

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO
COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO AMBIENTAL DO OESTE DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMAQUÃ - RS**

Manoela Sacchis Lopes

ORIENTADORA: PROF^a. DRA DEJANIRA LUDERITZ SALDANHA

PORTO ALEGRE, FEVEREIRO DE 2015.

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO
COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO AMBIENTAL DO OESTE DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMAQUÃ - RS**

Por Manoela Sacchis Lopes

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Sensoriamento Remoto**.

Orientadora: Dra. Dejanira Luderitz Saldanha

Porto Alegre, RS, Brasil
2015

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

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO
COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO AMBIENTAL DO
OESTE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMAQUÃ - RS**

elaborada por
Manoela Sacchis Lopes

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Sensoriamento Remoto

Banca Examinadora:



Dra. Aline Biasoli Trentin

Dra. Damáris Gonçalves Padilha

Dr. Jorge Ricardo Ducati

PORTO ALEGRE, FEVEREIRO DE 2015.

*Ao meu Pai, que mesmo distante me proporciona forças
por todo o amor deixado com sua repentina partida.
Dedico a ti, meu grande amor...*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que se mostra presente em todas as etapas da minha vida, me auxiliando a pensar nas melhores decisões e me dando forças para nunca desistir mesmo nos piores momentos da minha vida.

Ao meu Pai, meu grande amor, minha inspiração diária que Deus levou muito cedo, mas que me dá coragem e forças para continuar essa jornada. Meu esforço, minha vontade e todos meus planos são por ti, para te orgulhar e honrar teus ensinamentos.

À minha mãe, que com seu amor incondicional sempre priorizou a minha felicidade deixando muitas vezes de pensar nela própria. Agradeço pela dedicação, apoio nos momentos difíceis, pelas alegrias diárias e principalmente por mostrar que eu sempre devo lutar pelos meus sonhos.

À minha prima Bianca e minha dinda Marilda, que me mostram que o amor supera todas as barreiras. Agradeço por estarem presentes em todos os momentos, pela paciência, pelo apoio e principalmente por serem essas pessoas maravilhosas. A todos os meus familiares que sempre me apoiaram e me proporcionaram momentos felizes, os quais eu sempre levarei comigo.

Ao meu namorado Rodrigo que me traz tranquilidade, me faz acreditar no companheirismo, na lealdade e no amor que supera qualquer distância.

À minha orientadora Dejanira, que é uma pessoa incrível, um presente na minha vida acadêmica e que fez o mestrado se tornar doce, mas também de muito aprendizado. Agradeço por essa amizade, pelos ensinamentos, pela paciência e pelo enorme carinho demonstrado nesses anos de convivência.

Ao grupo de amigas 'SENHA', pela grande amizade e por todos os momentos ótimos que passamos juntas, sempre juntas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela formação profissional.

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado.

Aos colegas de mestrado, por compartilharem amizade, histórias, conquistas e muita troca de conhecimento.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e me incentivaram a sempre ir à busca de conhecimento.

A todos vocês, o meu muito obrigado.

RESUMO

A eficiência da gestão ambiental de um território depende em grande parte de levantamentos e estudos sistemáticos prévios sobre os principais elementos e condicionantes do meio físico. Para realizar esses estudos, neste trabalho utilizou-se o método da análise da vulnerabilidade natural à erosão, elaborada com base na metodologia proposta por Crepani et al. (1996;2001). O presente trabalho visou estabelecer a vulnerabilidade ambiental das unidades territoriais básicas considerando a relação entre os processos de morfogênese e pedogênese, a partir da análise integrada da rocha, solo, relevo, vegetação e uso e cobertura da terra e analisar a dinâmica multitemporal (1991 a 2014) da paisagem pelo alto incremento da silvicultura, da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã – RS. A área de estudo é considerada de elevado interesse ambiental por estar localizada no Bioma Pampa, que apresenta predomínio de campos nativos, matas ciliares, matas de encosta, formações arbustivas, butiazais, banhados e afloramentos rochosos, com estimativas que existam 3000 espécies de plantas e mais de 450 espécies de gramíneas, além de mais de 500 espécies de aves na fauna. A partir dessas peculiaridades, os resultados mostraram que a análise da vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã considera que a área de estudo como não Estável em relação às suas características do meio físico e influência da atividade antrópica. As UTBs mais estáveis (Moderadamente Estável e Medianamente Estável) estão localizadas em áreas com menor predisposição à erosão, apresentando equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese. As áreas medianamente estáveis/vulneráveis correspondem à 82% da área total e são consideradas de transição para a vulnerabilidade e 56% da totalidade da área de estudo já são consideradas medianamente vulneráveis. Essas áreas são as mais significativas na área de estudo e ocorrem em toda a região, principalmente nas limitações dos solos podzólico vermelho distrófico, unidade geomorfológica Planalto Residuais, altitudes maiores que 200 metros e classes de uso e cobertura da terra como reflorestamento e agricultura. As áreas moderadamente vulneráveis predominaram na porção central, noroeste e sudoeste, ao total somam 12% do território estudado. Essas áreas estão localizadas, principalmente, onde ocorrem as formações geológicas Rosário do Sul e Depósitos Aluvionares, associadas às outras variáveis com média/alta vulnerabilidade, como solos litólicos eutróficos e podzólico vermelho distrófico, unidade geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal, altitudes maiores que 200 metros e classes de uso e cobertura da terra como solo exposto, reflorestamento e agricultura. Essa classificação deve-se ao fato de que os Depósitos Aluvionares são as áreas consideradas mais instáveis das classes geológicas, pois nessa classificação apresentam-se as areias, cascalheiras, siltitos e sedimentos da planície de inundação e depósitos da rede fluvial. Em relação a dinâmica multitemporal das áreas de silvicultura, concluiu-se que áreas de reflorestamento em 1991 abrangiam, aproximadamente, 32.025 hectares e em 2014 esse número chegou a 124.256 hectares.. Entretanto, não se aplica nesse trabalho, a oposição quanto aos plantios de florestas exóticas, mas sim a não extensão de grandes áreas em um bioma de tanta importância e que segundo o Ministério do Meio Ambiente deve ter constante cuidado e preservação, para que se atinjam menores impactos ambientais. Assim, o mapeamento da vulnerabilidade natural à erosão e o estudo referente à dinâmica multitemporal das áreas de reflorestamento podem auxiliar nas futuras gestões territoriais, possibilitando um maior ordenamento juntamente ao planejamento ambiental adequado.

