

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CEPSRM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**ANÁLISE DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROSÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOS SINOS – RS**

RODRIGO FERREIRA DE AZEVEDO

Porto Alegre, RS
Setembro, 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**ANÁLISE DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROSÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO DOS SINOS – RS**

Rodrigo Ferreira de Azevedo

Orientadora: Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim

Banca Examinadora: Dra. Silvania Maria Netto

Dra. Elba Calesso Teixeira

Dr. Marco Antônio Siqueira Rodrigues

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – UFRGS, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Porto Alegre, RS

Setembro, 2012

CIP - Catalogação na Publicação

Ferreira de Azevedo, Rodrigo
ANÁLISE DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROSÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOS SINOS - RS / Rodrigo Ferreira
de Azevedo. -- 2012.
113 f.

Orientadora: Silvia Beatriz Alves Rolim.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-
Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-
RS, 2012.

1. Sensoriamento Remoto . 2. Geoprocessamento. 3.
Equação Universal de Perda de Solo. 4. Erosão. 5.
Bacia Hdrográfica. I. Beatriz Alves Rolim, Silvia,
orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Cláudio e Marilda, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

À minha esposa Sylvia, pela companhia, paciência e apoio incondicional.

E minha filha Helena que foi uma alegria especial a minha vida me dando mais ânimo para continuar.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa, pelo ensino de qualidade, auxílio financeiro aos trabalhos de campo e pela estrutura disponibilizada, sem a qual não seria possível a realização desta pesquisa.

Aos colegas do CEPSRM pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

À minha orientadora, Silvia Beatriz Rolim, por acreditar na minha proposta de pesquisa, pelo incentivo em todas as etapas do Mestrado e pela grandiosa dedicação nas orientações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de bolsa de pós-graduação.

À Fundação Estadual de Proteção ao Meio Ambiente (FEPAM), pela disponibilidade dos dados necessários para a conclusão deste trabalho.

À empresa Acxiom por me liberar e me incentivar a fazer o mestrado e ao meu antigo coordenador Rafael e ao atual Jader

Aos meus familiares, especial a minha esposa Sylvia, aos amigos Guilherme, Ismael, Fabrício, Carlos e Estevam e a todos que, de alguma forma, vivenciaram esta etapa da minha vida, seja pela colaboração na pesquisa ou simplesmente pelo incentivo e companhia.

RESUMO

Com a preocupação em minimizar a ação antrópica no meio ambiente e possibilitar o desenvolvimento econômico, social e cultural sustentável, cada vez mais se busca uma ferramenta capaz de gerir todos os recursos naturais de uma determinada região.

Neste sentido, é consensual que se deva administrar os recursos, de maneira sustentável e racional. Para tanto, há uma necessidade de se ter uma região delimitada, conhecida, um ecossistema fechado, que desde os anos 1990 no Brasil se propõem o uso de bacias hidrográficas como delineamento territorial na gestão dos recursos naturais.

Utilizando a delimitação da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos - RS e com o intuito de se obter um ambiente sustentável, foi realizado um projeto com o objetivo de indicar possíveis locais susceptíveis à erosão na região delimitada e com isto poder prever sítios onde se poderia haver risco de contaminação, principalmente através de efluente ricos em matéria orgânica, nutrientes e poluentes e ainda diagnosticar se estas áreas estão em situação irregular, como área de preservação permanente. Deste projeto sairão subsídios técnicos e científicos para uma gestão integrada da bacia.

Para se obter este estudo foram elaborados, com o auxílio do sensoriamento remoto e o geoprocessamento, diversos modelos, fatores e análises como modelo digital de elevação, declividade, comprimento de encosta, fatores topográficos, de erosividade, de erodibilidade e de conservação e uso do solo.

Com estes dados e com o auxílio da equação universal de perda de solo (EUPS) foram analisados possíveis sítios com susceptibilidade à erosão, através de mapas tematizados que demonstram os níveis de susceptibilidade na região. Podendo assim verificar os pontos de maior probabilidade a ocorrer uma erosão, que no caso do presente trabalho são as áreas mais íngremes no terceiro trecho da bacia mais ao norte e próximo ao leito dos rios principalmente onde se há um plantio elevado.

No presente trabalho também é possível verificar a diferença entre as susceptibilidades à erosão com ações antrópicas e sem a mesma ação, podendo verificar o malefício ou benefício da humanização nesta área.

Para demonstrar estes mapas tematizados, houve grandes processamentos, demandando tempo e software, como foi os processos de mosaicação e classificação das imagens. Estes processos são descritos ao longo do trabalho.

Palavras-chaves: Bacia Hidrográfica. Erosão. Equação Universal de Perda de Solo. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

ABSTRACT

With the concern to minimize the human action on the environment and enable the economic, social and cultural development, we are increasingly seeking for a tool to manage all natural resources in a given region.

In this sense, it is agreed that we should manage resources in a sustainable and rational way. Therefore, there is a need to having a bounded region, known, a closed ecosystem, which since the 1990 in Brazil propose the use of watersheds as territorial delineation in natural resource management.

Using the definition of Rio do Sinos watersheds - RS and in order to achieve a sustainable environment, a project was done with the objective of identifying potential sites susceptible to erosion in the region delimited and this may predict sites where there could be risk of contamination, primarily through effluent rich in organic matter, nutrients and pollutants and also diagnose if these areas are undocumented, as permanent preservation area. This project will leave allowances for technical and scientific integrated management of the basin.

To achieve this study, with the help of remote sensing and GIS, were prepared several models, factor, and analyzes such as digital elevation model of the terrain, slope, length of slope, topographic factors, erosivity, erodibility and conservation and use of the soil.

With this data and with the aid of universal soil loss Equation (USLE) possible sites were analyzed with susceptibility to erosion through thematized maps that show the levels of susceptibility in the region. Therefor, beging able to check areas with higher probability to occur erosion, which in the case of this work are the steeper areas in the third part to the north of the basin and near riverbeds especially where there is a high planting.

In this work it is possible to see the difference between susceptibility to erosion with human actions and without the same action, may verify the harm or benefit of humanizing this area.

To demonstrate these maps thematized, there were large processing, requiring time and software, as the mosaicking process and classification of images. These processes are described throughout the study.

Keywords: Watersheds. Erosion. Universal Soil Loss Equation. Remote Sensing and GIS.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	Conceito de Bacias Hidrográficas	11
2.2	Característica Morfométrica de Bacia Hidrográfica	12
2.3	Política Nacional e Estadual para Gerenciamento de Bacia Hidrográfica	13
2.4	Importância do Estudo de Erosão	14
2.5	Conceito de Erosão	16
2.6	Previsão de Produção de Sedimentos em Bacia Hidrográfica	23
2.7	Sistema de Informação Geográfica Aplicada à Obtenção de Parâmetros para a EUPS	29
2.8	Base de Dados Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto	31
3	ÁREA DE ESTUDO	33
3.1	Descrição Geral	33
3.2	Principais Usos da Água da Bacia	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Materiais	40
4.1.1	Imagens RapidEye	40
4.1.2	Curva de Nível	44
4.1.3	Ponto de Controle	44
4.1.4	Base Vetorial de Solos	44
4.1.5	Dados Pluviométricos	45
4.2	Métodos	46
4.2.1	Processamento das Imagens RapidEye	48
4.2.2	Classificação das Imagens	50
4.2.3	Modelo Digital de Elevação	52
4.2.4	Mapas Temáticos (ou plano de informação)	53
4.2.5	Modelo de Precipitação de Perda de Solo	61
5	RESULTADOS	63
5.1	Mosaico de Imagens	63
5.2	Classificação de Imagem	65
5.3	Modelo Digital de Elevação	73
5.3.1	Comprimento de Encosta	76
5.3.2	Declividade	78
5.3.3	Fator Topográfico	80
5.4	Fator de Erodibilidade	83
5.5	Fator de Erosividade	85
5.6	Modelo de Predição de Perda de Solo	90
6	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXOS	106

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Bacia Hidrográfica do Rio Grande do Sul	14
Figura 2 Erosão Laminar	18
Figura 3 Erosão em Sulcos	19
Figura 4 Ravina	19
Figura 5 Voçoroca	20
Figura 6 Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos	33
Figura 7 Mapa de Localização do Rio dos Sinos	34
Figura 8 Imagens RapidEye Bruta com sua Nomenclatura e Data Coletada	40
Figura 9 Satélite RapidEye	41
Figura 10 Localização dos Pontos Pluviométricos	45
Figura 11 Histogram Matching	49
Figura 12 Esquema <i>CutLine</i>	50
Figura 13 Critérios para Classificação pela Técnica MAXVER	51
Figura 14 Ilustração da Função de Correção	52
Figura 15 Mosaico das 15 Imagens RapidEye	64
Figura 16 Imagens Resultantes dos Classificadores Testados	65
Figura 17 Localização das Imagens sobre o Limite da Bacia Hidrográfica	69
Figura 18 Imagem 2225313 Classificada com MAXVER com Pixels não Corrigidos	70
Figura 19 Mosaico das 15 Imagens Classificadas com MAXVER e Pixels não Corrigidos ...	70
Figura 20 Imagem 2225313 Classificada com MAXVER com Pixels Corrigidos	71
Figura 21 Mosaico das 15 Imagens Classificadas com MAXVER e Pixels Corrigidos	71
Figura 22 Modelo Digital de Elevação	73
Figura 23 Modelo Digital de Elevação em Três Dimensões	74
Figura 24 Modelo Digital de Elevação em Três Dimensões, com Mosaico Sobreposto	75
Figura 25 Modelo Digital de Elevação em Três Dimensões, com Mosaico Sobreposto	75
Figura 26 Mapa de Comprimento de Encosta	77
Figura 27 Mapa de Declividade	79
Figura 28 Mapa de Fator Topográfico LS	82
Figura 29 Mapa de Fator de Erodibilidade	84
Figura 30 Localização dos Pontos Pluviométricos	86
Figura 31 Mapa de Fator de Erosividade	89
Figura 32 Mapa de Susceptibilidade à Erosão Utilizando Fatores Naturais	91
Figura 33 Mapa de Susceptibilidade à Erosão Utilizando Fatores Naturais e Antrópicos	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Características Morfométrica de Bacias Hidrográficas	13
Quadro 2 Parâmetros de EUPS, Correlacionada com a Informação de Base Necessária e quais os Procedimentos a Utilizar para a Conversão de Dados em Formato SIG	31
Quadro 3 Característica do Satélite RapidEye	42
Quadro 4 Especificação Técnica do Sistema RapidEye	43
Quadro 5 Bandas Espectrais do Satélite RapidEye	43
Quadro 6 Níveis de Produtos dos Satélites RapidEye	44
Quadro 7 Exemplo de um Arquivo Extraído da ANA	46
Quadro 8 Índice de Resistência do Solo da Região do Rio dos Sinos	56
Quadro 9 Classe de Resistência à Impactos Ambientais	57
Quadro 10 Índice de Resistência do Solo, com o Fator K.....	58
Quadro 11 Exemplo do Quadro Adequada com Remoção dos Ruídos.....	59
Quadro 12 Valores do Fator C Atribuídos aos Diferentes Usos da Terra.....	60
Quadro 13 Acurácia dos Classificadores Testados.....	66
Quadro 14 Acurácia pela Estatística Kappa das 15 Imagens	68
Quadro 15 Área e Porcentagem Classificada por Classes.....	72
Quadro 16 Risco de Erosão pela Declividade	80
Quadro 17 Fator de Erosividade para todos os Pontos Pluviométricos Utilizados	86
Quadro 18 Fator de Erosividade com Maior e Menor Índice Anual	87
Quadro 19 Fator de Erosividade com Maior Índice por Mês da Série Histórica	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA: Agência Nacional das Águas

EUPS: Equação Universal de Perda de Solo

EUPSM: Equação Universal de Perda de Solo Modificada

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAXVER: Máxima Verossimilhança

MDE: Modelo Digital de Elevação

SDR: Sediment Delivery Ratio

SEMA: Secretaria Estadual de Meio Ambiente

SIG: Sistema de Informação Geográfica

1 INTRODUÇÃO

As ações para minimizar a atividade antrópica no meio ambiente e possibilitar o desenvolvimento econômico, social e cultural sustentável apoiam-se, cada vez mais, em sistemas de gerenciamento integrado de dados. Nestes, é possível o armazenamento, processamento e análise integrada de todas as variáveis que influenciam os recursos naturais renováveis e não renováveis de uma região.

No Brasil, a gestão de recursos naturais baseada no delineamento territorial das bacias hidrográficas ganhou força no início dos anos 1990, quando os Princípios de Dublin foram acordados na reunião preparatória à Rio-92 (The Dublin Statement on Water and Sustainable Development). Este documento ressalta que uma gestão efetiva dos recursos naturais, deve ser integrada, considerando todos os aspectos, físicos, sociais e econômicos.

Neste sentido, a questão central da gestão está na integração dos vários aspectos que interferem no uso dos recursos hídricos e na sua proteção ambiental, sendo a bacia hidrográfica o palco unitário de interação das águas com os meios físico, o biótico, social, econômico e cultural.

Com o intuito de apontar soluções para a construção e manutenção de um ambiente sustentável, foi realizado núcleo de pesquisa, com alguns projetos para fornecer subsídios técnico-científicos para gestão integrada da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, uma região com altos índices de poluição e populacional, cujo evento extremo ocorrido no ano de 2006, culminou na mortandade de 80 toneladas de peixes.

Entre os subsídios técnico-científicos para gestão integrada estão: monitoramento da qualidade da água, análise genotóxica, análises dos sedimentos, análise de áreas susceptíveis à erosão, entre outras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos de Bacia Hidrográfica

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacia hidrográfica como unidade de estudo e gestão. Nela, a definição de bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Diversas definições de bacia hidrográfica foram formuladas ao longo do tempo. Percebe-se em vários autores (Lima & Zakia, 2000; Barrella, 2001; Pissara, 2004; Tonello, 2005; etc), grande semelhança e consideração deste recorte espacial, baseado na área de concentração de determinada rede de drenagem. Entretanto, as definições que envolvem as subdivisões da bacia hidrográfica (sub-bacia e microbacia) apresentam abordagens diferentes trocando fatores que vão do físico ao ecológico.

Assim, as definições propostas para bacia hidrográfica assemelham-se ao conceito apresentado por Barrella (2001), como um conjunto de terras drenado por um rio e seus afluentes, formados nas regiões mais altas do relevo por divisores de água. As águas provenientes das chuvas escoam superficialmente formando os riachos e rios ou infiltram no solo para formação das nascentes e do lençol freático.

Lima e Zakia (2000) acrescentam uma abordagem sistêmica ao conceito geomorfológico da bacia hidrográfica. Para esses autores as bacias hidrográficas são sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes. Desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico.

Assim, qualquer modificação no recebimento ou na liberação de energia, ou na modificação da forma do sistema, acarretará em uma mudança compensatória que tende a minimizar o efeito desta modificação e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico.

Do ponto de vista da hidrologia, a classificação de bacias hidrográficas em grandes e pequenas não é vista somente na sua superfície total, mas considerando os efeitos de certos fatores dominantes na geração do deflúvio, tendo características distintas tanto para as chuvas de alta intensidade (curta duração), como também ao fator uso do solo (cobertura vegetal) e o tipo do solo (Lima & Zakia, 2000).

2.2 Características Morfométricas de Bacia Hidrográfica

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, etc.) e do tipo da cobertura vegetal existente (Lima, 1976).

As classes de informações morfológicas determinam diferenças essenciais entre distintas paisagens, como relatam estudos clássicos desenvolvidos por Horton (1945), Strahler (1957), França (1968), Christofolletti (1978), entre outros.

Segundo Tonello (2005), as características morfométricas podem ser divididas em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem (Quadro 1).

Quadro 1 – Características Morfométricas de Bacias Hidrográficas

Características Morfométricas	Tipo de Análises
Características geométricas	Área Total Perímetro Total Coeficiente de compactidade Fator de forma Índice de circularidade Padrão de drenagem
Características do relevo	Orientação Declividade mínima Declividade média Declividade máxima Altitude mínima Altitude média Altitude máxima Declividade média do curso d'água principal
Características da rede de drenagem	Comprimento do curso d'água principal Comprimento total dos cursos d'água Densidade de drenagem Ordem dos cursos d'água

2.3 Políticas Nacionais e Estaduais para o Gerenciamento de Bacias Hidrográficas

A partir dos anos de 1990, principalmente com o acordo do Princípio de Dublin, algumas iniciativas foram tomadas pelo governo federal e estadual no sentido de gerir os recursos naturais e não naturais, delimitado os territorialmente por bacias hidrográficas, surgindo a Lei 9.433 (Agencia Nacional das Águas - ANA). E a Lei 10350/1994 instituiu o Sistema Estadual de Recursos Hídricos que estabelece, para os rios do estado, a formação de comitês de gerenciamento, o Comitê de Bacia. Segunda a Secretaria Estadual do Meio Ambiente - SEMA (2010) o estado do Rio Grande do Sul, foi determinada a existência de três regiões hidrográficas: Região do Uruguai, Guaíba e Litoral (Figura 1). Estas foram subdivididas em 25 bacias hidrográficas.

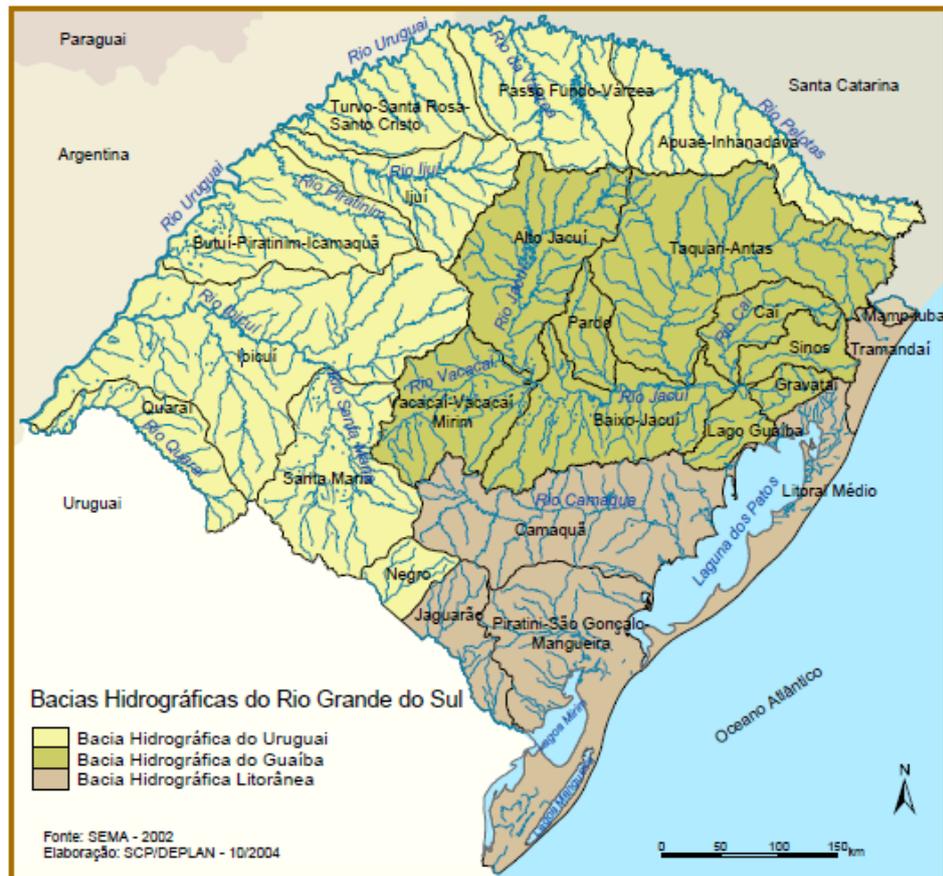


Figura 1 – Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul
(Fonte: SEMA – Secretaria Estadual do Meio Ambiente, 2002).

Considerando que a bacia hidrográfica é a unidade territorial de gestão de recursos hídricos, torna-se relevante a obtenção de dados sobre as características erosivas dentro de uma unidade de gestão.

2.4 Importâncias do Estudo da Erosão

A degradação das bacias hidrográficas pela ação antrópica, como os desmatamentos desordenados, o uso irracional do solo pela agricultura, pastoreio, obras civis, entre outros, associada aos fenômenos naturais de precipitação, tipo de solo, resulta em quantidades muito maiores de solo erodidos em relação aos produzidos em centenas de anos em condição de equilíbrio natural (Coiado, 2001).

O conhecimento da quantidade de sedimentos transportada pelos rios, além de informar sobre as características e o estado da bacia hidrográfica, é de fundamental importância para a análise da viabilidade dos recursos hídricos de uma região para utilização em abastecimento ou irrigação, cálculo de vida útil de reservatórios, etc.

Filizola *et al.* (2001) comentam que o transporte de sedimentos pelos rios pode afetar a qualidade da água e, conseqüentemente, a aceitação desta para diversos usos. Além da qualidade dos recursos hídricos, os problemas que provém da deposição dos sedimentos são os mais variados.

Carvalho (1994) cita que a erosão é o processo inicial da sedimentação, podendo-se ressaltar o seguinte:

- provoca a destruição das nascentes dos rios;
- aumenta o risco de desertificação;
- promove a remoção da camada fértil em zonas agrícolas, com o empobrecimento do solo;
- ocasiona o desprendimento e escoamento de terras e taludes podendo provocar danos gerais, incluindo mortes e destruição de obras;
- altera as condições de escoamento da água na superfície e na calha dos rios;
- modifica a calha dos rios (desbarrancamento) e provoca depósitos no leito;
- produz sulcos em locais indesejáveis nas terras durante as enxurradas;
- pode provocar danos irreversíveis, quando ocorrido em torno das estruturas urbanas.

Segundo o IAC (2003), em 1989 o Brasil perdia anualmente 1 milhão de toneladas de solos agricultáveis, correspondendo a uma taxa de erosão inferior a 1 ton/ha/ano. Atualmente, a erosão no Brasil atinge a média de 25 ton/ha/ano, por não ter uma gestão e boas práticas na agricultura, onde o tolerável nos Estados Unidos é de 12 ton/ha/ano (Tomaz, 2008).

2.5 Conceitos de Erosão

A erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo que pode ser causado pela água ou pelo vento. É a mais preocupante e principal forma de degradação do solo, resultando na perda anual de milhares de toneladas de solo, causando males para os cursos e espelhos d'águas, com prejuízos financeiros em escala global (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

Pode-se também considerar a erosão como sendo basicamente uma reação da natureza em estabelecer um novo equilíbrio (Resende, 1985).

Os processos naturais erosivos são intensificados com a ação antrópica, quando o solo passa a ser manejado para qualquer finalidade, ocorrem desequilíbrios na relação solo-clima-vegetação que promovem a instabilidade do sistema (Brasil, 1983). Como nem sempre o destino que se dá às terras é o mais adequado sob o ponto de vista de sua aptidão, são gerados processos de degradação de solos causados, principalmente, pela erosão hídrica (Merten *et al.*, 1995).

Segundo Zachar (1982), a erosão hídrica é a mais importante forma de erosão, na grande parte do planeta, se intensificando quando há uma substituição da vegetação nativa por áreas de uso agrícola, principalmente sem planejamento. Wischmeier e Smith (1978) ressaltam que alguns fatores e suas inter-relações são considerados determinantes para a taxa de erosão hídrica, são eles:

- o clima, principalmente a precipitação pluviométrica;
- o solo, com sua resistência à degradação, a topografia, notadamente o grau da declividade e o comprimento de encosta;
- a cobertura do solo.

A erosão hídrica que ocorre no solo tem como causa inicial o impacto direto das gotas de chuva sobre sua superfície, onde inicia a primeira fase da erosão, conhecida como

desagregação. O aumento da resistência à desagregação do solo em superfície ocorre em função do aumento da estabilidade dos agregados em água e da consolidação do solo (Eltz *et al.*, 1989).

A desagregação do solo em frações menores faz com que estas, ao se acomodarem junto à superfície, obstruam os poros, resultando em baixos valores de infiltração (Le Bissonnais, 1996), facilitando o transporte de solo pela enxurrada. A deposição das partículas erodidas provoca o assoreamento do leito de rios, barragens e baixadas, além da poluição ambiental (Veiga, 1991).

A ação erosiva da chuva é ainda maior onde a cobertura protetora do solo é totalmente removida, expondo as superfícies desnudas à ação direta do impacto das gotas de chuva. O preparo do solo pelo método convencional mobiliza totalmente a superfície, eleva a rugosidade superficial. Com o passar do tempo, a rugosidade superficial criada pelo preparo neste sistema de manejo tende a diminuir, reduzindo, conseqüentemente, a capacidade do solo de reter e infiltrar água na superfície, o que aumenta a enxurrada e a erosão hídrica, acentuando-se o transporte de sedimentos minerais e orgânicos (Bertol, 1997).

O processo erosivo, quando presente em ambientes com cobertura vegetal natural e sem pressão de fatores antrópicos, é denominado erosão natural ou geológica, e se manifesta de forma muito lenta (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

Ainda segundo, Bertoni & Lombardi Neto (1990), a erosão antrópica ou acelerada é resultante da ocupação inadequada dos solos por atividades agrícolas ou urbanas, que aceleram e intensificam os processos erosivos devidos as condições induzidas ou modificadas pelo homem ao solo.

As condições mais favoráveis estão presentes em solos sem cobertura vegetal, compactados e recentemente movimentados através do preparo mecânico, trazendo com

efeitos o aumento na desagregação do solo, diminuição da capacidade de infiltração, e consequentemente aumento do escoamento superficial.

Existem vários tipos de erosão quanto ao grau de intensidade, sendo que os mais frequentes são as laminares e lineares, esta última causada por concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em incisões na superfície do terreno na forma de sulcos, ravinas e boçorocas e solapamento de margens de canal.

Na erosão laminar (Figura 2) o solo é removido com certas uniformidades em camadas delgadas sobre toda uma área, sendo pouco visíveis sinais no solo, mas perceptíveis com o aumento da turbidez da água do rio.



