

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA, HIDROLÓGICA E ENERGÉTICA
DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA MICROCENTRAL
HIDRELÉTRICA DA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU- SP**

FRANCIENNE GOIS OLIVEIRA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura)

**BOTUCATU - SP
Dezembro/2013**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA, HIDROLÓGICA E ENERGÉTICA
DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA
DA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU - SP**

FRANCIENNE GOIS OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura)

**BOTUCATU - SP
Dezembro/2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Oliveira, Francienne Gois, 1979-
O48c Caracterização fisiográfica, hidrológica e energética da
bacia de contribuição da Microcentral Hidrelétrica da Fa-
zenda Lageado, Botucatu-SP / Francienne Gois Oliveira. -
Botucatu : [s.n.], 2013
xvii, 122 f. : ils. color., grafs., tabs., fots. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Fa-
culdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2013
Orientador: Odivaldo José Seraphim
Inclui bibliografia

1. Sistemas de informação geográfica. 2. Erosão. 3. So-
los - Conservação. 4. Curva de permanência. 5. Energia elé-
trica - Produção. I. Seraphim, Odivaldo José. II. Universi-
dade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de
Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

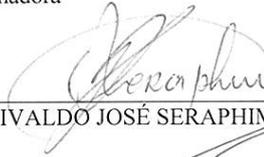
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "CARACTERIZAÇÃO FISIOGRAFICA, HIDROLÓGICA E ENERGÉTICA
DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA MICROCENTRAL
HIDRELÉTRICA DA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU - SP"

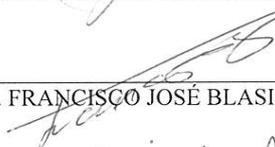
ALUNA: FRANCIENNE GOIS OLIVEIRA

ORIENTADORA: PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

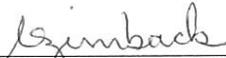
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM



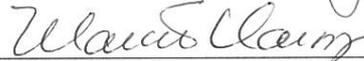
PROF. DR. FRANCISCO JOSÉ BLASI DE TOLEDO PIZA



PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK



PROF. DR. VALDEMIR ANTONIO RODRIGUES



PROF. DR. MARCIO MASSASHIKO HASEGAWA

Data da Realização: 06 de dezembro de 2013.

*Todos os ríbeiros vão para o mar e, contudo, o mar não se enche;
para o lugar para onde os ríbeiros vão, para aí tornam eles a ir.*
(Eclesiastes: 1, 7)

AGRADECIMENTOS

À DEUS sobre todas as coisas.

À minha família pelo amor incondicional, pela força, segurança, apoio e por compreenderem minha ausência neste período de aprendizado.

Ao meu amado Paulo, pelo amor, amizade, companheirismo, paciência e compreensão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim, que acreditou e confiou na minha capacidade.

Aos meus amados AMIGOS de Uberaba que os abandonei durante esta jornada.

As minhas queridas amigas e colegas que compartilharam a casa, a convivência, a amizade e o carinho ao longo dos meus 6 anos morando em Botucatu.

Aos meus colegas e amigos do Grupo de Estudos e Pesquisas Georreferenciadas - GEPAG, especialmente a Prof. Dra. Célia Regina Lopes Zimback, Ana Paula Barbosa, Anderson Antônio da Conceição Sartori e Jorgiana Ferreira Dantas, Indiamara Marasca, Juliano Boeck, Paula Odone e muitos outros que me capacitaram para a realização deste trabalho, pelo apoio, amizade, força, carinho e união.

À Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu/UNESP, Campus de Botucatu-SP, por me abrir as portas do conhecimento.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Rural, pela atenção Dedicada, ajuda prestada, pela agradável convivência e amizade.

À Universidade de Castilla La Mancha- Campus Albacete (Espanha), em especial ao Prof. Dr. Manuel Esteban Lucas Borja, pelo estágio de doutorado e todos os conhecimentos adquiridos.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ (Processo nº. 141086/2010-6, Edital: GM/GD-Cotas do Programa de Pós-Graduação) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Processo BEX: 18907/12-1 - Programa Institucional de Bolsas de Doutorado Sanduíche no Exterior - PDSE).

SUMÁRIO

LISTA DE EQUAÇÕES	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
RESUMO	XV
SUMMARY	XVI
CAPÍTULO I CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 ÁREA DE ESTUDOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	4
1.4 OBJETIVO GERAL.....	5
1.4.1 Objetivos Específicos	5
1.5 REFERENCIAS	6
CAPÍTULO II CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS	7
RESUMO.....	7
SUMMARY	8
2.1 INTRODUÇÃO	9
2.1.1 Variáveis Físicas.....	10
2.1.2 Variáveis Relativas à Composição da Rede de Drenagem e Relevo.....	14
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	18
2.2.1 Base de Dados	18
2.2.2 Aplicativo	18
2.2.3 Delimitação da área, perímetro, rede de drenagem e curvas de nível da bacia hidrográfica.....	19

2.2.4 Obtenção dos mapas Modelo Digital de Elevação do Terreno e Declividade da bacia do Ribeirão Lavapés.....	19
2.2.5 Variáveis Fisiográficas	20
2.2.6 Variáveis relativas à composição da rede de drenagem e relevo	20
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
2.3.1 Variáveis Físicas da Bacia do Ribeirão Lavapés.....	23
2.3.2 Variáveis relativas à composição da rede de drenagem e relevo	24
2.4 CONCLUSÃO	26
2.5 REFERENCIAS	26
CAPÍTULO III ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO E DO POTENCIAL NATURAL DE EROÇÃO	29
RESUMO.....	29
SUMMARY.....	30
3.1 INTRODUÇÃO	31
3.1.1 Erosão do Solo.....	32
3.1.2 Equação Universal de Perda de Solo.....	33
3.1.3 Parâmetros da RUSLE.....	34
3.1.4 Potencial Natural de Erosão – PNE.....	41
3.1.5 Sistemas de Informação Geográfica – SIG.....	42
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.2.1 Área de Estudos	43
3.2.2 Base de Dados	44
3.2.3 Sistema de Informação Geográfica.....	45
3.2.4 Métodos	45
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
3.3.2 Fator Erodibilidade do Solo.....	51
3.3.3 Fator Comprimento de Rampa e Declividade	53
3.3.4 Mapeamento Uso e Manejo do Solo e Práticas Conservacionistas - Fator CP..	55

3.3.5 Potencial Natural de Erosão	57
3.3.6 Estimativa de Perda de Solo	58
3.4 CONCLUSÃO	61
3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
CAPÍTULO IV ESTIMATIVA DA VAZÃO DO RIBEIRÃO LAVAPÉS	66
RESUMO.....	66
SUMMARY	67
4.1 INTRODUÇÃO	68
4.1.1 Modelos Hidrológicos	69
4.1.2 Modelo IPH II.....	73
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	78
4.2.1 Área de estudos.....	78
4.2.3 Dados da área de contribuição.....	79
4.2.4 Dados Pluviométricos e de Evaporação	80
4.2.5 Métodos	80
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.4 CONCLUSÃO	85
4.5 REFERENCIAS	86
CAPÍTULO V POTENCIAL ENERGÉTICO APROVEITAVEL DO RIBEIRÃO LAVAPES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	87
RESUMO.....	87
SUMMARY	88
5.1 INTRODUÇÃO	89
5.1.1 Centrais Geradoras Hidrelétricas ou Microcentrais Hidrelétricas (MCH)	90
5.1.2 Componentes de uma Microcentral Hidrelétrica.....	90
5.1.3 Histórico da Microcentral Hidrelétrica Lageado	97

5.2 MATERIAL E MÉTODOS	103
5.2.1 Área de Estudos	103
5.2.2 Métodos	104
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
5.4 CONCLUSÃO	108
5.5 REFERENCIAS	109
CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
CONCLUSÕES GERAIS	112

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação 2.1. Índice de circularidade.....	19
Equação 2.2. Índice de sinuosidade.....	20
Equação 2.3. Coeficiente de compacidade.....	21
Equação 2.4. Coeficiente de forma.....	22
Equação 2.5. Frequência dos cursos d'água.....	23
Equação 2.6. Densidade de drenagem.....	24
Equação 2.7. Declividade média	25
Equação 2.8. Comprimento de rampa médio	26
Equação 2.9. Coeficiente de rugosidade.....	26
Equação 3.1. Equação Universal de Perdas de Solos.....	43
Equação 3.2. Energia cinética da chuva.....	44
Equação 3.3. Índice de erosão.....	44
Equação 3.4. Estimativa do índice de erosividade EI ₃₀ médio mensal.....	45
Equação 3.5. Fator LS Wischmeier e Smith (1978).....	47
Equação 3.6. Fator LS Bertoni (1959).....	47
Equação 3.7. Fator práticas conservacionistas.....	50
Equação 3.8. Potencial natural de erosão.....	51
Equação 3.9. Comprimento de rampa.....	57
Equação 4.1. Evapotranspiração no tempo t.....	83
Equação 4.2. Capacidade de infiltração no tempo.....	83
Equação 4.3. Capacidade de infiltração total no tempo.....	84
Equação 4.4. Equação de continuidade.....	84
Equação 4.5. Capacidade de campo.....	84
Equação 4.6. Capacidade de campo II.....	85
Equação 4.7. Capacidade de campo III.....	85
Equação 4.8. Precipitação efetiva	85

Equação 4.9. Área contribuinte acumulada expressa relativamente à área total..	86
Equação 4.10 Área contribuinte acumulada à área total II	86
Equação 4.11 vazão superficial.....	87
Equação 4.12. Volume superficial.....	87
Equação 4.13. Propagação do escoamento subterrâneo.....	87
Equação 4.14. Tempo de concentração.....	87
Equação 5.1. Potencia hidráulica.....	114
Equação 5.2. Potência útil.....	114
Equação 5.3. Energia firme estimada em MW médios.....	115

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés	11
Figura 1.2. Vista da barragem e tomada de água.....	12
Figura 1.3. Antigo canal aberto e caixa de decantação 1.....	12
Figura 1.4. Caixa de decantação 2, extravasor e comporta da câmara de Carga.....	12
Figura 1.5. Tubulação forçada, casa de máquinas e turbina.	13
Figura 2.1. Usos do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés	31
Figura 2.2. Limite e rede de drenagem da bacia.....	32
Figura 2.3. Classes de declividade da bacia do Ribeirão Lavapés.	34
Figura 3.1. Localização da área urbanizada da Bacia do Ribeirão Lavapés.....	53
Figura 3.2. Mapa de solos e do fator K encontrados na área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés com rede de drenagem.....	61
Figura 3.3. Mapa de classes de declividade da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.....	63
Figura 3.4. Classes do fator LS da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés	64
Figura 3.5. Mapa de uso do solo e fator CP da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.....	65
Figura 3.6. Mapa PNE da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.....	67
Figura 3.7. Espacialização da estimativa de perdas de solo por erosão da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.....	68
Figura 3.8. Detalhamento das áreas com potencial erosivo natural muito forte e perda de solo	70
Figura 4.1. Perdas por evaporação no solo e interceptação	83
Figura 4.2. Continuidade na camada superior do solo	84
Figura 4.3. Funções das equações de balance, infiltração e percolação.....	85
Figura 4.4. Método de Clark	86
Figura 4.5. Localização da área de contribuição da Microcentral Hidrelétrica	

Lageado na Bacia do Ribeirão Lavapés.....	88
Figura 4.6. Estrutura metodológica do Win_IPH2.....	89
Figura 4.7. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2009.....	91
Figura 4.8. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2010.....	92
Figura 4.9. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2011.....	92
Figura 4.10. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2012.....	92
Figura 4.11. Curva de Permanência do período de 01/01/2009 a 31/12/2012..	93
Figura 5.1. Ilustração esquemática das instalações de uma PCH.....	100
Figura 5.2. Esquema de instalação de uma MCH com adução por dutos de baixa pressão e chaminé de equilíbrio	104
Figura 5.3. Croqui da barragem e derivação.....	109
Figura 5.4. Projeto da casa de máquinas da antiga Usina Hidrelétrica.....	109
Figura 5.5. Descrição do consumo de água – Questão de ordem prática.....	110
Figura 5.6. Localização da área de estudos e estruturas que compõem a MCH da Fazenda Experimental Lageado.	112
Figura 5.7 – Ábaco para seleção de turbinas aplicáveis a MCH.....	116

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1. Valores e a interpretação dos resultados quanto ao: fator de forma, índice de circularidade e coeficiente de compacidade da bacia.....	22
Tabela 2.2. Características das unidades de solo principais ocorrentes na bacia do Ribeirão Lavapés – Botucatu/SP.....	22
Tabela 2.3. Valores e a interpretação dos resultados da densidade de drenagem de acordo com os critérios	25
Tabela 2.4 Coeficiente de rugosidade relacionado com as classes de uso da terra.....	27
Tabela 2.5. Intervalos de classes de declive.....	28
Tabela 2.6. Características físicas da bacia do Ribeirão Lavapés.....	30
Tabela 2.7. Usos do solo na bacia do Ribeirão Lavapés	30
Tabela 2.8.Características da drenagem e relevo da bacia do Ribeirão Lavapés.....	33
Tabela 2.9. Classes de declividade com suas respectivas áreas e porcentagem.....	34
Tabela 3.1. Fator C para alguns tipos de solos.....	48
Tabela 3.2. Valores do fator P para algumas práticas conservacionistas.....	49
Tabela 3.3. Valor do fator erodibilidade (K) dos solos do Estado de São Paulo.	56
Tabela 3.4. Fatores CP em função das classes de uso e ocupação do solo.....	58
Tabela 3.5. Classes de Potencial Natural de Erosão	59
Tabela 3.6. Classes indicativas de Perda de solo.....	59
Tabela 3.7. Unidades de solo presentes na área urbanizada na área de estudos e fator erodibilidade do solo.....	60
Tabela 3.8. Classes de declive da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.....	62
Tabela 3.9. Classes de fator LS da área de estudos e respectivas áreas.....	63
Tabela 3.10. Classes de uso do solo e fator CP da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.....	65
Tabela 3.11. Classes de Potencial Natural de Erosão área urbanizada da Bacia do Ribeirão Lavapés e respectivas áreas.....	66
Tabela 3.12. Classes de perda de solo com respectivas áreas, porcentagem e	

classificação.	69
Tabela 4.1. Valores dos parâmetros do modelo IPH II para geração da serie sintética	90
Tabela 4.2. Limites dos Parâmetros que serão utilizados na calibração do Modelo IPH II	91
Tabela 4.3. Valores dos parâmetros obtidos na calibração para os anos de 2009 a 2012.....	93
Tabela 4.4. Valores espacializados da curva de permanência no período de 2009 a 2012.....	94
Tabela 5.1. Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto.....	100
Tabela 5.2. Elementos que caracterizam a MCH da Fazenda Lageado	113
Tabela 5.3. Dados obtidos na determinação do potencial energético do Ribeirão Lavapés.....	117

RESUMO

O objetivo deste trabalho de forma geral foi analisar o potencial energético do Ribeirão Lavapés e a viabilidade técnica para a reativação da Microcentral Hidrelétrica da Fazenda Lageado levando-se em consideração: a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés; estimativa das perdas de solo e o potencial erosivo na bacia de contribuição da Microcentral Hidrelétrica Lageado; estimativa da vazão; e cálculo do potencial energético aproveitável do Ribeirão Lavapés. Para o estudo das características da bacia utilizou-se o sistema de informações geográficas gvSIG onde foram estudados os parâmetros físicos, de drenagem e relevo da bacia. Trata-se de uma bacia rural-urbana, alongada com baixa tendência a inundação com o relevo plano a ondulado e baixo escoamento superficial e boa infiltração. No estudo de perdas de solo utilizou a Equação Universal de Perdas de Solo modificada aplicada ao sistema de informação geográfica gvSIG. O fator erosividade da chuva utilizando o programa netErosividade/SP, a erodibilidade do solo foi determinada por meio do mapa de solos da área, o fator topográfico foi gerado no gvSIG e os fatores uso e manejo praticas conservacionistas foram com a elaboração do mapa de uso do solo da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés. O fato do Ribeirão está próximo de áreas susceptíveis a erosão e a área ser deficitária de boa cobertura vegetal o deixa a vulnerável ao assoreamento e alargamento e ainda pode comprometer a qualidade e quantidade de água diminuindo o potencial hídrico. Para estimar a vazão do Ribeirão Lavapés utilizou o modelo chuva-vazão Win_IPH2 onde foram introduzidos no programa séries de precipitação, evaporação e dados de área da bacia, área impermeável, tempo de concentração e outros. Fez-se a calibração do programa e com isso foram gerados gráficos e dados da vazão calculada e a curva de permanência. Foi possível quantificar a vazão do Ribeirão Lavapés e gerar a Curva de Permanência para do período de janeiro de 2009 a dezembro de 2012 com resultados satisfatórios. Para analisar a viabilidade técnica para reativação da Microcentral hidrelétrica Lageado foram aplicadas equações para se determinar as potencias hidráulica e útil, estimou-se a energia firme e por meio de um ábaco selecionou-se a turbina. A vazão média do Ribeirão Lavapés foi calculada por meio de simulação utilizando-se o Modelo Hidrológico Chuva-Vazão. Utilizou-se a vazão a 35% de permanência ($0,91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). O Ribeirão Lavapés possui potencial tecnicamente viável para geração de energia elétrica.

Palavras-chave: sistemas de informação geográfica; erosão; solos - conservação; curva de permanência; energia elétrica – produção.

PHYSIOGRAPHIC CHARACTERIZATION, HYDROLOGIC AND ENERGY IN THE MICRO - HYDROELECTRIC PLANT CONTRIBUTION WATERSHED OF THE LAGEADO FARM, BOTUCATU-SP. Botucatu, 2013. XXp. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FRANCIENNE GOIS OLIVEIRA

Adviser: ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

SUMMARY

The objective of this study was to analyze in general the energy potential of Stream Lavapés and technical feasibility for reactivating the HPMS Hydro Farm Lageado taking into consideration: the physiographic characteristics of the watershed of Stream Lavapés; estimated soil loss and potential erosion in the watershed contribution HPMS Hydroelectric Lageado; estimated flow, and calculate the usable energy potential of Stream Lavapés. To study the characteristics of the watershed used the geographic information system gvSIG where physical parameters, drainage and topography of the watershed were studied. This is a rural - urban watershed, elongated with low tendency to flood relief plan with the wavy surface runoff and low infiltration and good. In the study of soil loss used the Universal Soil Loss Equation modified applied to geographic information system gvSIG. The erosivity factor of rainfall using NetErosividade / SP program, the erodibility of the soil was determined using the soil map of the area, the topographic factor was generated in gvSIG and factors use and management conservation practices were in the format of map use soil of the urbanized area of Stream Lavapés watershed. The fact of the Brook is close to areas susceptible to erosion and the area is deficient in good vegetation cover leaves you vulnerable to silting and widening and may also compromise the quality and quantity of water decreasing water potential. To estimate the flow of Stream Lavapés used the rainfall-runoff model Win_IPH2 which were introduced in the series of precipitation and evaporation data from the basin area, impervious area, time of concentration and other program. Made to the program and calibration graphs with that data and calculated flow and permanence curve were generated. It was possible to quantify the flow of Stream Lavapés and generate the curve Stay for the period January 2009 to December 2012 with satisfactory results. To analyze the technical feasibility of reactivation of hydroelectric HPMS Lageado equations to determine the hydraulic and

useful powers were applied, estimated the firm and using an abacus selected the turbine energy. The mean flow of Stream Lavapés was calculated by simulation using the Hydrologic Rainfall - Flow Model. We used the flow to 35 % of stay ($0,91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). The Lavapés has technically feasible potential for electricity generation.

Keywords: geographic information systems, erosion, soil - conservation; flow-duration curve; electricity - producing

CAPÍTULO I “CONSIDERAÇÕES GERAIS”

1.1 INTRODUÇÃO

Partindo se do princípio que a bacia hidrográfica é definida como unidade de gerenciamento pela Política Nacional dos Recursos Hídricos, seu estudo tem fundamental importância no âmbito ambiental, econômico e social. Mendes e Cirilo (2001) ressaltaram que as associações entre as características hidrológicas e as propriedades físicas de uma bacia hidrográfica que são necessárias ao contexto de aplicabilidade de modelos hidrológicos estão potencialmente inseridas no âmbito da elaboração e execução de projetos em casos como construção de usinas hidroelétricas, barragens regularizadoras de vazão para contenção de enchentes, como também armazenamento de água para fins de uso consultivo.

Os processos erosivos ocorrem, em geral, pelo manejo inadequado do solo, em especial quando ocorre à retirada da cobertura original da vegetação que representa uma barreira a alta velocidade das gotas da chuva que incidem sobre o solo, portanto a ausência de vegetação constitui a primeira ação a desencadear a erosão, o processo é intensificado quando o relevo apresenta-se íngreme e a região ocorre sobre solos de alta erodibilidade, como os solos arenosos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

Esses processos erosivos tem sido objeto de preocupação pelo setor hidrelétrico, com visto nos trabalhos de Silva (2009), Carneiro (2007) e Cabral et al. (2005), entre diversos outros disponíveis na literatura. A deposição de sedimentos nos reservatórios, produzidos por processos erosivos a montante da bacia, diminui a capacidade de armazenamento d'água, aumento o custo de manutenção do empreendimento e comprometendo a geração de energia elétrica.

Para prospecção do potencial hidroenergético é necessário realizar uma série de investigações sobre as propriedades hidrológicas e também com relação aos aspectos fisiográficos das bacias. Além disso, deve-se acrescentar informações nos âmbitos geológico-geotécnico, socioeconômico e ambiental. Etapa crucial dessas investigações, responsável por parte significativa dos custos de investimento.

Os altos custos de estudos como perda de solos e quantificação de vazão, levam a busca cada vez mais rápida e precisa da identificação desses problemas na fase de prospecção em escritório, demandando agilidade no levantamento de informações capazes

de reconhecer a heterogeneidade do meio, atividade que tem sido facilitada pelo avanço da informatização que acompanha a necessidade de aquisição de dados em alta precisão. Isto se verifica nas tentativas de construção de modelos digitais de elevação do terreno cada vez mais preciso e de fácil obtenção.

1.2 ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos, bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés localiza-se entre os paralelos $22^{\circ} 44' 16''$ e $22^{\circ} 55' 13''$ de latitude sul e os meridianos de $48^{\circ} 21' 50''$ e $48^{\circ} 31' 05''$ a oeste de Greenwich, com altitudes variando entre 455 e 925 metros (Figura 1.1). Possui extensão de 10.704 ha, a principal nascente deste curso d'água está localizada na zona urbana do município de Botucatu, e recebe vários afluentes até a foz da bacia no ponto de encontro de suas águas com a Represa de Barra Bonita, Rio Tietê percorrendo um longo trecho de 40 km e por sua vez integrando a bacia hidrográfica do Rio Paraná.

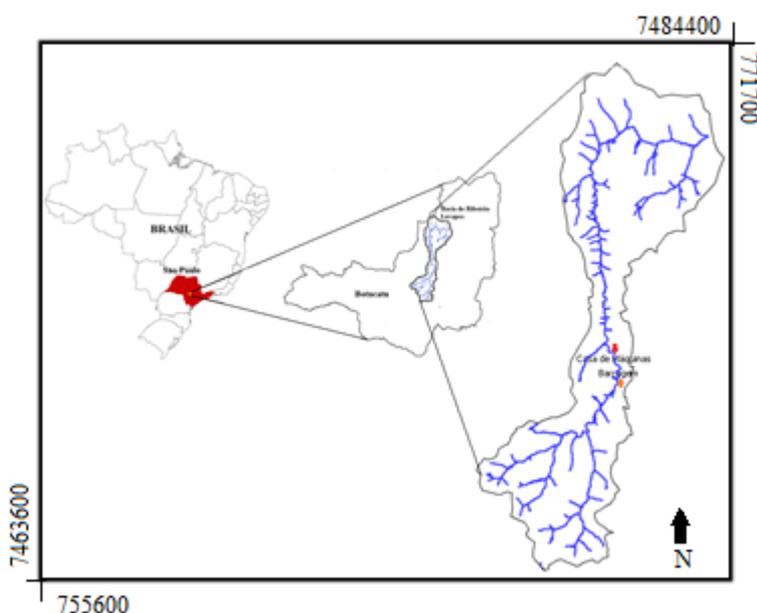


Figura 1.1. Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés.

Inserida na bacia, a Fazenda Lageado que pertence a Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu/UNESP, é banhada pelo Ribeirão Lavapés onde se encontra uma Microcentral Hidrelétrica (MCH) construída em 1935 e que foi desativada segundo relatos históricos em meados de 1980.

À primeira vista muitas das obras civis da MCH foram encontradas em bom estado de conservação, com sua estrutura razoavelmente bem preservada. Isto não ocorre, entretanto, com as estruturas de acionamento mecânico, tais como comportas e grades, que estão bastante avariadas ou mesmo inexistentes. Nas Figuras 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5 pode-se visualizar as estruturas da MCH.



Figura 1.2. Vista da barragem e tomada de água.



Figura 1.3. Antigo canal aberto e caixa de decantação 1.



Figura 1.4. Caixa de decantação 2, extravasor e comporta da câmara de Carga



Figura 1.5. Tubulação forçada, casa de máquinas e turbina.

O clima da região é definido enquadrado como clima mesotérmico, identificado como Cwa (clima subtropical de inverso seco e verão quente), segundo Köppen, com temperaturas médias anuais em torno de 20 ° C e precipitação entre 1.100 e 1.700 mm por ano (Jim & Carvalho, 1983), níveis superiores a 1800 mm de precipitação anuais que ocorrem um mês mais húmido e seco, respectivamente, 223,4 milímetros e 37,8 mm.

A vegetação é definida como cerrado e floresta estacional semidecidual, ecossistema pertencente ao bioma Mata Atlântica, caracterizada por clima sazonal duplo, com verões quentes e invernos úmidos seguidos de seca e frio (EMBRAPA, 2006).

De acordo com Piroli (2002) e atualizados segundo normas da Embrapa (2006), a área é composta pelos solos: Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd), Neossolo Lítico Distrófico (RL), Gleissolo Distrófico (GXbd), Neossolo Flúvico Distrófico (RU) e Neossolo Quartzarênico (RQ). E na área da Fazenda Lageado, segundo Carvalho, et al (1983) ainda são encontrados os solos classificados como: Neossolo Litólico Eutrófico (RLe), Nitossolo vermelho distrófico (NVd) e Nitossolos Vermelhos Distroférrico (NVdf).

A porção da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés localizada no Planalto de Botucatu/Itatinga apresenta solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico e Distroférrico, profundo, bem drenado, de coloração vermelho-amarelo e vermelho escuro, formado a partir de arenitos e basaltos (CARVALHO, et al, 1983).

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em cinco capítulos. O capítulo I trata das considerações gerais do trabalho, descrevendo a área de estudos e os objetivos. No capítulo II, Caracterização Fisiográfica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavapés, apresentam-se as

características físicas da bacia hidrográfica que determinam seu comportamento, ou seja, a maior ou menor possibilidade de ocorrência de danos ambientais.

O capítulo III descreve sobre a Estimativa de perdas de solo e do potencial natural de erosão da área urbanizada da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo modificada – RUSLE/MUSLE aplicada ao sistema de informação geográfica livre gvSIG.

O capítulo IV estima a vazão do Ribeirão Lavapés, uma vez que não existe monitoramento fluviométrico o que dificulta estudos de aproveitamento hídrico mas para tanto, trabalhou-se o modelo hidrológico do tipo chuva-vazão.

O capítulo V, avalia o potencial energético aproveitável do Ribeirão Lavapés uma vez que se pretende analisar a viabilidade técnica de reativação da Microcentral Hidrelétrica localizada na Fazenda Lageado. E por final apresentação das considerações finais como fechamento geral da tese.

1.4 OBJETIVO GERAL

O estudo objetivou analisar o potencial energético do Ribeirão Lavapés e a viabilidade técnica para a reativação da Microcentral Hidrelétrica da Fazenda Lageado.

1.4.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés;
- estimar as perdas de solo e o potencial erosivo na bacia de contribuição da Microcentral Hidrelétrica Lageado inserida na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés e identificar as áreas críticas quanto à erosão potencial;
- estimar a vazão do Ribeirão Lavapés uma vez que a área não possui registros fluviométricos; e
- calcular o potencial energético aproveitável do Ribeirão Lavapés.

1.5 REFERENCIAS

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.
- CABRAL, J.B.P.; BECEGATO, V.A.; SCOPEL, I. ; LOPES, R.M. **Uso de técnicas de geoprocessamento para mapear o potencial natural de erosão da chuva na bacia hidrográfica do reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG**. RA'EGA, n.10. 2005.
- CARNEIRO, G.T. **Suscetibilidade à erosão laminar na área do reservatório da usina hidrelétrica de Cana Brava - Minaçu – Goiás: impactos ambientais e saúde**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Saúde) – Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2007.
- CARVALHO, W.A.; ESPÍNDOLA C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado**. Boletim Científico, 1. Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. 1983. 94p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2006. 397p.
- JIM, J., CARVALHO, W.A. **Áreas de proteção ambiental: Região da “Serra de Botucatu” e Região da “Serra de Fartura”**. Botucatu: Instituto Básico de Biologia, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1983. 47p.
- MENDES, C. A.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- PIROLI, E. L. **Geoprocessamento na determinação da capacidade e avaliação do uso da terra do município de Botucatu–SP**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas. 2002. 108 p.
- SILVA, E.C.S. **Estudo Regional para a Avaliação da Erosão Laminar Potencial na Bacia Hidrográfica do Reservatório Corumbá IV**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2009.

CAPÍTULO II “CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS”

RESUMO

Bacia hidrográfica consiste em uma unidade geográfica territorial definida topograficamente, delimitada pelos divisores de águas, drenada por um curso d'água ou por um sistema conectado de cursos d'água, tal que toda vazão efluente seja descarregada no canal principal. Atualmente esta unidade fisiográfica está sendo considerada como unidade territorial ideal para gestão ambiental e ordenamento territorial. Uma das formas de avaliação ambiental de uma bacia hidrográfica é o estudo das características fisiográficas bem como de seu uso e ocupação. Este estudo teve por objetivo caracterizar fisiograficamente a bacia do Ribeirão Lavapés de forma digital utilizando-se o sistema de informações geográficas livre gvSIG. Foram estudados os parâmetros físicos, de drenagem e relevo da bacia. Trata-se de uma bacia rural-urbana, com rede de drenagem de 4ª ordem que apresentou os valores de 0,262 para o índice de circularidade, 0,185 para fator forma, 1,973 para coeficiente de compacidade e 1,176 para o índice de sinuosidade. Portanto, se enquadrando numa bacia alongada com baixa tendência a inundação. A declividade média é de 9,93% e 87,4% da área total da bacia tem o relevo classificado de plano a ondulado. E possui baixo escoamento superficial e maior infiltração por sua densidade de drenagem ser menor que 1,5. Contudo, uso da ferramenta de geoprocessamento gvSIG supriu bem as expectativas constituindo importante base para subsidiar análises e estudos hidrológicos e caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas, podendo ser utilizadas como subsídio para tomadas de decisão coerentes e apropriadas no contexto ambiental dos recursos naturais, considerando a bacia como unidade de gestão sustentável.

Palavras-chave: sistema de informações geográficas, rede de drenagem, inundação.

PHYSIOGRAPHIC CHARACTERIZING IN LAVAPÉS STREAM WATERSHED

SUMMARY

Watershed consists of a geographical territorial topographically defined, delimited by the watershed, drained by a watercourse or a connected system of watercourses, such that all flow effluent is discharged through a single outlet. Currently this physiographic unit is being considered as a territorial unit ideal for environmental management and spatial planning. One form of environmental assessment of a watershed is the study of the physiographic characteristics as well as their use and occupancy. This study aimed to physiographically characterize of the stream Lavapés watershed digitally using the geographic information system free gvSIG. We studied the physical parameters, drainage and topography of the basin. It is a bowl rural urban drainage network with 4th order presented the 0,262 values for the index of roundness, form factor to 0,185, 1,973 to 1,176 and compactness coefficient for sinuosity index. Therefore, if a framing oblong basin with low tendency to flood. The average slope is 9,93% and 87,4% of the total catchment area has ranked relief plan to wavy. And has low runoff and increased infiltration by a drainage density is less than 1,5. However, use of geoprocessing tool gvSIG supplied to the expectations and is an important base to support analysis and hydrological studies and characterization physiographic watershed and can be used as a basis for decision making consistent and appropriate in the context of environmental resources, considering the basin as sustainable management unit.