Palavras-chave: Rio Camaquã, vulnerabilidade natural, sensoriamento remoto

ABSTRACT

The effectiveness of the environmental management of a territory depends largely on researches and previous systematic studies on the main elements and conditions of the physical environment. To carry out these studies, in this paper we used the method of analysis of vulnerability to natural erosion, which is based on the methodology proposed by Crepani et al. (1996; 2001). This study aims to establish the environmental vulnerability of the basic territorial units considering the relationship between morphogenesis and pedogenesis processes from the integrated analysis of rock, soil, relief, vegetation and land use and cover and also analyze the multi-temporal landscape dynamic (1991-2014) by the high increase in forestry in the western portion of the watershed of the Camaquã River - RS. The study area is considered of high environmental interest because it is located in the Pampa Biome, which has a predominance of native grasslands, riparian forests, slope forests, shrub formations, "butiazais", wetlands and rocky outcrops, with estimates that there are 3,000 plant species and over 450 grass species, plus more than 500 bird species in the fauna. From all this peculiarity the analysis of vulnerability to natural erosion of the western portion of the Camaquã watershed brought as a result that the study area is not considered stable with respect to its characteristics of the physical environment and influence of human activity. The more stable UTBs (Lowly Stable and Moderately Stable) are located in areas with fewer predispositions to erosion, with balance between morphogenesis and pedogenesis. The moderately stable/vulnerable areas correspond to 82% of the total area and are considered to be in transition to the vulnerability and 56% of the total study area is already considered moderately vulnerable. These areas are the most significant in the study area and occur throughout the region, especially in the limitations of dystrophic red podzolic soils, Residuais Plateau geomorphological unit, altitudes greater than 200 meters and land use and cover classes such as reforestation and agriculture. The lowly vulnerable areas predominated in the central portion, northwest and southwest, to the total amount to 12% of the territory studied. These areas occur mainly where there are geological formations of Rosário do Sul and Depósitos Aluvionares, associated with other variables with medium/high vulnerability, as eutrophic litholic soils and dystrophic red podzolic soils, Rebaixado Marginal Plateau geomorphological unit, altitudes greater than 200 meters and land use and cover classes as bare soil, forestry and agriculture. This classification is due to the fact that the Depósitos Aluvionares are considered the most unstable geological classes because this classification presents the sands, gravels, silts and sediments of the floodplain deposits and the river network. Regarding multi-temporal dynamics of forestry areas, it was concluded that in 1991 reforestation areas use to cover approximately 32,025 hectares of land in forestry and in 2014 this number reached 124,256 hectares. It was noticed that the areas that already existed plantations were eventually expanded, without any protection zone to prevent the aggressive invasion of alien species in the areas of native forest. However, does not apply in this work, the opposition related to exotic forest plantations, but actually the non extension of large areas in a biome of such importance and that according to the Environment Ministry must have constant care and preservation, to achieve lower environmental impacts. So, the mapping of natural vulnerability to erosion and the study on the dynamics of multitemporal reforestation areas can assist in future territorial administrations, allowing more organization along the appropriate environmental planning.

Keywords: Camaquã River, natural vulnerability, remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de processamento digital de imagens.....	20
Figura 2 - Demonstração da mistura espectral contida no pixel.....	21
Figura 3 - Exemplificação da mistura espectral presente no pixel.....	23
Figura 4 - Localização da área de estudo.....	29
Figura 5 - Censo demográfico 2010 do município de Canguçu - IBGE.....	30
Figura 6 - Censo demográfico 2010 do município de Encruzilhada do Sul - IBGE.....	31
Figura 7 - Censo demográfico 2010 do município de Piratini - IBGE.....	32
Figura 8 - Diferentes formações vegetais na área de estudo.....	36
Figura 9 - Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.....	39
Figura 10 - Etapas de digitalização dos mapas temáticos.....	42
Figura 11 - Mapa Cadastral das Unidades Territoriais Básicas (UTBs).....	45
Figura 12 - Exemplo da rotina de programação em LEGAL para operação Média Zonal para o tema Hipsometria.....	58
Figura 13 - Registro da cena 222/081 para posteriormente ser mosaicada com a cena 222/082.....	61
Figura 14 - Comportamento espectral padrão a ser orientado para seleção manual de pixels puros.....	63
Figura 15 - Resposta espectral com a seleção manual dos pixels puros no <i>software</i> SPRING.....	64
Figura 16 - Imagens fração vegetação, solo e sombra gerados pelo MLME, cenas do satélite <i>Landsat8</i> e respectiva composição colorida.....	64
Figura 17 - Aplicação do realce linear nas bandas originais do satélite <i>Landsat8</i> e na composição do MLME.....	66
Figura 18 - Exemplificação da classe temática solo exposto e agricultura na mesma área no mosaico em épocas diferentes.....	69
Figura 19 - Áreas de reflorestamento no município de Piratini.....	71
Figura 20 - Rio Camaquã na divisa entre Encruzilhada do Sul e Canguçu.....	72
Figura 21 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra da porção oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã.....	74
Figura 22 - Mapa geomorfológico da porção da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã.....	76
Figura 23 - Mapa Hipsométrico da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	78
Figura 24 - Mapa de Declividade da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	79
Figura 25 - Mapa de Solos da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	82
Figura 26 - Mapa Geológico da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	85
Figura 27 - Mapa da vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	89
Figura 28 - Banco de dados geo-relacional.....	90
Figura 29 - Parâmetros dos Componentes Principais.....	92
Figura 30 - Composição colorida entre a 1ª e 2ª Componente Principal e a Banda 5 do satélite <i>Landsat 8</i> (2014).....	92
Figura 31 - Detecção de mudanças das áreas de reflorestamento de 1991 a 2014.....	93
Figura 32 - Mapa da dinâmica temporal da Silvicultura na porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do satélite <i>Landsat 8</i>	18
Tabela 2 - Áreas dos municípios que compõem a região de estudo.....	28
Tabela 3 - Valores de vulnerabilidade das unidades de paisagem de acordo com a relação pedogênese/morfogênese.	40
Tabela 4 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para as unidades geomorfológicas.	47
Tabela 5 - Valores de vulnerabilidade para as classes de hipsometria.	47
Tabela 6 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para a declividade das encostas.....	47
Tabela 7 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade à denudação das rochas.	49
Tabela 8 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para tipos de solos.	50
Tabela 9 - Definições das classes de uso e cobertura da terra.	51
Tabela 10 - Calendário agrícola para algumas espécies no Rio Grande do Sul.	52
Tabela 11 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para as classes de uso e cobertura da terra.	53
Tabela 12 - Classes de uso e cobertura da terra e suas associações no campo e na imagem de satélite.	54
Tabela 13 - Atributos das UTBs. (Continua).....	55
Tabela 14 - Representação da vulnerabilidade e/ou estabilidade das UTBs. (Continua)	59
Tabela 15 - Valores de Estabilidade/Vulnerabilidade para as classes de uso e cobertura da terra.	73
Tabela 16 - Medidas de classes para os solos da área de estudo em Ha e %.	81
Tabela 17 - Formações geológicas presentes na área de estudo.....	83

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Conceitos diferenciados de fragilidade e vulnerabilidade ambiental	15
2.2 Geotecnologias	16
2.2.1 Sensoriamento remoto	16
2.2.2 Satélite <i>Landsat</i> 8 – Sensor OLI	18
2.2.3 Processamento digital de imagens	19
2.2.3.1 Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME	20
2.2.3.2 Análise por Componentes Principais – ACP	24
2.2.4 Álgebra de Mapas	25
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
3.1. Localização da área de estudo	28
3.2 População e economia	29
3.2.1 Município de Canguçu	29
3.2.2 Município de Encruzilhada do Sul	30
3.2.3 Município de Piratini	31
3.3 Caracterização física da área de estudo	33
3.3.1 Solos	33
3.3.2 Geologia	34
3.3.3 Geomorfologia	34
3.2.4 Vegetação	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 Materiais utilizados	37
4.1.1 Materiais cartográficos	37
4.1.2 Dados orbitais	37
4.1.3 Mapas temáticos	38
4.1.4 Sistema de Processamento	38
4.2 Procedimentos metodológicos	39
4.2.1 Elaboração do banco de dados no SIG - SPRING	41
4.2.2 Mapas temáticos	42
4.2.3 Dados orbitais - Processamentos digitais de imagem	42
4.2.4 Técnicas de Realce	43
4.2.5 Unidades Territoriais Básicas - UTBs	44
4.2.6 Análise ecodinâmica – Morfogênese/Pedogênese	45
4.2.6.1 Geomorfologia	46
4.2.6.2 Geologia	48
4.2.6.3 Solos	49
4.2.6.4 Uso e cobertura da terra	50
4.3 Trabalho de Campo	53
4.4 Mapa Cadastral – UTBs	54
4.5 Álgebra de Mapas	56
4.6 Detecção de mudanças da paisagem – Dinâmica multitemporal	60
4.6.1 Registro	60
4.6.2 Análise por Componentes Principais	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1 Processamento Digital de Imagens	62