**Figura 2 – Exemplo de erosão Laminar
(Fonte: Saving Soil, 2009).**

A erosão em sulcos resulta de pequenas irregularidades na declividade do terreno que faz com que a enxurrada atinja volumes e velocidades suficientes para formar riscos mais ou menos profundos (Figura 3).



Figura 3 – Exemplo de erosão em Sulcos
(Fonte: Saving Soil, 2009).

As ravinas, que podem ser visualizadas na Figura 4, são feições de maior porte, com profundidade variável, de forma alongada e não atingindo o nível d'água subterrânea (CBH-AP,1997). A erosão em ravina ocorre quando a água se encontra em maior volume formando canais mais profundos que os sulcos e por solapamento ou escavação descendente formando as ravinas (Cerri, 1999).



Figura 4 – Exemplo de ravina
(Fonte: Saving Soil, 2009).

Voçorocas (Figura 5) é a forma mais grave de erosão, ocasionada por grandes concentrações de enxurrada, formando grandes cavidades em extensão e em profundidade (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).



**Figura 5 – Exemplo de voçoroca
(Fonte: Saving Soil, 2009).**

De um modo geral, as pesquisas sobre erosão do solo consideram como sendo fatores dos processos erosivos a erosividade da chuva, as propriedades dos solos, cobertura vegetal e características das encostas (Oliveira, 1999).

Salomão (1995) inclui como fatores dos processos erosivos o desmatamento, cultivo de terras, corte de estrada e expansão de cidades.

Para Pejon (1992), os processos erosivos dependem de uma série de fatores naturais, como: clima, geomorfologia, natureza do terreno e a cobertura vegetal. Já para Bertoni (1999), os processos erosivos são decorrentes dos seguintes fatores: declividade, pluviosidade, comprimento de encosta, resistência do solo e a densidade da cobertura vegetal.

Algumas pesquisas mostram alguns fatores naturais e antrópicos como elementar para o processo erosivo, como pode ser visto a seguir:

Fatores naturais:

- Clima: a água da precipitação provoca a erosão laminar por meio do impacto das gotas sobre a superfície do solo. Segundo Carson (1975), a água da chuva, ao alcançar a superfície do terreno, divide-se em vários componentes. Há porção que é interceptada pela vegetação é a parte que permanece sobre a superfície foliar e se evapora, enquanto que o restante chega à superfície do solo por gotejamento, desta uma parte preenche irregularidades da superfície e a outra parte infiltra no solo;

- Cobertura Vegetal: a cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra erosão, conforme Morgan (1995), a vegetação atua como uma camada protetora entre o solo e a atmosfera. Segundo Rodrigues (1982), a remoção da cobertura vegetal provoca uma série de mudanças no solo.

- Topografia do terreno: a influência da topografia do terreno na intensidade erosiva verifica-se principalmente pela declividade e comprimento da encosta e esses fatores interferem diretamente na velocidade das enxurradas (Salomão, 1999).

- Solo: o solo é o principal fator que influencia e sofre a ação dos processos erosivos. Sua influência deve-se às suas propriedades físicas, principalmente textura, estrutura, permeabilidade e densidade, e as propriedades químicas, biológicas e mineralógicas. As propriedades físicas e químicas do solo conferem maior ou menor resistência à ação das águas, quando exposto às condições semelhantes de topografia, de chuva e de cobertura vegetal (Bertoni, 1999).

Fatores antrópicos:

Caracteriza-se pela interferência humana no meio físico acelerando os processos erosivos, através das ações:

- Desmatamento;
- Núcleo urbano;
- Cortes de taludes;
- Mineração;
- Agropecuária.

O processo erosivo vai além de promover a queda de capacidade de uso do solo, ou seja, ele diminui o potencial de cultivo das terras. Problemas como o transporte de nutrientes, de matéria orgânica e de defensivos agrícolas até os cursos d'água, vêm se tornando muito sério e culminam com a poluição e/ou eutrofização destes cursos. O processo do assoreamento envolve o transporte de partículas de solo e sua posterior deposição, implicando em problemas relativos ao fornecimento de água as populações.

No contexto da preocupação de conservar o solo, diversos trabalhos foram realizados quantificando diferentes fatores que determinam a erosão, como a erosividade da chuva, erodibilidade do solo, fator topográfico, cobertura vegetal e manejo do solo.

Biscaia *et al.* (1981), calcularam a erodibilidade de dois solos do estado do Paraná, Margolis *et al.* (1985) determinaram os fatores da equação de perdas de solo para um solo litólico de Caruaru-PE, Lombardi Neto & Moldenhauer (1992) calcularam o índice de erosão médio anual e a variação mensal e estacional deste mesmo índice de um período de 22 anos para a cidade de Campinas-SP.

O conhecimento destes fatores é um passo fundamental para se estimar as perdas de solo, possibilitando a adoção de práticas para a sua redução.

No intuito de otimizar o uso das terras pode-se classificá-las em classes de capacidade de uso. O sistema de capacidade de uso foi proposto por Klingebiel & Montgomery (1961). No sistema de capacidade de uso, diversas características e propriedades são sintetizadas, visando à obtenção de classes homogêneas de terras, em termos do propósito de definir sua

máxima capacidade de uso sem risco de degradação do solo, especialmente no que diz respeito à erosão acelerada (Lepsch *et al*, 1991).

2.6 Previsão da Produção de Sedimentos em Bacias Hidrográficas

De acordo com Bordas & Semmelmann (2000), a descarga sólida produzida por uma bacia em função das características físicas da mesma é uma via ainda pouco explorada, se comparada com outros métodos existentes para avaliar a descarga de sedimentos.

A pouco tempo utilizavam-se métodos que foram desenvolvidos por estimativas de perda de erosão, para expressar essa produção, principalmente a Equação Universal de perda de Solo – EUPS, (Wischmeier e Smith, 1978) associada ao emprego de uma taxa de transferência (Sediment Delivery Ratio – SDR) que traduz a diminuição da produção bruta que pode ser estimada pela EUPS em decorrência dos depósitos ocorridos na bacia. Tanto a equação quanto a taxa de transferência (SDR) resultam de expressões empíricas, ainda limitadas pelo fato de considerar somente a produção anual de sedimentos.

Bordas & Semmelmann (2000) citam ainda, que processos importantes têm sido registrados a partir do advento da simulação matemática, do sensoriamento remoto e de sistemas de informações geográficas. Atualmente existe uma expressão relativamente simples, por não considerar muitas variáveis de complexa dedução, denominada Equação Modificada de Perdas de Solo – EUPSM, sugerida por Williams (1975).

Paiva (2001), diz que os modelos de previsão podem ser classificados quando à estrutura em empíricos e conceituais. Os modelos empíricos utilizam relações empíricas, com interesse em estudos preliminares e estimativas grosseiras, tentando relacionar a concentração e vazão, não podendo prever sempre a variação da qualidade das águas superficiais e sua relação com o impacto das mudanças das práticas agrícolas. Já os modelos conceituais equacionam os processos de transformação e o transporte de poluentes na bacia, aplicando

derivadas parciais para representar o escoamento da água e o transporte de poluentes associados.

A seguir são demonstradas algumas equações existentes para o estudo da perda de solo.

Equação Universal de Perda de Solo

A Equação Universal de Perda de Solo - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978) e a versão revisada - REUPS (Renard *et al.*, 1997) foram concebidas para prever ao longo de um período de tempo a perda anual média de solo (A). Ambos os modelos são representados pela equação envolvendo seis fatores de erosão,

$$A = R.K.L.S.C.P$$

em que R representa o fator de erosividade ou poder da precipitação média anual da região, em t.m/ha.mm/hora, K o fator de erodibilidade, em t/ha/(R), L o fator de comprimento de encosta, S é o fator de declive, C é o fator relativo ao cobertura vegetal e P o fator de prática agrícola ou medidas de controlo de erosão. Os quatro fatores adimensionais (L , S , C e P) são obtidos pela razão entre as perdas de solo num local específico, e as perdas de solo na unidade EUPS (22,1 m de comprimento, com 9% inclinação, sem vegetação, com áreas de cultivo ao longo do declive).

A equação universal de perdas de solo pode ser usada para:

- Prever as perdas de solo por erosão;
- Selecionar práticas de conservação de solo de tal forma que sejam mantidas as perdas dentro dos limites aceitáveis;
- Determinar os declives máximos que podem ser cultivados sob determinados manejos e tipos de solo;
- Estudos e pesquisas.

- Fator de Erosividade – R

É importante mencionar que o fator de erosividade (R) é um índice que expressa a capacidade de erosão da chuva em uma área desnuda. A erosividade é produto de duas características da chuva: sua energia cinética total e sua intensidade máxima em trinta minutos. Esse produto representa um termo de interação que mede o efeito de como a erosão por impacto e a turbulência se combinam com a enxurrada para transportar as partículas desprendidas de solo (Bertoni & Lombardi, 1990).

Os valores de R expresso em $\text{tm/ha} \times \text{mm/h}$ variam de fraco a muito forte, conforme a seguinte escala:

- $R < 250$ – erosividade fraca;
- $250 < R < 500$ – erosividade moderada;
- $500 < R < 750$ – erosividade moderada a forte;
- $750 < R < 1000$ – erosividade forte;
- $R > 1000$ – erosividade muito forte.

- Fator de Erodibilidade do Solo – K e Cobertura Vegetal – C

A erodibilidade pode ser considerada como o índice relativo às propriedades inerentes do solo e que reflete a sua suscetibilidade à erosão (Stein *et al.*, 1987). Tem um valor numérico determinado em parcelas unitárias, expresso como a perda de solo (A) por unidade de índice de erosão da chuva (EI) (Lombardi Neto & Bertoni, 1975).

O significado da erodibilidade é diferente de erosão do solo (Wischmeier e Smith, 1978). Esta é muito mais influenciada pelas características das chuvas, declive, cobertura vegetal e manejo do que pelas propriedades inerentes do solo. No entanto, mesmo quando as

variáveis citadas são controladas, alguns solos erodem mais do que outros, em decorrência das propriedades do solo em si, o que se constitui na erodibilidade.

Entre as propriedades do solo que influenciam a erodibilidade pela água, podem ser destacadas: as que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade e a capacidade de absorção, as relacionadas com resistência e a dispersão, ao salpicamento, à abrasão e às forças de transporte da chuva e enxurrada (Bertoni *et al.*, 1975); Lombardi Neto & Bertoni, 1975).

Já o fator de cobertura vegetal ou de uso e manejo correspondem à relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado sob determinada condição e as perdas de outro mantido continuamente descoberto (Wischmeier e Smith, 1965 citado por Bertoni & Lombardi Neto, 1999). O fator C expressa as diferentes formas de manejo aplicáveis a uma dada cultura e as condições da própria cultura (Valeriano, 1999; Bertoni & Lombardi Neto, 1999).

Por serem intrinsecamente relacionadas, as variáveis de uso e manejo não podem ser analisadas separadamente na abordagem da perda de solos por erosão (Stein *et al.*, 1987). O uso de uma área pode ocorrer sob diferentes formas de manejo, assim como um mesmo manejo pode ser aplicado a diferentes tipos de usos de solo; dessa forma, diferentes combinações refletirão diferentes níveis de perdas de solo.

- Fator Topográfico – LS

Este fator representa as perdas de solo esperadas por unidade de área em um declive qualquer, em relação às perdas de solo correspondentes a uma parcela unitária de 25 metros de comprimento e 9% de declividade. Basicamente, é composto pela declividade e pelo comprimento da encosta (Stein *et al.*, 1987). É considerado um fator adimensional desde que considera a relação entre perdas em condição real e em condição padrão (25 metros de comprimento de encosta e 9% de declividade) (Valeriano, 1999).

As formas do relevo exercem uma grande influencia sobre os processos erosivos. A declividade determina a quantidade e a velocidade do escoamento superficial, e o comprimento de rampa influencia no comportamento da enxurrada, velocidade do fluxo, e do grau de confluência do escoamento superficial. Deste modo, a capacidade de remoção e transporte de partículas do solo por escoamento superficial estão diretamente relacionadas com comprimento da encosta (Valeriano, 1999).

- Fator Práticas Conservacionistas – P

Expressa a relação entre a intensidade de perdas esperadas com determinada prática conservacionista e aquelas decorrentes quando o cultivo ocorre no sentido do declive. São consideradas práticas conservacionistas comuns o plantio em contorno, o plantio em faixas de contorno, o terraceamento e a alternância de capinas (Bertoni & Lombardi Neto, 1999).

O apoio ou implementação de práticas de gestão do solo, tais como contornos, cultivo em socacos e terraços, reduz o risco de erosão dos solos (Simms, 2003). Para áreas sem o apoio ou implementação destas práticas, ou no de caso de falta de informação, como no caso em estudo, considera-se o fator P igual a 1. Nesse caso, o modelo calcula o potencial real em vez da perda do solo.

Equação Universal de Perda de Solo Modificada

Paiva (2001) comenta que a equação universal de perda de solo modificada é um modelo de previsão da produção de sedimento, aplicável a eventos de chuvas individuais. É uma modificação da Equação Universal de Perda de Solo através da substituição do fator de energia da chuva por um fator de escoamento.

Essa equação faz uma modificação do fator de chuva (R) da equação universal de perda de solo, com a finalidade de prever a deposição. Quando a deposição ocorre, a produção

de sedimento é altamente correlacionada com as características do escoamento, uma vez que o escoamento controla a capacidade de transporte de sedimento, que é relacionada a carga do mesmo.

A equação universal de perdas de solo modificada, sugerida por Williams (1975), tem a seguinte forma:

$$Y = \alpha \cdot (Q_s \cdot q_p)^\beta \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

onde:

Y = produção de sedimento para uma chuva individual, em toneladas;

Q_s = volume de escoamento superficial (m^3);

q_p = vazão de pico de escoamento superficial, mm^3/s ;

α e β = coeficientes calibrados para bacia em estudo;

K, L, S, C, P = fatores da EUPS descritos anteriormente.

Na região em que os autores desenvolveram a fórmula (Estado do Texas e Nebraska – USA), os parâmetros α e β valem 95 e 0,56 respectivamente, no sistema de unidades americano, para o sistema internacional, Paiva (2001) cita 89,6 e 0,56 respectivamente.

Esta equação foi testada em bacias variando de 0,01 a 234 km^2 e declividade variando de 1 a 30%. Utilizando dados de escoamento médio, sendo avaliada a produção de sedimentos para eventos e chuva individuais.

Modelo de Propagação de Sedimentos de Williams utilizando EUPSM

A produção de sedimentos depende de uma série de fatores relacionados às características climáticas, topológicas, uso do solo, entre outras. Estes fatores variam consideravelmente e geralmente não tem distribuição uniforme dentro de bacias hidrográficas.

Williams (1975) propôs um modelo de propagação de sedimentos em bacias hidrográficas, que consiste em dividir a bacia em n sub-bacias representativas, nas quais estima-se a quantidade de sedimento produzido, por uma chuva isolada, através da Equação Universal de Perda de Solos Modificada.

O total de sedimentos produzidos pela bacia inteira é o somatório das frações do total de sedimentos produzidos pelas n sub-bacias propagadas até o exutório da bacia.

Conforme Williams (1975), a taxa de perdas depende do tamanho e velocidade de transito da partícula, da quantidade de partículas em suspensão e do comprimento e tempo de percurso, podendo ser expressa matematicamente da seguinte forma:

$$dy/dt = -B.Y.D^{1/2}$$

onde:

dy/dt = taxa de perdas no tempo t;

Y = sedimento produzido em dada secção da bacia;

t = tempo (horas);

B = coeficiente de propagação;

D = diâmetro da partícula (mm).

2.7 Sistemas de Informação Geográfica aplicados à obtenção de parâmetros para a EUPS

Atualmente, a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para armazenar, simular, modelar e resolver problemas ligados ao meio ambiente é essencial.

Na hidrologia, muitos modelos são geralmente baseados na análise bancos de dados georrelacionais. Os fatores da EUPS são relacionados com os dados relativos a ocorrências

sobre a superfície terrestre, como a distribuição da pluviosidade, cobertura vegetal, uso e práticas de conservação do solo e a própria configuração do relevo, é exemplo disso.

Bacellar (1994) utilizou a EUPS para analisar o potencial de erosão na bacia do Ribeirão Cachoeirinha e determinar os pontos críticos de perda de solo que causam assoreamento na represa que abastece o município de Iracemápolis – SP, utilizando SIG como ferramenta de armazenagem, gestão e análise das informações.

Um SIG é constituído por uma tecnologia de gestão de base de dados para armazenamento e consulta de dados e funcionalidades de análise, visualização e comunicação de informação geográfica.

De forma geral, através desses sistemas, os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre podem ser objeto de representação e análise.

O Quadro 2 a seguir apresenta os parâmetros da EUPS que podem ser obtidos num SIG.

Quadro 2 – Parâmetros de EUPS, correlacionados com a informação de base necessária e quais os procedimentos a utilizar para a conversão de dados em formato SIG. (Fonte: Saving Soil, 2009).

Parâmetros da EUPS	Informação necessária	Procedimento para a conversão dos dados para formato SIG
Erosividade	Pluviometria	Interpolação espacial dos valores da precipitação e intensidade pluviométrica
Erodibilidade	Variação espacial dos tipos e famílias de solo	Atribuição de valores correspondentes do fator K aos polígonos do mapa de tipo de solo, por reclassificação do mesmo
Comprimento das encostas	Modelo numérico do terreno (MDT)	Operações topológicas de conectividade e proximidade, que permitam criar uma função para o cálculo do fator L na bacia hidrográfica.
Inclinação das encostas	Modelo numérico do terreno (MDT)	Reclassificação dos valores da inclinação por classes. Obtenção do fator S por aplicação de uma expressão com este fim ao mapa das inclinações.
Técnica cultural	Variação espacial dos tipos de cultura (uso do solo)	Atribuição de valores correspondentes do fator C aos polígonos do mapa de ocupação do solo por reclassificação do mesmo
Práticas de conservação	Variação espacial das práticas de conservação	Reclassificação dos mapas com o valor do fator P, utilizando-se o valor 1 para zonas onde não existem práticas de conservação.

2.8 Base de Dados Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto

Com a evolução da informática e dos sistemas sensores de registro de imagens, cada vez mais tendem-se a fazer uso do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Informações Geográficas como forma de obter produtos que sirvam de ferramentas para aquisição, processamento, interpretação e atualização de dados. Estes dados são utilizados para efetuar planejamentos com maior precisão e com economia de tempo.

Segundo Novo (1999), sensoriamento remoto pode ser definido como aquisição de informações sobre o objeto a partir de medidas feitas por um sensor que não se encontra em contato físico direto com ele. As informações do objeto, neste caso são derivadas da detecção e mensuração das modificações que ele impõe sobre os campos de força que o cercam.

Já para Colwell (1983), o sensoriamento remoto é a aquisição de informações sem que haja um contato físico. Campbell (1996) define sensoriamento remoto como a ciência que obtém informações da superfície terrestre a partir de imagens obtidas a distância. A obtenção dessas informações geralmente depende da energia eletromagnética refletida ou emitida pelo alvos de interesse.

No que se refere ao sensoriamento orbital, atualmente existem imagens de vários sistemas, com diferentes características geométricas e resoluções espaciais, temporais, radiométricas e espectrais. As principais plataformas para recursos naturais são: LANDSAT, SPOT, CBERS, RADARSAT, IKONOS, QUICKBIRD, RAPIDEYE, EOS-TERRA, AVHRR e EnMAP.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Descrição Geral

A bacia hidrográfica do Rio dos Sinos (Figura 6) está situada à nordeste do Estado, entre os paralelos 29° e 30° sul, possui uma área de 3.820 km², correspondendo a 4,5% da bacia hidrográfica do Guaíba e 1,5% da área total do Estado do Rio Grande do Sul, com uma população aproximada de 1.330 mil habitantes, sendo que 95,2% ocupam as áreas urbanas e 4,8% estão nas áreas rurais (IBGE, 2010). Esta bacia é delimitada à leste pela Serra Geral, pela bacia do Caí à oeste e ao norte, e ao sul pela bacia do Gravataí (Figura 1).

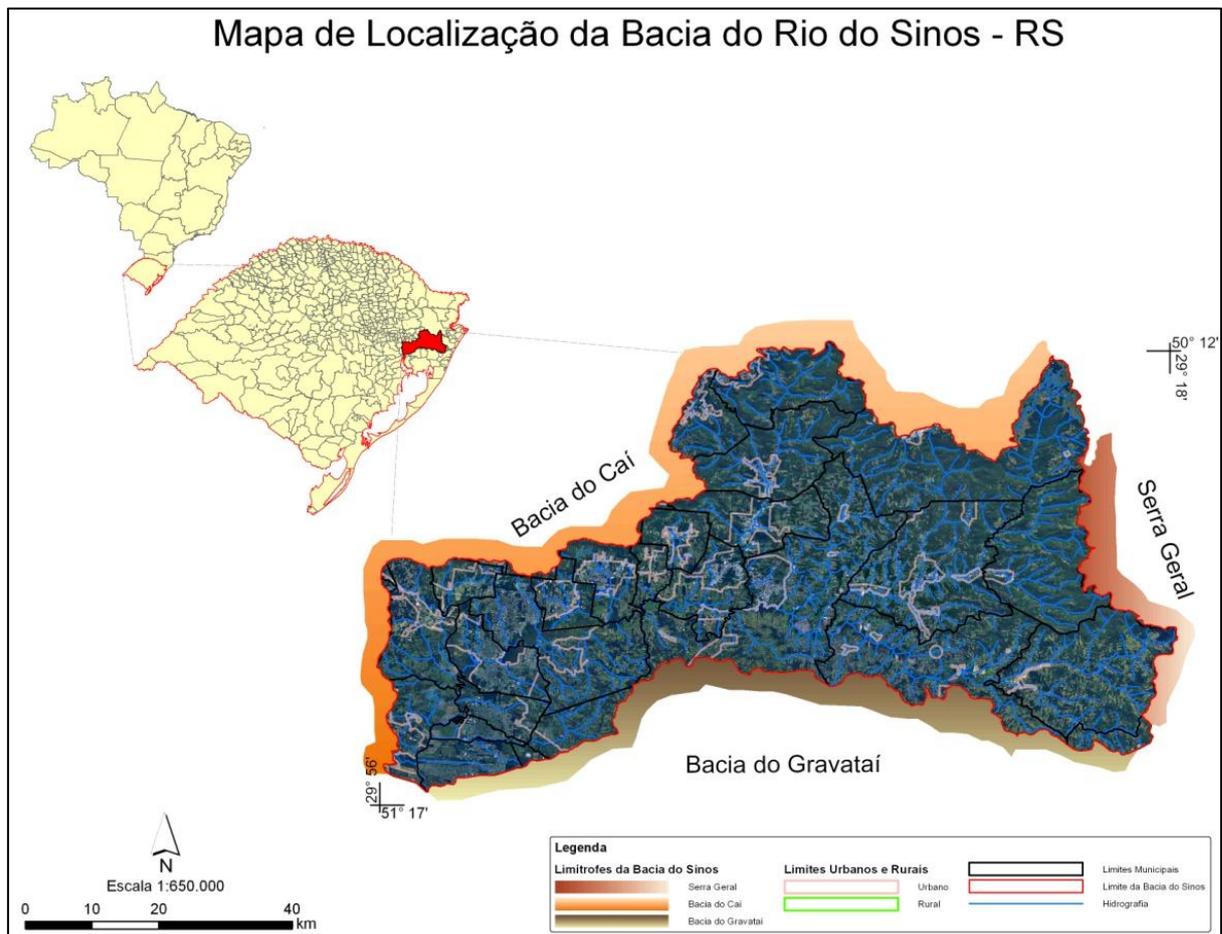


Figura 6 – Mapa de Localização da Bacia do Rio dos Sinos

Segundo a FEPAM (2011), seu curso d'água principal tem uma extensão aproximada de 190 km, e uma precipitação pluviométrica anual de 1.350mm (Figura 7). Suas nascentes

estão localizadas na Serra Geral, no município de Caraá (Região E da Bacia), a cerca de 600 metros de altitude, correndo no sentido leste-oeste até a cidade de São Leopoldo, cidade esta localizada na região metropolitana de Porto Alegre (SW da Bacia), onde muda para a direção norte-sul, desembocando no delta do rio Jacuí (SW da Bacia), que é um conjunto hidrográfico de dezesseis ilhas, canais, pântanos e charcos que se formam a partir do encontro de rios cujas águas formam o lago Guaíba a uma altitude de 12 metros.