Keywords: geographic information system, drainage system, flood.

2.1 INTRODUÇÃO

Bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação, limitada por divisores topográficos que fazem convergir o escoamento para um único ponto de saída, composta, segundo Tucci (2012) por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório ou foz.

A bacia hidrográfica vem sendo adotada como unidade de planejamento e gestão ambiental em muitos países. No Brasil ganhou força graças à regulamentação da Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei nº 9433, de 1997), que a define como unidade de gerenciamento e estipula ainda atuação descentralizada e participativa no processo de gestão, com a criação de comitês e agências de bacias, em conjunto com a participação de organizações civis no planejamento ambiental e na elaboração de planos diretores para as bacias hidrográficas (BRASIL, 1997).

Vários aspectos fisiográficos da bacia, tais como área, perímetro, forma, densidade de drenagem, declividade do rio, tempo de concentração, cobertura vegetal, uso, ocupação e relevo, auxiliam na interpretação dos resultados dos estudos hidrológicos e permitem estabelecer relações e comparações com outras bacias conhecidas. Esses aspectos têm influência direta no comportamento hidrológico da bacia em estudo e, conseqüentemente, no regime fluvial e sedimentológico do curso d'água principal (SILVA et al., 2007).

O estudo das características fisiográficas de uma bacia demanda tempo e cuidado para se extraía corretamente os dados desejados. Para facilitar estes estudos podemos contar com os sistemas de informações geográficas (SIG's) que se constituem em um conjunto de ferramentas que permitem combinações e sínteses sobre os dados ambientais disponíveis, sendo importante instrumento para análises ambientais. A eficiência dos SIG depende da definição precisa do objetivo e dos passos metodológicos a serem desenvolvidos no ambiente e no sistema, além da forma de integração dos diferentes dados sobre a área em questão (PRADO et al., 2010).

Diante da importância do estudo de bacias hidrográficas, este trabalho teve por objetivo caracterizar fisiograficamente a bacia do Ribeirão Lavapés de forma digital utilizando-se um Sistema de Informações Geográficas.

2.1.1 Variáveis Físicas

No estudo das variáveis físicas de uma bacia hidrográfica os principais parâmetros são:

2.1.1.2 Área e Perímetro da Bacia

A área de uma bacia é conceituada como toda a área drenada pelo conjunto fluvial, projetada em um plano horizontal (Christofolletti, 1980) e é classificada como parâmetro básico para cálculo de outras variáveis morfométricas, é delimitada a partir dos divisores de água da bacia, é expressa geralmente em km².

De acordo com Tonello et al. (2005), a área de drenagem de uma bacia hidrográfica tem influência sobre o volume produzido com o deflúvio superficial. A forma e o relevo, no entanto, atuam sobre a taxa ou sobre o regime dessa produção de água, assim como a taxa de sedimentação. O caráter e a extensão dos canais (padrão de drenagem) afetam a disponibilidade de sedimentos, bem como a taxa de formação do deflúvio.

2.1.1.2 Índice de Circularidade – Ic

O índice de circularidade, também denominado por alguns autores como Índice de Forma, representa a relação existente entre o perímetro e a área da bacia. Esse parâmetro influencia a determinação do débito (vazão) e a intensidade de escoamento (CHRISTOFOLETTI, 1970).

O índice apresentado por Miller, 1953, citado por Rocha e Kurtz, (2001), é uma variável que quanto maior for o valor de IC, mais próxima estará a mesma da forma circular, sendo maior o perigo de enchente (maior concentração de água no tributário principal). Para se calcular o IC, utilizou-se a Equação 2.1.

$$Ic = \frac{12,57 \times A}{P^2} \quad (2.1)$$

Onde:

Ic – índice de circularidade;

A - área de drenagem [m²];

P - perímetro [m].

Segundo Alves e Castro (2003), valores do índice de circularidade IC acima de 0,51 revela que a bacia tem tendência circular favorecendo os processos inundação. Porém, se o valor IC for igual a 0,51, nos mostra que o escoamento é moderado havendo pequena probabilidade de cheias. Contudo, os mesmos autores nos mostram que para valores de IC menores que 0,51, a bacia é mais alongada favorecendo desta forma a infiltração, aumento o tempo de concentração da bacia.

2.1.1.3 Índice de Sinuosidade do Curso d'água – Is

A sinuosidade do curso d'água é a relação do comprimento do rio principal e o comprimento de um talvegue, que seria o seu comprimento reto medido a partir do fundo do seu leito. É um fator controlador da velocidade de fluxo, pois quanto maior a sinuosidade, maior a dificuldade encontrada pelo canal no seu caminho à foz, portanto menor a velocidade.

Segundo Vilela e Mattos (1975) o índice de sinuosidade descreve o grau de tortuosidade dos cursos d'água, sendo um fator controlador da velocidade de escoamento das águas.

Para Alves e Castro (2003) valores de Is iguais a 1 (um), revelam que o canal de drenagem tende a ser retilíneo. Contudo, caso Is seja superior a 2, canais tortuosos; sendo que valores intermediários indicam formas transicionais. A sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos, pela compartimentação litológica, estruturação geológica e pelo declive dos canais. A Equação 2.2 mostra como este índice é calculado.

$$Is = \frac{C_p}{C_t} \quad (2.2)$$

Onde:

Is – índice de sinuosidade;

Cp- comprimento principal [m];

Ct - comprimento do talvegue [m].

2.1.1.4 Índice de Gravelius ou Coeficiente de Compacidade – Kc

O coeficiente de compacidade relaciona o perímetro da bacia e a circunferência do círculo, cuja área é igual à da bacia de drenagem. De acordo com Villela e Mattos (1975), esse coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente de seu tamanho. Quanto mais irregular for à bacia, maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo igual à unidade corresponderia a uma bacia circular, possuindo alta propensão a enchentes e, para uma bacia alongada seu valor é significativamente superior à unidade, indicando menor propensão a enchentes, sendo que valores superiores a 1,47 caracterizam bacias não sujeitas a enchente. Uma bacia será mais suscetível a enchentes mais acentuadas quando seu Kc for mais próximo de 1,0 (um) com formato redondo. Para o cálculo deste coeficiente utiliza-se a Equação 2.3.

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.3)$$

Onde:

Kc – coeficiente de compacidade;

P – perímetro [km];

A – área da bacia [km²].

2.1.1.5 Fator de Forma – Kf

O Kf indica maior ou menor tendência a enchentes, pois em uma bacia com fator de forma baixo há uma possibilidade menor, de uma chuva intensa cobrir toda a sua extensão, do que em uma bacia com mesma área e fator de forma maior. Isso se deve ao fato de que numa bacia estreita e longa, com fator de forma baixo, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão. Na análise de bacias hidrográficas, valores de Kf inferiores a 0,439 indicam a não sujeição a enchentes (VILLELA e MATTOS, 1975).

Segundo Silva e Melo (2006), a bacia hidrográfica com valor de Kf menor que 0,5 tende a não ter enchentes, e valor menor de 0,75 indica alta tendência a enchentes. Costa (2005) afirmou que maiores valores de kf, determinam maiores vazões de enchentes, sendo tais bacias mais sujeitas aos fenômenos erosivos.

Obtém-se o fator forma pela Equação 2.4 proposta por (HORTON, 1945).

$$Kf = \frac{A}{C^2} \quad (2.4)$$

Onde:

Kf – coeficiente de forma;

A- área de drenagem [km²];

C - comprimento da bacia [km].

Para os parâmetros de forma, circularidade e compacidade os resultados encontrados podem ser interpretados de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Valores e a interpretação dos resultados quanto ao: fator de forma (Kf), índice de circularidade (Ic) e, coeficiente de compacidade (Kc) da bacia.

Kf	Ic	Kc	Formato	Interpretação ambiental da bacia
1,0- 0,75	1,0- 0,80	1,0- 1,25	Redonda	Alta tendência a enchentes
0,75- 0,50	0,80-0,60	1,25- 1,50	Mediana	Media tendência a enchentes
0,50 – 0,30	0,60 - 0,40	1,50 - 1,70	Oblonga	Baixa tendência a enchentes
< 0,30	< 0,40	> 1,70	Comprida	Tendência a conservação

Fonte: Villela e Matos (1975) adaptado por Rodrigues et al (2013).

As características das unidades de solo também contribuem para a interpretação das variáveis físicas de uma bacia hidrográfica (Tabela 2.2).

Tabela 2.2. Características das unidades de solo principais ocorrentes na bacia do Ribeirão Lavapés – Botucatu/SP.

Tipo de Solo	Profundidade	Retenção de água	Fertilidade
PVAd	Media a alta	Média a alta	Alta a baixa
GXbd	Media a alta	Alta	Alta a baixa
LVA	Muito profundo	Média a baixa	Baixa a muito baixa
LV	Muito profundo	Média	Baixa
RL	Baixa	Baixa	Alta
RU	Media a alta	Media a alta	Média a alta
RQotípico	Muito profundo	Baixa a média	Baixa a muito baixa
NVd	Muito profundo	Media a alta	Alta

Fonte: Oliveira, et al (1999), IBGE (2007) e Embrapa (2006).

2.1.2 Variáveis Relativas à Composição da Rede de Drenagem e Relevo

2.1.2.1 Ordem e Frequência dos Cursos d'água

Segundo Strahler (1957), os canais sem tributários são designados de primeira ordem. Os canais de segunda ordem são os que se originam da confluência de dois canais de primeira ordem, podendo ter afluentes também de primeira ordem. Os canais de terceira ordem originam-se da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens, e assim sucessivamente.

Em uma bacia, cada segmento de determinada ordem é responsável pela drenagem de uma área. No caso de bacias de segunda, terceira e quarta ordem, e assim sucessivamente, a área drenada por elas abrange também a área de todos os segmentos de ordem menores que lhe são subsidiárias. Dessa forma, cada segmento de ordem superior drena uma área cada vez maior à medida que aumenta a ordem dos canais. Assim sendo, identificando-se as quantidades de bacias para cada ordem, pode-se calcular a área média das bacias de determinada ordem (CHRISTOFOLETTI,1980).

A frequência dos canais de acordo com Strahler (1957) é definida como a relação entre o número de canais e sua área correspondente e pode ser determinado por meio da Equação 2.5.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad (2.5)$$

Onde:

F – frequência dos cursos d'água;

N_i - número de canais da bacia;

A - área da bacia [km²].

2.1.2.2 Densidade de Drenagem – Dd

Christofoletti (1980) definiu a densidade de drenagem como sendo a razão entre o comprimento total do sistema de drenagem com a área da bacia hidrográfica. O sistema de drenagem é formado pelo rio principal e seus tributários. Seu estudo indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, indicando o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia.

A densidade de drenagem varia inversamente com a extensão do escoamento superficial (Vilella e Mattos, 1975), pois uma baixa densidade de drenagem significa uma maior superfície de contribuição, fazendo com que o deflúvio demore mais para atingir os rios (GARCEZ, 1974).

Segundo Vilella e Mattos (1975), o índice da Dd varia de 0,5 km.km⁻², para bacias com baixa drenagem, a 3,5 ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas.

Para Alves e Castro (2003) a variável Dd se relaciona diretamente com os processos climáticos atuantes na área estudada, os quais influenciam o fornecimento e transporte de material detrítico.

Segundo Horton (1945), as bacias de menor tamanho e de grau hierárquico de ordem menor, apresentam valores de Dd mais elevados. Isto ocorre, pois os segmentos de ordens inferiores localizam-se nos regiões mais elevadas dos cursos d'água, onde a declividade é mais acentuada (CHRISTOFOLETTI, 1980). Nesse caso, conforme aumenta a área da bacia e a ordem da rede de drenagem, incorporam-se áreas topograficamente mais suaves dando, origem a espaços com densidades de drenagem baixa. Fatores como o clima, topografia e vegetação podem influenciar na densidade de drenagem de uma bacia. A densidade de drenagem pode ser calculada de acordo com a Equação 2.6 tendo o resultado expresso em [km.km⁻²].

$$Dd = \frac{\sum Cc}{A} \quad (2.6)$$

Onde:

Dd – densidade de drenagem [km.km⁻²];

Cc – comprimento dos canais da bacia [km];

A – área da bacia [km²].

O resultado encontrado para o parâmetro densidade de drenagem pode ser interpretado de acordo com a Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Valores e a interpretação dos resultados da densidade de drenagem de acordo com os critérios

Dd	Tipo	Interpretação ambiental da bacia
< 1,5	Baixa	Baixo escoamento superficial e maior infiltração
1,50 – 2,5	Media	Tendência mediana de escoamento superficial.
2,5 – 3,0	Alta	Alta tendência ao escoamento e enxurradas.
> 3,0	Muito alta	Alta tendência ao escoamento superficial, enxurradas e erosão.

Fonte: de Horton (1945), Strahler (1957), França (1968) e Rodrigues, et al (2013).

2.1.2.3 Declividade Média – Dm

A magnitude dos picos de enchente e infiltração de água, trazendo, como consequência, maior ou menor grau de erosão, dependem da declividade média da bacia (que determina maior ou menor velocidade de escoamento da água superficial), associada à cobertura vegetal, tipo de solo e tipo de uso da terra (ROCHA e KURTZ, 2001).

A declividade dos terrenos de uma bacia controla em boa parte a velocidade com que se dá o escoamento superficial, afetando portanto o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem das bacias (VILELLA e MATOS, 1975). A declividade média da bacia pode ser calculada pela Equação 2.7.

$$H = \frac{\sum LCN \cdot \Delta h}{A} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Onde:

H - declividade média [%];

$\sum LCN$ - somatório dos comprimentos de todas as curvas de nível da bacia [m];

A - área da bacia [m²];

Δh - equidistância das curvas de nível [m].

2.1.2.4 Comprimento de Rampa Médio – Cr

O comprimento de rampa influi diretamente na perda de solo, pois rampas muito extensas podem gerar escoamentos superficiais com grandes velocidades. Este índice é definido como sendo a distância média em que a água da chuva teria que escoar sobre os terrenos de uma bacia, caso o escoamento se desse em linha reta desde onde a

chuva caiu até o ponto mais próximo no leito de um curso d água de uma bacia (VILELLA e MATOS, 1975). Calcula-se o comprimento de rampa a partir do método do retângulo equivalente, usado para estimar o índice de extensão média do escoamento sobre os solos apresentada pela Equação 2.8.

$$Cr = \frac{1}{4.Dd} \quad (2.8)$$

Onde:

Cr – comprimento de rampa médio [km];

Dd - densidade de drenagem [km.km⁻²]

2.1.2.5 Coeficiente de Rugosidade – Rn

O Coeficiente de Rugosidade (Ruggdeness Number – Rn) segundo Rocha e Kurtz (2001), determinado pelo produto entre a densidade de drenagem e a declividade média, é um parâmetro que direciona o uso potencial das terras rurais em bacias hidrográficas, determinando áreas de conflito, quanto às suas características, para atividades de agricultura, pecuária, silvicultura, reflorestamento ou para preservação permanente. Desta forma, quanto maior for o valor do Rn na bacia, maior o perigo de erosão, estabelecendo quatro classes de coeficientes, segundo Tabela 1. O coeficiente de rugosidade é calculado de acordo com Rocha (1997) pela Equação 2.9.

$$Rn = Dd \times Dm\% \quad (2.9)$$

Onde:

Rn - coeficiente de rugosidade;

Dd - densidade de drenagem [km.km⁻²];

Dm - declividade média [%].

Quanto maior for o coeficiente de rugosidade, maiores são os riscos de erosão. Na interpretação do coeficiente de rugosidade considerou-se a classificação apresentada por Rocha, 1997 adaptada por Pissara et al. (2004). Onde os coeficientes de rugosidade estão distribuídos em quatro classes: A, B, C, D, com terras propícias respectivamente para: agricultura; pastagens; pastagens/reflorestamento; e somente reflorestamento (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 Coeficiente de rugosidade relacionado com as classes de uso da terra.

Coeficiente de Rugosidade	Classes	Usos da terra
< 23	A	Agricultura
23 – 43	B	Pastagem/pecuária
44 – 63	C	Pasto/reflorestamento
> 63	D	Reflorestamento

Fonte: Rocha (1997) adaptado por Pissara, et al (2004).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Base de Dados

Os pontos de apoio planialtimétricos e de controle no processo de georreferenciamento da fotografia aérea digital, bem como as curvas de nível digitalizadas das cartas planialtimétricas do IBGE da área de estudos, foram obtidos no banco de dados do Grupo de Estudo e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas – GEPAG da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu.

2.2.2 Aplicativo

Para a criação do banco de dados de imagens, caracterização fisiográfica e processamentos de imagens de satélite foi utilizada a ferramenta do software gvSIG. O gvSIG foi desenvolvido pela Generalitat Valenciana do governo da Espanha e está em constante desenvolvimento, uma vez que é um sistema de código aberto e, portanto, pode ser alterado conforme a necessidade do usuário, fato decisivo para a escolha do software.

De acordo com Generalitat Valenciana (2013), o SIG denominado gvSIG é uma ferramenta para o processamento de informações geográficas que se caracteriza por uma interface simples, com capacidade de atender os formatos mais usuais de entrada e saídas de dados geográficos.

2.2.3 Delimitação da área, perímetro, rede de drenagem e curvas de nível da bacia hidrográfica

Os dados de área, perímetro, rede de drenagem e curvas de nível foram obtidos no banco de dados do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. Foram extraídos da carta planialtimétrica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Carta do Brasil – Escala 1:50.000, folha SF-22-R-IV-3 do município de Botucatu/SP, digitalizados e convertidos para o formato shapefile (shp) (formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas).

No gvSIG estas informações foram extraídas em: menu Camada → Agregar informações geométricas.

2.2.4 Obtenção dos mapas Modelo Digital de Elevação do Terreno e Declividade da bacia do Ribeirão Lavapés

Para a geração de MDE utilizou-se as curvas de nível no formato shp, e com a ferramenta do gvSIG: menu SEXTANTE → Rasterização e interpolação → Rasterizar, e gerou-se a valores altimétricos de uma superfície contínua, obtendo dessa forma o modelo digital de elevação do terreno.

Após a elaboração do MDE foi criado o mapa de declividade, acessando menu SEXTANTE → Geomorfologia e análise do terreno → Declividade (unidade: %), gerando-se o mapa de declive. Os intervalos de porcentagem foram ajustados de acordo Lepsch et al. (1991), para estudos de conservação de solo, descrito na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Intervalos de classes de declive.

Intervalo %	Relevo	Cor características
0 – 3	Plano	Verde claro
3 – 6	Suave ondulado	Amarelo
6 – 12	Ondulado	Vermelho
12 – 20	Forte ondulado	Azul
20 – 40	Montanhoso	Verde escuro
> 40	Escarpado	Roxo

Fonte: Lepsch et al. (1991).

2.2.5 Variáveis Fisiográficas

Índice de Circularidade: foi medido com o emprego do gvSIG tendo em mãos a área e perímetro já determinados executando-se em menu SEXTANTE → calculadora de campos → aplicação da Equação 2.1.

Índice de Sinuosidade do Curso d' água: como comprimento do rio principal já medido mediu-se e o comprimento do talvegue em linha reta a partir do fundo do seu leito, utilizando-se como base uma imagem do satélite Spot do município de Botucatu obtida junto ao GEPAG. E com o gvSIG menu SEXTANTE → calculadora de campos → efetuou-se a Equação 2.2.

Coefficiente de Compacidade: para a efetivação do cálculo do K_c , partindo dos valores calculados das respectivas áreas e perímetros utilizou-se a Equação 2.3 efetuando a no gvSIG → Calculadora de campos.

Fator de Forma: para o cálculo do coeficiente K_f , partindo do valor calculado da área e comprimento da bacia, aplicou-se a Equação 2.4 no gvSIG menu SEXTANTE → Calculadora de campos.

2.2.6 Variáveis relativas à composição da rede de drenagem e relevo

Ordem e Frequência dos Cursos d' água: a ordem dos cursos foi classificada de acordo com a metodologia de Strahler (1957) e para se determinar a frequência utilizou-se a Equação 2.5.

Densidade de Drenagem: determinou-se a D_d a partir dos dados de comprimentos dos cursos d' água e área da bacia previamente mensurados e no gvSIG menu SEXTANTE → Calculadora de campos efetuou-se a Equação 2.6.

Declividade Média: para obtenção da declividade média utilizou-se o mapa de declividade onde no gvSIG menu SEXTANTE → Ferramentas básicas para camada raster → Estatística básica.

Comprimento Médio de Rampa: para esta variável utilizou-se o valor da D_d pré-determinado e aplicou-se a Equação 2.8, na Calculadora de campos do gvSIG.

Coefficiente de Rugosidade: de posse dos valores de D_m e D_d aplicou-se na Equação 2.9.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés é uma bacia rural-urbana onde 39,55% da área total compreende a área urbana e a maior parte da área está distribuída entre culturas anuais e perenes, pastagens, matas nativas, reflorestamento e outros usos (63,65 km²) que podem ser observados na Figura 2.1.

Na Figura 2.2 pode se observar o limite da bacia e sua rede de drenagem. Na Tabela 2.6 são apresentados alguns parâmetros da bacia características da bacia e Tabela 2.7 a quantificação dos usos do solo na bacia.

Tabela 2.6. Características físicas da bacia do Ribeirão Lavapés.

Características	Unidade	Resultados
Parâmetros dimensionais		
Área	km ²	107,04
Perímetro	km	71,67
Comprimento da bacia	km	24,5
Comprimento da drenagem	km	118,08
Comprimento do canal principal	km	33,08
Comprimento do talvegue	km	28,12

Tabela 2.7. Usos do solo na bacia do Ribeirão Lavapés

Uso do solo	Área km²	%
Área urbana	43,398	39,55
Culturas anuais	35,007	32,62
Mata nativa	11,460	10,74
Pastagem	10,501	9,7
Várzea	2,368	2,57
Citrus	2,199	1,97
Reflorestamento	2,106	1,95
Quintais	0,34	0,31
Corpos d'água	0,26	0,23
Edificações	0,213	0,19
Café	0,134	0,12
Erosão	0,05	0,04
Total	107,040	100

Fonte: GEPAG, 2012.

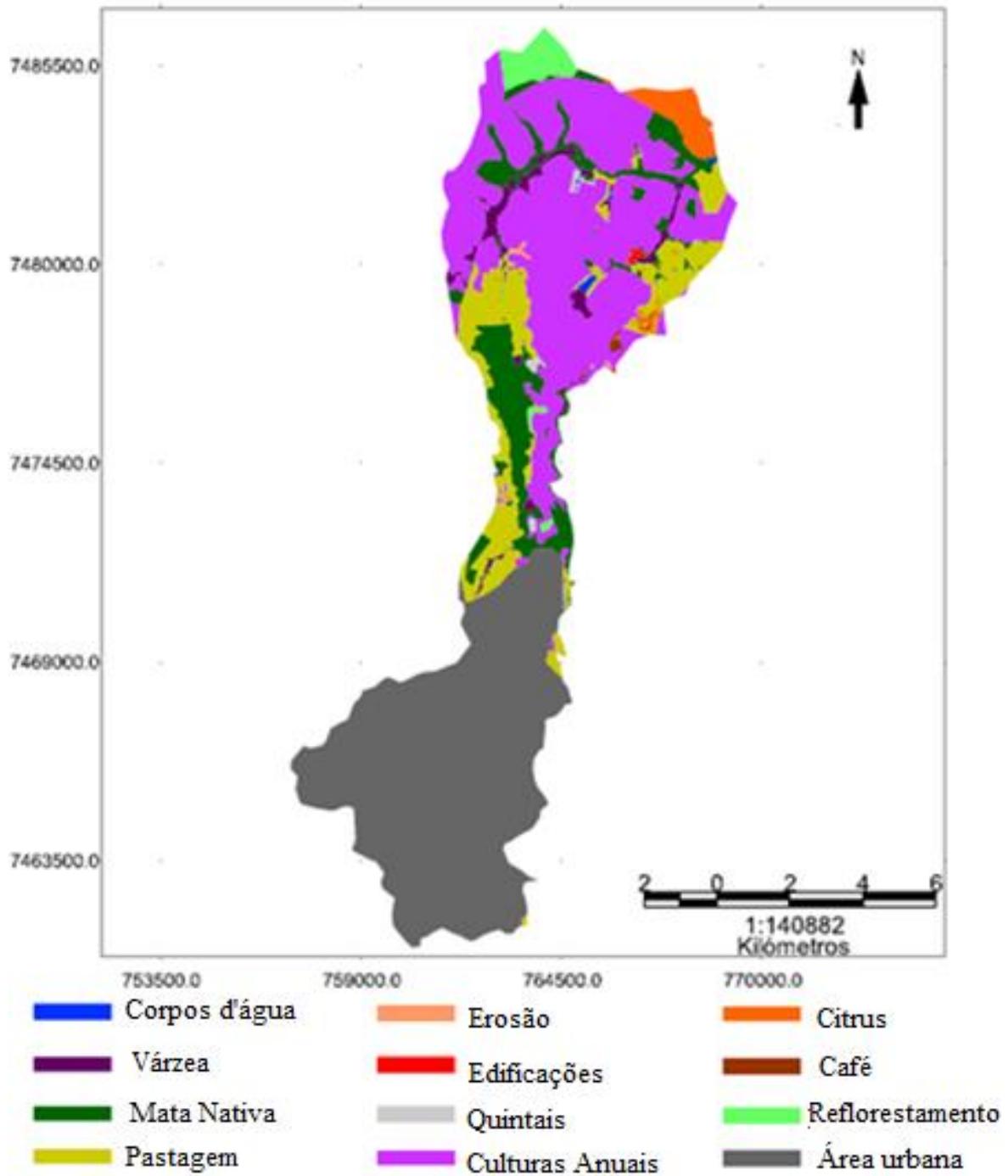


Figura 2.1. Usos do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés (GEPAG, 2012).

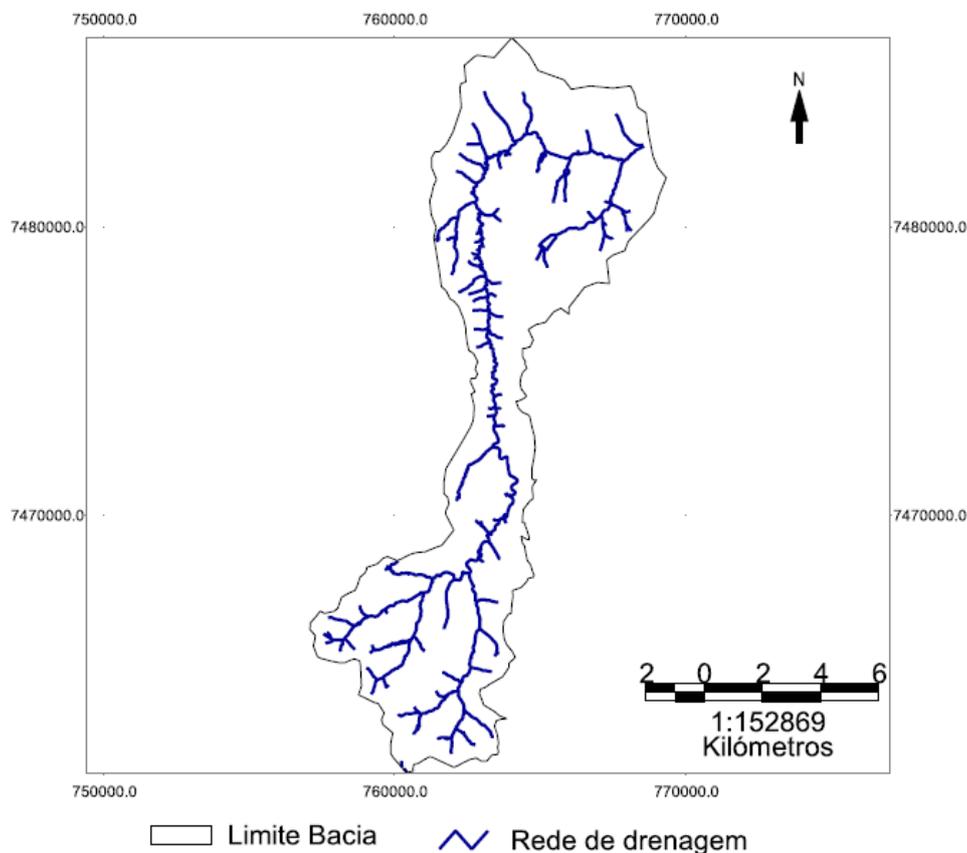


Figura 2.2. Limite e rede de drenagem da bacia.

2.3.1 Variáveis Físicas da Bacia do Ribeirão Lavapés

A bacia hidrográfica apresentou os valores de 0,260 para I_c , 0,185 para K_f , 1,939 para K_c e 1,176 para o índice de sinuosidade. Trata-se de uma bacia oblonga - alongada com baixa tendência a inundação e propensão a conservação.

O Ministério de Meio Ambiente (1998) discordou que uma bacia oblonga possa ter baixa tendência a inundação e argumenta que uma bacia com forma alongada terá maior risco de inundação, pela sobrecarga dos canais secundários que, por sua forma serão maiores do que em uma de forma redonda.

Quanto ao I_s , seguindo as indicações de Alves e Castro (2003), valores de sinuosidade valores entre 1 e 2 apontam para formas transicionais, regulares e irregulares o pode ser observado na Figura 2.2.

Comparando as características das unidades de solo principais ocorrentes na bacia do Ribeirão Lavapés com as variáveis fisiográficas da bacia pode-se afirmar que a bacia tem baixa tendência à inundações.

2.3.2 Variáveis relativas à composição da rede de drenagem e relevo

A bacia do Ribeirão Lavapés é de 4ª ordem segundo o método de Strahler (1957) e a frequência dos canais é de 0,91 canais.km². Na Tabela 2.8 são apresentados os demais resultados das características da rede de drenagem e relevo da bacia do Ribeirão Lavapés.

A declividade média da bacia obtida pela estatística básica do gvSIG é de 9,93%. O programa calculou ainda a variância que foi de 70,95 e o coeficiente de variação de 7,14%. Na Figura 4 pode-se observar o mapa da declividade de acordo com a classificação de Lepsch, et al (1991) e na Tabela 2.8 as classes de uso e as respectivas áreas nota-se que 87,4% da área total da bacia tem o relevo classificado de plano a ondulado.

Tabela 2.8. Características da drenagem e relevo da bacia do Ribeirão Lavapés.

Índices padrões de drenagem e relevo	Unidade	Resultado
Ordem da bacia	-	4 ^a
Frequência dos canais	canais.km ⁻²	0,91
Densidade de drenagem	km.km ⁻²	1,05
Declividade média	%	11,5
Altitude média	m	710
Maior altitude	m	920
Menor altitude	m	450
Comprimento médio de rampa	km	0,227
Coefficiente de rugosidade	-	12,68

A bacia apresenta densidade de drenagem de 1,05 km.km⁻² e pode ser classificada como baixa Dd. Mas para Vilella e Mattos (1975), este índice varia de 0,5 km.km⁻², para bacias com baixa drenagem, a 3,5 ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas, portanto, trata-se de uma bacia com drenagem média.

Na Tabela 2.9 as classes de declividade com suas respectivas áreas e porcentagem.

Tabela 2.9. Classes de declividade com suas respectivas áreas e porcentagem.