5.1.2 Modelo Linear de Mistura Espectral	62
5.1.3 Realce Linear	65
5.1.4 Segmentação	66
5.2 Análise da vulnerabilidade natural a erosão da área de estudo.....	70
5.2.1 Uso e Cobertura da Terra.....	70
5.2.2 Geomorfologia.....	75
5.2.3 Pedologia	80
5.3 Vulnerabilidade Natural à Erosão	86
5.4 Banco de dados geo-relacional	90
5.5 Detecção de mudanças da paisagem – Espécies Exóticas	91
5.5.1 Análise por Componentes Principais - ACP.....	91
5.5.2 Classificação das áreas de mudança e não mudança	94
5.5.3 Análise multitemporal – 1991 a 2014	96
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICES	107

1. INTRODUÇÃO

As questões ambientais envolvem estudos em áreas de atuação de várias ciências, devido à análise das relações do meio ambiente e sua dinâmica que exigem uma visão integrada dos aspectos do meio físico dos sistemas naturais e de suas influências nos fatores socioeconômicos e políticos (AMARAL et. al, 2005).

O artigo 225, caput, da Constituição Federal, assevera que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida”, está incluído entre os direitos sociais e do meio ambiente (BRASIL, 1988).

Diante disso, o conceito de meio ambiente, segundo a Lei de Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6938/1981) em seu artigo 3º, inciso I, constitui-se como “o conjunto de condições, leis, influências, interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”. Assim, o meio ambiente é o conjunto de relações e interações que condiciona a vida, tendo importante papel na sociedade.

A Constituição Federal prevê, ainda no art. 225, o dever jurídico e constitucional de transmitir o patrimônio ambiental nas melhores condições, às futuras e atuais gerações. A partir disso, somente com práticas de preservação e controle ambiental o equilíbrio será alcançado, objetivando a diminuição das degradações causadas pelo homem, direta ou indiretamente.

A eficiência da gestão ambiental de um território depende em grande parte de levantamentos e estudos sistemáticos prévios sobre os principais elementos e condicionantes do meio físico. A ocupação inadequada do espaço e a utilização indevida dos recursos naturais podem acarretar sérios problemas ambientais.

Logo, para analisar uma unidade de paisagem natural é necessário conhecer sua gênese, sua constituição no meio físico, sua forma e tipo de uso e cobertura da terra. Estas informações são fornecidas pela geologia, geomorfologia, pela pedologia e pelo uso da terra. Estas áreas do conhecimento devem ser integradas para que se tenha uma visão real do comportamento de cada unidade diante de sua utilização (AMARAL et. al, 2005).

Para realizar esses estudos, neste trabalho utilizou-se o método da análise da vulnerabilidade natural à erosão, elaborada com base na metodologia proposta por Crepani et al. (1996;2001). Este método é fundamentado na análise morfodinâmica das

unidades de paisagem natural feita a partir dos princípios da ecodinâmica (TRICART, 1977), que estabelecem diferentes categorias morfodinâmicas resultantes dos processos de morfogênese ou pedogênese. Quando predomina a morfogênese prevalecem os processos erosivos, modificadores das formas de relevo e quando predomina a pedogênese prevalecem os processos formadores de solos.

Nesse sentido, o presente trabalho visa estabelecer a vulnerabilidade ambiental das unidades territoriais básicas considerando a relação entre os processos de morfogênese e pedogênese, a partir da análise integrada entre rocha, solo, relevo, vegetação e uso e cobertura da terra, da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã – RS.

O interesse pelo estudo da vulnerabilidade natural à erosão na porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã deve-se ao fato de ela ser uma área prioritária de preservação segundo o Ministério do Meio Ambiente e não se ter identificado trabalhos científicos acerca da vulnerabilidade ambiental dessa região. Foram relatados apenas estudos sobre a evolução geológica da Bacia do Camaquã (MISUSAKI, 2006), a tectônica e a sedimentação da área (SANTOS, 2010), além da evolução geográfica e paleogeográfica (FAMBRINI et. al, 2007), dentre outros trabalhos com outros focos centrais sem a inserção da temática do planejamento ambiental.

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do rio Camaquã, com ênfase nos indicadores do meio físico, identificando as diferentes unidades de paisagem visando fornecer subsídios para as ações de planejamento e gestão ambiental podendo vir a ser implementadas junto ao comitê da bacia hidrográfica, utilizando ferramentas de sensoriamento remoto. Além dos tópicos acima descritos, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e diagnosticar as vulnerabilidades do ambiente de acordo com as características físicas da região;
- Integrar os mapas de vulnerabilidade natural à erosão da geologia, dos solos, da geomorfologia e do uso e cobertura da terra por meio de álgebra de mapas;
- Analisar a dinâmica multitemporal das áreas de incremento de reflorestamento na área de estudo por meio da técnica de detecção de mudanças, durante o período de 1991 a 2014;

- Considerar as regiões distintas da área de estudo e seus graus de vulnerabilidade como subsídio ao planejamento ambiental-territorial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos diferenciados de fragilidade e vulnerabilidade ambiental

A necessidade de definir os conceitos de vulnerabilidade e fragilidade advém da existência de diversos estudos sobre o tema, com diferentes abordagens de análise

O conceito de fragilidade ambiental, segundo Ross (1994), incorpora os ambientes em relação aos diferentes níveis de fragilidade que possuem. Essas informações que permitem ao planejador elaborar ações para evitar a ocupação de certas áreas mais frágeis e também de intervenção técnica.

Assim, para os estudos de fragilidade dos ambientes, é necessária a adoção de uma metodologia de trabalho baseada na compreensão das características e da dinâmica do ambiente natural e do meio sócio-econômico, buscando a associação das diversas disciplinas específicas. Dessa forma, para realizar estudos de fragilidade natural é necessário que se tenha conhecimento dos solos, do relevo, da geologia e do clima da área estudada, além da ação das atividades humanas (ROSS, 1994).

Segundo Tamanini (2008), o conceito de fragilidade pode ser definido como a vulnerabilidade do ambiente ao sofrer qualquer tipo de impacto, relacionado aos fatores de desequilíbrio de ordem natural e antropogênica. No entanto, para os autores Vitae e Mello (2009) a fragilidade ambiental está ligada a fatores de desequilíbrio, tanto de ordem natural (declividade, erodibilidade, variações climáticas), quanto social.

Quanto ao estudo da vulnerabilidade, requer a delimitação do sistema ambiental em estudo, assim como a identificação dos seus elementos constituintes. A escolha dos indicadores deve estar associada ao conceito de vulnerabilidade adotado e ao objetivo da análise (EMBRAPA, 2010).

O conceito de vulnerabilidade ambiental, tema desse estudo, segundo Lima et al. (2000), a vulnerabilidade de um ecossistema é avaliada de acordo com as características do meio físico (solo, rocha, relevo, clima e recursos hídricos), biótico (tipo de vegetação) e antrópico (uso e ocupação do solo), que tornam o relevo mais ou menos instável ou sujeito a processos erosivos.

