



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.25.13.19-TDI

APLICAÇÃO DE DADOS SRTM À MODELAGEM DA EROSÃO EM MICROBACIAS POR GEOPROCESSAMENTO

Elienê Pontes de Araújo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Márcio de Morisson Valeriano, e Douglas Francisco Marcolino Gherardi, aprovada em 25 de abril de 2006.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.25.13.19>>

INPE
São José dos Campos
2006

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.25.13.19-TDI

APLICAÇÃO DE DADOS SRTM À MODELAGEM DA EROSÃO EM MICROBACIAS POR GEOPROCESSAMENTO

Elienê Pontes de Araújo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Márcio de Morisson Valeriano, e Douglas Francisco Marcolino Gherardi, aprovada em 25 de abril de 2006.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.25.13.19>>

INPE
São José dos Campos
2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Araújo, Elienê Pontes de.

Ar15a Aplicação de dados SRTM à modelagem da erosão em micro-
bacias por geoprocessamento / Elienê Pontes de Araújo. – São
José dos Campos : INPE, 2006.

89 p. ; (sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.25.13.19-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

Orientadores : Drs. Márcio de Morisson Valeriano, e Douglas
Marclino Gherardi.

1. sensoriamento remoto. 2. dados SRTM. 3. erosão. 4. micro-
bacias. 5. geoprocessamento. I.Título.

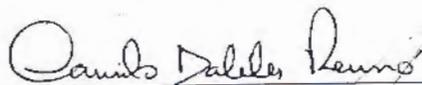
CDU 528.8

Copyright © 2006 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2006 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

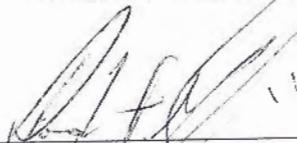
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Camilo Daleles Rennó



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Douglas Francisco Marcolino
Gherardi



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Márcio de Morisson Valeriano



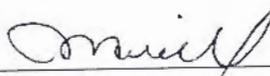
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. José Simeão de Medeiros



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Mara de Andrade Marinho Weill



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Aluno (a): Elienê Pontes de Araújo

São José dos Campos, 25 de abril de 2006

“Não é porque certas coisas são difíceis que nós não ousamos. É justamente porque não ousamos que tais coisas são difíceis!”.

SÊNECA

*A meus pais,
MOISÉS SOTERO DE ARAÚJO e
MARIA PONTES DE ARAÚJO.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a meus pais Moisés Araújo e Maria Pontes pelo apoio dado aos meus estudos durante toda a minha vida. A meus irmãos e a todos os meus amigos que, mesmo de longe, me apoiaram todo o tempo.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade e instalações oferecidas; à Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), que viabilizaram a execução da pesquisa através do suporte financeiro proporcionado.

Aos Drs. Márcio de Morisson Valeriano e Douglas F. M. Gherardi pela orientação e conhecimentos transmitidos no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Laboratórios de Geoprocessamento e Meteorologia do Maranhão, em especial aos amigos Jucivan Ribeiro Lopes, Raimundo Carvalho Filho, Danúbio Campos e Carlos Márcio Elói que nunca hesitaram quando solicitados em ajudar no apoio técnico que foi indispensável para esta pesquisa.

A todos os meus professores e amigos da pós-graduação pela solidariedade, apoio e motivação.

Ao Márcio Valeriano pela paciência, amizade e atenção dispensada.

Ao José Simeão de Medeiros pelo incentivo na realização do mestrado em Sensoriamento Remoto e pela amizade.

Ao Dr. Clovis Solano e Madalena Niero pela amizade e apoio constante durante minha permanência em São José dos Campos.

À Ilka, Agostinho, Wilson, Silvana, Eduardo Araújo, Daniela, Sâmia, Roberto, Eva e Karla pelo companheirismo, amizade e ótimos momentos vividos.

À turma PGSERE-2004: Avelino, Camilinha, Camila, Conrado, Daniela, Delano, Denis, Eduardo Araújo, Eduardo Arraut, Giovana, Ilka, José Wilson, Marcelo, Marco Aurélio, Marcos Freitas, Michelle, Mônica, Murilo, Natália, Rodrigo, Samuel, Silvana, Vanessa e Wilson Lins pelo companheirismo.

Aos amigos Fábio Gonçalves e Marco Aurélio pelos ensinamentos na utilização dos softwares IDRISI e ENVI.

Agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para minha experiência acadêmica nesta pesquisa e me ajudaram a vencer mais esta etapa da vida.

RESUMO

A Equação Universal de Perda dos Solos (EUPS) é um método muito utilizado por calcular perdas anuais dos solos por erosão, baseado em variáveis climáticas (chuva), pedológicas, topográficas e de uso e manejo do solo. Este estudo foi desenvolvido para inserção de dados SRTM na Modelagem de Erosão utilizando a EUPS. A análise de duas bacias em estudo no Maranhão indicou que os dados SRTM ampliaram a inserção de sensoriamento remoto na aplicação da EUPS como fonte de dados para delimitação de bacias, traçado de redes de drenagem, estimativa do fator topográfico (LS) e refinamento dos dados pedológicos, em substituição a mapeamentos de disponibilidade e detalhamento restritos. O Potencial Natural de Erosão, a Perda de Solo Anual e a Expectativa de Degradação das Terras foram calculados através da sobreposição de fatores climáticos, pedológicos, topográficos (extraídos do SRTM) e de uso e cobertura do solo, parametrizados de acordo com as pesquisas de desenvolvimento da EUPS. Os resultados indicaram que as taxas de perda de solos são baixas, inferiores a 10 t/ha.ano, nas áreas ocupadas com floresta, vegetação degradada e pastagens (31.185,23 ha ou 94,55% da área). Nas áreas ocupadas com cultivos (1.642,14 ha ou 4,98% da área), ocorre um intenso processo de degradação dos solos por erosão, com taxas de perda de solos muito elevadas, superiores a 40 t/ha.ano. Os resultados indicaram que a influência do fator LS sobre o potencial natural de erosão (PNE) foi maior do que a dos fatores Erosividade (R) e Erodibilidade (K). Quando calculadas as perdas anuais e a Expectativa de Degradação das Terras, o fator de uso, cobertura e manejo (CP) mostrou-se o aspecto de maior influência na distribuição da degradação estimada.

APPLICATION OF SRTM DATA TO THE MODELLING OF EROSION IN WATERSHEDS USING GEOPROCESSING

ABSTRACT

The Universal Soil-Loss Equation (USLE) is a widely used method for calculating annual soil erosion losses, based on rainfall, soil type, topographic and land-use parameters. This study was designed to apply SRTM data for erosion modeling through USLE. The analysis of two watersheds in Maranhão showed the feasibility of remote sensing applications beyond land-use survey, since SRTM was used for watershed and drainage extraction, topographic factor (LS) estimates and for the refining of pedological maps, allowing the substitution of maps of limited detail and availability. Topographic factor (from SRTM), climate erosivity, soil erodibility and land use factor, adapted from soil conservation research, were overlaid to the calculation of Natural Erosion Potential (NEP), annual soil loss and erosion expectation. Results showed low overall erosion levels, below 10t/ha.year, under forests, degraded natural vegetation or pastures (31,185.23ha or 94.55% of the study area). In agricultural areas (1,642.14ha or 4.98% of the study area), an intense erosion process occur, with soil loss rates above 40t/ha.year. Results indicated LS factor to prevail over erosivity (R) and erodibility (K) factor in the distribution of natural potential erosion. Otherwise, land-use and managing practices factor (CP) prevailed in the distribution of annual effective erosion and of the calculated soil loss expectation.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	
LISTA DE TABELAS.....	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1	23
INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO 2	27
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 Processos de Erosão	27
2.2 Degradação de Solos e Água em Microbacias	28
2.3 Modelagem da Erosão	29
2.4 Modelagem da Erosão por Geoprocessamento	30
2.4.1 Modelagem de Dados Topográficos.....	32
2.4.2 Shuttle Radar Topography Mission - SRTM.....	32
CAPÍTULO 3	41
MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Especificação das Demandas.....	41
3.2 Área de Estudo	42
3.2.1 Pedologia.....	45
3.3 Dados de Entrada.....	48
3.4 Material Cartográfico	50
3.5 Recursos Computacionais.....	51
3.6 Metodologia.....	52
3.6.1 Análises Morfométricas.....	52
3.6.2 Equação Universal de Perda dos Solos - EUPS	53
CAPÍTULO 4	59
RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Inserção de Dados SRTM.....	59
4.1.1 Fator K – Índice de Erodibilidade do Solo.....	64

4.1.2 Fator LS – Fator Topográfico	68
4.1.3 Fator CP – Uso e Cobertura do Solo e Práticas Conservacionistas	70
4.1.4 Fator R – Índice de Erosividade das Chuvas	72
4.2 Diagnóstico da Erosão	73
4.2.1 Potencial Natural de Erosão - PNE.....	73
4.2.2 Perda Anual de Solo – A	76
4.2.3 Risco de Erosão	78
CAPÍTULO 5	81
CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Ônibus Espacial Endeavour (veículo utilizado para a missão SRTM)..	33
FIGURA 3.1 – Localização da Área de Estudo: Microbacia Hidrográfica Boqueirãozinho e São Gonçalo, MA.....	43
FIGURA 3.2 – Fluxograma de Aquisição dos Dados da EUPS.....	54
FIGURA 3.3 – Medidas de comprimento de rampa sobre visualização ADD para cálculo do fator de ajuste.....	56
FIGURA 4.1 – Ampliação da Inserção do Sensoriamento Remoto na EUPS com SRTM	59
FIGURA 4.2 – Variáveis Topográficas da Microbacia Boqueirãozinho	60
FIGURA 4.3 – Variáveis Topográficas da Microbacia São Gonçalo	61
FIGURA 4.4 – Microbacia Boqueirãozinho.....	62
FIGURA 4.5 – Microbacia São Gonçalo.....	63
FIGURA 4.6 – Rede de Drenagem. Detalhe da Microbacia do Boqueirãozinho.....	64
FIGURA 4.7 – Refinamento dos Vetores do Mapa de Solos. Detalhe da Microbacia do São Gonçalo.....	65
FIGURA 4.8 – Mapa de Solos do Riacho Boqueirãozinho.....	66
FIGURA 4.9 – Mapa de Solos do Riacho São Gonçalo.....	67
FIGURA 4.10 – Comprimento de Rampa (L) e Fator (LS) das Microbacias Boqueirãozinho (dir.) e São Gonçalo (esq.).....	68
FIGURA 4.11 – Classes de Uso e Cobertura do Solo da Microbacia Boqueirãozinho .	70
FIGURA 4.12 – Classes de Uso e Cobertura do Solo da Microbacia São Gonçalo	71
FIGURA 4.13 – Distribuição Mensal da Erosividade (EI_{30}) nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo	73
FIGURA 4.14 – Potencial Natural da Erosão na Microbacia Boqueirãozinho	74
FIGURA 4.15 – Potencial Natural da Erosão na Microbacia São Gonçalo	75
FIGURA 4.16 – Distribuição do Potencial Natural da Erosão nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo	76
FIGURA 4.17 – Distribuição da Perda Anual de Solo na Microbacia Boqueirãozinho, com Sobreposição dos Vetores Correspondentes aos Usos Agrícolas.....	77
FIGURA 4.18 – Histograma da Perda Anual de Solos nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo.....	78
FIGURA 4.19 – Risco de Erosão na Microbacia Boqueirãozinho.....	79

FIGURA 4.20 – Risco de Erosão na Microbacia São Gonçalo.....	79
--	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - Classes de Solos e Fator K	67
TABELA 4.2 – Classes de Relevo e Classes de Declividade	69
TABELA 4.3 – Integração de CP em Função das Classes de Uso e Ocupação do Solo	71
TABELA 4.4 - Distribuição da Precipitação Média Mensal, Cálculo EI_{30} e Fator R.	73
TABELA 4.5 – Potencial Natural da Erosão nas Microbacias (t/ha.ano)	76
TABELA 4.6 – Expectativa de Degradação das Terras na Microbacia Boqueirãozinho e São Gonçalo.....	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADD – Drenagem + Divisores de Água + Orientação de Vertentes

AGNPS – Agricultural Non-Point Source Pollution

ANA – Agência Nacional de Águas

ANSWERS – Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation

ASI – Agenzia Spaziale Italiana

CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

CCD – Charge Coupled Device

CPRM – Companhia de Recursos Minerais

DENAE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

DLR – Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt

DSG – Divisão do Serviço Geográfico do Exército

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator

EUPS – Equação Universal de Perda de solo

EXPECT – Expectativa de Degradação das Terras Naturais

MDE – Modelo Digital de Elevação

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NIMA – National Imagery and Mapping Agency

PI – Plano de Informação

PNE – Potencial Natural a Erosão

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission

TM – Thematic Mapper

USGS – United States Geological Survey

USLE – Universal Soil Loss Equation

WEPP – Water Erosion Predict Project

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o advento dos sistemas computacionais e, mais recentemente, dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), modelos desenvolvidos para estimar a intensidade de processos erosivos puderam ser aplicados de forma espacializada. A Equação Universal de Perda de Solos (Universal Soil Loss Equation – USLE) foi desenvolvida na forma de uma multiplicação de fatores para cálculo da erosão. Esta estrutura permite que o cálculo seja invertido em função de um nível aceitável de perda de solo, de modo a se estimarem entre os fatores condições para a manutenção da erosão nesse nível. Dessa forma, a inversão desses modelos pode ser aplicada ao planejamento de aspectos manuseáveis da ocupação agrícola, tais como a seleção e a disposição de culturas e o dimensionamento de estruturas de conservação do solo (terraceamento e drenagem, por exemplo) em atendimento a necessidades de conservação do solo. O sucesso da implementação de tais modelos em SIG está relacionado diretamente com a evolução da análise integrada de dados de solos, clima, relevo e cobertura vegetal. As possibilidades são limitadas pela oferta desses dados na região de interesse, motivo pelo qual dados de sensores remotos são progressivamente incorporados neste fluxo de análise. Enquanto os dados de solos e de clima provêm de levantamentos diretos e dados topográficos provêm (tradicionalmente) de cartas topográficas, a conveniência técnica e operacional do levantamento da cobertura vegetal através de imageamento por satélites faz desta técnica uma prática consagrada. Devido ao seu peso nos processos erosivos, aliado à limitada cobertura de mapeamentos publicados, os dados de relevo são freqüentemente apontados como grande limitação ao desenvolvimento dessa linha de pesquisa.

Recentes avanços tecnológicos tornaram disponíveis grandes conjuntos de dados topográficos levantados por plataformas orbitais. O programa *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) gerou uma coleção global de dados altimétricos, com perspectiva de importantes impactos benéficos para estudos do meio físico.

Deve-se levar em conta que estes são dados remotos e que, como tais, trazem consigo as limitações intrínsecas do sistema e, portanto, seu uso requer o desenvolvimento de processos de preparação e tratamento para o atendimento à modelagem do relevo por Sistema de Informação Geográfica - SIG. Face a este contexto, propõe-se contribuir com a inserção de dados SRTM nos estudos conservacionistas de microbacias através do desenvolvimento de métodos de análise e modelagem do relevo voltados para o reconhecimento e a compreensão de processos erosivos.

Neste esforço, este estudo tem como objetivo incorporar dados SRTM no fluxo de modelos da degradação de solos e água aplicados ao planejamento conservacionista de microbacias. A área em que se propõe tal desenvolvimento corresponde às microbacias do riacho Boqueirãozinho e do riacho São Gonçalo, ambas da bacia hidrográfica do rio Munim, nos municípios de Chapadinha e Afonso Cunha - Estado do Maranhão. Em termos específicos, busca-se:

- Explorar o potencial de aplicação dos dados SRTM nas diversas etapas da modelagem de erosão em microbacias utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS);
- Aplicar a análise dos dados SRTM no traçado das redes de drenagem e na delimitação de microbacias;
- Avaliar o potencial das variáveis topográficas derivadas de dados SRTM como subsídio à preparação dos dados de solo;
- Estimar o fator topográfico da EUPS a partir de dados SRTM;
- Dimensionar o impacto dos dados SRTM na viabilização da modelagem da erosão com sensoriamento remoto.

A presente pesquisa foi aplicada no diagnóstico da erosão das microbacias de interesse na escala 1:30.000, de acordo com a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS). O Potencial Natural de Erosão (t/ha.ano), a Perda de Solo Anual (t/ha.ano) e o Risco de Erosão (adimensional, relativa à tolerância de solos) foram calculados através da sobreposição de fatores climáticos, pedológicos, topográficos (extraídos do SRTM) e de uso e cobertura do solo, parametrizados de acordo com as pesquisas de desenvolvimento da EUPS. Estes fatores foram tratados em SIG, obedecendo-se a uma série de procedimentos técnicos como interpretações de imagens de satélites, interpolação de dados pluviométricos, extração de variáveis topográficas e refinamento do mapa pedológico a partir de variáveis morfométricas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos de Erosão

A erosão do solo decorrente da combinação dos fatores antrópicos e naturais tem merecido a atenção dos pesquisadores pelas suas implicações na manutenção da produtividade agrícola e na preservação dos recursos naturais de uma forma geral. A remoção da vegetação natural através do desmatamento é a primeira etapa da ocupação de um território. A perda de solo por erosão hídrica está intimamente ligada à precipitação, devido à capacidade de desagregação do solo pelas gotas de chuva e pela contribuição do volume precipitado para o escoamento superficial. A vegetação natural mantém na região um processo de erosão natural, atenuando a ação das chuvas no solo. Quando esta vegetação é removida pode se intensificar na região um processo de erosão acelerada quando a taxa de perdas é muito superior à taxa de formação do solo (Curi et al., 1993).

Segundo Guerra et al. (1999), a erosão ocorre em duas fases: uma que constitui a remoção de partículas e outra que é o transporte desse material, efetuado pelos agentes erosivos. O processo de erosão que mais se observa em ambientes tropicais é a erosão hídrica, definida por Farias (1984), como o processo de desagregação e transporte das partículas do solo pela ação das chuvas.

A erosão pode se manifestar de diversas formas: A erosão laminar que se caracteriza por escoamento superficial da água e se distribui pelas encostas de forma dispersa, não se concentrando em canais; A erosão em ravinas, formada quando a velocidade do fluxo de água aumenta na encosta, tornando o fluxo turbulento e muitas vezes não tendo conexão com a rede de drenagem. A erosão em voçorocas, que pode ocorrer a partir da formação de túneis na subsuperfície com posterior colapso da superfície situada acima ou, a partir do alargamento e aprofundamento de uma ravina na medida em que esta evolui para um canal de água permanente (Guerra et al., 1999). As voçorocas, que são consideradas

feições erosivas relativamente permanentes nas encostas, possuem paredes laterais íngremes e, em geral, fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante os eventos chuvosos.

2.2 Degradação de Solos e Água em Microbacias

Um dos fatores de maior impacto sobre o sistema solo-água em grandes áreas é a erosão hídrica desencadeada pela exploração agrícola (Bertoni e Lombardi Neto, 1999). A falta de planejamento e de gestão dos recursos naturais no Estado do Maranhão vem apresentando sérias conseqüências em decorrência do uso indiscriminado de áreas ribeirinhas, destruição das matas ciliares, assoreamento dos rios e da poluição das águas. Por outro lado, a implantação de grandes projetos agrícolas, que vêm ocupando extensas áreas de terras do Estado, tem se configurado como uma das principais causas de aumento da degradação dos recursos hídricos e de outros componentes ambientais. Tais fontes de impactos erosivos vêm crescendo em expressão territorial. A adequada avaliação destes impactos deve ser feita preferencialmente adotando-se microbacias como unidades de estudo.