Classe %	Área km ²	% de área
0 a 3	19.14	17.24
3 a 6	25.53	22.99
6 a 12	42.69	38.44
12 a 20	16.18	14.57
20 a 40	5.71	5.14
> 40	1.80	1.62
Total	111.05	100

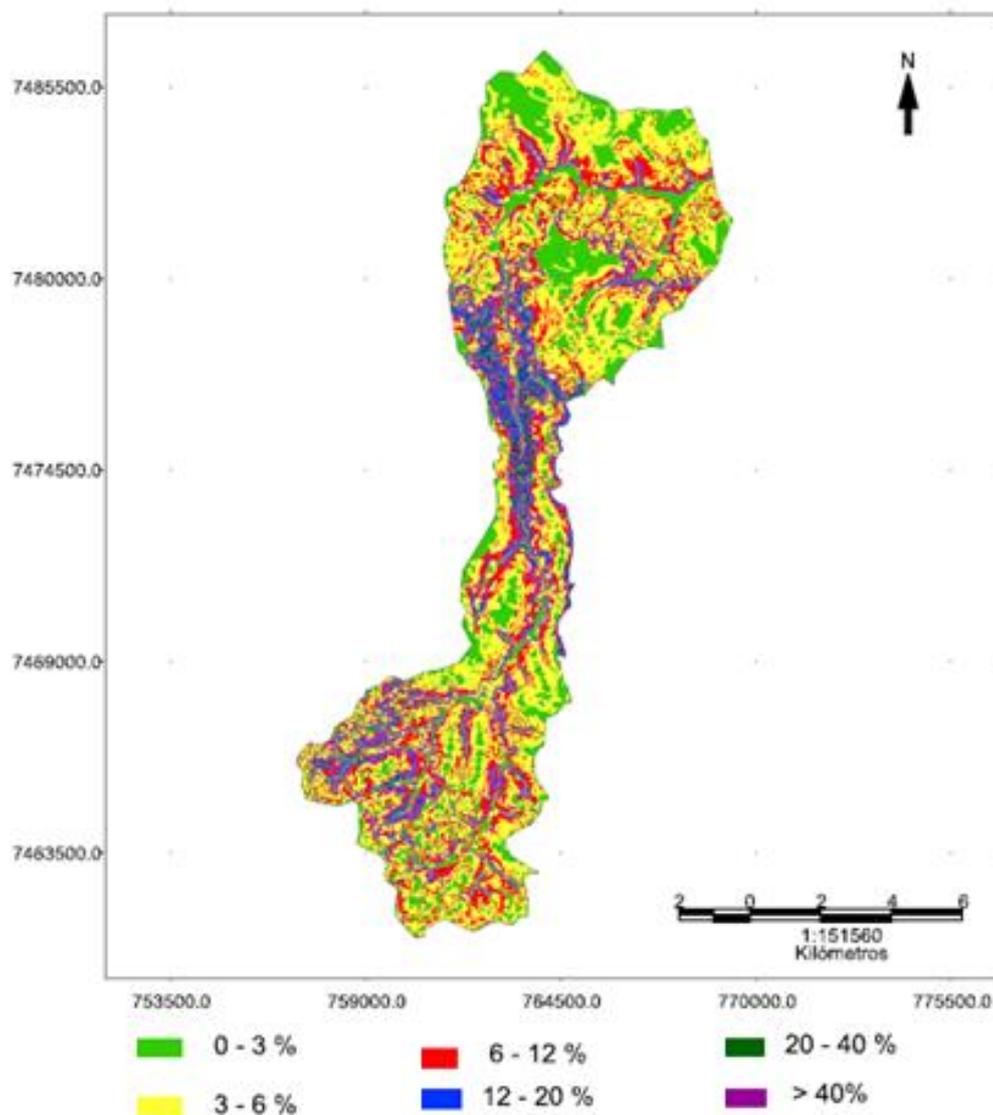


Figura 2.3. Classes de declividade da bacia do Ribeirão Lavapés.

Quanto ao Rn com o valor adimensional de 12.68 mostra que a bacia é susceptível a agricultura de acordo com Pissara, et al (2004) e possui baixo risco a erosão. A bacia 37,34% da área compreendida entre culturas anuais, citrus e café.

2.4 CONCLUSÃO

Com a análise dos parâmetros de forma, circularidade e compacidade conclui-se que a bacia do Ribeirão Lavapés possui forma oblonga – alongada, ambientalmente apresenta características de bacia com tendência a conservação remetendo a baixas tendências à inundações e baixo risco a erosão.

Em conformidade a metodologia empregada – sistema de informações geográficas, gvSIG, o uso da ferramenta supriu as expectativas constituindo importante base para subsidiar análises e estudos hidrológicos e caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas, podendo ser utilizadas como subsídio para tomadas de decisão coerentes e apropriadas no contexto ambiental dos recursos naturais.

2.5 REFERENCIAS

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p.117-127, 2003.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. 1997.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas (MG)**. Tese (Livre – Docência) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Rio Claro, 1970.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 190 p.

COSTA, A. L. C. C. **Estudo da vulnerabilidade à erosão com a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo na Alta Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré Pepitam Utilizando SIG/SPRING**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005. 168 f.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2006. 397p.

FRANÇA, G. V. **Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba** [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo; 1968.

GARCEZ, L.N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. 249 p.

GENERALITAT VALENCIANA. **GVSIG: Sistema de Información Geográfica**. Generalitat Valenciana Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. Valencia – Espanha 2013. Disponível em <http://www.gvpontis.gva.es/cast/gvsig-sistemainfor/>. Acesso em 10 out 2013.

Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas – GEPAG. Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. UNESP. **Banco de dados georreferenciado**. 2012.

HORTON, R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of American Bulletin**. New York, v. 56. p. 807-813, 1945.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Manuais técnicos em geociências N.4: **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro, 2007. 316p

LEPSCH, I. F., BELLINAZZI Jr., R., BERTOLINI, D., ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4a aproximação. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175p.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. **Restauracion hidrológico forestal de cuencas y control de la erosion: Ingeniería Medioambiental**. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 1998. 895p.

OLIVEIRA, J.B. (coord). **Mapa pedológico do estado de São Paulo**. Campinas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 64p.

PISSARA, T.C.T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A.S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal-SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 28, p.297-305, 2004.

PRADO, R. B.; NOVO, E. M. L. M. ; FERREIRA, C. G.. Mapeamento e caracterização dos fatores fisiográficos da bacia hidrográfica de contribuição para o reservatório de Barra Bonita – SP. **Caminhos De Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 36, p.237-257, 21 dez. 2010. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 09 set. 2013.

ROCHA, J. S. M. KURTZ, S. M. J. M. **Manual de Manejo Integrado de bacias Hidrográficas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2001. 282 p.

RODRIGUES, V. A., et al. Análise morfométrica da microbacia do Ribeirão das Araras – SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, SP, v.21, n.1, p. 25-37, 2013.

SILVA, A. M.; MELO, C. R.; **Bacia hidrográfica: teoria**. Lavras, UFLA,,2006. Disponível em http://www.deg.ufla.br/irrigação/Disciplinas/ENG%20170/hidrologia_eng_170.htm. Acesso em : 01 jul. 2007.

STRAHLER, A. N. Quantitative analyses of watershed geomorphology. **Transactions of American Geophysical Union**, Washington, 1957; 38: 913-920.

TUCCI, Carlos Eduardo Moreira (Org.). **Hidrologia**: ciências e aplicações. 4. ed. Porto Alegre: Ufrgs, 2012. 943 p.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 85 p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

CAPÍTULO III “ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO E DO POTENCIAL NATURAL DE EROÇÃO “

RESUMO

Sabendo-se que a erosão pode comprometer até mesmo o volume de água de uma bacia hidrográfica, o presente trabalho visa estimar a perda de solo e o potencial natural de erosão dos solos na bacia de contribuição da Microcentral Hidrelétrica Lageado, inserida na bacia do Ribeirão Lavapés, no município de Botucatu/SP. Para tanto se utilizou a Equação Universal de Perdas de Solo modificada – RUSLE aplicada ao sistema de informação geográfica livre gvSIG. O fator erosividade (R) da chuva foi obtido a partir de dados do programa netErosividade SP, a erodibilidade (K) do solo foi determinada por meio do mapa de solos da área, o fator topográfico (LS) foi gerado no gvSIG e os fatores uso e manejo praticas conservacionistas (CP) foram obtidos mediante a elaboração do mapa de uso do solo da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés. Os fatores RKLS foram multiplicados e geraram o mapa do Potencial Natural de Erosão. E acrescido do fator CP se obteve o mapa de perda de solo expresso em $t.ha^{-1}$. O sistema de informação geográfica gvSIG mostrou-se viável na determinação dos diversos fatores da Equação Universal de Perda de Solo tornando-se possível zonestar as áreas com altas perdas de solo. O fato do Ribeirão Lavapés está próximo de áreas susceptíveis a erosão e a área ser deficitária de boa cobertura vegetal o deixa a vulnerável ao assoreamento e alargamento e ainda pode comprometer a qualidade e quantidade de água diminuindo o potencial hídrico.

Palavras-chave: gvSIG, equação universal de perda de solo, praticas conservacionistas

ESTIMATED SOIL LOSS AND THE NATURAL EROSION POTENTIAL

SUMMARY

Knowing that erosion can jeopardize even the volume of water in a watershed, this study aims to estimate soil loss and natural erosion potential of soils in watershed contribution Microhydroelectric plant Lageado that is inserted in Lavapés stream watershed, in Botucatu / SP. For that we used Eq Universal Soil Loss modified applied to geographic information system free gvSIG. The erosivity factor (R) of rain was obtained from program data netErosividade SP, soil erodibility (K) of the soil was determined by the soil map of the area, the topographic factor (LS) was generated in gvSIG and factors use and management conservation practices (CP) were obtained by preparing the land use map of the urbanized area of the basin of Stream Lavapés. RKLS factors were multiplied and generated map of the Natural Potential Erosion. And plus factor CP was obtained map of soil loss expressed in $t\ ha^{-1}$. The geographic information system gvSIG was feasible in determining the various factors of Equation Universal Soil Loss making it possible zoning areas with high soil losses. The fact of Stream Lavapés is close to areas susceptible to erosion and the area is deficient in good vegetation cover the leaves vulnerable to silting and widening and also may affect the quality and quantity of water by decreasing water potential.

Keywords: gvSIG, universal equation of soil loss, conservation practices

3.1 INTRODUÇÃO

Erosão em bacias hidrográficas é considerada um dos problemas mais sérios da atualidade, influenciando a produção agrícola, devido ao conseqüente empobrecimento do solo, e no abastecimento de água, acarretando a diminuição de sua disponibilidade nos reservatórios devido ao assoreamento.

Desta forma, estudos mais aprofundados com relação aos processos erosivos e processos hidrológicos, têm exigido metodologias mais eficientes que proporcionem maior agilidade e potencial analítico dos dados no âmbito de bacias hidrográficas.

O quadro atual de degradação das terras agrícolas requer o desenvolvimento de modelos de predição e quantificação das perdas de solo por erosão que possibilitem a adoção de sistemas de cultivo e manejo do solo, bem como de práticas conservacionistas adequadas que reduzam este processo em intensidade, aumentem a produtividade agrícola e a renda no campo. Neste sentido, o modelo de avaliação ambiental da Equação Universal das Perdas de Solo apresenta-se como importante ferramenta, principalmente por proporcionar fácil implementação em sistemas de informação geográfica.

O modelo mais conhecido e utilizado na estimativa de erosão é a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), desenvolvida no National Runoff and Soil Loss Data Center (Purdue University, Estados Unidos) em 1954 e sistematizada por Wischmeier e Smith (1978), cujas variáveis são: a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o comprimento de rampa e declividade do terreno, o uso e manejo do solo e as práticas conservacionistas empregadas. Este modelo foi revisado por Renard et al. (1997), que aperfeiçoaram os métodos de determinação de seus fatores, constituindo a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE).

As técnicas de Geoprocessamento, implementadas nos Sistemas de Informações Geográficas, são importantes aliadas do planejamento e avaliação do uso e degradação do solo, permitindo a realização de estimativas de perdas de solos por erosão, a classificação das terras segundo a capacidade de uso, a simulação da degradação do solo através de cenários e diversas análises espaciais com rapidez e precisão, através da álgebra de mapas.

A Bacia do Ribeirão Lavapés, situada no município de Botucatu – SP, está ocupada por diversos usos tais como área urbana (40% da área total), culturas anuais, mata nativa, reflorestamento, pastagem, citrus, café e outros, e apresenta evidências de processos erosivos (GEAPG, 2012).

Sabendo-se que a erosão pode comprometer até mesmo o volume de água de uma bacia hidrográfica, o presente trabalho visou estimar a perda de solo e o potencial natural de erosão dos solos da área de contribuição da Microcentral Hidrelétrica Lageado inserida na bacia do Ribeirão Lavapés, identificando as áreas críticas quanto à erosão potencial.

3.1.1 Erosão do Solo

O processo erosivo em bacias hidrográficas é um dos processos mais prejudiciais à integridade da infraestrutura, dos serviços ambientais essenciais e da produtividade agrícola. Sua ação devastadora pode afetar as atividades econômicas e, principalmente, o meio ambiente.

A erosão do solo é um processo que ocorre em três fases: a remoção de partículas; o transporte desse material, realizado pelos agentes erosivos; e a deposição do material transportado, quando não há energia suficiente para a continuidade do transporte (GUERRA, 2005). De acordo com Pruski (2009a), a erosão consiste no processo de desprendimento e arraste das partículas do solo provocado pela ação da água e do vento, constituindo a principal causa da degradação das terras agrícolas. Quanto ao agente causador da erosão, esta pode ser classificada em eólica ou hídrica.

No Brasil, predomina fortemente a erosão hídrica em razão da localização intertropical e dos tipos climáticos predominantes, caracterizados pelos elevados índices pluviométricos. Entre os principais tipos de erosão hídrica, destacam-se a erosão laminar, ou entressulcos, a erosão em sulcos ou ravinas e as voçorocas (WEILL; PIRES NETO, 2007).

Os fatores controladores da erosão, aqueles que determinam a variação em sua taxa, são: erosividade da chuva, erodibilidade do solo, características das encostas e natureza da cobertura vegetal. A intervenção do homem pode alterar esses fatores, acelerando ou retardando os processos erosivos (GUERRA, 2005).

Segundo Weill e Pires Neto (2007), os principais fatores condicionantes da aceleração do processo erosivo em áreas agrícolas, provocados pelo homem, incluem a retirada da vegetação natural para a implantação dos agrossistemas e demais usos, o manejo incorreto dos solos produtivos, a exploração inadequada de terras marginais, a

pressão de ocupação da terra por usos competitivos, o uso intensivo das terras com potencial natural de erosão elevado e, sobretudo, a falta de planejamento da ocupação.

A erosão do solo tem sido extensamente estudada dentro do ponto de vista agrícola, pois está relacionada a sérias perdas em termos de produção de água e de produtividade das mais variadas culturas. Mais recentemente tem-se dado atenção especial aos problemas ambientais relacionados a erosão, transporte e deposição de sedimentos (SILVA, et al. 2007) .

A Equação Universal de Perda de Solo (RUSLE), quando espacializada por meio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), tem possibilitado a estimativa de perdas de solos em bacias hidrográficas (PRUSKI et al., 2009b). Assim sendo, a aplicação da RUSLE em escala municipal é válida para estudos qualitativos sobre predição de perdas de solos, possibilitando a delimitação e espacialização de áreas com maior e menor susceptibilidade a erosão, favorecendo o zoneamento ambiental e, conseqüentemente o planejamento ambiental.

3.1.2 Equação Universal de Perda de Solo

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) foi desenvolvida no National Runoff and Soil Loss Data Center em 1954 pelo Agricultural Research Service em cooperação com a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos, a partir da adaptação de algumas equações desenvolvidas na década de 1940 para as condições dos solos do Corn Belt, EUA. Alguns aperfeiçoamentos no modelo foram feitos por Wischmeier e Smith, publicados no “Agriculture Handbook 537”, em 1978, o qual se tornou seu texto básico (AMORIM et al., 2009).

Desde o desenvolvimento da USLE, as pesquisas continuaram a ser realizadas com o intuito de melhorar as estimativas de perdas de solo, culminando no desenvolvimento do modelo denominado Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) em 1997. Este modelo, desenvolvido por Renard et al. (1997) e publicado no “Agriculture Handbook 703”, manteve a estrutura da USLE, mas modificou expressivamente as metodologias de determinação dos fatores.

A Equação Universal de Perda de Solo, apesar de ser uma formulação empírica, ainda é a de maior referência no Brasil para estimativa de perda de solo. A sua

aplicação é viável graças a estudos brasileiros para parâmetros determinados em condições locais da RUSLE, como os de Bertoni e Lombardi Neto (2012).

A equação de perdas de solo exprime a ação dos principais fatores que sabidamente influenciam a erosão pela chuva e é expressa pela Equação 3.1 (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997):

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (3.1)$$

Onde:

A - representa a perda média anual de solo por erosão por unidade de área e de tempo em $[t.ha^{-1}.ano^{-1}]$;

R - fator erosividade da chuva, $[MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}]$;

K - fator erodibilidade do solo, expresso em $[t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}]$;

L - fator comprimento de rampa, adimensional;

S - fator declividade, adimensional;

C - fator uso e manejo do solo, adimensional;

P - fator práticas conservacionistas, adimensional.

Os fatores condicionantes do meio físico intervenientes no processo de erosão laminar (R, K, L e S) constituem o Potencial Natural de Erosão, ou seja, correspondem às perdas de solo em áreas continuamente destituídas de cobertura vegetal e sem qualquer intervenção antrópica (VALÉRIO FILHO, 1994). Os fatores C e P, por sua vez, constituem os componentes antrópicos da RUSLE, podendo ser modificados pelos agricultores de modo a ampliar a proteção do solo contra a erosão hídrica.

3.1.3 Parâmetros da RUSLE

3.1.3.1 Fator Erosividade - R

O fator chuva é um índice numérico que representa o potencial da chuva e da enxurrada para provocar erosão em uma área sem proteção. A perda de terra provocada por chuvas numa área cultivada é diretamente proporcional ao produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos. Esse produto é denominado índice de

erosão (EI₃₀). A média dos valores anuais de EI₃₀ de um longo período de tempo (mais de 20 anos) é o valor R da equação. (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

A energia cinética da chuva pode ser obtida pela relação desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), em função de sua intensidade Equação 3.2.

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I \quad (3.2)$$

Onde:

E_c - energia cinética da chuva [$\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$];

I - intensidade da chuva [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$].

O valor de R também pode ser calculado a partir de dados de pluviômetros, segundo modelo proposto por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) Equação 3.3.

$$EI = 68,73 \cdot \left(\frac{p^2}{P} \right)^{0.841} \quad (3.3)$$

Onde:

EI – índice de erosão;

p - precipitação média mensal em milímetros;

P - precipitação média anual em milímetros e

R - somatório de EI

Carvalho et al. (1996) determinaram a erosividade da chuva de Botucatu através da análise de um registro pluviométrico de 21 anos de dados (1974-1994) da Faculdade de Ciências Agronômicas-FCA/UNESP, para a caracterização do fator R da equação universal de perda de solo. Os índices de erosividade EI₃₀ médios mensais foram obtidos através da metodologia que preconiza o uso do coeficiente de chuva, proposta por Lombardi Neto (1977) e obtiveram um resultado de $7468 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ha}$, apresentando o desvio padrão de $1347 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ha}$ e o coeficiente de variação de 18,04% por meio da equação obtida para Mococa (SP), por Carvalho et al. (1991) exposta na Equação 3.4.

$$EI^{30}=111,173.RC^{0.691} \quad (3.4)$$

Onde:

EI_{30} - estimativa do índice de erosividade EI_{30} médio mensal [MJ.mm.h⁻¹.ha];

RC - dado pelo quociente entre o quadrado e a precipitação média mensal pela precipitação média anual [mm].

O Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (GPRH/UFV), em parceria com o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), desenvolveu uma Rede Neural Artificial (RNA) capaz de estimar a erosividade da chuva de qualquer localidade do estado de São Paulo a partir de dados de latitude, longitude e altitude. Esta RNA foi implantada através do software “netErosividade SP”, o qual além de interpolar o fator R para as latitudes, longitudes e altitudes fornecidas pelo usuário, também calcula a erosividade da chuva das estações pluviométricas utilizadas para o desenvolvimento da RNA e de todas as localidades (municípios e distritos) a partir de dados consistidos de precipitação média anual de 1961 a 1990 (MOREIRA et al., 2006).

3.1.3.2 Fator Erodibilidade - K

O fator K é função das propriedades do solo que influenciam no processo erosivo, tais como a velocidade de infiltração, a permeabilidade, capacidade de absorção, resistência a dispersão, ao salpicamento, à abrasão e às forças de transporte da chuva e enxurrada (STEIN et al., 1987).

A erosão pode ser mais fortemente influenciada pelo fator topográfico, características da chuva, cobertura e manejo da terra e práticas conservacionistas que pelas propriedades do solo. No entanto, alguns solos erodem mais facilmente que outros quando as demais condições são mantidas inalteradas. Esta diferença, inerente às propriedades do solo, é denominada erodibilidade do solo (DISSMEYER; FOSTER, 1980).

A erodibilidade do solo é considerada a mais importante variável na predição da erosão e no planejamento do uso do solo, representa a sua susceptibilidade á erosão, podendo ser definida como a quantidade de material que é removido por unidade de área quando os demais fatores determinantes da erosão permanecem constantes. Desta forma, ainda que fatores como chuva, declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo sejam as

mesmas, existem diferenças entre as propriedades do solo que admitem que alguns solos sejam mais erodidos que outros (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

Bertoni e Lombardi Neto (2012) apontaram que as propriedades do solo que influenciam sua erodibilidade são aquelas que afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água, e que promovem a resistência às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento.

De acordo com Dissmeyer e Foster (1980), o fator erodibilidade do solo (K) da USLE representa a relação de perda de solo por unidade de índice de erosividade da chuva medida em uma parcela experimental de 22,1 metros de comprimento e 9 % de declividade, mantida em alqueive (preparada para o plantio no sentido do declive, arada durante a primavera para impedir o crescimento vegetativo e a formação de crostas superficiais, mas mantida descoberta) por dois anos. Como a sua determinação em parcelas experimentais é demorada, possui custo elevado e dificuldade de implantação, diversos pesquisadores propuseram métodos mais acessíveis de estimativa que utilizam valores de propriedades conhecidas dos solos.

3.1.3.3 Fator Comprimento e Grau de Declive – LS

A intensidade de erosão hídrica é grandemente afetada tanto pelo comprimento do declive quanto pelo gradiente. Estes dois efeitos, pesquisados e determinados separadamente, são representados na Equação Universal de Perda de Solo como fatores L e S, respectivamente. Porém, para aplicação prática da RUSLE, são considerados conjuntamente como um fator topográfico LS (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

De acordo com Renard et al. (1997), o fator LS na RUSLE representa a taxa de perda de solo em um dado comprimento de rampa e declividade em relação à perda de solo de uma encosta com comprimento de 22,1 m e declividade de 9 %, em que as demais condições são mantidas constantes. Os valores LS não são absolutos, mas referidos como 1,0 em terrenos com declive de 9 % e rampa de 22,1 m de comprimento.

Equação Universal de Perda de Solo Revisada utiliza os algoritmos de determinação dos fatores comprimento de rampa (L) e declividade (S) e Wischmeier e Smith (1978) propuseram uma equação para o cálculo dos fatores L e S associados na Equação 3.5:

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^m \cdot \left[\frac{0,43+0,30s+0,043s^2}{6,613} \right] \quad (3.5)$$

Onde:

λ - comprimento da declividade, [m];

α - declividade do terreno [%];

m - coeficiente de ajuste que depende de declividade do terreno (S),

sendo: 0,5 para $S > 4\%$; 0,4 para S de 3% a 4% e 0,3 $S < 3,0\%$

Em muitos trabalhos que usam geoprocessamento na determinação dos fatores da RUSLE, o fator comprimento de rampa e o fator declividade aparecem associados, representados pela variável LS. Essa associação pode ser feita por meio da equação desenvolvida por Bertoni (1959) para a cidade de Campinas, que se adequou bem as condições brasileiras, partindo da relação experimental da perda de solo com diversos graus de declividade (de 1 a 20%, variando a cada 2%) e de comprimentos de rampa (de 5 a 100 m, oscilando de 5 em 5 m), (Equação 3.6).

$$LS = 0,000984.L^{0,63}.S^{1,18} \quad (3.6)$$

Onde:

L - comprimento de rampa [m] e

S - declividade [%].

3.1.3.4 Fator Uso e Manejo do Solo - C

O fator uso e manejo do solo conceitua-se como a relação esperada entre as perdas de solo em um terreno cultivado e em um terreno desprotegido. A redução da erosão vai depender do tipo de cultura e manejo adotado, da quantidade de chuvas, da fase do ciclo vegetativo entre outras variáveis, cujas combinações apresentam diferentes efeitos na perda de solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

O fator C da Equação Universal de Perda de Solo corresponde à taxa de perda de solo de uma área cultivada em determinadas condições e a perda de solo de uma área de referência, continuamente mantida com solo preparado e sem qualquer tipo de cobertura vegetal (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

O fator C varia em função da erosividade da chuva e da erodibilidade do solo, para cada cultura e tipos de manejo ou cultivo do solo. Por esta razão, há grande dificuldade na determinação deste fator em virtude das diversas combinações possíveis de erosividade, cultura, sistema de cultivo, tipo de preparo e manejo e tipo de solo (BERTOL et al., 2002).

O fator uso e manejo do solo é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições, e as perdas correspondentes desse terreno mantido continuamente descoberto e cultivado. Para este fator serão utilizados valores já estudados e utilizados em diversas pesquisas científicas segundo Silva et al. (2010); Silva et al. (2007) e Bertoni e Lombardi Neto (2012) Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Fator C para alguns tipos de solos.

Tipo de Cobertura do Solo	Fator C
Culturas Anuais	
Milho	0,0827
Soja	0,206
Algodão	0,465
Culturas Temporárias	
Cana-de-açúcar	0,1000
Cana-de-açúcar Forrageira	0,0500
Culturas Perenes	
Café	0,135
Citrus	0,135
Outros Usos	
Pastagem	0,0100
Reflorestamento Eucalipto	0,0470
Mata e vegetação nativa	0,0004
Área urbana	0,0000
Várzea	0,0000

Fonte: Silva et al. (2010); Silva et al. (2007) e Bertoni e Lombardi Neto (2012)

Stein et al. (1987) utilizaram os fatores C e P em conjunto (CP) para realizar uma estimativa da perda de solos por erosão na Bacia Hidrográfica dos Rios Peixe-Parapanema. O fator C foi determinado conforme a sistemática proposta por Bertoni e Lombardi Neto em 1985, fixando-se as datas, métodos e valores plausíveis para plantio, colheita, preparo do solo, manejo de restos culturais e produções médias esperadas, e utilizando-se um valor de erosividade da chuva obtido para um ponto do centro geográfico

da bacia. O valor adotado de P foi “1”, já que não foi possível estabelecer valores confiáveis para toda a bacia, o que superestimou os resultados. Tais valores de CP são amplamente utilizados em estimativas de perdas de solo recentes, como a realizada por Borges (2009), na Bacia do Ribeirão Alam Grei, em Rio Claro - SP.

3.1.3.5 Fator Práticas Conservacionistas - P

O fator P da RUSLE representa o efeito das práticas conservacionistas, como o plantio em nível, terraceamento e plantio em faixas, na erosão do solo. Expressa a relação entre a perda de solo com determinada prática conservacionista e a perda correspondente quando a cultura está implantada no sentido do declive, morro abaixo (AMORIM et al., 2009).

Os valores do fator P para algumas práticas conservacionistas expressos na Tabela 3.2 foram sistematizados por Bertoni e Lombardi Neto (2012) a partir de perdas de solo determinadas por Marques et al. (1961), em parcelas experimentais com sistemas coletores localizadas nas Estações Experimentais do Instituto Agrônomo em Pindorama e Campinas – SP cultivadas, respectivamente, com milho e algodão em terrenos com declividade de 10,8 % e 6,3 %, respectivamente, nos anos agrícolas de 1943/44 a 1958/59.

Tabela 3.2. Valores do fator P para algumas práticas conservacionistas

Práticas conservacionistas	Fator P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em nível ou Terraço	0,5
Alternância de capinas + plantio em nível	0,4
Cordões de vegetação permanente (cana-de-açúcar)	0,2

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (2012)

Lombardi Neto em 2005 citado por Silva, et al. (2010) estabeleceu o valor de p para o plantio em nível, em função da declividade, conforme a equação para declividades entre 0,5 a 20%. Para declividades menores que 0,5% foram assumidos o valor de $p = 0,6$ e para declividades maiores que 20% assumiu-se o valor de $p = 1$, Equação 3.7.

$$P = 0,69947 - 0,8911.S + 0,01184.S^2 - 0,000335.S^3 \quad (3.7)$$

Onde:

P - fator práticas conservacionistas da RUSLE e

S - declividade do terreno [%].

Silva et al. (2010) aplicaram a referida equação para determinar o fator P para a prática conservacionista plantio em nível na Fazenda Canchim, São Carlos – SP, entre 0,5 % e 20 % de declividade. Para declividades menores que 0,5 %, assumiu-se o valor de P igual a 0,6, e para declividades maiores que 20 %, foi adotado P igual a 1,0, considerando que em declividades acima deste limiar, o plantio em nível não contribui para a redução da perda de solo por erosão.

3.1.4 Potencial Natural de Erosão – PNE

Sendo a erosão um processo ocasionado por forças ativas como a intensidade da chuva, declividade e comprimento de rampa do terreno e a permeabilidade dos solos e por forças passivas, como a resistência que exerce o solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal, na análise das perdas de solo ocasionadas pela erosão, deve-se ponderar também as quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e outros nutrientes arrastados no escoamento. Desta forma, na análise dos processos erosivos devem-se levar em conta questões importantes em relação aos volumes mobilizados (quantitativos) e os aspectos qualitativos relacionados (Bertoni e Lombardi Neto, 2012).

Quando se analisa o potencial de mobilização e transporte de sedimento, pode-se ter uma indicação de outros aspectos que influenciam a qualidade do meio receptor. Desta maneira, será possível a partir a utilização de modelos de previsão de potencial de formação de sedimentos, como o potencial natural de erosão, obter informações do potencial de formação de outras cargas difusas intervenientes nos cursos d águas (VALLE JUNIOR, 2008).

O potencial natural de erosão é uma simplificação da Equação Universal de Perdas de Solo (Equação 3.8), onde apenas são considerados os fatores: erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), comprimento do declive (L) e grau de declive (S) DONZELI et al. (1992).

$$PNE = R \cdot K \cdot L \cdot S \quad (3.8)$$

Onde:

PNE – potencial natural de erosão , [t.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹];

R - fator erosividade da chuva, [MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹];

K - fator erodibilidade do solo, expresso em [t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹];

L - fator comprimento de rampa, adimensional;

S - fator declividade, adimensional.

Esta grandeza expressa a suscetibilidade de determinada área à erosão, indicando onde ocorreria maior ou menor erosão, sem levar em consideração os fatores antrópicos, cobertura vegetal e práticas conservacionistas (BRANDÃO, 2001).

3.1.5 Sistemas de Informação Geográfica – SIG

A exigência de visão globalizada das questões ambientais tem contribuído para uma crescente demanda por informações cartográficas. Estas são obtidas em ritmo cada vez mais intenso, graças ao desenvolvimento de técnicas apoiadas no uso de computadores e às imagens obtidas por sensores instaladas a bordo de satélites espaciais. As informações com suas características de repetitividade e periodicidade tornaram-se também ferramentas indispensáveis na análise e monitoramento multitemáticos e multitemporais de fenômenos naturais ou decorrentes de ações antrópicas em nosso planeta (SILVA et al. 2008).

O SIG facilita estudos dos riscos de erosão em diferentes áreas. Ranieri et al. (1996) utilizaram SIG para elaborar mapas de riscos de erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins em Piracicaba/SP e associaram o uso da Equação Universal de Perdas de Solo para estimar a perda de solo na área.

Silva et al. (2010), utilizando geoprocessamento, realizaram uma previsão da perda de solo na Fazenda Canchim/SP aplicando a Equação universal de perda de solo e os resultados obtidos mostraram-se coerentes com os tipos de solo, as declividades e a cobertura vegetal da área de estudo.