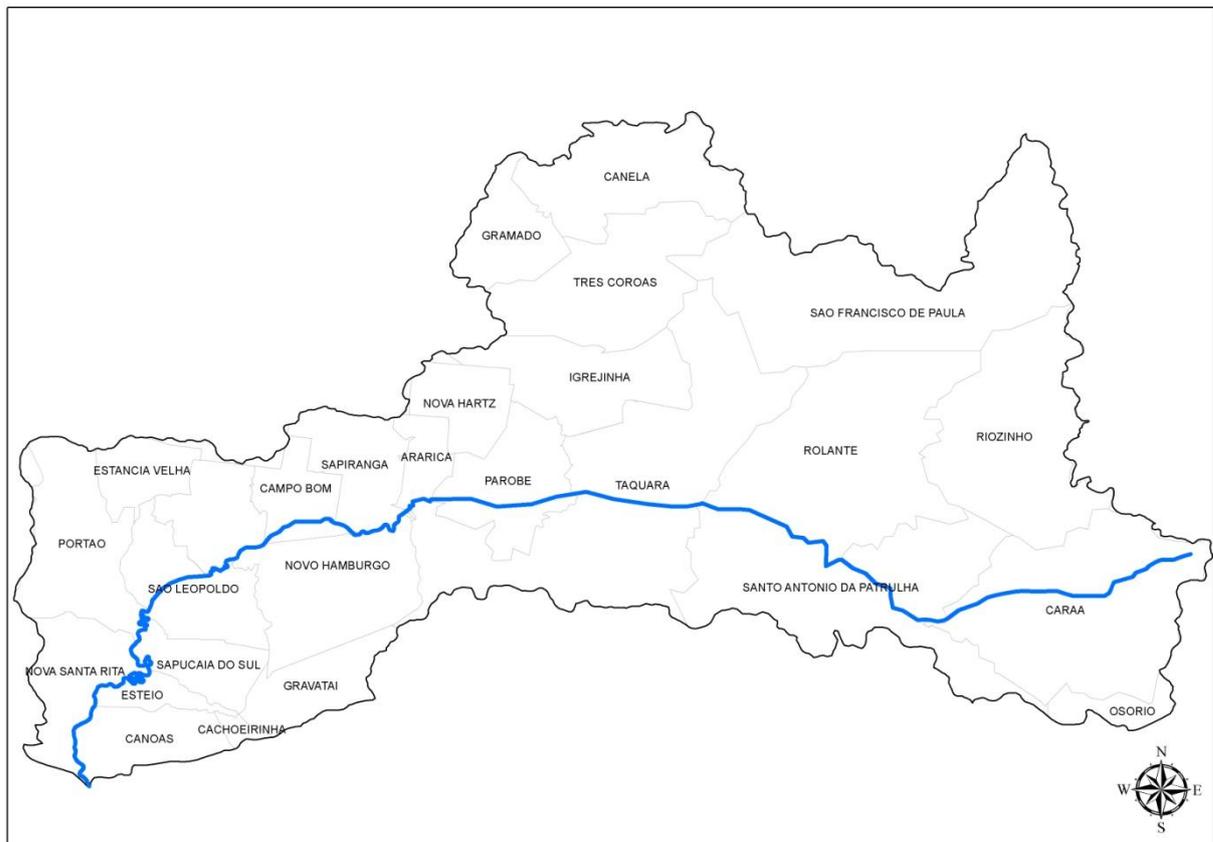


Figura 7 – Detalhe da Bacia dos Rio dos Sinos (linha em azul) com principais municípios.

Seus principais formadores são o rio Rolante e Paranhana, norte/noroeste da bacia (Rolante), além de diversos arroios. O rio Paranhana recebe águas transpostas da bacia do Caí (norte da Bacia dos sinos), das barragens do Salto, Divisa e Blang (São Francisco de Paula).

A cobertura vegetal da bacia apresenta-se reduzida, com remanescentes localizados, predominantemente, nas nascentes do rio dos Sinos e seus formadores (FEPAM, 2011).

Para efeito de caracterização hidrológica e hidráulica, o Rio dos Sinos foi dividido em 03 sub-trechos distintos:

-trecho superior - cerca de 25 km, desenvolvendo-se entre a cota 600 m até a cota 60 m, em alta declividade;

-trecho médio - com declividade média, e extensão de aproximadamente 125 km, recebe o rio Paranhana, que drena uma área de 580 km², o rio Rolante, drenando 500 km², e o rio da Ilha com uma área drenada de 330 km². Possui alto índice pluviométrico, tornando seus afluentes importantes na definição do regime hídrico do rio.

-trecho inferior - caracteriza-se por declividades suaves a quase nulas, próximas a Campo Bom (NW da Bacia), ocorrendo alguns trechos de contra-declives, característica de rio de planície, com formação de meandros e zona de sedimentação.

FEPAM (2011) ressalta que os trechos superior e médio têm escoamento regular por jusante e o trecho inferior sofre influência do Delta do Jacuí, existindo represamento e até mesmo refluxo.

A porção superior do rio dos Sinos (de Caraá, região do litoral norte a 90 quilômetros de Porto Alegre até Rolante, que é localizada na encosta da serra, leste da bacia a 95 quilômetros da capital) apresenta vegetação ciliar e pequenos banhados. São áreas de baixa densidade populacional, com pequenas propriedades rurais cuja agricultura é diversificada (culturas de arroz, cana de açúcar e hortaliças, etc). A pecuária também é pouco desenvolvida, mas encontramos pequenas criações de gado leiteiro, suínos e aves.

Na porção média do rio dos Sinos (entre Taquara, sul da bacia e região metropolitana de Porto Alegre, que esta localizada a cerca de 75 quilômetros da capital e Sapiranga, NW da Bacia, que está a 52 quilômetros da capital fazendo parte da região metropolitana de Porto Alegre) a densidade populacional aumenta, mas as duas grandes cidades (Sapiranga e Taquara) não estão localizadas próximas às margens. Esta porção do rio não apresenta uma

característica tão rural como a porção superior. O principal afluente do rio dos Sinos na porção média é o rio Paranhana, que drena municípios serranos, situados do norte ao sul da bacia como Taquara, Igrejinha, Três Coroas e parte de Gramado e Canela.

O trecho inferior, de Campo Bom, município da região metropolitana e vale dos Sinos até a foz no delta do Jacuí é de grande concentração populacional e industrial, onde os principais arroios formadores drenam grandes centros urbanos, como Campo Bom (arroio Schmidt), Novo Hamburgo (arroio Pampa e arroio Luiz Rau), São Leopoldo (arroio Peão e canal João Corrêa), Estância Velha e Portão (arroio Portão/Estância Velha), Sapucaia do Sul (arroio José Joaquim) e Esteio e zona norte de Canoas (arroio Sapucaia), regiões estas pertencente à metropolitana de Porto Alegre.

Seus afluentes principais são no sentido das cabeceiras para a foz os rios da Ilha, Rolante e Paranhana, sendo que este último recebe, desde de 1956, águas derivadas da bacia do rio Caí da ordem de 5 a 9 m³/s. Estas águas são provenientes das barragens do Salto e da Divisa para a geração de energia nas Usinas Hidrelétricas de Bugres e Canastra, da Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE. Na porção inferior recebe, ainda, os arroios Pampa, Luiz Rau, João Correa, Sapucaia, e outros (FEPAM,2011).

O Rio dos Sinos possui formas diversas de correr e são essas diferentes características que determinam duas coisas muito importantes: ajudam a definir os usos e a vida na água, e também contribuem para que o rio tenha maior ou menor capacidade de se recuperar sozinho. Por exemplo, nos trechos encachoeirados o rio têm mais saltos conseguindo oxigenizar melhor suas águas, facilitando a ação das bactérias que vão eliminar a poluição orgânica, a que sai das casas, das criações de animais e de algumas indústrias.

A bacia do rio dos Sinos é representativa das condições climáticas às quais o Estado está sujeito de um modo geral. Situada na interface das zonas subtropical e temperada, sofre influências tanto de massas tropicais de ar oriundas basicamente do Atlântico, como de

massas atlântico-polares. As precipitações são bem distribuídas ao longo do ano, com média anual de 2.162 mm na área com tipo climático temperado - região de maiores altitudes - e de 1.459 mm na zona de clima subtropical - região de menores altitudes (Pereira,1999).

A evapotranspiração potencial possui valores médios mensais que variam entre aproximadamente 40 mm até 170 mm, sendo os menores valores verificados nos meses de inverno e os maiores no verão. A temperatura média mensal situa-se entre 14,4°C na área de clima temperado e 19,4°C na região de clima subtropical. A umidade relativa do ar possui pequena variação ao longo do ano, situando-se em média entre 72% e 86% (Pereira, 1996).

3.2 Principais Usos da Água da Bacia

A dinâmica do desenvolvimento econômico do Estado do Rio Grande do Sul está localizada na região onde se insere uma parte da área de estudo, ou seja, a região metropolitana e sua área de influência, onde se concentram as atividades econômicas, resultado do processo de industrialização das últimas décadas a partir de uma base econômica preexistente (FEE,2010).

Nesta área se encontra grande parte do crescimento econômico do Estado, quanto aos gêneros metalúrgico, mecânico, material elétrico, material de comunicação, material de transporte, além dos setores químicos.

A indústria de vestuário, como o calçado, importante gênero industrial, ocorre em uma faixa ao longo do Vale do Rio dos Sinos. Este gênero evoluiu a partir de pequenos estabelecimentos artesanais localizados inicialmente em São Leopoldo e Novo Hamburgo, os quais aproveitam a matéria-prima originada da área da Campanha. A indústria contou com capitais, mão-de-obra e mercado local à base da qual se expandiu tornando um dos mais importantes centros, por seu crescimento, comercialização e sua industrialização.

O uso mais expressivo das terras agrícolas na área é com pastagens. A irrigação é utilizada em apenas 4,6% dos estabelecimentos, atingindo 2,0% da área agrícola (Pereira, 1999).

Usos dos recursos hídricos da bacia do Rio dos Sinos

Os principais usuários dos recursos hídricos da bacia foram agrupados em: abastecimento populacional, abastecimento industrial, irrigação, aquicultura e dessedentação de animais. Entre estes usos, destacam-se o abastecimento populacional que, em virtude da ocupação populacional da bacia, verifica-se em toda sua extensão e o abastecimento industrial.

Parte dos recursos hídricos, em todas as sub-bacias, é consumida para dessedentação de animais, principalmente os rebanhos bovinos, suínos e ovinos, além de aviários e pocilgas.

A Tabela 1 apresenta os consumos para os principais usos descritos, para dois cenários distintos em (1995 e 2007).

Tabela 1 – Uso Atuais Totais (Fonte: Magna, 1996).

ATIVIDADES	QUANTIDADES (1995)		QUANTIDADES (2007)	
	m ³ /s	%	m ³ /s	%
Abastecimento				
Doméstico				
Urbano	2,52662	58,02	3,55094	54,6
Rural	0,0616	1,41	0,04394	0,68
Abastecimento Industrial	0,81503	18,72	1,45993	22,45
Irrigação de Arroz	0,85223	19,57	1,3256	20,38
Aquicultura	0,00004	0	0,00007	0
Dessedentação de animais				
Grande Porte	0,09632	2,21	0,11791	1,81
Pequeno Porte	0,00292	0,07	0,00537	0,08
TOTAL	4,3576	100	6,50376	100

Fontes poluidoras da bacia do Rio dos Sinos

Os principais cursos d'água da bacia são utilizados como meio de diluição e afastamento dos despejos líquidos domésticos, industriais, rurais e também de eventuais lixívias de lixões ou de aterros sanitários mal implantados no passado. Esse fato se traduz nas más condições da qualidade da água de alguns cursos d'água, especialmente aqueles que drenam as zonas urbanas e industriais dos municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre.

As principais fontes de poluição da bacia foram agrupadas em 8 classes e estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais Fontes Poluidoras da Bacia do Rio dos Sinos (Fonte: Lanna e Perreira, 1996).

FONTES POLUIDORAS	ORIGEM DA POLUIÇÃO
Efluentes domésticos urbanos	Zonas urbanas;
Efluentes domésticos rurais	Zonas rurais;
Drenagem pluvial urbana	Zonas urbanas, onde ocorre a mistura das águas das chuvas com efluentes industriais, esgotos domésticos e lixívias de lixo;
Fontes difusas rurais	Incluem a erosão natural e artificial de pedreiras, saibreiras, matas, reflorestamentos e culturas;
Resíduos sólidos domésticos	Lixívias de aterros sanitários e lixões mal acondicionados;
Atividade agropecuária de dessedentação de animais	Criação de aves, suínos, ovinos e bovinos;
Efluentes industriais tratados	Efluentes de indústrias, os quais já são tratados até o nível secundário por exigência do órgão ambiental estadual (FEPAM);
Efluentes de Irrigação do Arroz	Efluentes de lavouras de arroz irrigado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Foram utilizados como insumo para o desenvolvimento do trabalho imagens do satélite *RapidEye*, curvas de nível de 20 em 20 metros, pontos de controle extraídos de GPS, base vetorial do solo e dados pluviométricos, conforme descrito a seguir.

4.1.1 Imagens *RapidEye*

Foram adquiridas 15 imagens do satélite *RapidEye*, com 5 bandas espectrais de 440 μm à 850 μm com datas de coleta entre 24/05/2009 à 06/05/2010, como pode ser verificado na Figura 8.

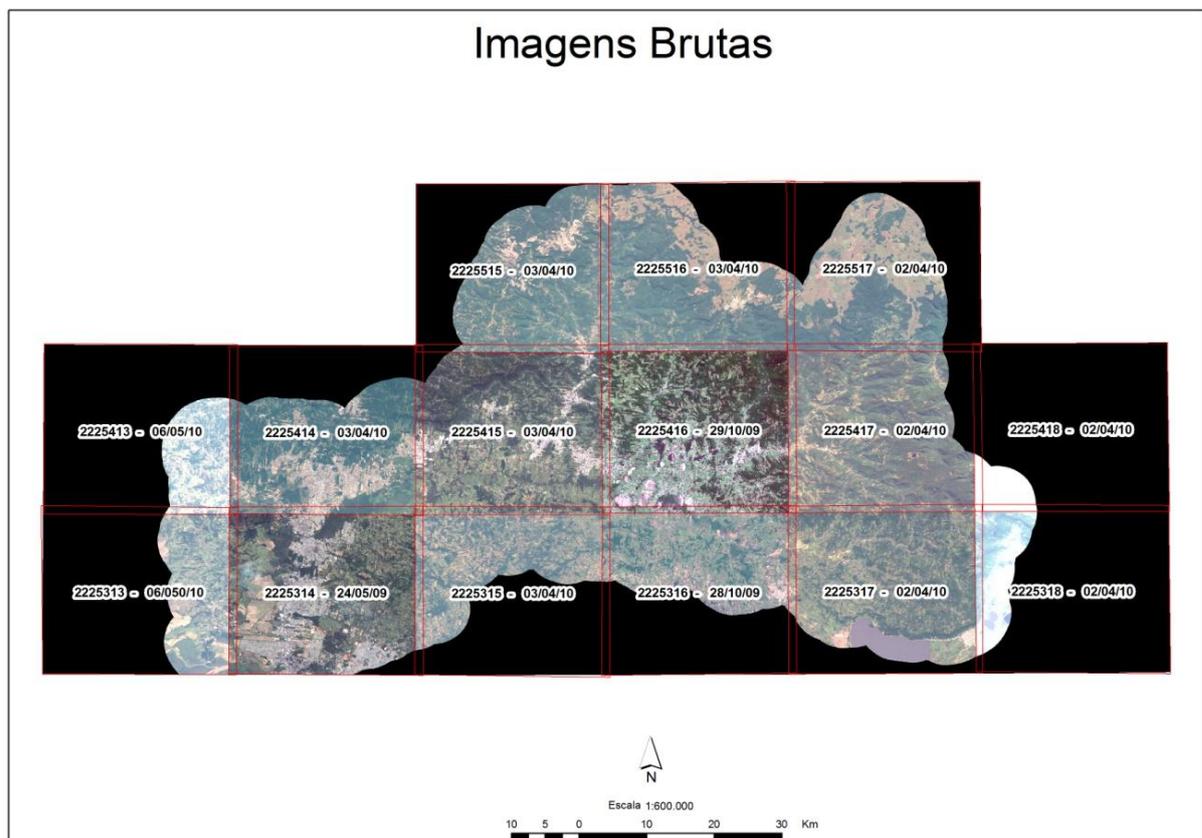


Figura 8 – Imagens *RapidEye* Brutas com sua Nomenclatura e Data de Coleta.

Atualmente, diversos satélites têm sido lançados com avanços consideráveis em suas especificações técnicas, principalmente em se tratando das resoluções espacial, espectral e temporal. Seguindo esta tendência, no dia 29 de Agosto de 2008 a empresa alemã *RapidEye* lançou com sucesso seus cinco satélites (Figura 9) de observação da Terra.

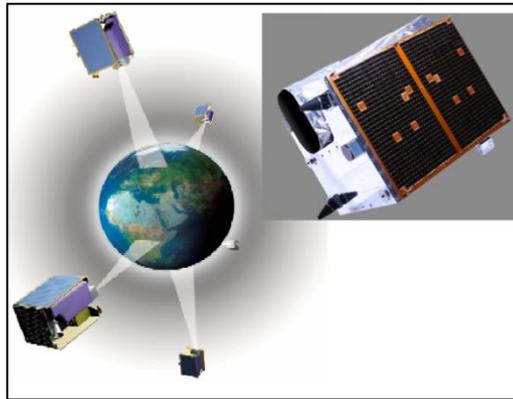


Figura 9 – Satélite *RapidEye*
(Fonte: RAPIDEYE, 2008)

O sistema *RapidEye* (REIS – RapidEye Earth Imaging System) é composto por cinco satélites capazes de registrar dados com altas resoluções temporal e espacial. O Quadro 3 apresenta as características gerais dos cinco satélites (Felix *et al*, 2009).

Quadro 3 – Características dos Satélites RapidEye (Fonte: EMBRAPA, 2012)

Missão	RapidEye				
Instituições Responsáveis	RapidEye AG				
País/Região	Alemanha				
Satélite	TACHYS (RapidEye 1)	MATI (RapidEye 2)	TROCHIA (RapidEye 3)	CHOROS (RapidEye 4)	CHOMA (RapidEye 5)
Lançamento	29/8/2008	29/8/2008	29/8/2008	29/8/2008	29/8/2008
Local de Lançamento	Baikonur Cosmodrome (Kazakistão)	Baikonur Cosmodrome (Kazakistão)	Baikonur Cosmodrome (Kazakistão)	Baikonur Cosmodrome (Kazakistão)	Baikonur Cosmodrome (Kazakistão)
Veículo Lançador	DNEPR - 1				
Situação Atual	ativo	Ativo	ativo	ativo	ativo
Órbita	Heliossíncrona	Heliossíncrona	Heliossíncrona	Heliossíncrona	Heliossíncrona
Altitude	630 km				
Inclinação	97,8°	97,8°	97,8°	97,8°	97,8°
Tempo de Duração da Órbita	96,7 minutos				
Horário de Passagem	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
Período de revisita	24 horas				
Tempo de Vida Projetado	7 anos				
Instrumentos Sensores	REIS	REIS	REIS	REIS	REIS

Cada um dos cinco satélites realiza 15 orbitas por dia e os sensores a bordo dos satélites podem registrar dados ao longo de uma faixa de 77 km de largura por até 1500 km de extensão. O Quadro 4 descreve as especificações técnicas (Rapideye, 2008).

Quadro 4 – Especificações Técnicas do Sistema RapidEye (Fonte: RAPIDEYE, 2008)

Número de Satélites	5
Altitude da Órbita	630 km, órbita solsíncrona
Hora de Passagem no Equador	11:00 h (aproximadamente)
Velocidade	27.000 km/h
Largura da Cena	77 km
Tempo de Revisita	Diariamente (off-nadir): 5,5 Dias (nadir)
Capacidade de Coleta	4,5 milhões de km ² /dia
Registro / Varredura	Multiespectral / Pushbroom
Bandas Espectrais	5 (Verm., Verde, Azul, Red-Edge, Inf. Verm. Próx.)
Resolução Espacial (nadir)	6,5 m
Resolução Espacial (ortoretificado)	5 m
Armazenamento de dados a Bordo	1.500 km de dados de imagens por órbita
Resolução Radiométrica	12 bits
Velocidade de Download (banda X)	80 Mbps

Os cinco satélites são equipados com sensor multiespectral composto de scanners de linha, com 12.000 pixels cada, capazes de capturar imagens em cinco bandas espectrais, com alcance de comprimento de onda entre 440 μm e 850 μm , o Quadro 5 descreve as bandas espectrais e seus comprimentos de ondas.

A resolução espacial original de cada banda é de 6,5 m, e após a ortoretificação as bandas são reamostradas uma resolução de 5m, resultando em imagens corrigidas com precisão de detalhes compatível com escala 1:25.000 (Felix *et al*, 2009).

Quadro 5 – Bandas Espectrais do Satélite RapidEye (Fonte: RAPIDEYE, 2008)

440 - 510 μm	Azul
520 - 590 μm	Verde
630 - 685 μm	Vermelho
690 - 730 μm	Red-Edge
760 - 850 μm	Infravermelho próximo

As imagens possuem 4 níveis de correção, desde sua versão bruta (nível 0, não fornecida), até a versão ortoretificada (nível 3) (Quadro 6).

Quadro 6 – Níveis de Produtos dos Satélite RapidEye (Fonte: RAPIDEYE, 2008)

Nível 0	Imagens brutas, metadados e dados de calibração (efemérides). Somente para uso interno.
Nível 1	Produto Nível-Sensor - Imagens com correção radiométrica a partir dos dados de efemérides e atitude dos satélites.
Nível 2	Produto Geocorrigido - Imagens com correção radiométrica e geométrica a partir dos dados de efemérides e atitude dos satélites, sem uso de pontos de controle.
Nível 3	Produto Ortoretificado - Imagens com correção radiométrica e geométrica a partir de DEM SRTM (Nível 1 DTED) ou melhor, com uso de pontos de controle. Podem atingir exatidão de 6m (12,7m CE90), compatível com escala 1:25.000.

4.1.2 Curva de Nível

As curvas de nível utilizadas no presente trabalho foram fornecidas pelo departamento de geoprocessamento da Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM, e possuem equidistancias de 20 metros, abrangendo toda a extensão da bacia do Rio dos Sinos.

4.1.3 Ponto de Controle

Foram coletados 16 pontos de controle com GPS (Garmin GPS III Plus) com precisão variada de 6 a 10 m. Os pontos foram registrados ao longo de toda a bacia do Rio dos Sinos para posterior cálculo do modelo digital de elevação.

4.1.4 Base Vetorial de Solos

Para o presente trabalho foi utilizado dados de solo da área da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, oriundos da base vetorial de solos fornecida pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM. Estes dados contem alguns atributos entre eles o de resistência de cada tipo diferente de solo da região a bacia do Rio dos Sinos, onde estes eram classificados de A até D (solo com maior resistência à erosão até solo com baixa resistência a erosão) (Kämpf/FEPAM, ajustado através do Faster *et al*, 1981).

4.1.5 Dados Pluviométricos

Para o presente trabalho a precipitação mensal e anual foram obtidas a través dos pontos de coleta pluviométrica junto a Agencia Nacional de Águas (ANA). Portanto foram levantados todos os dados por série histórica dos pontos de pluviometria existente nos limites da bacia (Figura 10), após este levantamento foram extraídos os arquivos em texto do banco de dados da ANA (Quadro 7).

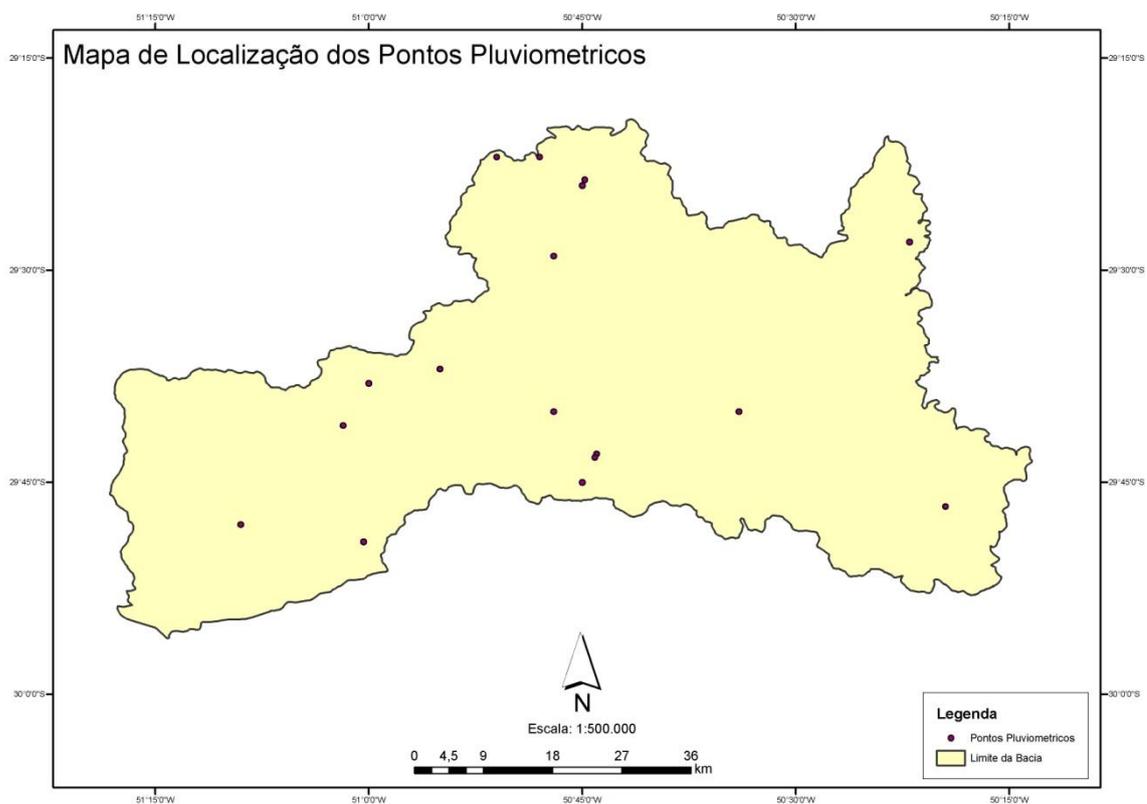


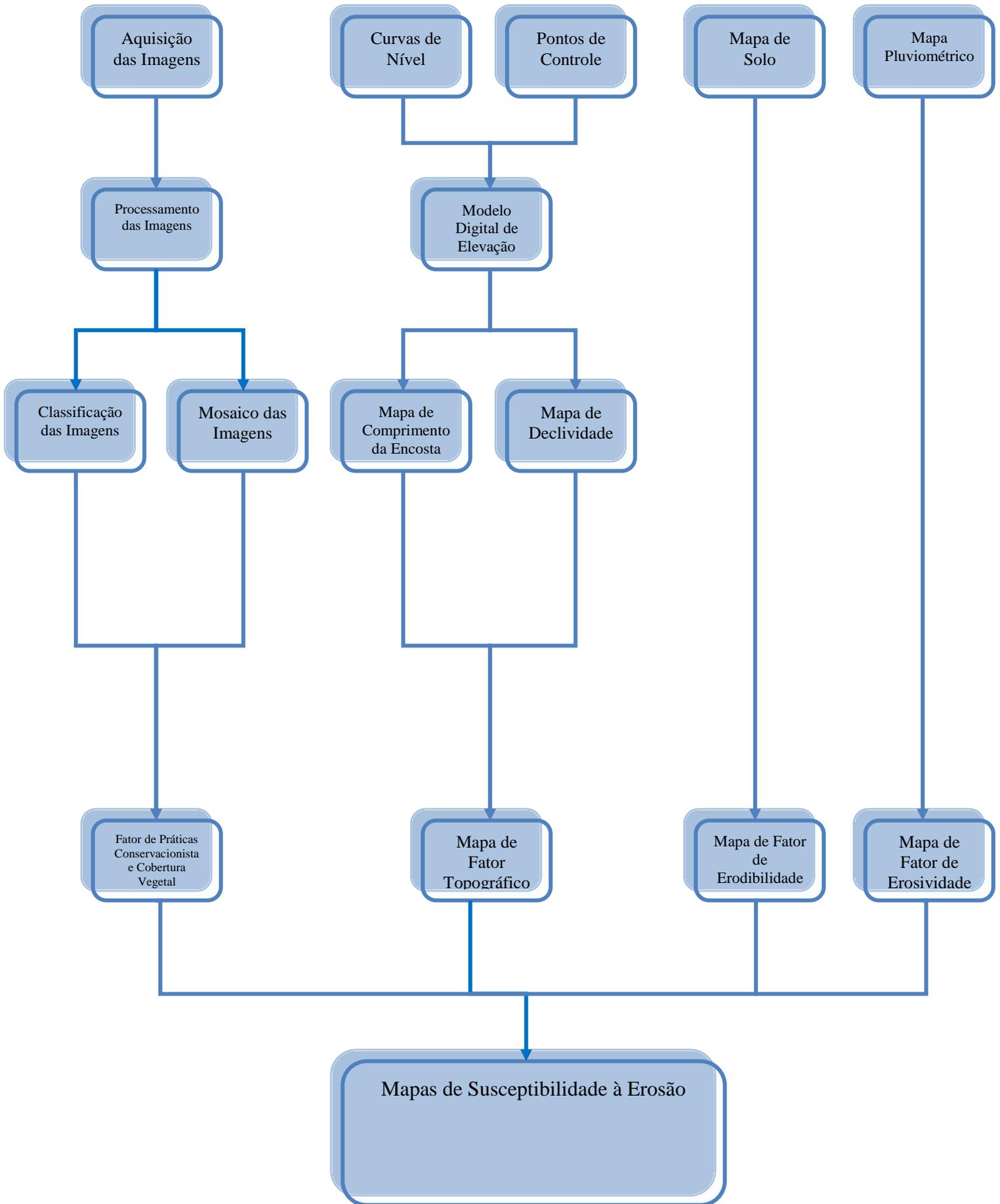
Figura 10 – Localização dos Pontos Pluviométricos.

