média Ponderada por Quadrante foi possível gerar uma grade numérica com resolução espacial de 30 m para X e Y e espacializar os valores do fator R para a bacia hidrográfica. Esta grade corresponde a variável R do modelo matemático e foi usada para compor o cálculo final de perdas de solos por erosão laminar.

Para a construção do produto cartográfico usou-se a função fatiamento de grade numérica disposta no SPRING. Com isso foi possível transformar o plano de informação numérico em temático com suas respectivas classes de valores.

4.3.2. Fator erodibilidade dos solos (K)

Os valores do fator K da EUPS usados neste trabalho foram compilados de Silva e Alvares (2005). Conforme descrito, tais índices tiveram como base valores médios do fator K determinados para as classes de solos presentes no mapa pedológico do Estado

de São Paulo, escala 1:500 000 (OLIVEIRA, et al., 1999), mesma base cartográfica usada neste trabalho.

O editor vetorial do SIG foi usado para digitalizar as classes de solos da área de estudo e uma rotina de programação computacional do tipo ponderação, executada na ferramenta LEGAL, foi usada para associar os valores de erodibilidade com as classes pedológicas definidas.

Como resultado final deste procedimento, obteve-se uma grade numérica, de resolução espacial X e Y de 30m, com os índices de erodibilidade para cada polígono de solo mapeado. Esta grade corresponde a variável do K da equação e compôs o cálculo das perdas de solo por erosão.

4.3.3. Fator Topográfico (LS)

Para o cálculo do fator topográfico foi utilizada a proposta de Bertoni e Lombardi Neto (1999), conforme descrita na equação 7. O desenvolvimento das rotinas computacionais no SIG SPRING para o cálculo individual dos fatores L e S bem como para sua integração (LS) teve como base os trabalhos realizados por Tomazoni e Guimarães (2005), Ruthes et. al (2012) e Souza e Gasparetto (2012).

Os dados topográficos da missão *SRTM* (*Shuttle Radar Topographic Mission*), disponíveis gratuitamente no endereço eletrônico <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> foram utilizados como base altimétrica para a geração das variáveis.

Primeiramente, geraram-se as isolinhas topográficas equidistantes em 20m tendo como base os pontos altimétricos cotados dos dados SRTM. Em seguida, gerou-se uma grade triangular (TIN) que foi armazenada em um modelo de dados Numérico do SIG. A grade numérica declividade (fator S) foi obtida por meio da função MNT – Declividade do SPRING. Nesse procedimento, a grade triangular (TIN) gerada na etapa anterior serviu como dado de entrada, a unidade porcentagem e as resoluções X e Y de 30m foram definidas como atributos de saída dos dados.

Para a elaboração do fator L da EUPS, primeiramente utilizou-se o editor Temático do SIG para digitalizar os interflúvios principais e secundários da bacia hidrográfica. Na função “mapa de distâncias” do ícone MNT do SPRING, após atribuir o valor de 0m para os divisores topográficos e definir a rede de drenagem como linha de quebra, gerou-se a grade numérica retangular com o comprimento de rampa (fator L) da

área de estudo, com resolução espacial X e Y de 30m. Esse plano de informação foi armazenado no modelo de dados Numérico do *software* adotado.

A variável topográfica (LS), usada para compor o cálculo da EUPS, foi obtida através da integração das duas grades numérica L e S. Por meio da elaboração de uma rotina de programação do tipo numérica no editor LEGAL do SIG, aplicou-se a equação 7 e obteve-se a referida grade com resolução X e Y de 30m.

Os procedimentos fatiamento de grade numérica e associação de plano de informação Numérico para o Temático foram realizados para a obtenção dos produtos cartográficos das três variáveis topográficas (S, L e LS).

4.3.4. Análise multitemporal do uso e ocupação do solo – Fatores C e P

Os valores dos fatores C e P da EUPS foram compilados de Bertoni e Lombardi Neto (1999). No entanto, para a ponderação desses valores ao banco de dados geográfico foi necessário elaborar os mapas de uso e ocupação das terras para os anos de 1987, 2004 e 2013. Assim, utilizaram-se técnicas de processamento digital de imagens orbitais propostas por Lillesand e Kiefer (1992) e desenvolveram-se as seguintes atividades:

- Aquisição e pré - processamento digital das imagens de satélite de 1987, 2004 e 2013;
- Aplicação de rotinas relacionadas ao ganho visual dos dados de Sensoriamento Remoto;
- Identificação, classificação e pós-classificação dos padrões predominantes de uso e ocupação da terra obtidos nas imagens de satélite.

4.3.4.1. Aquisição dos dados e rotinas de pré – processamento

As imagens do satélite Landsat5/TM foram obtidas junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no formato digital (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). Foram selecionadas três bandas de cada órbita ponto (220/75 e 221/75) para os anos 1987 e 2004. Os dados orbitais do sistema sensor Landsat8/OLI, usado para ano de 2013, foram adquiridos no endereço eletrônico <http://earthexplorer.usgs.gov/> da USGS (U. S. Geological Survey). Para a cobertura total da área de estudo foram selecionadas quatro bandas espectrais das duas órbitas ponto citadas. As imagens de ambos os satélites foram escolhidas com 0% de cobertura de nuvem. O contexto espacial das

cenos completas no Estado de São Paulo com suas respectivas órbita ponto é exibido a seguir (Fig. 16). As imagens do satélite Landsat8/OLI apresentam uma pequena variação de área de ocupação em relação ao do Landsat5/TM. Tal diferença varia entre aproximadamente 7’N e 8’S nas intersecções noroeste e sudeste, respectivamente.

Figura 16 – Mosaico das imagens de satélites usadas no projeto com as respectivas órbita/ponto do sensor TM/Landsat5 (vermelho) e OLI/Landsat8 (preto). Organizado pelo autor.

As especificações dos dados orbitais são demonstradas abaixo na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos dados orbitais usados no trabalho.

Sensor	Resolução Espacial	Órbita/ Ponto	Data	Bandas
Landsat5/TM	30m	220/75	29/06/1987	3,4 e 5
Landsat5/TM	30m	221/75	14/07/1987	3,4 e 5
Landsat5/TM	30m	220/75	30/08/2004	3,4 e 5
Landsat5/TM	30m	221/75	21/08/2004	3,4 e 5
Landsat8/OLI	30m e 15m (b8)	221/75	19/04/2013	3,4, 5 e 8
Landsat8/OLI	30m e 15m (b8)	220/75	18/07/2013	3,4, 5 e 8

Fonte – INPE e *Earth Explorer USGS*. Elaborado pelo autor.

Inicialmente realizou-se a conversão no formato dos arquivos das imagens de TIFF (*Tagged Image File Format*) para o SPG (formato nativo do SPRING). As cenas do sistema sensor Landsat 8/OLI foram submetidas a uma reamostragem radiométrica. Mais precisamente, transformou-se as cenas do referido sistema sensor de 16 para 8 bit.

Na sequência, as imagens foram corrigidas geometricamente tendo como base o mosaico Geocover s22-20-2000 da NASA, obtido por meio do site

<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>. Foram utilizados 18 pontos de controle para retificação geométrica com grau de polinômio 1 e interpolador vizinho mais próximo.

Para o mosaico das imagens utilizou-se a função Mosaico contido no ícone Imagem do software adotado. O interpolador estatístico usado para esse procedimento foi o vizinho mais próximo, uma vez que o mesmo assegura que o valor interpolado não gere novos valores (FRANKE, 1982).

4.3.4.2. Rotinas de realce, composições coloridas e fusão de bandas

As imagens de satélite usadas no presente trabalho foram submetidas à técnica de realce de contraste, modelo linear. Além disso, utilizou-se o filtro linear com máscara 4x4 específico para imagens TM/Landsat, disponível no SPRING 5.2.

Com o objetivo de melhorar o resultado na identificação do uso do solo gerou-se algumas composições coloridas das cenas dos sensores por meio da associação das bandas 3,4 e 5 aos filtros B (*Blue*), G (*Green*) e R (*Red*).

Para aprimorar a resolução espacial dos dados do sistema sensor Landsat8/OLI executou-se a técnica de fusão de imagem IHS (TU et al., 2001). Basicamente, tal procedimento consistiu em gerar uma composição colorida das cenas por meio da associação das bandas 3,4 e 5 aos filtros B (*Blue*), G (*Green*) e R (*Red*), respectivamente. Na sequência, associaram-se esses dados (3B 4G 5R) às componentes (I) intensidade, (H) matiz e (S) saturação, que resultou em três novas cenas. Com isso, no procedimento de retorno dos dados IHS para o BGR, substituiu-se a componente (I) pela banda de menor resolução espacial (15m), ou seja, a banda 8 do sistema sensor. As demais componentes H e S continuaram associadas aos canais G e B. Como resultado, obteve-se uma imagem sintética da área de estudo com uma resolução espacial de 15m.

As rotinas realizadas referentes à aplicação de realce, filtro, composição colorida e fusão das imagens orbitais são apresentados na figura 17.

Figura 17 – Imagem do alto curso da bacia do rio Jacaré Guaçu. (A) Banda 3 sem contraste, (B) contrastada, (C) filtrada, (D) composição colorida das bandas 3B, 4G e 5R, (E) composição colorida das bandas 3B, 4R e 5G (F) Imagem fusionada bandas 4, 5 e 8.

4.3.4.3. Rotinas de Segmentação, Classificação e Pós Classificação

Para separar a área de estudo em regiões homogêneas de ocupação e cobertura da terra utilizou-se a técnica de segmentação com a aplicação do método de crescimento por regiões. Após a realização de alguns testes foram definidos os valores 18 (similaridade) e 85 (área) para as imagens de 1987 e 2004. Para os dados de 2013 os valores de similaridade e área foram de 10 e 69, respectivamente.

Os testes visam um determinado controle do usuário sobre o tamanho mínimo das áreas a serem formados e o fatiamento espectral dos níveis de cinza de acordo com as características de cada região (ALVES, 1996).

Com o intuito de extrair as informações de média e variância das regiões definidas na segmentação, de acordo com as bandas escolhidas, aplicou-se a técnica de extração de regiões. Na sequência, executou-se o treinamento para a aquisição das amostras e associação das mesmas com as classes de uso criadas, ou seja, área urbana, pastagem/campos, solo exposto, cultura anual, cultura temporária, silvicultura, vegetação arbórea e água. O nível II do sistema de classificação do IBGE (2006) foi usado como referência para a criação dessas classes de uso. As regiões obtidas na segmentação foram associadas às classes temáticas de acordo com suas características geométricas, texturais e espectrais (Figura 18).

Figura 18 – Principais padrões geométricos, espectrais e texturais apresentados na composição colorida dos canais (3B, 4G e 5R) do sistema sensor Landsat 5 usados para a classificação supervisionada da área de estudo. A – Lagos e represas; B – Área urbana; C – Silvicultura; D – Cultura permanente; E – Pastagens e campos; F – Solo exposto; G – Cultura temporária (cana) e H - Vegetação arbórea.

Após essa etapa, analisou-se a qualidade das amostras adquiridas, com base nas matrizes de confusão (Tabela 3). Com isso, realizou-se a classificação das imagens segmentadas com similaridade 18 e área 85 para 1987 e 2004, 10 (similaridade) e 69 (área) para 2013, uso do algoritmo Bhattacharya e limiar de aceitação de 99% (MATHER, 1993).

Tabela 3 – Análise das amostras usadas para a classificação das imagens de 1987, 2004 e 2013 do sistema/sensor Landsat 5, 8 e índice de coeficiente TAU para o algoritmo Battacharya.

Análise das amostras	1987	2004	2013
Desempenho médio	98,63%	99,32%	98,87 %
Abstenção média	0%	0%	0%
Confusão média	1,37%	0,68%	1,13 %
Total	100%	100%	100%
Coeficiente TAU	0,98	0,99	0,98

Elaborado pelo autor.

Na etapa final, após a transformação da imagem matricial em dados vetoriais, procedeu-se o processo de pós-classificação cujo intuito foi o de corrigir as áreas associadas erroneamente no processo de classificação a determinados temas que não correspondessem as classes apropriadas. A função “Associação de Classes Temáticas” disposta no editor de dados vetoriais do SPRING foi usada para o referido procedimento. A figura 19 demonstra a sequência de técnicas realizadas nessa etapa em uma parte da bacia, ou seja, segmentação, classificação e pós-classificação.

Figura 19 – Imagem do baixo curso da bacia do rio Jacaré Guaçu. (A) Banda 3 contrastada e filtrada, (B) banda 3 com vetor de segmentação, (C) imagem classificada com destaque (círculos vermelhos) para os locais associados à outros temas e que foram corrigidos e (D) imagem classificada corrigida.

Além disso, foram usadas três fontes de informações sobre o uso da terra da área de estudo para os anos estudados. Esses trabalhos auxiliaram na identificação e/ou confirmação dos resultados obtidos. O primeiro, que auxiliou nos mapeamentos de 1987 e 2004, refere-se aos dados sobre o uso e ocupação das terras de boa parte da área de estudo dos anos de 1987/1988 e 2003/2004 identificados no do projeto do Sistema de Gestão Territorial da ABAG/RP (Associação Brasileira do Agronegócio da Região de Ribeirão Preto) em parceria com a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) /Monitoramento por Satélite, disponível em <http://www.abagrp.cnpm.embrapa.br>. O segundo diz respeito aos dados do monitoramento anual do cultivo da cana-de-açúcar do projeto Canasat/INPE, disponível em <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>. Essas informações auxiliaram exclusivamente na identificação e confirmação das áreas destinadas a esse tipo de uso no ano de 2004 e 2013. Por fim, para a validação do mapeamento de 2013 foi realizado um trabalho de campo para ratificar e/ou corrigir os dados obtidos.