A adoção de microbacias hidrográficas como unidade de planejamento vem da crescente percepção de que impactos gerados por uma unidade política (município ou Estado) ultrapassam os limites arbitrários, podendo atingir a toda população dentro de limites funcionais (Silva et al., 2003). A microbacia hidrográfica é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum num determinado ponto de um canal fluvial. Seus limites são definidos por divisores de drenagem ou divisores de águas. Em função de suas características naturais, as microbacias hidrográficas têm se tornado importante unidade espacial utilizada no estudo e no gerenciamento das atividades de uso e conservação dos recursos naturais.

Nas vertentes, as partículas de solo são erodidas por efeito de diferentes processos e depois transportadas até atingirem os sistemas fluviais, ou se depositarem em locais onde a energia do escoamento disponível para o transporte é insuficiente. A erosão e o

assoreamento trazem também como consequência alterações gerais no regime hidrológico de microbacias, provocando maior frequência e intensidade de enchentes (Finco e Hepner, 1998).

2.3 Modelagem da Erosão

Dentre os diversos modelos de predição de perdas de solo pela erosão hídrica, a chamada *Universal Soil Loss Equation* (USLE) de Wischmeier e Smith (1978) é considerado um desenvolvimento de impactos importantes sobre os esforços de conservação do solo, por possibilitar a transferência de tecnologia entre pesquisadores e os usuários (extensionistas e produtores). Bertoni e Lombardi Neto (1999) adaptaram a USLE às condições brasileiras, mais especificamente às paulistas, a partir de experimentos de campo para parametrização de seus fatores nas condições de solo e clima locais, resultando no que passou a ser conhecida como Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), numa tradução direta da expressão USLE. A EUPS (Equação 2.1) agrupa as variáveis que influenciam a erosão em fatores genéricos de relevo, clima, solo e cobertura vegetal, que se relacionam da seguinte forma:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

Onde **A** representa a perda de solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), **R** fator de erosividade da precipitação ($MJ \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$), **K** fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot MJ^{-1}$), **LS** fator topográfico, que compreende o comprimento de rampa ou de encosta (**L**) e a declividade da vertente (**S**), **C** fator relativo à cobertura vegetal e **P** fator de práticas agrícolas conservacionistas, com LS, C e P adimensionais.

Em analogia à EUPS, novos modelos foram desenvolvidos, dos quais se destacam, pela sua ampla difusão e por incluírem a estimativa do material depositado que ocorre nos perfis côncavos e convexos das vertentes, o modelo *Erosion Productivity Impact Calculator* – EPIC (Sharpley e Williams, 1990), que pode ser usado para determinar o efeito de estratégias de manejo agrícola sobre os recursos hídricos e a produtividade de solos; *Water Erosion Predict Project* – WEPP (Flanagan e Nearing, 1995), que se baseia em simulação numérica para estimar a erosão do solo; *Agricultural Non-Point*

Source Pollution – AGNPS (Young et al., 1989), desenvolvido para modelar a distribuição da poluição agrícola no terreno; e *Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation* – ANSWERS (Beasley e Huggins, 1982), que simula o escoamento superficial e a erosão em microbacias predominantemente agrícolas.

De acordo com Risse et al. (1993), Wischmeier e Smith previnem o usuário (da USLE) que a grande fonte potencial de erros está na seleção de valores inadequados dos fatores e que as condições a serem avaliadas devem ser claramente definidas, mas muitos pesquisadores investigaram o uso da USLE em áreas de vegetação natural. A maioria destes estudos mostrou que a USLE não tem desempenho tão bom como quando testado em condições de cultivo agrícola. Apesar destes estudos não apresentarem os mesmos resultados, eles realmente indicam que versões não modificadas da USLE não estimam adequadamente a erosão em solos não-agrícolas.

Entretanto, segundo Ranieri et al. (1998), apesar dos limites e restrições atribuídos à EUPS (Risse et al., 1993; Molnar e Julien 1998), esta continua sendo o principal modelo aplicado em estudos de erosão de microbacias por geoprocessamento. A estrutura da EUPS permite que, espacializados os fatores em mapas individuais, o restante do cálculo pode ser feito com operações simples de sobreposição, permitindo simulações de cenários (Castro e Valério Filho, 1997) e inversão do modelo (Nogueira et al., 2000).

2.4 Modelagem da Erosão por Geoprocessamento

A aplicação de modelos de erosão pode ser efetuada com a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que possibilita a obtenção de resultados na forma de mapas com a distribuição espacial da erosão na área estudada. Para alimentar este estudo é necessária a produção dos Planos de Informação (PI) de cada fator da equação para serem operados através de sobreposição (Wang et al., 2003). Os planos de erosividade (R), erodibilidade (K), fator topográfico (LS) e do fator de uso/manejo (C/P) são construídos dentro do SIG a partir dos planos básicos de pluviometria, solos,

elevação e levantamento da cobertura vegetal, através de desdobramentos, cálculos e associações a pesquisas agronômicas para sua parametrização. O fator P (Práticas Conservacionistas) da EUPS pode ser inserido no modelo através de levantamento e inferências das práticas conservacionistas correntes obtidas através de tabelas com valores de referência (Bertoni e Lombardi Neto, 1999) consolidadas pela pesquisa em conservação de solos. Donzeli et al. (1992) ampliaram o levantamento da cobertura vegetal ao incluir a tomada de dados relativos às práticas de manejo locais, de modo que os fatores C e P fossem conjugados num único fator (CP).

Pesquisas realizadas por Donzeli et al. (1992) e Ranieri et al. (1998), com objetivo de elaborar mapas de risco de erosão nas microbacias hidrográficas do córrego São Joaquim (Pirassununga, SP) e no ribeirão dos Marins (Piracicaba, SP), respectivamente, mostraram que o uso dessa ferramenta possibilita rapidez, integração dos dados e simulação de cenários. Apesar disso, Ranieri et al. (1998) apontaram a falta de confiabilidade dos PI de entrada utilizados em seu estudo, sobretudo o fator topográfico, como fator limitante à qualidade dos resultados e por isso recomendaram os sistemas de aptidão (Ramalho Filho e Beek, 1994) e capacidade de uso (Lepsch et al., 1991) como instrumentos mais seguros para diagnóstico e planejamento conservacionista. Independentemente da abordagem, tanto os sistemas clássicos de planejamento quanto modelos de erosão e combinam primordialmente informações do solo, do clima, do relevo e da cobertura vegetal, sob critérios de classificação no primeiro caso e cálculos numéricos no segundo. Enquanto os sistemas de aptidão e capacidade de uso são reconhecidos instrumentos de planejamento do uso agrícola, a inversão de modelos analíticos pode fornecer importante subsídio para o planejamento do uso conservacionista do solo nas situações em que os métodos clássicos indicam inadequação do uso atual em relação à fragilidade do meio físico.

As imagens de satélite constituem uma importante fonte de informações para estudos do meio físico em microbacias. Há um reconhecimento atual de sua utilidade no monitoramento de recursos naturais (vegetação, solos, culturas agrícolas, minerais e rochas, rios, etc.), previsão do tempo e do clima, desastres naturais (enchentes,

deslizamentos, etc.) e aqueles provocados pelo homem (desmatamentos e queimadas), estudos atmosféricos, planejamento e cadastro em áreas urbanas, e muitas outras aplicações. No estado da arte do presente estudo, o imageamento orbital representa a fonte dos dados relativos à cobertura do solo por vegetação natural ou agrícola, subsidiando o levantamento do fator CP, enquanto outros fatores são inseridos através de outras fontes como mapas e levantamentos (Donzeli et al., 1992).

2.4.1 Modelagem de Dados Topográficos

Os dados topográficos têm sido bastante requisitados nas análises ambientais aplicadas a microbacias. A disponibilidade crescente de bases topográficas digitais, aliada ao uso dos SIG, tem impulsionado o desenvolvimento automático de extração de variáveis topográficas.

2.4.2 Shuttle Radar Topography Mission - SRTM

Grande parte do território nacional é provido de mapeamentos em escalas demasiadamente generalizadas para várias utilizações da informação topográfica. A utilização de modelos de elevação obtidos por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprimir a carência de mapeamentos na América do Sul. Avanços tecnológicos de grande impacto foram alcançados nos últimos tempos, quando o ônibus espacial *Endeavour* orbitou a Terra, realizando a Missão Topográfica por Radar ou *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma missão espacial liderada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com parceria da *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), e das agências espaciais da Alemanha (*Deutschen Zentrum für Luft - und Raumfahrt - DLR*) e Itália (*Agenzia Spaziale Italiana - ASI*). Num período de 11 dias foi gerada a mais completa base de dados sobre a topografia da superfície do planeta, com a obtenção de dados altimétricos com precisão compatível com mapas topográficos na escala de 1:50.000, conforme as condições locais e a aplicação pretendida. Essa missão é um projeto internacional liderado pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), dos Estados Unidos (Rabus et al., 2003).

Visando gerar um modelo de elevação quase global, o ônibus espacial *Endeavour*, veículo espacial utilizado para a missão, foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2000 para uma órbita de 233 km de altitude e com inclinação de 57°. A missão SRTM foi projetada para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de uma técnica de sensoriamento remoto por RADAR chamada interferometria. Para tanto, a nave foi munida de um mastro de 60m (Figura 2.1) cuja extremidade foram instaladas os mesmos sensores para obtenção de dados em paralaxe (diferentes ângulos), o que permitiu a montagem de Modelos Digitais de Elevação-MDE em cobertura de grande parte da superfície terrestre com resoluções de 1 e 3 arco-segundos (Valeriano, 2005). Duas antenas foram utilizadas: SIR-C (Estados Unidos) e X-SAR (Alemanha/Itália). O sistema utilizou os comprimentos de onda (λ) de 6,0 cm para a banda C e 3,1 cm para a banda X. Os MDEs relativos à banda C, para as Américas do Sul e do Norte, estão sendo distribuídos gratuitamente pela NASA com resolução espacial de aproximadamente 90 x 90 metros. Os dados relativos à banda X estão sendo processados e distribuídos pelo DLR – Centro Aeroespacial Alemão (NASA/JPL, 2004).

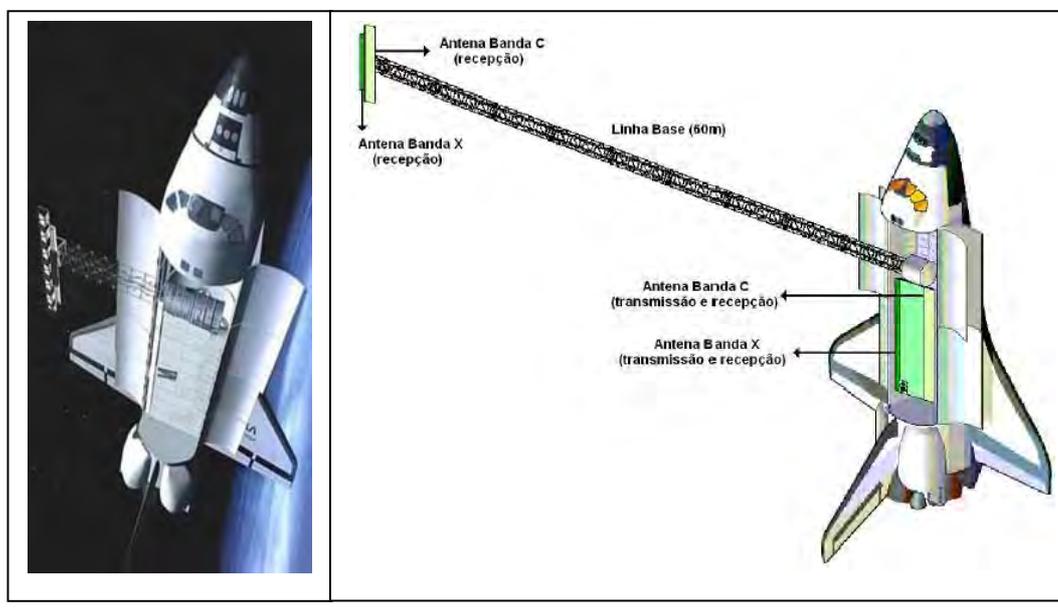


FIGURA 2.1 – Ônibus Espacial Endeavour (veículo utilizado para a missão SRTM)

Um importante avanço em relação ao estado atual dessa linha de pesquisa é a inserção

desses dados no fluxo de estudos do meio físico em substituição a dados de cartas topográficas. Numa situação generalizada em nosso país, os problemas ambientais decorrentes da ocupação territorial agrícola, em vista da carência de informações topográficas para o conhecimento e o manuseio dos impactos que incidem na área de estudo, tornam a viabilidade da aplicação dos dados SRTM na modelagem de microbacias um importante passo para a pesquisa metodológica.

A utilização dos MDEs recai principalmente para obtenção de variáveis derivadas de altimetria. Com a crescente disponibilidade de bases topográficas digitais, aliada ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), torna-se estratégico o desenvolvimento de métodos automáticos de extração e análise de variáveis topográficas, para posterior tratamento e integração em ambiente computacional dos resultados. A declividade (Valeriano, 2003b), orientação de vertentes, curvatura horizontal (Valeriano e Carvalho Júnior, 2003), curvatura vertical (Valeriano, 2003a) e identificação de canais de drenagem e divisores de água, são variáveis morfométricas locais providas de algoritmos específicos para sua extração a partir de MDE.

Estes planos podem ser operados posteriormente para fornecer variáveis não locais (amplitude, distância em relação à drenagem, distância em relação a divisores de água, medidas de densidade de drenagem), que por sua vez, podem fornecer variáveis de maior significado físico, como a detecção de várzeas e patamares e mapeamento de índices topográficos (Moore et al., 1993). Incluem-se também entre as variáveis não-locais a área de captação e o comprimento de rampa, obtidas com operações de conectividade (Valenzuela, 1991), que requerem algoritmos mais complexos do que as variáveis locais.

a) Modelos digitais de elevação (MDE)

Os modelos digitais de elevação podem ser descritos, em analogia às imagens de satélite, como uma imagem de cotas altimétricas (repetido). São representações computacionais que descrevem a altitude ponto a ponto de uma determinada área. Embora os dados altimétricos orbitais sejam relativamente recentes nas metodologias de modelagem do relevo, os recursos de tratamento de MDE foram por longo tempo

desenvolvidos sobre dados cartográficos.

Um estudo sobre metodologia de construção de MDE com curvas de nível (Valeriano 2002b) permitiu verificar que os modelos formados por krigagem, um interpolador inexato, expressaram melhor as formas do relevo em relação a outros interpoladores exatos (Inverso do Quadrado da Distância-IQD e linear), apesar de causar uma ligeira compressão da amplitude do relevo. Observou-se que o desempenho dos processos de derivação posteriores à formação do MDE foi melhorado com este processo. Özdamar et al. (1999) explicam que a krigagem pode ser um interpolador exato ou inexato, dependendo das condições de aplicação, o que indica sua flexibilidade em representar diferentes condições de relevo. Entretanto, as aplicações estritamente dependentes dos níveis altimétricos dos divisores de água e dos canais de drenagem (como cenários de inundação, por exemplo) poderiam ser mais bem supridas por modelos elaborados com interpolação linear ou outros, desde que preservem as cotas altimétricas originais (Blomgren, 1999).

Valeriano (2004) apresentou testes com os dados SRTM que foram disponibilizados para a América do Sul. A apreciação dos dados originais mostrou a necessidade de operações de pré-processamento para estimativas e mapeamento de variáveis morfométricas. Assim como foi observado para curvas de nível, a krigagem dos dados SRTM mostrou-se uma alternativa interessante para a formação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) mais fiéis à conformação do terreno. Os dados apresentaram fortes restrições à sua utilização na sua forma original, porém o pré-processamento desenvolvido permite sua utilização em escalas relativamente detalhadas, sobretudo para ambientes agrícolas. A mesma metodologia para refinamento dos dados SRTM-90m foi aplicada para tornar possíveis estudos detalhados da rede de drenagem na Amazônia (Valeriano et al., 2006). Os dados originais foram pré-processados para traçar de forma detalhada drenagens de baixa-ordem e permitiu estimativas digitais de variáveis morfométricas. Os autores observaram que este refinamento a resolução espacial refinada (de 3' a 1', ou de 90m a 30m) favoreceu a superação dos principais limitantes à modelagem da drenagem.

b) Declividade (S)

A declividade é o ângulo de inclinação da superfície local em relação ao plano horizontal. Pode ser expressa em graus ou em porcentagem. A geração do PI declividade é feito através de máscaras ou janelas móveis, explorando-se a função de derivação na vizinhança de cada célula (Valenzuela, 1991) para toda a área de interesse. Os sistemas atuais permitem uma série de opções para o cálculo da declividade, podendo-se, inclusive, estabelecer uma formulação de cálculo próprio, elaborado pelo usuário (Eastman, 1995).

c) Comprimento de rampa (L)

O comprimento de rampa tem importante influência sobre comportamento da enxurrada, determinando igualmente a velocidade do fluxo, além do grau de confluência do escoamento superficial. A capacidade de remoção e de transporte de partículas do solo pelo escoamento superficial está, portanto, diretamente ligada ao comprimento de rampa. Há uma série de estudos voltados especificamente sua estimativa por geoprocessamento (Desmet e Govers, 1996; Kinnel, 2001; Valeriano, 1999), que em geral desenvolvem uma seqüência de operações em SIG para o mapeamento automático de variáveis topográficas relacionadas a modelos de erosão, as quais são tradicionalmente medidas à mão sobre as cartas altimétricas. Um dos subprodutos do estudo de Valeriano (1999), requerido para atender aos objetivos finais específicos, foi a detecção automática dos divisores de água através de derivação do Modelo Digital de Elevação (MDE). Este estudo fornece ainda diretrizes básicas e técnicas especiais para a formação de MDE com características desejáveis para o geoprocessamento.

A intensidade da erosão hídrica é variável dependendo da rampa que a água percorre, através de suas características comprimento (L) e grau de declive(S). Estes fatores são estudados isoladamente, mas para aplicação na EUPS, são analisados conjuntamente, constituindo o fator topográfico (LS). O LS representa a relação esperada de perdas de solo por unidade de área em um declive qualquer, comparada às perdas de solo correspondente em uma parcela unitária padrão de 25 metros de comprimento com 9%

de declividade (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

O fator LS é um dos fatores mais importantes da EUPS, porém é o que apresenta mais dificuldades para sua obtenção, especialmente quando se deseja estimar a perda de solos de uma microbacia. Esta dificuldade se dá pela complexidade do relevo, na qual o declive pode ser reto, côncavo, convexo ou uma combinação dos formatos (Rocha et al., 1997).

Em alguns trabalhos (Fujihara (2002), Machado (2002), Ruhoff et. al (2002), Gameiro (2003), Paranhos Filho et al (2003), Silva (2004) e Pedro et. al (2004)) esse fator foi obtido por medições diretas em cartas topográficas ou pela razão entre a área da bacia (m^2) e o somatório de todos os cursos de água da bacia (m).

d) Orientação de vertentes (ADD)

A orientação de vertentes é uma medida de ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial, geralmente expressa em azimute, isto é, em relação ao Norte geográfico, onde o valor é 0° (ou 360°), crescendo desta direção no sentido horário. Corresponde à direção azimutal do vetor cujo módulo é a declividade. Tomando-se uma malha de observações em uma vertente, o alinhamento de pontos em orientações próximas entre si determina as chamadas linhas de fluxo, que constituem os elementos básicos da estrutura da hidrologia superficial de uma microbacia.