Gallopín (2006) avaliou que o termo vulnerabilidade é normalmente compreendido como a susceptibilidade de um sistema a um dano, quando sujeito a uma perturbação ou pressão ambiental, ao invés de medida de um dano real.

De acordo com Adger (2006), as definições de vulnerabilidade, atrelam esse conceito a um ou mais dos seguintes fatores: exposição, sensibilidade e resiliência. O estudo desses fatores permite a avaliação da maior ou menor vulnerabilidade de um sistema a determinadas questões ambientais. Nesse contexto, um sistema é mais vulnerável quanto maior as pressões e a sensibilidade do meio e menor sua capacidade adaptativa.

Frente a esses conceitos, será utilizada nesse trabalho a denominação de vulnerabilidade ambiental. Esse trabalho não pretende determinar a questão etimológica-conceitual desses termos, porém se faz necessária a denominação do autor segundo seus objetivos, análises e indicadores de estudo de acordo com a menor ou maior suscetibilidade das características do seu meio físico.

A partir disso, Simões et al. (1998) apud Rovani (2013) salienta que conhecer a vulnerabilidade natural das unidades de paisagem tem um papel fundamental para a previsão dos comportamentos futuros dos sistemas naturais que atuam no processo de ocupação e adensamento da atividade social.

Sendo assim, por meio da análise da vulnerabilidade é possível identificar as regiões da área de estudo, segundo potencialidades e vulnerabilidades, fundamentais para o processo de compreensão do cenário atual, integrando políticas públicas e colaborando para o processo de tomada de decisões para ordenamento do território.

2.2 Geotecnologias

As geotecnologias são o conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação com referência geográfica. As geotecnologias referentes ao sensoriamento remoto e aos sistemas de informações geográficas (SIG) estão cada vez mais interligadas entre si.

2.2.1 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto pode ser definido, de maneira mais estreita, se distanciando do conceito amplo de ser considerado apenas como aquisições de informações e características de um objeto sem entrar em contato físico com ele. Essa definição é considerada ineficaz ao caracterizarmos as inúmeras ações e análises

provindas dos produtos de sensoriamento remoto. Segundo Elachi apud Novo (2010), caracterizando de forma estreita e válida:

“Sensoriamento remoto implica na obtenção de informação a partir da detecção e mensuração das mudanças que um determinado objeto impõe aos campos de força que o circundam, sejam estes campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais.”

Aliado a isso, pode-se entender que as interações das substâncias e características presentes na superfície terrestre com a radiação eletromagnética nos permitem analisar, estudar e aferir sobre distintos fenômenos e processos ocorridos. Essas análises são permitidas por meio de um conjunto de sensores, equipamentos de transmissão de dados em plataformas suborbitais, orbitais e espectroradiômetros de campo, por exemplo. Esses sensores são capazes de coletar características dos objetos, com a finalidade de extrair as informações desejadas (NOVO, 2010).

A obtenção de informação confiável sobre os objetos físicos e o ambiente é permitida por meio dos processos de registro, medição e interpretação de imagens e representações digitais que nos mostram a representação da radiação eletromagnética nos garantindo aferir sobre os diferentes padrões e permitir analisar e concluir sobre eventos múltiplos e associados.

Os sensores registram informações espectrais das diferentes regiões do espectro eletromagnético, como radiação ultravioleta, visível, infravermelho e microondas. A análise destes dados é adquirida por meio visual e realçados por processamento digital de imagens, visando uma associação do sensoriamento remoto com outras ciências da informação geográfica, como cartografia, levantamento e sistemas de informação geográfica (SIG) (JENSEN, 2009).

A coleta dos dados de sensoriamento remoto pode ser detectada usando sensores ativos ou passivos. Esses sensores remotos se caracterizam pelo registro da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelo terreno. Os sensores ativos, como os de microondas, Sonar ou Lidar, fornecem sua própria energia eletromagnética como fonte de iluminação e medem o fluxo radiante retroespalhado. Em relação aos sistemas passivos de sensoriamento remoto, podem-se citar como exemplos os sensores suborbitais como filmes pancromáticos, coloridos, câmeras métricas digitais (CCD); sensores em satélites como NOAA, *Landsat 5, 7 e 8*, Spot 4, MODIS, Ikonos, Aster, QuickBird, dentre outros.

2.2.2 Satélite *Landsat 8* – Sensor OLI

Em 11 de fevereiro de 2013 foi lançada ao espaço a Missão de Continuidade dos Dados Landsat (LDCM) – *Landsat 8*. O satélite *Landsat 8* possui dois sensores: o sensor espectral OLI e o sensor termal TIRS. Em relação ao satélite *Landsat 5* foram adicionadas duas novas bandas espectrais, a new coastal (banda 1), tendo como finalidade a análise e monitoramento dos recursos hídricos e monitoramento da zona costeira, e um novo canal de infravermelho (banda 9), para a detecção de nuvens cirros.

As bandas obtiveram mudanças nas suas faixas de comprimentos de onda em relação aos satélites anteriores da série *Landsat*. Quanto ao sensor termal TIRS, foram criadas duas bandas espectrais, TIRS 1 e TIRS2, para o comprimento de onda antes coberto por uma única banda nos sensores TM e ETM, com resolução espacial de 100 metros (USGS, 2013).

A resolução radiométrica do *Landsat 8* mudou de 8 bits (*Landsat 5*) para 12 bits. Essa melhoria possibilita uma maior caracterização de alvos da imagem, e podem contribuir bastante para a diminuição do efeito de sombras.

Em relação a resolução espacial, as bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 9 possuem uma resolução de 30 metros como era nas outras séries *Landsat*; as bandas termais 10 e 11 possuem uma resolução de 100 metros; e a banda 8 (pancromática) possui uma resolução de 15 metros, conforme a Tabela 1 (USGS, 2013).

Tabela 1 - Características do satélite *Landsat 8*.

Landsat 8 – Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Banda 1 – Coastal aerossol	0.43 – 0.45	30
Banda 2 – Blue	0.45 – 0.51	30
Banda 3 – Green	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Red	0.64 – 0.67	30
Banda 5 – Near Infrared (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Panchromatic	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – Cirrus	1.36 – 1.38	30
Banda 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100
Banda 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

Fonte: USGS (2013)

2.2.3 Processamento digital de imagens

Os produtos fornecidos pelos sensores dos satélites garantem um fluxo contínuo de informações com diferentes frequências temporais e espaciais, sendo utilizados por várias disciplinas e especialistas, fornecendo-nos múltiplos usos e análises (LIU, 2006). Como, por exemplo, estudar fenômenos oceânicos, monitorar queimadas e desflorestamentos, gerar mapas geológicos, de uso e cobertura da terra, mapear recursos hídricos, áreas agrícolas, áreas urbanas, medir transformações e expansão de ambientes, dentre outros.

A partir disso, uma imagem de satélite é uma matriz de dimensões x linhas por y colunas, com cada elemento possuindo um atributo z (CROSTA, 1992), com diferentes níveis decimais em função do número de bits, sua resolução radiométrica (NOVO, 2010), constituída por dados da emissão ou reflexão da energia de uma área da superfície terrestre, expressos em nível de cinza, em determinados comprimentos de onda do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011).