Após a elaboração dos mapas de uso e ocupação das terras (1987, 2004 e 2013), atribui-se os valores dos fatores C e P da EUPS aos polígonos mapeados por meio de uma rotina de programação do tipo Ponderação no editor LEGAL do SIG. Assim, as duas últimas variáveis do modelo (C e P) foram geradas para ambos os anos, no formato de uma grade numérica, com resolução espacial X e Y de 30m.

Por fim, com o propósito de identificar os locais que não sofreram modificações e os que alteraram o uso da terra entre 1987 e 2004 e 2004 e 2013 na área de estudo, elaborou-se um mapa de dinâmica de uso. Uma rotina de programação do tipo booleana (álgebra de mapas) foi efetuada no editor LEGAL do SPRING para o referido procedimento. Com isso, foi possível determinar especificamente os locais que sofreram alterações para outras formas de uso na bacia hidrográfica.

4.4. Cálculo das perdas de solos por erosão laminar

A sistematização da equação 1 para o cálculo final da EUPS foi realizada no programador LEGAL do SPRING. Neste caso, o operador utilizado dentro da linguagem LEGAL é do tipo pontual, especificamente Operador Matemático. Em termos práticos, o *software* utiliza as grades numéricas de cada variável do modelo determinadas nas etapas descritas anteriormente para a operação matemática. Uma grade numérica, com resolução espacial X e Y de 30m com os valores de perdas de

solos por erosão laminar é o produto obtido nesse procedimento. Para a obtenção do produto cartográfico final das perdas de solos por erosão laminar fez-se o fatiamento e a associação dessa grade numérica com os valores definidos para a classe temática da EUPS.

Com o intuito de verificar as áreas que sofreram modificações e as que se mantiveram estáveis em relação ao intervalo de classes de perdas de solo, elaborou-se um mapa de dinâmica erosiva entre 1987-2004 e 2004-2013. Assim como no mapa de dinâmica de uso, explicitado no item anterior, desenvolveu-se uma rotina de programação do tipo booleana no editor LEGAL do SIG tendo com base nos mapas temáticos de perdas de solo por erosão laminar de 1987, 2004 e 2013.

4.5. Análise dos dados de vazão fluvial

Para a identificação do comportamento e da variabilidade do regime fluvial foram usados dados diários do SIGRH (Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos), disponível no *site* <http://www.sigrh.sp.gov.br>. O posto 5C 013, disposto no médio curso da bacia hidrográfica (Fig. 20), foi o único que apresentou série histórica compatível com os anos dos dados orbitais usados para o mapeamento do uso e ocupação da terra, ou seja, 1987, 2004 e 2013.

Figura 20 – Localização dos postos pluviométricos, fluviométrico (5C-013) e sua área de influência na área de estudo.

Além disso, dados dos postos pluviométricos apresentados no mapa (D4-040, D5-076, C5-035, C5-056 e C5-050) foram usados para verificar a variabilidade da precipitação pluvial e sua relação com a descarga fluvial para os anos estudados, ou seja, 1987, 2004 e 2013.

Técnicas de estatística descritiva, executadas no *software* Microsoft Excel 2007, foram usadas para organizar os dados fluviais e pluviais e elaborar diversos produtos gráficos para análise.

O teste paramétrico *t* de *Student* foi utilizado para verificar a significância nas mudanças de tendência das médias históricas de vazão fluvial entre os anos estudados (1987, 2004 e 2013). Para isso, foram usadas as equações 8 e 9.

Tal procedimento consistiu em testar as seguintes hipóteses para uma confiança de 95% (ou $\alpha = 0,05$):

H0 (Hipótese Nula): sem variação significativa das médias mensais de vazão fluvial em função das alterações no uso e ocupação da terra.

H1: (Hipótese Alternativa): com variação significativa das médias mensais de vazão fluvial em função das alterações no uso e ocupação da terra.

4.5. Elaboração dos produtos cartográficos

Todos os mapas temáticos determinados nas etapas descritas foram editados no módulo SCARTA do SIG. Todos os atributos cartográficos como escala, legenda, sistema de coordenadas e orientação foram editados nessa ferramenta. Na figura 21 é exibido um fluxograma com a estrutura do banco de dados montado no SPRING e as rotinas de programação desenvolvidas no editor LEGAL do SIG para o desenvolvimento da pesquisa e geração dos resultados.

Figura 21 – Fluxograma com estrutura do banco de dados e rotinas de programação desenvolvidas no editor de modelos LEGAL para o desenvolvimento do trabalho.

5 RESULTADOS

5.1. Fator R da EUPS

A tabela 4 demonstra a média anual da precipitação pluviométrica e do índice de erosividade obtido para área de estudo por meio dos dados disponibilizados pelo Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH).

Tabela 4 - Média anual da precipitação pluviométrica e do índice de erosividade dos postos pluviométricos.

Identificação	Prefixo DAEE	Precipitação Média Anual (mm)	Erosividade Média Anual (MJ.mm/ha.h)
1	D4 – 014	1441,4	6953,1
2	D4 – 040	1313,7	6392,2
3	D5 – 076	1573,7	7680,9
4	D5 – 053	1564,0	7554,8
5	C4 – 021	1680,3	8096,0
6	C4 – 092	1543,2	7572,6
7	C5 – 074	1354,8	6845,4
8	C5 – 035	1656,1	7977,9
9	C5 – 101	1394,0	6803,9
10	C5 – 038	1331,4	6563,2
11	C5 – 081	1354,9	6571,3
12	C5 – 048	1385,2	6839,4
13	C5 – 016	1453,9	7138,1
14	C5 – 050	1511,2	7458,6
15	C5 – 056	1573,5	7561,4
16	C5 – 055	1389,9	6732,5

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

A Figura 22 exhibe a distribuição espacial do índice de erosividade na área de estudo. Verifica-se que os maiores valores do fator R da EUPS estão dispostos no alto curso da bacia. Os valores intermediários do índice apresentam distribuição variada e

localizam-se por toda área de estudo. Os valores menos acentuados ocorrem tanto no baixo quanto no alto curso da bacia de drenagem.

Figura 22 – Distribuição espacial do índice de erosividade da área de estudo.

A Tabela 5 demonstra a área ocupada e o percentil de ocupação do índice de erosividade na bacia do rio Jacaré Guaçu. Verifica-se que mais da metade da bacia, ou seja, 72,4% apresenta valores dispostos entre 6839 e 7933 MJ.mm/ha.h. Os valores compreendidos entre 6392 e 6839 MJ.mm/ha.h ocupam 883,0 km² que representa 21,8% do total da área de estudo. Os valores mais acentuados, dispostos entre 7933 e 8180 MJ.mm/ha.h, ocupam 232,4 km² da bacia hidrográfica, ou seja, 5,8% do total de sua área.

Tabela 5 - Área ocupada pelas classes do índice de erosividade.

Índice de erosividade em MJ.mm/ha.h	Área em km ²	%
6392-6839	883,0	21,8
6839-7286	1349,4	33,2
7286-7933	1592,5	39,2
7933-8180	232,4	5,8
Total	4057,3	100

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

Os valores de erosividade determinados para a área de estudo são considerados moderadamente forte (4095 a 7357 MJ.mm/ha.h) e forte (7357 a 9810 MJ.mm/ha.h) para os padrões brasileiros, de acordo com a classificação de Oliveira et al. (2012). Portanto, a bacia do rio Jacaré Guaçu compreende uma região com grande risco de ocorrência de erosão pluvial, sobretudo em alguns meses do ano e em locais onde o solo fica temporariamente descoberto.

5.2. Fator K da EUPS

A figura 23 exibe a distribuição espacial das classes de solos da bacia hidrográfica.

Figura 23 – Classes de solos verificadas na área de estudo.

Verifica-se que o Latossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho Amarelo ocupam a maior parte da bacia. De acordo com Oliveira et al. (1999), essas classes de solos apresentam textura que variam de argilosa a média e estão dispostas sobre relevo suavemente ondulado e ondulado. Em algumas situações, o Latossolo Vermelho Amarelo está associado ao relevo fortemente ondulado. Devido aos seus atributos físicos (alta profundidade e permeabilidade) apresentou o segundo menor índice de erodibilidade da área de estudo, ou seja, 0,0162 t.ha/ (MJ/ha.mm/h).

O Argissolo Vermelho Amarelo possui maior representatividade no baixo curso da área de estudo. Ocorre também em alguns setores do alto e médio curso. Apresenta textura que varia de arenosa a média e está associado ao relevo plano, suave ondulado e ondulado. O fator K é de 0,0425 t.ha/ (MJ/ha.mm/h), ou seja, o segundo maior das classes de solos verificadas na bacia hidrográfica.

O Gleissolo Háplico, disposto no alto Jacaré Guaçú, apresenta coloração cinza, textura argilosa e associa-se a uma pequena planície de inundação do Ribeirão do Feijão. O índice de erodibilidade, de 0,0361 t.ha/ (MJ/ha.mm/h), pode ser considerado intermediário para os padrões da área de estudo.

Ainda no alto curso da bacia hidrográfica, vinculado ao relevo plano de várzea, próximo à represa do Lobo e com textura arenosa ocorre o Organossolo Háplico. O valor do fator K estipulado em 0,0610 t.ha/ (MJ/ha.mm/h) é o maior verificado entre as classes de solos da bacia do rio Jacaré Guaçú.

O Neossolo Quartzarênico apresenta textura média e associa-se ao relevo plano e suavemente ondulado do alto e médio curso da bacia hidrográfica. Já o Neossolo Litólico vincula-se ao relevo escarpado e fortemente ondulado do alto e médio Jacaré Guaçú. A textura varia de argilosa a arenosa. O índice de erodibilidade dessas classes de solos é de 0,0351 t.ha/ (MJ/ha.mm/h), ou seja, mediano quando comparado aos demais valores determinados para os tipos de solo da área de estudo.

O Planossolo Háplico, com textura média a arenosa, ocorre em uma planície de inundação do baixo curso do rio Jacaré Guaçú. Apresentou o menor índice de erodibilidade de todas as classes de solo, estipulado em 0,0097 t.ha/ (MJ/ha.mm/h).

A tabela 6 exibe a área ocupada pelas classes de solos da área de estudo e os correspondentes índice de erodibilidade em t.ha (MJ/ha.mm/h). Pode-se verificar que, respectivamente, a maior representatividade areal ocorre com as seguintes classes de solos: associação entre Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Planossolo Háplico, Organossolo Háplico e Gleissolo Háplico.

Tabela 6 - Área ocupada pelas classes de solos na bacia e seus respectivos fatores de erodibilidade em t.ha/ (MJ/ha.mm/h).

Classes de solos	Fator K	Área em km ²	%
Planossolo Háplico	0,0097	111,9	2,7
Neossolo Quartzarênico	0,0351	523,4	13,0
Organossolo Háplico	0,0610	26,2	0,6
Gleissolo Háplico	0,0361	17,0	0,4
Neossolo Litólico	0,0351	127,7	3,1
Argissolo Vermelho Amarelo	0,0425	643,6	15,9
Latossolo Verm./ Latossolo Verm. Ama.	0,0162	2593,5	64,0
Lagos e represas	-	14,5	0,3
Total	-	4057,3	100

Fonte: Oliveira et al. (1999); Silva e Alvares (2005). Elaborado pelo autor.

5.3. Fatores L e S da EUPS

A figura 24 demonstra o mapa com o comprimento das vertentes da área de estudo e a tabela 7 exhibe a área ocupada pelas classes dessa variável topográfica.

Figura 24 – Comprimento de rampa (L) na bacia do rio Jacaré Guaçu.

Verifica-se que as vertentes com comprimento compreendidos entre 0 e 300m e 300 e 600m ocorrem por toda bacia e ocupam 53,7% do total da área de estudo. As encostas com valores dispostos entre 600 e 900m e 900 e 1200m também estão distribuídas por toda área de estudo e representam 31,9% do total das classes mapeadas. Os valores de comprimento de rampa dispostos acima de 1200m aparecem associados às principais drenagens da bacia e ocupam 14,1% do total da área (Tabela 5).

Basicamente, o aumento da energia e da velocidade do escoamento superficial é proporcional ao comprimento das vertentes. Com isso, a quantidade de sedimentos transportados será maior nas vertentes de maior comprimento, assim como a intensidade dos processos erosivos. No entanto, conforme descrito no decorrer do trabalho, somente a análise dessa variável não é suficiente para o entendimento da influência do fator topográfico no processo erosivo. A união entre o comprimento de rampa (L) e a declividade (S) do terreno permite um entendimento mais integrado do domínio topográfico sobre a erosão.

Tabela 7 - Área ocupada pelas classes de comprimento de rampas

Comprimento de rampa (m)	Área em km ²	%
0-300	1168,2	28,7
300-600	1015,7	25,0
600-900	789,2	19,4
900-1200	507,2	12,5
1200-1500	296,9	7,3
1500-1800	146,9	3,6
>1800	133,2	3,2
Lagos e represas	14,5	0,3
Total	4057,3	100

Fonte – *SRTM*. Elaborado pelo autor.