Quanto maior a latitude, maior a influência da orientação de vertentes no regime térmico (hídrico) devido à incidência de energia solar, maior nas vertentes orientadas ao Equador do que aos Pólos. Em regiões de clima temperado, tal mecanismo é levado em conta na distribuição de culturas agrícolas e no valor de terras, o que faz da orientação de vertente uma variável de significado relevante no planejamento territorial.

Valeriano e Moraes (2001) fizeram uma adaptação de recursos de SIG para evidenciar os canais de drenagem e divisores de água a partir do MDE, como forma de suporte à leitura dos elementos da drenagem com fins de classificação fisiográfica.

Esta técnica deu suporte para a avaliação de modelos com um processo de visualização ADD (Azimute, Drenagem, Divisores) que realça feições da hidrologia superficial, baseado em canais de drenagem, divisores de água e orientação das vertentes.

e) Curvatura vertical (k_v)

Os estudos de compartimentação da topografia apontam a curvatura vertical das vertentes como uma das variáveis de alto poder de identificação de unidades homogêneas do relevo (Doornkamp e King, 1971). A curvatura vertical refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, quando analisado em perfil. Esta variável está relacionada aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade. A ação da curvatura decorre da combinação dos efeitos isolados da declividade e do comprimento de rampa. Associada à exposição de vertentes (aspecto), a curvatura vertical desempenha papel importante sobre a evapotranspiração e o decorrente balanço hídrico.

A percepção da curvatura vertical do terreno no campo, quando não ocorre visualmente (em perfil), se dá pela variação da declividade enquanto se percorre a vertente em sua orientação (direção do desnível). Em geoprocessamento, há diferentes soluções para simular estas observações através do uso de janelas móveis (Giles e Franklin, 1998; Schmidt et al., 2003; Valeriano, 2003).

f) Curvatura horizontal (k_h)

A curvatura horizontal refere-se ao caráter divergente/convergente do escoamento superficial (potencial) sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal (Schmidt et al., 2003). Esta variável está relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade. Analogamente à curvatura vertical, desempenha papel importante sobre o balanço hídrico e o equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese (Moore et al., 1993). Como medida de concentração do escoamento superficial, é uma variável importante também para a compreensão de problemas urbanos ligados ao posicionamento de estruturas de drenagem e mapeamento das

possíveis áreas de alagamento.

A percepção da curvatura horizontal é feita através das direções de declive (denominadas linhas de fluxo) adjacentes. As áreas em que estas linhas estão paralelas têm curvatura horizontal nula e se diz que o terreno é planar. Áreas com linhas de fluxo indicando convergência e divergência têm curvaturas não-nulas com sinais opostos. Analogamente à curvatura vertical, a curvatura pode ser expressa tanto em ângulo por distância (exemplo, graus por metro) como em raio de curvatura (metros).

A curvatura vertical foi observada como um descritor de terreno capaz de agrupar várias bacias e interflúvios em uma área maior e de evidenciar traçado dos principais ambientes de relevo, enquanto a curvatura horizontal é um descritor fortemente local, pois é natural a mudança de convergente para divergente dentro de uma única rampa.

As curvaturas horizontais e verticais combinadas representam uma caracterização das formas do terreno, às quais se associam propriedades hidrológicas e de transporte de sólidos, diretamente, e pedológicas, ecológicas, além de uma série de outros aspectos, indiretamente. Os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento). As combinações intermediárias têm características hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades (módulos) dos efeitos individuais de cada componente.

g) Delineamento de canais de drenagem e divisores de água

O delineamento de canais de drenagem e divisores de água é o ponto de partida para o traçado de microbacias e a organização funcional de seus elementos para modelagem da hidrologia fluvial (Band, 1986). A rede de drenagem é uma das mais importantes características do terreno para a indicação de diferenças entre solos. O Padrão de drenagem, definido pelo arranjo espacial dos rios e seus afluentes, foi amplamente explorado na definição de zonas homólogas em estudos de segmentação do meio físico. As técnicas de extração de informações da drenagem se baseiam em características qualitativas (forma ou tipologias) e quantitativas (ordem de ramificação, distribuição,

densidade e frequência).

Os canais de drenagem podem ser descritos sob diferentes aspectos e formas, nas quais se apóiam as diferentes metodologias para seu levantamento a partir do relevo (Rennó e Soares, 2001; Valeriano e Moraes, 2001, Band, 1986). Entre essas, pode-se adotar como critério para sua identificação um nível mínimo de convergência (curvatura horizontal) ou de área de captação (fluxo acumulado). De forma mais simples, pode ser determinado por todos os pontos de mínimo em seções transversais dos vales, ou ainda como todos os pontos cuja vizinhança contém uma única direção indicando altitude abaixo da cota local.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Especificação das Demandas

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi construído um modelo digital da área de estudo contendo a base de dados georreferenciada, gerado a partir de quatro planos de informação envolvendo os termos da EUPS - Equação Universal de Perdas de Solos (Weichmeier e Smith, 1978). A técnica de geoprocessamento permitiu o tratamento dos dados, desde a sua entrada, passando pela edição, armazenamento e, finalmente, as análises ambientais, com a extração das informações registradas nos cartogramas digitais.

Como o objetivo do trabalho é a inserção de dados SRTM na EUPS, criou-se a base de dados digital, que representou os parâmetros da EUPS, constituída do levantamento das condições ambientais vigentes, representados pelos quatro fatores da equação (Erosividade-R, Erodibilidade-K, Fator Topográfico-LS e do Fator de Uso e Cobertura-C/P) para as microbacias Bonqueirãozinho e São Gonçalo. Assim, os dados primários levantados foram digitalizados com objetivo de compor as grades de sobreposição de informações integradas pelo modelo EUPS. Os dados topográficos foram obtidos diretamente do SRTM, as classes de solos foram refinadas através das variáveis morfométricas extraídas do SRTM e os dados sobre a precipitação foram coletados de estações meteorológicas do DENAEE. O levantamento do uso e cobertura do solo foi obtido de documentação cartográfica e melhorado a partir da interpretação de imagens digitais TM/Landsat e CCD/CBERS, com apoio de uma chave de interpretação definida conforme as características de comportamento espectral dos alvos. A integração dos dados gerou como produtos básicos cartogramas temáticos referentes ao uso e cobertura do solo, pedologia, fator topográfico (LS), potencial natural de erosão, perdas dos solos e Risco de Erosão.

3.2 Área de Estudo

O Estado do Maranhão ocupa área de aproximadamente 333.360 km² e é um dos Estados brasileiros de maior riqueza em recursos hídricos. Essa riqueza está representada pelas microbacias hidrográficas, bacias lacustres e águas subterrâneas. Os rios maranhenses se caracterizam por apresentar grande extensão e volume de água. Os principais rios do Estado são: Mearim, Itapecuru, Pindaré e Munim.

A bacia do rio Munim está localizada na porção Nordeste do Estado, compreendida entre as coordenadas geográficas 02°45' e 04°45' de latitude Sul e 43°00' e 44°15' de longitude Oeste. Esta bacia está representada pela área drenada pelo rio Munim e seus tributários. A superfície da bacia é de 15.926,94 Km², representando cerca de 4,8% da área do Estado.

A área de estudo compreende as microbacias do Riacho Boqueirãozinho e Riacho São Gonçalo, ambas da bacia do rio Munim, localizada nos municípios de Chapadinha e Afonso Cunha. A microbacia Boqueirãozinho está compreendida entre as coordenadas geográficas 03°37'37'' e 03°43'33'' de latitude Sul e 43°22'18'' e 43°32'55'' de longitude Oeste. Já a microbacia São Gonçalo localiza-se entre as coordenadas 03°59'46'' e 04°16'25'' de latitude Sul e 43°17'15'' e 43°23'35'' de longitude Oeste (Figura 3.1).

As microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo abrangem uma área de 11.428,63 ha e 21.555,81 ha, respectivamente. A sua rede de drenagem possui disposição na forma dentrítica, apresentando ramificações irregulares de cursos de água em todas as direções. Os ângulos de inserção entre os canais de drenagem secundários e os principais são os mais variados. Este modelo expressa uma característica básica das bacias sedimentares, que é a presença de rochas sedimentares com pouca resistência à erosão.

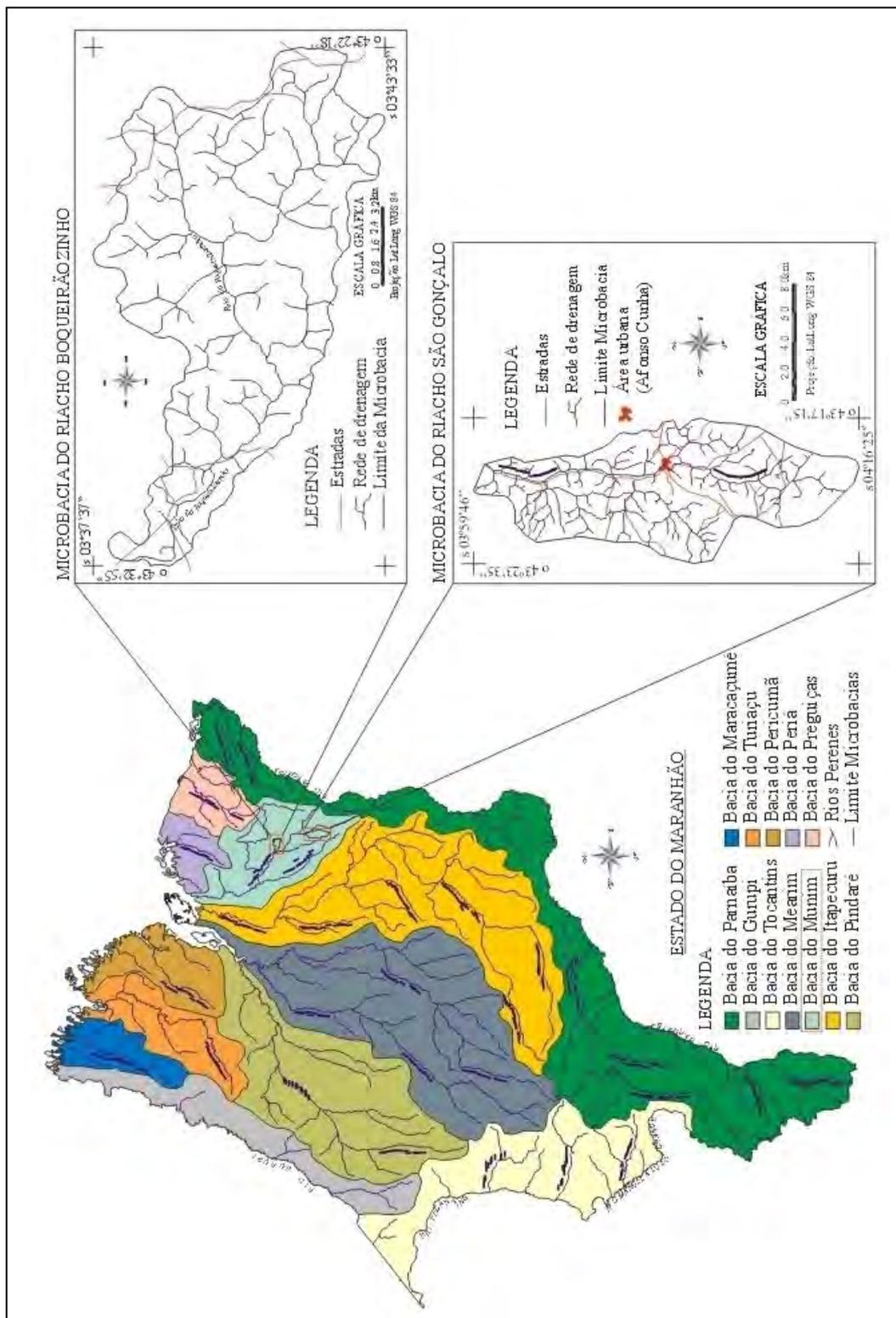


FIGURA 3.1 – Localização da Área de Estudo: Microbacia Hidrográfica Boqueirãozinho e São Gonçalo, MA.

O principal tipo climático identificado nas microbacias segundo a classificação de THORNTHWAITE é **C2WA'a** – Clima Sub-Úmido, com moderada deficiência de água no inverno, entre os meses de junho a setembro. A temperatura média mensal é sempre superior a 18°C, sendo que a soma da evapotranspiração potencial nos três meses mais quentes do ano é inferior a 48%, em relação a evapotranspiração potencial anual (Atlas do Maranhão, 2002).

A principal formação geológica existente nas microbacias é a Formação Itapecuru que pertence ao Cretáceo Superior e ocupa quase metade do Estado do Maranhão, onde é a mais importante do ponto de vista sócio-econômico devido à extensão de área e a grande densidade demográfica localizada sobre ela. Constitui-se principalmente de arenitos finos ou muito argilosos às vezes com presença de folhelhos. Em decorrência das altas temperaturas e umidade da região onde se encontram, estes sedimentos apresentam elevado estado de intemperização, o que origina principalmente os Latossolos e Plintossolos com presença de areia fina e silte com baixa capacidade de troca catiônica (EMBRAPA, 1986).

As unidades geomorfológicas das microbacias resultam dos processos de aplainamento da área. Como consequência, a microbacia do Munim apresenta-se, segundo IBGE, 1984, com a unidade geomorfológica Superfície Maranhense com testemunhos, que corresponde ao aplainamento da região, restando entre os interflúvios alguns morros testemunhos tabulares da superfície de cimeira existente antes desse processo.

Os principais tipos de vegetação existentes na área estão representados pela Floresta de Babaçu e pelo Cerrado. Com grande predominância na área, a Floresta subcaducifolia dicótilo-palmácea (babaçual) que ocorre ao longo de toda a microbacia. A principal espécie de babaçu encontrada é a *Orbignya spp*, que ocorre em agrupamentos compactos como resultado do desmatamento da floresta estacional perenifolia aberta com babaçu, surgindo, neste caso, como vegetação secundária (EMBRAPA, 1986).

3.2.1 Pedologia

Em termos de solos, o levantamento pedológico feito pela EMBRAPA (1986) indica que as unidades predominantes nas microbacias estudadas pertencem a classes dos Latossolos e Argissolos Vermelho-Amarelo, os quais representam respectivamente 50,65% e 31,25% da área total. O restante das microbacias está coberto por pequenas manchas de Plintossolo. A seguir, serão apresentadas as características gerais dos tipos de solos encontrados nas microbacias:

a) Latossolo Amarelo textura média Álico e Distrófico fase cerrado subcaducifólio e fase floresta subcaducifólia dicótilo-palmácea (babaçual) relevo plano e suave ondulado

São solos de coloração amarelada, com transições graduais ou difusas entre seus subhorizontes. São profundos, bem drenados, de textura média no horizonte B. Apresenta estrutura fraca a moderada, muito pequena a média granular, com transição plana e gradual ou clara para o horizonte B.

Estão distribuídos em áreas de topos de chapadas baixas pouco dissecadas, de relevo plano com pequenas e suaves ondulações. São originados de materiais da formação Itapecuru e estão sob as formações de cerrados subcaducifólio e floresta subcaducifólia.

Nos Latossolos de uma maneira geral devido a sua pobreza química e mineralógica, a matéria orgânica passa a ter um papel preponderante na nutrição das plantas e se constitui na única fonte fornecedora de elementos nutritivos. Assim, o uso destes solos está condicionado na utilização de um manejo que mantenha um nível razoável de matéria orgânica, a fim de não provocar a perda da fertilidade deste solo.

As áreas destes solos são aproveitadas com culturas de milho, feijão, arroz, mandioca, pouca pastagem plantada e alguma fruticultura.

b) Argissolo Vermelho-Amarelo e Luvisolos

São solos com horizonte B textural, argila de atividade baixa ou alta, com seqüência de

horizontes A, B_t, C. Possuem marcante diferenciação morfológica entre os horizontes. O horizonte A é moderado, com profundidade em torno de 20 cm, podendo ser mais espesso, subdividido em A₁ e A₃ de coloração brunadas; textura da classe franco a franco arenosa, estrutura fraca ou moderada em blocos subangulares ou granular e maciça, e grãos simples. O horizonte A pode ser com cascalho ou cascalhento quando o solo for quase concrecionário.

O horizonte B_t pode estar subdividido em B_{1t}, B_{2t} e B_{3t}. Possuem profundidade variada podendo ser rasos nos solos litólicos até muito espesso nos solos profundos. A cor varia do vermelho ao bruno, verificando-se no entanto com maior frequência as cores vermelhas, podendo apresentar mosqueados com presença ou não de plintita.

Nesta classe de solos, são encontrados os Podzólicos Vermelho-Amarelo Álicos e Distróficos, onde a saturação de bases, inferior a 50%, e Podzólicos Vermelho-Amarelo Eutróficos, com alta saturação de bases, acima de 50%.

Ocupam áreas de colinas e outeiros com relevo variando de suave ondulado até forte ondulado. São originados de materiais da Formação Itapecuru.

O uso destes solos está condicionado principalmente ao tipo de relevo. Nas áreas de relevo suave ondulado e ondulado devem ser aproveitados racionalmente com culturas onde os fatores limitantes podem ser corrigidos com a utilização de corretivos, adubos e controle da erosão. As áreas de relevo forte ondulado deveriam ser destinadas à preservação da flora e fauna.

c) Plintossolo Petrico Concrecionário

Compreende solos com horizonte B textural, semelhante ao descrito anteriormente, diferindo deste por apresentar nos seus perfis grande quantidade de calhaus e cascalhos constituídos de concreções de ferro que foram formados pelo endurecimento irreversível da plintita. São solos fortemente ácidos, com saturação de bases baixa ou alta e saturação com alumínio alta. O relevo varia de suave ondulado a forte ondulado e são originados de materiais da formação Itapecuru.

Estes solos apresentam fortes limitações quanto ao manejo e à mecanização agrícola, face à grande quantidade de calhaus e cascalhos na superfície e dentro do perfil e também por estarem situados em topografia ondulada e forte ondulada. Para o aproveitamento racional destes solos seriam necessárias pesquisas e experimentações com as culturas mais adequadas às condições físicas destes solos. Atualmente, estão cobertos com babaçuais nativos, e que, além do extrativismo do coco babaçu, se encontram intercaladas pequenas culturas de subsistência (Arroz, mandioca e milho).

d) Plintossolo

Esta classe compreende solos sujeitos ao efeito temporário do excesso de umidade, são imperfeitamente drenados, e se caracterizam por apresentar horizonte plíntico. Possuem seqüência de horizontes A₁, A₂, B_{tpl} - C_{pl} ou A-C_{pl}. O horizonte B_{tpl} é caracterizado pela presença de plintita de cor vermelha em conjunto com cores acinzentadas dando uma coloração variegada, característica destes solos. São Álicos, Distróficos e Eutróficos, ocupam áreas de relevo plano ou suave ondulado.

Estes solos ocupam áreas de relevo suave ondulado, com vegetação subcaducifólia dicótilo-palmácea babaçal ou com babaçu. São utilizados com extrativismo de babaçu, cultura de mandioca, arroz, cana-de-açúcar, milho e pastagens implantadas de capim elefante, brachiária, jaraguá além da pecuária extensiva, de bovinos.