Donzeli et al. (1992), em estudo desenvolvido na bacia do rio São Joaquim (Pirassununga/SP) também utilizaram o sistema computacional SGI/INPE, para integrar os parâmetros do modelo EUPS, no sentido de avaliar a degradação dos solos na área. Obtiveram o potencial natural de erosão e a estimativa de perdas de solo. Utilizando ainda

o SGI/INPE, foram combinados o potencial natural de erosão com a tolerância de perdas de solo para obtenção do parâmetro CP tolerável. O CP tolerável foi combinado com a informação do CP atual, de forma a gerar a expectativa de erosão.

Valério Filho (1994), também utilizou o SGI/INPE para combinar os parâmetros do modelo EUPS, referentes à bacia do Ribeirão Bonito (SP), na área de influência do reservatório de Barra Bonita. Os procedimentos adotados para combinação das informações foram semelhante àqueles realizados por Donzeli et al. (1992), diferindo apenas porque o autor efetuou o estudo em duas datas e teve a possibilidade de avaliar que houve um aumento na expectativa de erosão da área, em virtude da substituição da vegetação natural por culturas.

Lombardi Neto et al. (1995), utilizaram o programa computacional IDRISI para combinar os parâmetros do modelo USLE, em estudo desenvolvido na microbacia do Ribeirão Cachoeirinha (Iracemápolis/SP). Os valores referentes aos parâmetros da EUPS e também da tolerância de perdas de solo foram estabelecidos para a microbacia como um todo, através da ponderação dos valores em relação a área de ocorrência de cada elemento do meio. Sendo assim, foi obtido o valor de perdas médias de solo, o qual superou o valor de tolerância.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de Estudos

A área estudada envolve parte inicial da bacia do Ribeirão Lavapés, onde a principal nascente deste curso d' água, ate a barragem da Microcentral Hidrelétrica da Fazenda Lageado, área urbana do município de Botucatu.

A área possui extensão de 44.01 km² e está geograficamente localizada entre as coordenadas 22°43'12" de latitude Sul e 48°29'43" de longitude Oeste de Greenwich, com altitudes variando entre 715 e 920 metros (Figura 3.1).

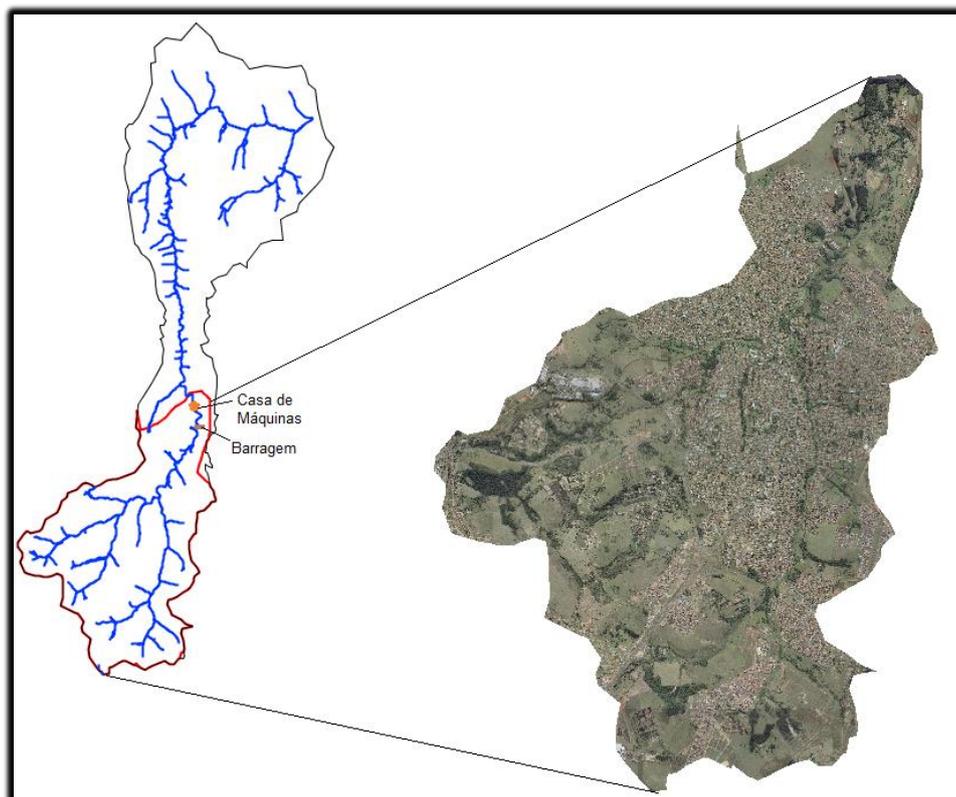


Figura 3.1. Localização da área urbanizada da Bacia do Ribeirão Lavapés.

3.2.2 Base de Dados

A base de dados da Bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés (limite, curvas de nível, rede de drenagem e outros arquivos no formato shape file) foram obtidos do banco de dados de arquivos georreferenciados do Grupo de Estudos e Pesquisas Georreferenciadas (GEPAG) da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu.

Todos os mapas têm como sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM); fuso 22; Datum planimétrico WGS84 (World Geodetic System 1984), equivalente ao SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), novo sistema geodésico de referência adotado oficialmente no Brasil em 25 de fevereiro de 2005. E ainda utilizou-se uma imagem do Satélite SPOT5 com resolução espacial de 10 m de ano de 2010.

3.2.3 Sistema de Informação Geográfica

Para o processamento dos dados e confecção dos mapas temáticos utilizou-se o sistema de informação geográfica de código aberto - gvSIG. Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Infraestrutura e Transito de Valência, Espanha.

O gvSIG é um sistema de informação geográfica (SIG), ou seja, uma aplicação projetado para capturar, armazenar, manipular, analisar e exibir todas as formas de informação geograficamente referenciados para resolver complexos de planejamento e gestão. Caracteriza-se por ter uma interface amigável, sendo capaz de acessar os formatos mais comuns, tanto vetoriais e raster, e tem um grande número de ferramentas para trabalhar com dados geográficos (ferramentas de consulta, mapeamento, geoprocessamento, redes, etc.) que o tornam uma ferramenta ideal para usuários que trabalham com o componente territorial GENERALITAT VALENCIANA (2013).

O gvSIG possui uma extensão - Sistema de Análise Espacial Extremadura (SEXTANTE) que é uma biblioteca de algoritmos de análise espacial. O SEXTANTE possui um gerente de geoprocessamento, uma linha de comando, um gerente de processamento em lote de um gerador de padrão e um histórico de comandos feitos pelo usuário, a fim de facilitar o processo repetido. Alguns utilitários que podem ser encontrados em SEXTANTE incluem funcionalidade para: análise de padrões, análise hidrológica, geoestatística e análise da geomorfometria alívio, análise e cálculo de camadas raster, iluminação e visibilidade, a localização ideal de elementos, a lógica fuzzy, perfis, rasterização e interpolação, processamento de imagem e análise, índices de vegetação, índices e outros parâmetros hidrológicos (SEXTANTE, 2013).

3.2.4 Métodos

3.2.4.1 Obtenção do Limite da Área de Estudos, Curvas de Nível Declividade e Mapa do Modelo Digital do Terreno (MDE).

Os dados de área, perímetro, rede de drenagem e curvas de nível foram obtidos no banco de dados do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. Foram extraídos da carta planialtimétrica do Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística, Carta do Brasil –

Escala 1:50.000, folha SF-22-R-IV-3 do município de Botucatu/SP, digitalizados e convertidos para o formato shapefile (shp) (formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas).

No gvSIG estas informações foram extraídas em: menu Camada → Agregar informações geométricas (área, perímetro e comprimento).

Para a geração de MDE utilizou-se as curvas de nível no formato shp, e com a ferramenta do gvSIG: menu SEXTANTE → Rasterização e interpolação → Rasterizar, e gerou-se a valores altimétricos de uma superfície contínua, obtendo-se dessa forma o modelo digital de elevação do terreno.

Após a elaboração do MDE procedeu-se na criação do mapa de declividade, acessando-se o menu SEXTANTE → Geomorfologia e análise do terreno → Declividade (unidade: %), gerando-se o mapa de declive. Os intervalos de porcentagem foram ajustados de acordo Lepsch et al. (1991), para estudos de conservação de solo (0-3, 3-6, 6-12, 12-20, 20-40 e > 40).

3.2.4.2 Obtenção dos Fatores do Modelo RUSLE

A metodologia de obtenção dos fatores da RUSLE para estimativa das perdas de solo na Bacia do Ribeirão Lavapés é apresentada a seguir e para cada fator foi gerado uma mapa.

3.2.4.2.1 Erosividade da Chuva – Fator R

O índice de erosividade médio anual da Bacia do Ribeirão Lavapés foi determinado pelo programa netErosividade SP a partir das coordenadas geográficas centrais Bacia: latitude 22°49'40" S, longitude 48°26'01" W e altitude 706 m.

O resultado obtido pouco difere ao encontrado por Carvalho et al. (1996) para o município de Botucatu/SP, obtido por meio da equação proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), a partir de dados pluviométricos do período de 1974 a 1994.

Mapa de Solos

Para confeccionar o mapa de solos da bacia do Ribeirão Lavapés utilizou-se os um mapa semidetalhado do município de Botucatu/SP obtido dos arquivos do banco de dados do GEPAG. Foi feito uma detalhamento na área da Fazenda Lageado utilizando-se de um mapa detalhando de Carvalho et al (1983). Todos os processos foram realizados no gvSIG.

Determinação da Erodibilidade do Solo

O K foi determinado para cada classe de solo de levando-se em conta os valores encontrados nas pesquisas de Mannigel, et al (2002) e Bertoni e Lombardi Neto (2012) que determinaram o fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Valor do fator erodibilidade (K) dos solos do Estado de São Paulo

Classe de Solo	Fator K [t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹]	
	Horizonte A	Horizonte B
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	0,047	0,010
Gleissolos Háplicos Distróficos	0,004	0,026
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	0,011	0,008
Latossolos Vermelhos Distróficos	0,006	0,004
Latossolos Vermelhos Distroféricos	0,007	0,005
Nitossolos Vermelhos Distróferricos	0,034	0,018
Nitossolos Vermelhos Distróficos	0,130	0,006
Neossolos Litólicos Eutróficos	0,052	0,240
Neossolos Quartzarênicos Órticos	0,145	0,108
Neossolos Flúvicos Distroficos	0,046	0,035
Neossolos Litólicos Distroficos	0,036	

Fonte: Mannigel, et al. (2002) e Bertoni e Lombardi Neto (2012).

3.2.4.2.2 Comprimento de Rampa e Declividade - Fator LS

O comprimento de rampa médio das rampas bacia foi obtido, conforme metodologia de Vilela e Mattos (1975) expressa pela Equação 3.9.

$$L = \frac{A}{4\ell} \quad (3.9)$$

Onde:

L - comprimento de rampa [m];

A - área da bacia [m²];

ℓ - somatório do comprimento de todos os cursos d'água da bacia [m].

Após a confecção dos mapas de comprimento de rampa (Fator L) e declividade utilizando-se o gvSIG em menu SEXTANTE > calculadora de mapas procedeu-se a execução da expressão matemática apresentada na Equação 3.6 de Bertoni (1959), gerando o mapa do fator topográfico.

3.2.4.2.3 Mapeamento do Uso e manejo do Solo e Práticas Conservacionistas - Fator CP

Para aquisição dos fatores de uso e práticas conservacionistas (Fatores C e P), buscando-se agrupar em classe os usos e ocupações do solo, obteve-se o mapa de uso do solo da área urbanizada da bacia Ribeirão Lavapés, que foi gerado a partir da classificação em tela da imagem do satélite SPOT5.

De posse do mapa de uso do solo valorou-se cada classe de acordo com os valores da Tabela 3.4. com os resultados encontrados por Stein et al. (1987).

Tabela 3.4. Fatores CP em função das classes de uso e ocupação do solo

Descrição	CP
-----------	----

Área urbana	0,00
Estradas	0,00
Cursos de água (rios)	0,00
Corpos de água (lagos)	0,00
Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial a total do terreno (pastagem)	0,01
Vegetação de porte médio a baixo, cobertura parcial do terreno (cerrado)	0,0007
Vegetação de porte médio a baixo, cobertura parcial do terreno (agricultura)	0,25
Vegetação de porte alto a médio, cobertura total do terreno (Floresta, cerradão, reflorestamento)	0,005
Solo exposto (arado e ou gradeado desprovido de cobertura vegetal)	1,00

Fonte: Stein et al. (1987).

3.2.4.3 Potencial Natural de Erosão – PNE

O Potencial Natural de Erosão considera apenas as variáveis da RUSLE que representam os parâmetros do meio físico correspondendo às estimativas de perdas de terras em áreas destituídas de cobertura vegetal e sem qualquer intervenção antrópica, foi calculado segundo a Equação 3.8 de acordo com Donzelli et al. (1992).

O PNE foi calculado a partir da combinação dos planos de informações -Mapas dos fatores R, K e LS. A multiplicação destes fatores da RUESLE foi efetuado pelo gvSIG menu SEXTANTE → calculadora de mapas.

O mapa de Potencial Natural de Erosão foi classificado qualitativamente de acordo com a classificação proposta por Silva (2008) na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Classes de Potencial Natural de Erosão

Classes do PNE	Intervalo[t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹]
----------------	---

Fraco	0 – 400
Moderado	400- 800
Forte	800 – 1600
Muito forte	> 1600

Fonte: Silva (2008).

3.2.4.4 Estimativa das Perdas de Solo

A perda de solo anual da área urbanizada da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés foi determinada no gvSIG através do produto entre o PNE e os fatores CP da RUSLE por meio do menu SEXTANTE → Ferramentas de calculo para camadas raster > calculadora de mapas.

O mapa resultante foi classificado qualitativamente de acordo com a classificação proposta pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), expressa na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Classes indicativas de Perda de solo

Classes de perda de solo	Intervalo [t.ha⁻¹.ano⁻¹]
Baixa	0 – 10
Moderada	10 – 50
Alta	50 – 200
Muito alta	> 200

Fonte: Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (1967).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Fator Erosividade da Chuva

O fator erosividade da chuva, foi obtido por meio do programa netErosividade/SP, que utiliza a metodologia proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) e apresentou como resultado o valor de $7.797 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

3.3.2 Fator Erodibilidade do Solo

As classes de solo encontradas no levantamento de solos da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés, realizado em conformidade com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), e a espacialização do Fator K são apresentadas na Figura 3.2. As classes de solo, áreas e porcentagem em relação à área total podem ser observadas na Tabela 3.7 juntamente com o fator K que está diretamente relacionado com as classes de solo.

Tabela 3.7. Unidades de solo presentes na área urbanizada na área de estudos e fator erodibilidade do solo, expresso em $[\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}]$ adaptadas segundo normas da Embrapa (2006).

Classe de solos	Sigla	Área (km ²)	%	Fator K
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	LVAd	23,56	53,5	0,008
Latossolos Vermelhos Distróficos	LVd	11,79	26,8	0,004
Latossolos Vermelhos Distroféricos	LVdf	0,66	1,5	0,005
Neossolos Flúvicos	RU	0,07	0,2	0,035
Neossolos Litólicos Distróficos	NLd	0,03	0,1	0,036
Neossolos Litólicos Eutróficos	RLe	0,18	0,4	0,24
Nitossolos Vermelhos Distróficos	NVd	1,39	3,2	0,018
Nitossolos Vermelhos Distróferricos	NVdf	6,33	14,4	0,006
Total		44.01	100	

Fonte: Mannigel et al. (2002) e Bertoni e Lombardi Neto (2012).

A classe de solo - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico é a que mais se encontra na área estudada (53,5%) e esta localizado na área da nascente do Ribeirão Lavapés de alguns afluentes.

Os LVAd são solos profundos ou muito profundos de textura muito argilosa a argilosa. Apresentam normalmente relevo plano e suave ondulado, ocorrendo também como relevo ondulado, forte ondulado e montanhoso. A baixa fertilidade natural inibe o uso deste tipo de solo para a agricultura. Apresentam teor de silte inferior a 20% e argila variando entre 15% e 80%. São solos com alta permeabilidade à água, podendo ser trabalhados em grande amplitude de umidade. São profundos, porosos, bem drenados, bem permeáveis mesmo quando muito argilosos friáveis e de fácil preparo. Apesar do alto potencial para agropecuária, parte de sua área deve ser mantida com reserva para proteção da biodiversidade desses ambientes (EMBRAPA , 2013).

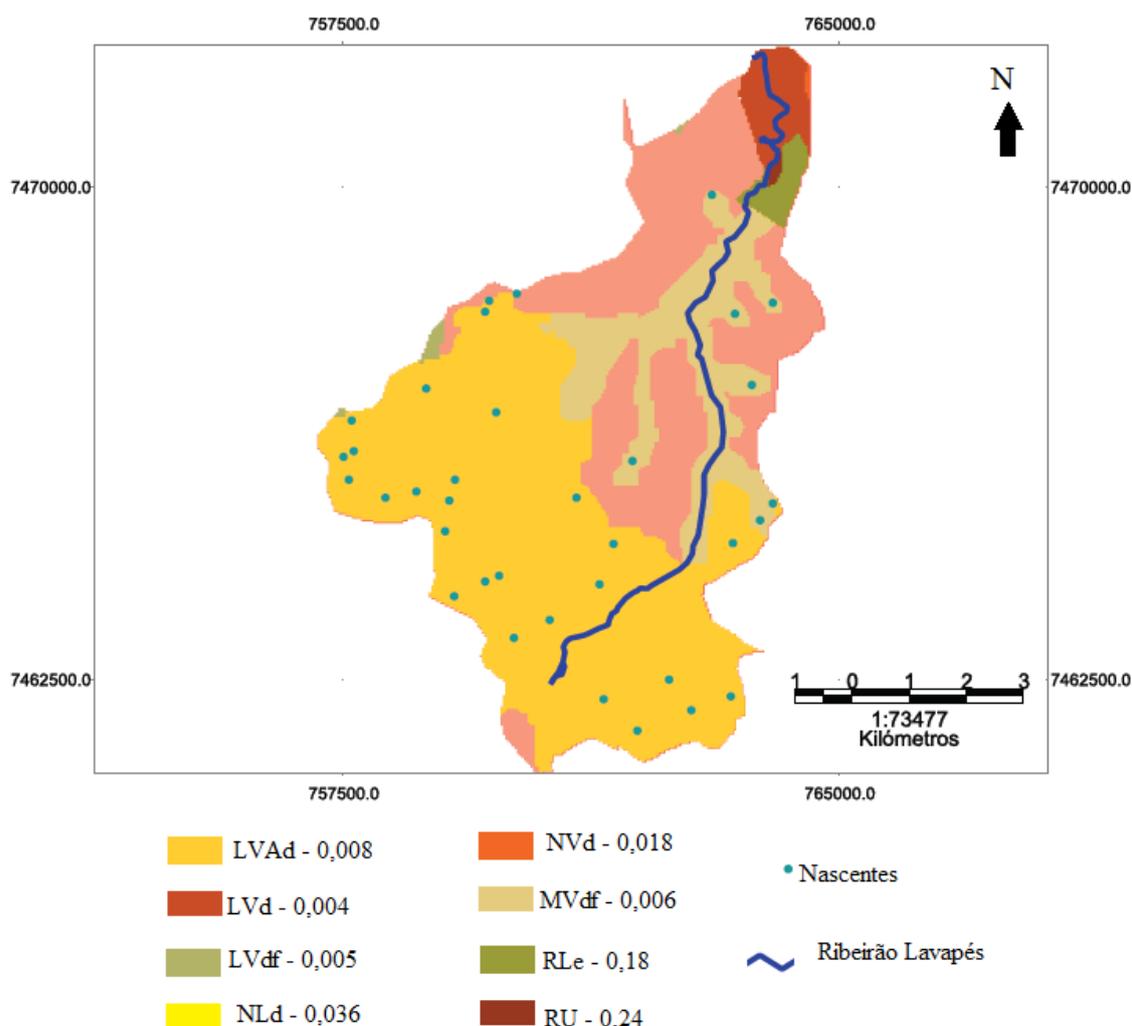


Figura 3.2. Mapa de solos e do fator K (valores expressos em $t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$) encontrados na área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés com rede de drenagem.

3.3.3 Fator Comprimento de Rampa e Declividade

Para gerar o mapa do fator LS foram elaborados os mapas de MDE e declividade. As altitudes variaram de 715 a 920 metros. Nas altitudes de 750 a 850 metros, concentra-se a maior área 34,9 km² (79,3 %) da área total.

Quanto à declividade, o mapa de classes de declividade elaborado a partir do modelo digital de elevação do terreno, é apresentado na Figura 3.3. A Tabela 3.8 mostra a área em quilômetros quadrados e porcentagem da área total das classes de declive.

Tabela 3.8. Classes de declive da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.

Classe %	Área [km²]	%	Relevo
0 a 3	9,37	21,28	Plano
3 a 6	14,26	32,40	Suave ondulado
6 a 12	16,24	36,91	Ondulado
12 a 20	3,28	7,46	Forte ondulado
20 a 40	0,85	1,92	Montanhoso
> 40	0,02	0,04	Escarpado
TOTAL	44,01	100	

O relevo predominante na área é o ondulado (declividade de 6 – 12 %), que ocupa 36,9 % da sua área, seguido do relevo suave ondulado, representando 32,4 % da área e a área plana 21,3%. As classes que variam de 12% a maior que 40% representam uma pequena área de 4,15 km².

O LS da RUSLE, calculado para a área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés pelo SIG gvSIG utilizando-se a metodologia de Villela e Mattos (1975) e Bertoni (1959) é apresentado na Figura 3.4. Vale Junior (2008) aplicou está metodologia e obteve resultados satisfatórios. O mapa apresenta os valores agrupados em classes de modo a facilitar sua visualização. A Tabela 3.9 apresenta a área das classes de LS da figura.

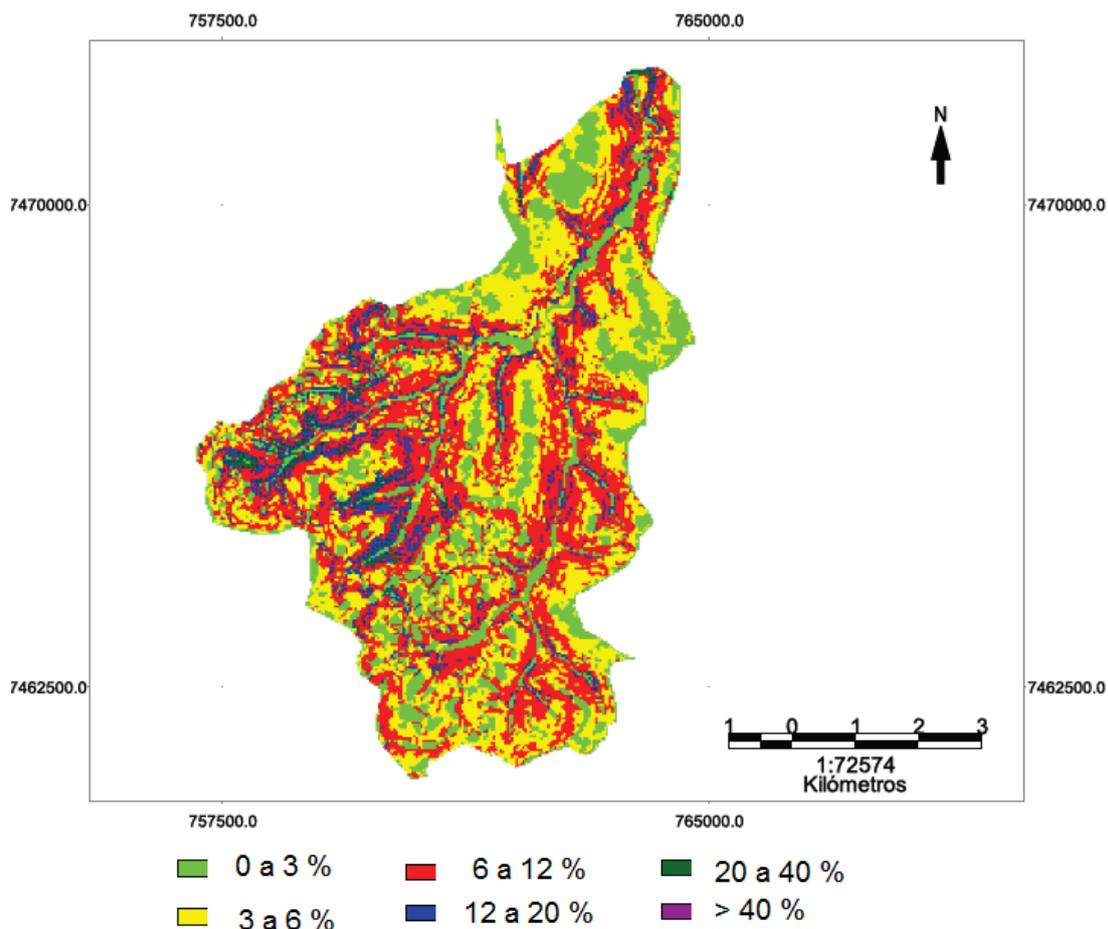


Figura 3.3. Mapa de classes de declividade da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés

Tabela 3.9. Classes de fator LS da área de estudos e respectivas áreas

Classe de LS	Área km ²	%
0 - 5	33,39	75,9
5 - 10	9,15	20,8
10 - 15	1,2	2,7
15 - 20	0,25	0,6
20 - 25	0,02	0,0
25 - 27,57	0,002	0,0
Total	44,01	100

A variação do fator LS foi de 0 a 27,57 que correspondem diretamente com as classes de declividade. A maior parte da área, 96,7% apresentou fator LS na faixa de 0 – 10. Nos intervalos entre 10 e 27,57 encontra-se aproximadamente 1,5 km² de área.

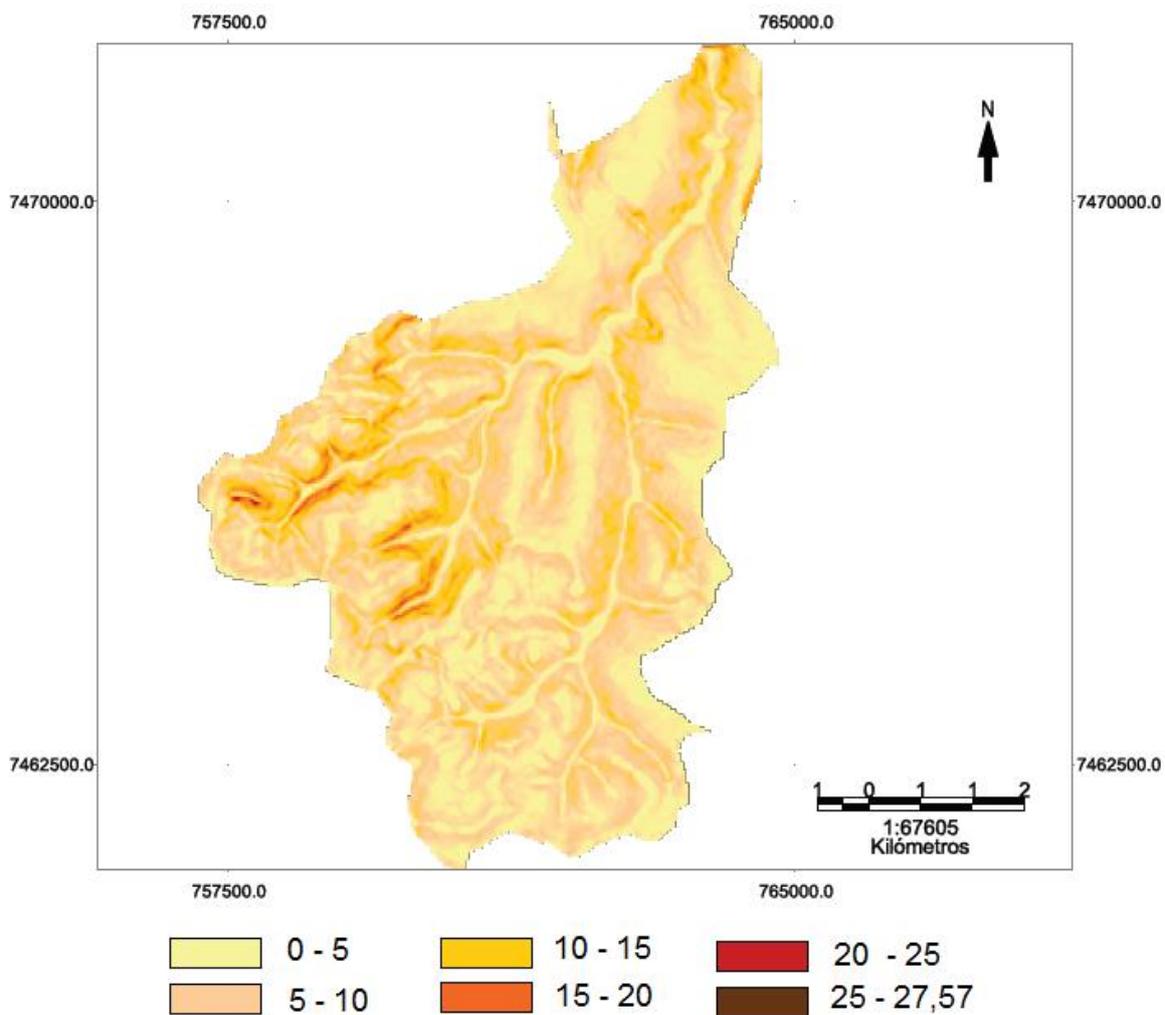


Figura 3.4. Classes do fator LS da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés

3.3.4 Mapeamento Uso e Manejo do Solo e Práticas Conservacionistas - Fator CP

Os fatores CP estão diretamente relacionados com o uso e cobertura do solo. Na área urbanizada da bacia foram determinadas 4 classes de uso que são apresentadas na Tabela 3.10 juntamente com os valores de CP. A classe que mais expõe o solo à erosão, abrange 18,2 % da área – campo/pasto. Na Figura 3.5 pode-se observar os valores especializados de CP e as classes de uso do solo

Tabela 3.10. Classes de uso do solo e fator CP da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.