A figura 25 exhibe a distribuição das classes de declividade presentes na área de estudo. Verifica-se o predomínio das classes compreendidas entre 0% e 3% e 3% e 6%, sobretudo nos setores norte, sul e leste da área de estudo. A classe de declive envolvida entre 6% e 12% é verificada principalmente no terço inferior das vertentes, nos setores leste e sudeste da bacia. Já os declives mais acentuados, ou seja, classificados no intervalo de 12% a 20% e maior que 20% são verificados no setor leste e sudeste da

área de estudo associados às cuestas arenítico-basálticas e as cabeceiras de drenagem do alto curso da bacia. Assim como o comprimento de rampa, quanto maior o grau de declive, maior o potencial erosivo da vertente.

Figura 25 – Classes de declividade verificadas na área de estudo.

A tabela 8 exhibe a área em km² e a sua proporção em porcentagem das faixas de declive verificadas na bacia do rio Jacaré Guaçu. A maior representatividade ocorre com as faixas 3 a 6, 0 a 3, 6 a 12, 12 a 20 e >20, respectivamente.

Tabela 8 - Área ocupada pelas classes de declividade		
Declividade em %	Área em km ²	%
0-3	1220,8	30,0
3-6	1537,9	38,0
6-12	953,0	23,5
12-20	196,9	4,9
>20	134,2	3,3
Lagos e represas	14,5	0,3
Total	4057,3	100

Fonte – SRTM. Elaborado pelo autor.

5.4. Integração dos fatores L e S da EUPS

Em relação distribuição espacial do fator LS da EUPS na área de estudo, verifica-se na figura 26 que os valores compreendidos entre 0 e 2 ocorrem em toda bacia hidrográfica. Estão associados aos interflúvios das vertentes, às baixas declividades e às pequenas planícies do rio Jacaré Guaçu. Os valores dispostos entre 2 e 4 e 4 e 6 também aparecem em toda bacia. Estão relacionados ao terço inferior e médio das vertentes e às declividades intermediárias. Os maiores valores do fator topográfico, ou seja, compreendidos entre 6 e 8 e maiores que 8 aparecem mais no alto e médio curso da bacia hidrográfica, associados aos altos declives, ao terço inferior das vertentes e ao relevo escarpado das cuestas.

Figura 25 – Distribuição espacial do índice topográfico da bacia hidrográfica.

Na tabela 7 é possível verificar a área ocupada pelas classes do fator LS da EUPS bem como sua porcentagem de distribuição. Verifica-se que 41% do total da área de estudo apresenta valores compreendidos entre 0 e 2. Os valores dispostos entre 2 e 4 e 4 e 6 ocupam 1565,3 km² da bacia hidrográfica que representa 38,6% do total da área de estudo. Os valores mais acentuados, acima de 8, ocupam 493,2 km² da bacia hidrográfica.

Tabela 9 - Área ocupada pelo índice do Fator Topográfico

Fator Topográfico	Área em km ²	%
0-2	1663,0	41,0
2-4	944,0	23,3
4-6	621,3	15,3
6-8	321,3	8,0
>8	493,2	12,1
Lagos e represas	14,5	0,3
Total	4057,3	100

Fonte – *SRTM*. Elaborado pelo autor.

5.5. Fatores C e P da EUPS

Em relação ao uso da terra em 1987, verifica-se na figura 27 que bacia hidrográfica era ocupada por cultura agrícola anual, sobretudo de café e citrus, silvicultura, pastagens, campos, vegetação arbórea, área urbana dos municípios, lagos e represas.

A distribuição espacial desses dados é variada. Pastagens e campos ocorrem por toda bacia hidrográfica. A vegetação arbórea vincula-se aos cursos d' água e encostas íngremes dos relevos escarpados. A cultura anual ocupa grande parte do setor oeste da bacia. Alguns locais destinados a esse uso também são verificados no alto Jacaré Guaçu. A cultura agrícola temporária, representada principalmente pelo cultivo da cana de açúcar, localiza-se nos setores centro leste e oeste da área de estudo. Os locais com solo exposto ocorrem próximos as áreas destinadas ao cultivo temporário, uma vez que estão descobertos para o replantio da cana. As áreas destinadas à silvicultura estão dispostas no alto e médio curso da bacia hidrográfica. A área urbana possui maior representatividade juntos aos municípios de São Carlos e Araraquara. Os locais com represamento de água são verificados no alto Jacaré Guaçu e no baixo curso do rio junto à confluência com o Tietê.

Figura 27 – Uso e ocupação das terras em 1987 na bacia do rio Jacaré Guaçu.

A tabela 10 demonstra a área de ocupação das classes de uso da terra em 1987 na área de estudo. Os locais com pastagens e campos, vegetação arbórea, cultura agrícola temporária, anual, solo exposto, silvicultura, área urbana, lago e represas ocupam as maiores áreas, respectivamente.

Tabela 10 – Fatores C e P da EUPS e área ocupada pelas classes de uso dos solos em 1987

Classe de Uso	Fator C	Fator P	Área em km ²	%
Vegetação	0,0001	0,2	928,6	22,9
Solo Exposto	1,0000	0,5	277,0	6,8
Pastagem/Campos	0,0080	0,5	1246,7	30,7
Cultura Anual	0,0875	0,5	628,5	15,5
Cultura Temporária	0,3066	0,5	684,2	16,9
Silvicultura	0,0010	0,5	203,1	5,0
Área urbana	-	-	74,0	1,8
Lagos e represas	-	-	15,2	0,4
Total	-	-	4057,3	100

Fonte: Landsat 5/TM; Bertoni e Lombardi Neto (1999). Elaborado pelo autor.

Para o ano de 2004 verifica-se que a maior porcentagem de ocupação ocorria na seguinte ordem: pastagens e campos, vegetação, cultura anual, solo exposto, cultura temporária, silvicultura, área urbana, lagos e represas (Tabela 11).

Tabela 11 - Área ocupada pelas classes de uso da terra em 2004 e seus respectivos fatores C e P.

Classe de Uso	Fator C	Fator P	Área em km ²	%
Vegetação	0,0001	0,2	855,4	21,1
Solo Exposto	1,0000	0,5	534,5	13,2
Pastagem/Campos	0,0080	0,5	1291,7	31,9
Cultura Anual	0,0875	0,5	557,6	13,7
Cultura Temporária	0,3066	0,5	504,6	12,4
Silvicultura	0,0010	0,5	166,8	4,1
Área urbana	-	-	132,2	3,3
Lagos e represas	-	-	14,5	0,3
Total	-	-	4057,3	100

Fonte: Landsat 5/TM; Bertoni e Lombardi Neto (1999). Elaborado pelo autor.

A distribuição espacial dos dados também é variável. Verificam-se praticamente todas as formas de uso ao longo de área de estudo, com exceção da silvicultura, que ocupa alguns locais do alto e médio curso da bacia hidrográfica (Fig. 28).

Figura 28 – Uso e ocupação das terras em 2004 na bacia hidrográfica.

Assim como nos demais anos estudados, as classes de uso da terra identificadas em 2013 ocorrem em praticamente toda a área de estudo. No entanto, em comparação aos anos anteriores, é notório o incremento de locais destinados à cultura temporária no alto e baixo curso da bacia hidrográfica. Verifica-se também uma considerável diminuição de locais ocupados por cultura anual e vegetação arbórea, sobretudo no alto e baixo Jacaré Guaçu, respectivamente. O decréscimo de áreas ocupadas por pastagens e campos ocorre em praticamente toda a área de estudo.

A figura 29 exibe a distribuição espacial das classes de uso da terra em 2013 na bacia do rio Jacaré Guaçu.

Figura 29 - Distribuição espacial das classes de uso da terra em 2013.

O percentil, a área ocupada e os índices dos fatores C e P atribuídos às classes de uso da terra mapeadas para 2013 são exibidos a seguir na tabela 12.

Tabela 12 – Área ocupada e índices dos fatores C e P das classes de uso da terra em 2013.

Classe de Uso	Fator C	Fator P	Área em km ²	%
Vegetação	0,0001	0,2	520,5	12,8
Solo Exposto	1,0000	0,5	520,9	12,8
Pastagem/Campos	0,0080	0,5	903,3	22,2
Cultura Anual	0,0875	0,5	385,0	9,5
Cultura Temporária	0,3066	0,5	1311,4	32,3
Silvicultura	0,0010	0,5	233,7	5,7
Área urbana	-	-	168,8	4,1
Lagos e represas	-	-	13,7	0,3
Total	-	-	4057,3	100

Fonte: Landsat 8/OLI; Bertoni e Lombardi Neto (1999). Elaborado pelo autor.

A ordem de ocupação decrescente das classes de uso da terra em 2013 é a seguinte: cultura temporária, pastagens, campos, vegetação, solo exposto, cultura anual, silvicultura, áreas urbanizadas, lagos e represas.

5.6. Dinâmica de uso e ocupação das terras (1987-2004 -2013)

A figura 30 demonstra uma comparação em porcentagem de área ocupada pelas classes de uso da terra entre 1987, 2004 e 2013.

Figura 30 – Variação em porcentagem de área das classes de uso e ocupação das terras entre 1987, 2004 e 2013 na área de estudo. Organizado pelo autor.

Verifica-se significativa diminuição das classes vegetação e cultura anual entre os períodos analisados. Os locais com pastagem, campos e solo exposto tiveram acréscimo de porcentagem de área entre 1987 e 2004 e diminuição entre 2004 e 2013. Nos locais destinados à cultura temporária e silvicultura o processo foi inverso, ou seja, diminuição de área entre 1987 e 2004 e aumento entre 2004 e 2013. As áreas urbanizadas aumentaram entre o período analisado e os locais com lagos e represas tiveram uma pequena diminuição de ocupação.

A distribuição espacial referente às classes temáticas que sofreram alterações e as que não se alteraram entre 1987 e 2004 pode ser observada abaixo na figura 31.

Figura 31 - Distribuição espacial das classes de uso da terra que sofreram alterações em 1987

É possível verificar que os locais destinados à cultura anual sofreram alterações, sobretudo no médio e baixo Jacaré Guaçu. A vegetação altera-se próxima a rede de drenagem e em locais específicos no alto curso da bacia hidrográfica. As demais classes identificadas que sofreram alterações ocorrem por praticamente toda área de estudo.

A figura 32 exibe as classes de uso que tiveram nova finalidade de ocupação em 2004. Pela análise das figuras 31 e 32 é possível observar que a cultura temporária cedeu espaço para áreas com solo exposto, uma vez que ambas estão voltadas para o

plantio da cana de açúcar. A vegetação arbórea concedeu espaço principalmente para pastagem e campos. Os locais com cultura anual e silvicultura ocuparam áreas antes destinadas à pastagem e campos. O processo inverso também é observado. A diminuição da classe lago e represas está associada à variação do nível do reservatório da represa do Lobo no alto curso da bacia e da lâmina d'água da planície de inundação do baixo Jacaré Guaçu, próximo a confluência com o Tietê. O aumento da área urbana está associado ao aumento populacional, sobretudo, dos principais municípios da área de estudo.

Figura 32 – Espacialização das classes que tiveram novo uso da terra em 2004.

Dados específicos em km² sobre a dinâmica de uso da terra entre 1987 e 2004 da bacia hidrográfica podem ser observados abaixo na tabela 13.

Tabela 13 – Tabulação cruzada em km² entre as classes de uso da terra identificadas em 1987 (linhas) e 2004 (colunas).

Classe de Uso	Vegetação	Solo Exposto	Pastagem /Campos	Cultura Anual	Cultura Temporária	Silvicultura	Área urbana	Lagos e represas
Vegetação	441,4	61,1	274,4	67,5	56,3	12,9	14,0	1,7
Solo Exposto	33,0	64,9	56,0	46,7	69,5	3,2	3,7	0,0
Pastagem/Campos	182,2	140,5	565,1	199,2	98,9	28,3	31,5	1,3
Cultura Anual	78,7	84,0	219,2	185,7	46,1	11,7	2,7	0,0
Cult. Temporária	90,9	179,3	149,1	36,4	230,8	0,6	3,1	0,2
Silvicultura	27,0	4,1	27,0	20,5	1,7	109,4	3,1	0,1
Área urbana	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	74,0	0,0
Lagos e represas	2,4	0,0	0,7	0,0	0,1	0,0	0,1	11,9

Fonte: Landsat 5/ TM. Elaborado pelo autor.

Os dados da tabela revelam a área de cada classe de uso que não se alterou (valores em negrito) e os locais que pertenciam a um tipo de uso da terra e se transformou em outro. Como exemplo, pode-se citar os 274,4 km² de vegetação arbórea que se transformaram em pastagem e campos ou os 199,2 km² de pastagem e campos que se transformaram em cultura anual entre o período analisado (1987-2004).

Na figura 33 é possível verificar a distribuição espacial das classes de uso da terra que não se alteraram e as que sofreram alterações entre 2004 e 2013.

Figura 33 - Distribuição espacial das classes de uso da terra que sofreram alterações em 2004.

É possível observar expressiva alteração de locais destinados à pastagem e campos ao longo de toda área de estudo. Locais destinados à silvicultura cederam espaços no médio e alto curso da bacia hidrográfica. Assim como o período 1987 e 2004, a vegetação sofreu alteração próxima à rede de drenagem. As alterações nas demais formas de uso da terra de modo geral ocorrem por praticamente toda área de estudo.