Quadro 7 – Exemplo de um dos Arquivos Extraído da ANA.

Estacao Codigo	Nivel Consistencia	Data	Tipo Medicao Chuvvas	Maxima	Total	Dia Maxima	Num Dias De Chuva	Maxima Status	Total Status	Num Dias De Chuva Status	Total Anual	Total Anual Status
2950013	1	01/08/1955	1	34,5	136,8	7	13	1	1	0		0
2950013	1	01/09/1955	1	71,8	197,1	15	10	1	1	0		0
2950013	1	01/10/1955	1	47	51,8	12	2	1	1	0		0
2950013	1	01/11/1955	1	8,4	11	17	3	1	1	0		0
2950013	1	01/12/1955	1	17,7	49,3	26	9	1	1	0		0
2950013	1	01/01/1956	1	45,6	199,3	12	19	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/02/1956	1	38,2	176,8	1	12	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/03/1956	1	24,4	35	24	6	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/04/1956	1	27,1	76,1	5	8	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/05/1956	1	14,8	56,5	31	6	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/06/1956	1	20,8	115,7	15	11	1	1	0	1095,9	1
0013	1	01/07/1956	1	12,8	55,1	18	8	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/08/1956	1	22,4	88	18	7	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/09/1956	1	32	120,5	19	8	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/10/1956	1	26,6	104,7	22	9	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/11/1956	1	27	27	27	1	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/12/1956	1	15,8	41,2	23	6	1	1	0	1095,9	1
2950013	1	01/01/1957	1	55,3	236,8	8	9	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/02/1957	1	17,8	39,5	3	5	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/03/1957	1	47	102,2	2	4	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/04/1957	1	35,5	142,5	3	14	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/05/1957	1	19,4	62,2	26	4	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/06/1957	1	19	79,2	3	7	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/07/1957	1	50,3	138,1	21	10	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/08/1957	1	22,1	116,3	9	14	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/09/1957	1	50,8	180	6	12	1	1	0	1341,4	1
2950013	1	01/10/1957	1	45,8	114,8	22	9	1	1	0	1341,4	1

4.2 Método

A seguir serão descritas as etapas metodológicas utilizadas que podem ser vistas no fluxograma.



4.2.1 Processamento das Imagens RapidEye

As imagens utilizadas no trabalho foram adquiridas no nível 3, com as correções atmosférica, geométrica efetuadas, conforme consta no Quadro 6. Os produtos são 15 imagens ortorretificada com dados SRTM e pontos de controle coletado em campo para alcançar a resolução espacial de 6m.

Tais imagens foram utilizadas na geração do mosaico que abrangeu a área de estudo.

Os mosaicos de imagens de satélites, em sua grande maioria são produzidos utilizando avançadas tecnologias de processamento digital de imagens, onde são feitas algumas etapas, segundo a EMBRAPA, para a confecção do mosaico, como:

- Seleção das Imagens a serem utilizadas

Para cada mosaico é utilizado um número de cenas para cobrir o total da área de estudo. Em alguns casos há uma grande dificuldade em fazer a seleção das imagens, pois não é possível encontrar cenas desprovidas de nuvens.

No caso deste trabalho foram utilizadas 15 imagens para cobrir todo o território da bacia do Rio dos Sinos, estas imagens foram adquiridas com datas desiguais devido à quantidade de nuvens, resolução temporal e defeitos em cenas. Foram selecionadas cenas de datas próximas de passagens, evitando grandes variações espaciais e temporais, principalmente em relação ao uso e ocupação do solo. A Figura 7 apresenta o mosaico composto das 15 imagens brutas, sem as etapas de correção radiométrica.

A equalização das 15 cenas foi realizada através da conversão do histograma das imagens, com objetivo de padronizar as informações espectrais de adjacentes devido às datas e/ou imageamentos distintos (Erdas Field Guide, 2007).

A Figura 11 apresenta o exemplo de equalização utilizando, denominado ‘Histogram Match’. Neste caso, as seguintes condições devem ser observadas as imagens:

- forma geral das curvas do histograma deve ser semelhante;
- características claras e escuras da imagem devem se assemelhar;
- resolução espacial dos dados deve ser a mesma.

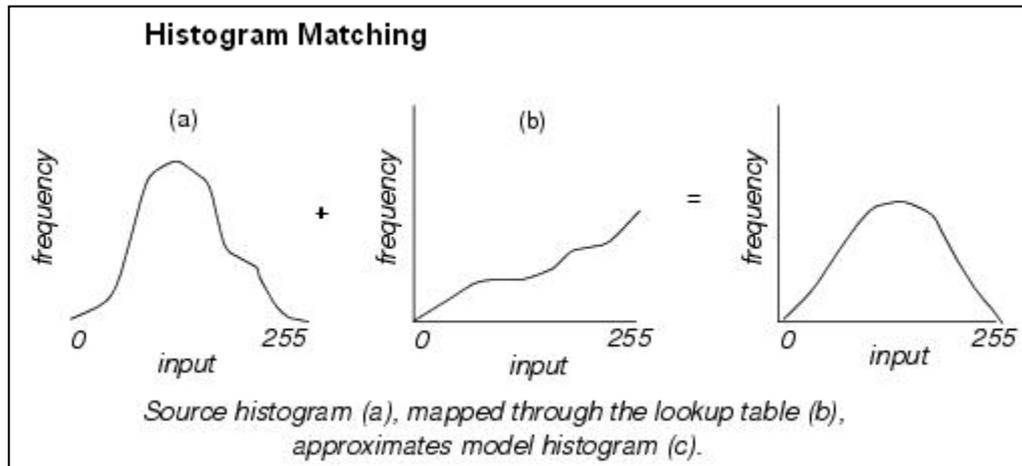


Figura 11 – Histogram Matching
(Fonte: Erdas Field Guide, 2007)

Para o mosaico específico o Histogram Match foi realizado banda a banda, ou seja, a banda X de uma imagem é correspondente à banda X da outra imagem. A imagem de referência utilizada foi a 2225415 de 03/04/2010, com isso as demais imagens teve seu histograma alterado para se assemelhar com o histograma da imagem de referência. A referência foi escolhida por ter mais feições semelhantes em outras imagens e por apresentar data de coleta próxima ou igual à maioria das demais imagens.

Para se obter uma homogeneidade no mosaico junto com o processo de *histogram match* foi realizada o processo de *cutline* (Figura 12), que é uma linha de corte geralmente feita nas áreas de sobreposição das imagens, para minimizar a percepção das divisas entre cada cena.

Para tanto foi vetorizado em cada sobreposição das cenas as linhas de corte, procurando delimita-las em estradas e rios. E para suavizar o corte foi utilizada a opção de *feather*, que é uma suavização na imagem a partir do corte, ficando imperceptível o local de corte, conseqüentemente a divisão das cenas.

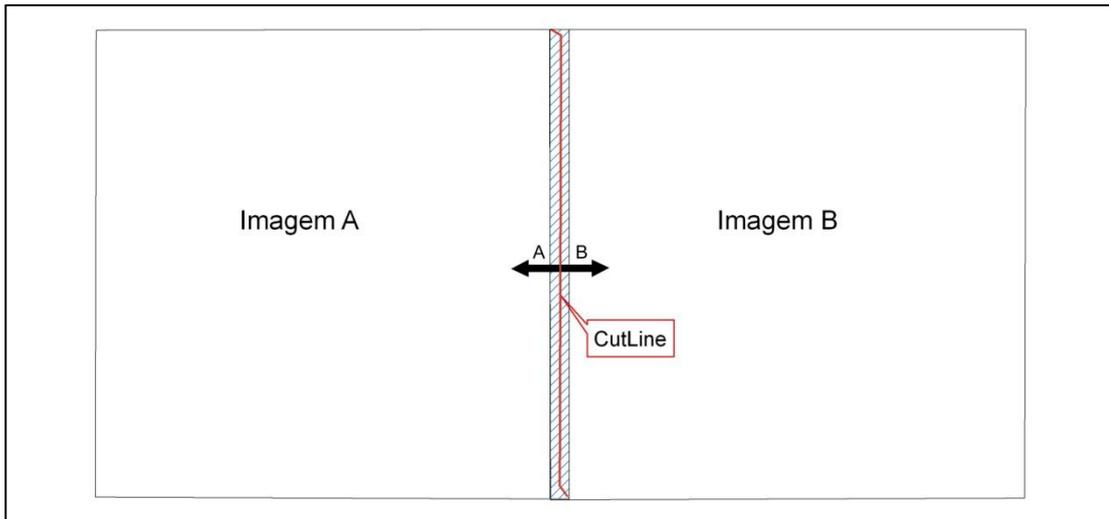


Figura 12 – Esquema do *CutLine*.

4.2.2 Classificação das imagens

Classificação, em sensoriamento remoto, significa a associação de pontos de uma imagem a uma classe ou grupo de classes. Estas classes representam as feições e alvos terrestres tais como: água, lavouras, área urbana, reflorestamento, cerrado, etc. A classificação de imagens é um processo de reconhecimento de classes ou grupos que exibem características comuns.

Ao se classificar uma imagem, assume-se que objetos/alvos diferentes apresentam propriedades espectrais diferentes e que cada ponto pertence a uma única classe. Além disso, os pontos representativos de certa classe devem possuir padrões próximos de tonalidade, de cor e textura. A classificação pode ser dividida em supervisionada e não supervisionada.

A classificação não supervisionada é útil quando não se tem informações relativas às classes de interesse na área imageada. As classes são definidas automaticamente pelo próprio algoritmo da classificação (Figueiredo, 2005).

A supervisionada é utilizada quando se tem algum conhecimento prévio sobre as classes na imagem, de modo a permitir, ao analista, definir sobre a mesma, áreas amostrais das classes. Estas áreas amostrais são utilizadas pelos algoritmos de classificação para

identificar na imagem os pontos representativos das classes. A fase preliminar onde o analista define as áreas amostrais é denominada de treinamento.

O método da máxima verossimilhança (MAXVER), que é um algoritmo paramétrico, pois utiliza média e covariância das amostras de treinamento, e assim que as classes possuem distribuição normal. Com esse parâmetro pode ser computada a probabilidade estatística de um pixel desconhecido pertencer a uma classe. Depois de avaliar a probabilidade para cada categoria o pixel é assinalado à classe onde a probabilidade tenha sido maior.

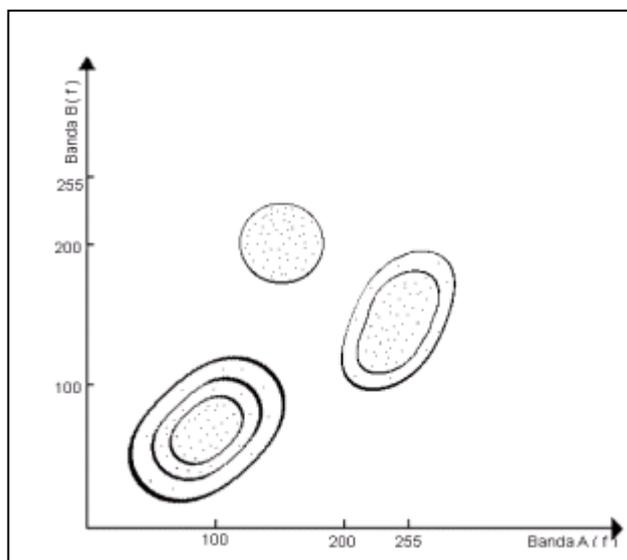


Figura 13 – Critérios para Classificação pela Técnica MAXVER
Fonte: Crósta (1992)

No presente trabalho foi utilizado a classificação supervisionada com o modelo de MAXVER, após a realização de testes com os métodos de Mínima Distância, Distância de Mahalanobis, Paralelepípedo, Mapeamento de Ângulos Espectrais e Divergência de Informação Espectral.

Testes estes realizados com a imagem 2225314 de 24 de maio de 2009, esta imagem foi utilizada como referencia para este teste por conter uma grande área urbana, que é uma das

classes que mais há erros no processo de classificação e por ter além da área urbana outras feições como hidrografia, vegetação entre outras.

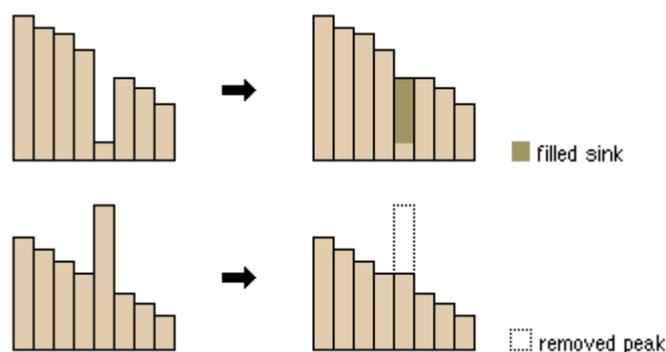
De uma forma geral, os testes com o MAXVER apresentaram a melhor acurácia pela estatística Kappa (Quadro 13) e matriz de confusão. Além disso, mostrou melhor resultado visual.

4.2.3 Modelo Digital de Elevação

Modelo Digital de Elevação é uma representação matemática e computacional contínua da topografia do terreno distribuída espacialmente às variações de altitude em uma área baseada e definida sobre um plano cartográfico em um conjunto de coordenadas X, Y e Z. As coordenadas Z representam valores da altitude e profundidade num modelo tridimensional que contenha o atributo elevação.

O modelo digital de elevação (MDE) foi gerado através da interpolação das curvas de nível e os pontos de controle coletado in loco na região da bacia do Rio dos Sinos. O modelo foi interpolado utilizando interpolador linear, obtendo uma resolução espacial de 20 metros.

O modelo ainda passou por uma etapa adicional de correção, para remoção de comportamentos errôneos de continuidade dos valores de altitude, tornando o modelo hidrologicamente correto (Tarboton D. G., 1991) (Figura 14).



**Figura 14 – Ilustração da Função Correção
(Fonte: Environmental Systems Research Institute, 1991).**

4.2.4 Mapas Temáticos (ou plano de informação)

Mapa de Fator Topográfico – LS

O fator LS combina os fatores comprimento da encosta L com declividade S. A determinação desse fator apresenta limitações, devido ao grande número de informações e variáveis, em áreas de relevo complexo ou de grandes extensões, levando com isso a estimativas erradas das taxas de erosão do solo, com o cálculo tradicional. Com a automatização e incorporação dos conceitos de potência de escoamento, área de contribuição específica e técnicas de geoprocessamento, permitiram calcular o fator LS para grandes áreas e de relevos complexo, como em bacias hidrográficas.

Antes do advento das técnicas de geoprocessamento, foram propostos diferentes métodos para estimar o fator LS para bacias. Williams & Berndt (1977) avaliaram diferentes procedimentos utilizando relações que levavam em considerações a área de drenagem, a densidade de drenagem e o comprimento das linhas de contorno e dos canais de drenagem.

Com as técnicas do sistema de informação geográfica (SIG) e a facilidade de obtenção dos modelos digitais do terreno, tem sido possível estimar o fator LS, levando em consideração as feições geomorfológicas do relevo.

Moore & Burch (1986) propuseram uma base teórica para determinação do fator LS pela incorporação da teoria da potência unitária do escoamento apresentada por Yang (1972,1973,1984). De acordo com essa teoria, a água na superfície do solo apresenta determinada energia capaz de desagregar e transportar partículas de solo quando estas se movem no sentido do declive. Esse conceito, combinado com as equações do cálculo tradicional do fato LS, derivou métodos que são utilizados para representar espacialmente o fator LS em áreas de relevos complexos por exemplo aqueles baseados em Moore & Burch (1986) e em Desmet & Govers (1996). A equação abaixo representa essa nova conceituação utilizada para estimar o fator LS.

$$LS_P = \left(\frac{a.l}{22,13} \right)^{0,4} \left(\frac{s}{0,0896} \right)^{1,3}$$

em que LS_P representa o fator LS derivado da teoria da potência do escoamento; a o fator de forma da vertente; l a distância longitudinal da unidade de contribuição hidrológica; e s o gradiente de declividade.

Mapa de Comprimento de Encosta

Para obtenção do comprimento de encosta, utilizou-se dados do modelo digital de elevação e a função *Slope Length* do módulo *Terrain Analysis* para obtenção da grade de comprimento de encosta, em metros.

Essa função tem em seu algoritmo a seguinte sequência:

“inicia da mais elevada para a mais baixa célula do modelo digital de elevação onde:

slopeCell = declividade da célula.

slopeNeighbor = declividade da célula vizinha de maior gradiente de declividade.

se (slopeNeighbor > (slopeCell / 2))

length = comprimento (já acumulado) na célula + comprimento da célula vizinha

mais íngreme.

caso contrário

length = 0

se (length > length (já acumulado) na célula vizinha)

escreve o length para a célula vizinha" (Wichmann - 2011).

Com isso o comprimento de encosta é finalizado quando ocorre a condição de uma célula vizinha apresentar declividade menor que a metade da declividade da célula sob análise.

Mapa de Declividade

A declividade foi gerada através de uma rede de triangulação irregular de superfície (TIN) criada a partir dos dados dispersos de elevação utilizando o método de triangulação de Delaunay, para a modelagem da declividade (Environmental Systems Research Institute, 1991).

A partir do TIN, uma grade de superfície é criada através do interpolador polinomial de quinto grau bivariado, o mesmo considera a geometria dos triângulos vizinhos, permitindo ondulações nas faces do triângulo individuais, criando uma superfície lisa e contínua.

Mapa de Fator de Forma da Vertente

O fator de forma da vertente é calculado pela razão entre a área da unidade de contribuição hidrológica (A) e o produto da largura da seção transversal da unidade hidrológica no seu exutório (b) pela distância longitudinal da unidade de contribuição hidrológica (l), que pode ser visualizado na equação a seguir.

$$a = \frac{A}{b \cdot l}$$

O fator de forma da vertente 'a' é de grande importância para representação dos processos hidrológicos de superfície. Quando $a=1$, a forma da unidade hidrológica é retilínea; quando $a<1$, a forma representa condição de divergência e quando $a>1$, a forma da unidade é convergente. As áreas de convergências, por exemplo, podem ser consideradas preferenciais para formação do escoamento em uma bacia. Teoricamente com isso a unidade de convergência gera trabalhos relativos à desagregação e ao transporte de sedimentos potencialmente maior em relação a condição de divergência, pois nas áreas de convergências pode haver preferências para a formação do escoamento em um bacia.

Mapa de Fator de Erodibilidade

O fato de erodibilidade ou fator K é o índice de resistência do solo contra uma erosão.

Este fator foi gerado através dos dados de solo da FEPAM (Quadro 8).

Quadro 8 – Índice de Resistência do Solo da Região da Bacia do Rio dos Sinos
Fonte: Kämpf/FEPAM, ajustado através do FASTER *et al*, 1981

Classe Radam	Código Radam	Resistência do Solo
Brunizém Avermelhado	BV	B
Cambissolo Bruno Húmico álico	CBHa	C
Cambissolo eutrófico	Ce	B
Planossolo eutrófico	Ple	D
Podzólico Vermelho-Amarelo álico	Pva	C
Solos Aluviais eutróficos	Ae	D
Solos Litólicos eutróficos	Re	D
Terra Roxa Estruturada distrófica	TRd	A
Terra Roxa Estruturada eutrófica	Ter	A

Este índice segundo Kämpf (2008) demonstra o nível de resistência do solo, onde a resistência classificada como A, tem uma resistência elevada podendo haver erosão ligeira à moderada, para os solos classificados como B, a erosão varia entre moderada à forte, os solos classificados como C, a erosão pode ocorrer de forma forte e os D a erosão pode ser classificada de forte à muito forte (Quadro 9).

Quadro 9 – Classe de Resistência à Impactos Ambientais
Fonte: Kämpf/FEPAM, ajustado através do Faster *et al*, 1981

Fator do Solo ou do terreno	Classe de resistência à impactos ambientais			
	Alta (A)	Média (B)	Baixa (C)	Muito baixa (D)
Profundidade	>150 cm	100 a 150 cm	50 a 100 cm	>50 cm
Textura	Argilosa (>35% argila)	Média (15 a 35% argila)	Arenosa (<15% argila)	Arenosa (<15% argila)
Gradiente textural	Sem ou pouco	Com	Abrupto	Com ou sem
Drenagem	Bem ou moderada	Forte ou acentuada	Imperfeita ou excessiva	Mal ou muito mal
Lençol freático	Ausente	Ausente ou eventualmente suspenso	Alto	Superficial
Lençol suspenso	Não	Não	Sim	Sim
Risco de inundação	Nulo	Nulo	Raro	Ocasional a frequente
Erodibilidade	Ligeira a moderada	Moderada a forte	Forte	Forte a muito forte
Relevo	Plano, suave ondulado ou ondulado.	ondulado	Forte ondulado	Forte ondulado ou montanhoso
Declividade	<3%, 3-8%, 8-20%	8-20%	20-45%	>45%
Aptidão agrícola	Boa	Boa a regular	Regular a restrita	Restrita

Para se obter o valor numérico de K foi utilizado o índice criado por Faster *et al.*(1981), que define a erodibilidade do solo da seguinte forma:

- baixa: 0,01 a 0,03
- média: 0,03 a 0,045
- forte: 0,045 a 0,06
- muito forte: maior que 0,06

O valor de K pode ser visualizada no Quadro 10.

Quadro 10 – Índice de Resistência do Solo, com o Fator K. (Fonte: Kämpf / FEPAM, ajustado através do FASTER *et al*, 1981)

Classe Radam	Código Radam	Resistência do Solo	Fator K
Brunizém Avermelhado	BV	B	0,04
Cambissolo Bruno Húmico álico	CBHa	C	0,06
Cambissolo eutrófico	Ce	B	0,04
Planossolo eutrófico	Ple	D	0,08
Podzólico Vermelho-Amarelo álico	Pva	C	0,06
Solos Aluviais eutróficos	Ae	D	0,08
Solos Litólicos eutróficos	Re	D	0,08
Terra Roxa Estruturada distrófica	TRd	A	0,02
Terra Roxa Estruturada eutrófica	Ter	A	0,02

Mapa de Fator de Erosividade

O fator de erosividade (R) é um índice que expressa a capacidade de haver erosão através da chuva em uma área desnuda (Bertoni & Lombardi, 1990).

Para a estimativa da erosividade foi utilizada a formulação de Lombardi Neto & Moldenhauer (1992) que demonstra que o valor de R é a somatória da média mensal do índice de erosividade.

$$R = \sum EI$$

sendo

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

onde:

R = erosividade, em MJ.mm/ha.h;

EI = média mensal do índice de erosividade, em MJ.mm/ha.h;

r = média do total mensal de precipitação, em mm;

P = média do total anual de precipitação, em mm.

Para o presente trabalho a precipitação mensal e anual foram obtidas a través dos pontos de coleta pluviométrica junto a Agencia Nacional de Águas (ANA).

Os pontos extraídos em arquivos no formato texto do banco de dados passaram por uma adequação, onde foram removidos dados que continham, deixando-a apta ao uso (Quadro 11).