Ocorrem em áreas no vale do riacho São Gonçalo, município Afonso Cunha, e como se situam em relevo suave ondulado, o uso de mecanização agrícola é fornecido para sua utilização racional necessita de algumas práticas conservacionistas, a fim de evitar os efeitos da erosão, principalmente quando se cultiva plantas de ciclo curto, devido à diferença textural entre os horizontes A e B, arenosa/argilosa ou média/argilosa.

e) Gleissolos

Ocorrem nas planícies de inundação dos rios, são mal drenados, fortemente ácidos, pouco profundos e de textura indiscriminada. Apresentam como característica principal, o hidromorfismo, que consiste no processo de oxidação e redução do ferro no perfil,

conforme a oscilação do lençol freático. Os compostos de ferro se reduzem a ferroso ou se oxidam, provocando o aparecimento de mosqueados amarelo-avermelhados no perfil.

As áreas destes solos estão localizadas em pequenas faixas nos fundos dos vales e margens de rios e riachos. Estão quase sempre encharcados, com o lençol freático próximo ou à superfície, o que prejudica por falta de aeração o desenvolvimento radicular da grande maioria das culturas.

Atualmente estas áreas são pouco utilizadas com a agricultura, sendo largamente utilizados com o extrativismo de açaí ou juçara e buriti, que são plantas adaptadas às condições de encharcamento ou má drenagem dos solos. Para o aproveitamento racional destes solos, devem ser realizadas pesquisas e experimentos, com o objetivo de um melhoramento genético visando maior produtividade para estas palmeiras nativas, preservando inclusive as já existentes.

f) Neossolo Quartzarênico Hidromórfico

São solos que apresentam um perfil pouco evoluído, de textura arenosa, mal drenados, porosos, de consistência muito friável ou mesmo solto em todo o perfil. São de fertilidade natural baixa o que limita o seu uso agrícola. Ocorrem em baixadas, vales de riachos sujeitas a alagamentos, e estão associados à unidade Plintossolo.

O resultado da espacialização do fator K está diretamente relacionado ao mapeamento pedológico, uma vez que esse parâmetro é uma característica inerente a cada classe de solos.

3.3 Dados de Entrada

As imagens foram copiadas da rede mundial de computadores diretamente do endereço da USGS (United States Geological Survey), em que permanecem disponíveis sob a resolução de 3", ou cerca de 90m (<http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>). Foram capturados dados SRTM de todo o território nacional em segmentos correspondentes às folhas 1:250.000, de 1° de latitude por 1,5° de longitude. A preparação dos dados consistiu na modificação do MDE SRTM original para um novo MDE, com

características desejáveis. Entre as modificações pretendidas, listam-se: a resolução melhorada, de 1'' (~30m); a remoção das falhas; redução de artefatos; e distribuição da aleatoriedade. Os dados foram tratados desde a imagem (TIFF) original até o MDE (Valeriano, 2005).

As variáveis topográficas produzidas, basicamente descritores locais do terreno (altimetria, declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal, curvatura vertical, talwegues e divisores de água) e as variáveis não locais (densidade de drenagem e comprimento de rampa etc.) foram extraídas do SRTM utilizando metodologia desenvolvida por Valeriano (1999).

A seleção das microbacias foi feita com vistas à observação de diferenças do ponto de vista dos condicionantes de processos erosivos. Estas tiveram seus limites digitalizados sobre as variáveis morfométricas e imagens TM Landsat / CCD CBERS.

A análise de distribuição da erosividade da chuva (fator R) ao longo do ano foi determinado através da Equação (3.1), proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1999).

A erodibilidade (fator K), que reflete a suscetibilidade à erosão para determinado tipo de solo, foi obtida através da associação dos valores encontrados em Bertoni e Lombardi Neto (1999) e adaptados para as condições de áreas semelhantes no Estado do Maranhão. As manchas de solos foram extraídas do mapa de levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Maranhão (EMBRAPA, 1986) e refinadas a partir das variáveis morfométricas (curvatura vertical e declividade) extraídas do SRTM.

O fator topográfico (LS), que relaciona a intensidade de perdas esperadas de solo em função do comprimento de rampa e da declividade, foi obtido através da Equação (3.2) de Bertoni (1959).

O fator CP foi compilado com base nos valores utilizados em diversos trabalhos (Stein et al., 1987) e adaptado para as condições das microbacias estudadas por Lopes (2006). As classes de uso e cobertura foram adquiridas do mapa de uso e cobertura dos solos do

Estado do Maranhão (EMBRAPA, 2000) e atualizadas a partir da interpretação visual das imagens TM Landsat e CCD CBERS.

A estimativa da erosão atual (fator A) foi obtida do cruzamento de todos os planos de informação referentes aos fatores da EUPS (R, K, LS, CP) conforme proposto por Bertoni e Lombardi Neto (1999).

O potencial Natural de Erosão (PNE) foi obtido utilizando parte da EUPS por cruzamento dos fatores R, K e LS que exprimem as condições naturais do clima, do solo e do terreno, sendo utilizada para identificação das áreas de risco de erosão como propôs Donzeli et al. (1992). As classes de PNE adotadas foram extraídas de Weill (1999).

O Risco de Erosão foi obtido pela razão dos produtos A (Erosão) e T (Perda dos Solos) e indica qual o grau de erosão que se espera em um determinado local (Bertoni e Lombardi Neto, 1999; Weill, 1999; Carvalho Filho, 2005).

3.4 Material Cartográfico

Para subsidiar esta pesquisa foram utilizados mapas de: Geologia, Geomorfologia, Solos, Uso e Cobertura vegetal e Clima.

Para inserção de dados sobre a geomorfologia local utilizou-se principalmente dados SRTM em escala aproximada de 1:30.000. Adicionalmente, utilizaram-se mapas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 1994 e 2000) referentes às folhas: SA.23 – Z – A e SB.23 – X – A (Escala 1: 250.000 e 1:500.000) e informações disponíveis em trabalhos desenvolvidos pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Maranhão (Maranhão, 1998).

O mapeamento das classes de solos que ocorrem na área de estudo, foi baseado no estudo desenvolvido pela EMBRAPA e RADAM (1:1.000.000).

Com relação ao mapa de uso e cobertura do solo, foi usado como referência, o mapa produzido para Zoneamento Ecológico-econômico do Estado do Maranhão

(EMBRAPA, 2000) na Escala 1:250.000, sendo feitas às devidas atualizações utilizando imagens Landsat/CBERS.

Como fonte de informações Climatológicas, foi utilizado o banco de dados do Laboratório de Meteorologia do Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. Dentre os diversos parâmetros levantados, a carta de erosividade (fator R) foi confeccionada a partir de séries históricas (22 anos) das precipitações pluviométricas observadas para a região e extraídas de três estações meteorológicas: duas do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica-DENAE (543006 e 2773433) e uma da Agência Nacional de Águas-ANA (443023).

Para o controle das variáveis topográficas extraídas das imagens SRTM, foram utilizadas as Cartas Planialtimétricas da Divisão de Serviços Geográficos do Exército (DSG) na escala de 1:100.000, com equidistância vertical de 50m, folhas: MI-674, MI-675 e MI-742.

Imagens de Sensores Remotos

Em atendimento às necessidades da presente pesquisa utilizaram-se os produtos:

- SRTM em cortes correspondentes às folhas da articulação 1:250.000 SA-23-Z-C e SB-23-X-A;
- TM LANDSAT-5, órbita/ponto 220/62 e 220/63, bandas espectrais 3, 4 e 5, adquiridas em 26.07.2004 ;
- CCD CBERS-2, órbita/ponto 155/104, 155/105 e 156/104, bandas espectrais 2, 3 e 4, de 30.05.2004.

3.5 Recursos Computacionais

O projeto foi desenvolvido através dos programas IDRISI, ENVI e Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas. Entretanto, dispomos de outros programas para viabilizar o trabalho tais como: Surfer (SIG), Excel (planilhas eletrônicas), Minitab, (análise estatística), além de programas desenvolvidos para

múltiplos fins.

O ENVI (Research Systems Incorporation, 2002) - foi usado para correção de falhas do SRTM, amostras e exportação de dados em ASCII;

Surfer (Golden Software, 1995) - para interpolações dos dados pluviométricos;

IDRISI (Eastman, 1995) foi usado para operações como aplicações de teste, extração de variáveis morfométricas, delimitação das microbacias, cálculo do fator R e refinamento do mapa de solos;

SPRING (INPE, 2005) – utilizado para extração da drenagem, atualização das classes de uso e cobertura do solo e refinamento do mapa de solos.

3.6 Metodologia

3.6.1 Análises Morfométricas

Para o cumprimento de suas aplicações, os dados SRTM foram desdobrados, após refinamento em planos de informação de variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes e curvaturas) bem como em planos de informação de variáveis classificadas e combinadas para caracterização qualitativa da topografia, tais como o processo ADD e as formas do terreno, conforme exposto por Valeriano (2005). O banco de dados morfométricos foi desenvolvido usado para fornecer variáveis analíticas, bem como componentes de análises de terreno, assinatura geométrica, modelagem de bacia e classificação digital de imagem de relevo, como também um apoio para outros cálculos.

Os algoritmos para derivação morfométrica advêm de estudos específicos sobre seu desenvolvimento. Dessa forma, a declividade (Valeriano, 2002), a curvatura vertical (Valeriano 2003) e a curvatura horizontal (Valeriano e Carvalho Júnior, 2003) foram obtidos com processos otimizados para máxima correlação com dados de controle. O algoritmo para cálculo de orientação de vertentes, por sua vez, é um dos recursos do SIG utilizado (Eastman, 1995). Enquanto a informação de curvatura horizontal foi aplicada para delimitação de bacia, merece destaque o potencial de dados de curvatura

vertical para a delimitação das unidades dos solos, além das várias aplicações de topografia regional. O banco de dados morfométrico é complementado por um processo de visualização chamado ADD (Azimute, Divisores e Drenagem), que apresenta um delineamento de canais de drenagem e divisores de água, sobreposto a uma representação da orientação de vertentes. Uma codificação adequada (circular) de classes de orientação de vertentes proporciona uma sensação de tridimensionalidade desejável ao produto ADD.

As microbacias foram delimitadas através de digitalizações sucessivamente aprimoradas sobre as imagens de altitude, ADD, e orientação de vertentes. A altimetria, apresentada em níveis de cinza, fornece uma visão do relevo que permite uma delimitação geral das microbacias que, embora imprecisa, assegura sua integridade funcional. A visualização em ADD permite o traçado conjunto dos divisores de água internos e dos canais de drenagem, promovendo ao mesmo tempo uma verificação do primeiro traçado e um posicionamento mais refinado dos limites digitalizados. Por fim, a orientação de vertentes visualizada em escala de cinza circular (distribuindo-se os níveis de cinza com claros para o norte e escuros para o sul) permite que se posicionem precisamente estas feições sob grande ampliação.

3.6.2 Equação Universal de Perda dos Solos - EUPS

Os parâmetros da EUPS foram obtidos por meio dos procedimentos metodológicos ilustrados na Figura 3.2.

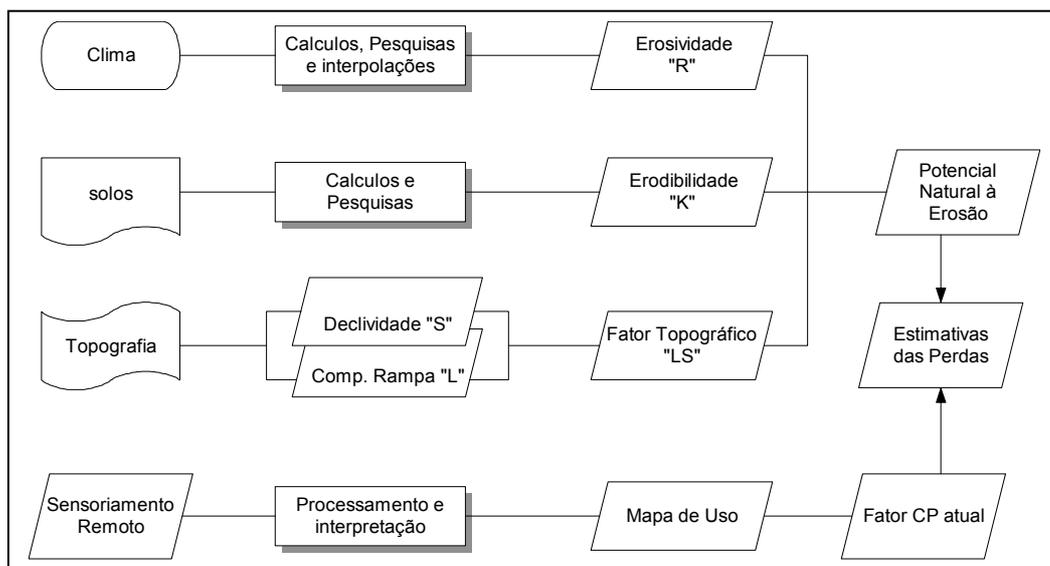


FIGURA 3.2 – Fluxograma de Aquisição dos Dados da EUPS

Fator R - Índice de Erosividade das Chuvas

O Fator chuva é o índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção adequada. As perdas de solos, segundo Wischmeier e Smith (1978), são diretamente proporcionais ao produto da energia cinética total da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos. Este fator mede a interação do processo de transporte das partículas do solo que ocorre entre a enxurrada e a erosão do impacto, salpico e turbulência.

Para aplicação da EUPS nas duas microbacias, foram selecionadas três estações sendo que duas delas se encontram dentro das microbacias e uma em seu entorno que serviram de apoio na interpolação. Para determinação do fator R foi calculada a média aritmética simples para as três estações pluviométricas. Calculadas as médias foi extraído o valor de R para cada estação pluviométrica por meio da Equação (3.1), proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), onde R é a somatória das médias mensais do índice de erosão (EI_{30}). Obtidos estes valores, foi criado um arquivo com as coordenadas de cada estação pluviométrica e os valores de R correspondentes.

$$EI_{30} = 89,823 \left(\frac{r^2}{p} \right)^{0,759} \quad (3.1)$$

onde:

EI_{30} = erosividade média mensal do mês (MJ.mm/ha.h);

r = precipitação média mensal do mês (mm);

p = precipitação média anual (mm).

Fator K - Índice de Erodibilidade do Solo

O índice de erodibilidade de um solo pela água é determinado pelas suas propriedades intrínsecas que afetam a velocidade de infiltração da água no solo, permeabilidade e a capacidade de absorção da água; e as que conferem resistência à dispersão, ao salpicamento, à abrasão e as forças de transporte da chuva e enxurrada (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

Os valores do fator K para cada tipo de solo da região de estudo foram obtidos através da associação dos valores encontrados na tabela de Lombardi Neto e Bertoni (1975), resumidos em tabela por Bertoni e Lombardi Neto (1999). A espacialização do fator K foi feita através da criação de um Plano de Informação no programa SPRING e IDRISI denominado Solo onde foram digitalizadas as distintas manchas de solo abrangidas pela área de estudo, sendo cada uma delas vinculada ao valor correspondente do fator K.

A digitalização das manchas de solos foi baseada no levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Maranhão (EMBRAPA, 1986). Sendo realizado um refinamento destas manchas utilizando as variáveis morfométricas curvatura vertical e declividade.

Fator LS – Fator Topográfico

O cálculo do fator LS combina a declividade do terreno com o comprimento de rampa,

segundo a Equação 3.2, baseada nas fórmulas obtidas por Bertoni (1959).

$$LS = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18} \quad (3.2)$$

onde:

LS = Fator Topográfico;

L = Comprimento de rampa/encosta (m);

S = Declividade média da rampa/encosta (%).

Para obter o plano de informação de LS foi necessário complementar o banco de dados morfométricos com o comprimento de rampa. A técnica usada o cálculo de L consiste na aplicação de um algoritmo de SIG seguida de um ajuste por um fator determinado com base em medidas manuais obtidas sobre uma apresentação ADD do terreno, conforme a Figura 3.3

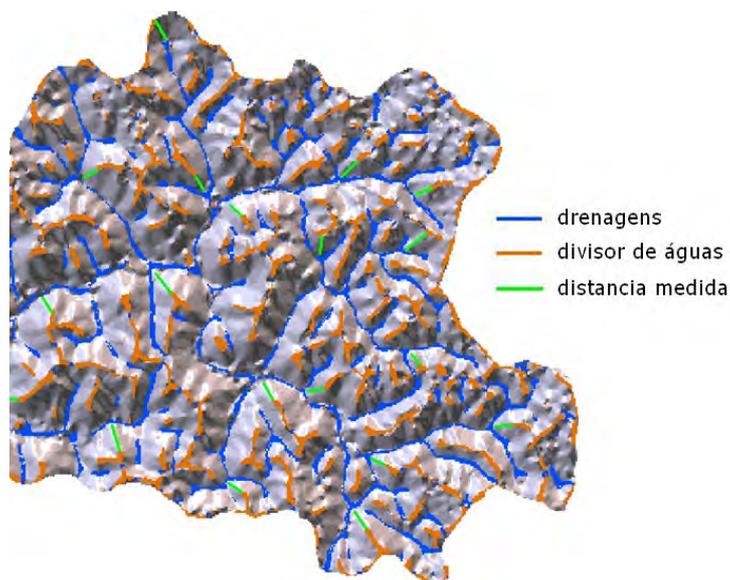


FIGURA 3.3 – Medidas de comprimento de rampa sobre visualização ADD para cálculo do fator de ajuste.

O algoritmo é baseado em funções de SIG e emprega análise de conectividade, especificamente o cálculo de custo anisotrópico (Valeriano, 2002). Custos anisotrópicos

são calculados em função de uma superfície heterogênea em que atuam uma fonte do movimento (divisores de água), forças (declividade) e direção (orientação de vertentes). Os dados foram pareados com medidas de controle tomados em pontos amostrais e calculou-se um fator de ajuste para compatibilizar os valores encontrados no mapa de custos anisotrópicos com aqueles encontrados de comprimento de rampa.

Fator CP – Uso e Cobertura do Solo e Práticas Conservacionistas

Fator CP é a relação esperada entre as perdas de solo em áreas com cultivos e vegetação, com áreas descobertas. 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 (Stein et al., 1987).

Os fatores antrópicos da EUPS foram integrados conforme a proposta de Stein et al. (1987), visando obtê-los a partir do uso e ocupação do solo. Partindo-se desta proposta adotou-se um valor médio obtido a partir de três parcelas padrão com culturas de milho, arroz e mandioca para áreas degradadas, sem adoção de práticas conservacionistas.

As classes de uso e ocupação do solo foram obtidas por meio da interpretação visual de imagens multiespectrais do sensor TM do LANDSAT 5 e CCD CBERS ano 2004. A imagem foi registrada e em seguida gerada uma imagem sintética da composição das bandas 3, 4 e 5, a partir da qual foi feita a interpretação visual. Foram atribuídos valores a cada classe encontrada, de acordo com a tabela adaptada de Stein et al., 1987.