A figura 34 demonstra as classes de uso da terra que obtiveram novo propósito de ocupação em 2013.

Figura 34 – Espacialização das classes que tiveram novo uso da terra em 2013.

A comparação da figura 34 com a 33 possibilita identificar que às pastagens e campos cederam espaço para a cultura temporária e solo exposto, ambos vinculados ao plantio da cana de açúcar. Também verifica-se o incremento de cultura anual, área urbana e vegetação arbórea em locais de pastagem e campos. A dinâmica de alteração solo exposto para cultura temporária e vice versa também pode ser verificada como na análise do período 1987- 2004 (locais destinados ao cultivo de cana de açúcar). A alteração de vegetação para pastagem/campos e área urbana também é observada. Nota-se também o dinamismo vegetação arbórea para silvicultura e solo exposto para

silvicultura e pastagem/campos ao longo de toda a bacia hidrográfica. No setor leste da área de estudo observa-se a substituição de cultura anual por locais voltados para a silvicultura e solo exposto. Os locais que não sofreram alterações possui representatividade em toda área de estudo, com destaque para o alto e médio Jacaré Guaçu.

Os valores em área (km²) referente à tabulação cruzada dos dados de uso da terra entre 2004 e 2013 podem ser verificados na tabela 14.

Tabela 14 – Tabulação cruzada em km² entre as classes de uso da terra identificadas em 2004 (linhas) e 2013 (colunas).

Classe de Uso	Vegetação	Solo Exposto	Pastagem /Campos	Cultura Anual	Cultura Temporária	Silvicultura	Área urbana	Lagos e represas
Vegetação	278,9	55,4	223,9	42,7	193,4	44,3	15,2	1,6
Solo Exposto	27,5	113,1	68,6	32,6	282,3	4,0	6,0	0,1
Pastagem/Campos	124,4	146,4	458,5	99,7	405,2	45,3	10,5	1,7
Cultura Anual	37	70,8	87,6	204,5	129,8	25,7	1,9	0,3
Cult. Temporária	41,6	124	45	3,7	295,3	1,3	1,9	0,6
Silvicultura	9,7	12,1	17,1	3,0	4,7	116,3	0,8	0,0
Área urbana	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	132,2	0,0
Lagos e represas	1,4	0,1	2,6	0,0	0,7	0,0	0,3	9,4

Fonte: Landsat 5/ TM e Landsat 8/OLI. Elaborado pelo autor.

Dos valores obtidos, chama atenção os locais que eram voltados para pastagem que se transformaram em cultura temporária (405,2 km²) e solo exposto (146,4km²), ambos destinados ao plantio da cana de açúcar conforme descrito anteriormente. A cultura temporária também ocupou área significativa em locais voltados para vegetação e cultura anual, com valores de 193,4 km² e 129,8 km², respectivamente.

5.7. Quantificação e distribuição espacial dos valores da EUPS para 1987, 2004 e 2013

Os resultados referentes às perdas anuais de solo por erosão para ano de 1987 demonstram que os locais com valores situados entre 0 e 3 ton. ha⁻¹ ano⁻¹ ocorrem por

toda área de estudo, com destaque para o alto curso da bacia hidrográfica entre os municípios de Analândia, Itirapina e Brotas. São áreas associadas ao fator topográfico compreendido entre 0 e 2, dispostas sobre os Latossolos, Gleissolo, Organossolo e Planossolo ocupadas por pastagens e campos, vegetação arbórea e silvicultura. Os valores compreendidos entre 3 e 5, 5 e 10 e 10 e 15 ton. ha⁻¹ ano⁻¹ possuem menor representatividade. Também localizam-se por toda bacia, no entanto, vinculam-se com áreas onde o fator LS varia de 2 a 4, 4 a 6 e 6 a 8, sobre o Argissolo Vermelho Amarelo, Neossolo Quartzarênico e Neossolo Litólico. Nessas localidades a terra é usada sobretudo, por pastagens e culturas anuais. Os locais classificados com perdas de solo acima de 15 ton. ha⁻¹ ano⁻¹ estão associados às áreas com solo exposto, cultura temporária, cultura anual e raramente pastagens. Ocorrem, principalmente sobre o Argissolo Vermelho Amarelo e Neossolo Quartzarênico com fator topográfico variando de 6 a 8 e maior que 8 entre os municípios de Tabatinga, Nova Europa e Gavião Peixoto no baixo Jacaré Guaçú, Boa Esperança do Sul, Araraquara, Ibaté e Ribeirão Bonito no médio curso e São Carlos e Brotas no alto curso da bacia hidrográfica. A figura 35 exhibe a distribuição espacial dos valores de perda de solo anual para o ano de 1987.

Figura 35 – Perdas de solo anual em 1987 da bacia do rio Jacaré Guaçú.

A tabela 15 demonstra a área ocupada pelas classes de perdas de solo anual em 1987 na bacia hidrográfica bem como o percentil ocupado por cada classe mapeada.

É possível observar que mais da metade da área da bacia hidrográfica, ou seja, 58,9% apresentou perdas de solo abaixo de 3 ton. ha⁻¹ ano⁻¹. Os locais onde as perdas de solo variam entre 3 e 5, 5 e 10 e 10 e 15 ton. ha⁻¹ ano⁻¹ representam 12,6% do total da área da bacia do rio Jacaré Guaçú. As maiores perdas de solos, ou seja, acima de 15 ton. ha⁻¹ ano⁻¹ ocorrem praticamente em pouco mais um quarto do total da área de estudo. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999) os valores acima de 15 ton. ha⁻¹ ano⁻¹ estão fora dos limites toleráveis para as classes de solos da área de estudo.

Tabela 15 - Área ocupada pelas classes de perdas de solos por erosão em 1987.

Perdas de Solo em ton/ (ha.ano)	Área em km ²	%
0-3	2387,4	58,9
3-5	184,0	4,5
5-10	207,8	5,1
10-15	123,2	3,0
>15	1065,7	26,3
Área urbana	74,0	1,8
Lagos e represas	15,2	0,4
Total	4057,3	100

Elaborado pelo autor.

As perdas de solo em de 2004 apresentaram valores diferentes em algumas classes identificadas quando comparada aos dados de 1987 (Tabela 16).

Tabela 16 - Área ocupada pelas classes de perdas de solos por erosão em 2004.

Perdas de Solo em ton/ (ha.ano)	Área em km ²	%
0-3	2289,7	56,4
3-5	199,6	4,9
5-10	225,2	5,5
10-15	124,9	3,1
>15	1071,2	26,4
Área urbana	132,2	3,3
Lagos e represas	14,5	0,3
Total	4057,3	100

Elaborado pelo autor.

Verifica-se um decréscimo de 2,5% no intervalo compreendido entre 0 e 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹. As perdas de solo compreendidas entre 3 e 5, 5 e 10, 10 e 15 e >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ aumentaram menos de 1% em relação aos valores obtidos em 2004.

A distribuição espacial dos dados de perdas de solo por erosão laminar para 2004 é apresentada a seguir na figura 36.

Figura 36 – Perdas de solo anual em 2004 da área de estudo.

Verifica-se o incremento de locais classificados com perdas de solo acima de 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹, sobretudo no médio e alto curso da bacia nos municípios de Ibaté, Araraquara, Ribeirão Bonito e Brotas. Esses resultados associam-se, dentre outros fatores, ao aumento de locais classificados com solo exposto para o referido período quando comparado ao anterior (1987). A análise das figuras 34 e 35 permite verificar também que há um aumento de áreas classificadas com intervalo entre 5 a 10 e 10 a 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ no setor oeste da bacia hidrográfica, principalmente no baixo Jacaré Guaçu nos municípios de Boa Esperança do Sul, Nova Europa e Gavião Peixoto. A alteração no uso da terra nesse setor, principalmente a substituição de vegetação arbórea para pastagem e cultura anual explica essa variação entre 1987 e 2004. No alto curso da

bacia hidrográfica, também verifica-se a substituição de classes compreendidas entre 0 e 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹ para as demais classes estipuladas.

Esses resultados são consequência da dinâmica de uso ocorrida entre os períodos analisados, uma vez que os valores das demais variáveis não foram alterados. Apesar da variação dos valores de perdas de solo entre 1987 e 2004, pode-se afirmar que não há variabilidade significativa em termos de área de ocupação das classes determinadas. A maior oscilação do período ocorre na classe 0 a 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹ com 58,9% em 1987 e 56,4% em 2004.

Em 2013 a alteração quantitativa e consequentemente espacial é expressiva (Fig. 37).

Figura 37 - Distribuição espacial das classes de perdas de solo por erosão laminar em 2013.

Verifica-se significativa ocupação de locais classificados com valores acima de 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ ao longo de toda bacia hidrográfica, sobretudo ao longo de todo vale do rio Jacaré Guaçu em seu baixo e médio e curso e no alto, entre os municípios de São Carlos, Analândia, Itirapina e Brotas. Conforme elucidado, isso ocorre pelo aumento de áreas voltadas para o plantio da cana de açúcar (solo exposto e cultura temporária). Em contrapartida, é possível observar também a expressiva diminuição de locais

classificados com classe 0 a 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹. As demais classes de perdas de solo também diminuem quando comparada aos anos anteriores (1987 e 2004), uma vez que cederam espaço, principalmente para a classe maior que 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹. A distribuição espacial dessas classes (0-3, 3-5, 5-10 e 10-15 ton. ha⁻¹ano⁻¹) é verificada em toda a área de estudo.

Os valores ocupados em km² pelas classes determinadas para 2013, bem como a porcentagem do total da área da bacia hidrográfica é exibida na tabela 17.

Tabela 17 - Área ocupada pelas classes de perdas de solos por erosão em 2013.

Perdas de Solo em ton/ (ha.ano)	Área em km ²	%
0-3	1859,1	45,8
3-5	145,3	3,6
5-10	175,7	4,3
10-15	102,5	2,5
>15	1592,2	39,4
Área urbana	168,8	4,1
Lagos e represas	13,7	0,3
Total	4057,3	100

Elaborado pelo autor.

Por meio da análise da tabela é possível observar que as classes compreendidas entre 0-3 e >15 abrangem 85,2% da bacia hidrográfica. As demais classes (3-5, 5-10 e 10-15 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹) representam 10,4% do total da área de estudo. Com isso, observa-se uma tendência de locais classificados com perdas de solo relativamente baixos e altos em detrimento de valores moderados.

5.8. Dinâmica de perdas de solo (1987-2004-2013)

Na figura 38 é possível observar um histograma com a variação das classes de perdas de solo por erosão laminar de 1987, 2004 e 2013 da bacia do rio Jacaré Guaçú.

Figura 38 – Comparação em porcentagem de área das classes de perdas de solo por erosão laminar entre 1987, 2004 e 2013 na bacia do rio Jacaré Guaçu. Organizado pelo autor.

Observa-se diminuição significativa dos valores compreendidos entre 0 e 3 ton. $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. Os locais com perdas de solo compreendidos entre 3 e 5, 5 e 10 e 10 e 15 ton. $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ apresentaram aumento no percentil de área entre 1987 e 2004 e diminuição entre 2004 e 2013. As áreas classificadas com perdas acima de 15 ton. $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ foram as que apresentaram maior variação positiva, sobretudo entre 2004 e 2013.

A seguir, é possível verificar a distribuição espacial das classes de perdas de solo que sofreram alterações e as que não se alteraram entre 1987 e 2004 (Fig. 39).

Figura 39 - Distribuição espacial das classes de perdas de solo que sofreram alterações e as que não se alteraram em 1987.

Em relação à dinâmica espacial das classes de perdas de solo por erosão laminar (1987 e 2004) na bacia do rio Jacaré Guaçu, verifica-se que os locais que não sofreram alteração e os que se modificaram (0 e 3, 3 e 5 e 5 e 10 ton. ha⁻¹ano⁻¹) distribuem-se por toda área de estudo. Os valores compreendidos entre 10 e 15 e acima de 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ estão dispostos, sobretudo no centro, leste, sul, sudeste e noroeste da bacia hidrográfica.

A figura 40 exibe a distribuição da dinâmica erosiva da área de estudo entre 1987 e 2004, ou seja, os locais que não sofreram alterações e os que se modificaram para classes de perdas de solo específicas.

Figura 40 - Distribuição espacial da dinâmica erosiva laminar entre 1987 e 2004.

Pela análise das figuras 39 e 40 é possível observar que os locais classificados com perdas de solo dispostas entre 0 e 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹ alteraram-se para as demais classes (3 e 5, 5 e 10, 10 e 15 e >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹) em toda bacia hidrográfica. Esses valores estão associados, dentre outros fatores, a dinâmica de uso da terra existente nesse período na área de estudo. A alteração de pastagem para cultura temporária, anual e solo exposto, de vegetação arbórea para pastagem e silvicultura contribuíram para a alteração nos valores do fator C da EUPS e consequentemente para os resultados das perdas de solo obtidas.

As demais modificações observadas entre as classes, inclusive de locais com valores mais acentuados para perdas de solo mais baixa (>15 e 15 a $10 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ para os demais intervalos) podem ser explicadas pela substituição de locais com solo exposto por cultura temporária ou pastagem. Ou seja, o índice do fator C da EUPS estipulado em 1987 diminuiu para a mesma área com novo propósito de uso em 2004.