Quadro 11 – Exemplo do Quadro Adequada com a Remoção dos Ruídos.

EstaçãoCódigo	Data	Total	TotalAnual	R (MÊS)	R (ANO)	R (FINAL)
2950001	01/01/1963	197,5	1608,7	39599,36	346541	274140,1
2950001	01/02/1963	125,2	1608,7	6394,948		
2950001	01/03/1963	124,5	1608,7	6253,125		
2950001	01/04/1963	43,2	1608,7	90,64726		
2950001	01/05/1963	53	1608,7	205,3635		
2950001	01/06/1963	44,8	1608,7	104,8411		
2950001	01/07/1963	80,5	1608,7	1092,957		
2950001	01/08/1963	171,8	1608,7	22673,18		
2950001	01/09/1963	191,8	1608,7	35222,01		
2950001	01/10/1963	286,4	1608,7	175110,3		
2950001	01/11/1963	218,3	1608,7	59106,42		
2950001	01/12/1963	71,7	1608,7	687,8541		
	.	.	.			
2950001	01/01/1980	154,3	1672	13657,18	201739,2	274140,1
2950001	01/02/1980	152,9	1672	13168,22		
2950001	01/03/1980	122,5	1672	5425,524		
2950001	01/04/1980	106,6	1672	3111,187		
2950001	01/05/1980	119	1672	4831,535		
2950001	01/06/1980	95,5	1672	2004,06		
2950001	01/07/1980	183	1672	27021,01		
2950001	01/08/1980	112,6	1672	3873,03		
2950001	01/09/1980	118,6	1672	4766,9		
2950001	01/10/1980	128	1672	6467,511		
2950001	01/11/1980	117,4	1672	4576,882		
2950001	01/12/1980	261,6	1672	112836,1		

Com a planilha apta ao uso foram calculados os R para todos os pontos e feito uma interpolação *Spline* resultando assim o mapa de erosividade. A interpolação *Spline* tem em sua técnica de curvatura de base mínima que também pode ser referida como placa fina de

interpolação, uma garantia de uma superfície lisa, contínua e diferenciável, pois utiliza a derivada primária contínua da superfície.

A função *Spline* utiliza a seguinte fórmula:

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j)$$

onde:

$j = 1, 2, \dots, N$

N número de pontos.

λ_j coeficiente encontrado pela solução de um sistema de equação linear.

r_j distância dos pontos (x, y) até o j ésimo ponto (Franke, 1982).

Mapa de Cobertura Vegetal e Fator de Práticas Conservacionistas

O fator C de cobertura vegetal foi determinado segundo Wischmeier & Smith (1978), conforme informações contidas no Quadro 12, na qual se procurou associar, a cada uso da terra, um fator C correspondente. O uso da terra na bacia hidrográfica do Rio dos Sinos foi determinada através da classificação das imagens de satélite (RapidEye, bandas 1,2,3, 4 e 5).

Ao fator P atribui-se o valor 1, considerando-se a não adoção de práticas conservacionistas em toda a bacia hidrográfica.

Quadro 12 – Valores do Fator C Atribuídos aos Diferentes Usos da Terra.
(Fonte: Wischmeier & Smith, 1978).

Usos da Terra	Fator C
Água	0,000
Campo natural	0,005
Mata nativa densa	0,001
Mata nativa rala	0,002
Agricultura	0,750
Área urbana	0,030

4.2.5 Modelo de Predicação de Perdas de Solo

Existem vários modelos de predição de perdas do solo ou produção de sedimentos, estes modelos são utilizados para previsão de perda do solo e a produção de sedimentos em áreas de dimensão reduzida. De acordo com Bhattarai e Dutta (2008), os modelos atualmente disponíveis dividem-se em dois grupos: empíricos e orientados à processos.

O primeiro grupo baseia-se em medição em bacias hidrográficas ou terrenos de áreas menores e na exploração de grandes áreas (Kinnell, 2008), como o REUPS2 (Foster, 2005), WATEM (Van Oost *et al.*, 2000), AnnAGNPS (Bingner, 2001) ou AGNPS-UM (Kinnell, 2005). Esses modelos possuem uma origem comum: a equação universal de perda de solo (Wischmeier e Smith, 1978, Renard *et al.*, 1997).

O segundo grupo é composto pelos modelos EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998), EROSÃO-3D (Schmidt, 1999), LISEM (De Roo *et al.*, 1996), WEPP (Flanagan e Nearing, 1995) e SWAT (Neitsch *et al.*, 2005) que estão em desenvolvimento contínuo pois em sua grande maioria têm limitações na sua ampla aplicabilidade, devido a exigentes termos complexo de dados e computacional.

Para este trabalho foi utilizado um modelo empírico, o modelo da EUPS a equação universal de perda de solo desenvolvido por Wishmeier & Smith (1978).

$$A = R.K.L.S.C.P$$

O mesmo foi escolhido, pois os outros métodos empíricos são em sua maioria para chuvas individuais e isoladas, como é o caso do modelo REUPS e Willians.

Então para se determinar as perdas de solo foi realizado o cruzamento dos diferentes planos de informação representados pelos fatores da equação na forma de matriz numérica.

Com isso, foi obtido um novo plano de informação com as estimativas de perdas de solo da bacia hidrográfica.

5 RESULTADOS

5.1 Mosaico de Imagens

Conforme descrito no capítulo 4.2.1, foi gerado um mosaico para a área de estudo com 15 imagens do satélite RapidEye. A geração envolveu o processo de equalização de histogramas, corte de pontos de sobreposição de cenas e suavização de bordas.

O resultado obtido pode ser observado na Figura 15, que apresenta o mosaico da Bacia do Rio dos Sinos sem a separação abrupta do mosaico original (Figura 7). Os ganhos do processamento são evidentes e preservam a qualidade espectral das cenas.

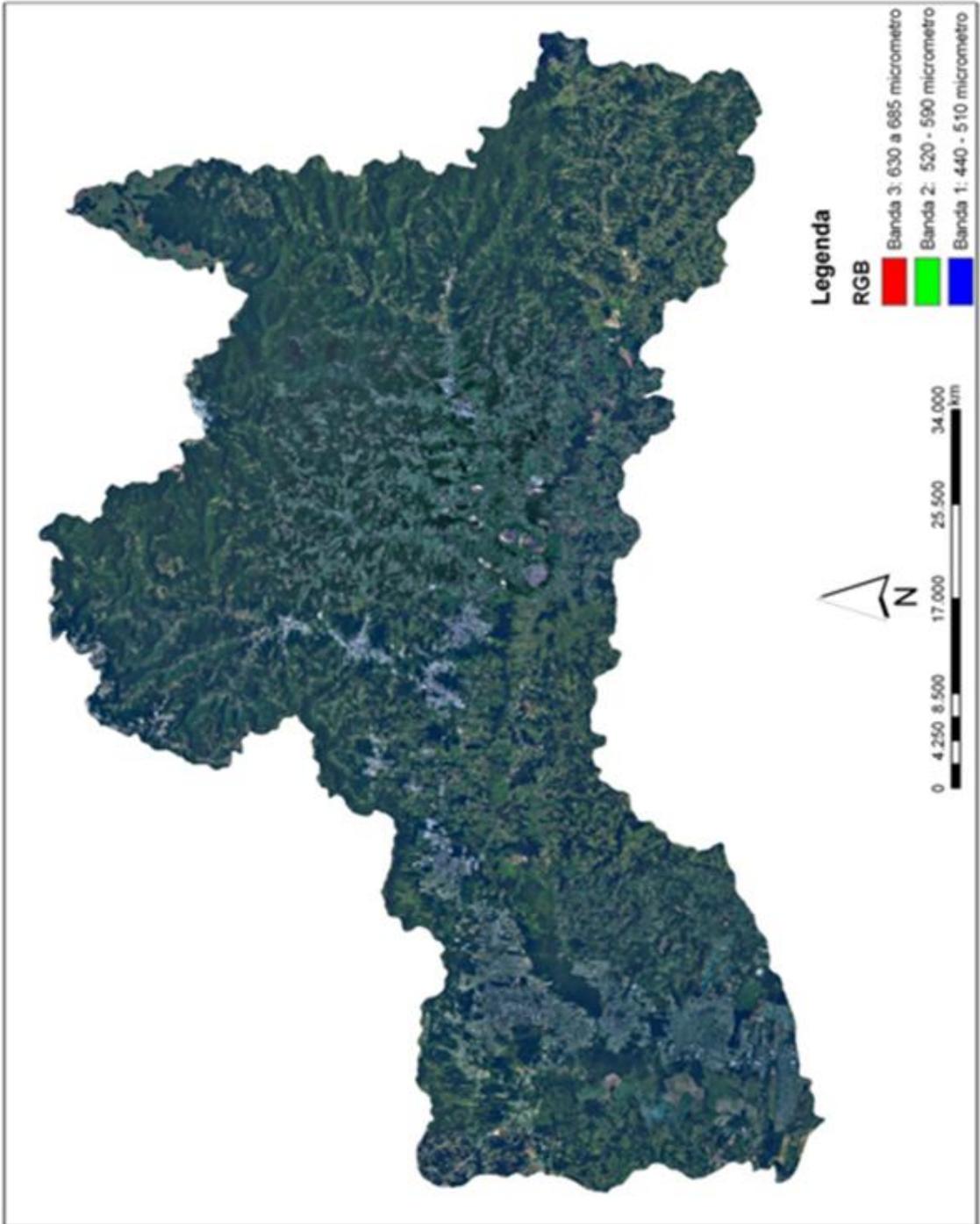


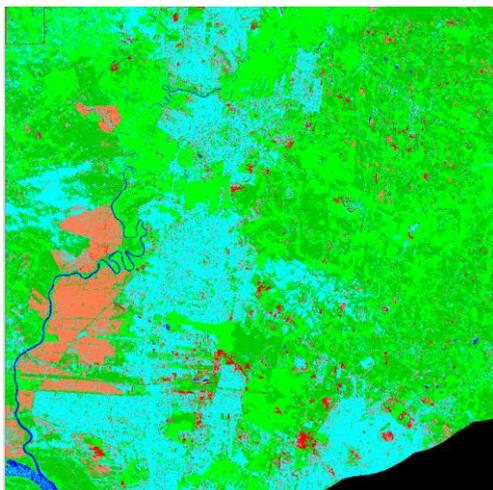
Figura 15 – Mosaico das 15 Imagens RapidEye.

5.2 Classificação de Imagem

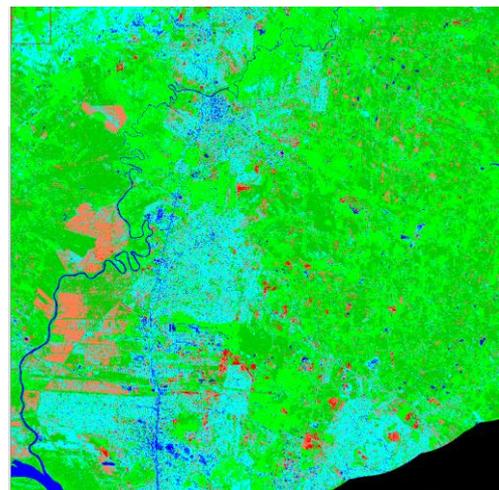
Os resultados visuais (Figura 16), do Kappa (Quadro 13) e da Matriz de Covariância (Anexos), sobre a imagem 2225314 de 24 de maio de 2009 utilizando diferentes classificadores (MAXVER, Mínima Distância, Distância de Mahalanobi, Paralelepípedo, Mapeamento de Ângulos Espectrais e Divergência de Informação Espectral), pode ser observados a seguir:



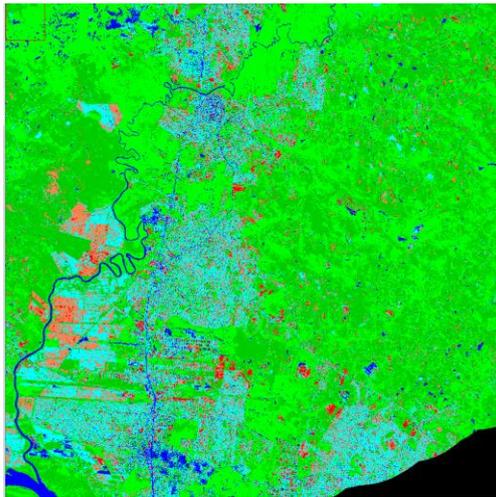
Imagem Referência



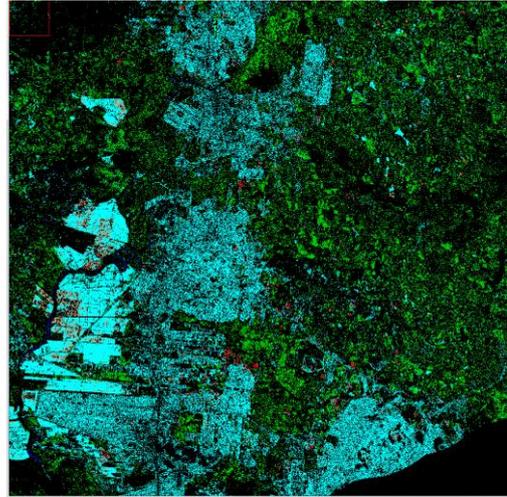
Máxima Verossimilhança



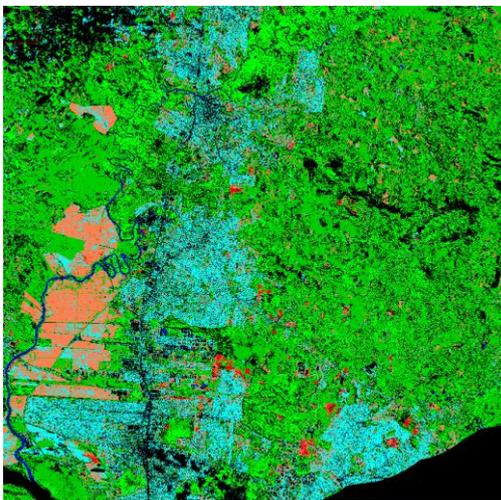
Distância de Mahalanobi



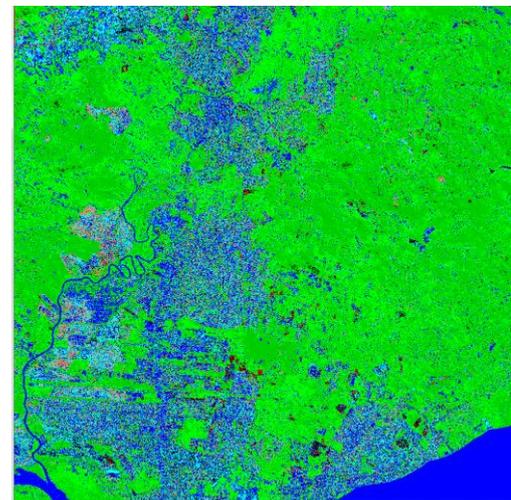
Mínima Distância



Paralelepípedo



Mapeamento de Ângulos Espectrais



Divergência de Informações Espectral

Figura 16 – Imagens Resultantes dos Classificadores Testados.

Quadro 13 – Acurácia dos Classificadores Testados.

MATRIX DE CONFUSÃO		
CLASSIFICADOR	PRECISÃO GERAL	COEFICIENTE KAPPA
Distância Mahalanobis	83,1419%	0,7720
Máxima Verossimilhança	93,1274%	0,9043
Mínima Distância	75,3909%	0,6766
Paralelepípedo	60,4257%	0,4918
Mapeamento de Ângulo Espectral	47,9246%	0,3903
Divergência de Informações Espectrais	29,8330%	0,2073

As matrizes de confusão dos testes para todos os classificadores testados podem ser visualizadas no Anexo 1. A matriz de confusão demonstra para cada classificador o percentual de pixel corretos e errôneos. Para tanto o mesmo faz uma matriz de n para n , onde n são todas as classes amostradas, enumerando em percentual o cruzamento entre classes iguais e distintas. Isto é, com este percentual se tem um síntese de quantos pixels foram classificados erroneamente, devido ao percentual que uma classe se classificou em uma classe distinta.

No presente trabalho o classificador de máxima verossimilhança - MAXVER pode ter apresentado melhor valor por trabalhar com classificação por espectro (bandas espectrais), a imagem RapidEye contém 5 bandas, e pela amostra ter sido coletada com um número de pixel elevado. Em alguns trabalhos (Bittencourt 2001; Erbert 2001) verificado-se que o aumento na dimensionalidade dos dados, isto é, do número de bandas espectrais, resulta inicialmente em um incremento na acurácia da resultante classificada com MAXVER, pois com o aumento do número de bandas, ocorre um incremento na informação disponível.

Após o resultado dos testes das classificações demonstrados anteriormente, foi realizada a classificação supervisionada com o método da máxima verossimilhança, que resultou em uma acurácia entre 0,7620 e 0,9464 pela estatística Kappa (Quadro 14). Os resultados das matrizes de confusão de todas as 15 imagens podem ser verificadas no Anexo 2.

Na Figura 17 observa-se a localização das imagens sobre a área da bacia hidrográfica, podendo assim fazer uma análise os índices kappas para se verificar onde se obteve melhores resultados na classificação.

Quadro 14 – Acurácia pela estatística Kappa das 15 imagens.

Imagem	PRECISÃO GERAL	COEFICIENTE KAPPA
2225313	99,8834%	0,9464
2225314	90,8341%	0,8861
2225315	82,8181%	0,7620
2225316	86,3673%	0,8261
2225317	91,7227%	0,8984
2225318	93,1036%	0,9041
2225413	87,9960%	0,8364
2225414	91,1517%	0,8816
2225415	87,8614%	0,8516
2225416	90,2037%	0,8741
2225417	91,2466%	0,8807
2225418	93,4772%	0,9166
2225515	91,5752%	0,8928
2225516	86,2726%	0,8314
2225517	84,5090%	0,7951

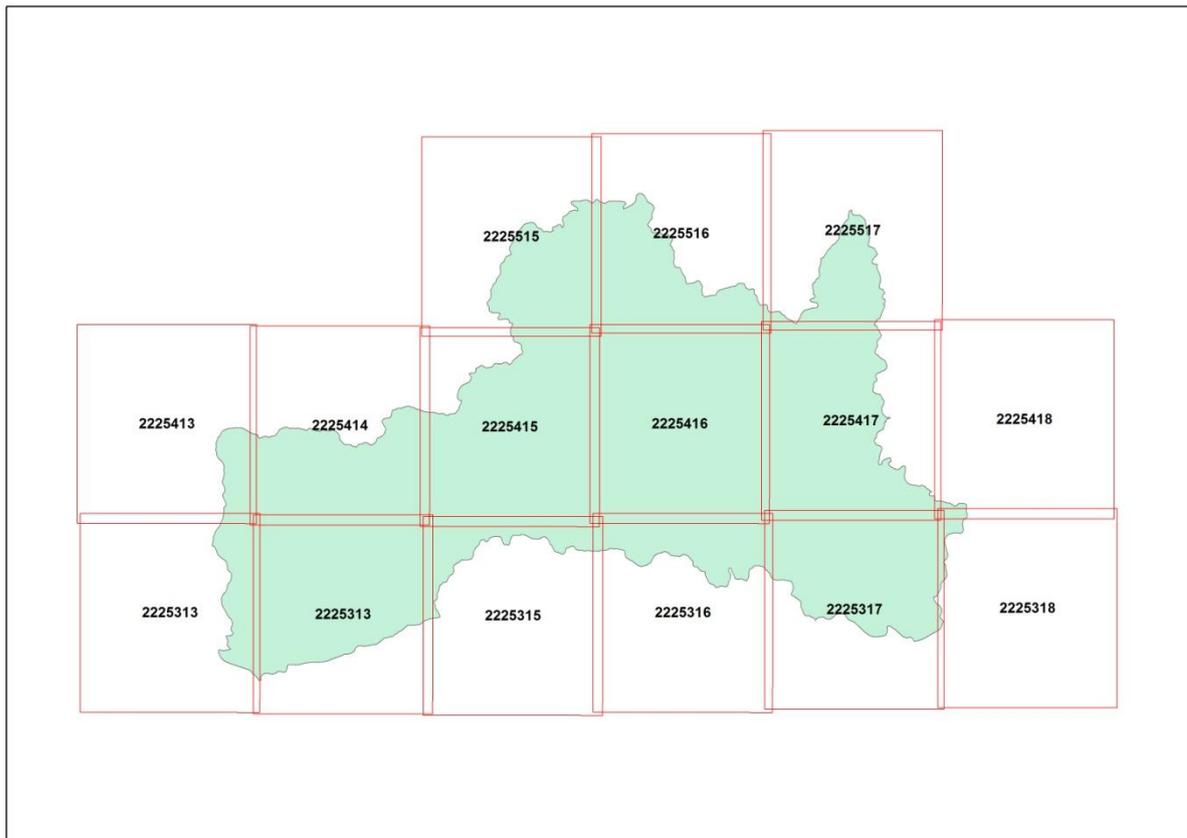


Figura 17 – Localização das Imagens Sobre o Limite da Bacia Hidrográfica.

Verifica-se, com o auxílio da matriz de confusão, que existem alguns pixels errôneos em algumas classes, principalmente a classe de área urbana com quase todas as outras classes, com uma maior gravidade comparando com a classe de cultura, outra erro perceptível na matriz de confusão é entre a classe de solo e novamente a cultura.

Para correção destes valores errôneos foi realizado um ajuste manual reclassificando os pixels deixando assim as 15 imagens classificadas aptas ao uso da equação universal de perda de solo (Figuras 18 e 19).

Com as imagens corrigidas foi possível processar o mosaico das imagens classificadas (Figura 20 e 21) e assim verificar a área de cada classe e sua porcentagem (Quadro 15).

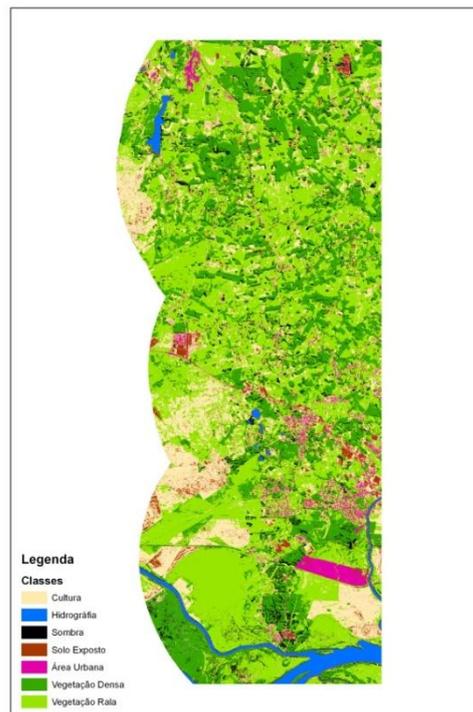


Figura 18 – Imagem 2225313 Classificada com MAXVER com os Pixels não Corrigidos.

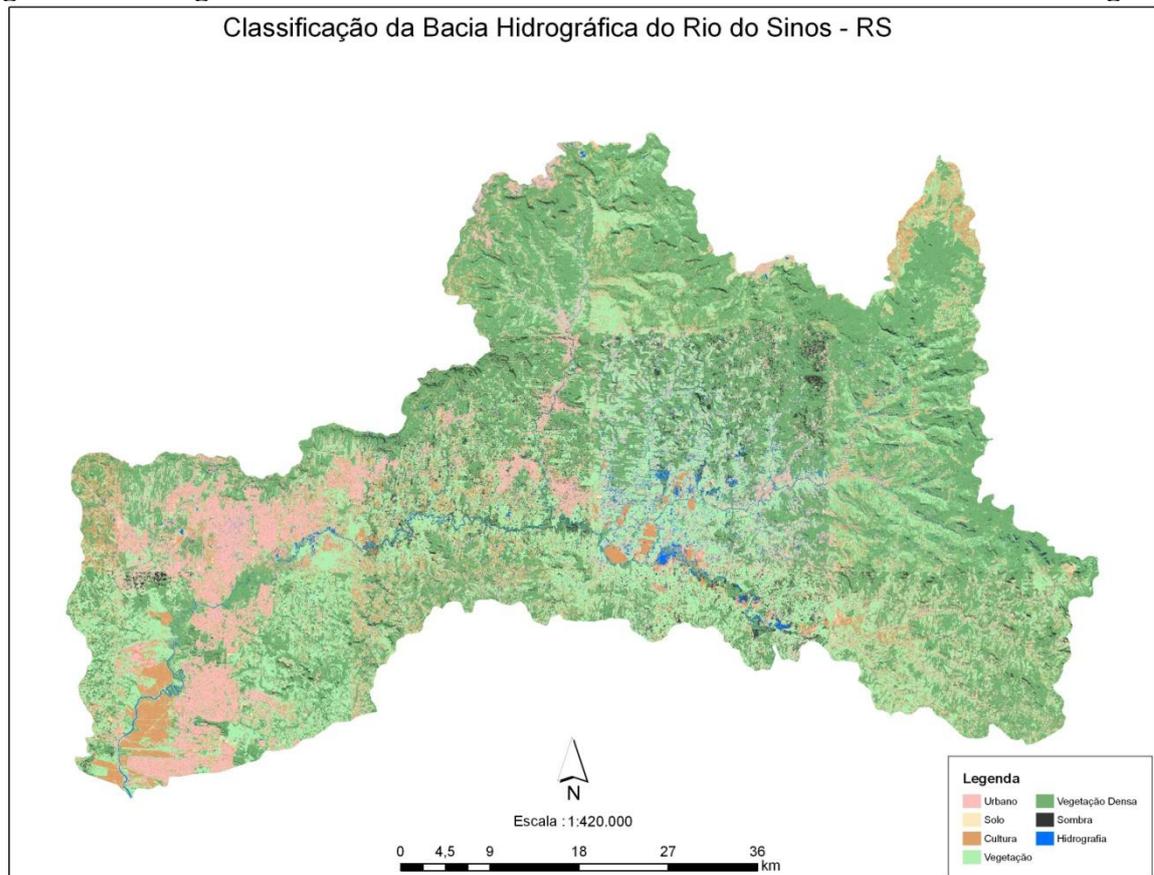


Figura 19 – Mosaico das 15 imagens classificadas com MAXVER e Pixels Não Corrigidos.