A classificação de uso e ocupação do solo resultou em dez categorias: soja, campos agrícolas, policultivos, área urbanizada, cerradão, cerrado, campos cerrado, mosaico de pastagem com floresta aberta e vegetação degradada com babaçu, mosaico de pastagem com floresta aberta e vegetação degradada com babaçu denso e corpos d'água.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Inserção de Dados SRTM

A inserção do sensoriamento remoto na Equação Universal de Perda do Solos-EUPS anteriormente se dava apenas através da variável uso do solo, levantada com aplicação de imageamento orbital óptico. A utilização dos dados SRTM mostrou que se pode ampliar esta inserção, com vantagens, em várias etapas da modelagem da erosão em microbacias. Neste trabalho, estes dados foram aplicados na delimitação das microbacias; traçado das redes drenagem; estimativa (e controle) do fator LS e refinamento dos dados pedológicos (Figura 4.1).

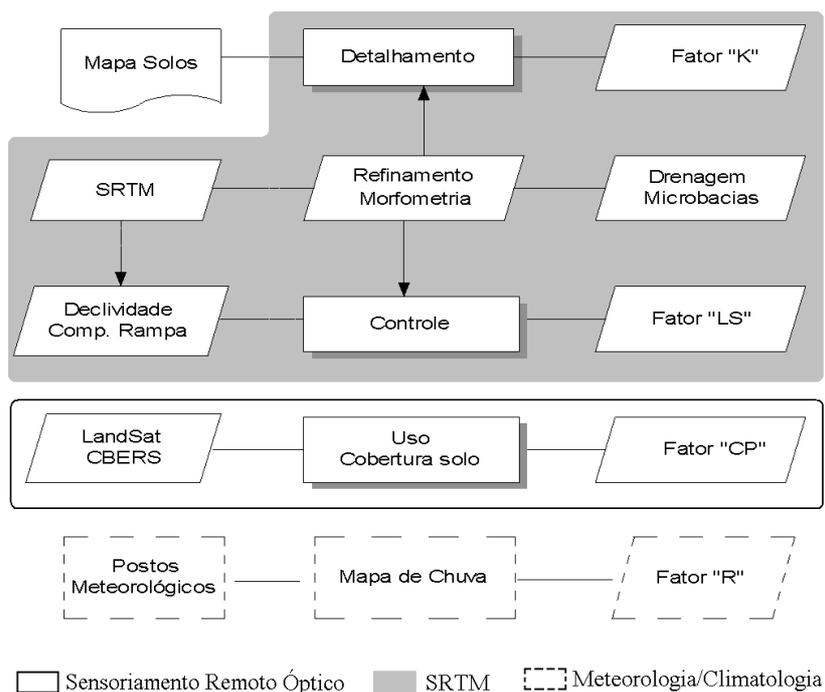


FIGURA 4.1 – Ampliação da Inserção do Sensoriamento Remoto na EUPS com SRTM

Nas figuras 4.2 e 4.3 são apresentadas as variáveis morfométricas e ADD das Duas áreas de estudo.

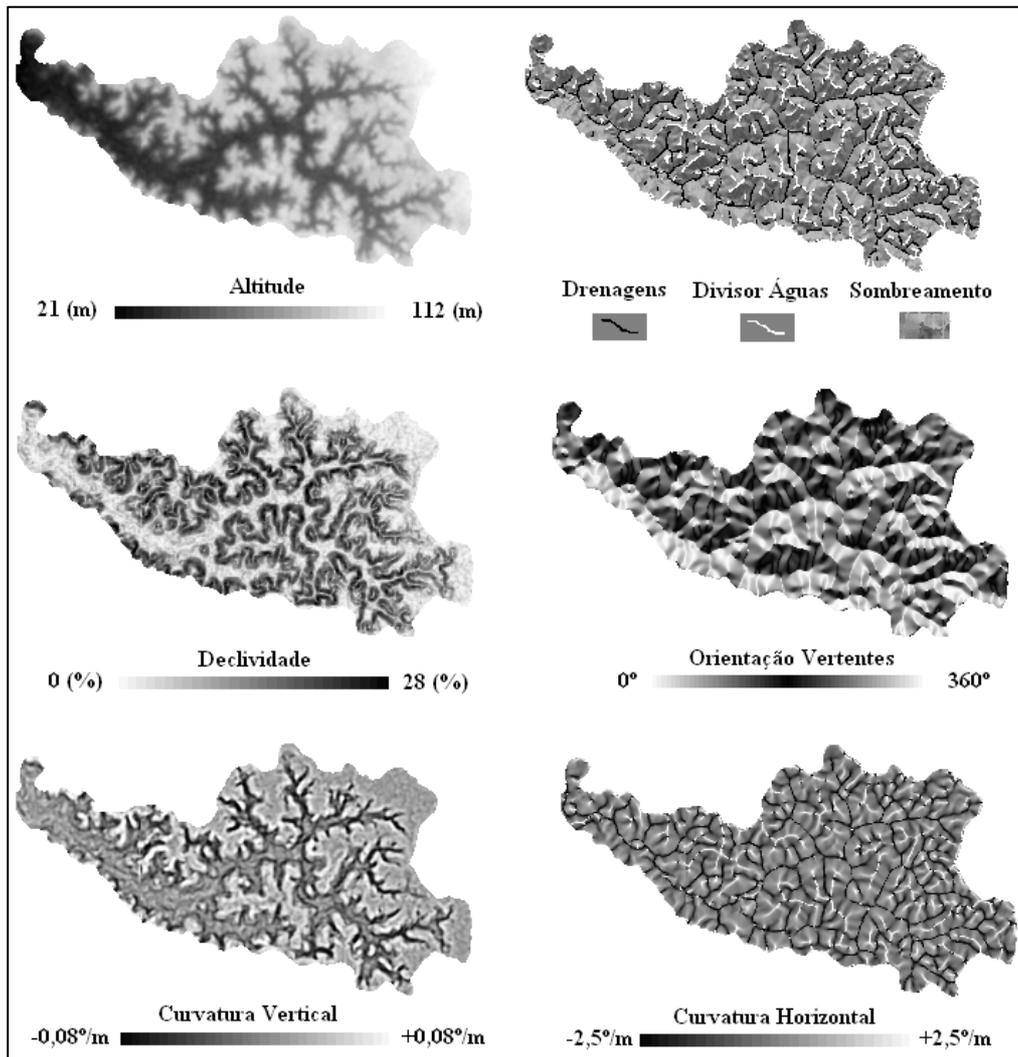


FIGURA 4.2 – Variáveis Topográficas da Microbacia Boqueirãozinho

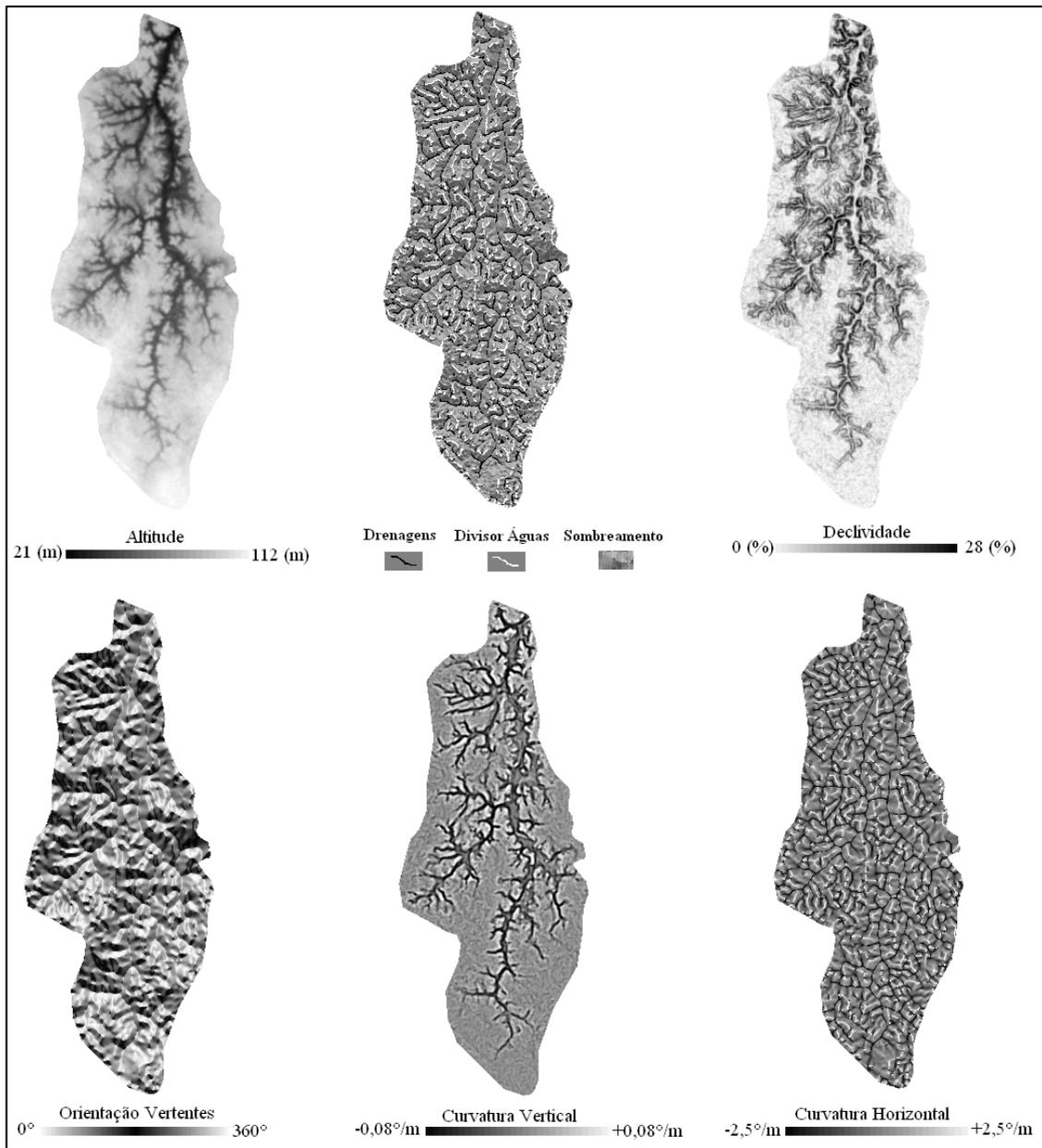


FIGURA 4.3 – Variáveis Topográficas da Microbacia São Gonçalo

A microbacia Boqueirãozinho apresentou limite do divisor de águas com contornos bem acentuados e curvilíneos, conferindo a mesma um perímetro de 62,95 km e uma área de 114,28 km². De acordo com os dados SRTM, o canal principal percorre uma distância aproximadamente 22,52 km da nascente até a foz. A rede de drenagem apresenta

comprimento de 114,37 km de cursos de água permanentes, o que resulta em uma densidade de drenagem da ordem de 1,2 km (Figura 4.4).

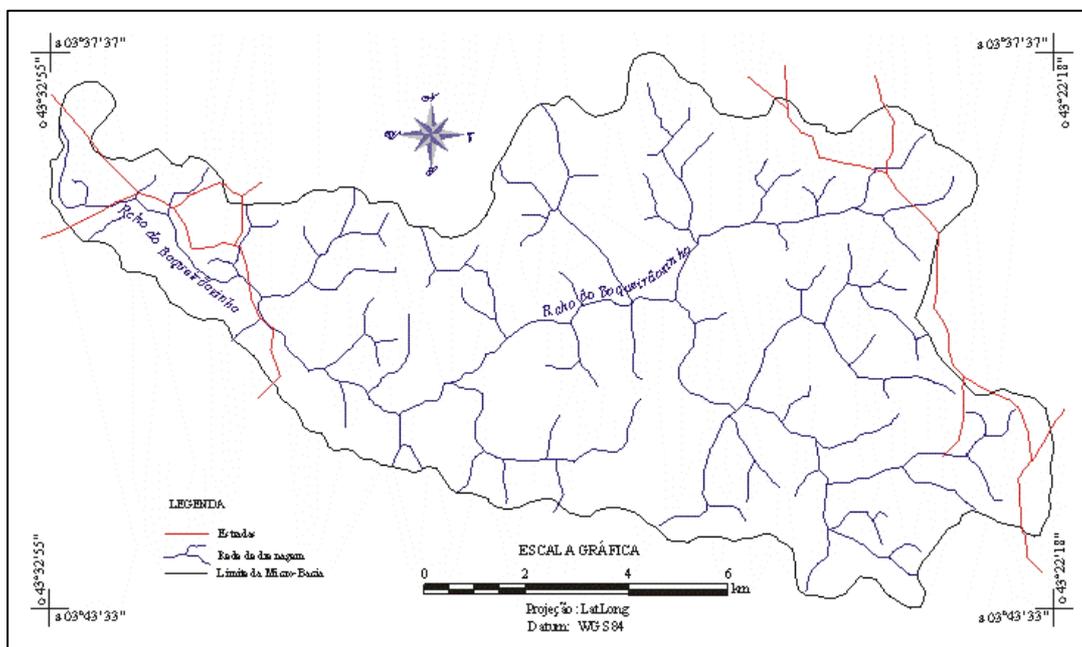


FIGURA 4.4 – Microbacia Boqueirãozinho

Na Microbacia São Gonçalo, o limite do divisor de águas tem contornos acentuados e bem menos curvilíneos, com um perímetro de 73,75 km e uma área de 215,55 km². O canal principal percorre uma distância de 32,50 km da nascente até a foz. A rede de drenagem extraída dos dados SRTM apresenta comprimento de 186,33 km de cursos de água permanentes, o que resulta em uma densidade de drenagem da ordem de 1,0 km (Figura 4.5).

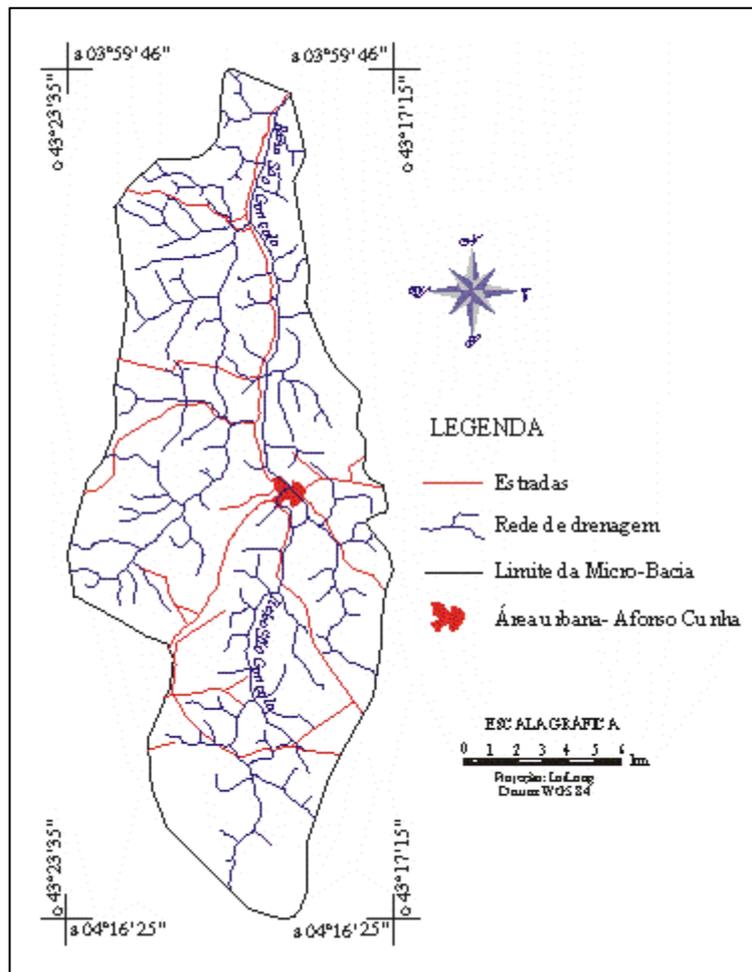


FIGURA 4.5 – Microbacia São Gonçalo

O levantamento da Rede de drenagem para este estudo foi obtido de cartas topográficas - DSG (1:100.000), imagens TM/Landsat (1:50.000) e Dados SRTM (1:30.000). A Figura 4.6 mostra um detalhe deste processo, extraído da microbacia Boqueirãozinho. Neste contexto, a partir dos resultados obtidos, pode-se notar que dada à escala e data de aquisição dos dados a carta topográfica foi a que menos se aproximou da realidade. As imagens TM LandSat apresentaram mais informações porém a drenagem com a vegetação de várzea se confundem. Já a drenagem extraída dos dados SRTM foi a que melhor representou a realidade da área de estudo por apresentar claramente os canais de drenagem e divisores de água facilitando a interpretação visual destes.

As principais vantagens do uso do SRTM estão ligadas ao evidenciamento dos canais de drenagem e divisores de água que são úteis na delimitação de áreas homogêneas, cujos limites podem ser diretamente digitalizados em tela assim como apoiar no georeferenciamento de imagens de sensoriamento remoto. Porém, este dado apresenta como desvantagem o fato das feições serem estruturadas no formato raster e não vetorial o que dificulta a aplicação de recursos, como manipulação de arcos e sobreposição a bases (Valeriano e Moraes, 2001).

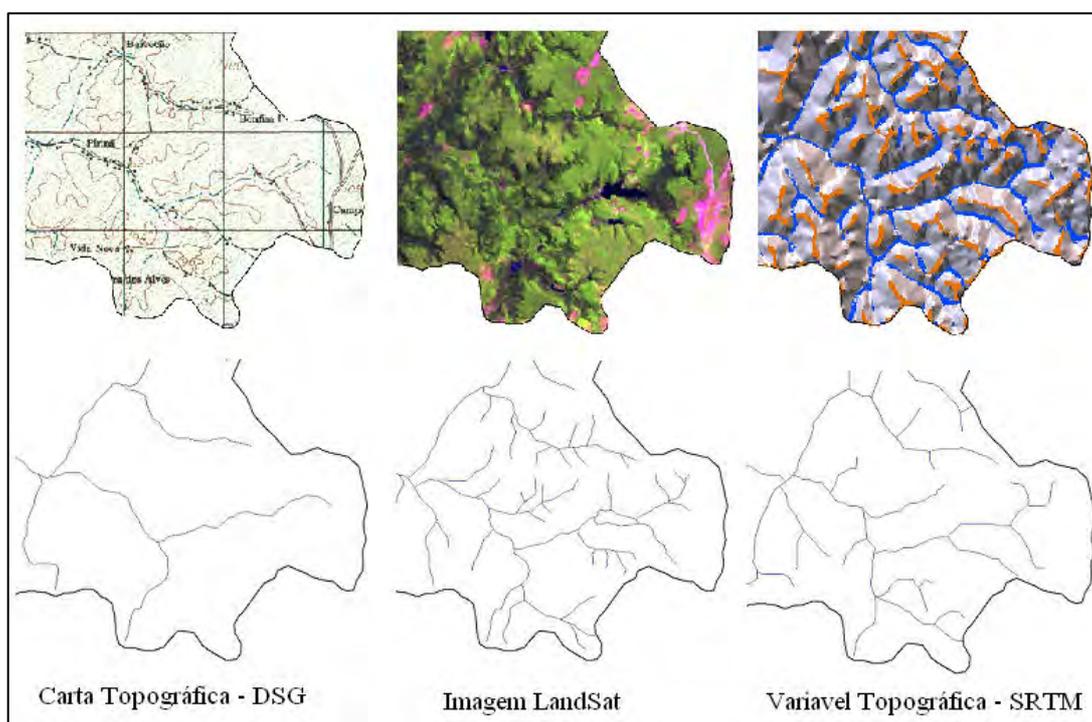


FIGURA 4.6 – Rede de Drenagem. Detalhe da Microbacia do Boqueirãozinho.