Uso do solo	Área km ²	%	CP
Área construída	31,47	71,5	0
Campo/Pasto	8,01	18,2	0.01
Mata/Reflorestamento	3,87	8,8	0.005
Água	0,66	1,5	0
TOTAL	44,01	100	

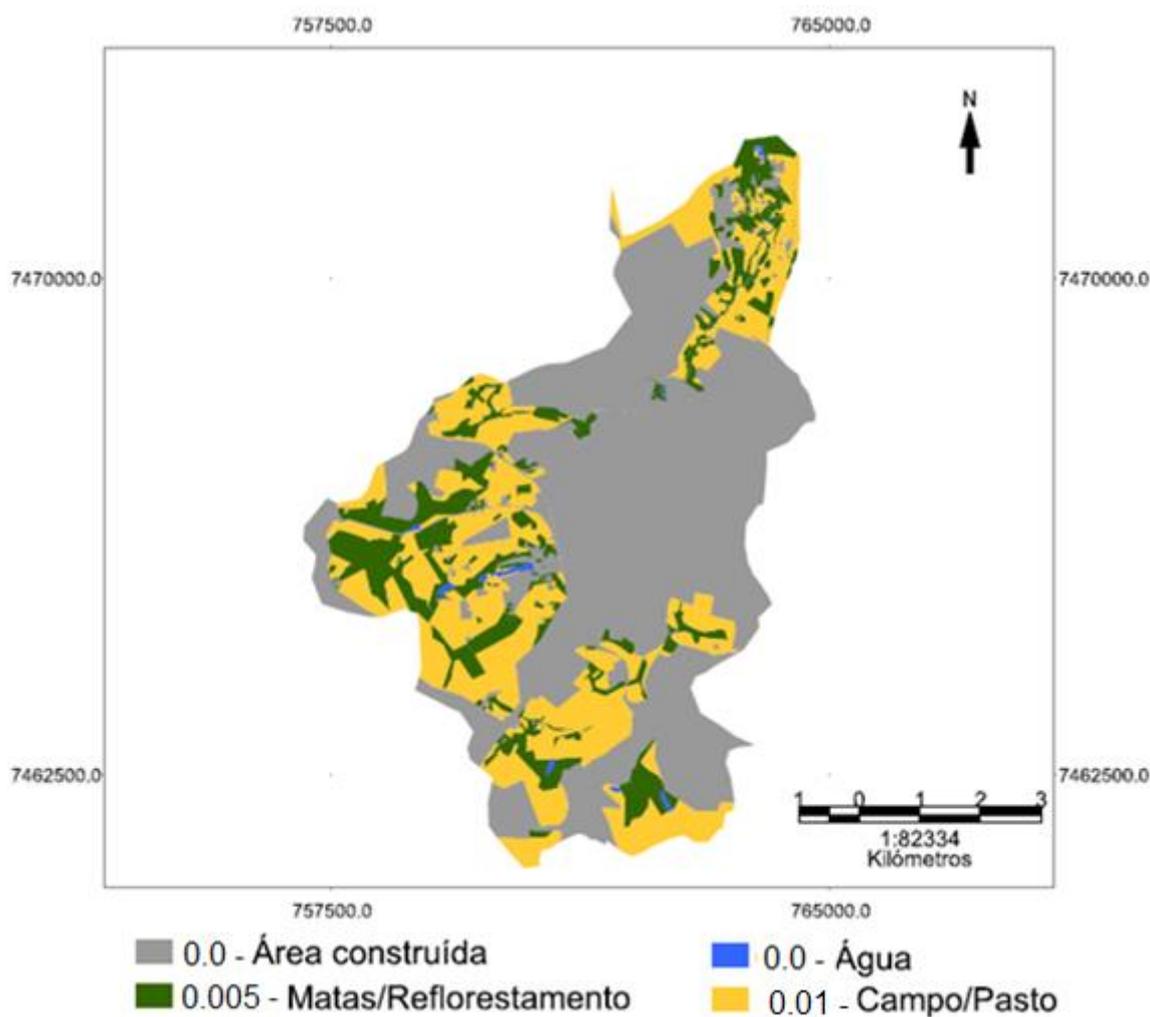


Figura 3.5. Mapa de uso do solo e fator CP da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés

3.3.5 Potencial Natural de Erosão

O mapa de Potencial Natural de Erosão da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés, obtido a partir da multiplicação dos mapas dos fatores naturais que constituem a RUSLE (erosividade da chuva, erodibilidade do solo e comprimento de rampa / declividade do terreno), é apresentado na Figura 3.6.

A Tabela 3.11 mostra as áreas e porcentagem das classes de PNE propostas por SILVA (2008).

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 3.11, observa-se que as áreas menos sujeitas à erosão natural englobam 76,6% (fraco) e 17,7% (moderado) e o restante distribui-se entre forte (2,27 km²) e muito forte (0,58 km²).

De forma geral a área de estudos não apresenta grandes problemas com relação à erosão natural, isso se deve ao fato de se tratar de uma área urbanizada, mas existem pontos críticos que merecem atenção.

Tabela 3.11. Classes de Potencial Natural de Erosão área urbanizada da Bacia do Ribeirão Lavapés e respectivas áreas.

Classe de PNE (t.ha⁻¹.ano⁻¹)	Área (km²)	%	Classificação Silva (2008)
0 – 400	33,71	76,60	Fraco
400 - 800	7,77	17,67	Moderado
800 - 1600	2,27	5,16	Forte
> 1600	0,25	0,58	Muito forte
TOTAL	44,01	100	

Comparando o mapa do PNE com o de classes de solos, nota-se que as áreas com potencial maior que 1600 t.ha⁻¹.ano⁻¹ estão localizadas principalmente tipos de solo altamente suscetíveis a erosão - Nitossolo Litólico (NLd e RLe). E também nos Neossolo flúvico e algumas manchas nos LVd, LVdf, LVAd e NVdf que apesar de serem resistentes a erosão, estas áreas são usadas como campo/pasto, possivelmente sem utilização de técnicas de manejo e conservação do solo. Na Figura 3.6 pode-se observar as áreas com potencial natural de erosão críticas.

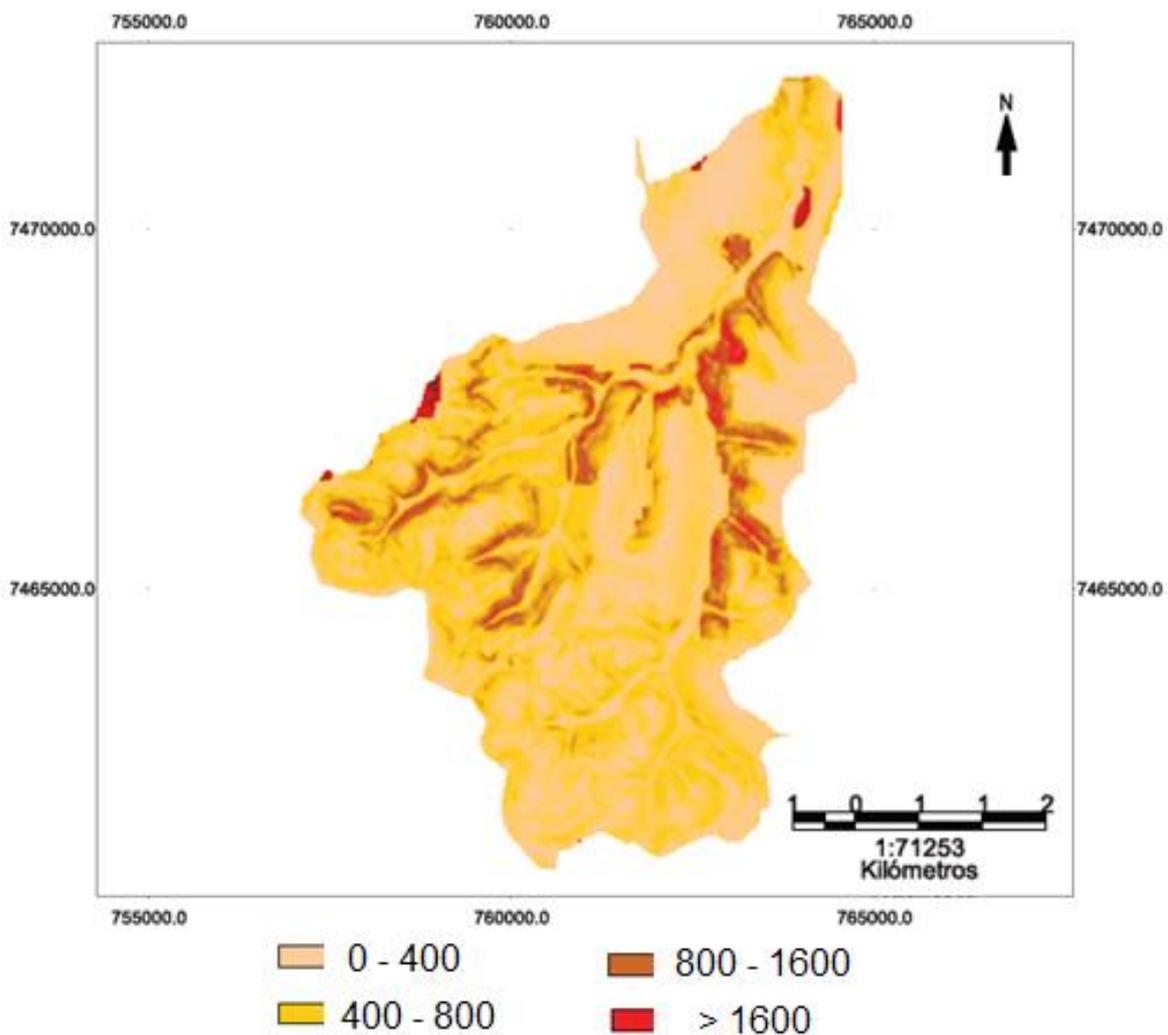


Figura 3.6. Mapa PNE da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés, como valores expressos em $t.ha^{-1}.ano^{-1}$

3.3.6 Estimativa de Perda de Solo

A Figura 3.7 apresenta a estimativa de perdas de solo por erosão da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés gerada pelo modelo RUSLE, ou seja, o produto dos fatores naturais (Potencial Natural de Erosão) e antrópicos condicionantes da erosão do solo (uso, manejo do solo e práticas conservacionistas).

Analisando a Figura 3.7, observa-se que a distribuição espacial da susceptibilidade à erosão está associada ao relevo da região e as classes de uso do solo.

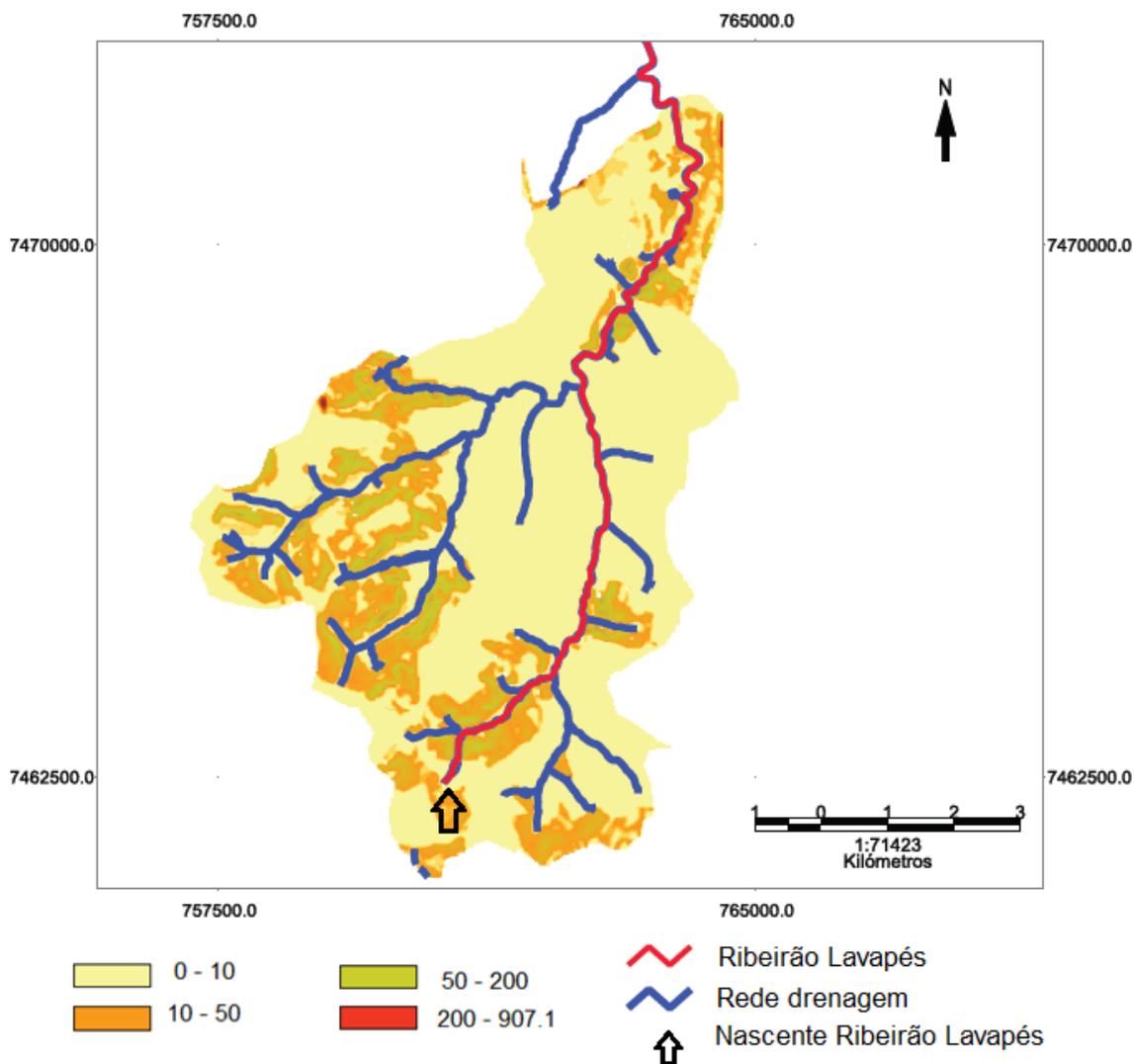


Figura 3.7. Espacialização da estimativa de perdas de solo por erosão da área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés como valores expressos em $t.ha^{-1}.ano^{-1}$

As áreas com estimativas superiores a $50 t.ha^{-1}.ano^{-1}$ estão localizadas em regiões de maior declive e classificadas como campo/pasto, totalizando $1,23km^2$ da área de estudos (Tabela 3.12).

Estas perdas classificadas como alta e muito podem ser observadas nos 8 tipos de solos presentes (LVd, LVad, LVdf, NLd, NUd, NVdf, RLe e RU) na área urbanizada da bacia do Ribeirão Lavapés.

Tabela 3.12. Classes de perda de solo com respectivas áreas, porcentagem e classificação.

Classe t.ha⁻¹.ano⁻¹	Área km²	%	Classificação FAO (1967)
0 - 10	33,47	76,1	Baixa
10 - 50	9,31	21,1	Moderada
50 -200	1,17	2,7	Alta
> 200	0,06	0,1	Muito alta
Total	44,01	100	

As perdas de solo concentradas entre 0 – 10 t.ha⁻¹.ano⁻¹ podem ser observadas nas áreas onde o fator CP é igual varia de 0 a 0,005 (área construído e mata/reflorestamento), são classificadas com baixa e cobrem 76,1% (33,47 km²) da área total.

Algumas pequenas áreas com perda muito alta podem ser observadas no tipo de solo Neossolo Litólico que são classificadas como alta susceptibilidade á erosão e existe área de Neossolo Flúvico que apesar de pouco sujeito a erosão apresenta-se na classe maior que 200 (FIGURA 3.8 a e b).

Verifica-se que a distribuição espacial de susceptibilidade à erosão está associada ao relevo da região. Na figura 3.7 pode se observar algumas manchas de alta erosividade nos tipos de solo Neossolo Litólico e Flúvico e Latossolos Vermelhos e Amarelos Distróficos. As classes de susceptibilidade acima de 50 t.ha⁻¹.ano⁻¹ se localizaram justamente nas regiões com declive mais acentuado, pois a elevação dos declives favorece a susceptibilidade à erosão (BAPTISTA , 2003).

Nota-se que perdas de solo classificadas como moderada e alta circundam a rede de drenagem e principalmente o canal principal – Ribeirão Lavapés (exceto nas áreas construídas) e até mesmo algumas nascentes estão muito próximas das áreas susceptíveis (Figura 3.8 e).

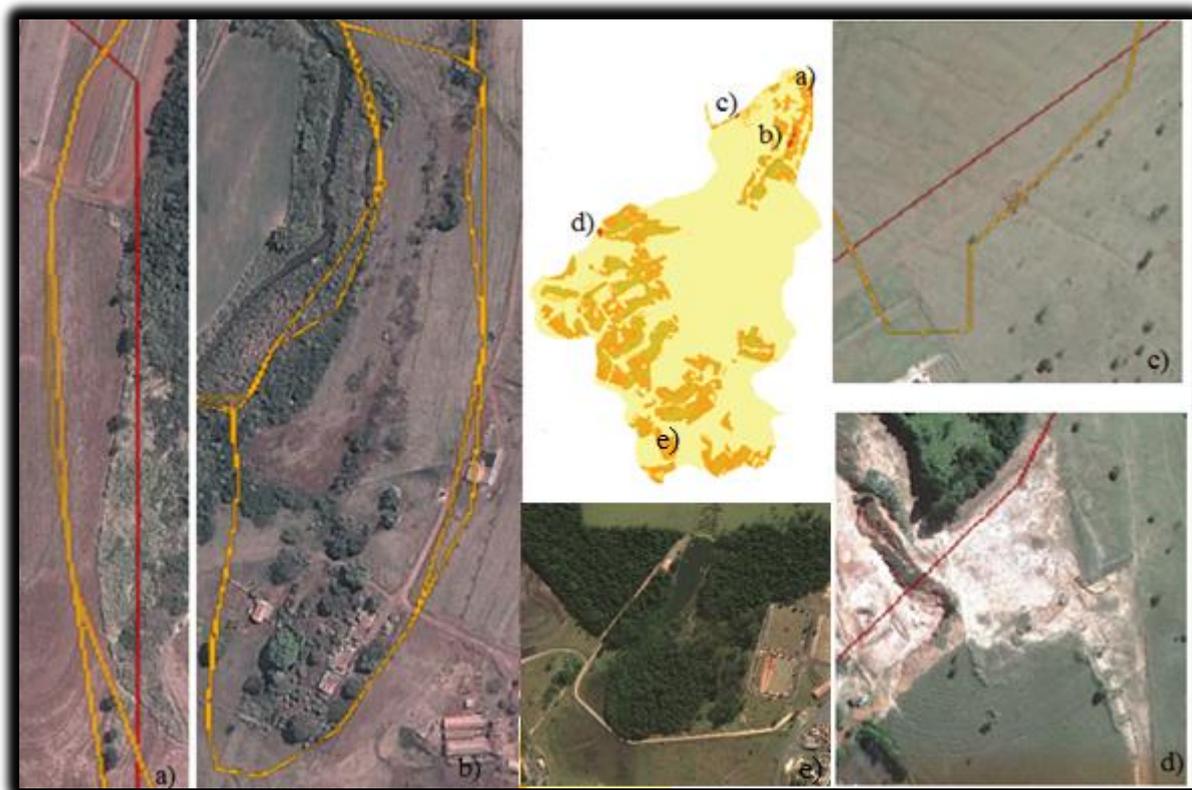


Figura 3.8. Detalhamento das áreas com potencial erosivo natural muito forte e perda de solo muito alta: a) NLd – Neossolos Litólicos Distróficos, b) RU – Neossolos Flúvicos Distróficos, c) LVAd – Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, d) LVd – Latossolos Vermelhos Distrófico e e) nascente do Ribeirão Lavapés.

Fonte: Image DigitalGlobe – Maplink 2013. Google Earth.

3.4 CONCLUSÃO

Os resultados alcançados com o emprego da Equação Universal de Perda de Solo - EUPS, na estimativa do potencial natural e erosão e de perda de solo na área urbanizada da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavapés, demonstraram ser extremamente satisfatórios. O potencial natural de erosão, com predominância da classe “Fraco”, com potencial entre 0- 400 t.ha⁻¹.ano⁻¹, correspondeu a 76,6% da área. Com relação as perdas de solo, predominou a classe “Baixa”, classificada entre 0-10 t.ha⁻¹.ano⁻¹, representa uma área de 33,47 ha (76,1%) da área total.

O fato do Ribeirão Lavapés estar próximo de áreas susceptíveis a erosão e a área ser deficitária de boa cobertura vegetal o deixa vulnerável ao assoreamento e alargamento.

O sistema de informação geográfica gvSIG mostrou-se viável na determinação dos diversos fatores da Equação Universal de Perda de Solo tornando-se possível zonear as áreas com altas perdas de solo e alto potencial natural de erosão.

3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F. F. (Ed). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009. cap.4, p.75-107.

BAPTISTA, G. M. M, **Diagnóstico Ambiental de Erosão Laminar: modelo geotecnológico e aplicação**. Brasília: Universa, 2003.140 p.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para milho e aveia em rotação com outras culturas em três tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 545-552, abr./jun. 2002

BERTONI, Jose. O espaçamento os terraços em culturas anuais, determinados em função das perdas por erosão. **Bragantia**: Boletim técnico do instituto agrônômico do Estado de São Paulo, Campinas, v. 18, n. 10, p.113-140, set. 1959.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.

BORGES, P. **A evolução dos processos erosivos na Bacia do Ribeirão Alam Grei – SP: uma contribuição ao planejamento ambiental**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.

BRANDÃO, D. **Risco de degradação dos recursos hídricos na bacia do ribeirão Pinhal–Limeira (SP): uma proposta metodológica**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas,Campinas, 2001

CARVALHO, W.A.; ESPÍNDOLA C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado**. Boletim Científico, 1. Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. 1983. 94p.

CARVALHO, M.P.; PISSARRA, T.C.T. e PAULINO, H.B. **Erosividade da chuva de Botucatu (SP): distribuição, período de retorno e probabilidade de ocorrência**. In:

Congresso Latino Americano De Conservação Do Solo, 13., Águas de Lindóia, 1996, Águas de Lindóia. Anais. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1996. CD-ROM

CARVALHO, M.P., LOMBARDI NETO, F., VASQUES FILHO, J. et al. Correlação entre o índice de erosividade EI₃₀ médio mensal e o coeficiente de chuva no município de Mococa (SP). **Científica**, São Paulo, v.19, n.1, p.1-7, 1991.

CARVALHO, W.A.; ESPÍNDOLA C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado**. Boletim Científico, 1. Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. 1983. 94p.

DISSMEYER, G. E.; FOSTER, G. R. **A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land**. Atlanta: USDA Forest Service, 1980. 40 p.

DONZELLI, P. L. et al. Técnicas de Sensoriamento Remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de Microbacias Hidrográficas. **Documentos IAC**, Campinas, n. 29, p. 91-119, 1992.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Embrapa Solos: Latossolo vermelho- Amarelo**. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/>>. Acesso em: 15 set. 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. **Cuadernos de Fomento Agropecuario da Organización de las Naciones Unidas**. Roma: FAO, 1967. n. 81, 207 p.

GENERALITAT VALENCIANA. **GVSIG: Sistema de Información Geográfica**. Generalitat Valenciana Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. Valencia – Espanha 2013. Disponível em <http://www.gvpontis.gva.es/cast/gvsig-sistemainfor/>. Acesso em 10 set 2013.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. cap. 4, p. 149-209.

LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação. Campinas: SBCS, 1991, 175p.

LOMBARDI NETO, F. **Rainfall erosivity-its distribution and relationships with soil loss as Campinas, Brasil**. West Lafayette, 1977.53p. Dissertação (Master of Science) Purdue University.

LOMBARDI NETO, F; et al. Planejamento agroambiental da microbacia hidrografica do Ribeirão Cachoeirinha, Iracemápolis, SP, utilizando-se um sistema de informações

geográficas. **5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. Anais. Bauru, SP, p.257-260, 1995.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI J. **Tolerância de perdas de terra para solo do Estado de São Paulo**. Boletim técnico n.28. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1975.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 51, n. 2, p.189-196, 1992. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051992000200009>>.

MANNIGEL, A. R. et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARQUES, J. Q. A.; BERTONI, J.; BARRETO, G. B. Perdas por erosão no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 20, n. 47, p. 1143-1182, nov. 1961.

MOREIRA, M. C. et al. Programa computacional para estimativa da erosividade da chuva no estado de São Paulo utilizando redes neurais artificiais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 14, n. 2, p. 88-92, abr./jun. 2006.

PRUSKI, F. F. Prejuízos decorrentes da erosão hídrica e tolerância de perdas de solo. In: (ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009a. p. 13-23. (cap.1)

PRUSKI, F. F. Processo físico de ocorrência da erosão hídrica. In: (ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009b. p. 24-39. (cap.2)

RANIERI, S. B. L. **Avaliação de métodos e escalas de trabalho para determinação de risco de erosão em bacia hidrográfica utilizando Sistemas de Informação Geográficas (SIG)**. 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

RENARD, K.G. et al. **Predicting soil erosion by water: guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: US Gov. Print Office, 1997. 404 p. (Agriculture Handbook, 703). Disponível em: <<http://www.techtransfer.osmre.gov/NTTMainSite/Library/hbmanual/rusle703.htm>>.

SEXTANTE (Espanha). Victor Olaya. **The SEXTANTE framework**. Disponível em: <<http://www.sextantegis.com/>>. Acesso em: 12 set. 2013.

SILVA, A. M. Potencial Natural de Erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, Mayagüez, v. 8, n. 1, p. 5-14, 2008. Disponível em: <<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/146/142>>.

SILVA, Alexandre Marco da; SCHULZ, Harry Edmar; CAMARGO, Plínio Barbosa de. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**: Estado da arte da pesquisa em erosão. 2. ed. São Carlos: Rima, 2007. 158 p.

SILVA, F. G. B. et al. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim – SP (EMBRAPA) utilizando Geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.141-148, abr./jun. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n2/a06v15n2.pdf>>. Acesso em: 8 jun. 2012

STEIN, D. P., DONZELLI, P. L, GIMENEZ, A. F.,PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na bacia do Peixe – Paranapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSAO,3., 1987, Marília. **Anais...ABGE/DAEE**, 1987. v.1, p. 105-135.

VALLE JUNIOR, R. F. Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do rio Uberaba. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2008. 222p

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: PEREIRA, V. P.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Ed.). **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: FCAV – UNESP/SBCS, 1994. p. 223-242.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e assoreamento. In: SANTOS, R. F. (org.). **Vulnerabilidade ambiental**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. cap. 4, p. 39-58.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537).

CAPÍTULO IV “ESTIMATIVA DA VAZÃO DO RIBEIRÃO LAVAPÉS”

RESUMO

A carência de dados fluviométricos em pequenas bacias hidrográficas dificulta estudos de aproveitamento hídrico. A estimativa de disponibilidade hídrica de bacias sem dados fluviométricos é normalmente feita com base em modelos hidrológicos como chuva-vazão ou por informações hidrológicas de bacias da mesma região – Regionalização de vazão. Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão foram desenvolvidos tendo como objetivo a síntese de séries de vazão em determinados locais, para finalidades como a previsão de vazões ou a síntese de vazões em locais carentes de informações. Este estudo teve por objetivo a quantificação da vazão do Ribeirão Lavapés para possível reativação da Microcentral hidrelétrica da Fazenda Experimental Lageado. Para tanto utilizou o modelo chuva-vazão Win_IPH2 desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foi introduzido no programa séries de precipitação, evaporação e dados de área da bacia, área impermeável, tempo de concentração e outros. Fez-se a calibração do programa e com isso foram gerados gráficos e dados da vazão calculada e a curva de permanência. Por meio da metodologia utilizada foi possível quantificar a vazão do Ribeirão Lavapés e gerar a Curva de Permanência para do período de janeiro de 2009 a dezembro de 2012 com resultados satisfatórios.

Palavras-chaves: chuva-vazão, regionalização de vazão, curva de permanência.

ESTIMATE OF THE FLOW LAVAPES STREAM

SUMMARY

The lack of stream flow data in small watershed studies prevents water use. The estimation of water availability basins without stream flow data is usually made based on hydrological models as rainfall-runoff or hydrological information of basins in the same region - Regionalization of flow. Hydrological models of type rainfall-runoff were developed with the objective of synthesizing series flow in certain places, for purposes such as stream flow forecasting or synthesis flows in places lacking information. This study aimed to quantify the flow at stream Lavapés for possible reactivation of HPMS hydroelectric Lageado Farm. Used for both the rainfall-runoff model Win_IPH2 developed by the Institute of Hydraulic Research, Federal University of Rio Grande do Sul was introduced in the program series of precipitation, evaporation and data watershed area, impervious area, time of concentration and others. Made up the calibration program and thus were generated graphs and flow data and the calculated flow-duration curve. Through the methodology was possible to quantify the flow of Lavapés Stream and generate the Curve Remain for the period January 2009 to December 2012 with satisfactory results.

Keywords: rainfall-runoff, flow regionalization, flow-duration curve.

4.1 INTRODUÇÃO

A realidade brasileira contempla uma carência enorme de energia para propriedades e aglomerados rurais em pontos isolados da rede interligada de transmissão de energia elétrica, assim como para localidades próximas a perímetros urbanos e distritos agroindustriais de grande demanda energética.

Entretanto quando se parte para o estudo de viabilidade econômica e social dos aproveitamentos de pequeno porte, depara-se com a quase total ausência de dados fluviométricos de pequenos mananciais para o desenvolvimento das avaliações de potencialidades energéticas.

Quando ocorre a necessidade de estudo da disponibilidade hídrica do pequeno manancial, o profissional habilitado, deparando-se com a carência de dados fluviométricos para a avaliação pretendida, fica sujeito a grandes incertezas quanto aos resultados da quantificação de vazões. Em consequência, por avaliações incorretas pode considerar viável um aproveitamento inviável. Do modo inverso, também pode considerar inviável um aproveitamento adequado à sociedade.

O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil, que permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (Tucci, 2005). Entretanto, os modelos hidrológicos possuem limitações básicas como a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade em definir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos.

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão foram desenvolvidos tendo como objetivo a síntese de séries de vazão em determinados locais, para finalidades como a previsão de vazões ou a síntese de vazões em locais carentes de informações, entre outros. Além do interesse em séries simuladas de vazões em diferentes regiões, as questões ambientais exigem a compreensão do comportamento da bacia, de como os processos físicos acontecem e interagem dentro de seus limites.

O processo de modelagem supõe a existência de amostra de eventos que possibilitem o ajuste dos parâmetros de modo a representar as condições locais do escoamento em estudo. Ocorre que muitas vezes a necessidade de informações recai em locais com ausência de dados. Uma rede hidrológica raramente cobre todos os locais de interesse em uma bacia hidrográfica, o que gera lacunas espaciais que precisam ser

preenchidas. Nessas situações, um procedimento usual é aplicação de estudos de regionalização e simulação. Em regiões com dados deficientes é possível estender as séries de vazões através de modelos hidrológicos chuva-vazão e obter séries de vazões mais representativas.

Em geral os parâmetros para a estimativa de vazões estão associados às características fisiográficas da bacia hidrográfica, tais como: área de drenagem, comprimento do rio principal, declividade média do rio principal, densidade de drenagem e coeficiente de compacidade, é outra possibilidade que vem sendo utilizada para estudos de grande abrangência, pois permite inferir sobre a vazão de determinadas bacias que, ou não têm registros, ou os possuem de forma insuficiente.

Há, portanto, uma grande necessidade de estudos hidrológicos confiáveis para pequenas bacias que levem em conta a carência de dados fluviométricos. Contudo, este estudo teve por objetivo a estimar a vazão Ribeirão Lavapés na área de contribuição da Microcentral Hidrelétrica do Lageado.

4.1.1 Modelos Hidrológicos

4.1.1.1 Aspectos Gerais

Um modelo, segundo Tucci (2005), é a representação simplificada de algum objeto ou sistema, numa forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.

Um modelo matemático, por sua vez, é um conjunto de equações que é utilizado para representar de forma simplificada o comportamento de um sistema físico mais complexo. Um sistema é uma estrutura qualquer com procedimentos particulares que, a partir de um estímulo, gera uma resposta. O objetivo da modelagem é avaliar, de maneira coerente, quais as possíveis respostas de um sistema a partir de certos estímulos, utilizando para isto uma representação simplificada do comportamento ou da estrutura e das transformações internas deste mesmo sistema (MACHADO, 2005).

Devido à complexidade da natureza física, o modelo leva em consideração algumas simplificações dos fenômenos existentes no processo. Entretanto, estas simplificações não devem invalidar os resultados obtidos pelo modelo, sendo que as diferenças entre a realidade física do sistema e a do modelo devem ser aceitáveis para os fins almejados. Isto justifica a simplificação dos sistemas e a sua consequente

utilização.

Quando as equações do modelo procuram reproduzir os principais processos envolvidos no ciclo hidrológico, e nestas equações os parâmetros atribuídos no modelo possuem significado físico, estes são denominados de modelos conceituais. Esses modelos apresentam, em geral, uma estrutura complexa e um grande número de parâmetros. Estes parâmetros podem ser reduzidos ou não, e apresentar, em certos casos resultados satisfatórios.

4.1.1.2 Classificação dos Modelos

Os modelos apresentam as seguintes classificações, segundo Tucci (2005), sendo estas: estocásticos ou determinísticos; empíricos ou conceituais; contínuos ou discretos; concentrados ou distribuídos; estacionários ou dinâmicos.

O modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Se não forem aplicados os conceitos de probabilidade durante a elaboração do modelo, este é denominado de determinístico. Assim sendo, o modelo é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída. Os modelos são ditos empíricos, quando utilizam relações baseadas apenas em observações. A sua abrangência é especificada para aquela região para a qual as relações foram estimadas. Os modelos empíricos em certos casos não possibilitam fazer extrapolações confiáveis. Já os modelos conceituais são baseados em processos, sendo em geral mais complexos que os empíricos, pois eles procuram descrever os principais processos físicos que envolvem determinado fenômeno estudado. Os fenômenos naturais variam continuamente no tempo e no espaço, podendo ser representados por modelos discretos. A escolha do intervalo ou passo de tempo no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. A precisão dos resultados pode ser melhorada com a redução do intervalo de tempo, mas isso exige maior custo em processamento computacional, o que, antigamente, era importante (CHOW et al, 2005).