Valores específicos de área em km^2 sobre essa dinâmica entre as classes de perdas de solo entre 1987 e 2004 podem ser verificados a seguir na Tabela 18.

Tabela 18 - Tabulação cruzada em km^2 entre as classes de perdas de solo por erosão laminar entre 1987 (linhas) e 2004 (colunas).

Perdas de Solo em ton/ (ha.ano)	0-3	3-5	5-10	10-15	>15	Área urbana	Lagos e represas
0-3	1822,1	46,3	74,3	55,9	336,7	49,4	1,8
3-5	41,17	78,6	2,5	2,9	55,6	0,1	3,2
5-10	62,2	3,6	85,4	1,4	54,9	0,2	0,0
10-15	43,9	2,0	2,4	45,3	30,3	0,1	0,0
>15	317,0	69,5	61,2	18,9	593	0,3	5,3
Área urbana	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	74,0	0,0
Lagos e represas	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	11,9

Elaborado pelo autor.

Os valores em negrito evidenciam áreas que não sofreram modificações nos valores de perdas de solo por erosão laminar enquanto que o restante representa as áreas que se alteraram para outros intervalos de perdas.

Dos dados da tabela, chama a atenção os $336,7 \text{ km}^2$ de área antes dispostas sobre o intervalo 0 a $3 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ que alteraram-se para locais com perdas de solo acima de $15 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. O processo inverso também é expressivo, ou seja, $317,0 \text{ km}^2$ de locais classificados com perdas acima de $15 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 1987 modificaram para intervalo de 0 a $3 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 2004. Esses resultados demonstram a influência da dinâmica de uso da terra na área de estudo, nesse caso, de locais classificados com cultura temporária em 1987 que se alteraram para solo exposto em 2004 e vice versa.

Além dos dados citados, a dinâmica entre as classes de perdas de solo com área superior a 50 km^2 ocorrem entre os seguintes intervalos: 0 a 3 para 5 a 10 e 10 a 15 ton.

$\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, 3 a 5 para $>15 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, 5 a 10 para 0 a 3 e $>15 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, e >15 para 3 a 5 e 5 a 10 $\text{ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. As demais interações entre as classes estipuladas ocorrem com área inferior a 50 km^2 .

Na figura 41 é possível observar a distribuição espacial das classes de perdas de solo que sofreram alterações e as que não se alteraram entre 2004 e 2013 na bacia do rio Jacaré Guaçu. Mais precisamente, a imagem possibilita identificar os locais que mantiveram o mesmo intervalo de perdas de solo entre 2004 e 2013 (representados na cor cinza) e as áreas com suas classes específicas de que sofreram alterações no ano de 2004 (demais cores).

Figura 41 - Distribuição espacial das classes de perdas de solo que sofreram alterações e as que não se alteraram entre 2004 e 2013.

Por meio da análise do mapa apresentado anteriormente é possível observar grande representatividade de locais que não se alteraram e os que sofreram alterações com intervalo compreendido entre 0 e 3 $\text{ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ por toda área de estudo. De forma geral, são as classes que mais chamam a atenção na figura.

As classes dispostas entre 5 e 10 e 10 e 15 $\text{ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ alocam-se em áreas específicas do médio e alto Jacaré Guaçu. Os locais que se modificaram com perdas acima de 15 $\text{ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ encontram-se, de forma geral, no baixo e alto curso da bacia

hidrográfica. O intervalo de perdas de solo entre 3 e 5 possui pouca representatividade, com destaque para algumas localidades no sul e leste da área de estudo.

A figura 42 exibe o mapa de dinâmica de perdas de solo entre 2004 e 2013. Pela imagem é possível identificar os locais que não sofreram modificações e os que se alteraram para classes exclusivas de perdas no ano de 2013.

Figura 42 - Distribuição espacial da dinâmica erosiva laminar entre 2004 e 2013.

A análise das figuras 41 e 42 permite identificar de forma rápida que grande parte dos locais classificados com perdas de solo entre 0 e 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹ alteraram-se para as áreas com perdas acima de >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹. Esse fenômeno ocorre por praticamente toda área de estudo, com destaque para a região central da bacia hidrográfica. O processo inverso (>15 para 0 e 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹) também é verificado, sobretudo no alto Jacaré Guaçú e em alguns locais do setor norte e oeste da área de estudo.

Outros dados que chamam a atenção é a modificação dos locais com perdas entre 3 e 5 e 5 e 10 ton. ha⁻¹ano⁻¹ para áreas com >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ no médio Jacaré Guaçú. Em locais específicos do alto e médio curso da bacia hidrográfica verifica-se a dinâmica erosiva das classes >15 para 10 a 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹.

Conforme elucidado, de forma geral, todas essas alterações em valores de perdas de solo por erosão laminar ocorrem devido à dinâmica de uso da terra entre os períodos analisados, neste caso 2004-2013. A alteração na ponderação dos valores do fator C da EUPS de um ano para o outro refletiu na variação dos resultados obtidos.

Os dados areais em km² sobre a dinâmica erosiva existente entre as classes de perdas de solo estipuladas para 2004 e 2013 podem ser observados na tabela 19.

Tabela 19 - Tabulação cruzada em km² entre as classes de perdas de solo por erosão laminar entre 2004 (linhas) e 2013 (colunas).

Perdas de Solo em ton/ (ha.ano)	0-3	3-5	5-10	10-15	>15	Área urbana	Lagos e represas
0-3	1599,4	42,5	56,4	28,3	533,6	25,6	3,9
3-5	25,3	70,7	4,0	3,4	91,7	4,5	0,0
5-10	40,2	0,1	86,5	0,0	95,4	2,9	0,1
10-15	27,0	0,4	0,0	52,6	43,9	1,0	0
>15	163,9	31,4	28,6	18,2	826,8	1,8	0,3
Área urbana	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	132,2	0,0
Lagos e represas	3,1	0,2	0,2	0,4	0,9	0,3	9,4

Elaborado pelo autor.

Em negrito são exibidos os valores em área que não sofreram alterações nos valores de perdas de solo entre 2004 e 2013 e os demais dados da tabela representam as áreas que se modificaram para outros intervalos de perdas.

As maiores alterações ocorrem da classe 0 a 3 para >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ totalizando 533,6 km², seguido pelas variações >15 para 0 a 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹ com 163,9 km², 5 a 10 para >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ com 95,4 km² e 3 e 5 para >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ com 91,7 km².

As alterações 0 a 3 para 3 a 5, 5 a 10 e 10 a 15 ton. ha⁻¹ano⁻¹, 3 a 5 para 0 a 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹, 5 a 10 para 0 a 3 ton. ha⁻¹ano⁻¹, 10 a 15 para 0 a 3 e >15 ton. ha⁻¹ano⁻¹ e >15 para 3 a 5 e 5 a 10 ocuparam áreas dispostas entre 57 e 25 km² na bacia hidrográfica.

As demais interações dinâmicas entre as classes de perdas de solo entre 2004 e 2013 ocuparam área menor que 19km² na área de estudo.

5.9. Vazão fluvial, precipitação e uso da terra no alto e médio Jacaré Guaçu

A variação temporal da descarga fluvial entre 1987 e 2013 do posto 5C-013, disposto no médio Jacaré Guaçu, é representada abaixo na figura 43.

Figura 43: Hidrograma das vazões médias mensais entre 1987 e 2013 para o posto 5C-013 (Prefixo DAEE) da área de estudo. A linha vermelha representa a média entre 1987 e 2005.

Por meio do hidrograma apresentado é possível ter uma noção da variabilidade dos dados, sobretudo no que diz respeito à periodicidades anuais das estações secas e úmidas. De forma geral, as oscilações ocorrem com valores de máxima intensidade nos meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março enquanto que as menores descargas ocorrem entre junho e setembro. A média anual dos valores analisado entre 1987 e 2005 é de $25,8\text{m}^3/\text{s}$, a menor descarga fluvial ocorreu em outubro de 1989 com $14,28\text{m}^3/\text{s}$ e a maior com $69,63\text{m}^3/\text{s}$ foi registrada em janeiro de 2002. Além disso, é possível perceber que os períodos com os valores mais acentuados de vazão ocorreram entre 1994/95, 1999 e entre 2001 e 2002. Em contrapartida, 1989 e 1992 apresentaram as menores médias mensais de descarga fluvial. Os demais anos oscilam entre 14 e $45\text{m}^3/\text{s}$ ao longo do ano. Os anos de 2006, 2009, 2010, 2011 e 2012 apresentaram falhas em seus dados.

Em relação à variabilidade da precipitação pluvial dos postos apresentados na figura 20 (médio e alto Jacaré Guaçu), a figura 44 exibe os dados para os anos de 1987, 2004 e 2013.

Figura 44: Variação da precipitação pluvial média para 1987, 2004 e 2013 com base nos postos D4-040, D5-076, C5-035, C5-056 e C5-050 (Prefixo DAEE) da área de estudo.

De forma geral é possível verificar que o padrão de comportamento dos dados é semelhante ao longo dos meses entre os três anos analisados. Diante dos valores encontrados observa-se um período úmido e outro relativamente seco típico do clima da região central do Estado de São Paulo (MONTEIRO, 1973). Além disso, por meio da análise dos dados é possível afirmar que os meses de março e outubro foram mais chuvosos em 2013 enquanto que janeiro, novembro e dezembro apresentaram menor precipitação pluvial quando comparado aos mesmos meses dos demais anos (1987 e 2004). Para 2004, em relação aos meses de 1987 e 2013, os maiores valores pluviométricos ocorrem em fevereiro, julho e dezembro e os menores em junho, agosto e setembro. Em 1987 somente janeiro e novembro apresentaram maiores valores pluviométricos em relação aos demais anos (2004 e 2013). No entanto, em fevereiro, março, abril, julho e outubro os valores observados são menores quando comparados a 2004 e 2013.

Em relação ao uso da terra na área de abrangência do posto fluviométrico 5C-013 (alto e médio Jacaré Guaçu) é possível verificar a variação quantitativa dos dados na figura 45.

Figura 45: Variação do uso da terra na área de abrangência do posto fluviométrico 5C-013 (alto e médio Jacaré Guaçu) entre 1987, 2004 e 2013.

Por meio dos dados obtidos é possível observar diminuição de pastagem/campos e vegetação arbórea entre 1987, 2004 e 2013. Em contrapartida, a silvicultura, as áreas urbanas e, sobretudo a cultura temporária aumentam entre os períodos analisados. Os locais voltados a culturas anuais, com solo exposto e com lagos e represas apresentam comportamento variado, ou seja, aumentam entre 1987 e 2004 e depois diminuem entre 2004 e 2013.

A distribuição espacial dos dados de uso e ocupação das terras em 1987, 2004 e 2013 na área de abrangência do posto fluviométrico 5C-013 pode ser observada na figura 46.

Figura 46 - Distribuição espacial dos dados de uso e ocupação das terras em 1987 (canto superior esquerdo), 2004 (canto superior direito) e 2013 (centralizado abaixo) na área de abrangência do posto fluviométrico 5C-013 (Alto e médio Jacaré Guaçu).

Além da expansão das áreas urbanas, sobretudo nos municípios de São Carlos e Araraquara, pode-se observar uma tendência de aumento de cultura temporária e solo exposto associados à cana de açúcar nos sentidos sul e sudeste dessa parte da área de estudo. Conforme constatado no item 5.8, esse acréscimo ocorre sobre as pastagens, campos e vegetação arbórea. É notória também a diminuição de locais voltados para cultura anual e aumento de locais com silvicultura também nos setores sul e sudeste dessa parte da bacia hidrográfica.

De acordo com os fundamentos teóricos elucidados no item 2.6 esses tipos de modificações podem influenciar nos padrões de vazão fluvial das redes de drenagem.

O comportamento mensal da vazão fluvial e da precipitação pluviométrica em 1987 pode ser observado abaixo na figura 47.

Figura 47 - Comportamento da Vazão em função da Precipitação Média Mensal para o ano de 1987.

É possível observar que a vazão tende a acompanhar o comportamento da precipitação pluviométrica ao longo dos meses. Dois períodos também são evidenciados, ou seja, os meses 6,7 e 8 com baixa precipitação e vazão fluvial e novembro, dezembro e janeiro com valores hidrometeorológicos mais acentuados.

De forma geral, o mesmo padrão de comportamento dos dados pode ser observado nos anos de 2004 (Figura 48), ou seja, a vazão fluvial oscila em função da variabilidade da precipitação pluviométrica e dois períodos aparecem bem demarcados.

Figura 48 - Comportamento da Vazão em função da Precipitação Média Mensal para o ano de 2004.

Em 2013 o comportamento dos dados (vazão fluvial e precipitação pluviométrica) assemelha-se aos dois anos analisados anteriormente (Fig. 49).

Figura 49 - Comportamento da Vazão em função da Precipitação Média Mensal para o ano de 2013.

Uma pequena variação, quando comparada aos anos anteriores (1987 e 2004), ocorre entre novembro e dezembro. Devido a diminuição dos valores médios de precipitação pluviométrica nesses meses, verifica-se tendência de queda também dos valores de descarga fluvial.

A figura 50 exibe o comportamento mensal da vazão fluvial média dos anos estudados e entre o período de 1987 e 2005.

Figura 50 - Variabilidade da Vazão Média Mensal em 1987, 2004, 2013 e entre o período 1987 e 2005 (Média).