4.1.1 Fator K – Índice de Erodibilidade do Solo

Os vetores digitalizados a partir do mapa de levantamento pedológico foram refinados com base na altimetria, declividade e curvatura vertical e declividade, extraídas de dados SRTM. Na Figura 4.7 está apresentado um detalhe deste processo, extraído da microbacia do São Gonçalo. Através da sobreposição dos vetores aos mapas morfométricos, são observadas as possíveis associações entre cada classe pedológica e sua situação morfométrica, levando-se em conta os deslocamentos posicionais

evidentes. As associações observadas são então reproduzidas sobre os mapas morfométricos, que definem o novo traçado dos vetores com uma precisão no limite da percepção do intérprete sobre as variáveis e feições do relevo. Este refinamento possibilitou um melhor delineamento das classes de solos encontradas.

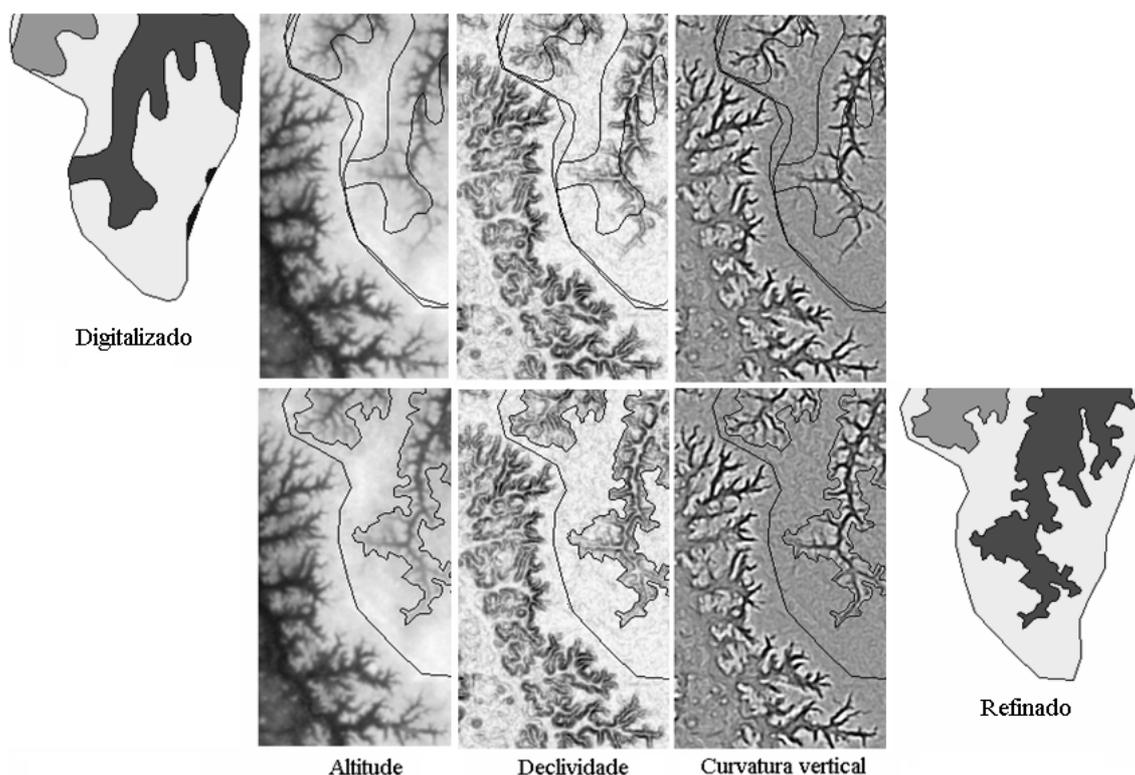


FIGURA 4.7 – Refinamento dos Vetores do Mapa de Solos. Detalhe da Microbacia do São Gonçalo.

Após o refinamento dos vetores, houve ainda um esforço de compatibilização de legendas para a correspondência entre as classes caracterizadas pela pesquisa de conservação de solos e aquelas que constam no mapa pedológico utilizado. Os mapas refinados são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9. Apesar das diferenças entre as classificações pedológicas representadas, a comparação destes com os mapas digitalizados (na Figura 3.2) fornecem uma medida do impacto do uso de dados SRTM na qualidade da preparação dos planos de informação pedológicos.

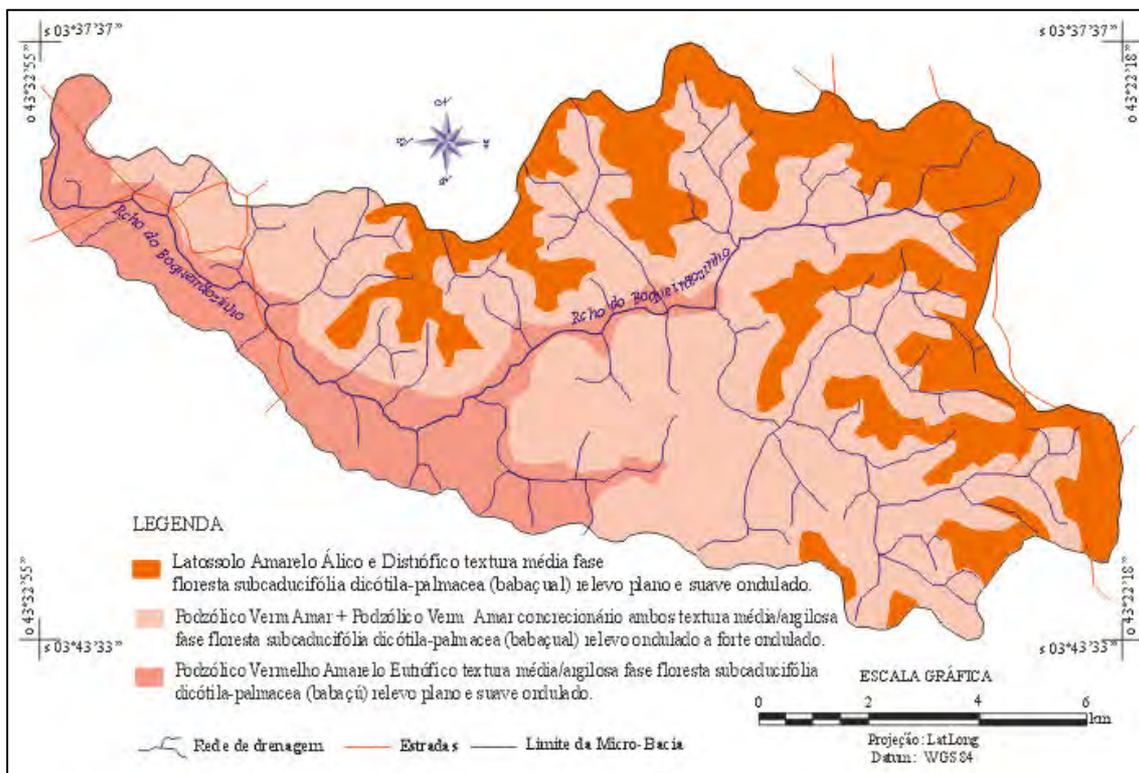


FIGURA 4.8 – Mapa de Solos do Riacho Boqueirãozinho

As classes de solos encontradas na microbacia Boqueirãozinho (Figura 4.8) pertencem aos Podzólicos Vermelho Amarelo + Podzólicos Vermelho Amarelo concrecionário (54,11%), Latossolos Amarelo Álico Distrófico (27,77%) e Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico (18,12%). A Tabela 4.1 apresenta a área total de cada classe de solos.

Na microbacia São Gonçalo (Figura 4.9) as classes de ocorrência são os Latossolos Amarelo Álico Distrófico (51,76%), Podzólicos Vermelho Amarelo + Podzólicos Vermelho Amarelo concrecionário (43,09%) e Plintossolo +Gleissolos+Areias Quartzosas Hidromórficas (5,15%). A área ocupada por cada classe de solos encontra-se na Tabela 4.1.



FIGURA 4.9 – Mapa de Solos do Riacho São Gonçalo

TABELA 4.1 - Classes de Solos e Fator K

SOLOS	Rch. Boqueirãozinho		Rch. São Gonçalo		Toler. Perda* (Ton/ha/ano)	Fator K*
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)		
Latossolo Amarelo Álico e Distrófico	3.174,69	27,77	11.157,90	51,76	14,2	0,17
Podz Verm Amar + Poz Verm Amar concrec	6.183,56	54,11	9.287,70	43,09	5,7	0,48
Podz Verm Amar Eutróf	2.070,38	18,12	-	-	6,6	0,42
Plintossolo + Gleissolo + Areias Quartz Hidromorf	-	-	1.110,21	5,15	6,6	0,33
Total	11.428,63	100,00	21.555,81	100,00	-	-

Fonte: *Bertoni e Lombardi Neto (1999), adaptado por Carvalho Filho (2005).

De acordo com a Tabela 4.1, o solo de menor erodibilidade nas microbacias estudadas é o Latossolos Amarelo Álico e Distrófico, que ocupa uma área de 14.332,59 ha

(43,45%). Estes resultados demonstram que boa parte da área possui solos que apresentam baixo risco de erosão. O restante da área, com erodibilidade mais elevada, totalizou cerca de 18.651,85 ha (56,55%) da área total.

4.1.2 Fator LS – Fator Topográfico

A representação do comprimento de rampa em escala de cinza invertida (brilho maior para valores baixos) mostra áreas escuras próximas a canais de drenagem e partes claras associadas a divisores de drenagem e locais de mudanças na orientação de vertentes (Figura 4.9). Há semelhança maior do fator LS com os mapas de declividade do que de com aqueles de comprimento de rampa, em função dos pesos aplicados no seu cálculo. Isto, pode ser percebido comparando-se a Figura 4.10 com as Figuras 4.2 e 4.3.

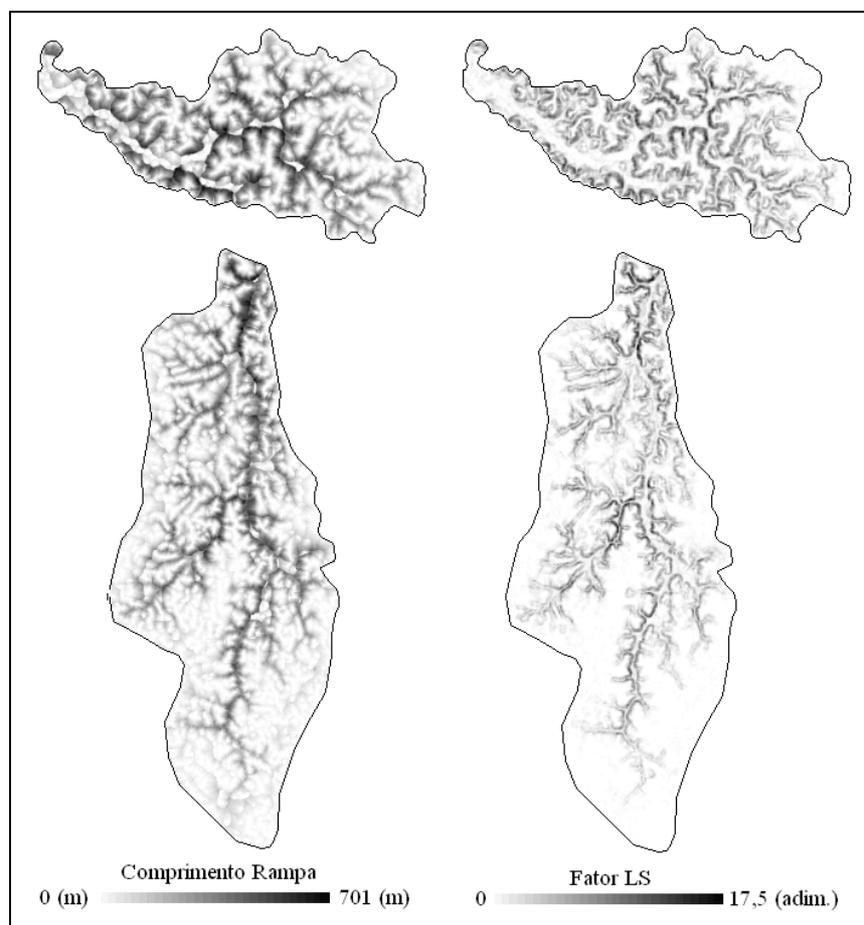


FIGURA 4.10 – Comprimento de Rampa (L) e Fator (LS) das Microbacias Boqueirãozinho (dir.) e São Gonçalo (esq.).

O cálculo de estimativa do comprimento de rampa por geoprocessamento foi aplicado sobre os dados SRTM refinados e os resultados demandaram um fator de ajuste de 0,227 (Boqueirãozinho) e 0,292 (São Gonçalo), considerando individualmente cada área. A análise conjunta de todos os dados resultou em um fator global de ajuste de 0,250. No desenvolvimento do processo automático, Valeriano (1999) demonstrou que poderia haver grande variação de magnitude nos fatores de ajuste para a estimativa do comprimento de rampa em MDE de diferentes áreas, o que não ocorreu entre as duas microbacias do presente estudo. A proporção entre os ajustes individuais e o ajuste global (91% ou, se invertido, 117%) indica uma relativa estabilidade da estimativa do comprimento de rampa. Pode-se supor esta relativa estabilidade dos ajustes encontrados como decorrência do tratamento padronizado dos dados SRTM na preparação dos MDE, uma vez que há diferenças de relevo em termos da distribuição de declividade. A Tabela 4.2 apresenta a distribuição da área total das microbacias segundo as classes de declividade da EMBRAPA, 1999. A microbacia Boqueirãozinho possui um grande predomínio de terras nas classes de relevo suave ondulado e ondulado, as quais totalizam 75,48% da área total da microbacia. As áreas de relevo plano representam 23,38%, enquanto as áreas de relevo forte ondulado corresponderam à menor parte da área estudada 1,14%. Na microbacia São Gonçalo as classes de declividade plano, suave ondulado e ondulado é praticamente uniforme, totalizando 95,39% da área total da microbacia.

TABELA 4.2 – Classes de Relevo e Classes de Declividade

Classes de Relevo	Classes* Declividade (%)	Rch. Boqueirãozinho		Rch. São Gonçalo	
		Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área(%)
Plano	0 a 3	2672,16	23,38	6501,39	30,16
Suave Ondulado	3 a 8	3811,18	33,35	7249,56	33,63
Ondulado	8 a 20	4815,14	42,13	6812,22	31,60
Forte Ondulado	20 a 45	130,15	1,14	992,65	4,61
Total	-	11.428,63	100,00	21.555,81	100,00

Fonte: *EMBRAPA (1999).

4.1.3 Fator CP – Uso e Cobertura do Solo e Práticas Conservacionistas

Em termos de uso e cobertura do solo, algumas modificações que ocorreram na paisagem das microbacias de estudo puderam ser observadas nas imagens CBERS CCD e LandSat TM. De acordo com o mapa elaborado a partir dessas imagens (Figura 4.11 e 4.12), nas microbacias predominam áreas com mosaico de pastagem com floresta aberta e vegetação degradada com babaçu/babaçual (87,45%) e uso agrícola (12,07%). Cabe ressaltar que foi observada a presença de açudes e lagos na área de estudo.

A classificação do uso e cobertura do solo nas microbacias resultou em dez categorias: soja, campos agrícolas, policultivos, área urbanizada, cerradão, cerrado, campos cerrado, mosaico de pastagem com floresta aberta e vegetação degradada com babaçu, mosaico de pastagem com floresta aberta e vegetação degradada com babaçu denso e corpos d'água. Dentre as categorias, verificou-se que a cobertura vegetal natural cobre 94,55% (31.185,23ha) da área total, seguida pelos cultivos, com 4,98% (1.642,14ha) conforme é apresentado na Tabela 4.3.

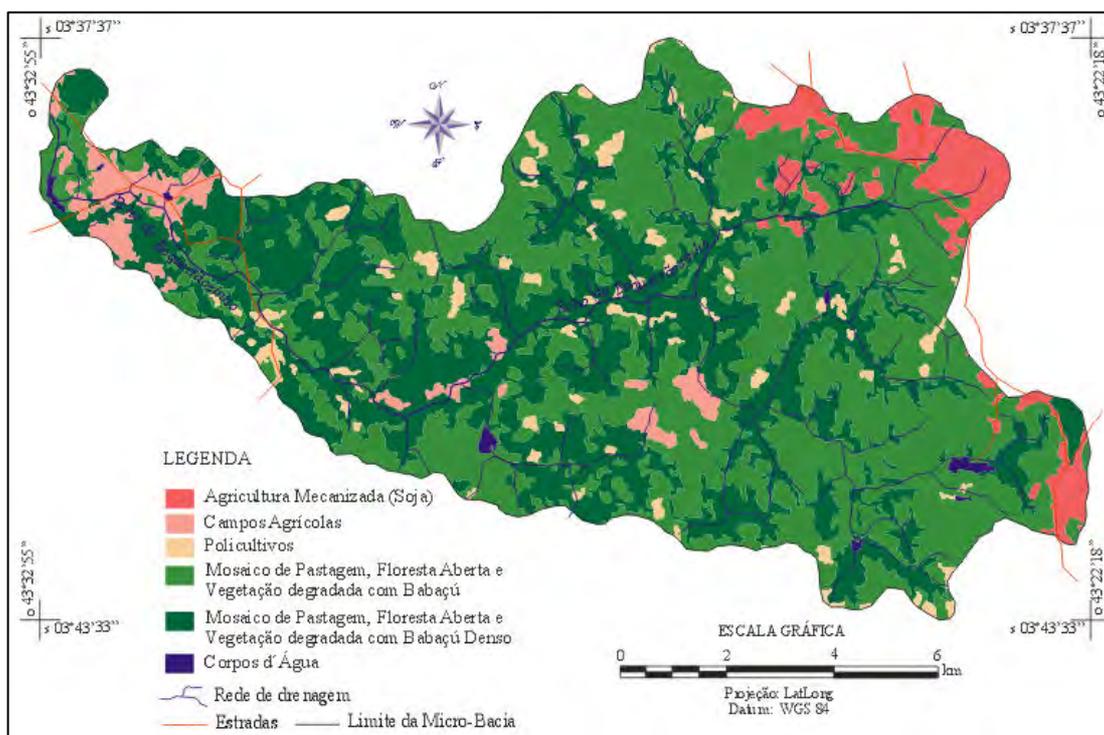


FIGURA 4.11 – Classes de Uso e Cobertura do Solo da Microbacia Boqueirãozinho

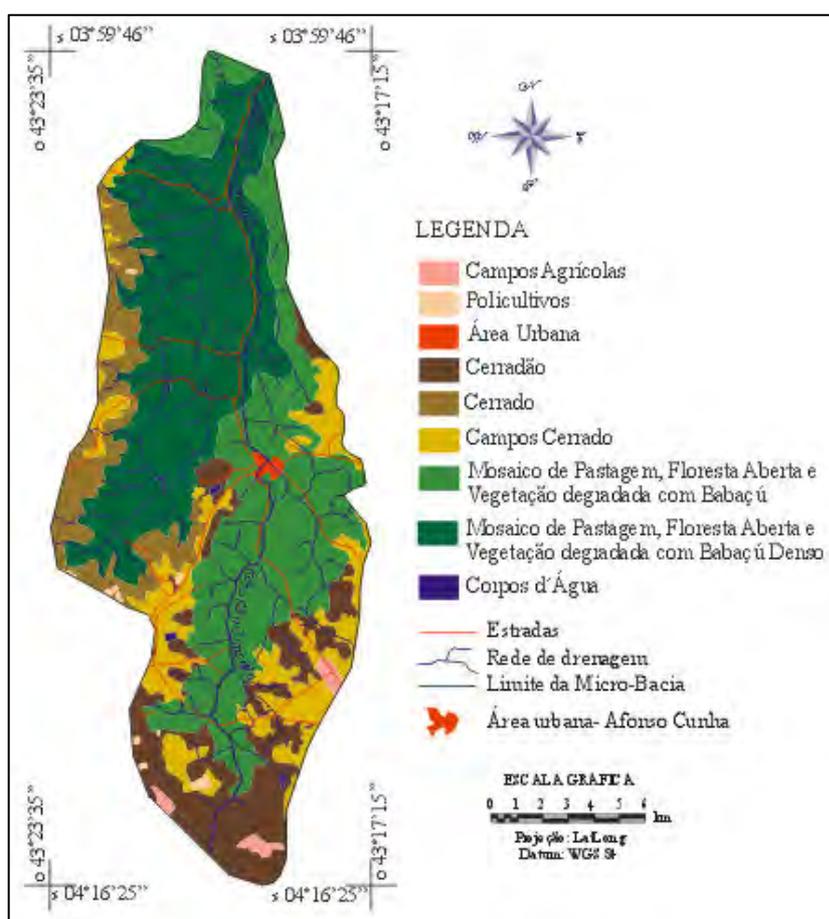


FIGURA 4.12 – Classes de Uso e Cobertura do Solo da Microbacia São Gonçalo

TABELA 4.3 – Integração de CP em Função das Classes de Uso e Ocupação do Solo

Uso e ocupação do solo	Rch. Boqueirãozinho		Rch. São Gonçalo		CP*
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área(%)	
Agricultura Mecanizada (Soja)	601,01	5.26	-	-	0,2086
Campos Agrícolas (Mandioca, Arroz e Milho)	388,35	3.40	182,62	0,85	0,4933
Policultivo (Mandioca, Arroz e Milho)	390,70	3.42	79,37	0,37	0,4933
Área urbanizada	-	-	73,43	0,34	0,1000
Cerradão	-	-	3.046,76	14,13	0,0040
Cerrado	-	-	1.884,48	8,74	0,0040
Campos Cerrado c/ pastagem	-	-	2.739,83	12,71	0,0040
Mos. pastagem, fl. aberta e veget. degradada com babaçu	5.620,66	49.18	6.204,66	28,78	0,0030
Mos. pastagem, fl. aberta e veget. degrad c/ babaçu denso	4.379,37	38.32	7.309,47	33,91	0,0030
Corpos d'água	48,54	0.42	35,19	0,16	0,0000
Total	11.428,63	100,00	21.555,81	100,00	-

Fonte: * Bertoni e Lombardi Neto (1999).