De acordo com o autor, pode-se dividir as etapas do processamento digital de imagens em três: pré-processamento, classificação e pós-processamento. A etapa de pré-processamento é caracterizada pelos procedimentos computacionais aplicados às imagens de satélites, com o intuito de refinar a qualidade visual das imagens, como por exemplo, georreferenciamento, realce, restauração, filtragem, operação aritmética, transformação IHS, modelo linear de mistura espectral e componentes principais. Essas pré-atividades são consideradas também como o tratamento inicial dos dados brutos como a calibração radiométrica, a correção de distorções geométricas e a remoção do ruído (NOVO, 2010).

Na sequência, considera-se a etapa de classificação, quando se associa classes aos conjuntos de pixel de acordo com as características que se deseja classificar. A maneira de categorizar os valores de níveis de cinza é realizada por meio de algoritmos estatísticos que reconhecem os padrões (assinatura) espectrais, geralmente inseridos em pacotes de Sistemas de Informação Geográfica, que realizam processamento digital de imagens. A classificação pode ser supervisionada ou não supervisionada, diferenciando-os em relação a interatividade do analista com a área de estudo. E para finalizar, tem-se a etapa de pós-processamento que é considerada como edição matricial com a finalidade de melhorar a precisão do mapa temático.

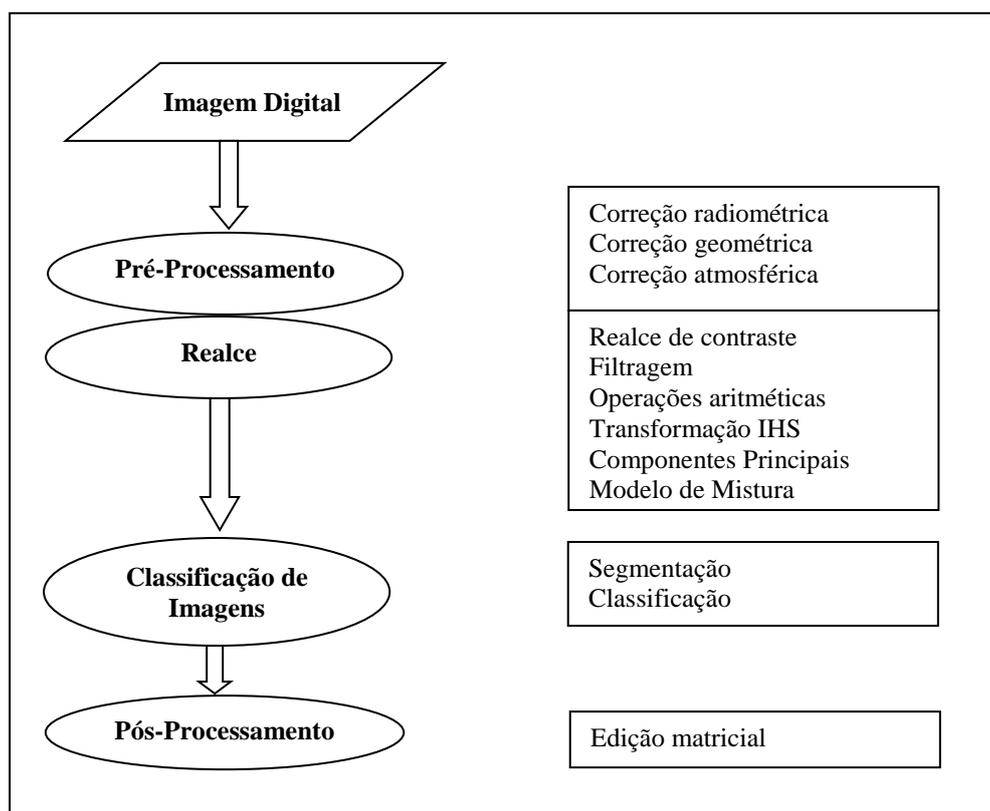


Figura 1 - Etapas de processamento digital de imagens.

2.2.3.1 Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME

Um alvo na superfície terrestre tem sua reflectância espectral específica, e essa característica faz com que seja possível diferenciá-lo de outros em uma classificação de imagens, por exemplo. A intensidade dessa energia refletida ou emitida por um objeto está inserida no pixel, caracterizado por ser um elemento de resolução (SHIMABUKURO e PONZONI, 2009).

Geralmente, os alvos não são do tipo simples, onde só apresentam um objeto uniforme, como uma lagoa. Na maioria das vezes, eles são compostos de um ou mais objetos, caracterizando uma mistura espectral, por exemplo, de floresta e solo nu, ocasionando uma maior dificuldade na classificação desse alvo. A partir disso, surge a necessidade de estimar as porções das áreas ocupadas pelos diferentes objetos e delinear o limite dessas classes dentro de um pixel de mistura (LIU, 2006).

Juntamente a isso, um dos definidores da mistura espectral é a resolução espacial. De maneira geral, considera-se a resposta espectral da mistura contida no pixel da combinação de três componentes: solo, vegetação e água/sombra (MOREIRA,

2011). Cada sistema sensor está posicionado em uma altitude, caracterizando uma resolução espacial específica e a radiância explicitada no seu produto imagem será consequência das propriedades físico-químicas dos objetos contidos dentro do pixel juntamente com a interferência atmosférica.

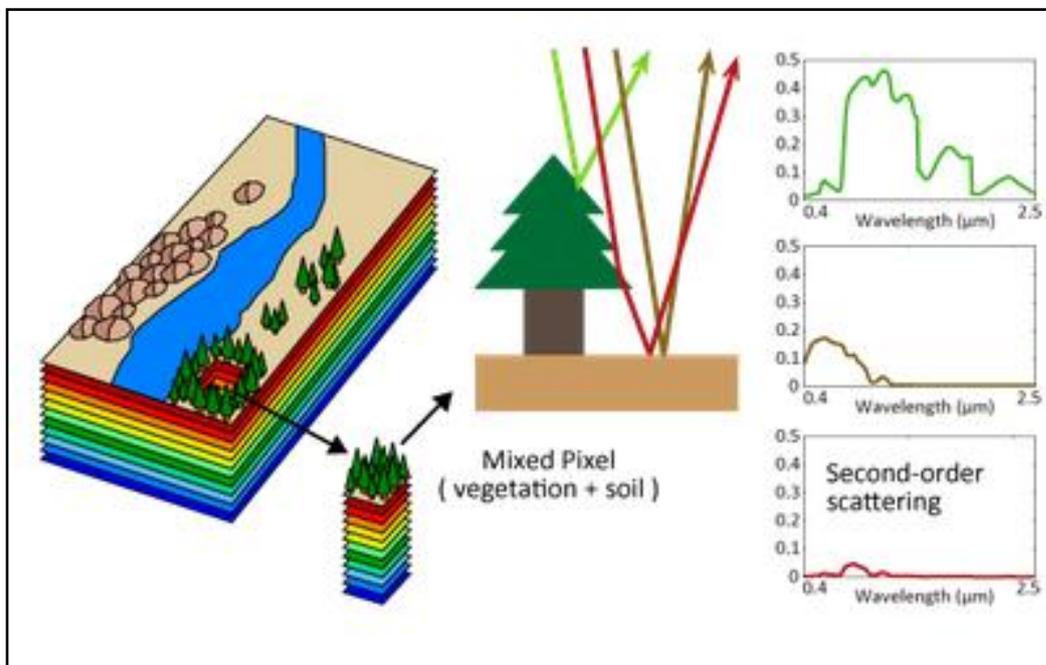


Figura 2 - Demonstração da mistura espectral contida no pixel.
Fonte: Yokoya et. al (2014)

O sensor somente irá representar apenas um material, se ele apresentar um único objeto, o que de fato não ocorre na realidade. Com isso, temos associado o conceito de mistura espectral aliado aos alvos terrestres. A mistura espectral, dependendo das características específicas dos alvos no terreno, e pode ser linear ou não linear. Nessa pesquisa utilizou-se o modelo linear de mistura espectral.