Os modelos ainda podem ser classificados como concentrados, os quais consideram a uniformidade de todas as variáveis de entrada na área estudada, e os distribuídos, em que considera a variabilidade espacial encontrada nas diversas

variáveis do modelo. Quando a discretização do espaço é feita, cada elemento representa a homogeneidade existente em toda a área da bacia. Modelos distribuídos mais realistas consideram também a existência da relação espacial entre os elementos vizinhos. Os modelos classificados como estacionários descrevem o fenômeno em determinado momento, e os parâmetros não variam com o tempo. Enquanto que, para os modelos dinâmicos, os parâmetros são função do tempo (TUCCI, 2005).

4.1.1.3 Aplicação dos Modelos

Os modelos chuva-vazão são ferramentas de abordagem dos processos do ciclo hidrológico de maneira simplificada, com o ideal de avaliar qual é a resposta em termos de vazão de uma dada bacia hidrográfica em função da precipitação e das outras variáveis. Esses modelos podem descrever os processos que ocorrem na bacia em função da precipitação, evaporação, etc.

Como os modelos apresentavam muitos parâmetros para serem utilizados na modelagem hidrológica, na década de 70, recorreu-se à modelagem de processos hidrológicos com os parâmetros mais importantes. Dessa simplificação era possível obter resultados equivalentes aos dos modelos que representam quase todos os processos, devido à pequena sensibilidade dos parâmetros. Logo após, seguindo essa linha, surgiram os modelos com menor número de funções e parâmetros como o IPH II, seguindo o princípio de parcimônia dos parâmetros, e mais eficientes para o uso na engenharia.

O modelo IPH II foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulica/Universidade Federal do Rio Grande do Sul - IPH/UFRGS (2006), no final a década de 70, com o objetivo de aplicação em projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas. O modelo IPH II é definido como um modelo determinístico - conceitual, para simulação chuva-vazão. O IPH II tem como uma de suas características, uma interface simples, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseado em metodologias bem difundidas. O modelo é constituído dos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação; separação de escoamento; propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos (Tucci, 2005), representando o modelo chuva vazão do tipo concentrado.

O modelo baseia-se num algoritmo de separação de escoamento,

desenvolvido com uso da equação da continuidade em combinação com a equação de Horton (1945), e uma função empírica para a percolação, desenvolvida por Berthelot em 1970. Este algoritmo foi aplicado para compor o modelo precipitação-vazão às bacias dos rios Capivari (Santa Catarina), Cauca (Colombia) e Chasqueiro (RS), pelos respectivos autores, Berthelot (1972), Sanchez (1972) e Munoz e Tucci (1974) (apud Tucci, 2005) e apresentou resultados convincentes. Os referidos algoritmos foram utilizados em conjunto, com a consideração das perdas, do escoamento superficial e do escoamento subterrâneo. O algoritmo de escoamento foi modificado, para apresentar um número mínimo de parâmetros, e o modelo foi implementado por Tucci e Campana em 1993 (apud TUCCI, 2005).

4.1.1.4 Calibração do Modelo

A calibração é uma das etapas consideradas nos modelos hidrológicos, pois visa determinar os valores dos parâmetros do modelo, para que os valores calculados se aproximem aos resultados medidos em campo. Esta calibração pode ser por tentativa e erro ou automática.

O método da calibração por tentativa e erro consiste em testar diferentes conjuntos de parâmetros até alcançar um vetor de valores dos parâmetros que resulte numa representação mais próxima da resposta natural da bacia hidrográfica para aquela precipitação. Este método exige a experiência do usuário do modelo, pois a correta interpretação dos parâmetros proporciona a convergência dos valores para um nível de precisão desejada (BRAVO et al. 2006a).

O método da calibração automática, em geral, consiste na busca de um vetor adequado de parâmetros, mediante métodos matemáticos de otimização. A otimização é realizada a partir da minimização ou maximização de uma função-objetivo baseada nos erros entre as séries de vazão observada e simulada. A função-objetivo é a representação numérica desta diferença, entre os valores das vazões observadas e os das vazões calculadas pelo modelo, e a calibração consiste na busca de um vetor de parâmetros representativo, com o ideal de encontrar o ponto ótimo desta função. A cada iteração, o algoritmo calcula o novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção do valor ótimo para a função objetivo, quando então se verifica a convergência e encerra-se o processo

iterativo (Collischonn e Tucci, 2003).

A versão WIN_IPH II (Bravo et al. 2006a) do modelo IPH II, possibilita realizar a calibração do modelo de forma automática, além da manual, com base em dois métodos numéricos de otimização: monobjetivo e multiobjetivo. O algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – Universidade Arizona) é utilizado na calibração automática monobjetivo e o algoritmo MOCOM-UA (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metrópolis – Universidade de Arizona) é utilizado na calibração automática multiobjetivo. Esta versão tem características de promover uma interface melhor entre o modelo e o usuário, através da apresentação dos resultados de diferentes interfaces em forma de gráficos e animações (BRAVO et al., 2006b).

4.1.2 Modelo IPH II

O modelo IPH II é um modelo conceitual que simula o processo chuva-vazão, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseia-se nos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação; separação de escoamento; propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos (BRAVO, 2006a).

Os parâmetros que compõem o modelo são:

R_{max} - Capacidade máxima do reservatório de interceptação [mm];

I_0 - Capacidade de infiltração para $t=0$ [mm.h⁻¹];

I_b - Capacidade de infiltração mínima [mm.h⁻¹];

h - Parâmetro de decaimento da infiltração no solo [adm];

K_{sup} - Parâmetro de propagação do escoamento superficial [h];

K_{sub} - Parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo [h];

t_c - tempo de concentração da bacia [h];

AIMP - Porcentagem de área impermeável na bacia [%].

4.1.2.1 Perdas por Evaporação e Interceptação

Da precipitação que chega à superfície, parte é perdida por evaporação e parte é retida pela interceptação. A precipitação interceptada pela cobertura vegetal e depressões do solo é modelada por um reservatório que tem uma capacidade máxima $R_{máx}$

(parâmetro do modelo) e uma variável de estado R_t (Figura 1). A precipitação restante é a entrada do algoritmo de separação do escoamento.

Quando a precipitação não é suficiente para atender a evapotranspiração potencial, parte é atendida pelo reservatório de perdas e o restante pode ser retirado do solo, de acordo com seu conteúdo de umidade. A retirada de água do solo é obtida por uma relação linear entre a porcentagem de evapotranspiração potencial e a umidade do solo através da Equação 4.1.

$$E_t = \frac{EP_t \cdot S_t}{S_{max}} \quad (4.1)$$

Onde:

E_t - evapotranspiração no tempo t [mm];

EP_t - evapotranspiração potencial [mm];

S_t - estado de umidade da camada superior de solo [mm];

S_{max} - capacidade máxima de umidade da camada superior do solo [mm].

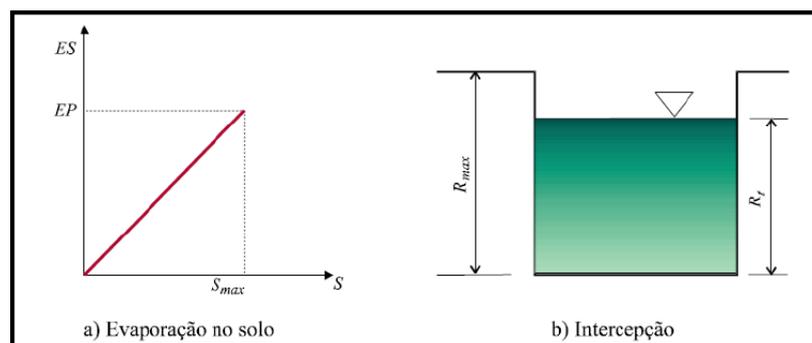


Figura 4.1. Perdas por evaporação no solo e interceptação (Tucci, 2005).

4.1.2.2 Separação do Escoamento

A parcela de precipitação resultante pode gerar escoamento superficial ou infiltrar no solo. A parcela de água que precipita sobre áreas impermeáveis gera escoamento superficial sem que ocorra infiltração. O parâmetro utilizado para definir a porcentagem de área impermeável na bacia é representado por AIMP. A infiltração pode ser obtida pela equação de Horton (19393) (Equação 4.2) e a percolação pela Equação 4.3, proposta por Tucci (2005):

$$I_t = I_b + (I_o - I_b) \cdot h^t \quad (4.2)$$

$$T = I_b \cdot (1 - h^t) \quad (4.3)$$

Onde:

I_t - capacidade de infiltração no tempo t [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$];

I_b - capacidade de infiltração quando o solo está saturado [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$];

I_0 - a capacidade de infiltração do solo quando a umidade é S_0 [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$] e

$h = e^{(-Kt)}$, onde K é um parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo [adm].

A equação de continuidade aplicada à zona superior do solo, conforme Figura 4.2, é expressa pela Equação 4.4:

$$\frac{dS}{dt} = I - T \quad (4.4)$$

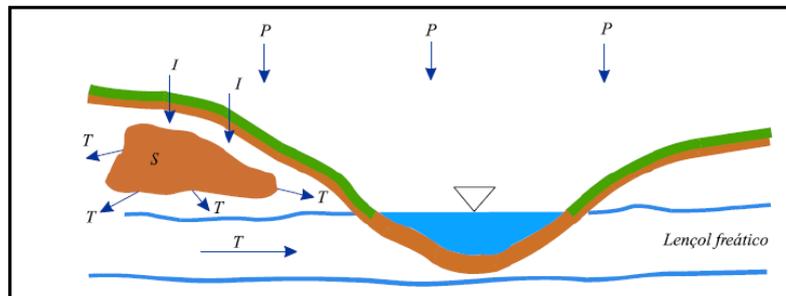


Figura 4.2. Continuidade na camada superior do solo (Mine, 1998).

Substituindo-se as Equações 4.3 e 4.4 na Equação 4.5 e integrando no intervalo $t=0$ até t resulta:

$$S = S_0 + \left(\frac{I_0}{\ln h} \right) \cdot (h^t - 1) \quad (4.5)$$

Onde:

S_0 - capacidade de campo, ou estado da umidade de solo quando se inicia a percolação [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$];

I_0 - capacidade de infiltração correspondente [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$].

No modelo IPH II geralmente adota-se S_0 igual a zero. Isolando-se o termo h^t nas Equações 4.2 e 4.3 e substituindo esse termo na Equação 4.5, resultam as seguintes duas Equações (4.6 e 4.7) que relacionam o armazenamento com a infiltração e a percolação (Figura 4.3):

$$S_t = a_i + b_i \cdot I_t \quad (4.6)$$

$$S_t = a_t + b_i \cdot I_t \quad (4.7)$$

Onde:

$$a_i = \frac{(-I_0^2)}{[\lnh. (I_0 - I_b)]}$$

$$b_i = \frac{I_0}{[\lnh. (I_0 - I_b)]}$$

$$a_t = 0$$

$$b_t = \frac{(-I_0)}{[\lnh. I_b]}$$

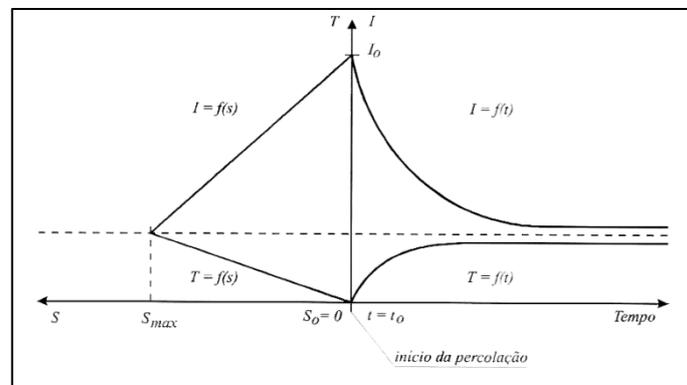


Figura 4.3. Funções das equações de balance, infiltração e percolação (TUCCI, 2005).

Podem ocorrer duas situações no cálculo dos volumes superficial e percolado, sendo que uma delas compreende duas alternativas. A precipitação utilizada em todos os cálculos é a que resulta da aplicação do algoritmo de perdas.

4.1.2.3 Propagação Superficial Subterrânea

O escoamento superficial é calculado com base no método de Clark. Este método utiliza o histograma tempo-área (HTA) para representar o efeito de translação e o reservatório linear simples para o amortecimento Equação 4.8 (Figura 4.4).

$$P_t = \sum_{i=1}^t V_{e_{t-i-1}} f_i \quad (4.8)$$

Onde:

P_t - precipitação efetiva [mm],

V_{e-i-1} - volume escoado superficialmente [$m^3 \cdot s^{-1}$], e

f_i - ordenada i do histograma tempo-área.

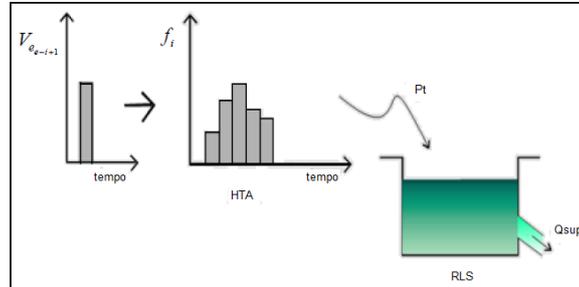


Figura 4.4. Método de Clark (Mine, 1998).

O histograma tempo-área pode ser determinado através do conhecimento detalhado da bacia hidrográfica. Quando não existem informações suficientes para tanto, pode-se utilizar o histograma tempo-área sintética, que é obtido admitindo-se que o tempo de percurso é proporcional à distância do ponto em estudo à seção principal. Considera-se a área de contribuição relacionada ao tempo de percurso pelas Equações 4.9 e 4.10:

$$Ac = aT^n \quad 0 < T' < \frac{1}{2} \quad (4.9)$$

$$Ac = 1 - a(1 - T')^n \quad \frac{1}{2} < T' < 1 \quad (4.10)$$

Onde:

Ac - área contribuinte acumulada expressa relativamente à área total [m^2];

T - tempo em unidades do tempo de concentração t_c [h];

n - coeficiente que varia com a forma da bacia [adm];

a - $0,5^{1-n}$

Cada lamina de chuva efetiva é distribuída no tempo pelo HTA e filtrada pelo reservatório linear simples (RLS). O escoamento superficial é definido pelo método do reservatório linear simples por meio da Equação 4.11.

$$Q_{s_{t+1}} = Q_{s_t} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\Delta k_s}} + V_{s_{t+1}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta k_s}}\right) \quad (4.11)$$

Onde:

Q_{st} - vazão superficial no instante t [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$];

K_s - tempo médio de esvaziamento do reservatório [h];

V_s - definido por meio da Equação 4.12.

$$V_{s_t} = \sum_{i=r}^t V_{e_{t-i+1}} \cdot f_{p_i} + \sum_{i=r}^t P_{t-i+1} \cdot f_{m_i} \quad (4.12)$$

Finalmente, a propagação do escoamento subterrâneo é obtida também pelo método do reservatório linear simples através da Equação 4. 13.

$$Q_{\text{sub}_{t+1}} = Q_{\text{sub}_t} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{K_{\text{sub}}}} + V_{p_{t+1}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{K_s}}\right) \quad (4.13)$$

Onde:

Q_{sub_t} - vazão subterrânea no instante t [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$];

K_{sub} - tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo [h];

V_p - volume percolado [mm].

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudos

A área estudada envolve parte inicial da bacia do Ribeirão Lavapés, onde a principal nascente deste curso d' água, ate a barragem da Microcentral Hidrelétrica da Fazenda Lageado, área urbana do município de Botucatu.

A área possui extensão de 44,01 km^2 e está geograficamente localizada entre as coordenadas 22°43'12" de latitude Sul e 48°29'43" de longitude Oeste de Greenwich, com altitudes variando entre 715 e 920 metros (Figura 4.5).

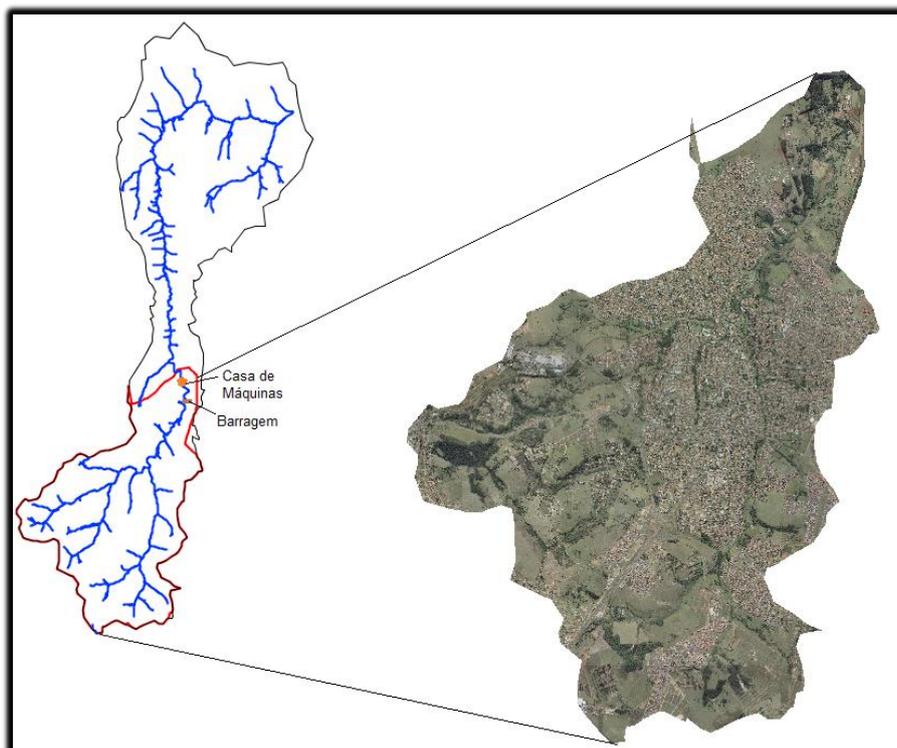


Figura 4.5. Localização da área de contribuição da Microcentral Hidrelétrica Lageado na Bacia do Ribeirão Lavapés.

4.2.3 Dados da área de contribuição

Os dados da bacia área em quilômetros quadrados, área impermeável, comprimento o talvegue do Ribeirão Lavapés e desnível foram obtidos junto ao banco de dados do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas de Botucatu – GEPAG.

O Coeficiente forma do histograma tempo área sintético foi obtido de acordo com as recomendações do Manual de conceitos do IPH2 (Bravo et al. 2006a), onde este valor pode ser 1, 2 ou 1,5. E o valor do tempo de concentração foi calculado utilizando a Equação 4.14 da “Califórnia Culverts Practice” em 1942 que é uma adaptação da equação de Kirpich em 1940 (PAIVA; PAIVA, 2003).

$$tc=57. \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (4.14)$$

Onde:

t_c - tempo de concentração [min];

L - comprimento do talvegue [km];

H - desnível entre duas seções de análise [m].

4.2.4 Dados Pluviométricos e de Evaporação

Os dados pluviométricos e de evaporação foram obtidos na Estação Climatológica da Fazenda Experimental Lageado, setor de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu/SP. Trabalhou-se com os anos de 2009, 2010, 2011 e 2012.

4.2.5 Métodos

A Figura 4.6 apresenta a estrutura metodológica da utilização do programa.

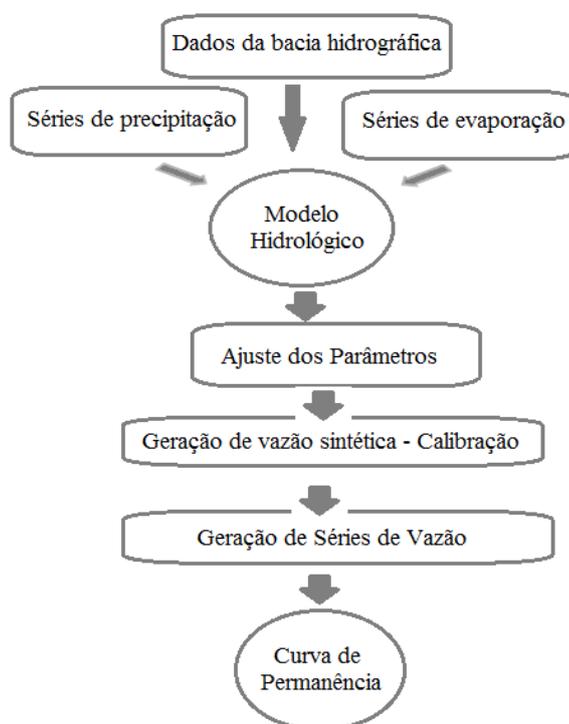


Figura 4.6. Estrutura metodológica do Win_IPH2.

4.2.5.1 Definição dos Dados de Entrada para Simulação do Processo Chuva-Vazão

O modelo IPH II na versão Win_IPH2 elaborada por Bravo et al. (2006a) foi a ferramenta utilizada neste trabalho para simular a vazão a partir dos dados de precipitação e evaporação.

- Discretização temporal - intervalo de tempo da simulação: 1440 min que corresponde a 1 dia;
- Dados da bacia:
 - Área da bacia: 44,01 km²;
 - Área impermeável: 71,5%;
 - Coefficiente de forma do histograma tempo área sintético: 1,5 (BRAVO, 2006a);
 - Tempo de concentração: 2 [h];

4.2.5.2 Calibração

Para a calibração do modelo são necessários dados de vazão, mas, como a bacia em estudos não possui estes dados, neste caso a única forma de checar se um método de calibração pode atingir o ótimo global é testa-lo usando uma série de vazões geradas pelo próprio modelo utilizando-se os parâmetros da Tabela 4.1 onde adotou-se os intervalos dos valores sugeridos na literatura, como nos trabalhos de COLLISCHONN; TUCCI, (2001).

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros do modelo IPH II para geração da serie sintética (COLLISCHONN ;TUCCI, 2001).

Parâmetro	Unidade	Valor
I _o	mm.Δt ⁻¹	50,0
I _b	mm.Δt ⁻¹	1,0
h	-	0,8
K _s	Δt ⁻¹	5,0
K _{sub}	Δt ⁻¹	100,0
R _{max}	mm	4,0
Alfa	-	2,0

Gerada a vazão sintética a partir dos dados de precipitação e vazão inicia-se a etapa de calibração automática monobjetivo - Algoritmo SCE-UA ajustando-se os limites dos parâmetros conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Limites dos Parâmetros que serão utilizados na calibração do Modelo IPH II (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
I_o	10,0	300,0
I_b	0,1	5,0
h	0,01	1,00
K_s	0,01	10,0
K_{sub}	10,0	500,0
R_{max}	1,0	5,0
Alfa	0,01	20,0

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os hidrogramas das vazões calculadas em m^3s^{-1} (Linha azul) e simuladas (linha preta) pelo modelo no processo de verificação, com uso dos parâmetros obtidos do processo de calibração. E as séries das precipitações (na parte superior das figuras) utilizadas como modo de entrada no programa.

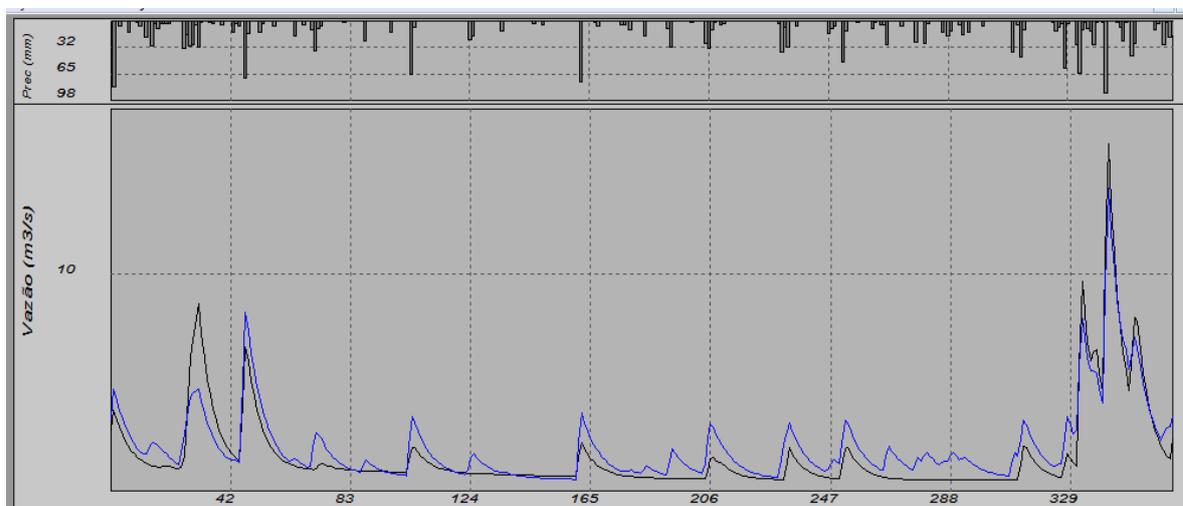


Figura 4.7. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2009.

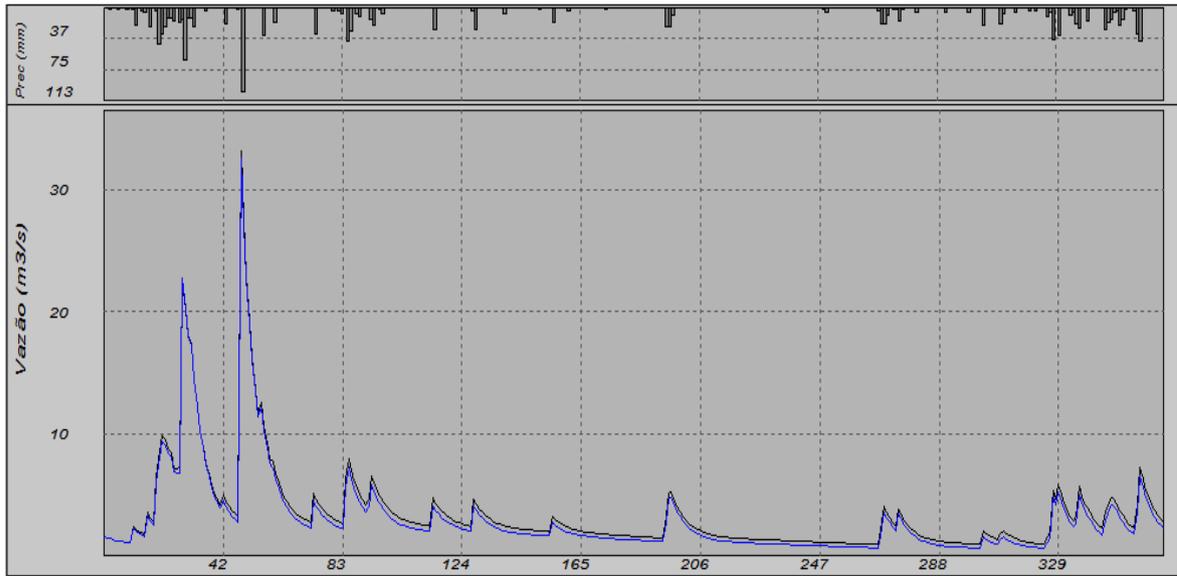


Figura 4.8. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2010.

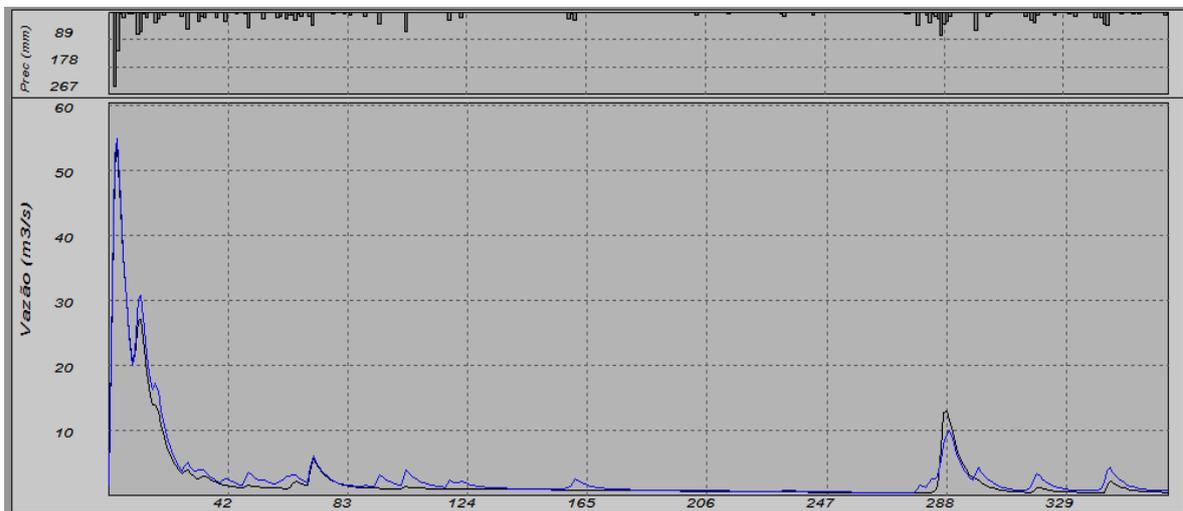


Figura 4.9. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2011.

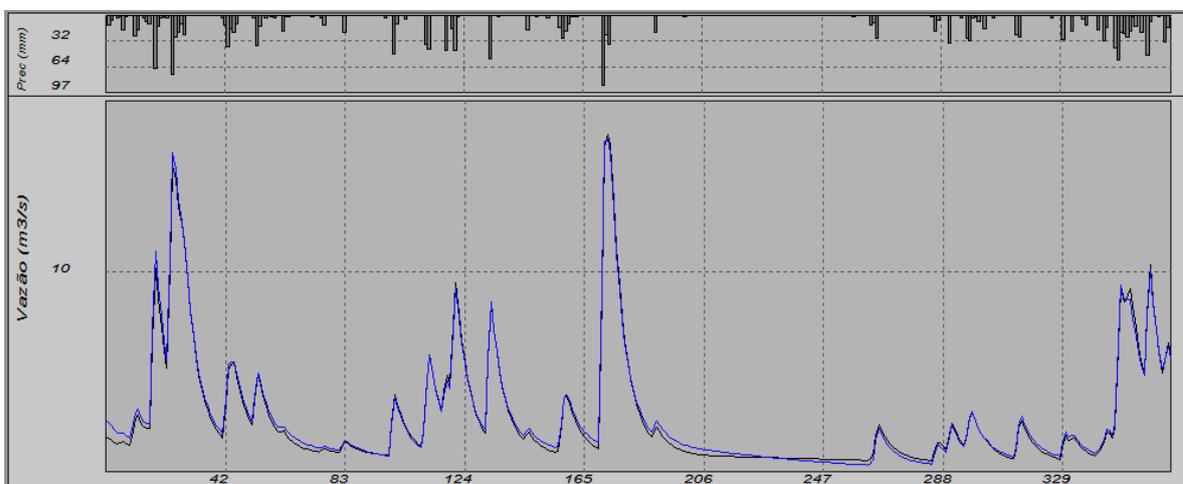


Figura 4.10. Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01 a 31/12/2012.

As séries de vazões de verificação foram utilizadas neste procedimento para avaliar o desempenho do modelo a partir das vazões simuladas para o conjunto de parâmetros obtidos da calibração com as estatísticas pontuais de entrada como mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Valores dos parâmetros obtidos na calibração para os anos de 2009 a 2012.

Parâmetro	2009	2010	2011	2012
I_o [mm.Δt ⁻¹]	28,700	11,275	42,237	21,002
I_b [mm.Δt ⁻¹]	5,655	4,999	1,437	1,375
h	0,010	0,959	0,853	0,015
K_s [Δt ⁻¹]	8,025	3,858	3,661	3,895
K_{sub} [Δt ⁻¹]	12,515	31,750	10,001	49,997
R_{max} [mm]	4,999	4,999	4,999	4,999
Alfa	0,010	18,879	19,978	19,994
Desvio padrão	1,01	0,958	1,022	1,212

Na Figura 4.11 pode se observar a curva de permanência calculada pelo Win_IPH2. A curva representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões no período de um ano para a área de estudos na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, fornecendo a porcentagem de tempo que uma cada vazão é igualada ou superada no período definido.