4.1.4 Fator R – Índice de Erosividade das Chuvas

A precipitação anual nas microbacias no período considerado foi de 1.523,38mm, apresentando uma estação chuvosa de dezembro a maio e uma estação seca de junho a novembro com precipitações totais de 1.354,64mm e 168,74mm respectivamente (Tabela 4.4). O mês de março apresentou a maior intensidade pluviométrica (321,53mm).

A temperatura média mensal é de 26,6 °C. O mês de outubro apresentou a temperatura mais elevada com 27,9 °C, enquanto que a temperatura mais baixa foi observada no mês de julho com 25,6 °C. De acordo com os dados de temperatura e precipitação utilizados, foi observada deficiência hídrica no período de junho a novembro, atingindo a máxima em setembro com 12,30mm. A partir de dezembro, há um período de reposição de água no solo devido ao início da precipitação mensal, ocorrendo excedentes na retenção de água entre os meses de março e abril. Apesar da média mensal do período em que ocorre excedente ser de 225,77mm, o escoamento superficial deve ser mais intenso devido às chuvas torrenciais que ocorrem na região.

A ocorrência de déficit hídrico no período de junho a novembro nas microbacias, associada aos solos Podzólicos, pode causar problemas para culturas anuais e pastagens se estas não forem bem manejadas. A implementação de técnicas de manejo que possibilitem aumentar a capacidade de armazenamento de água no solo é um aspecto importante para o planejamento de uso dessas microbacias. A ocorrência de chuvas intensas no período de dezembro a maio constitui um problema à estabilidade dos solos proporcionando maior risco de erosão.

A distribuição da erosividade na área de estudo variou entre 2.205,96 e 15,56 MJ.mm/ha.h (Tabela 4.4 e Figura 4.13). Observou-se que ocorreu uma concentração do potencial erosivo na estação chuvosa entre os meses de dezembro a maio, cuja erosividade correspondeu a aproximadamente 95,76% do total anual, enquanto no período seco, entre junho a novembro, esse valor foi de aproximadamente 4,24%. O Valor de R, definido no cálculo da erosividade da chuva por interpolação para as microbacias estudadas é de 8.394,73 MJ.mm/ha.h.

TABELA 4.4 - Distribuição da Precipitação Média Mensal, Cálculo EI_{30} e Fator R.

Meses	Precipitação mm*	EI_{30} (MJ.mm/ha.h)
Janeiro	213,17	1.182,07
Fevereiro	247,47	1.482,53
Março	321,53	2.205,96
Abril	290,37	1.889,72
Mai	165,90	807,91
Junho	45,37	112,88
Julho	24,47	44,22
Agosto	14,70	20,40
Setembro	12,30	15,56
Outubro	26,47	49,82
Novembro	45,43	113,11
Dezembro	116,20	470,56
Fator R anual (Soma dos EI_{30} mensais)		8.394,73

Fonte: *Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica-DNAEE.

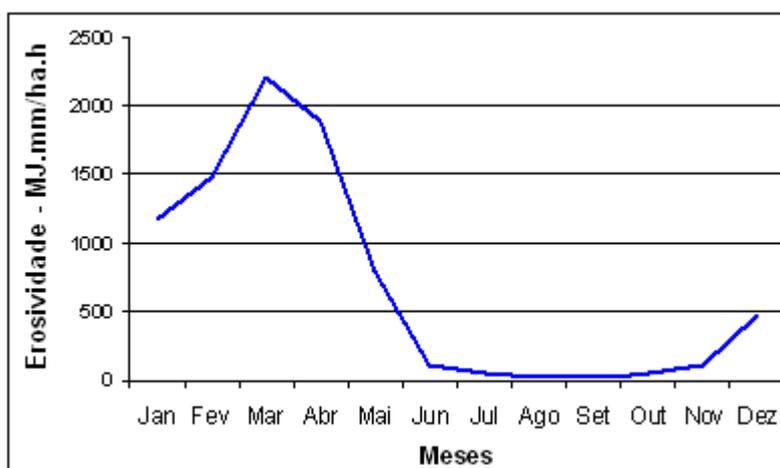


FIGURA 4.13 – Distribuição Mensal da Erosividade (EI_{30}) nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo

4.2 Diagnóstico da Erosão

4.2.1 Potencial Natural de Erosão - PNE

A carta de Potencial Natural de Erosão (PNE) foi elaborada utilizando-se parte da EUPS por sobreposição dos fatores erosividade (R), erodibilidade (K) e fator topográfico (LS). De modo geral, a distribuição de PNE observada nos mapas refletiu o padrão de

distribuição da declividade, com ligeiras variações associadas à distribuição de erodibilidade (solos).

Na estimativa do PNE, verificou-se que a maior parte da microbacia Boqueirãozinho (6.048,25 ha ou 52,93%) apresentou perda de solo alta e muito alta, com valores superiores a 40 toneladas por ano, em decorrência da combinação freqüente de relevo ondulado e forte ondulado com solos rasos e de alta erodibilidade. Os potenciais de perda muito baixo e baixo, com valores inferiores a 10 toneladas por ano, corresponderam a 4.073,16 ha (ou 35,64 %), devido às condições de solos profundos, com baixa erodibilidade e boa drenagem, associados ao relevo predominantemente plano e suave ondulado (Tabela 4.5 e Figura 4.14).

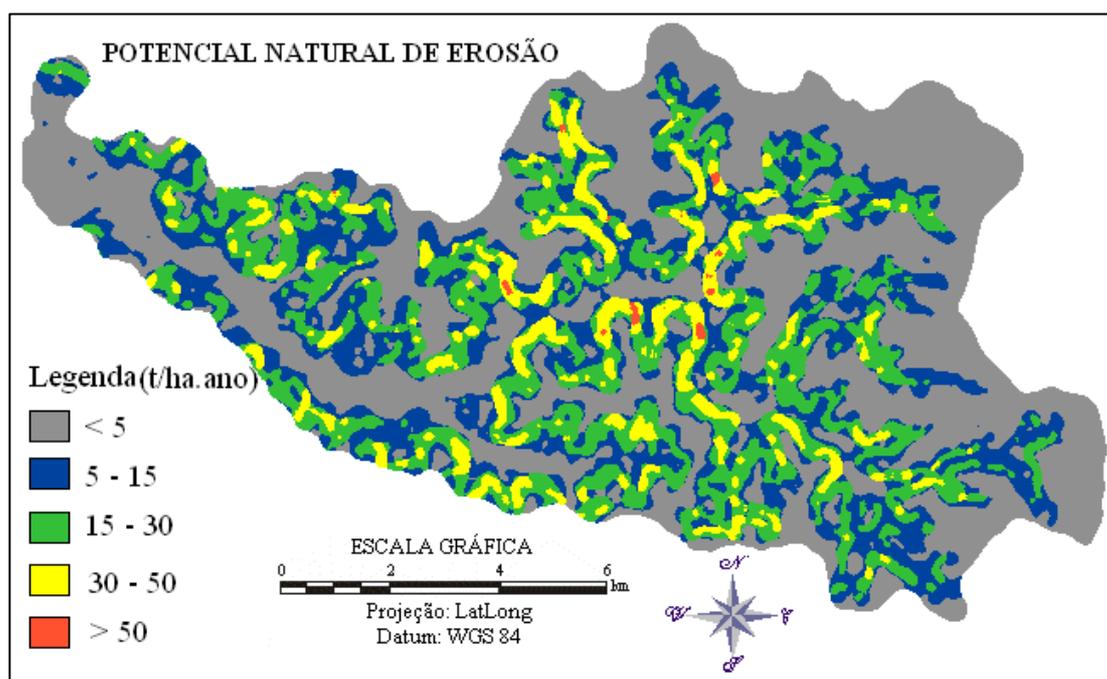


FIGURA 4.14 – Potencial Natural da Erosão na Microbacia Boqueirãozinho

Na microbacia São Gonçalo, a maior parte da área 81,69 % (17.609,05 ha) apresentou PNE muito baixo devido à predominância de boas condições do solo associadas ao relevo plano e suave ondulado. As áreas de PNE alto e muito alto ocorreram em 6,72% (1.448.09 ha), em consequência de uma pequena proporção de relevo mais

movimentado (ondulado e forte ondulado) conforme pode ser visto na Tabela 4.5 e Figura 4.15.

A microbacia Boqueirãozinho possui PNE médio de 10,779 t/ha, 41% maior do que o PNE médio da microbacia São Gonçalo (7,645t/ha). No entanto, o total de PNE acumulado em toda a microbacia do São Gonçalo é maior devido à maior área, aproximadamente o dobro, da microbacia de Boqueirãozinho (Figura 4.16).

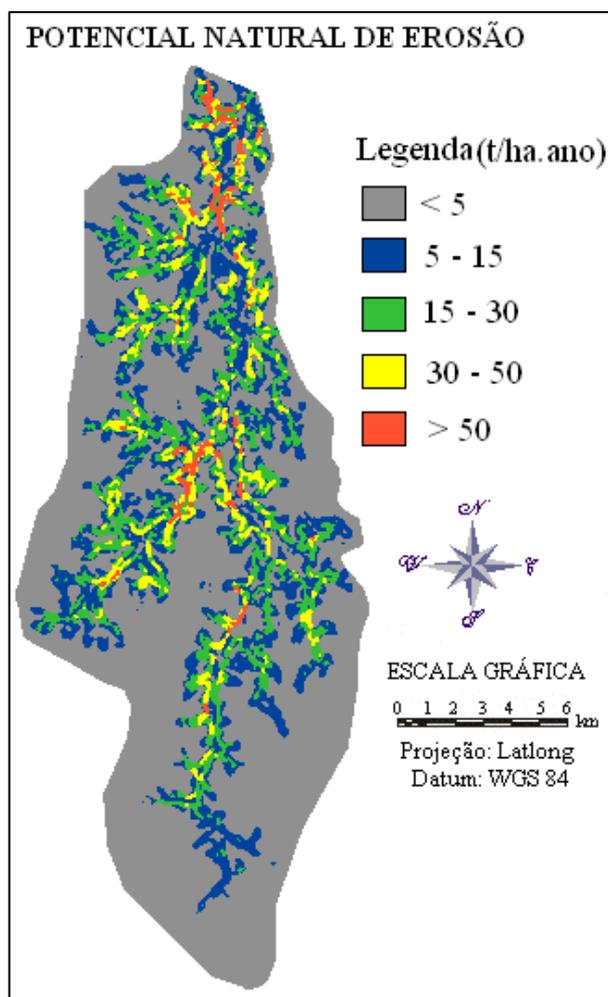


FIGURA 4.15 – Potencial Natural da Erosão na Microbacia São Gonçalo

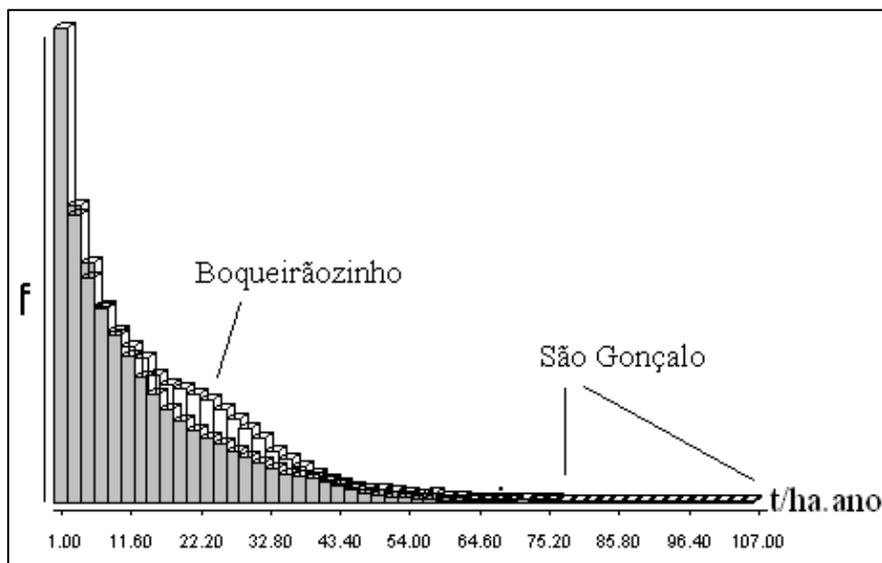


FIGURA 4.16 – Distribuição do Potencial Natural da Erosão nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo

TABELA 4.5 – Potencial Natural da Erosão nas Microbacias (t/ha.ano)

Potencial Natural da Erosão	Rch. Boqueirãozinho		Rch. São Gonçalo	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Muito baixa	2751,98	24,08	13704,00	63,57
Baixa	1321,18	11,56	3905,05	18,12
Média	1307,22	11,44	2498,67	11,59
Alta	4830,39	42,27	1108,35	5,14
Muito alta	1217,86	10,66	339,74	1,58
	11.428,63	100,00	21.555,81	100,00

4.2.2 Perda Anual de Solo – A

A distribuição geral das perdas de solo (A) mostrou-se estreitamente condicionada pelo padrão espacial de uso do solo, com pequena atenuação nas áreas de PNE muito baixo (Figura 4.17). A microbacia Boqueirãozinho apresenta erosão média estimada em 0,38 t/ha.ano. As áreas de maior erosão apresentaram estimativas de 28,26 t/ha.ano, correspondentes a áreas de alto PNE associadas a uso agrícola. Na totalidade desta

microbacia, 1.645 t/ano de solos se movimentam devido à erosão nas condições levantadas. Fazendo-se uma expansão direta da estimativa de perdas anuais médias das áreas sob agricultura (2,89 t/ha.ano) para toda a microbacia, chega-se a uma perda anual prevista da ordem de 323.000 toneladas, se a área for ocupada por inteiro com o mesmo padrão de adequação e práticas conservacionistas.

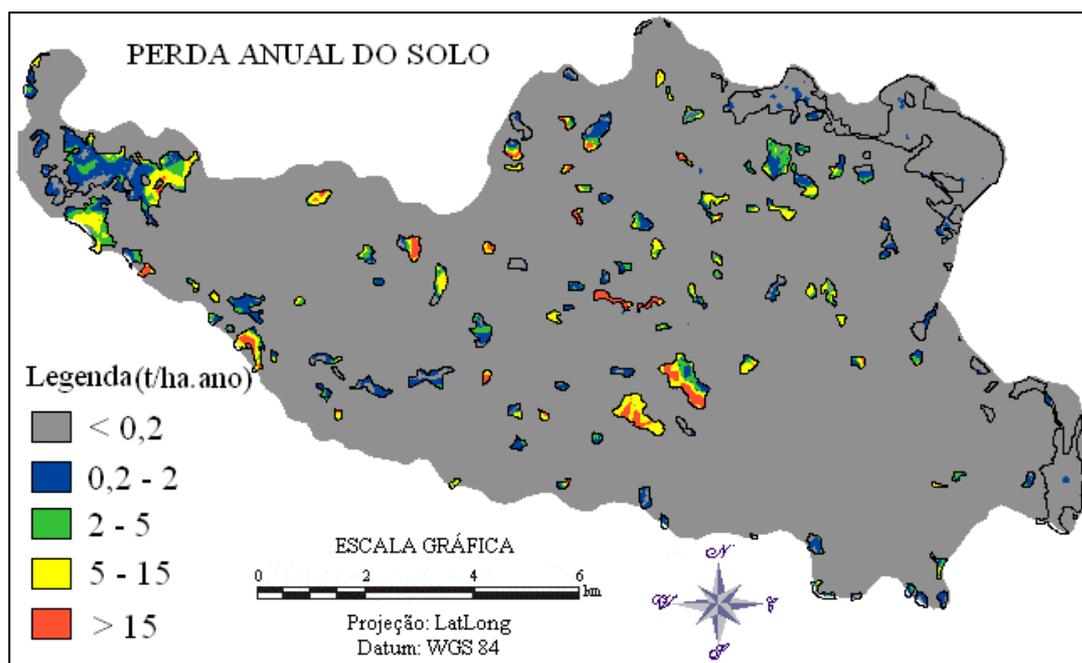


FIGURA 4.17 – Distribuição da Perda Anual de Solo na Microbacia Boqueirãozinho, com Sobreposição dos Vetores Correspondentes aos Usos Agrícolas.

Na microbacia São Gonçalo, a erosão média encontrada foi de 0,02 t/ha.ano e a erosão máxima de 0,85 t/ha.ano. Assim, esta microbracia movimenta por ano 525 toneladas de solos pela erosão em sua totalidade. Os resultados de perda anual de solos para esta microbacia não estão representados em mapa ou tabela porque a mesma encontra-se toda inserida na classe de erosão muito baixa (Figura 4.18).