É possível verificar que os valores oscilam entre 45 e 14,5 m³/s. Observa-se também que a descarga fluvial média é maior em 2013, com exceção dos meses de maio e dezembro. Os dados de 1987, 2004 e da média do período (1987-2005) apresentam comportamento semelhante com pequenas variações positivas e negativas ao longo dos meses.

Em termos estatísticos, os valores médios mensais de vazão fluvial não apresentaram alterações significativas entre 1987, 2004 e 2013 (tabela 20).

Tabela 20: Valores estatísticos obtidos para a vazão média mensal (Qm) para os anos de 1987, 2004 e 2013.

Medidas	Qm 87	Qm 04	Qm 87	Qm 13	Qm 04	Qm 13
Média	22,76	24,17	22,76	28,50	24,17	28,50
Desvio Padrão	5,05	6,58	5,05	8,50	6,58	8,50
Variância	25,59	43,35	25,59	72,14	43,35	72,14
Observações	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Grau de Liberdade	21,00		18,00		21,00	
t crítico bi-caudal	2,08		2,10		2,08	
Teste T - 95%	0,56		0,06		0,17	

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

O teste paramétrico adotado (Teste T) para comparar os dados médios mensais de descarga fluvial nos anos estudados apontam para rejeição da hipótese de que a variabilidade ocorre em função das mudanças no uso da terra. Na tabela é possível observar que os valores obtidos no teste T para comparar os dados médios entre 1987 e 2004, 1987 e 2013 e 2004 e 2013 não excederam os valores críticos obtidos (t crítico bi caudal), esse estabelecido em função do grau de liberdade das amostras.

Em relação à média mínima mensal os valores obtidos para os anos estudados e para a média do período (1987 a 2005) estão entre 12 e 30,5 m³/s. A variabilidade dos dados pode ser observada na figura 51.

Figura 51 - Variabilidade da Vazão Média Mínima Mensal em 1987, 2004 e 2013 e entre o período 1987 e 2005 (Média).

Por meio da análise do gráfico é possível observar que em 2013 os valores médios mínimos de vazão fluvial são maiores que os demais anos analisados, exceto para os meses de maio e dezembro. Entre 1987 e 2004 as médias mínimas mensais não apresentam variabilidade expressiva. Esses valores também se assemelham ao valor médio do período (1987 e 2005).

Apesar da variabilidade dos dados observada no gráfico anterior, em termos estatísticos, essas diferenças de médias entre 1987, 2004 e 2013 não são significativas (Tabela 21).

Tabela 21: Valores estatísticos obtidos para a vazão média mínima mensal (Qmi) para os anos de 1987, 2004 e 2013.

Medidas	Qmi 87	Qmi 04	Qmi 87	Qmi 13	Qmi 04	Qmi 13
Média	17,67	18,53	17,67	22,05	18,53	22,05
Desvio Padrão	4,50	3,61	4,50	5,12	3,61	5,12
Variância	20,27	13,08	20,27	26,03	13,08	26,03
Observações	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Grau de Liberdade	21,00		22,00		20,00	
t crítico bi-caudal	2,08		2,07		2,08	
Teste T - 95%	0,61		0,03		0,06	

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

Os valores alcançados no teste t por meio da comparação das médias mínimas mensais entre os anos estudados encontram-se dentro da amplitude paramétrica estabelecida pelo t crítico bi caudal. Ou seja, o teste rejeitou a hipótese de variabilidade das médias mínimas de descarga fluvial entre os anos estudados (1987, 2004 e 2013) em função das modificações identificadas no uso e ocupação das terras da bacia hidrográfica.

Na sequência (Fig. 52), são apresentados os valores médios máximos mensais de 1987, 2004, 2013 e entre o período estipulado para a média (1987 a 2005).

Figura 52 - Variabilidade da Vazão Média Máxima Mensal em 1987, 2004 e 2013 e entre o período 1987 e 2005 (Média).

As médias máximas mensais variaram entre 105,1 em janeiro de 2013 e 16,8 em novembro de 2004. Com exceção de janeiro, maio e junho de 2013, observa-se pouca variabilidade dos dados mensais dos anos estudados e entre a média do período.

Assim como nos valores médios e mínimos mensais, estatisticamente a variabilidade das médias máximas entre os anos 1987, 2004 e 2013 não é significativa. Na tabela 22 é possível observar alguns dados estatísticos determinados bem como os valores obtidos no teste t para avaliação da significância das médias.

Tabela 22: Valores estatísticos obtidos para a vazão média máxima mensal (Qma) para os anos de 1987, 2004 e 2013.

Medidas	Qma 87	Qma 04	Qma 87	Qma 13	Qma 04	Qma 13
Média	30,27	33,22	30,27	45,59	33,22	45,59
Desvio Padrão	11,97	12,89	11,97	23,51	12,89	23,51
Variância	143,36	166,30	143,36	552,79	166,30	552,79
Observações	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Grau de Liberdade	22,00		16,00		17,00	
t crítico bi-caudal	2,07		2,12		2,11	
Teste T - 95%	0,56		0,06		0,12	

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

A tabela 23 exhibe alguns dados estatísticos e os resultados do teste paramétrico t usado para comparar a vazão média mensal dos anos estudados (1987, 2004 e 2013) com a média do período (1987 a 2005).

Tabela 23: Valores estatísticos e teste t obtido para comparação entre a vazão média mensal (Qm) dos anos estudados (1987, 2004 e 2013) e para a média do período QmP (1987 a 2005).

Medidas	Qm 87	QmP	Qm 04	QmP	Qm 13	QmP
Média	22,76	25,84	24,17	25,84	28,50	25,84
Desvio Padrão	5,05	6,96	6,58	6,96	8,50	6,96
Variância	25,59	48,56	43,35	48,56	72,14	48,56
Observações	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Grau de Liberdade	20		22		21	
t crítico bi-caudal	2,08		2,07		2,07	
Teste T - 95%	0,22		0,55		0,41	

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

Por meio da tabela é possível observar que não há variação significativa das vazões médias mensais dos anos estudados com a média do período. Os valores do teste t encontram-se no intervalo de aceitação da hipótese nula, ou seja, sem variação significativa das médias em função das alterações no uso e ocupação da terra.

O mesmo ocorre com a comparação da vazão média mínima entre os anos estudados e a média mínima do período entre 1987 e 2005 (Tabela 24).

Tabela 24: Valores estatísticos e teste t obtido para comparação entre a vazão média mínima mensal (Qmi) dos anos estudados (1987, 2004 e 2013) e para a média mínima do período QmiP (1987 a 2005).

Medidas	Qmi 87	Qmi P	Qmi 04	Qmi P	Qmi 13	Qmi P
Média	17,67	19,94	18,53	19,94	22,05	19,94
Desvio Padrão	4,50	4,40	3,61	4,40	5,12	4,40
Variância	20,27	19,40	13,08	19,40	26,03	19,40
Observações	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Grau de Liberdade	22		21		22	
t crítico bi-caudal	2,07		2,07		2,07	
Teste T - 95%	0,22		0,39		0,29	

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

Assim como no teste anterior, para todas as comparações realizadas (1987-média mínima; 2004-média mínima e 2013-média mínima), os valores apontam para rejeição da hipótese alternativa e aceitação da nula.

Os resultados do mesmo procedimento aos dois anteriores, agora para as médias máximas, são apresentados a seguir (Tabela 25).

Tabela 25: Valores estatísticos e teste t obtido para comparação entre a vazão média máxima mensal (Qma) dos anos estudados (1987, 2004 e 2013) e para a média máxima do período QmaP (1987 a 2005).

Medidas	Qma 87	QmaP	Qma 04	QmaP	Qma 13	QmaP
Média	30,27	35,66	33,22	35,66	45,59	35,66
Desvio Padrão	11,97	13,60	12,89	13,60	23,51	13,60
Variância	143,36	185,08	166,30	185,08	552,79	185,08
Observações	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Grau de Liberdade	22		22		18	
t crítico bi-caudal	2,07		2,07		2,10	
Teste T - 95%	0,31		0,65		0,22	

Fonte – SIGRH. Elaborado pelo autor.

Neste caso, assim como nos demais, não existe variação significativa de médias entre os anos estudados e a média do período.

Com isso, é possível afirmar que as modificações observadas no uso das terras de partes da bacia hidrográfica nos anos estudados (1987-2004-2013) não influenciaram estatisticamente na variabilidade a vazão fluvial média, mínima e máxima do rio Jacaré Guaçu em seu médio curso.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados referentes ao índice de erosividade anual da área de estudo são similares aos determinados por Bertoni e Lombardi Neto (1999) e Oliveira et al. (2012) para a região central do Estado de São Paulo, exceto para os valores acima de 8000 Mj.mm/ha.h obtidos para o alto curso da bacia, no município de São Carlos, que excedem os dados estipulados pelos pesquisadores.

Outro fato que chama atenção em relação ao fator R da EUPS determinado para a bacia hidrográfica é a amplitude entre os valores que foi de 1176 Mj.mm/ha.h. Essa diferença ocorreu em localidades relativamente próximas no alto e entre o alto e baixo curso da bacia hidrográfica. A variabilidade dos valores está atrelada a distribuição da precipitação pluviométrica que é a base para a determinação da erosividade conforme a metodologia adotada. Apesar da quantidade de chuva obedecer aos condicionantes climáticos da área de estudo (clima tropical alternadamente seco e úmido), o que se percebe é uma grande diferença entre valores pluviométricos dentro da bacia hidrográfica. Um estudo, de caráter climatológico/meteorológico com uso de dados diários ou horários de atributos e elementos do clima poderá contribuir para uma explicação mais detalhada dessas diferenças pluviométricas na bacia hidrográfica.

No entanto, para o estudo da erosão laminar, os dados determinados referentes à erosividade das chuvas foram preponderantes para o cálculo final das perdas de solo da bacia hidrográfica. As áreas que mais tiveram expansão do cultivo da cana de açúcar entre 1987, 2004 e 2013 e que em determinados meses desses anos apresentaram solo exposto no período entre safras estão dispostas sobre os locais com índice do fator R mais elevado. Isso pode ser verificado nas figuras 22, 29 e 34. Portanto, pode-se afirmar que o aumento das perdas de solo está atrelado, dentre outros fatores, diretamente às mudanças no uso da terra sobre as áreas com maior potencial erosivo das chuvas na bacia do rio Jacaré Guaçu.

Cabe ressaltar ainda que os meses onde se deve ter maior atenção em relação à cobertura do solo nos locais voltados para a cultura temporária da cana (locais classificados com as maiores perdas de solo) são novembro, dezembro, janeiro e fevereiro tendo em vista que esse período apresentou maior volume de chuvas e consequentemente de erosividade (Fig. 44).

Em relação ao fator K da EUPS obtido para as classes pedológicas da bacia do rio Jacaré Guaçu pode se afirmar que de acordo com a classificação de Carvalho (1994) os solos apresentam a seguinte categorização: Alta Erodibilidade $> 0,3058 \text{ t.ha/ (MJ/ha.mm/h)}$: Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Organossolo Háplico e Argissolo Vermelho Amarelo; Média Erodibilidade $0,01529 - 0,03058 \text{ t.ha/ (MJ/ha.mm/h)}$: Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho Amarelo; Baixa Erodibilidade $< 0,01529 \text{ t.ha/ (MJ/ha.mm/h)}$ – Planossolo Háplico.

Em termos de porcentagem de área de ocupação das classes de solos (Tabela 6) verifica-se que 33% dos materiais apresentam erodibilidade alta, $> 0,3058 \text{ t.ha/ (MJ/ha.mm/h)}$, 64% média, ou seja, entre $0,01529 - 0,03058 \text{ t.ha/ (MJ/ha.mm/h)}$ e somente 2,7% baixa $< 0,01529 \text{ t.ha/ (MJ/ha.mm/h)}$.

Apesar da limitação existente na escala do mapa pedológico adotado como base para esse trabalho (1:500000) a maior parte dos solos identificados na bacia apresentam alta e média erodibilidade (97%). As ampliações das áreas de cultivo de cana de açúcar (associadas às maiores perdas de solo) ocorreram sobre essas classes pedológicas ao longo de toda a área de estudo. Portanto, pode se afirmar que o detalhamento dos níveis categóricos das classes pedológicas com uma escala maior seria importante, mas não impactaria de forma significativa nos valores de perdas de solos obtidas nessa pesquisa. Isso decorreria da pequena variação que ocorreria nos índices do fator K da EUPS que seriam atribuídas para classes de solos em um eventual mapa pedológico de escala mais detalhada, ou seja, possivelmente ocorreria uma variabilidade espacial mas não numérica.

De forma geral, recomenda-se uma atenção especial ao alto do curso da bacia onde a substituição de pastagens, silvicultura e culturas anuais pelo cultivo temporário da cana de açúcar são verificadas (Figuras 31, 32, 33 e 34). Nesse compartimento, além da existencia dos maiores índices de erosividade estão dispostos os Neossolos Quartzarênicos que são classificados com alta erodibilidade e, se manejados de forma inadequada, podem apresentar processos erosivos conforme detalhado por Sales et al. (2010).