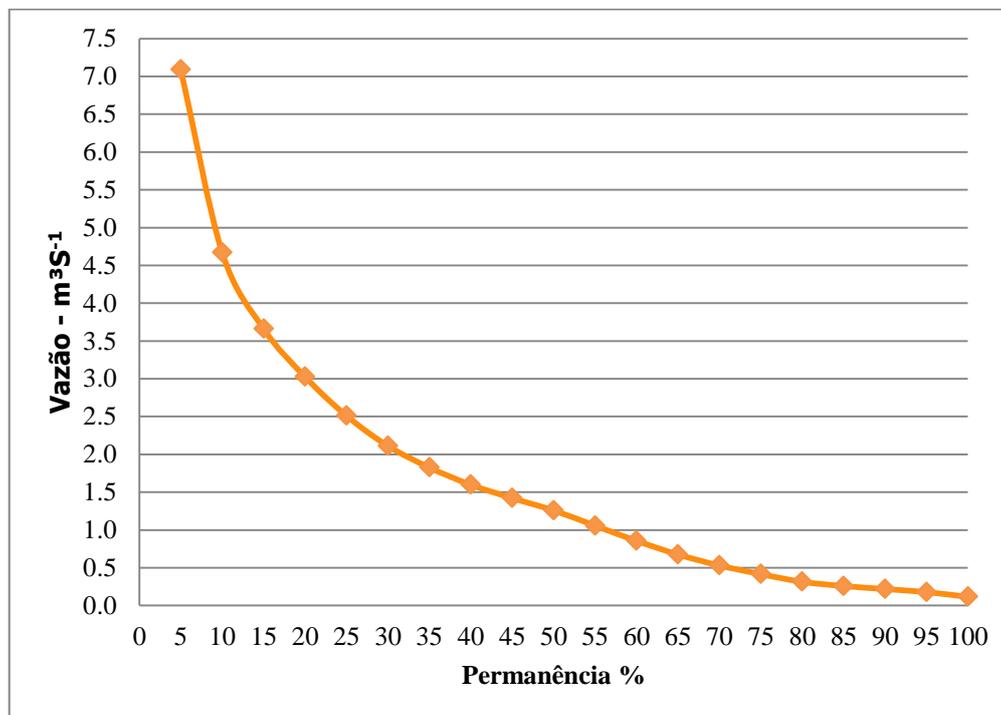


Figura 4.11. Curva de Permanência do período de 01/01/2009 a 31/12/2012.

Na Tabela 4.4 é apresentado os valores da curva de permanência especializados em vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) pela porcentagem do período de 01 de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2012 calculados pelo Win_IPH2.

Tabela 4.4. Valores especializados da curva de permanência no período de 2009 a 2012.

Permanência %	5	10	15	20	25	30	35	40	50
Vazão $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	7,09	4,67	3,66	3,03	2,51	2,11	1,82	1,60	1,26
Permanência %	55	60	70	75	80	85	90	95	100
Vazão $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	1,06	0,86	0,53	0,42	0,31	0,26	0,22	0,18	0,12

De acordo com Eletrobrás (1985), para as MCH a vazão de projeto para sistemas isolados (vazão de turbina) a ser adotada é a vazão com 95% de ocorrência e sistemas interligados a rede de energia adota-se a vazão a 35% de permanência.

4.4 CONCLUSÃO

Por meio da metodologia utilizada foi possível quantificar a vazão do Ribeirão Lavapés e gerar a Curva de Permanência para do período de janeiro de 2009 a dezembro de 2012 com resultados satisfatórios.

O programa Win_IPH2 mostrou-se uma ferramenta viável para atender os objetivos quanto na quantificação de vazão tanto na geração da curva de permanência na área sem registros fluviométricos.

4.5 REFERENCIAS

- BRAVO, J.M.; ALASSIA, G.G.P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M.. **Manual de usuários do WIN_IPH2**. Versão 1.0. Porto Alegre, 2006a. 62 p.
- BRAVO, J.M.; ALASSIA, G.G.P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M. **Manual de conceitos do WIN_IPH2**. Versão 1.0. Porto Alegre, 2006b. 27 p.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W.. **Hidrologia Aplicada**. 2. ed. Bogota: Mcgraw-hill Interamericana, 2000. 584 p.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. **Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hidricos, v.8, n.3. 2003.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Hidrologia. Disponível em:
http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=72%3Ahidrometeorologia&catid=43%3Ahidrometeorologia&Itemid=30. Acesso em fev. 2013.
- HORTON, R. E. **Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity**, Trans. Am. Geoph. Union, par IV. 1939. 693p.
- IPH - INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRAÚLICAS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – Porto Alegre. 2006.
- MACHADO, F.W. **Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação – Mestrado (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR. 2005. 156p.
- MINE, M. R.M. **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias**. Tese – Doutorado (Engenharia de Recursos Hidricos e Ambientais) . Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1998. 146p
- SIGRH - Sistema de Informação para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. **Regionalização Hidrológica**. Disponível em:
<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/regnet.exe?lig=pdfp>. Acesso em out/2013.
- TUCCI, C. E. M.. **Regionalização de Vazão**. Porto Alegre: Universidade UFRGS, 2002. 256 p.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2. Ed. Porto Alegre. Editora da Universidade. ABRH/UFRG, 2005. 678p.
- PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre, 2003, 628p.

CAPÍTULO V “POTENCIAL ENERGÉTICO APROVEITAVEL DO RIBEIRÃO LAVAPES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”

RESUMO

Uma das alternativas para a geração de energia elétrica é através da transformação da energia hidráulica disponível. As Microcentrais Hidrelétricas (MCH) ou Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) representam uma importante alternativa de produção e uso localizado de energia renovável em relação aos sistemas energéticos centralizados, promovendo a ampliação da oferta de energia elétrica em áreas isoladas, pequenos centros agrícolas e industriais e outros. Este estudo objetivou analisar a viabilidade técnica para reativação da Microcentral hidrelétrica situada na Fazenda Experimental Lageado na área da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés. Como metodologia, foram aplicadas equações para se determinar as potências hidráulica e útil, estimou-se a energia firme e por meio de um ábaco selecionou-se a turbina. A vazão média do Ribeirão Lavapés foi calculada por meio de simulação utilizando-se o Modelo Hidrológico Chuva-Vazão. Utilizou-se a vazão a 35% de permanência ($0,91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Contudo o Ribeirão Lavapés possui potencial tecnicamente viável para geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Microcentral hidrelétrica, vazão, energia.

ENERGY POTENTIAL USABLE OF RIBEIRÃO LAVAPES FOR ELECTRICITY GENERATION

SUMMARY

One alternative for the generation of electricity is through the transformation of hydro power available. The micro hydro plants (MCH) or Hydroelectric Generating Plants (CGH) represent an important alternative for the production and use of renewable energy located in relation to centralized energy systems, promoting the expansion of supply of electricity in isolated areas, small agricultural and industrial facilities and others. This study aimed to investigate the feasibility of reactivation HPMS dam located at the Experimental Farm in Lageado catchment area of Lavapés Stream. The methodology were applied equations to determine the potential and hydraulic useful energy was estimated steady and through an abacus selected the turbine. The average flow of Lavapés Stream was calculated by simulation using the Hydrological Model Rain - Flow. We used the flow to 35% of stay ($0.91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). However the Lavapés has technically feasible potential for electricity generation.

Keywords: Micro hydro power plant, flow, energy

5.1 INTRODUÇÃO

A energia sempre foi um elemento fundamental na vida e no desenvolvimento do ser humano. No contexto mundial, esse insumo tornou-se o centro das atenções e dos esforços governamentais. Ao mesmo tempo em que se torna necessária a expansão da oferta para garantir o crescimento econômico dos países diante do mercado globalizado, problemas ambientais como o aquecimento global, obrigam que essa expansão ocorra de forma sustentável, privilegiando as fontes renováveis.

Uma das alternativas para a geração de energia elétrica é através da transformação da energia hidráulica disponível. As hidrelétricas são a principal fonte de energia elétrica no Brasil, com 66,90% da potência instalada e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH - empreendimentos com aproveitamento hidrelétrico entre 1 MW e 30 MW, com área de reservatório inferior a 3 km²), 3,30% e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH– capacidade instalada de até 1MW) 0,18% (ANEEL, 2012).

As Microcentrais Hidrelétricas (MCH) ou Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) representam uma importante alternativa de produção e uso localizado de energia renovável em relação aos sistemas energéticos centralizados, promovendo a ampliação da oferta de energia elétrica em áreas isoladas, pequenos centros agrícolas e industriais, e também para ações nas áreas de saúde, educação, informações e segurança. Por serem menores, são mais baratas de construir, causam menor dano ambiental, podem ser construídas em rios com menor vazão e contribuem para a descentralização da geração de eletricidade. Para tanto, torna-se necessário o estudo hidrológico para avaliar o potencial hidrelétrico aproveitável de um rio que alimentará uma CGH.

No Brasil, de acordo com o Banco de Informações da Geração da ANEEL, em novembro de 2011, existiam em operação 377 CGHs, com potência total de 216,42 kW; 433 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) – 3,8 mil MW de potência instalada e 181 usinas hidrelétrica (UHE) com uma capacidade total instalada de 78 mil MW. As usinas hidrelétricas, independentemente de seu porte, respondem por 70,5% da potência total instalada no país, de 114,135 mil MW (ANEEL, 2012).

O objetivo do estudo foi analisar a viabilidade técnica para reativação da Microcentral hidrelétrica situada na Fazenda Lageado analisando-se o potencial energético aproveitável do Ribeirão Lavapés – área contribuição.

5.1.1 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) ou Microcentrais Hidrelétricas (MCH)

Segundo Simone (2000), as MCH estão na categoria de geração de energia elétrica a partir de máquinas hidráulicas, também denominadas turbinas hidráulicas onde o aproveitamento hidráulico para geração depende basicamente do desnível e da vazão do curso de água. A água é forçada por tubulações a passar por dentro da turbina provocando um movimento de rotação em seu rotor que é transferido mecanicamente para um gerador que desta forma gera a energia elétrica.

As Centrais Geradoras Hidrelétricas – CGH, Potência Igual ou Inferior a 1.000 kW. A Constituição Federal de 1988, no seu artigo 176, alterado pela Emenda Constitucional n. 6/95, definiu no parágrafo 4^o que não dependerá de autorização ou concessão o aproveitamento do potencial de energia renovável de capacidade reduzida (BRASIL, 1988).

De acordo com o artigo 5^o do Decreto n^o 2.003, de 1996, houve a regulamentação dos aproveitamentos de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1.000 kW independentem de concessão ou autorização, devendo, entretanto, ser comunicados ao órgão regulador e fiscalizador do poder concedente, para fins de registro (Brasil, 1996). O parágrafo único deste artigo estabeleceu que, caso o aproveitamento hidrelétrico com estas características venha a ser afetado por aproveitamento ótimo de curso d'água, conforme preceitua a Lei n^o 9.074, de 7 de julho 1995, não acarretará ônus de qualquer natureza ao poder concedente (BRASIL 1995).

5.1.2 Componentes de uma Microcentral Hidrelétrica

As instalações de uma MCH variam conforme a vazão do rio, o local, a potência e inúmeros outros fatores. De um modo geral pode-se classificar as Centrais hidrelétricas de acordo com a Tabela 5.1.

A Resolução da ANEEL 652, de 09/12/2003, estabelece os critérios para o enquadramento de aproveitamento hidrelétrico na condição de Pequena Central Hidrelétrica (PCH), em seu artigo 3^o considera com características de PCH o aproveitamento hidrelétrico com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000

kW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 km² (ANEEL, 2003).

Tabela 5.1. Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto (ELETROBRAS, 2000).

Classificação das Centrais	Potência - P (kW)	Queda de projeto - Hd (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro (MCH)	P < 100	Hd < 15	15 < Hd < 50	Hd > 50
Central Geradora (CGH)	100 < P < 1.000	Hd < 20	20 < Hd < 100	Hd > 100
Pequena (PCH)	1.000 < P < 30.000	Hd < 25	25 < Hd < 25	Hd > 130

5.2.2.1 Barragem

Na Figura 5.1 tem-se a ilustração das instalações de uma PCH com canal de adução a céu aberto em alvenaria e um conjunto turbina tipo Francis com eixo horizontal e gerador.

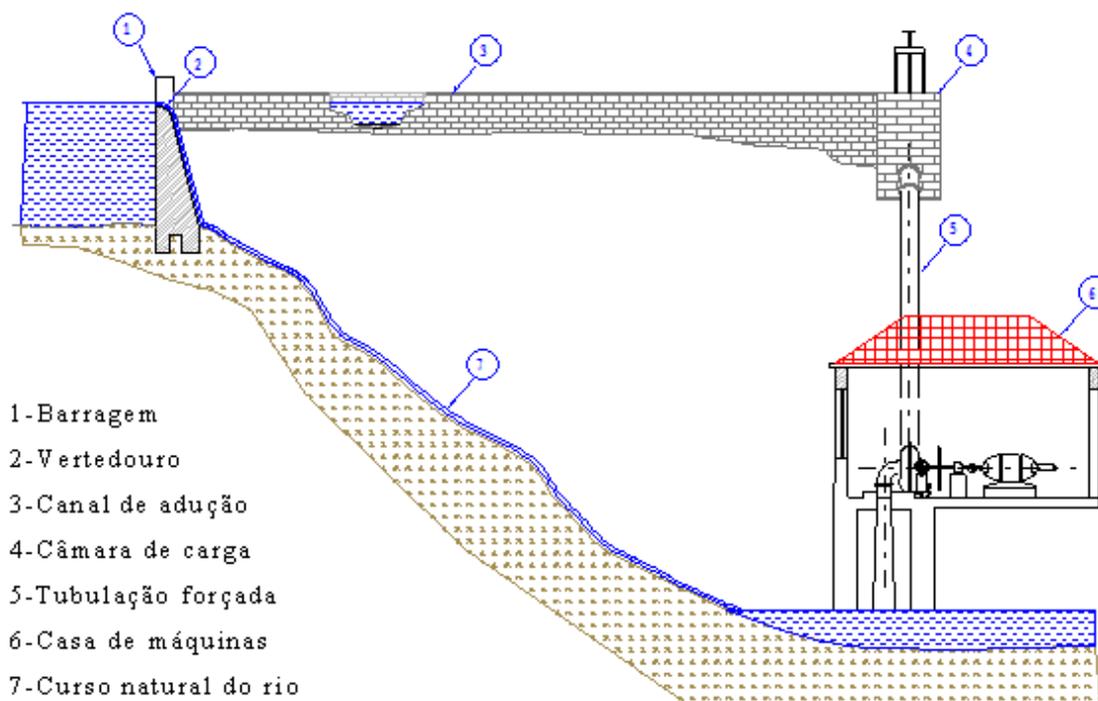


Figura 5.1. Ilustração esquemática das instalações de uma PCH (PIZA, 2002).

Conforme a ELETROBRÁS (1999), a barragem é a estrutura que tem a função de represar a água, visando, com a elevação do nível d'água do rio, possibilitar a

alimentação da tomada d'água. No caso de locais de baixa queda, a barragem tem também a função de criar o desnível necessário à produção da energia desejada.

5.2.2.2 Vertedouro ou Sangradouro

Também conhecido como extravasor, serve para o extravasamento do excesso de água afluyente ao reservatório do aproveitamento hidrelétrico.

A ELETROBRÁS (1999) determinou que, de forma geral, nas PCHs pode-se considerar três tipos básicos de solução para extravasamento:

- Extravasamento por canal lateral, com fundo situado em cota mais elevada em relação ao leito natural do rio;
- Extravasamento por sobre o próprio corpo da barragem, ao longo de toda a crista ou parte dela;
- Extravasamento misto utilizando as duas soluções acima.

As centrais hidrelétricas de maior porte costumam utilizar comportas para regulação do extravasamento, porém o custo deste sistema geralmente afasta esta solução para centrais muito pequenas.

5.2.1.3 Tomada de Água

Segundo Simone (2000), “denomina-se Tomada de Água o conjunto de componentes e dispositivos que direcionam, seccionam e conectam o reservatório à tubulação de baixa pressão ou canalização de baixa pressão”, incluindo aqui, tomada de água com saída para canais abertos.

Entre os órgãos que compõem a tomada de água, encontram-se: canalização de entrada ou bocal; grades de prevenção e proteção; montantes ou trilhos das comportas de emergência (stop–log) e serviço e quando a adução é feita através de canais revestidos ou tubulação, é instalado na tomada de água um desarenador ou caixa de decantação HASEGAWA (1999).

Conforme a ELETROBRÁS (1985), a tomada de água deve ser dimensionada para prover a captação da vazão requerida pela motorização completa da usina funcionando a plena carga. A estrutura de tomada d'água deve ser localizada, sempre que possível, junto à margem do reservatório, ao longo de trechos retos.

5.2.1.4 Caixa de Decantação ou Desarenador

As caixas de decantação são estruturas construídas para decantar a areia transportada pela água que, caso chegasse à turbina, desgastaria o equipamento com sua abrasividade. O conceito básico desta estrutura é aumentar a seção transversal do fluxo da água, diminuindo conseqüentemente sua velocidade e capacidade de transportar partículas, com isso, a areia transportada pela água decanta no fundo desta caixa, que será limpa periodicamente, ELETROBRÁS (1985).

Para facilitar a limpeza, seu projeto deve prever comportas que alterem o fluxo e velocidade da água removendo assim a areia depositada no fundo da caixa. Podem ser instaladas logo após a tomada de água, no percurso do canal de adução (quando o canal for revestido), ou imediatamente antes da câmara de carga, (quando o canal for escavado em terra). Geralmente possuem sistema de extravasamento próprio, que facilita e amortece os efeitos das manobras de limpeza ou outras operações, podendo inclusive operar como auxiliar do sistema de extravasamento da barragem no caso de grandes cheias ELETROBRÁS (1985).

5.2.1.5 Canal Aberto

Geralmente são canais escavados no solo, a jusante da barragem e ligam a tomada de água à câmara de carga. De acordo com ELETROBRÁS (1985), deve ser o mais simples possível, por motivo de economia, preferencialmente deve ser executado sem revestimento, evitando também, sempre que possível, escavações em rochas, para isso são necessários estudos mais cuidadosos do terreno, tais como porosidade do solo e declividade transversal ao percurso do canal.

Assim, os canais a céu aberto geralmente não recebem revestimento, a não ser em caso de solos muito porosos, devido ao custo que isto significaria, uma vez que é comum estes canais percorrerem algumas centenas de metros.

A extensão dos canais a céu aberto visa aumentar o desnível entre estes e o leito natural do rio onde a declividade do rio é maior que a do canal (SIMONE, 2000).

5.2.1.6 Câmara de Carga

A câmara de carga, também conhecida como Castelo de Água, situa-se entre o canal aberto e a tubulação forçada, e só é encontrada em instalações que optaram pela utilização do canal aberto para adução da água do reservatório. Sua função básica é aliviar os efeitos das manobras de mudança de vazão nas turbinas, diminuindo os efeitos do golpe de ariete nas instalações a jusante e oferecendo vazão suficiente em caso de aumento de consumo, aliviando os efeitos de inércia da água do canal aberto. A câmara de carga também tem a função de manter afogada a entrada da tubulação forçada que, sem esta estrutura, poderia em certos momentos puxar ar juntamente com a água, o que não é interessante para o sistema (SIMONE, 2000).

5.2.1.7 Tubulação de Adução

Também chamada de Tubulação de Baixa Pressão, segundo Simone (2000), substitui o canal aberto em alguns casos. Tem, entre outras, a desvantagem de ter seu custo muito mais elevado, e a vantagem de possibilitar o funcionamento do sistema mesmo que o reservatório não esteja completamente cheio, permitindo que a oscilação do nível do reservatório funcione como regularizador entre a vazão e a demanda, e exigir menor manutenção, uma vez que não tem contato com a superfície.

Segundo Balarim (1999), a tubulação de adução é utilizada também quando a declividade do terreno é muito acentuada, o que dificultaria a condução por canal aberto.

Segundo a ELETROBRÁS (1999), a jusante da comporta da tomada d'água, há a necessidade de instalação de um tubo (poço) de aeração visando, com a entrada de ar, manter o equilíbrio das pressões externa e interna e evitar o colapso da tubulação. A adoção desse tubo de aeração é mais econômica que as outras soluções, como, por exemplo, o reforço da tubulação com anéis, o aumento da espessura de toda a tubulação, a instalação de ventosas, etc.

5.2.1.8 Chaminé de Equilíbrio

É a estrutura utilizada entre a saída da tubulação de adução e a entrada da tubulação forçada, e tem a mesma função do Castelo de Água utilizado no caso dos canais

abertos segundo Simone (2000), serve para amortecer manobras que alterem a vazão no sistema.

A estrutura estende-se em altura até o nível da barragem e o nível da água na chaminé de equilíbrio fica próximo do nível do reservatório quando operando em trabalho contínuo; como a conexão entre a chaminé de equilíbrio, o condutor de baixa pressão e o condutor forçado ficam normalmente mais abaixo do nível do reservatório, a estrutura se estende ligando o nível da barragem ao nível desta ligação, formando uma estrutura semelhante a uma chaminé (BALARIM, 1999).

Na Figura 5.2 tem-se o esquema de instalação de uma pequena central hidrelétrica com adução por condutores de baixa pressão e chaminé de equilíbrio segundo Simone (2000).

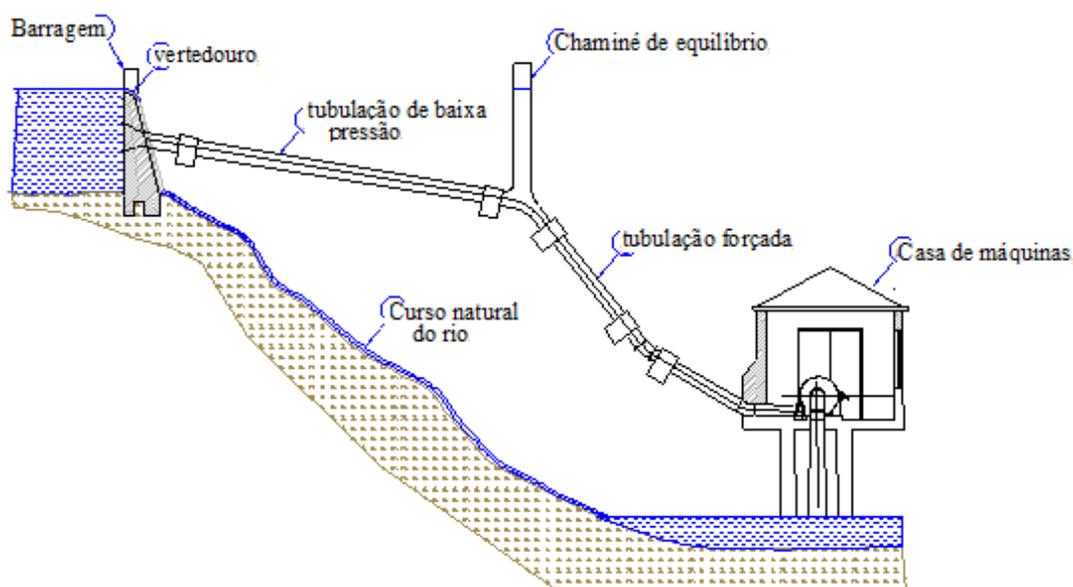


Figura 5.2. Esquema de instalação de uma MCH com adução por dutos de baixa pressão e chaminé de equilíbrio (PIZA, 2002).

Segundo ELETROBRÁS (1999) a chaminé de equilíbrio é um reservatório de eixo vertical, normalmente posicionado no final da tubulação de adução de baixa pressão e a montante do conduto forçado, com as seguintes finalidades: amortecer as variações de pressão que se propagam pelo conduto forçado e o golpe de aríete decorrente do fechamento rápido da turbina; armazenar água para fornecer ao conduto forçado o fluxo inicial provocado pela nova abertura da turbina, até que se estabeleça o regime contínuo.

5.2.1.9 Tubulação Forçada

É a tubulação que liga a chaminé de equilíbrio ou o castelo de água à turbina hidráulica. Geralmente é construída em chapas de aço, porém nada impede que se utilizem outros materiais como concreto ou PVC, conforme cita Hasegawa (1999), desde que devidamente calculados e dimensionados (SIMONE , 2000).

A determinação do diâmetro econômico dos tubos pode ser feita de acordo com o Manual de Micro Centrais Hidrelétricas. As tubulações forçadas devem ser muito bem ancoradas no solo através de blocos de ancoragem, para não se abalarem com a movimentação da água e os efeitos do golpe de aríete (ELETROBRÁS, 1985).

5.2.1.10 Casa de Máquinas

A orientação da ELETROBRÁS (1985) esclarece que a casa de máquinas é a edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica.

As casas de força têm a finalidade de alojar as máquinas e os equipamentos, possibilitar sua montagem ou eventual desmontagem e sua operação e manutenção. Os materiais de construção podem ser quaisquer, dependendo das disponibilidades locais. Usualmente são utilizadas madeira ou alvenaria de tijolo, materiais bastante difundidos e de custo baixo (MAUAD, 1997).

5.1.2.11 Turbina

É o equipamento mecânico mais sofisticado do sistema hidráulico, dele depende grande parte do rendimento do conjunto.

Segundo Simone (2000), turbina hidráulica “é uma máquina hidráulica que, recebendo em sua porta de entrada energia mecânico-hidráulica de um fluido, converte esta energia em energia mecânico-motriz e a disponibiliza na ponta mecânica referida”. Divididas em turbinas de ação e reação, podem ser instaladas em eixos verticais ou horizontais.

As turbinas hidráulicas utilizadas nas MCH devem ser escolhidas de modo a se obter facilidade de operação e de manutenção, dando-se grande importância à sua robustez e confiabilidade, pois a tendência é de que a usina seja operada no modo não assistido. Na escolha da turbina, deve-se analisar, além dos parâmetros técnicos e do seu preço, a capacidade de imediato atendimento, em caso de problemas durante o funcionamento, e a disponibilidade para fornecimento de peças sobressalentes, por parte do fabricante (ELETROBRÁS, 1999).

ELETROBRÁS (1999) detalha e especifica as turbinas hidráulicas como segue: escolha da velocidade de rotação da turbina depende da potência nominal, da altura de queda, do tipo de turbina e do tipo de gerador; a queda líquida (m) e a vazão de projeto por turbina (m^3s^{-1}) são os parâmetros utilizados para a escolha preliminar do tipo de turbina.

5.1.3 Histórico da Microcentral Hidrelétrica Lageado

Hasegawa (1999) e Piza (2002) efetuaram levantamentos históricos da antiga hidrelétrica instalada na Fazenda Experimental Lageado – Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. Foram encontrados vários documentos históricos (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5), dentre as quais o projeto original em papel vegetal da Usina Hidrelétrica, elaborado em Janeiro de 1935, concebido para uma potência efetiva de 43 HP e desenvolvido pela seção técnica da empresa Herm Stoltz & Cia., da cidade de São Paulo – SP.

Algumas datas importantes referentes à Estação Experimental Central do Café e detalhes construtivos da casa de máquinas e equipamentos hidroeletromecânicos segundo documentos históricos obtidos na biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu podem ser visto na descrição a seguir:

- 1935 - Projeto de usina hidrelétrica de 43 HP para a Estação Experimental de Café em Lageado – Botucatu-SP, elaborado pela empresa HERM STOLTZ & COMP. - São Paulo – Seção Técnica – Janeiro de 1935; construção (conclusão) do prédio no mês de julho; instalação da turbina hidráulica Francis com quadro completo, excitador e reostato.
- 1936 - Elaboração do esquema da rede de distribuição elétrica pelo Sr. Affonso Poyart, em 06 de Janeiro; instalação do Volante de aço, castelo d'água em alvenaria cimentado com comportas e a instalação do Regulador hidráulico.

- 1937 - instalação da Caixa de decantação de areia, com comporta e grades.
- 1938 - instalação do Regulador de Voltagem.
- 1940 - Estudo para modificação das posições do mancal externo e do volante.

em 01 de Fevereiro.

- 1950 - a usina funcionou até esta década.

Detalhes construtivos da Casa de Máquinas e Equipamentos Hidroelétricos

Localização Sede Usina hidrelétrica

- Casa n.º 76
- Área - 24,15 m²
- Comprimento - 5,55 m
- Largura - 4,35 m
- Pé direito - 3,00 m
- Altura até a laje de concreto - 3,30 m
- Alicerces de pedra rejuntada
- Paredes externas de 1 tijolo
- Cobertura em laje de cimento armado
- Porta frente - 2,00 x 1,00 m (lado)
1,20 x 1,20 m (fundo)
- Pavimentação: ladrilhado sobre laje de concreto
- Instalações existentes: luz elétrica com globo no interior e 1 braço no exterior, para-raios de haste.

Turbina

- Marca STOLTZ 40 HP com:
- 01 válvula borboleta;
- 01 regulador manual;
- 01 tacômetro;
- 01 luva elástica;
- 01 mancal.

Gerador

Marca ASEA 36 kVA, trifásico 50 ciclos por segundo a 1000 rpm, 230 V, 90,5 A, $\cos \varphi = 0,8$ acoplado a um excitador no mesmo eixo, magneto em tensão 110 V.

Quadro de Comando

Composto por: 01 voltímetro; 01 amperímetro; 01 chave trifásica com fusíveis e 01 arandela para iluminação.

Sistema de Tubulação de Adução

Composto por um encanamento adutor de 80,70 m, dividido em:

- 38,70 m de comprimento por 0,38 m de diâmetro interno inclusive 2 curvas soldado, novo, remetido do Superior Tribunal de Contas, sem guia remessa acompanhando a turbina em 10 de abril de 1935;

- 42,00 m de comprimento por 0,45 m de diâmetro interno reto, rebitado, usado, existente no ato da aquisição da Fazenda, - custo englobado na aquisição das terras.

Volante de aço

Composto por: 18 mm de espessura; 1 m de diâmetro adquirido em Jundiaí em 1936.

Regulador Automático

Marca BOWING VKA no. 1829, para pressão de 30 kg - CM 2, adquirido pelo Superior Tribunal de Contas através da Guia Remessa n°. 128 de 15 de Outubro de 1935.

Regulador automático de voltagem

Marca YRVE - ASEA - Vasteras - Suécia no. 604.4395, adquirido pelo STC em 1937, através da Guia Remessa no. 145.

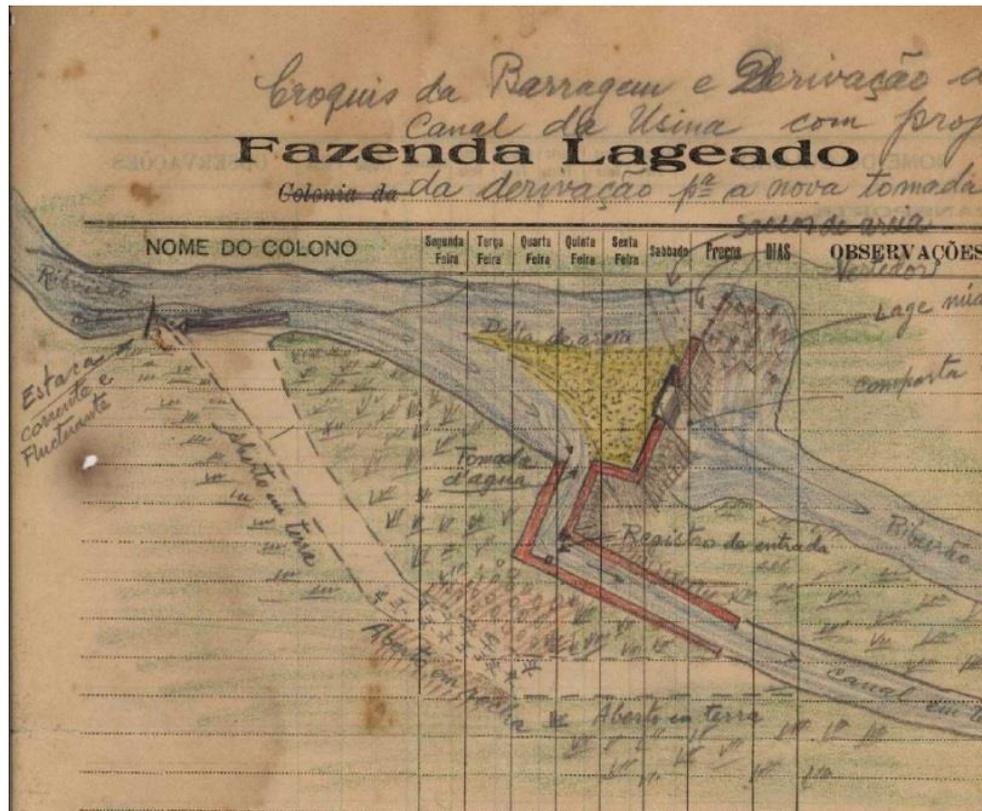


Figura 5.3. Croqui da barragem e derivação.