O modelo linear de mistura espectral (MLME) parte do princípio que a resposta espectral em cada pixel e em qualquer banda pode ser considerada como uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente que constitui essa mistura. Shimabukuro e Ponzoni (2009), afirmam que ao conhecer a proporção dos componentes dessa mistura, pode-se estimar a resposta espectral de cada uma delas, ou se a resposta espectral de cada componente for conhecida, a proporção de cada componente na mistura pode ser estimada.

O MLME realiza a decomposição da reflectância contida em um determinado pixel, em três componentes referentes à vegetação, solo, sombra. O modelo linear de

mistura espectral pode ser escrito de acordo com as seguintes equações (SHIMABUKURO e PONZONI, 2010), :

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{a}_{ij} \mathbf{x}_j + \mathbf{a}_{ij} \mathbf{x}_j + \dots + \mathbf{a}_{in} \mathbf{x}_n + \mathbf{e}_i \quad (1.1)$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{a}_{ij} \mathbf{x}_j + \mathbf{a}_{ij} \mathbf{x}_j + \dots + \mathbf{a}_{in} \mathbf{x}_n + \mathbf{e}_i \quad (1.2)$$

...

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{a}_{mi} \mathbf{x}_j + \mathbf{a}_{mj} \mathbf{x}_i + \dots + \mathbf{a}_{in} \mathbf{x}_n + \mathbf{e}_m \quad (1.3)$$

Onde:

\mathbf{r}_i = Reflectância espectral média na i-ésima banda espectral de um pixel;

\mathbf{a}_{ij} = Reflectância espectral da j-ésima componente no pixel para a i-ésima banda espectral;

\mathbf{x}_j = valor de proporção do j-ésima componente do pixel;

\mathbf{e}_i = corresponde para a i-ésima banda espectral;

$i = 1, 2, \dots, m$ (m = número de bandas espectrais para o sistema sensor).

O resultado da decomposição linear gera as imagens-fração solo, vegetação e sombra, transformando a informação espectral em informação física, com valores de proporção de cada componente no pixel (MOREIRA, 2011).

De maneira simplificada, o modelo de mistura espectral também pode ser escrito como, segundo Moreira (2011):

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{a} * \text{vegetação} + \mathbf{b} * \text{solo} + \mathbf{c} * \text{sombra} + \mathbf{e}_i, \quad (1.4)$$

Onde:

\mathbf{r}_i = Resposta do pixel na banda i;

\mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} : proporções de vegetação, solo e sombra;

\mathbf{e}_i = Erro na banda i e i indica a banda do sensor.

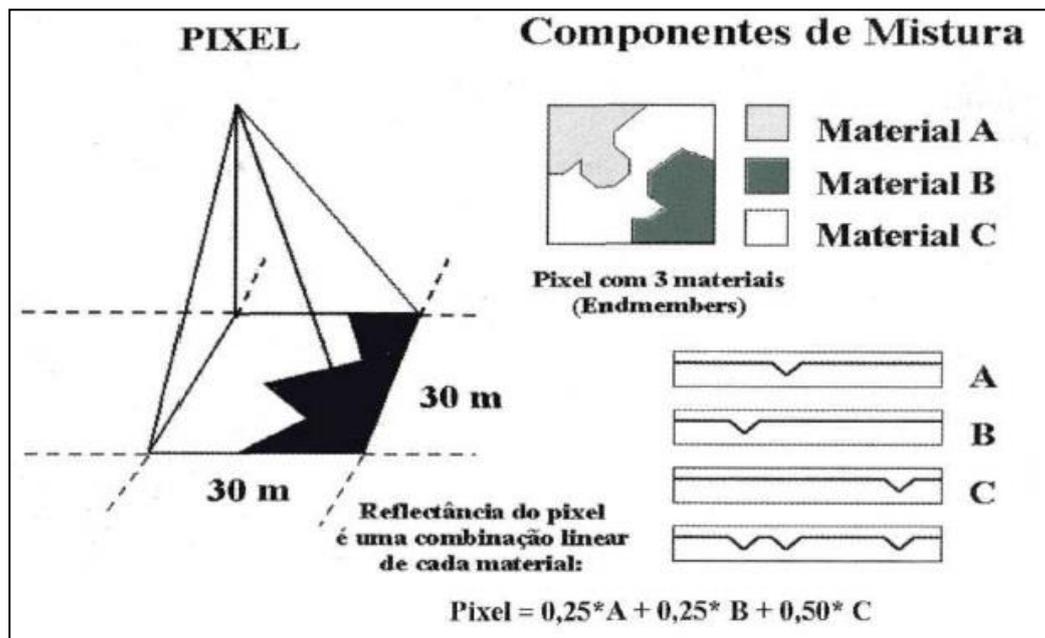


Figura 3 - Exemplificação da mistura espectral presente no pixel.

Fonte: Kawakubo et. al (2004)

Os métodos existentes para a escolha das componentes (*endmembers*) podem ser por diferentes métodos, como o uso de assinaturas espectrais contidas em bibliotecas espectrais e escolha de pixels puros representativos.

A utilização do modelo linear de mistura espectral mostrou-se eficiente e viável em trabalhos como o de Anderson et. al (2005), onde a metodologia buscou a aplicação do modelo nas imagens reflectância para a geração das imagens fração sombra. A imagem fração sombra gerada a partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral na imagem diária do sensor MODIS (produto MOD09), apresentou um maior potencial para a identificação de cicatrizes de áreas queimadas que as imagens fração sombra de mesma resolução espacial, derivadas das composições mensais do produto MOD13A1.

O trabalho de Bausch e Quaresma (2009), tendo como base a aplicação do MLME, possibilitou detectar os padrões de escoamento como estradas, carreadores, pátios, além de diferenciação entre as práticas de manejo florestal adequado e as de desmatamento progressivos, foi possível, por meio da aplicação do modelo, detectar usos e explorações de baixa intensidade na floresta, demonstrando que a metodologia pode vir a ser uma ferramenta muito importante no monitoramento de intervenções incipientes ou de uso racional dos recursos florestais.

Além disso, o modelo foi útil para analisar os tipos de águas no Lago Paranoá em Brasília (BIAS e BARBOSA, 2011). Os autores concluíram que a aplicação do MLME sob cenas de dois períodos diferentes do sensor *Landsat 5 TM*, uma em época chuvosa e outra da época seca é uma ferramenta de grande potencialidade para os processos de planejamento ambiental, permitindo estudar a dispersão de poluentes, mapeando o contato entre água branca e água preta, de modo a separar domínios de diferentes densidades e temperaturas.

Borges e Santos (2009) aplicaram o MLME no monitoramento do cerrado, na sub-bacia do Rio Caririnha, localizada na divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia. Os autores utilizaram a componente solo de diferentes datas, 2001 e 2007, a fim de aplicar o cálculo de subtração das imagens fração e medir o incremento de desmatamento durante esses anos, e concluíram que a aplicação do modelo adequou-se ao objetivo do trabalho.

2.2.3.2 Análise por Componentes Principais – ACP

A técnica de análise por componentes principais foi criada por Pearson (1901). É considerada uma técnica estatística de análise multivariada que utiliza transformações lineares, descrevendo a relação das variáveis e estudando as suas associações. De uma maneira geral, o cálculo das componentes principais de um conjunto de dados é realizado primeiramente com obtenção dos autovalores e os autovetores por meio da matriz de correlação ou da matriz de variância-covariância entre as variáveis do conjunto (COUTINHO et. al, 2010).