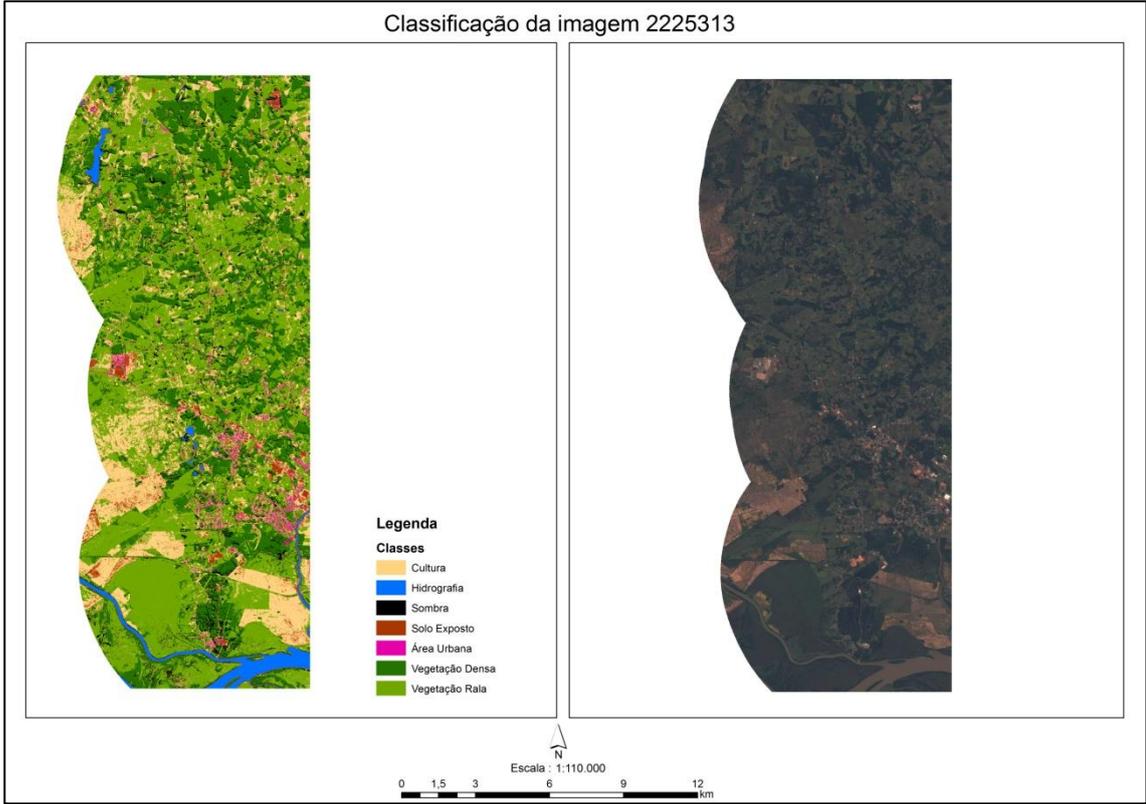


Figura 20 – Imagem 2225313 Classificada com MAXVER com os Pixels Corrigidos.

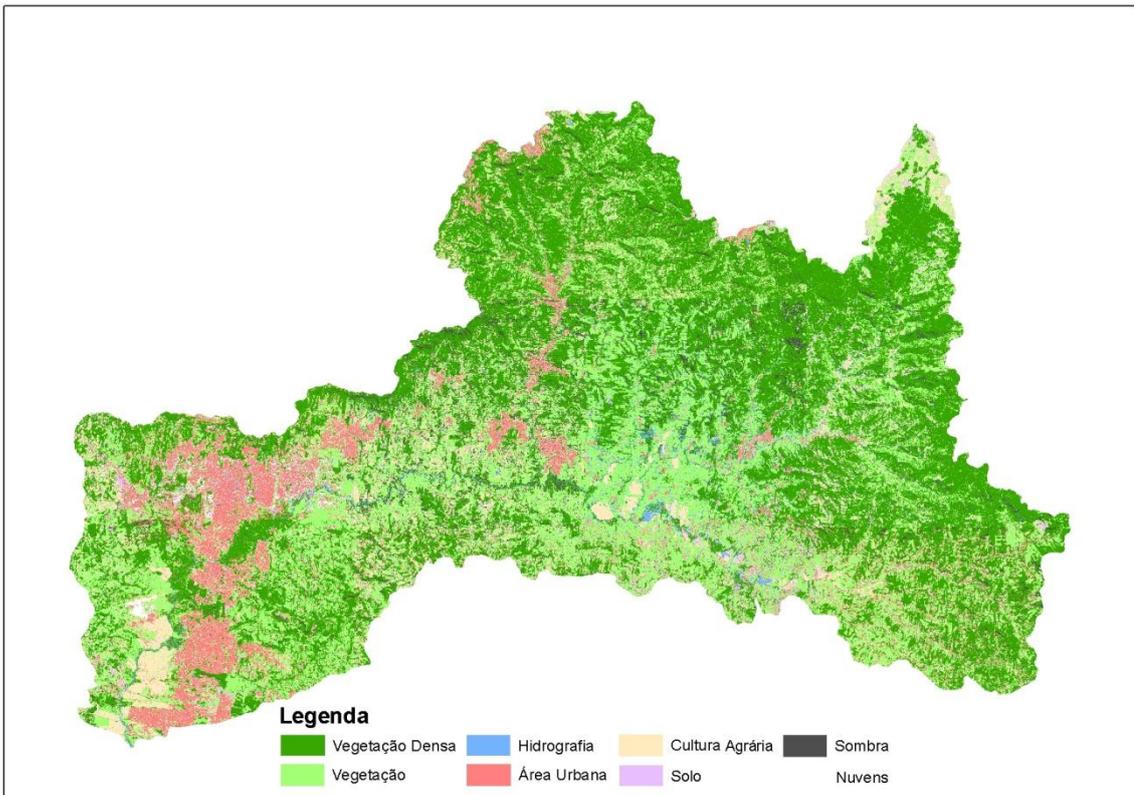


Figura 21 – Mosaico das 15 imagens classificadas com MAXVER e pixels corrigidos.

Quadro 15 – Área e Porcentagem Classificada por Classes.

Classes	Área (km²)	%
Vegetação Densa	1560,529	42,38
Vegetação	1133,170	30,78
Hidrografia	74,534	2,024
Área Urbana	319,338	8,67
Cultura Agrária	379,009	10,29
Solo	83,688	2,27
Sombra	128,693	3,50
Nuvens	2,898	0,08
TOTAL	3681,860	100

Analisando as Figuras 18 com a Figura 20, observa-se que algumas feições na primeira imagem estão com classificações errôneas, como algumas áreas de cultivos que estavam classificadas como urbano e outras como solo exposto. Ao sul da imagem a classes de vegetação densa que deveriam ser de vegetação rala.

Já na Figura 19 é possível notar na área central alguns pixels com classes erradas de sombra, ficando até bem visível às áreas limítrofes das cenas. Pode observar também algumas trocas nas classificações de solo exposto e cultura com área urbana.

Analisando o Quadro 15 pode-se perceber uma grande área com cobertura vegetal e, secundariamente, uma ampla área de cultivo e área urbana. A rede hidrográfica, fundamental para este trabalho, é a sétima classe em extensão, com apenas 2,024% de toda a área da bacia do Rio dos Sinos. A partir desta informação, foram adotados os valores do fator de uso e cobertura do solo segundo Wischmeier & Smith (1978). Para a hidrografia foi adotado um fator de 0.000, para vegetação densa um fator de 0.001, para vegetação um fator de 0.002, para área urbana um fator 0.030, para cultura agrária um fator de 0.750, para o solo um fator 1.000 e para sombra e nuvens um fator 0.000. Estes fatores podem ser melhor visualizados no Quadro 12, página 63.

5.3 Modelo Digital de Elevação

A geração do modelo digital de elevação (MDE) foi realizado a partir de curvas de nível, interpoladas por triangulação. Foram utilizados 16 pontos de controle para obtenção de maior precisão, resultando em mapa com curvas de nível equidistantes em 20 m.

Analisando o modelo digital de elevação (Figura 22 e 23), percebe-se que a parte mais elevada da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos (porção NE) possui uma altitude aproximadamente de 1004 m e é uma área de pouca extensão, comparado com a área total da bacia.

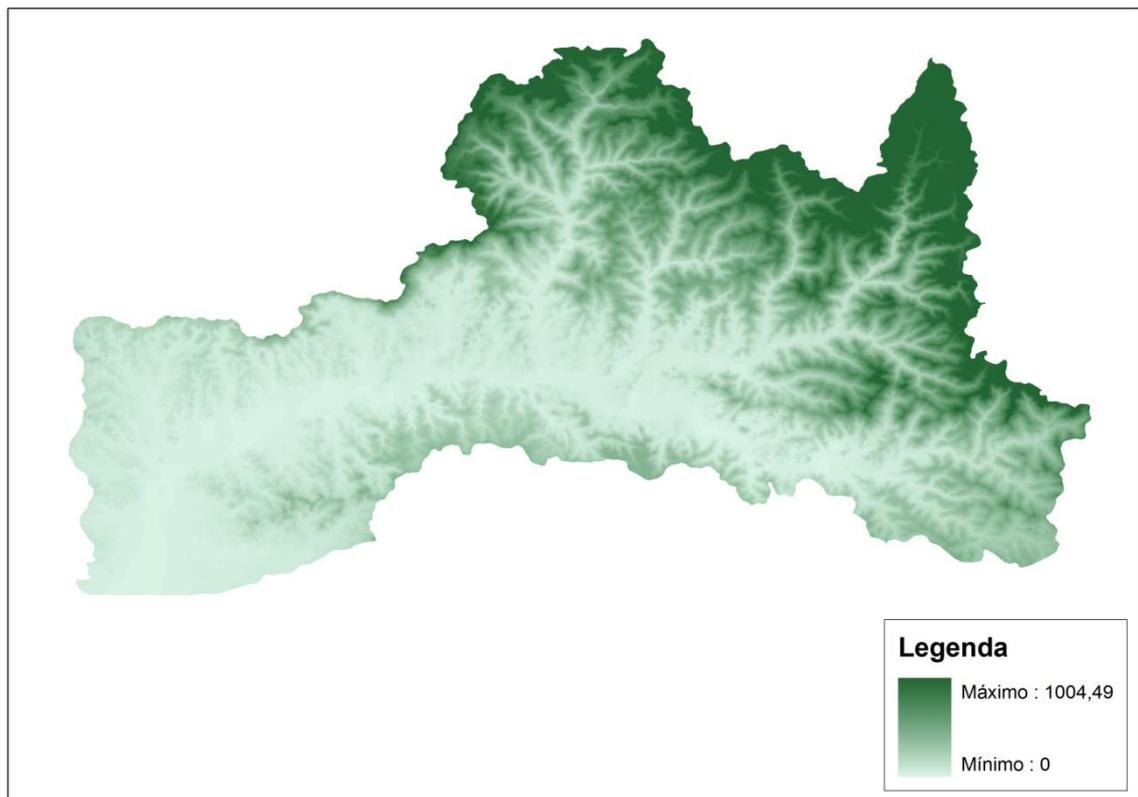


Figura 22 – Modelo Digital de Elevação.

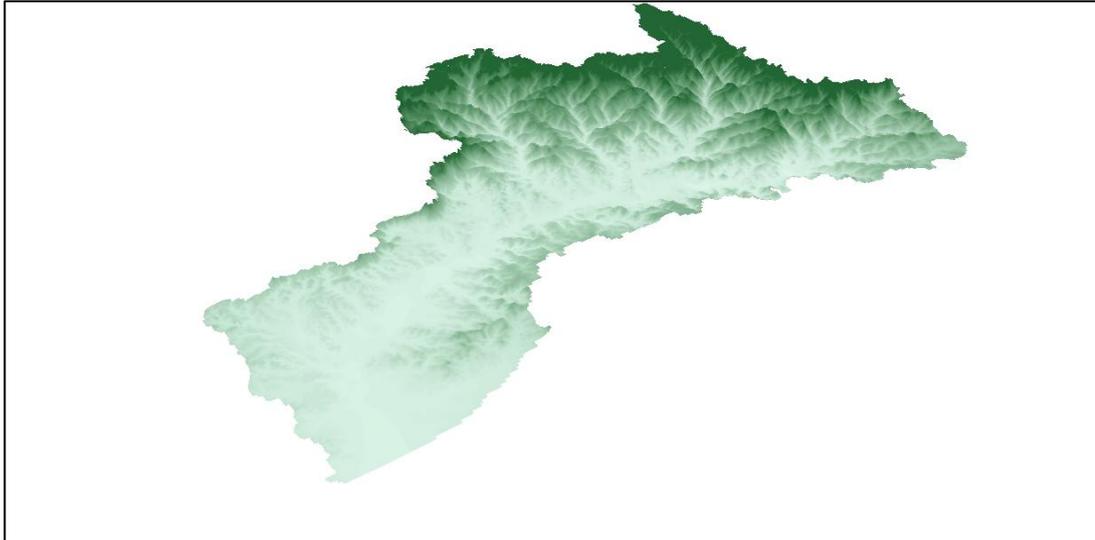


Figura 23 – Modelo Digital de Elevação em Três Dimensões.

Observa-se também que as áreas mais planas (porção SW) são onde se concentra a maior área urbana, industrial e de cultura. As áreas de maior altitude são ocupadas por uma vegetação mais densa.

Nas figuras 24 e 25 se observa o produto da fusão do modelo digital de elevação com o mosaico das imagens da área de estudo. O mosaico é formado pela composição colorida RGB 321, nos comprimentos de ondas 685 μm , 590 μm e 510 μm , respectivamente.

Esta fusão apresenta uma visão tridimensional da área, somada às características espectrais da área de estudo. Nela observa-se com mais clareza as relações entre as informações geomorfológicas (elevação, declividade e aspecto) e de uso do solo, permitindo uma avaliação qualitativa da influência do relevo na dinâmica dos agentes antrópicos e naturais da Bacia do Rio dos Sinos.

Nota-se que a maior concentração de vegetação densa localiza-se em áreas mais altas e íngremes, e que o cultivo e a área urbana estão estabelecidos em superfícies mais planas e mais próximas dos leitos dos rios. Também se observa que nos cursos das hidrografias há uma falta de vegetação mais densa, deixando as encostas susceptíveis à erosão.

Com base nesta avaliação preliminar parte-se para uma avaliação quantitativa.

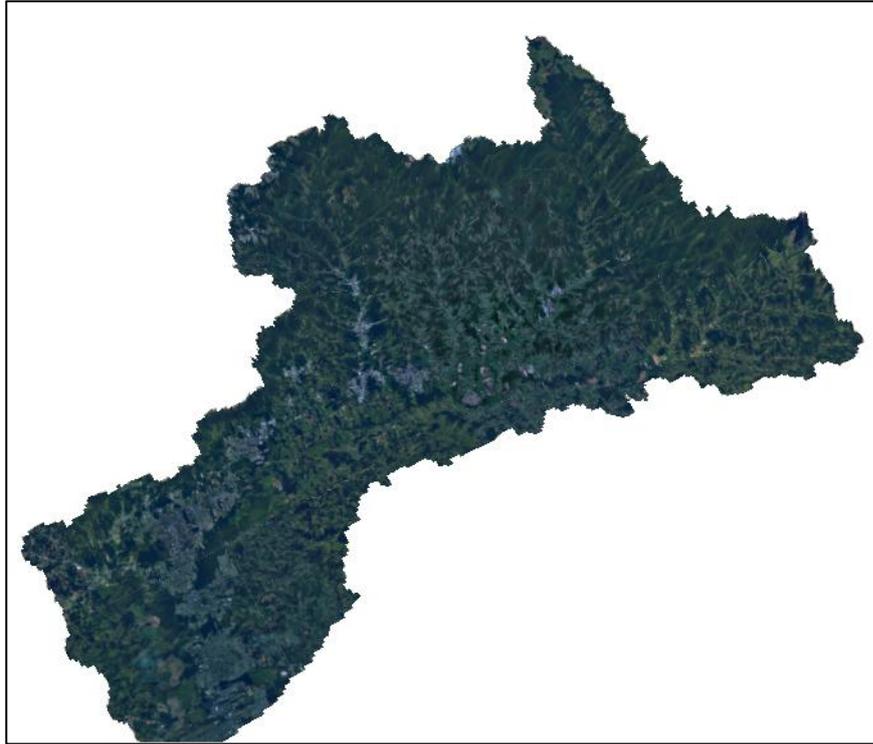


Figura 24 – Modelo de Elevação Digital em Três Dimensões, com o Mosaico Sobreposto.

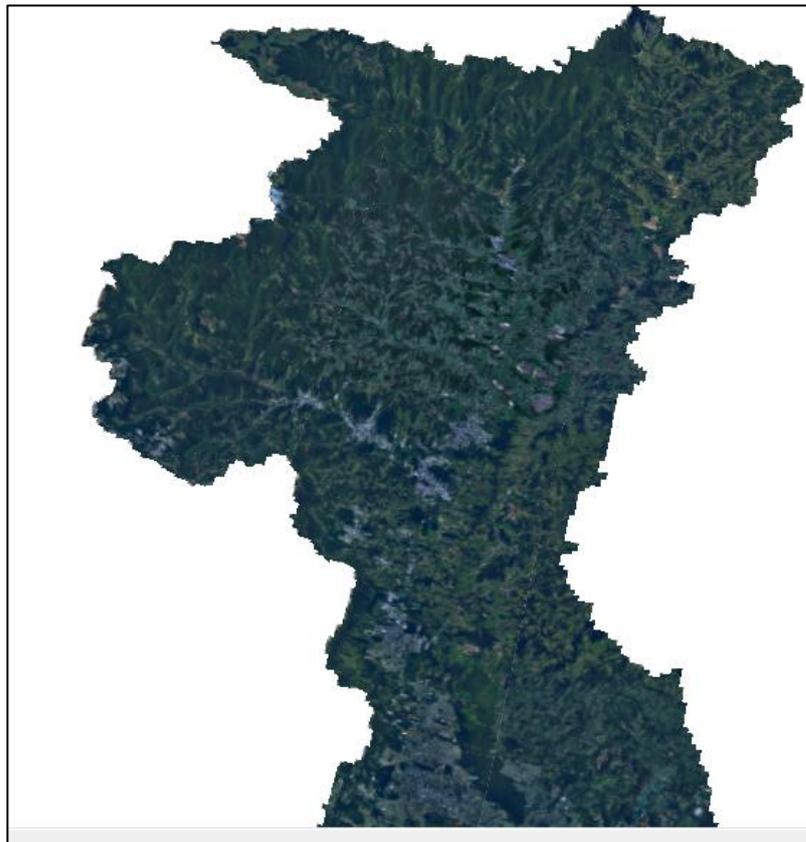


Figura 25 – Modelo de Elevação Digital em Três Dimensões, com o Mosaico Sobreposto.

5.3.1 Comprimento de Encosta

Com o modelo de elevação finalizado foi possível construir o mapa de comprimento de encosta (Figura 26). Analisando a figura percebe-se que nas partes mais elevada da bacia (região N) observa-se as áreas mais susceptíveis à erosão, onde há menores comprimentos de rampas (250 à 1000 m). Nestas áreas íngremes os efeitos gravitacionais podem resultar em maiores movimento de massa.

Além disso, observa-se que a parte menos íngreme são áreas próximas aos cursos d'água, com comprimentos de rampas alcançando 10 mil m.

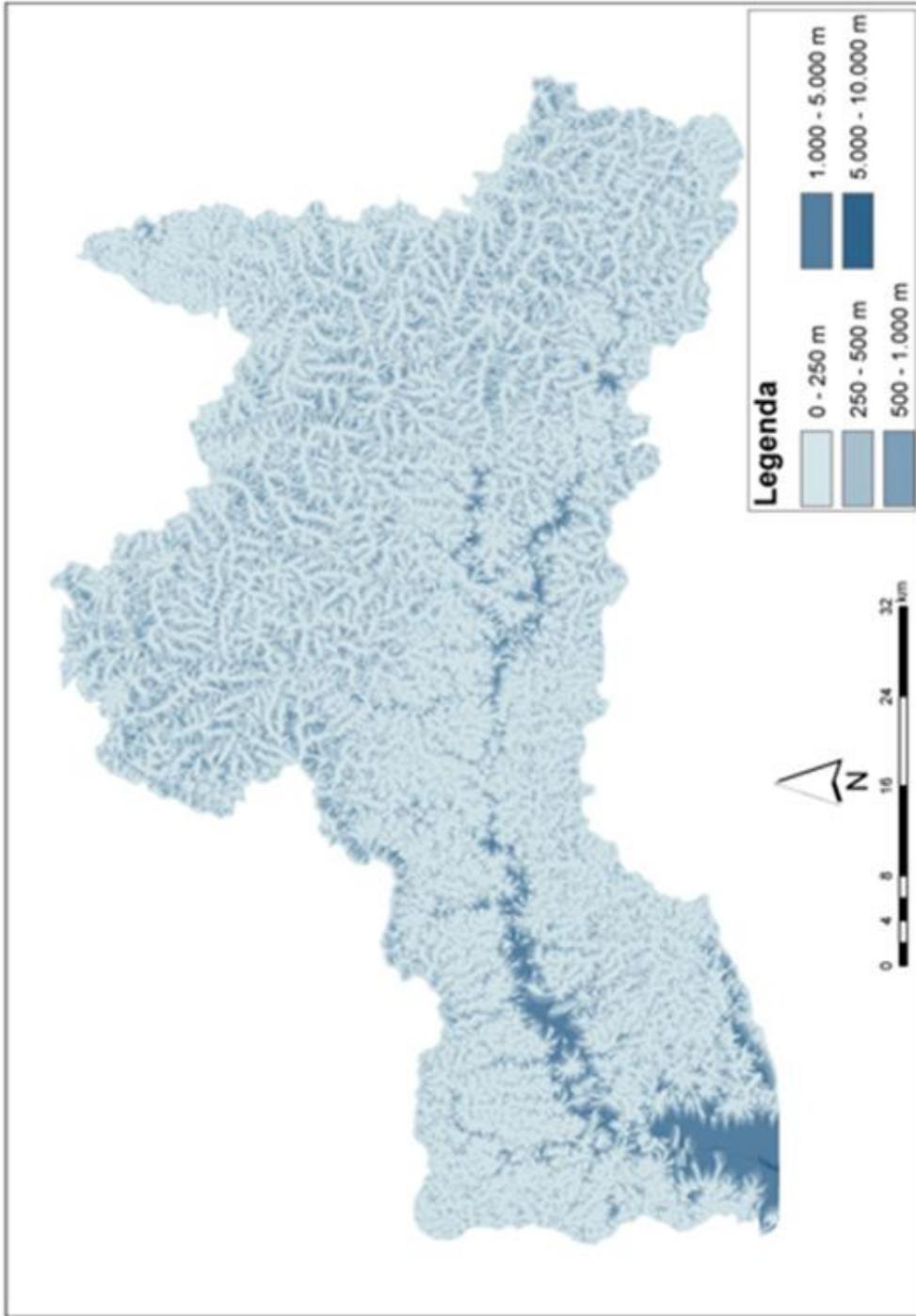


Figura 26 – Mapa de Comprimento de Encosta.

5.3.2 Declividade

O mapa de declividade (Figura 27), foi realizado a partir de uma rede de triangulação irregular de superfície. A área com maior declive varia entre 45 a 90% localizando-se na parte mais elevada da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, região está propícia a erosão (Quadro 16). As áreas mais planas são as áreas próximas aos cursos d'água.

A classificação de risco foi baseada nos estudos da NSW Department of Primary Industries que descreve o mesmo em um guia de prevenção e reparo em solos erodidos (Saving Soil, 2009). Analisando a área com base neste guia percebe-se que as áreas próximas aos cursos d'água há risco de erosão muito baixo ou não muito grave e que o risco vai aumentando ao longo que sua declividade aumenta, passando então pela região central e tendo seu maior risco ao norte da bacia onde é possível encontrar picos de erosão.