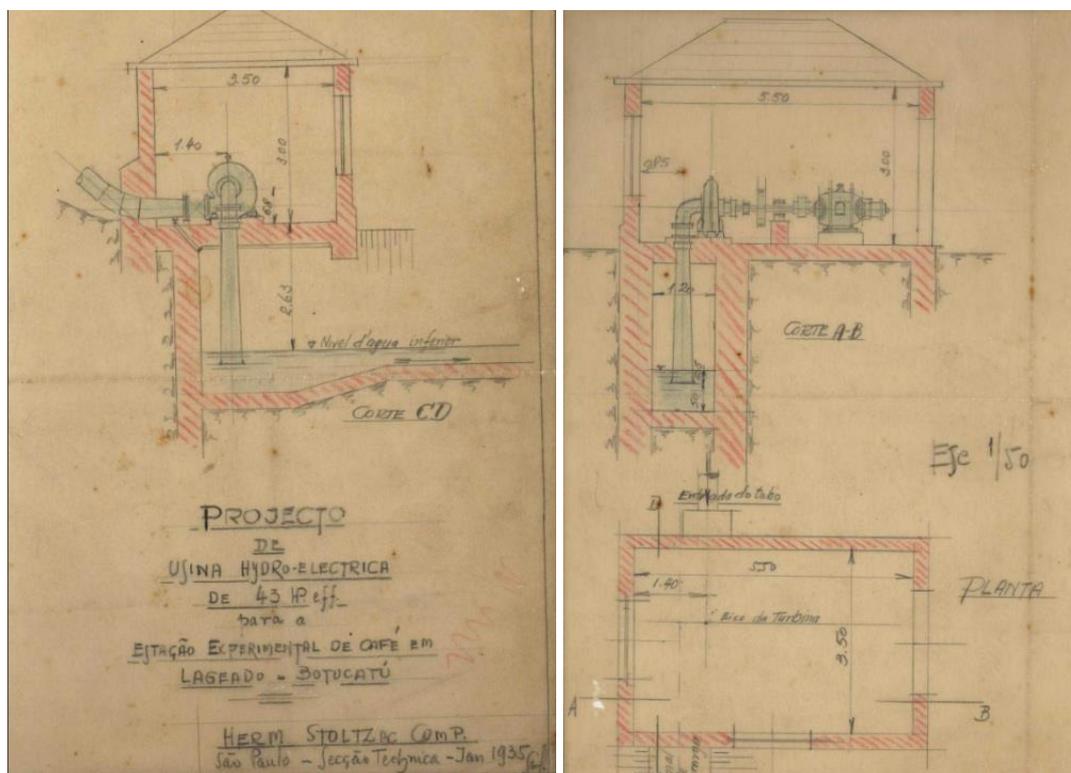


Figura 5.4. Projeto da casa de máquinas da antiga Usina Hidrelétrica.

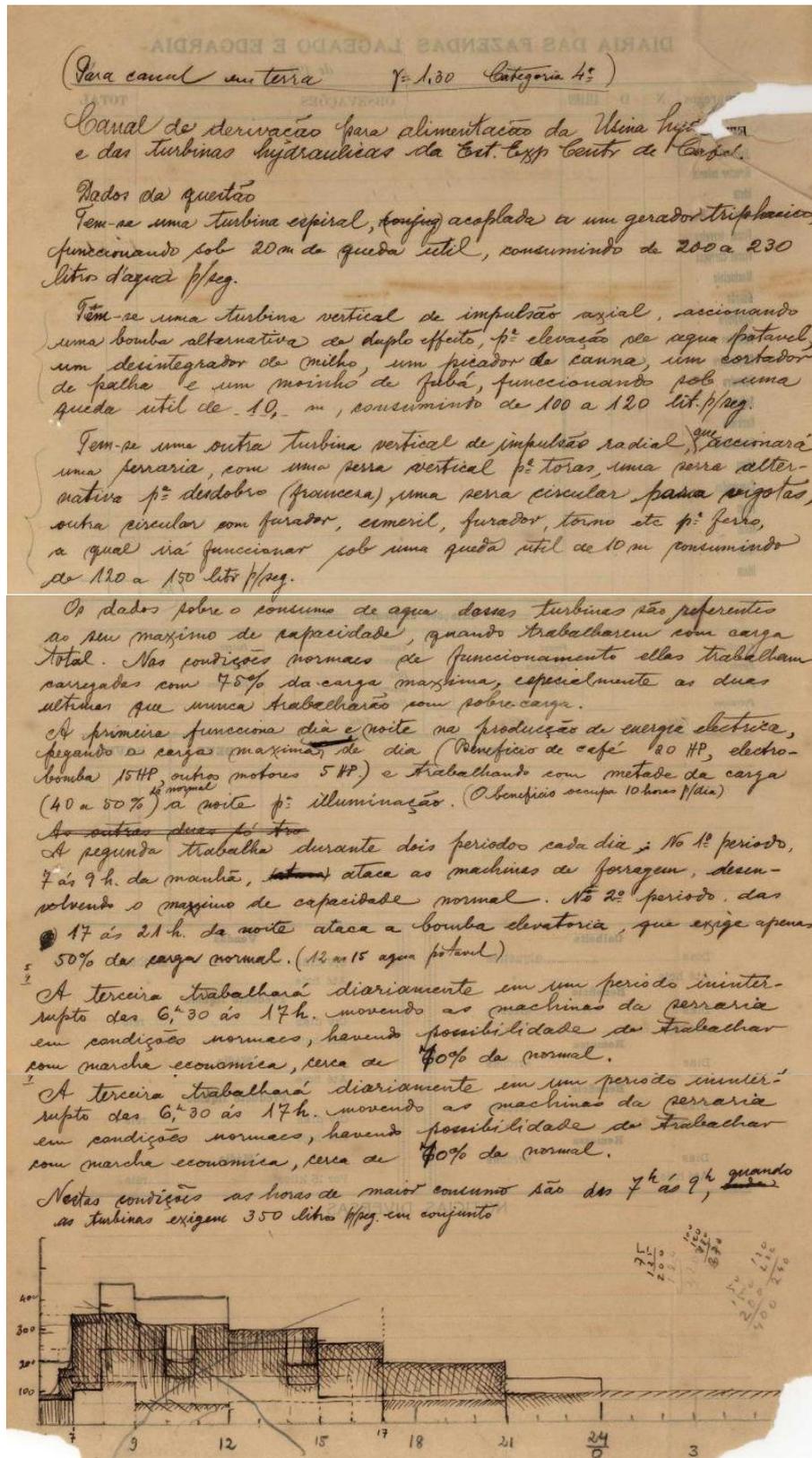


Figura 5.5. Descrição do consumo de água – Questão de ordem prática.

Descrição da Figura 5.6. Descrição do consumo de água – Questão de ordem

prática segundo Hasegawa (1999):

“ Canal de derivação para alimentação da Usina Hidrelétrica e das turbinas hidráulicas da Estação Experimental Central de Café.

Dados da questão:

Tem-se uma turbina espiral, acoplada a um gerador trifásico funcionando sob 20 m de queda útil, consumindo de 200 a 230 litros d'água por segundo.

Tem-se uma turbina vertical de impulsão axial, acionando uma bomba alternativa de duplo efeito, para elevação da água potável, um desintegrador de milho, um picador de cana, um cortador de palha e um moinho de fubá, funcionando sob uma queda útil de 10 metros, consumindo de 100 a 120 litros por segundo.

Tem-se um outra turbina vertical de impulsão radial, que acionará uma serraria, com uma serra vertical para desdobro (francesa), uma serra circular para vigotas, outra circular com furador, esmeril, furador, torno etc. para ferro, a qual irá funcionar sob um queda útil de 10 m consumindo de 120 a 150 lit. p/ seg.

Os dados sobre o consumo de água dessas turbinas são referentes ao seu máximo de capacidade, quando trabalharem com carga total. Nas condições normais de funcionamento elas trabalham carregadas com 75% da carga máxima, especialmente as duas últimas que nunca trabalharão com sobrecarga.

A primeira funcionará dia e noite na produção de energia elétrica, pegando a carga máxima de dia (Benefício de café 20 HP, eletrobomba 15 HP, outros motores 5 HP) e trabalhando com metade da carga (40 a 50%) da normal a noite para iluminação. (O benefício ocupa 10 horas por dia).

A segunda trabalha durante dois períodos cada dia. No 1º período, 7 às 9 horas da manhã, funcionam as máquinas de forragem, desenvolvendo o máximo de capacidade normal. No 2º período, das 17 às 21 horas da noite funciona a bomba elevatória, que exige apenas 50% da carga normal das 12 às 15 horas, água potável. A terceira trabalhará diariamente em um período ininterrupto das 6 horas e 30 minutos às 17 horas movendo as máquinas da serraria em condições normais, havendo possibilidade de trabalhar em marcha econômica, cerca de 70% a normal.

Nestas condições as horas de maior consumo são das 7 horas às 9 horas, quando as turbinas exigem 350 litros p/ seg. em conjunto.”

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Área de Estudos

A área estudada localiza-se na Bacia do Ribeirão Lavapés, na Fazenda Lageado. Na Figura 5.6 pode se observar a localização da área estudada assim como as principais estruturas que compõem a MCH.

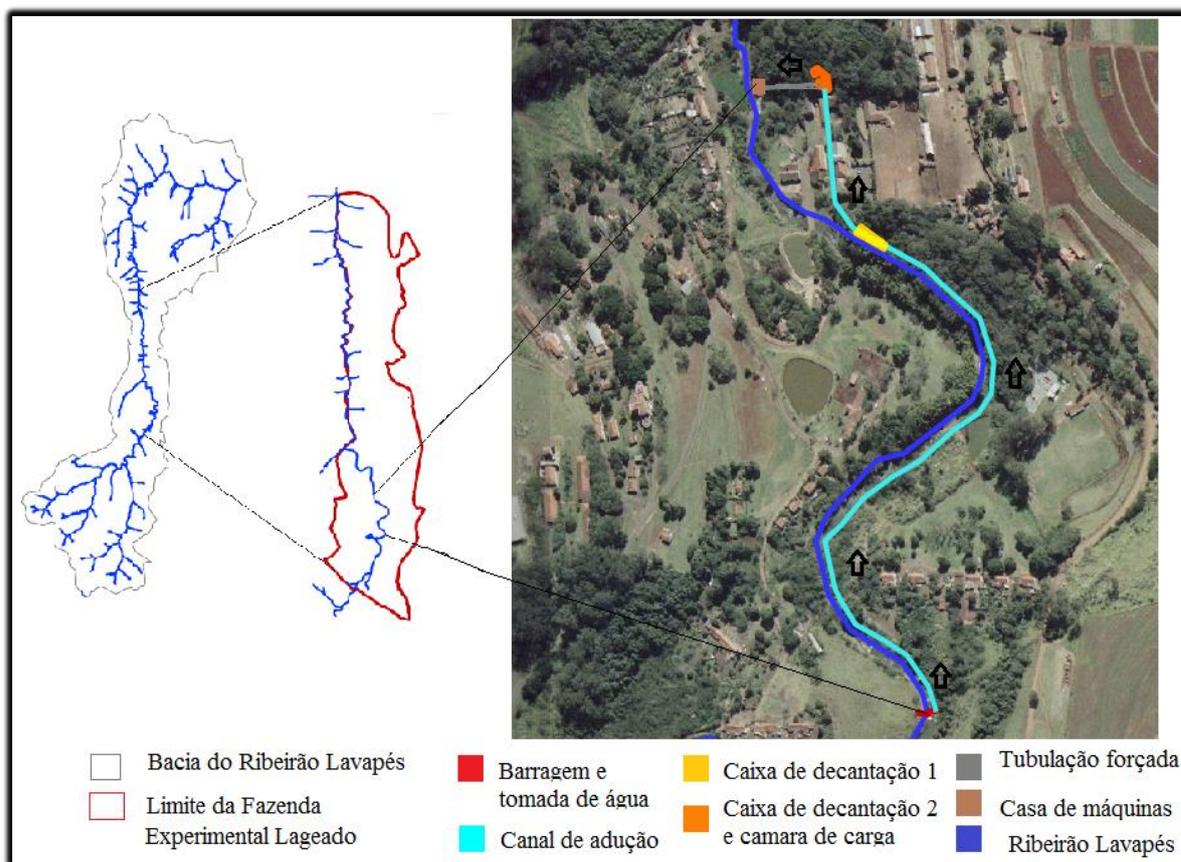


Figura 5.6. Localização da área de estudos e estruturas que compõem a MCH da Fazenda Experimental Lageado.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as características do Ribeirão Lavapés os e da Microcentral Hidrelétrica Lageado desde sua construção segundo PIZA (2002).

Tabela 5.2. Elementos que caracterizam a MCH da Fazenda Lageado

Vazão do rio Lavapés (Q95)	0,70 m ³ s ⁻¹
Vazão total Desviada	0,35 m ³ s ⁻¹
Vazão desviada para a PCH	0,25 m ³ s ⁻¹
Vazão desviada extra disponível	0,10 m ³ s ⁻¹
Vazão a jusante da Barragem	0,25 m ³ s ⁻¹
Altura da Barragem	1,80 m
Extensão da Barragem	23,10m
Comprimento do Canal escavado no solo	960 m
Desnível no canal escavado no solo	1,48 m
Velocidade da água no desarenador	0,044 m.s ⁻¹
Comprimento da Galeria de adução	115 m
Comprimento da Tubulação Forçada	80,70 m
Diâmetro da Tubulação Forçada	45 cm
Queda útil	20 m
Vazão Turbinada	0,20 a 0,23 m ³ s ⁻¹
Turbina tipo Francis com caixa espiral	Marca STOLTZ – 30kW
Área construída da casa de máquinas	21,45m ²
Capacidade mensal média do sistema	23,5 MWh.mês ⁻¹

Fonte: PIZA (2002).

5.2.2 Métodos

5.2.2.1 Cálculo do Potencial Hidráulico

Segundo Nogueira e Thiago Filho (2007), a energia que é naturalmente dissipada em um curso d'água quando este escoar através de um desnível topográfico é dada pela Equação 5.1.

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (5.1)$$

Onde:

Ph – potencia hidráulica [W]

ρ - massa específica da água [kg.m³];

g – aceleração da gravidade [m.s⁻²];

H – altura da queda d'água [m];

Q – vazão de água [m³s⁻¹].

Os equipamentos utilizados atualmente nas centrais hidrelétricas são capazes de converter uma grande parte da energia hidráulica disponível em energia útil. Apesar disso, durante essa conversão ocorrem perdas inevitáveis. Por esse motivo a potência hidráulica é corrigida por um rendimento que leva em consideração todas essas perdas, sendo então a potência útil igual à Equação 5.2. O rendimento global dos equipamentos utilizados nas MCH situa-se dentro da faixa de 85% sendo que os maiores valores são para os aproveitamentos de maior potência.

$$P_u = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta \quad (5.2)$$

Onde:

Pu - potência útil [kW];

g – aceleração da gravidade [m.s⁻²];

Q – vazão de água [m³s⁻¹];

η - rendimento global da conversão.

Se a água cai ou é conduzida de um nível mais alto para um nível mais baixo, então essa vazão de água resultante pode ser utilizada. Normalmente um conduto ou uma tubulação forçada é utilizado para levar a água declive abaixo, e disto resulta uma vazão de água sob pressão. Quando se permite que a água mova algum tipo de turbina, a pressão é então transformada em energia mecânica e pode ser utilizada no acionamento de um gerador elétrico ou um moinho de grãos ou algum outro tipo de equipamento.

5.2.2.2 Verificação do potencial local

Segundo Eletrobrás (2000), deve-se avaliar a atratividade energético-econômica do local selecionado. Estima-se a energia firme (E_f), utilizando-se a Equação 5.3.

A energia firme de uma usina hidrelétrica corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida, supondo a ocorrência da sequência mais seca registrada no histórico de vazões do rio onde ela está instalada (ANEEL, 2005).

$$EF_e = \frac{\mu \cdot 9,81 \cdot Q \cdot H_{liq} \cdot \Delta t}{1000} \quad \text{ou} \quad EF_e = 0.0083 \cdot Q \cdot H_{liq} \quad (5.3)$$

Onde:

E_f - energia firme estimada em MW médios, considerando-se Q e H_{liq} constantes durante o funcionamento da usina [1 MW médio = 8760 MWh por ano, durante a vida útil da usina];

μ - rendimento do conjunto turbina-gerador, sugerindo-se o valor final de 0,85;

Δt - intervalo de tempo igual a 1 s;

Q - vazão mínima medida no local, ou $Q_{95\%}$, ou, ainda, a vazão média (\bar{Q}) ao longo do período crítico do sistema interligado [m^3s^{-1}];

H_{liq} - queda líquida [m].

5.2.2.3 Seleção da Turbina

Uma vez obtidas a queda líquida em metros, e vazão em metros cúbicos por segundo, para encontrar o tipo de turbina recomendado para o aproveitamento em estudo, a ELETROBRÁS (1985) indica que se utilize o ábaco apresentado na Figura 5.7.

Conforme estabelecido também pela ELETROBRÁS (1985), e mostrado na Figura 5.8, a faixa de potência unitária adotada para as microcentrais é de 100 kW, valendo como entrada os valores de queda (até 200 m) e vazão (até $2 m^3s^{-1}$). A escolha da turbina, quando usado o ábaco, é preliminar, uma vez que não existem fronteiras bem definidas entre os vários tipos de turbina.

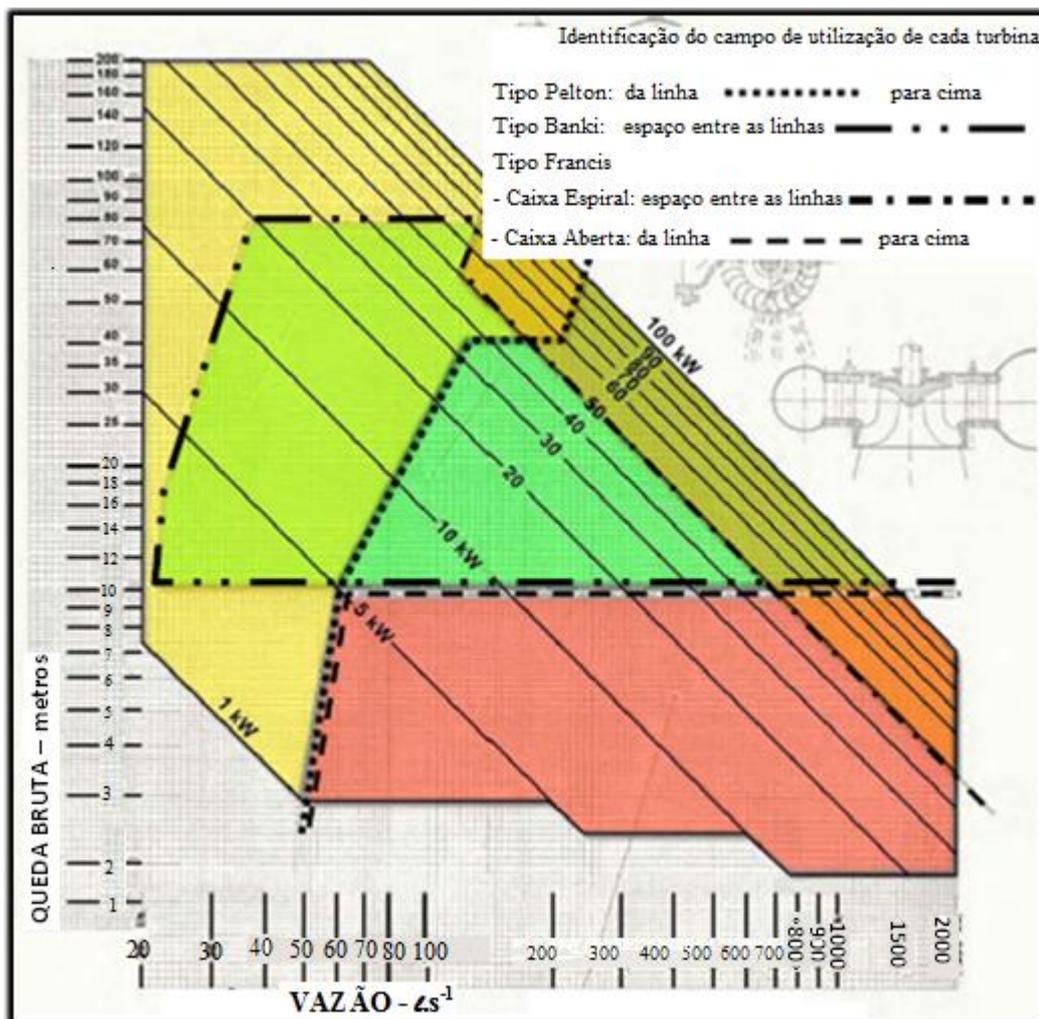


Figura 5.7 Ábaco para seleção de turbinas aplicáveis a microcentrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (1985).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão do Ribeirão Lavapés relativa a área de contribuição da MCH foi calculada por meio de simulação utilizando-se o Modelo Hidrológico Chuva-Vazão. Os cálculos foram realizados utilizando-se os valores de vazão extraídos da curva de permanência dos anos de 2009 a 2012 a 50% e 95% de permanência ($1,26$ e $0,18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente) que de acordo com Eletrobrás (1985) para as MCH deve-se adotar esta vazão de projeto (vazão de turbina).

Com os dados de vazão e a queda o potencial aproveitável do Ribeirão Lavapés pode ser observada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Dados obtidos na determinação do potencial energético do Ribeirão Lavapés a 50% e 95% de permanência.

Dados do Ribeirão Lavapés				
Vazão - Curva de Permanência		Q50%	Q95%	m^3s^{-1}
		1,26	0,18	m^3s^{-1}
Altura - queda	H	20	20	m
Altitude local	HL	750	750	m
Dados Hidráulicos				
Potencial hidráulico	Ph	247,21	35,32	kW
Potencia útil	Pu	210,13	30,02	kW
Energia firme	Efe	188,24	26,89	kW

De acordo com o ábaco (Figura 5.8), Eletrobrás (1985), com a vazão de $1,26 m^3s^{-1}$ e queda de 20 metros, a turbina indicada é uma tipo Francis, com potência de 100 kW e para a vazão Q95% - $0,18 m^3s^{-1}$ seria uma tipo Francis de 20 kW.

Nas instalações da MCH a turbina que se encontra também é do tipo Francis, mas de 30 kW e a vazão utilizada era de $0,35 m^3s^{-1}$. A vazão 95% de permanência é recomendada pela Eletrobrás (1985) para sistemas isolados. Para o uso que se pretende recomenda-se usar a vazão a 50% de permanência.

5.4 CONCLUSÃO

A área estudada do Ribeirão Lavapés possui potencial tecnicamente viável (178,54 kW) para geração de energia elétrica. A energia gerada poderá ser interligada a rede elétrica.

É importante que seja realizado um estudo atualizado da viabilidade econômica de reativação da MCH uma vez que todas as estruturas deverão ser reconstruídas e o canal de adução que antes era aberto deverá ser submetido a um laudo arqueológico. E ainda, muitas estruturas estão localizações na área do conjunto arquitetônico histórico da Fazenda Lageado tombado pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico – CONDEPHAAT, o que impede de sofrer alterações.

5.5 REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Guia do empreendedor de pequenas centrais hidrelétricas** / Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2003. 704 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Resolução ANEEL N° 652, DE 9 de DEZEMBRO de 2003**. Brasília: ANEEL, 2003. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Energia Assegurada** / Agência Nacional de Energia Elétrica. (Cadernos Temáticos ANEEL; 3). Brasília: ANEEL, 2005. 18 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Relatório ANEEL 2011**. Brasília: ANEEL, 2012. 108 p. Disponível em http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Relatorio_Aneel_2011.pdf.

BALARIM, C. R.. **Estimativa de custo das estruturas e equipamentos de microcentrais hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. 1999. 158p.

BRASIL . Constituição da Republica Federativa do Brasil de 1988.

BRASIL. Decreto nº 2.003, de 1996. Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº 9.074, de 7 de julho 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências

ELETROBRÁS. Ministério das Minas e Energia. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro. 2000. 458p.

ELETROBRÁS. Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica. Diretrizes para projetos de PCH. Rio de Janeiro, 1999. 350p.

ELETROBRAS. Ministério das Minas e Energia. **Manual de Microcentrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro. 1985. 354p.

HACKER INDUSTRIA LTDA (Xanxerê). **Tecnologia no aproveitamento de potencias hidrelétricos**. 2013. Disponível em: <<http://www.hacker.ind.br/contato.php>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

HASEGAWA, M. M.. **Avaliação técnica para a reativação de uma PCH na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu-SP**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Ciências Agronomicas de Botucatu/SP. 1999. 94p.

MAUAD, F. F. et al (Eds) **Curso sobre micro centrais hidrelétricas**: procedimentos práticos. Apostila Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1997, 130p.

NOGUEIRA, F. J. H. TIAGO FILHO, G. L. **Microcentrais hidrelétricas**. CERPCH - Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Itajubá, MG, 2007. 32p.

PIZA, F. J. T.. **Avaliação para Recuperação das Obras Cíveis da Micro Central Hidrelétrica Instalada na Fazenda Lageado Unesp - Botucatu**. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Botucatu, 2002.

SÃO PAULO. Portal do Governo do Estado de São Paulo. Botucatu. **Botucatu atinge 100% de esgoto tratado**. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/lenoticia.php?id=225191>>. Acesso em: 26 dez. 2012.

SIMONE, G. A. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos**. São Paulo: Érica, 2000. 246p.

SOUZA, Z., FUCHS, R. D., SANTOS, A. H. M. **Centrais Hidro e Termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983, 241p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das características fisiográficas da bacia serviu de suporte para os demais estudos uma vez que a bacia é a unidade de planejamento e gestão de recursos hídricos. A caracterização da bacia feita de forma digital, utilizando-se um sistema de informação geográfica, demandou menor tempo de trabalho e foram gerados dados mais precisos.

Quando ao estudo de perdas de solo e potencial erosivo da área urbanizada do Ribeirão Lavapés, práticas conservacionistas podem e devem ser aplicadas a fim de minimizar as perdas de solo e assoreamento do Ribeirão Lavapés. Em se tratando de sistemas hidrelétricos, um estudo hidrossedimentológico, é de extrema importância e necessário para validação das perdas de solo e verificar se realmente os sedimentos provenientes da erosão do solo pode afetar o potencial hídrico do Ribeirão Lavapés.

A estimativa de vazão utilizando modelagem hidrológica minimiza custos de forma geral, mesmo encontrando bons resultados com os programas empregados é importante que se instale equipamentos de medição e registro de vazões uma vez que se pretende reativar a MCH da Fazenda Experimental Lageado e também para monitoramento da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés.

O artigo 5º do Decreto nº 2.003, de 1996, regulamentou que os aproveitamentos de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1.000 kW independem de concessão ou autorização, devendo, entretanto, ser comunicados ao órgão regulador e fiscalizador do poder concedente, para fins de registro. A Resolução CONAMA 237/97, que, em seus Artigos 2º, 3º e 12º, deixa a critério do órgão ambiental licenciador a decisão quanto aos casos em que serão necessários estudos detalhados ou simplificados. Para as usinas hidrelétricas, não há mais, o limite de 10 MW para a isenção de apresentação de estudos e relatórios de impactos ambientais, mas a consideração deverá ser feita pelo órgão ambiental, de que o empreendimento é ou não potencialmente causador de significativa degradação ao meio ambiente, podendo ser estabelecidos procedimentos simplificados para as atividades e empreendimentos de pequeno potencial de impacto ambiental.

A esse respeito, cabe ressaltar que o licenciamento deve ser considerado não só como uma consequência do bom e adequado tratamento da questão ambiental, mas, também para que se conheça a biodiversidade área uma vez que compreende uma instituição de ensino e pesquisa.

A utilização de programa de código livre – software livre, tem sido tema de destaque nos governos brasileiros, tanto na adoção quanto no incentivo e divulgação. Estes programas promovem: a independência do fornecedor já que o governo não fica dependente de apenas um fabricante, tão pouco obrigado a adquirir novas licenças a cada vez que algum software deixa de ter suporte ou lança-se uma nova versão; a inclusão digital de forma econômica e eficiente, desde que haja planejamento, por exemplo, treinando instrutores; economia de dinheiro público, pois, deixaria de pagar as licenças cada vez mais caras dos softwares proprietários; intensificação da segurança da informação pois, com software aberto é possível identificar e adaptar a lógica do sistema para um formato confiável de transporte e de divulgação das informações; e ainda incentiva o mercado interno pois os desenvolvedores e técnicos locais encontrariam mais emprego nessa área.

Contudo, este trabalho que se iniciou com a caracterização fisiográfica da bacia passando pelas estimativas de perda e de solo, do potencial natural de erosão e de vazão, utilizando um software livre que ainda não havia sido usado para o desenvolvimento desse tipo de estudo, culminou na análise do potencial energético para geração de energia elétrica do Ribeirão Lavapés, mostrou que as estimativas geram resultados satisfatórios, mas para futuros estudos sugere a coleta de dados em campo para a obtenção de resultados mais precisos.

CONCLUSÕES GERAIS

No estudo da caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, conclui-se que com a análise dos parâmetros de forma, circularidade e compacidade conclui-se que a bacia do Ribeirão Lavapés possui forma oblonga – alongada, ambientalmente apresenta características de bacia com tendência a conservação remetendo a baixas tendências à inundações e baixo risco a erosão. E em conformidade a metodologia empregada – sistema de informações geográficas, gvSIG, o uso da ferramenta supriu as expectativas constituindo importante base para subsidiar análises e estudos hidrológicos e caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas, podendo ser utilizadas como subsídio para tomadas de decisão coerentes e apropriadas no contexto ambiental dos recursos naturais.

A estimativa de perdas de solo e do potencial natural de erosão na área urbanizada da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavapés, demonstraram ser extremamente satisfatórios. O potencial natural de erosão, com predominância da classe “Fraco”, com potencial entre 0- 400 t.ha⁻¹.ano⁻¹, correspondeu a 76,6% da área. Com relação as perdas de solo, predominou a classe “Baixa”, classificada entre 0-10 t.ha⁻¹.ano⁻¹, representa uma área de 33,47 ha (76,1%) da área total. O fato do Ribeirão Lavapés estar próximo de áreas susceptíveis a erosão e a área ser deficitária de boa cobertura vegetal o deixa vulnerável ao assoreamento e alargamento.

Na estimativa da vazão do Ribeirão Lavapés na área de contribuição da MCH Lageado, por meio da metodologia utilizada foi possível quantificar a vazão do Ribeirão Lavapés e gerar a Curva de Permanência para do período de janeiro de 2009 a dezembro de 2012. E o programa Win_IPH2 mostrou-se uma ferramenta viável para atender os objetivos quanto na quantificação de vazão tanto na geração da curva de permanência na área sem registros fluviométricos.

Quanto ao potencial energético aproveitável do Ribeirão Lavapés, a área estudada possui potencial tecnicamente viável (178,54 kW) para geração de energia elétrica. A energia gerada poderá ser interligada a rede elétrica.