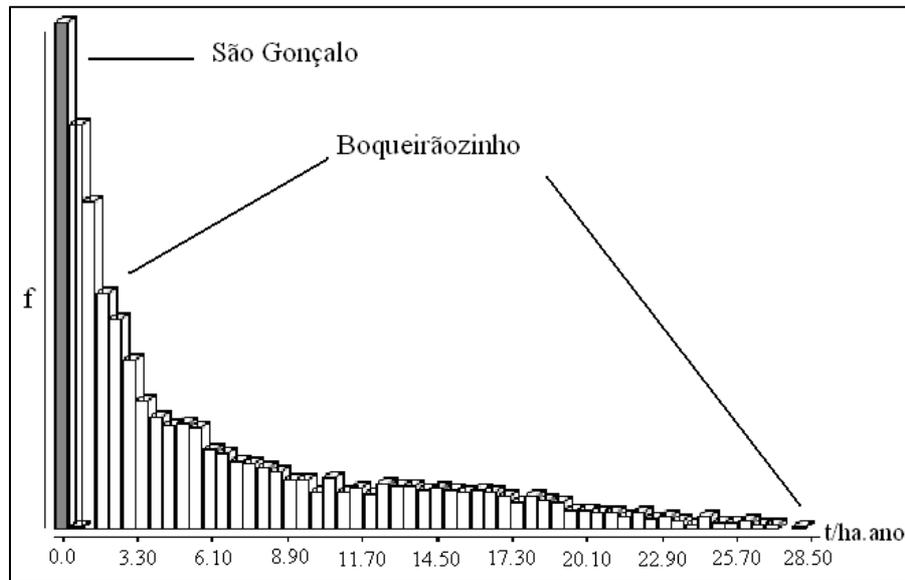


FIGURA 4.18 – Histograma da Perda Anual de Solos nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo.

4.2.3 Risco de Erosão

Os valores de Risco de Erosão das microbacias estudadas foram estimados, em maioria, no intervalo entre 0 e 10 (número de vezes a erosão tolerável). A variação geral dos valores de risco de erosão mostrou-se associado à espacialização dos fatores da EUPS, principalmente aqueles que compõem o PNE (R, K e LS). Entretanto, os valores extremos de risco de erosão encontrados estiveram associados ao uso agrícola do solo em áreas de PNE desfavorável (Figuras 4.19 e 4.20). Os riscos de erosão médios correspondem a 12.98 % da área das microbacias e estão compatíveis com valores encontrados em outros trabalhos (Bertoni e Lombardi Neto, 1999 e Weill, 1999).

As áreas de risco de erosão baixo e muito baixo corresponderam a 82,15 % enquanto aquelas de risco alto e muito alto ocorreram em 4,87% da área, devidos à associação entre relevo ondulado e forte ondulado e solos rasos e de alta erodibilidade, quando presentes sob uso agrícola (Tabela 4.6).

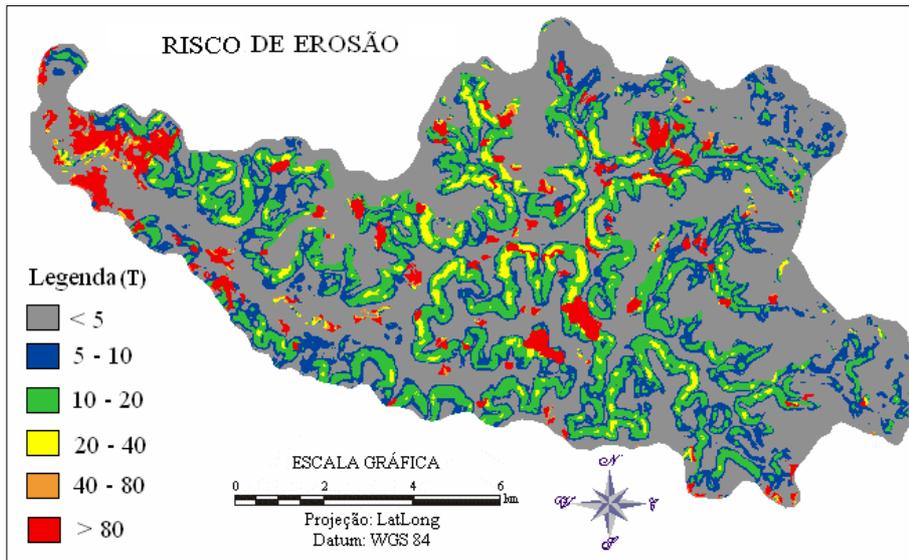


FIGURA 4.19 – Risco de Erosão na Microbacia Boqueirãozinho

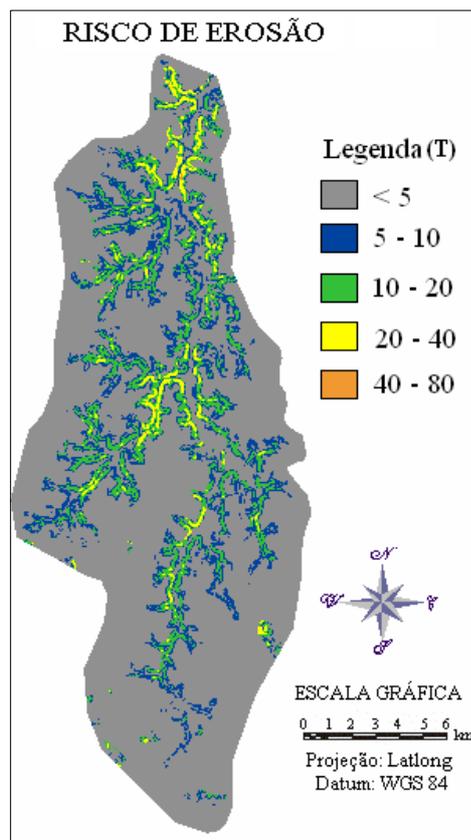


FIGURA 4.20 – Risco de Erosão na Microbacia São Gonçalo

TABELA 4.6 – Risco de Erosão nas Microbacias Boqueirãozinho e São Gonçalo

Classe* (toneladas)	Rch. Boqueirãozinho		Rch. São Gonçalo	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área(%)
< 5	6.138,40	53.71	1.6219,43	75,24
5 -1 0	1.959,00	17.14	2.780,54	12,90
10 - 20	2.235,70	19.56	2.044,31	9,48
20 - 40	407,12	3.56	506,56	2,35
40 - 80	58,80	0.51	4,97	0,02
> 80	629,61	5.51	-	-
	11.428,63	100,00	21.555,81	100,00

Fonte: *Weill et al. (1999).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

De acordo com os métodos e técnicas utilizados no presente trabalho e levando-se em conta os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- 1) Os dados SRTM puderam ampliar a inserção de sensoriamento remoto na aplicação da EUPS como fonte de dados para delimitação de bacias, traçado de redes de drenagem, estimativa do fator LS e refinamento dos dados pedológicos, em substituição a mapeamentos de disponibilidade e detalhamentos restritos.
- 2) O traçado das redes de drenagem e de divisores de água feito a partir de dados SRTM mostrou-se uma alternativa viável em relação às técnicas tradicionais de levantamento cartográfico e imageamento óptico, por evidenciarem claramente os canais de drenagem e divisores de água para interpretação visual.
- 3) A aplicação de variáveis morfométricas para o refinamento dos dados de solo mostrou-se eficiente pela praticidade e rapidez na geração de resultados pedológicos.
- 4) Os dados SRTM permitiram a estimativa do comprimento de rampa por geoprocessamento e seu ajuste, feito com medidas cartográficas sobre desdobramentos do modelo digital de elevação.
- 5) Com a exceção da modelagem climática e dos levantamentos de campo para caracterização de solos e verificações da cobertura, foi possível mapear os demais fatores da EUPS com dados SRTM e de sensores ópticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Band, L. E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1 p. 15-24, 1986.

Beasley, D.B.; huggins, L. F. **Answers user's manual**. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency, 1982. (Report n°. 905/9-82-001)

Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1999. 395p.

Bertoni, J. **O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão**. Bragantia, Campinas, SP, 18:113-140, 1959.

Blomgren, S. A digital elevation model for estimating flooding scenarios at the Falsterbo Peninsula. **Environmental Modelling e Software**, v. 14, p. 579-587, 1999.

Carvalho Filho, R. **Refinamento mapa de solos**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eliene@ltid.inpe.br> em 10 nov. 2005.

Castro, A. G.; Valério Filho, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.3, p.419-26, 1997.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Folha SA.23 – Z – A. Estado do Maranhão/Organizado por Telmo Luiz das Neves, Clodionor Carvalho de Araújo, Eduardo Camozzato, Gilberto Emílio Ramgrab. Escala 1: 250.000. Brasília, 1994.114p.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Folha SB.23 – X – A. Estado do Maranhão/Organizado por Telmo Luiz das Neves, Clodionor Carvalho de Araújo, Eduardo Camozzato, Gilberto Emílio Ramgrab. Escala 1: 250.000. Brasília, 1994. 114p.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. **São Luís NE/SE**. Folhas SA.23 – X e SA.23 – Z. Estados do Maranhão e Piauí/Organizado por José Pessoa Veiga Júnior, CD – Room. Escala 1: 500.000. Brasília, 1994. 40p.

Curi, N.; Larach, J. O. I.; Kämpf, N.; Moniz, A. C.; Fontes, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 89p.

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

Donzeli, P. L.; Valério Filho, M.; Pinto, S. A. F.; Nogueira, F. P.; Rotta, C. L.; Lombardi Neto, F. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. In: Lombardi Neto, F.; Camargo, O. A. (org.) **Microbacia do córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP)**. São Paulo: IAC - SAA/SP, Documentos IAC, n.o.29, setembro de 1992. p. 91-119.

Doornkamp, J. C; King, C. A. M. **Numerical analysis in Geomorphology: an introduction**. London: Edward Arnold Ltd., 1971. 372p.

Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro (DSG). **Carta Chapadinha**. Folha SA.23-Z-D_IV (MI-675). Escala 1:100.000. Ministério do Exército - Região Nordeste do Brasil- Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro. Carta, 1977.

Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro (DSG). **Carta Coelho Neto**. Folha SB.23-X-B_I (MI-742). Escala 1:100.000. Ministério do Exército - Região Nordeste do Brasil- Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro. Carta, 1978.

Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro, DSG. **Carta Vargem Grande**. Folha SA.23-Z-C_VI (MI-674). Escala 1:100.000. Ministério do Exército - Região Nordeste do Brasil- Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro. Carta, 1980.

Eastman, J.R. **Idrisi for Windows**, Version 2.0 – Update Manual. Massachusetts, EUA: Clark University, 1997. 405p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro,RJ). 1986. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Maranhão**. Rio de Janeiro, RJ. (EMBRAPA.SNLCS. Escala 1:1.000.000. Boletim de Pesquisa,35. (SUDENE.DRN. Série Recursos de Solos,17). 964p : il.

EMBRAPA. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão (ZEE/MA). EMBRAPA Campinas (SP): **Mapa do uso e cobertura da terra**.Escala 1:250.000. Campinas, 2000.

Farias, I. C. et al. **Guia para la elaboracion de estudios del medio fisico: contenido y metodologia**. 2.ed. Madrid: Ministério de Obras Publicas y Urbanismo, Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, 1984. 572p.

Finco, M. V.; Hepner, G. F. Modelling agricultural nonpoint source sediment yield in Imperial Valley, California. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 64, n.11, p.1097-1105, 1998.

Flanagan, D. C.; Nearing, M. A. **USDA water erosion prediction project: hillslop profile and watershed model documentation**. Washington: USDA, 1995. (Report n. 10, USDA-ARS).

Fujihara, A.K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. Piracicaba, 2002. 118p. Dissertação (Mestrado-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, universidade de São Paulo. Acesso: 18 jan. 2006.

Gameiro, M. G. **Avaliação de métodos para obtenção dos fatores "L" e "S" da EUPS numa microbacia, via geoprocessamento e banco de dados**. fev. 2003. 138 p. (INPE-9555-TDI/831). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003. Disponível na biblioteca digital *URLib*: <<http://iris.sid.inpe.br:1912/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2003/05.27.09.07>>. Acesso em: 07 out. 2005.

Giles, P.T.; Franklin, S.E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, v.21, p251-264. 1998.

Golden Software. **Surfer version 6.01- surface mapping system**. Golden: Golden Software, Inc., 1995.

Guerra, A.J.T; Silva, A.S; Botelho, R.G.M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos temas e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Atlas do Estado do Maranhão**. Rio de Janeiro, 1984.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.html>>. Acesso em: 14 mar 2005a.

Kinnel, P. I. A. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. **Soil and Tillage Research**, v.58, n.1, p.11-17, 2001.

Lepsch, I. F., Belinazzi Jr., R., Bertolini, D., Espindola, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4.a. aproximação**. Campinas: SBCC, 1991. 175p.

Lopes, J. R. **Cálculo do CP para policultivos**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eliene@ltid.inpe.br > em 22 jan. 2006.

Lombardi Neto F.; Bertoni, J. **Erodibilidade de solos paulistas**. Campinas, SP, Instituto Agrônomo, 1975. 12p. (Boletim Técnico 27).

Lombardi Neto, F.; Moldenhauer, W. C., 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 51, n.2, p.189-196.

Machado, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Piracicaba, 2002. 154p. Tese (Doutorado-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, universidade de São Paulo. Acesso: 01 fev. 2005.

Maranhão. **Atlas do Maranhão**. Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico/Laboratório de Geoprocessamento - UEMA. 2ª ed. São Luís: GEPLAN, 2002. 44p.

Maranhão.Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos.Coordenadoria de Programas Especiais. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. Macrozoneamento do Golfão Maranhense;diagnóstico ambiental da microrregião da aglomeração urbana de São Luís e dos municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário. **Estudo de pedologia e cobertura vegetal**. São Luís; SEMA/MMAPNMA.1998. 186 p.

MOLNÁR, D. K.; JULIEN, P. Y. **Estimation of upland erosion using GIS**. *Computers and Geosciences*, Nepean, v.24, n.2, p.183-192, 1998.

Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nielsen, G. A.; Peterson, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 443-452, 1993.

NASA/JPL SRTM: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm>. Acesso em: 03 mar. 2005.

Nogueira, F. P.; Donzeli, P. L.; Valeriano, M. M.; Lombardi Neto, F.; Machado, H. M. Adequação do uso e manejo do solo no planejamento agroambiental sustentado do município de Vera Cruz, SP. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS E ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus, BA. **Anais...** Ilhéus, BA: 2000. CD-ROM.

Özdamar, L; Demirhan, M.; Özpınar, A. A comparison of spatial interpolation methods and a fuzzy areal evaluation scheme in environmental site characterization. **computers, Environment and Urban Systems**, v.23, p.399-422, 1999.

Paranhos Filho, A. C.; Fiori, A. P.; Disperati, L.;Lucchesi, C.; Ciali, A.;Lastoria, G. Avaliação multitemporal das perdas de solos na bacia do Rio Taquarizinho-MS. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 52, p. 49-59, 2003. Editora UFPR. Acesso: 08 dez. 2005.

Pedro, F.G.; Lorandi, Reinaldo. Potencial natural de erosão na área periurbana de São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Cartografia** N. 56/01, 2004. Acesso: 08 dez. 2005.

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A.; Bamler, R. The shuttle radar topography mission-
anew class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Photogrammetry**

and Remote Sensing, v. 57, p. 241-262, 2003.

Ramalho Filho, A., Beek, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3.ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS. 65 p. 1994.

Ranieri, S. B. L.; Sparovek, G.; Souza, M. P.; Dourado Neto, D. Aplicação de índice comparativo na avaliação do risco de degradação das terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n.4, p.751-60, 1998.

Rennó, C. D. ; Soares, J. V. Discretização de bacias hidrográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001.

Research Systems Inc. **Environment for Visualizing Images – ENVI Version 3.6**. Colorado: Boulder, 2002. 126p.

Risse, L. M.; Nearing, M. A.; Nicks, A. D.; Laflen, J. M. Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, 57:825-833 (1993)

Rocha, J.V.; Lombardi Neto, F.; Bacellar, A.A.A. Metodologia para determinação do fator comprimento de rampa (L) para Equação Universal de Perdas de Solo. **Caderno de Informações Georreferenciadas (CIG)**, v.1, n.2,1997. Disponível em: <http://cpa.unicamp.br/revista/cigv1n2n2.html> (16 nov.2005)

Ruhoff, A.L.; Pereira, R.S.; Souza, B. S. P.; Giotto, E. **Avaliação do processo erosivo pela equação universal de perda de solos com algoritmos do SPRING**. Acesso: 08 dez. 2005.

Schmidt, J.; Evans, I.S.; Brinkmann, J. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, n.8, p.797-814, 2003.

Sharpley, A. N.; Williams, J. R. **Erosion/productivity impact calculator**. Washington: USDA-ARS Technical Bulletin 1768, 235 p. 1990. Model Documentation.

Silva, A. M.; Schulz, H. E.; Camargo, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RIMA, 2003.

Silva, V.C. **Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF)**. Pesquisa Agropecuária tropical, 34(3): 147-159, 2004. Acesso: 06 dez. 2005.

Stein, D. P.; Donzelli, P. L.; Gimenez, F. A.; Ponçano, E. L.; Lombardi Neto, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica na Bacia do Peixe- Paranapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4. 1987, Marília. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987

Valenzuela, C. R. Data analysis and models. In: Belward, A. S; Valenzuela, C. R. **Remote sensing and Geographical Information Systems for resource management in developing countries**. Euro Courses: Remote Sensing, Netherlands: Kluwer, 1991. v.1, cap. 18, p. 335-48.

Valeriano, M. M. **Estimativas de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos**. 1999. 172f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro.1999.

_____. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003.

_____. Mapeamento da declividade em microbacias com sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande, v.7, n.2, p.303-310, 2003b.

_____. Mapeamento do comprimento de rampa em microbacias com Sistema de Informação Geográfica. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1541-1551, 2002a.

_____. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004. 52p. (INPE-10550-RPQ/756).

_____. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos: INPE, 2002b. (INPE-9364-RPQ/736). 54p.

_____. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), , 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3595-3602. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Publicado como: INPE-12739-PRE/8029. Disponível na biblioteca digital *URLib*: <<http://marte.dpi.inpe.br:80/rep-/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41>>. Acesso em: 18 maio. 2005.

Valeriano, M. M.; Carvalho Júnior, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, n.1, p.17-29, 2003a.

Valeriano, M. M; Kuplich, T. M; Storino, M; Amaral, B. D; Mendes Júnior, J. N; Lima, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with SRTM-90m data (corrected proof available on-line). **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169-1181, 2006. ISSN: 00983004. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.10.019 2006.

Valeriano, M. M; Moraes, J. F. L. Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Posters. 1 CD-ROM.

Wang, G.; Gertner, G.; Fang, S.; Anderson, A. B. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM Images and a slope map. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 8, 2003, p. 889-898.

Weill, M. A. M. **Estimativa da Erosão do solo e avaliação do seu impacto na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP) através do índice de tempo de vida. Piracicaba, 1999.** 100p. Tese (Doutorado-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, universidade de São Paulo).

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington: USDA/ARS, 1978. 58p. (Agricultural Handbook n° 537).

Young, R. A.; Onstad, C .A.; Bosch, D. D.; Anderson, W. P. AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 44, n. 2, p. 168-173, 1989.