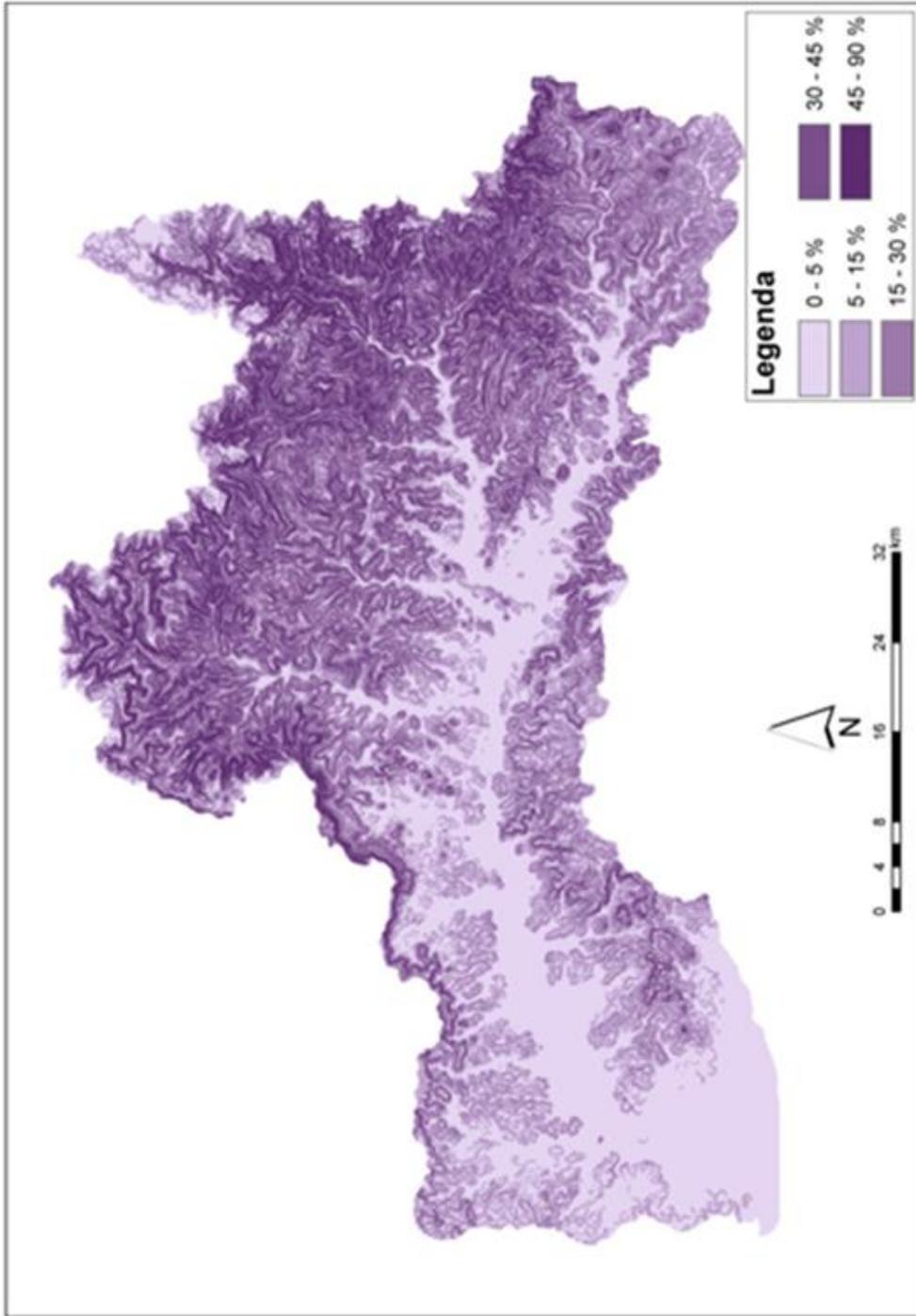


Figura 27 – Mapa de Declividade.

Quadro 16 – Risco de Erosão pela Declividade. (Fonte: Saving Soil, 2009)

Declividade (%)	Paisagem	Risco de Erosão
0	ao nível	muito baixo
1	quase ao nível	
2		declive muito suave
3	aumento do risco de erosão	
4		
5	declive suave	rápido aumento do risco de erosão
6		
7		
8	declive moderado	rápido aumento do risco de erosão
9		
10		
11		
12		
13		
14	encosta íngreme	rápido aumento do risco de erosão
15		
16		
17		
18		
19	picos de erosão	
20-25		
26-30		
>30	inclinação muito íngreme	

5.3.3 Fator Topográfico – LS

O fator topográfico (Figura 28) é uma multiplicação dos fatores de comprimento da encosta L com o de declividade S. Para a equação universal de perda de solo todos os fatores têm os mesmos pesos, com isso não há uma diferenciação destes fatores.

Na área de estudo observa-se relevos complexos foi utilizada uma combinação com as equações tradicionais do fato LS, conforme descrito no capítulo 4.2.4, página 54.

Para esta combinação se dá pesos distintos para a declividade e comprimento de encosta, sendo 0.4 para o comprimento de encosta e 1.3 para a declividade. Nesta combinação também se utilizou o fator de forma de vertente.

Verificando a Figura 25 observa-se que o fator mais elevado fica próximo aos cursos d'água e alguns pontos no alto da bacia (Região N), ficando as demais regiões variando entre o fator topográfico médio à baixo. Portanto defini-se que as regiões com fatores topográficos que variam de médio a baixo são mais propícias a uma erosão, pois são onde se encontram comprimento de rampa curtos e médios com declividades superiores a 15%, já os fatores topográficos próximo a zero são locais com declividades baixas, quase planas.

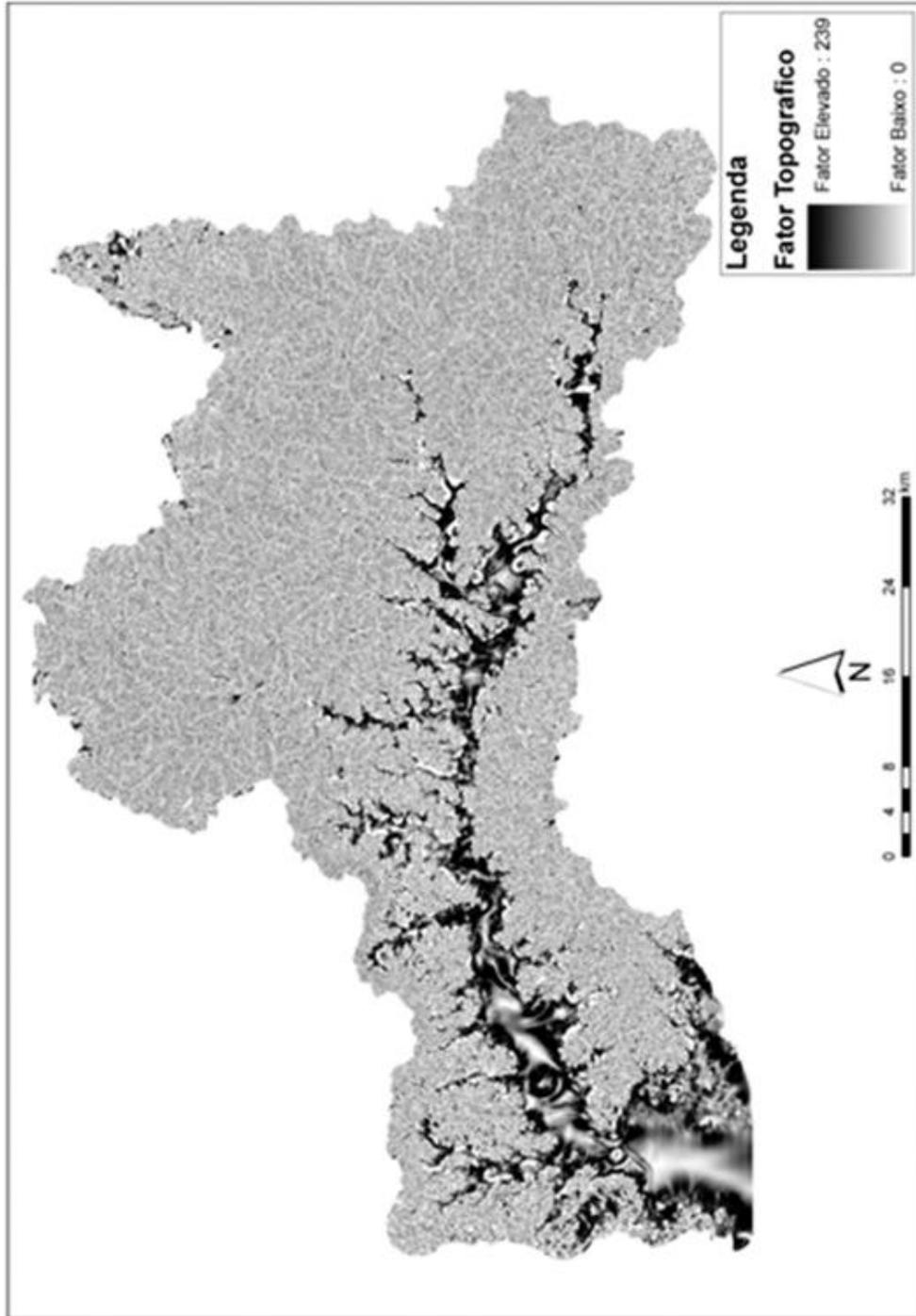


Figura 28 – Mapa do Fator Topográfico LS.

5.4 Fator de Erodibilidade

O fator de erodibilidade é o índice de resistência do solo à erosão. Analisando a Figura 25, é possível indentificar áreas com baixa resistência do solo à erosão, como no alto da bacia (Região N), em uma pequena área próxima ao curso d'água e áreas urbanas (Região W). Estas áreas possuem uma não resistência à erosão, que variam de forte à muito forte. Ao nordeste nas áreas mais elevadas encontram-se os pontos de maior resistência à erosão.

Nota-se na Figura 29 algumas regiões sem informações de resistência do solo, devido à falta de informações do tipo solo, é possível observar que em sua grande maioria as mesmas encontram-se em áreas urbanizadas (Região W).

Para obter este fator foi utilizado o mapa de solo fornecido pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM, que continham atributos de tipo de solo e suas respectivas resistências à impacto ambiental, que variam de A até D. Onde segundo Kämpf (2008), as resistências A para erosões, equivaliam a ligeiras a moderadas até chegar a resistência D erosões fortes à muito fortes.

Os valores numérico de K deu-se através do índice criado por Faster *et al.*(1981), que defini erodibilidade do solo baixa entre 0.01 e 0.03, erodibilidade média entre 0.03 e 0.045, erodibilidade forte entre 0.045 e 0.06 e erodibilidade muito forte maior que 0.06.

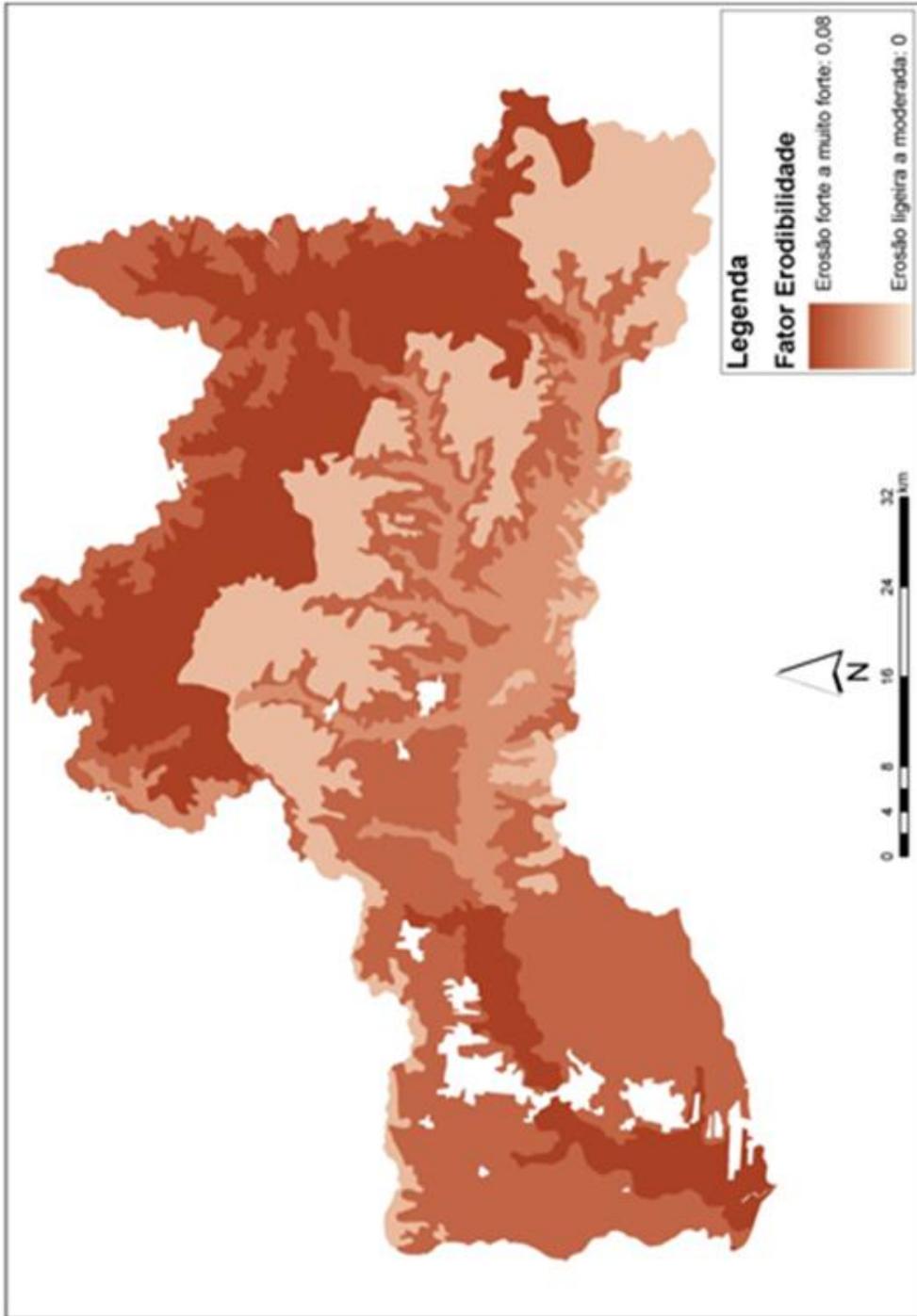


Figura 29 – Mapa do Fator de Erodibilidade K

5.5 Fator de Erosividade

O fator de erosividade é um índice que expressa a capacidade de haver erosão através da chuva em uma área desnuda. Para tanto foi utilizado a equação de Lombardi Neto & Moldenhauer (1980), conforme descrito no capítulo 4.2.4, página 54.

Para obter este índice foi coletado pontos pluviométricos contidos na área da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos de precipitação mensal e anual através da Agência Nacional de Águas - ANA e realizado o cálculo através da equação de erosividade. O Quadro 17 demonstra os índices de erosividade em todos os pontos coletado. Já nos Quadros 18 e 19 podem ser verificadas as séries históricas, os maiores e os menores índices de erosividade do ano para cada ponto e de cada mês da série histórica.

Como muitos dados de precipitação não estavam completos foram eliminados da série histórica todos os anos que não continham alguns índices mensais, ficando assim alguns pontos de pluviometria com intervalos de data sem dado e com isto estes intervalos não foram contados como anos utilizados no Quadro 17.

Abaixo na Figura 30 pode ser observada a localização exata para cada ponto pluviométrico utilizado para a obtenção da erosividade.

Quadro 17 – Fator de Erosividade para Todos os Pontos Pluviométricos Utilizados.

Cod.EstacaoMapa	EstacaoCodigo	Nome	R (FINAL)
1	2950001	Ararica	347895,92
2	2950009	Canela	434052,90
3	2950013	Entrepalado	238370,51
4	2950022	Passo do Louro	241215,28
5	2950025	Povoado Avenida	509969,69
6	2950029	Sander	307393,34
7	2950030	Santa Tereza	325622,64
8	2950036	Taquara	237716,02
9	2950037	Taquara	280803,70
10	2951028	Sapucia do Sul	285193,97
11	2951040	Toca	284961,07

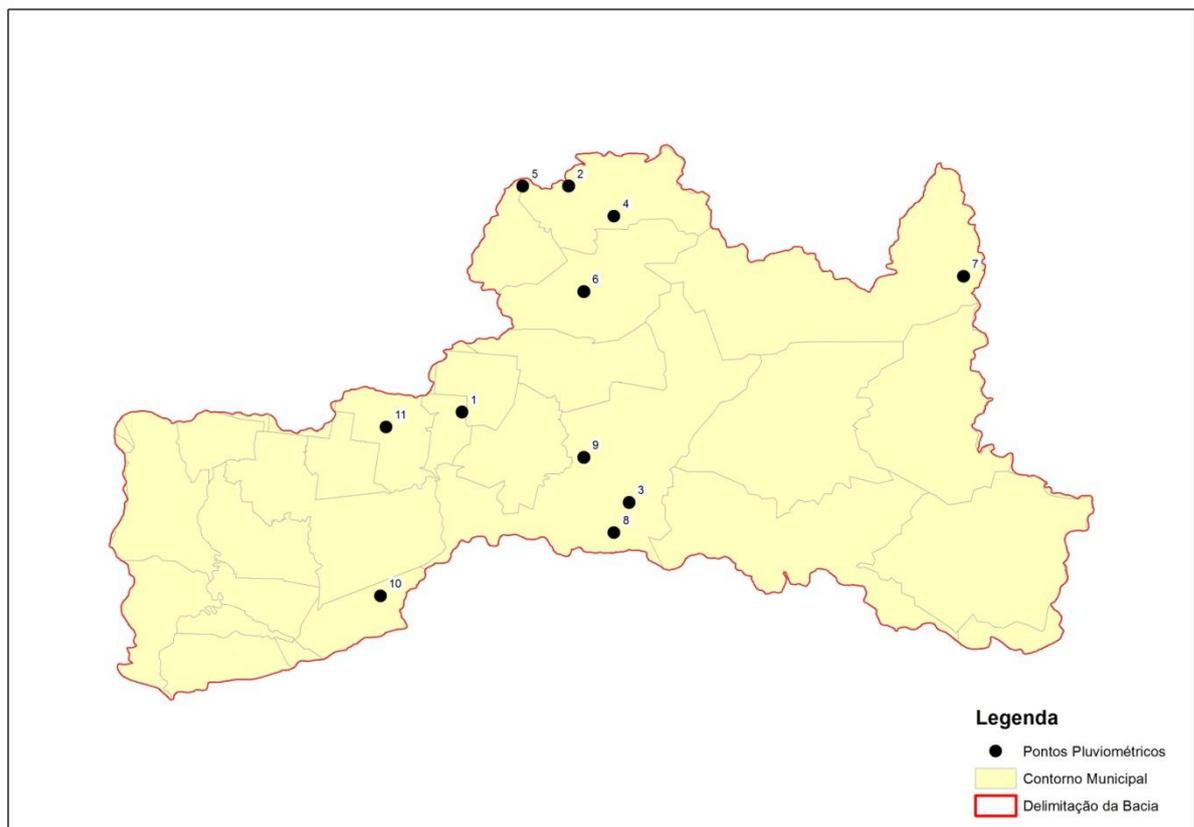


Figura 30 – Localização dos Pontos Pluviométricos.

Quadro 18 – Fator de Erosividade com o Maior e Menor Índice Anual.

EstacaoCodigo	Anos	Período	> R anual	Ano	< R anual	Ano
2950001	17 anos	1960 - 1977	975031	1967	121334	1979
2950009	34 anos	1943 - 1978	1453238	1967	85243,5	1943
2950013	19 anos	1956 - 1980	1075935	1967	96432,1	1979
2950022	14 anos	1944 - 1957	701513	1954	97155,4	1950
2950025	21 anos	1952 - 1978	278207	1952	90755,3	1962
2950029	33 anos	1943 - 1978	116618	1943	76229,2	1953
2950030	31 anos	1947 - 1978	899756	1954	94228,1	1960
2950036	4 anos	1961 - 1964	428220	1961	87854,5	1962
2950037	24 anos	1941 - 1977	1219789	1967	55325,4	1962
2951028	43 anos	1965 - 2008	707268	1982	98542,7	1999
2951040	6 anos	1941 - 1946	504129	1946	87714,4	1943

Quadro 19 – Fator de Erosividade com o Maior Índice por Mês da série histórica

EstCodigo	>R Jan	Ano	>R Fev	Ano	>R Mar	Ano	>R Abr	Ano	>R Mai	Ano	>R Jun	Ano
2950001	330816,30	1969	230746,50	1969	104074,00	1974	26712,70	1973	51799,28	1970	52256,77	1970
2950009	598511,96	1946	306230,87	1969	390907,50	1972	168782,23	1957	59399,03	1947	217156,40	1944
2950013	117700,96	1957	131407,3	1980	75954,38	1961	15435,22	1957	13592,92	1959	47273,10	1974
2950022	350793,39	1954	76138,96	1956	62672,56	1948	194409,06	1957	126441,24	1947	90557,58	1952
2950025	239591,77	1977	447389,71	1975	152825,67	1974	91763,60	1957	307975,65	1976	161703,64	1952
2950029	272159,50	1957	484554,97	1966	199692,39	1972	147562,11	1975	185452,73	1948	142615,73	1952
2950030	351375,26	1956	152871,80	1947	101215,32	1974	360386,66	1953	243412,99	1976	149707,91	1952
2950036	5656,95	1963	44380,36	1964	18678,41	1961	1659,39	1964	593,15	1961	29436,84	1961
2950037	303402,85	1956	314510,84	1969	57502,64	1974	238386,37	1953	26863,37	1970	214427,60	1952
2951028	151439,85	1996	553204,52	1981	143363,99	1985	83179,88	2001	77411,68	1993	532072,12	1982
2951040	371109,44	1946	13859,96	1944	36274,87	1944	117446,87	1941	167996,62	1942	214337,19	1944
EstCodigo	>R Jul	Ano	>R Ago	Ano	>R Set	Ano	>R Out	Ano	>R Nov	Ano	>R Dez	Ano
2950001	74861,48	1977	564593,60	1965	920860,30	1967	175110,30	1967	59106,42	1963	120420,30	1966
2950009	118587,60	1954	410436,13	1959	1295834,22	1967	272685,26	1953	62081,86	1960	233800,51	1966
2950013	61540,61	1980	131971,53	1975	1042382,65	1967	131427,11	1963	131427,11	1963	79099,21	1966
2950022	49913,73	1945	36840,40	1957	260036,72	1954	91968,94	1953	46796,37	1951	37728,53	1946
2950025	34134,13	1978	337996,11	1965	1193265,68	1967	250221,07	1953	136717,04	1974	146185,67	1958
2950029	352925,61	1948	144920,48	1959	732317,04	1967	435678,51	1963	114414,69	1963	142846,60	1966
2950030	84499,49	1954	117842,42	1964	341270,68	1954	113799,29	1952	65974,54	1963	125365,30	1966
2950036	17007,45	1964	20259,51	1963	277630,32	1961	221599,12	1963	43372,88	1963	17860,99	1964
2950037	62398,72	1966	194581,44	1965	281555,34	1961	166441,17	1963	73402,95	1963	127157,34	1957
2951028	148334,57	1976	179989,42	1975	550581,82	1967	363192,02	2005	186170,62	1986	77328,16	2003
2951040	44857,19	1945	110897,76	1985	20430,74	1945	26321,21	1944	116306,02	1941	89336,09	1946

Analisando o Quadro 18 pode ser verificado que a maior série histórica da bacia do Rio dos Sinos é de 43 anos para o ponto de Sapucaia do Sul e a menor é de Taquara, também é possível observar que o ano de 1967 foi o ano que mais estações obtiveram os maiores

índices R, e com isto as maiores erosividades. Já no Quadro 19 é possível verificar que o maior índice foi em setembro de 1967 na estação 2950009 (Canela) e a menor é em maio de 1961 na estação 2951028 (Sapucaia do Sul).

A geração do mapa de erosividade (Figura 31) deu se através da interpolação dos pontos das 11 estações, utilizando nesta interpolação os atributos de maiores índices R.

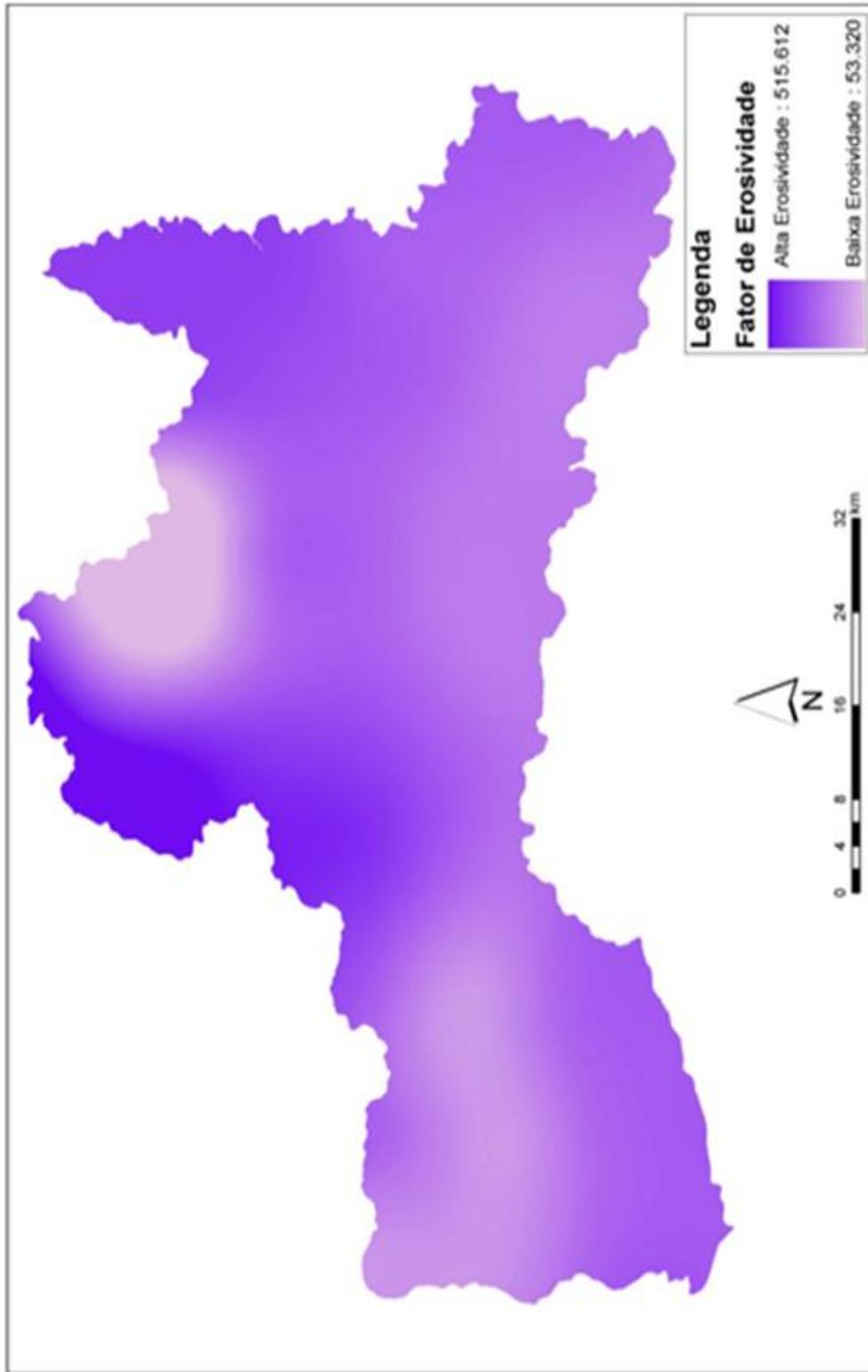


Figura 31 – Mapa do Fator de erosividade.