Em relação ao fator topográfico (LS) e sua influência sobre as perdas de solo por erosão verificam-se situações distintas (Figuras 25, 35, 36 e 37). Em algumas localidades específicas do alto curso da bacia onde o índice LS é $>$ que 6 e encontram se associados as escarpas festonadas, mesas basálticas, morros amplos e arredondados as perdas de solo nos anos estudados (1987, 2004 e 2013) são baixas, com predomínio das

classes compreendidas entre 3 e 5 e <3 ton/ (ha.ano). Isso ocorre pelo fato desses locais apresentarem áreas de preservação permanente com vegetação arbórea de acordo com recomendação do código florestal (BRASIL, 2012). Em contrapartida, ao longo de toda a área de estudo, associado, principalmente ao terço inferior das vertentes de todos os compartimentos geomorfológicos verificam-se setores com fator LS >6 e com perdas de solo acima de 15 ton/ (ha.ano). Nessas localidades as terras são ocupadas por pastagens, cultura temporária, anual e solos expostos ao durante os anos pesquisados.

Outra relação verificada entre o fator topográfico, as perdas de solos, os compartimentos geomorfológicos e o uso da terra é a correspondência de áreas com LS < 4 sobre os interflúvios das sub bacias ou das planícies de inundação do rio Jacaré Guaçu com uso da terra predominante de pastagens e perdas de solo $<$ que 3 ton/ (ha.ano). Os valores dos fatores da EUPS ponderados para essas variáveis, sobretudo do fator topográfico (declividade 0% e comprimento de rampa 0m) contribuíram para esses resultados.

Cabe ressaltar que o pressuposto teórico e metodológico do fator LS da EUPS não leva em consideração os aspectos morfológicos das vertentes como concavidade, convexidade e retilineidade. Portanto, pesquisas com nível de detalhamento mais acentuado em sub-bacias específicas da área de estudo e que considerem os aspectos geomórficos e antropogênicos das encostas podem auxiliar na validação dos dados obtidos sobre a relação topográfica e as perdas de solo estipuladas neste trabalho.

Outro dado que chama a atenção e que deve ser monitorado é o avanço da cultura canavieira sobre as escarpas festonadas do alto e médio Jacaré Guaçu bem como para os sopés das mesas basálticas e morros dos testemunhos da bacia hidrográfica conforme identificado nas figuras 27, 28 e 29. São áreas voltadas para preservação permanente da vegetação nativa, com relevância ecológica, naturalmente com alta fragilidade ambiental e que muitas vezes alocam mananciais importantes das sub-bacias da área de estudo.

No que diz respeito aos fatores uso e manejo do Solo (C) e prática conservacionista (P), ambos vinculados ao uso e ocupação das terras, o que mais chama a atenção é a ampliação das áreas voltadas para a cultura temporária (cana de açúcar e solo exposto) sobre as pastagens, campos, silvicultura e vegetação arbórea durante o período pesquisado (1987, 2004 e 2013). A análise das figuras 34 e 37 permite verificar de forma clara como a ampliação dessa atividade agrícola em toda a área de estudo contribuiu para o aumento das perdas de solo > 15 ton/ (ha.ano), ou seja, acima do

tolerável. Naturalmente, as mudanças no uso da terra implicam em alterar os valores do fator C da EUPS que diretamente aumentará a estimativa de perdas de solo por erosão laminar, sobretudo sobre as áreas onde os índices das demais variáveis do modelo são maiores.

A relação entre perdas de solo menores que 3 ton/ (ha.ano) e as áreas voltadas para pastagens, campos e vegetação arbórea também ocorre (Figuras 34 e 37). O resultado decorre do fato de que essas formas de uso e ocupação da terra protegem o solo da erosividade das chuvas ao longo de todo ano. Em termos práticos, o índice atribuído ao fator C da EUPS para as pastagens, campos, silvicultura e vegetação arbórea é menor que o da cultura temporária consequentemente, as perdas de solo serão menores.

No entanto, é preciso considerar os aspectos relacionados à conservação das pastagens ou das áreas de preservação permanente. A degradação dessas localidades pode mascarar os resultados alcançados pelo modelo adotado nesse trabalho. Centurion et al. (2001) verificou que algumas propriedades físicas em Latossolo Vermelho foram mais degradadas em pastagens do que em cana de açúcar, milho e vegetação arbórea (Floresta Latifoliada Tropical) em função do pisoteio do gado. A degradação dessas propriedades (resistência à penetração e infiltração de água no solo) pode favorecer ao escoamento superficial e aos consequentes processos erosivos. Nesse sentido, um estudo com ênfase no estado de conservação das pastagens bem como das propriedades físicas dos solos nessas áreas pode contribuir para validar as informações determinadas na presente pesquisa.

As áreas com perdas de solo com valores compreendidos entre 3-5, 5-10 e 10-15 ton/ (ha.ano) tiveram pouca representatividade e dinamismo espacial entre os períodos estudados (1987, 2004 e 2013) na bacia do rio Jacaré Guaçú (Figuras 38, 39, 40, 41 e 42). A maior ocupação foi de 5,5% do total da área da bacia para a classe 5-10 ton/ (ha.ano) em 2004 e a menor foi de 2,5% para a categoria 10-15 ton/ (ha.ano) em 2013. Além da baixa amplitude entre os valores (3%), o maior percentil (5,5%) obtido corresponde a um quinto do menor valor obtido nas categorias extremas que foi de 26,3% para a classe >15 ton/ (ha.ano) no ano de 1987.

Nesse sentido, pode se afirmar que a área de estudo é caracterizada, dentre outros fatores, por apresentar valores extremos de perdas de solos, ou seja, <3 e >15 ton/ (ha.ano) e que a menor categoria perdeu espaço para a maior durante os anos pesquisados (1987, 2004 e 2013). Com isso, reforça se aqui a necessidade de

monitoramento pelo Poder Público e pela sociedade de um modo geral para a expansão da cultura temporária da cana sobre outras formas de uso da terra na bacia do rio Jacaré Guaçú.

A análise da relação qualitativa dos dados mensais de vazão fluvial em função da precipitação pluvial no alto e médio curso da bacia do rio Jacaré Guaçú revelou que há uma tendência de acompanhamento dos dados tanto para aumento quanto para diminuição (Figuras 47, 48 e 49). É um comportamento comum que obedece aos pressupostos teóricos do ciclo hidrológico das bacias dispostas sobre a região tropical (TUCCI, 2002). No entanto, um dado que chama a atenção é o aumento da vazão fluvial no mês de junho no ano de 2013, mesmo com uma oscilação relativamente pequena da precipitação pluvial comparada ao demais anos estudados (1987 e 2004). Em termos numéricos a precipitação (P) média para o mês 6 em 1987 foi de 32,2 mm e a vazão (Q) de $21,1 \text{ m}^3/\text{s}$, em 2004 a pluviosidade foi de 29,3mm e a descarga fluvial foi $23,3 \text{ m}^3/\text{s}$ e em 2013 os valores para P e Q foram 51,3mm e $32,0 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. A explicação poderia decorrer da ocorrência de um aumento expressivo de precipitação pluviométrica no mês de maio, o que acarretaria no aumento da vazão em junho de 2013. Entretanto, nos demais anos estudados (1987 e 2005) a oscilação positiva para maio também é verificada, porém sem o aumento expressivo da vazão fluvial.

Outro dado interessante que merece destaque é a relação entre precipitação e vazão do mês 7 de 2004 e 2013. Em julho de 2013, mês do registro do uso da terra pelo sistema sensor Landsat 8/OLI usado neste trabalho (Tabela 2), verifica-se vazão e precipitação pluviométrica média mensal de $24,4 \text{ m}^3/\text{s}$ e 20,4mm, respectivamente. No mesmo mês (julho) em 2004 os valores são de 35,8mm para a precipitação e de $19,6 \text{ m}^3/\text{s}$, para a descarga fluvial. Ou seja, em 2013 a precipitação é menor que em 2004, porém a vazão é maior.

Nesse sentido, um estudo específico sobre a variabilidade e a relação diária da precipitação e da vazão pode contribuir para explicar essas anomalias dos meses de junho e julho, tendo em vista que a aplicação do teste estatístico paramétrico T não identificou variabilidade significativa na descarga fluvial mensal entre os anos estudados e entre a média do período (1987 a 2005) em função das mudanças no uso da terra, conforme destacado na tabela 20.

No que diz respeito à variabilidade da vazão média mensal mínima observa-se que em 2013 os valores encontraram-se sempre acima da média dos demais períodos analisados (Fig. 51), exceto para os meses de maio e dezembro. Esse resultado é

interessante uma vez que a precipitação em 2013 só foi maior que os demais períodos nos meses de março, maio, junho e outubro (Fig. 44). Mesmo assim, apesar desse aparente aumento de escoamento relativamente desconectado com a precipitação pluvial, em termos estatísticos, essas mudanças não apresentaram alterações significativas quando testadas hipoteticamente em função das mudanças ocorridas no uso e ocupação das terras (Tabela 21).

Para a análise da vazão média máxima mensal entre os períodos estudados o destaque são para os meses de janeiro, maio e junho de 2013, com valores de 105,1 m³/s, 65,6 m³/s, 62,5 m³/s, respectivamente. Esses valores são bem mais acentuados que os dos mesmos períodos dos demais anos analisados (Fig. 52). Apesar de não encontrar variação estatística significativa na comparação entre os valores dos demais anos estudados (Tabela 22) esses dados podem refletir uma eventual relação de aumento de escoamento superficial em função de solo exposto nas culturas temporárias de cana de açúcar. O mês de julho de 2013 especificamente demonstra a quantidade de solo exposto presente no médio e alto Jacaré Guaçú (Fig. 29).

Portanto, conforme elucidado, um estudo de cunho estatístico com intuito de analisar valores diários de precipitação pluvial, vazão fluvial e uso da terra nesses meses específicos pode colaborar para entender essa variabilidade que é expressiva visualmente, mas não quantitativamente no que concerne a análise mensal.

7 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos e os resultados alcançados têm-se as seguintes conclusões:

1. A área de estudo está inserida em uma região com grande potencial de ocorrência de erosão pluvial. Os índices de erosividade anual determinados para a bacia hidrográfica pode ser classificado como moderadamente forte e forte para os padrões brasileiros.
2. As classes de solos existentes na bacia do rio Jacaré Guaçu apresentaram índice de erodibilidade variado. No entanto, grande parte da área de estudo (64%) está disposta sobre os Latossolos, onde o fator K é médio e sobre o Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Organossolo Háptico e Argissolo Vermelho Amarelo, que computam 33% do total da área da bacia hidrográfica e apresentam alta erodibilidade.
3. Os procedimentos desenvolvidos sobre os dados da missão SRTM evidenciam que declives abaixo de 12%, vertentes com comprimento variando entre 0 a 900m e fator LS menor que 4 predominam em mais de 60% da área da bacia hidrográfica.
4. A classificação supervisionada das imagens do sistema/sensor Landsat 5/TM e Landsat 8/OLI revelaram aumento de locais destinados ao cultivo de cana de açúcar (cultura temporária e solo exposto) entre 1987, 2004 e 2013, sobretudo em áreas destinadas à cultura agrícola anual, pastagens e silvicultura. O aumento das áreas urbanas, a diminuição de locais destinados à vegetação arbórea e a ampliação de pastagens e silvicultura sobre essas localidades nesse período também foi verificada.
5. A aplicação do modelo ambiental EUPS demonstrou que mais de 45% da área de estudo apresentou perdas de solo menor que $3 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 1987, 2004 e 2013. No entanto, uma diminuição de locais classificados com esses valores é observada durante o período citado (12,6% do total da área da bacia). As perdas de solo compreendidas entre 3 e 5, 5 e 10, 10 e 15 tiveram um pequeno acréscimo entre 1987 e 2004 e um decréscimo entre 2004 e 2013 (ambos menores que 0,6%). Os locais classificados com perdas de solo acima de $>15 \text{ ton. ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ aumentaram 0,1% o entre 1987 e 2004 e (13%) e entre 2004 e 2013.
6. A análise estatística comparativa dos dados fluviométricos evidenciou que não ocorreram mudanças significativas nos padrões de vazões médias, mínimas e máximas mensais entre 1987, 2004, 2013 e entre a média do período (1987 a 2005).

8 REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. Os baixos chapadões do Oeste Paulista. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 17, p. 1-8, 1969.
- ALMEIDA, F.F.M. de. **Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista**. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, 1965, n.41. p.169-263.
- ALMEIDA M.A.; STEIN D.P.; MELO M.S.; BISTRICHI C.A.; PONÇANO W.L.; HASUI Y.; ALMEIDA F.F.M. Geologia do oeste paulista e áreas fronteiriças dos Estados de Mato Grosso do sul e Paraná. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 31, 1980, Camboriú, **Anais...** Camburiu 1980, v.5p.2799-2812.
- ALVES, D.S. **Mapeamento do Uso da terra em Rondonia Utilizando Técnicas de Segmentação e Classificação de Imagens TM**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE - São José dos campos, 1996.
- ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Ottawa: DL Publications, 1989. 249p
- BAKKER, M.M; GOVERS, G.; DOORN, A.V.; QUETIER, D.C.; ROUNSEVELL, M. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern. **Geomorphology** n. 98 p. 213-226, 2008.
- BARCELOS, A.A. **Geração de sulcos em meio coesivo e caracterização hidrossedimentométrica de sua evolução**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre - RS, 2005. 154p.
- BERTONI, J. O espaçamento dos terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. **Bragantia**. IAC, Campinas. v. 18(1) . p.113-140, 1959.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4ª Ed. São Paulo: Ícone, 1999. 480p.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 1993. p. 177-242.