A análise por componentes principais (ACP) é considerada um processamento digital de imagens como método estatístico eficaz na detecção de mudanças na paisagem, intuito da aplicação da técnica nesse trabalho. A detecção de mudanças é caracterizada pela identificação das alterações no estado de um objeto ou fenômeno por meio da aferição das diferenças entre duas ou mais imagens de satélite da mesma área em diferentes épocas (DUARTE et. al, 2009).

Além da detecção de mudanças em imagens multitemporais, a técnica de análise por componentes principais tem também como função determinar a extensão da correlação das bandas das imagens e removê-la, reduzindo a dimensão dos dados e excluindo as informações redundantes.

Os componentes principais apresentam propriedades importantes, pois cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, independentes entre si e contém o máximo de informação, aliada à ideia de redução da massa de dados, com menor perda possível da informação (IBGE, 2001).

Na análise por componentes principais se realiza uma transformação dos canais originais da imagem com o cálculo da matriz de covariância entre as bandas, permitindo gerar os novos canais. Por meio da matriz de covariância se calculam os autovalores e autovetores da matriz que são de suma importância para a utilização da ACP, onde os autovalores indicam a contribuição de cada componente em termos de variância total dos conjuntos de dados e os autovetores indicam a contribuição de cada banda específica para a geração de cada componente principal (NOVO, 2008). As novas variáveis (componentes principais) são não correlacionadas, sendo a primeira componente principal a imagem que possui a maior variância total, seguida pelas outras componentes com uma menor variância dos dados (FLORENZANO, 2011).

Algo que vale ser destacado, é que os sensores, em sua maioria, apresentam ruídos, porém esses ruídos são informações não-correlacionadas entre as bandas, permitindo que ao utilizarmos a análise por componentes principais eles possam ser extraídos dos conjuntos das bandas multiespectrais, visto que se concentram nas últimas PCs (CROSTA, 1992).

Associada às essas informações, a técnica tem como vantagem o realce dos dados da dinâmica multitemporal das imagens. Em relação a detecção de mudanças, a principal atividade executada pela ACP pode ser explicada da seguinte maneira: as duas bandas do satélite *Landsat5* (TM3 - 1991) e *Landsat8* (TM4 - 2014), foram analisadas suas correlações e gerou-se um novo conjunto de imagens TM3 (1991) e TM4 (2014) com informação que é comum a todas as bandas originais (1ª CP) e irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto. Quanto mais alta a ordem das CPs, as feições espectrais serão menos significantes e a última terá somente a informação que sobrar no conjunto (CROSTA,1992).

2.2.4 Álgebra de Mapas

Segundo Cordeiro et. al (2007), a distinção de um SIG para outros tipos de sistemas de informação é a capacidade de realizar análises espaciais. Essas análises são feitas a partir de funções que utilizam atributos espaciais e não espaciais de entidades

gráficas que são armazenadas em um banco de dados espacial e também permitem fazer modelagens sobre fenômenos do mundo real. A análise espacial é considerada o ponto crucial dos SIGs, caracterizada, de maneira geral, quando a informação sobre a localização geográfica é essencial, equivalendo a um conjunto de métodos cujos resultados dependem e variam conforme mudam a localização dos objetos em estudo (LONGLEY et. al, 2013).

A partir disso, o termo “álgebra de mapas” foi inicialmente utilizado por Tomlin em 1990 com o livro “*Geographic information systems and cartographic modelling*”, onde os elementos que consistiam as rotinas de programação para a álgebra de mapas teriam valores quantitativos (escalar, ordinal, cardinal ou intervalar) ou qualitativo (nominal) associados (CORDEIRO et. al, 2007).

As operações de álgebra de mapas podem ser realizadas sobre campos e objetos. Os geo-campos analisam o espaço geográfico como uma superfície contínua com variação de fenômenos representados por um atributo, o qual possui valores em todos os pontos inseridos em uma área geográfica. Já os geo-objetos são uma entidade geográfica singular e indivisível, com geometrias de fronteira fechada, com limites visíveis (CÂMARA, 2005).

As operações de álgebras de mapas mais utilizadas formam um conjunto de operadores, onde na maioria das vezes se trabalha com variáveis, como campos geográficos, os geo-campos. As operações sobre geo-campos podem ser classificadas como pontuais, de vizinhança e zonais (TOMLIN, 1990). Em relação aos operadores sobre objetos, tem-se as operações de restrições sobre atributos, restrições espaciais e propriedades de objetos que são baseadas nas relações topológicas entre os objetos.

Quanto aos operadores de geo-campos, tem-se as operações pontuais que geram um geo-campo de saída com valores dependentes do geo-campo de entrada em cada área geográfica correspondente. As operações pontuais podem ser subdivididas em operações de transformação (unárias), operações booleanas e operações matemáticas. As operações de transformação podem apresentar operadores de ponderação, operadores de reclassificação e operadores de fatiamento, nesse caso todos esses tipos descritos de operadores pontuais foram utilizados nesse trabalho.

As operações de vizinhança atuam sobre um geo-campo de entrada que analisa o campo de saída com base na dimensão e forma das características da sua vizinhança. Os operadores de vizinhança são classificados em minoria, declividade, intervalo, filtragem e diversidade.

Em relação aos operadores zonais, as operações são realizadas em regiões específicas, estáticas, como as áreas delimitadas pelos geo-objetos, definidas por meio de operações booleanas envolvendo campos com informações de modelo de dados do tipo Cadastral, por exemplo. Os operadores zonais mais usados são classificados em máximo zonal, mínimo zonal, maioria zonal, e foram utilizados nesse trabalho.

Essas operações podem ser realizadas em diversos *softwares*, porém destaca-se o SIG SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pelo INPE, que possui a característica de realizar as operações de álgebra de mapas via programação de rotinas por meio da Linguagem LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) associada também à várias outras capacidades de processamentos digitais e consulta ao banco de dados espaciais via geo-objetos.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização da área de estudo

A área em estudo corresponde à porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã, localizada na região Centro-Sul do estado do Rio Grande do Sul.

As áreas totais dos polígonos municipais caracterizam por: Encruzilhada do Sul abrangendo 2044,57 km², Piratini com 1571,39 km² e Canguçu com 1807,29 km² (IBGE, 2010).

Tabela 2 - Áreas dos municípios que compõem a região de estudo.
Fonte: IBGE (2010)

Municípios	Área total - IBGE (Km²)	Área de estudo (Km²)	Área de estudo (%)
Encruzilhada do Sul	3.348,32	2044,57	61,06%
Canguçu	3.525,29	1571,39	44,57%
Piratini	3.539,69	1807,29	51,06%
Total	10.413,30	5423,25	52,08%

A porção geográfica estudada compreende parcialmente a área de três municípios, sendo eles Encruzilhada do Sul, Piratini e Canguçu, como demonstrado na Figura 4. Para fins desse estudo, utilizou-se apenas a área dos municípios que se encontram dentro dos limites da bacia hidrográfica do Rio Camaquã, excluindo a área ao norte de Encruzilhada do Sul e ao sul de Piratini e Canguçu.