A Figura 31 demonstra que na área mais baixa (Região W) e a área pontual no alto da bacia (Região N) é o local onde o índice de erosividade é menor, com isto as áreas menos impróprias de ocorrer erosão causada por uma precipitação forte de curta duração.

5.6 Modelo de Predição de Perdas de Solo

O modelo de predição de perdas de solo realizado através da equação universal de perda de solo (Capítulo 4.2.5) foi obtido de duas formas: a primeira levando em conta fatores naturais como erosividade, erodibilidade e topográfico, que demonstram a susceptibilidade à erosão da bacia hidrográfica considerando somente as áreas que podem ocasionar erosões naturais (Figura 32). A segunda forma, além dos naturais, considerou os fatores antrópicos, a exemplo do uso e ocupação do solo e medidas práticas de conservação (Figura 33).

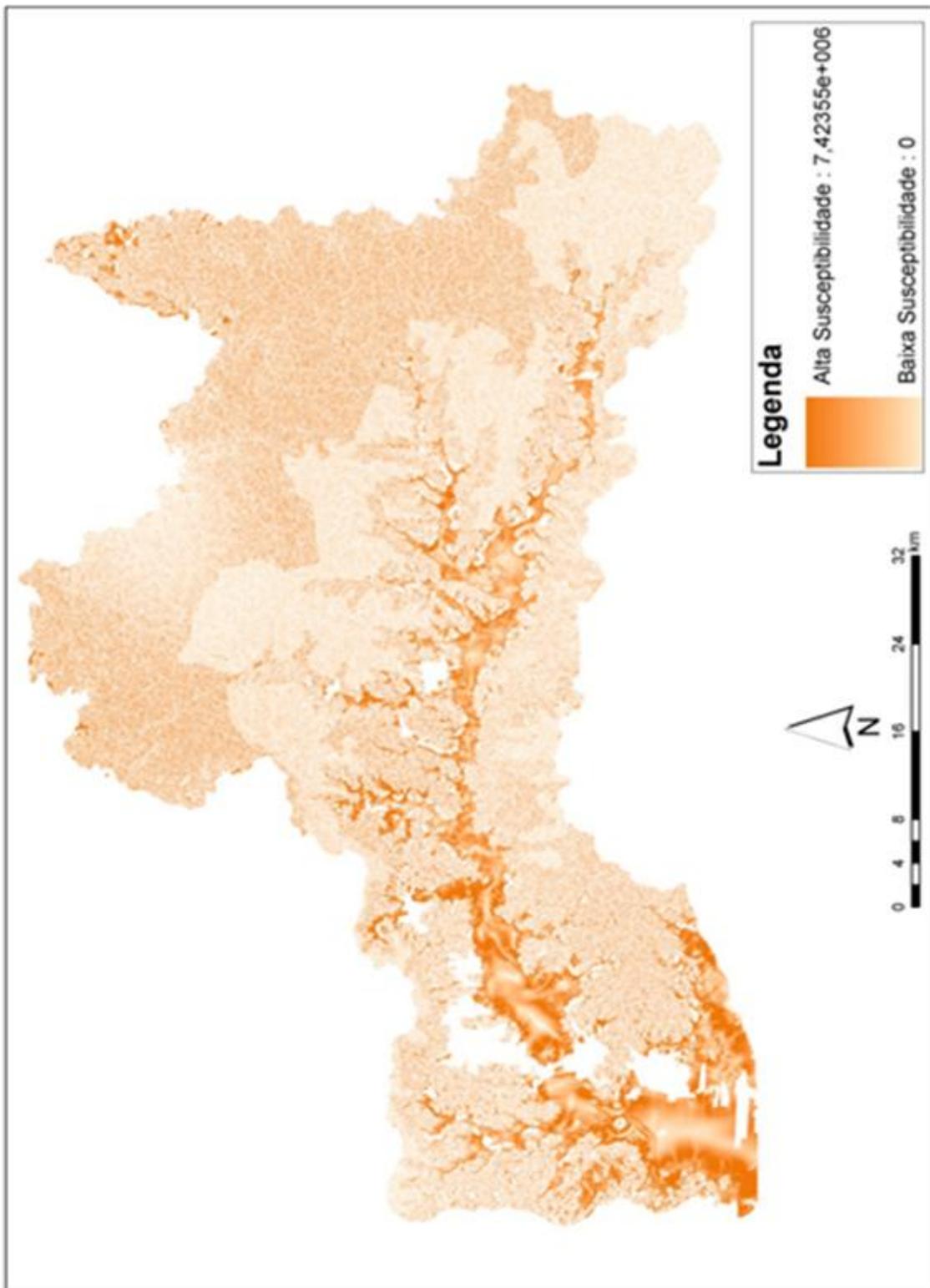


Figura 32 – Mapa de Susceptibilidade à Erosão Utilizando Fatores Naturais.

Observa-se que na Figura 32 as áreas mais susceptível a erosão são regiões próximas aos cursos d'água (Porção W) e em pequenas áreas ao norte da bacia, regiões estas que

contem um elevado fator de erosividade, principalmente ao norte, e que há uma erodibilidade alta à muito alta, destacando a região ao sul próximo a hidrografia.

Porem a maior parte da bacia esta classificada como áreas com susceptibilidade alta à modera, este modelo se explica pois nestas áreas há erodibilidade, erosividade e fator topográfico com índices de alta à moderada. Já as áreas com menor susceptibilidade que são as áreas centrais da bacia, devido principalmente ao fator de erodibilidade, que para esta região tem uma erodibilidade baixa, ou seja, um solo com boa resistência a erosão.

Percebe-se que há áreas sem informação (porção W), devido à falta de atribuição de resistência para os solos nesta região.

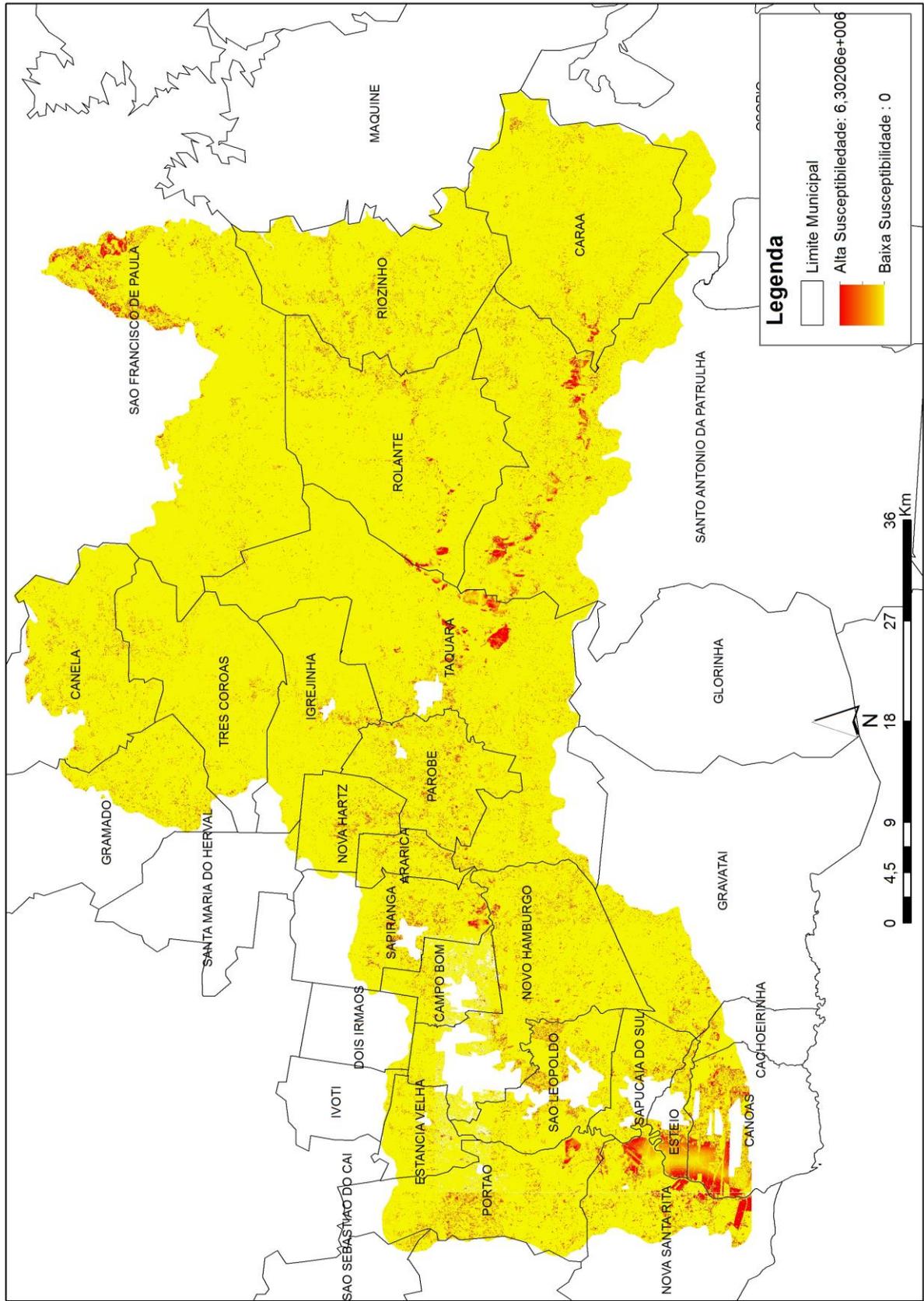


Figura 33 – Mapa de Susceptibilidade à Erosão utilizando Fatores Naturais e Antrópicos.

O mapa de susceptibilidade à erosão utilizando fatores naturais e antrópicos (Figura 33) mostra áreas mais susceptíveis à erosão nas regiões próximas ao Rio dos Sinos e seus afluentes (porção W, onde se encontram áreas de cultivos), principalmente nos municípios Nova Santa Rita, Esteio, Canoas, Sapucaia do Sul, Portão, Taquara e Santo Antônio da Patrulha. Em áreas de solo exposto (porção N), como o município de São Francisco de Paula também apresenta área de susceptibilidade à erosão. Contudo, percebe-se que as regiões mais susceptíveis são as que possuem interferência humana, através do plantio ou de exploração mineral.

Outros pontos isolados com susceptibilidade moderada são encontrados nas regiões centrais da bacia onde há uma declividade mais elevada em conjunto com uma alta erodibilidade e erosividade (Riozinho, Rolante, Parobé, etc.).

6 CONCLUSÃO

A elaboração deste estudo proporcionou, com o auxílio dos sistemas de informação geográfica e do sensoriamento remoto, a identificação e caracterização dos processos de degradação do solo, com ênfase na definição e análise de áreas susceptíveis à erosão na região que abrange a bacia hidrográfica do Rio dos Sinos.

Desta forma, obteve-se como resultado definição das áreas de susceptibilidade à erosão na bacia. Assim, foram identificadas as regiões com maiores e menores probabilidade de se haver erosões.

Os resultados apontaram que as áreas de maiores susceptibilidade são regiões próximas a hidrografia, principalmente em locais com agricultura e solos expostos, como é o caso dos municípios de Nova Santa Rita, Esteio, Canoas, Portão, Taquara, Santo Antonio da Patrulha e São Francisco de Paula.

Regiões com risco de erosões altas a moderadas encontram-se em sítios de alta declividade, erosividade e erodibilidade e os menores riscos em áreas planas onde não há plantio e desmatamento de mata nativa.

Nas áreas com maior susceptibilidade (agrícolas e solo exposto), esses problemas estão associados à expansão da atividade agropecuária e a falta de políticas públicas mitigadoras, a exemplo de ações para conservação da mata ciliar.

Já para as regiões com alto declive, com risco de erosão de alta à moderada, como Riozinho, Rolante, Parobé, etc. recomenda-se a utilização de cobertura vegetal permanente, pois essa técnica é de baixo custo e recupera os solos degradados.

Nos pontos de menor susceptibilidade, Três Coroas e Igrejinha por exemplo, é recomendada a manutenção da cobertura vegetal e o uso de alternativas de capinas em áreas com culturas anuais, plantadas em faixas alternadas.

A identificação das áreas susceptíveis à erosão em bacias hidrográficas através de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, aumenta a dinâmica do processo de planejamento ambiental (recuperação e proteção) e da elaboração do prognóstico das áreas potenciais à degradação ambiental.

Porem para se obter estas identificações o processo é oneroso e de alto custo, principalmente os processos de mosaicagem e classificação das imagens. Pois para estes processos além dos mesmos requererem muito do hardware exige uma manutenção/correção dos pontos errôneos como foi o caso de alguns pixels que classificaram errados.

Para o mosaico e a classificação ficarem adequadas a este trabalho foi necessário o ajuste manual de todos os pixels errôneos encontrados, isto através de comparação entre a classificação, imagens de satélites e amostragem no campo.

Os resultados obtidos no presente estudo poderão auxiliar no planejamento territorial de caráter sustentável, principalmente no que se refere ao uso e ocupação do solo da bacia do Rio dos Sinos, permitindo a redução dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS ANA: Pontos Pluviométrico. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acessado em 10 jun. 2012.
- ATLAS SÓCIO ECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2011. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas/atlas.asp?menu=547>>. Acessado em 11 jan. 2012.
- BACELLAR, A.A.A. Estudo da erosão na microbacia hidrográfica do ribeirão Cachoeirinha – município de Iracemápolis, utilizando um sistema de informação geográfica. Campinas:FEAGRI/UNICAMP, 1994. (Relatório técnico)
- BARRELLA, W. *et al.* As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 1997b.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.; BENATTI JUNIOR, R. Equação de perdas de solo. Campinas: IAC, 1975. (Boletim técnico, 21).
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo: Ícone, 1999.
- BISCAIA, R. C. M.; RUFINO, R. L.; HENKLAIN, J. C. Cálculo da erodibilidade de dois solos do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1981.
- BITTENCOURT, H. R., 2001. Reconhecimento estatístico de padrões: o caso da discriminação logística aplicada a classificação de imagens Digitais obtidas por Sensores remotos. In Congresso Brasileiro de Computação – CBComp 2001.
- BORDAS, M. P. & SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos In: Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Produção Agropecuária. Manejo e Conservação do solo e da água: informação técnicas Brasília, 1983.

CAMPBELL, J.B. Introduction to Remote Sensing. Second edition. ed. Taylor & Francis, 1996.

CARSON, M.A.; KIRKBY, M.J. Hillslop form and process. Cambridge University Press. 1975.

CARVALHO, Newton de Oliveira. Hidrossedimentologia prática. Rio de Janeiro:CPRM,1994.

CERRI, C.E.P. Mapeamento das áreas de risco de erosão dos solos da bacia do rio Piracicaba, utilizando geoprocessamento. Piracicaba, 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

COHEN, J.A. A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurement, 1960.

COIADO, E. M. Produção, transporte e deposição de sedimentos. HIDROLOGIA APLICADA À GESTÃO DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS. Porto Alegre: ABRH, 2001.

CBH-AP – Comitê das Hidrográficas dos Rios Aguapeí e Peixe Relatório de situação dos recursos hídricos das bacias dos rios Aguapeí e Peixe. CETEC, 1997.

CRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. Rev.Geomorfol, Campinas, 1969.

CRÓSTA, A. P. (1992). Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. São Paulo. (Tese - Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

DESMET, P.J. & GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the EUPS LS factor on topographically complex landscape units. J. Soil Water Conserv., 1996.

DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES - Saving Soil, 2009 Disponível em <<http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/resources/soils/erosion/saving-soil/>>. Acessado em 13 mar. 2012.

ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1989.

EMBRAPA Método de Elaboração dos Mosaicos. Disponível em: <<http://www.cdbrasil.cnpem.embrapa.br/txt/meto.htm>>. Acessado em 09 jan. 2012

EMBRAPA RapidEye Disponível em: <<http://www.sat.cnpem.embrapa.br/conteudo/rapideye.htm>>. Acessado em 15 mar. 2012

ERBERT, M. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Master Tesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001

ERDAS Field Guide Manager, Technical Documentation. Leica Geosystems Geospatial Imaging, LCC. 2007.

ESRI – Environmental Systems Research Institute ArcGIS Tutorial, 1991.

FEE Disponível em: <http://www.fee.rs.gov.br/feedados/consulta/menu_consultas.asp?tp_Pesquisa=var_Anual>. Acessado em 15 nov. 2010

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AO MEIO AMBIENTE – **FEPAM**. Disponível em < http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_sinos/sinos.asp>. Acessado em 11 jan. 2012

FELIX, I. M., KAZMIERCZAK, M. L., ESPINDOLA, G. M. RapidEye: A nova geração de satélites de Observação da Terra. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE.

FIGUEIREDO, D. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Conab Companhia Nacional de Abastecimento. 2005

FILIZOLA, N.; COUTINHO, P.; CARVALHO, N. O.; *et alii*. Informações hidrossedimentométricas no Brasil. PAIVA, E.M.C.D & PAIVA, J. B. D. Caracterização Quali-Quantitativa da Produção de Sedimentos. Santa Maria: ABRH/UFMS, 2001.

FOODY, G.M. On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 58, n. 10, 1992.

FRANÇA, G.V. de. Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba. Piracicaba, 1968. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1968.

FRANKE, R. 1982. "Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines". *Comp. & Maths. with Appls.* Vol. 8. No. 4. Great Britain.

HACKBART, E. J. Clima da Bacia do Rio dos Sinos. Serviço de Meteorologia – SEMMAM. Disponível em <http://www.martimpescador.org.br/> acessado em 12 mar. 2011

HICKEY, R.; SMITH, A.; JANKOWSKI, P. Slope Length Calculations from a DEM within Arc/Info GRID, *Computing, Environment and Urban Systems*, Vol. 18, No. 5. 1994

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc America Bulletin*, 1945.

IAC Instituto Agrônomo de Campinas – Campinas-SP, 2003. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br>. Acesso em: 10/01/2011.

IBGE Introdução ao processamento digital de imagens, Primeira Divisão de Geociências do Nordeste. Rio de Janeiro : IBGE, 2001.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> acessado em 20/05/2001.

KÄMPF N., GIASSON E., INDA A. V., NASCIMENTO P. C. Metodologia para classificação de solos quanto à resistência a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos. *Fepam em Revista*, Porto Alegre, v.2, 2008

KLINGEBIEL, A. A.; MONGOMERY, P. H. Land capability classification. Washington, D.C. USDA 1961. (Agriculture Handbook, 210).

LANNA, A. E., PEREIRA, J. S. 1996. Simulação da cobrança pelo uso da água na bacia do rio dos Sinos. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL., 3, 1996, Gramado. Anais. [S. l.] ABES:ANDIS. v.1.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 47, n. 4. 1996.

Lepsch, I.F.; Bellinazzi Jr., R.; Bertolini, D.; Espíndola, C.R. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4a aproximação, 2a. impressão revisada. Campinas: SBCS, 1991.

LIMA, W.P. Prinsípios de manejo de bacias hidrográficas. Piracicaba: ESALQ. USP, 1976.

LIMA, W.P.; ZAKIA M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da Chuva: Sua Distribuição e Relaçãp com as Perdas de Solo em Campinas (SP). VIII. Conservação do Solo. 1992

LOMBARDI NETO, Francisco, BERTONI, José. Erodibilidade dos solos paulistas. Campinas, SP, Instituto Agrônômico, 1975. Boletim Técnico, 27.

MAGNA ENGENHARIA LTDA. 1996a. Diagnóstico dos usos e disponibilidade de água na bacia. In: __. Simulação de uma proposta de gerenciamento dos recursos hídricos na bacia do rio dos Sinos, RS: Relatório. Porto Alegre.

MARGOLIS, E.; SILVA, A.B. da; REIS, O.V. dos. Controle da erosão com diferentes práticas conservacionistas num solo Litólico de Caruaru (PE). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1985.

MERTEN, G. H.; CAVIGLIONE, J. H.; CIACOMINI, D. C.; RUFINO, R. L.; MEDEIROS, G.; SAINTRAI, D.; RIBAS G. C.; DEDECEK, R.; KESSLER, C. A. El uso del SIG del modelo EUPS para determinar mapas de erosion potencial y actual em lasmicrucuencas pilotos de Água Grande y Córrego do Pensamento, Momborê, Paraná, Brasil. Santiago, Chile: Proeto Regional GCP /RLA /107 /JPN. 1995.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. - Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas - *Rev. Bras. Ciênc. Solo* vol.34 no.4 Viçosa . 2010

- MOORE, I.D. & BURCH, G.J. Modeling erosion and deposition: Topographic effects. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 29:1624-1640, 1986a.
- MOORE, I.D. & BURCH, G.J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Res. Res.*, 22:1350-1360, 1986b.
- MOORE, I.D. & BURCH, G.J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1294-1298, 1986c.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 250 p.
- MORGAN, R.P.C. Soil erosion & conservation. 2.ed. New York. John Wiley & Sons. 1995.
- NOVO, E. M. N. Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações. 2ª ed. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1999.
- OLIVEIRA, A.M.S. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA et. al. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.
- PAIVA, E. M. C. D. Métodos de Estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B. D. & PAIVA, E. M.C. D. *HIDROLOGIA APLICADA À GESTÃO DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS*. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- PEJON, O.J. Mapeamento Geotécnico de Piracicaba: Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- PEREIRA, J. S. 1996. Análise de critérios de outorga e de cobrança pelo uso da água na bacia do rio dos sinos, RS. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.
- PEREIRA, J. S. A problemática dos recursos hídricos em algumas Bacias Hidrográficas Brasileiras. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre. 1999.

PISSARA, T.C.T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A.S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP). Rev. Bras. Ciências do Solo, Viçosa.

Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <www.ana.gov.br/Institucional/Legislacao/leis/lei9433.pdf>. Acessado em 23 out. 2011.

RAPIDEYE AG. RAPIDEYE. Disponível em: <<http://www.rapideye.de/>>. Acesso em 05 jan 2012.

RENARD, K.G., G.R. FOSTER, G.A. WEESIES, D.K. McCool, and D.C. Yoder (coordinators). "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (REUPS)." USDA Agr. Handb. No 703, 1997.

RESENDE, M.; ALMEIDA, J. R. Modelos de predição de perda de solo: uma ferramenta para manejo e conservação do solo. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 1985.

RICHARDS, J. A. Jia, X. Remote sensing digital image analysis: na introduction. New York: Springer, 2005.

RODRIGUES, J. E. Estudo de fenômenos acelerados: Boçorocas. 1982. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1982.

ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.52, n.2. 1986.

SAATY, R.W. The analytic hierarchy process--what it is and how it is used. Mathematical Modeling 9(3).1987

SALOMÃO, F.X.T.; IWASA, O.Y. Erosão e ocupação rural e urbana. São Paulo, ABGE/IPT, 1995.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE **SEMA** Disponível em <http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=54>. Acessado em 11 jan. 2012.

SHARING EARTH OBSERVATION RESOURCES. RAPIDEYE earth observation constellation. Disponível em:

<http://directory.eoportal.org/get_announce.php?an_id=7466>. Acesso em 06 jan. 2009.

Sistema Estadual de Recursos Hídricos Disponível em <www.ausm.com.br/util/links/LEI%2010350-94.pdf>. Acessado em 11 jan. 2012.

SIMMS, A. D.; WOODROFFE, C. D.; JONES, B. G. Application of REUPS for erosion management in a coastal catchment, southern NSW. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 5.,2003.

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. Ln: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Marília. Anais...ABGE.v.1, 1987.

STRAHLER AN. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans Am Geophys Union, 1957.

Tarboton D. G., R. L. Bras, I. Rodriguez–Iturbe. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. Hydrological Processes. 5: 81-100.1991

PLINIO, T. Curso de Manejo de águas pluviais, 2008 (Livro Eletrônico) disponível em <www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo23_rEUPS.pdf>. Acessado em 10 mar. 2012.

TONELLO, K.C. Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG.Tese(Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

USING PCI software. Ontario : Richmond Hill, 1997.

VALERIANO, M. M. Estimativa de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos. Tese de doutorado, IGCE/UNESP, Rio Claro, 1999.

VEIGA, M.; AMADO, T. J. C. Preparo do solo. In: Manual de uso, manejo e conservação do solo. Florianópolis: Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento 1991. 292 p.

WARREN, S.D.; HOHNANN, M.G.; AUERSWALD, K; MITASOVA, H. Na evolution of methods to determine slope using digital elevation data. Elsevier & Catena -2004

WICHMANN, V. Slope length. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/sagagis/forums/forum/790705/topic/4504649>>. Acesso em: 02 jun. 2012

WILLIAMS, J. R. Sediment routing for agricultural watersheds. In: WATER RESOURCES BULLETIN. 1975. Proceedings of the AWRA, Minneapolis, 11., nº 5, 1975.

WILLIAMS, J.R. & BERNDT, H.D. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds Soil erosion: Prediction and control. Soil Conserv. Am., 21:217-225, 1977. (Special Publication)

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Washington: Department of Agriculture, 1965. (USDA. Agriculture Handbook, 282).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide planning. Washington, DC: USDA, 1978.

YANG, C.T. Unit stream power and sediment transport. J. Hydr. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng. 98:1805-1826, 1972.

YANG, C.T. Incipient motion and sediment transport J. Hydr. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng., 99:1679-1826, 1973.

YANG, C.T. Unit stream power equation for gravel J. Hydr. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng., 110:1783-1797, 1984.

ZACHAR, D. Soil erosion: Developments in soil science. New York: ElsevierScientific, 1982.