BEVEN, K. J.; KIRBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin Hydrologiques**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BISSIONAIS, Y.L.; MONTIER, C.; JAMAGNE, M.; DAROUSSIN, J.; KING, D.; Mapping erosion risk for cultivated soil in France. **Catena**, n. 46, p. 207-220, 2001.

BUENO, C. R. P. **Zoneamento da susceptibilidade à erosão dos solos da alta e média Bacia do Rio Jacaré Pepira, SP, com vistas ao planejamento ambiental**. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

BUENO, C. R. P.; STEIN, D. P. Potencial Natural e Antrópico de erosão na região de Brotas, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, 2005. v. 26, p.1-5.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, England, Claredon Press, 1987. 193p.

BRASIL. Lei 9.433, de 08. jan. 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, Cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da CF, e altera o artigo 1 da Lei 8.001 de 13.03.1990 que modificou a Lei 7.990, de 28.12.1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 09 jan.1997.

BRASIL. Lei 12.651, de 25 maio 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n^{os} 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n^{os} 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n^o 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 maio.2012.

BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, n.3, p. 385-415, 2000.

CABECAUER, T.; HOFIERKA, J. The consequences of land cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. **Geomorphology** n. 98 p. 187-198, 2008.

CAMARA, G.; DAVIS, C. Por que Geoprocessamento? In: CAMARA, G. DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. (org.) **Geoprocessamento: teoria e aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2000. p.1-5. Disponível em: <http://mtc-12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2013.

CAMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Interacting remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v.20 n.3, p. 395-403, 1996.

CANASAT. **Monitoramento da cana-de-açúcar via imagem de satélite**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/cultivo.html>. Acesso em: 08 de maio de 2012.

CARSON, M.A.; KIRKBY, M.J. **Hillslope form and process**. Oxford, Cambridge University Press, 1975. 475p.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM), 1994, 372 p.

CERRI, C.E.P. **Mapeamento das áreas de risco de erosão dos solos da Bacia do Rio Piracicaba, utilizando geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1999. 89 p.

CENTURIO, J.F.; CARDOSO, J.P.; NATALE, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agrossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p.254-258, 2001.

CHORLEY, R.J.; KENNEDY, B.A. **Physical Geography: a systems approach**. London: Prentice Hall International, 1971. 370p.

CORREA, M.G.G. **Distribuição espacial e variabilidade de precipitação pluviométrica na bacia do rio Piquiri – PR**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. 104p.

CHRISTOFOLETTI, A.; QUEIROZ NETO, J.P. Os sedimentos da Serra de Santana (SP). **Boletim Paranaense de Geografia**. n.18-20 p. 231-240, 1966.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas, UNICAMP 2^a ed., 1993. 170 p.

DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, 1990. 114 p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 1990, 114p.

DERPSH, R. **Controle da erosão no Paraná, Brasil:** sistema de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo: IAPAR, 1990. 273p.

DEVORE, J. L. **Probabilty and statistic for engineering and the sciences.** 4th ed. Wadsworth Publishing, 1995.

FERNANDES, L.A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e pontal do Paranapanema (SP):** os grupos Bauru e Caiuá. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 1997, 129p.

FERREIRA, R.E.; ALVES, F. D. Organização espacial da cana de açúcar no Estado de São Paulo: uma análise evolutiva. In: Encontro de Grupos de Pesquisa Agricultura, desenvolvimento regional e transformações socioespaciais, 5, 2009, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2009. p.1-18.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto.** São Paulo: Oficina de Textos 2ª ed, 2007, 101p.

FIORIO, P.R. **Avaliação cronológica do uso da terra e seu impacto no ambiente da microbacia hidrográfica do Córrego do Ceveiro da região de Piracicaba, SP.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1998, 114 p.

FOSTER, G. R.; McCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal Soil Water Conservation**, Ankeny, v.36, n.6, p.355-359, 1981.

FRANKE, R. Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods, **Mathematics of Computations**, v. 33, n. 157, p. 181-200. 1982.

FUJIHARA, A.K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. 118 p.

JABUR, I.J. **Alterações hidrológicas decorrentes de mudança do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do alto rio Ligeiro, Pato Branco – PR.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba– PR, 2010, 178p.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M.; Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999 p. 15-55.

GREGORY, K.J.; WALLING, D.E. **Drainage basin form and processes: a Geomorphological approach**. New York: John Wiley & Sons Ltda, 1973. 456p.

GREENLAND, D.J. Soil structure and erosion hazard. In: GREENLAND, D.J. LAL, R. Soil conservation and management in the humid tropics. Chichester: John Wiley & Sons, 1977. p. 17-23

GUIMARÃES, J.L.B. **Relação entre a ocupação do solo e o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Pequeno - São José dos Pinhais - PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba- PR, 2000, 205p.

HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. Image segmentation techniques. **Computer Vision Graphics Image Process**. N.29; 100–132, 1985.

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

HUGGETT, R. A history of the systems approach in geomorphology. **Géomorphologie: relief, process, environmentant**, n. 2, p. 145-158, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapa de Clima do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Catálogo de imagens**. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acesso em 12 jan. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Sistema de ajuda on line do SPRING**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/>. Acesso em 30 set. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, IPT, Escala 1: 500.000. São Paulo: IPT, v2. 1981, 125p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, IPT, Escala 1: 1000000. São Paulo: IPT, v1. 1981.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Orientações para o combate à erosão no estado de São Paulo, Bacia do Pardo-Grande**. São Paulo: 3v. IPT. Relatório, 1990. 184p.

JAMES, M. **Classification Algorithms**. John Wiley and Sons Inc, 1985. 209p.

JABUR, I.J. **Alterações hidrológicas decorrentes de mudança do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do alto rio Ligeiro, Pato Branco – PR**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba– PR, 2010, 178p.

KIRKBY, M.J; MORGAN, R.P.C. **Soil Erosion**. Jonh Wiley & Sons Ltda. New York, 1980. 312p.

LAL, R. **Physical Management of soil of the tropics: priorities for the 21st century**. Soil Sci., 165:191-203, 2000.

LAMBIN, E.F. **Modelling deforestation processes: a review**. Trees Publications Series B: Research Report. n.1 Luxemburgo: European Commission, 1994. 128p.

LEITE, D.S.; RINO, L. H. M. **Análise de Significância Estatística na Comparação entre Sistemas de Sumarização Automática**. Série de Relatórios do Núcleo Interinstitucional de Lingüística Computacional NILC - ICMC-USP. São Carlos, 2009. 8p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3a ed. New York: John Wiley & Sons Ltda, 1994. 750p.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas – SP. In: Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, 3 Recife, 1980. **Anais...**fl13-A.

McCULLOCH, J.L.; ROBINSON, M. History of forest hydrology. **Journal of Hydrology**. N.150 p. 189-216, 1993.

MATINELLI, L. A; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, n. 18 p. 885–898, 2008.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; SÁNCHEZ-BOSCH, I. Impact assessment of changes in land use/conservation practices on soil erosion in the Penedès-Anoia vineyard region (NE Spain). **Soil & Tillage Research** n.57 p.101–106, 2000.

MATHER, P. M. "Introduction: the ESRC/NERC Joint Programme on Geographical Information Handling." **Geographical Information Handling - Research and Applications**. Ed., Paul M. Mather. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993. 1-6.

MELFI A.J.; PICCIRILLO E.M.; NARDY, A.J.R. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin: an introduction. In: Piccirillo E.M., Melfi A.J. (eds) **The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects**. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 600p, 1988.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 8, n. 1 p. 69-82, 1994.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças climáticas**. Orgs. PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. Rio de Janeiro: Embrapa Solo. 2010. p.105-121.

MONTEIRO, C.A. de F. **A dinâmica climática e as chuvas do estado de São Paulo: estudo em forma de atlas**. São Paulo: USP/Igeo, 1973.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos, 2001. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 208p.

MORETTI, L.R. **Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001. 128 p.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Essex: Longman Group Limited, England, 1995. 198p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte, 2007. CPRM, 552p.

NEARING, V.J.; JETTEM, V.; BAFFAUT, C.; CERDAN, O.; COUTURIER, A. HERNANDEZ, M.; BISSONNAIS, Y.L.; NICHOLS, M.H.; NUNES.J.P.; RENSCHLER, C.S. SOUCHERE, V. OOST, K.V. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. **Catena**. 2005 n.61 p.131-154.

NASA. **Jet Propulsion Laboratory**. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acesso em: 13 mar. 2012.

OLIVEIRA, J.B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas, Instituto Agrônomo, 1999. Boletim Científico 45, 112p.

OLIVEIRA, P.T.S.; WENDLAND, E.; NEARING, M.A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, 2012, v.100, n.1, p.139-147.

PARANHAS FILHO, A.C.; PIO FIORI, A.; DISPERATI, L. LUCCHESI, C. CIALI, A. LASTORIA, G. Avaliação multitemporal das perdas de solos na bacia do rio Taquarizinho – MS. **Boletim Paranaense de Geociências** n. 52 p. 49-59, 2003.

PEDRO, F. G.; LORANDI, R. Potencial Natural de Erosão na área periurbana de São Carlos – SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2004. n.56. p. 28 – 33.

PERINOTTO, J. A. de J.; ETCHEBEHERE, M. L.de C. ; SIMÕES, L. S. A. Diques clásticos na Formação Corumbataí no nordeste da Bacia do Paraná, SP : Análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas. **Geociências**. n. 27 p. 469-491, 2008.

PERROTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; LOPES,R.C; D'AGOSTINO, L.Z.; PERUFFO, N.; GOEMS, S.D.; SACHS, L.L.B; MEIRA, V.T.; GARCIA, M.G.M.; LACERDA FILHO, G.V. **Mapa Geológico do estado de São Paulo, escala 1:750000**. Programa Geologia do Brasil – PGB, CPRM, São Paulo, 2005.

POIRAUD, A. Landslide susceptibility-certainty mapping by a multi-method approach: a case study in the tertiary basin of Puy-en-Valey (Massif central, France). **Geomorphology**, 2014. n.216 p. 108-224

PRADO, J.P.B; NÓBREGA, M.T. Determinação de perdas de solo na bacia hidrográfica do córrego Ipiranga em Cidade Gaúcha, Estado do Paraná, com aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS). **Acta Scientiarum Technology**, 2005, v.1 p. 33-42.

RANIERI, S.B.L. **Estimativa da erosão do solo em uma bacia hidrográfica no Município de Piracicaba (SP) utilizando os modelos USLE e WEPP**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000. 99 p.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, R.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, 2003. p.241-262.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.10, p.41-56, 1996.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis**. New York, Springer – Verlag, 1993.340p.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**. 2010; v. 2 .n 4, p.1057-1076.

RUTHES, J.M.; TOMAZONI. J.C.; GUIMARÃES. E.; GOMES.T.C. Uso de Sistema de Informação Geográfica na Determinação do Fator Topográfico da Bacia do Rio Catorze, Sudoeste do PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 2012; v. 5, p. 1099 – 1199.

SALES, L.E.O.; CARNEIRO, M.A.; SEVERIANO, E.C. OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M. M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 3, p. 667-674. 2010.

SANT'ANNA NETO, J. L. **As chuvas no Estado de São Paulo**: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica. 1995. 200 p. Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia, Letras, Artes e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing**: Models and Methods for Image Processing, 3ª Ed. Academic Press, 2006.

SIGRH. **Banco de dados Fluviométricos do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/flu/>. Acesso em: 16 ago. 2012.

SILVA, A.M.; ALVARES, C.A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no Estado de São Paulo. **Geociências**, Rio Claro, v.24, n.1, p.33-42, 2005.

SISTEMA DE GESTÃO TERRITORIAL DA ABAG/RP. Disponível em: <http://www.abagrpnpm.embrapa.br/index.htm>. Acesso em: 21 ago. 2013.

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. Comparisons between the tectonic evolution of the intracratonic and marginal basins in South Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48, (Suplemento), p. 313-324, 1975.

SOUZA, V.; GASPARETTO, N.V.L. Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) na bacia do córrego Pinhalzinho Segundo, noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 2012. v.3 n.3 p.267-278.

STAR, J.; ESTES, J. **Geographic Information Systems**: an introduction. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1990. 303p.

SUMMERFIELD, M.A. **Global Geomorphology**: an introduction to the study of landforms. London: Longman.,1991. 537p.

TOMAZONI, J.C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia** n. 57 p. 235-244, 2005.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G.. **Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control**. New York: John Wiley & Sons, 2002. 337 p.

TU, T.; SU, S.; SHYU, H.; HUANG, P.S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v.40, n.5, p.720-8, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. Brasília: Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002. 150p.

VALERIANO, M.M. **Estimativa de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas 172p, Rio Claro, 1999.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756), 2004. 72p.

van ZYL, J.J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v.48, 2001. p.559-565.

XAVIER da SILVA, J. Geoprocessamento em estudos ambientais: uma perspectiva sistêmica. In: MEIRELLES, M.S.P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C.M. **Geomática: Modelos e aplicações ambientais**. EMBRAPA - Informação Tecnológica. Brasília, 2007. 593p.

ZACHAR, D. Soil erosion. Elsevier Scientific Publishing Company. Bratislava, Czechoslovakia, 1982. 547p.