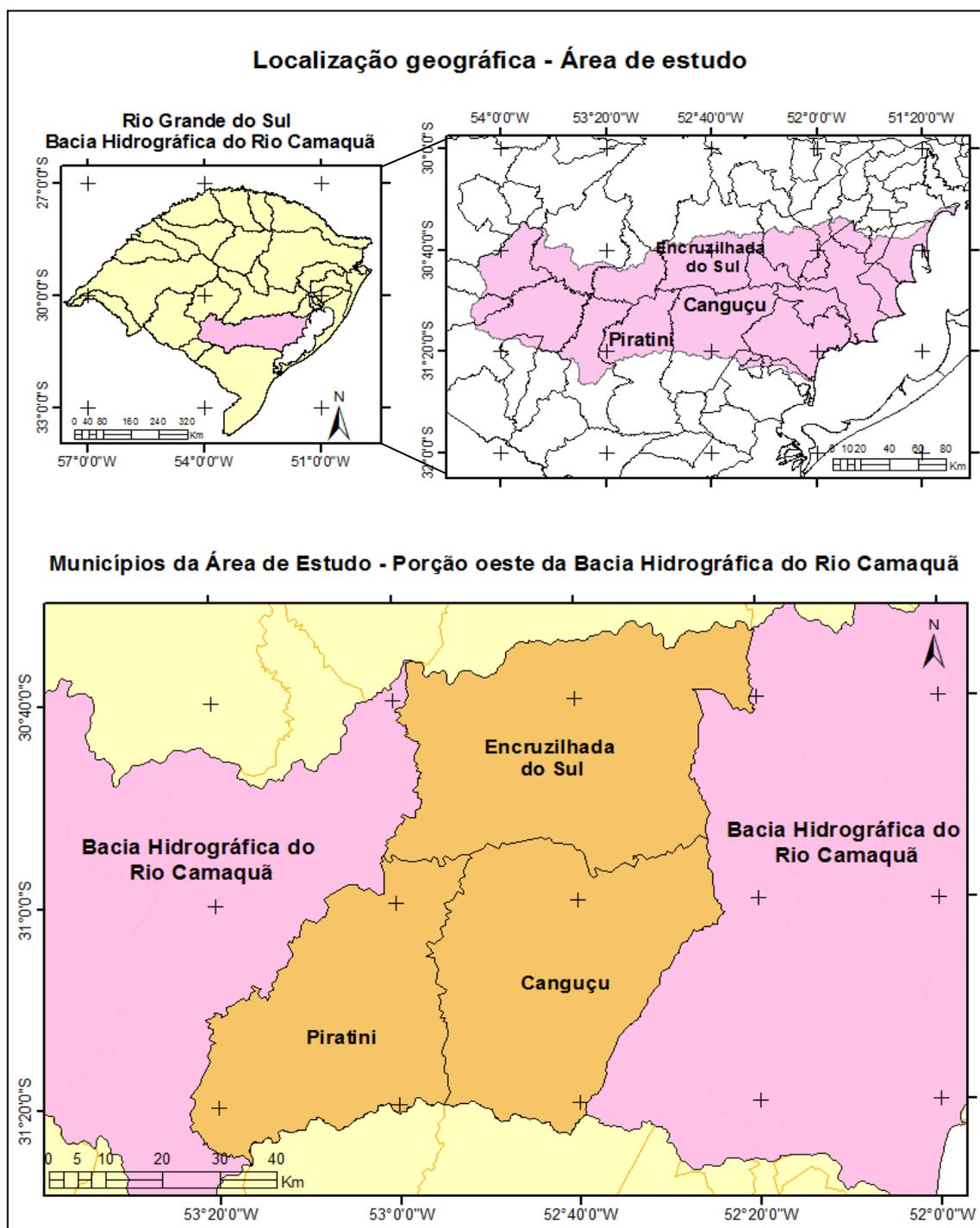


Figura 4 - Localização da área de estudo.

3.2 População e economia

3.2.1 Município de Canguçu

Segundo o último censo do IBGE, em 2010, o município de Canguçu apresenta uma população de 53.259 habitantes, apresentando um decréscimo de 288 pessoas em relação ao ano de 2007, com população estimada em 2014 para 55.637 habitantes.

Desde 1991, a cidade apresentou um acréscimo de 2.892 habitantes, apresentando valores baixos em relação aos outros municípios compreendidos pela área de estudo. A cidade de Canguçu, conforme a Figura 5, apresenta uma densidade de homens maiores quanto às faixas etárias de 10 a 14 anos até 55 a 59 anos, já quanto à população mais velha, as mulheres predominam, perfazendo um total de 4.409 habitantes. A taxa de urbanização de Canguçu é de 64%.

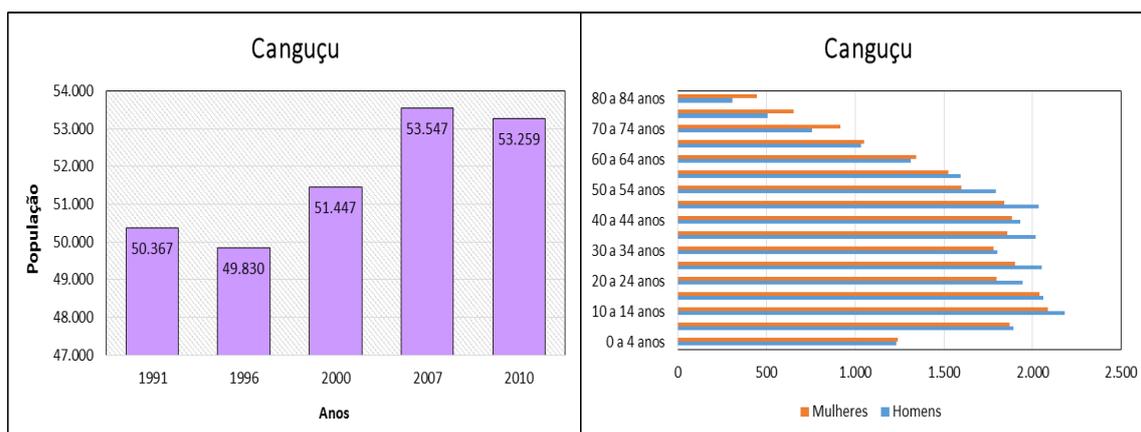


Figura 5 - Censo demográfico 2010 do município de Canguçu - IBGE

A economia de Canguçu é baseada principalmente em culturas temporárias como o milho, abrangendo uma área plantada de 20.200 hectares em 2012; a soja, totalizando uma produção de 15.000 hectares; fumo 9.470 hectares e feijão 4.650 hectares. No município também há lavouras permanentes de pêssigo, laranja e figo como parte do alicerce da economia local (IBGE, 2007).

Quanto à produção vegetal e silvicultura, o município apresentou em 2006, 15.036 hectares com florestas plantadas com essências florestais, além da produção de carvão vegetal, totalizando uma quantidade produzida de 39 toneladas em 2012 e madeira em tora para diferentes finalidades (IBGE, 2012).

3.2.2 Município de Encruzilhada do Sul

O município de Encruzilhada do Sul está localizado na porção norte da área de estudo e totaliza 25.534 habitantes, segundo o censo demográfico do IBGE realizado em 2010, com expectativa de 25.647 pessoas em 2014. O histórico de crescimento populacional da cidade é baixo, caracterizando-se por um aumento de apenas 3.055 habitantes de 1991 a 2010. Quanto à distribuição da faixa etária dos homens e mulheres

há uma diferença da tendência do município de Canguçu, abrangendo um número maior de mulheres dos 30 aos 39 anos e dos 75 anos até os mais de 100 anos (3 habitantes). A taxa de urbanização de Encruzilhada do Sul é 70%.

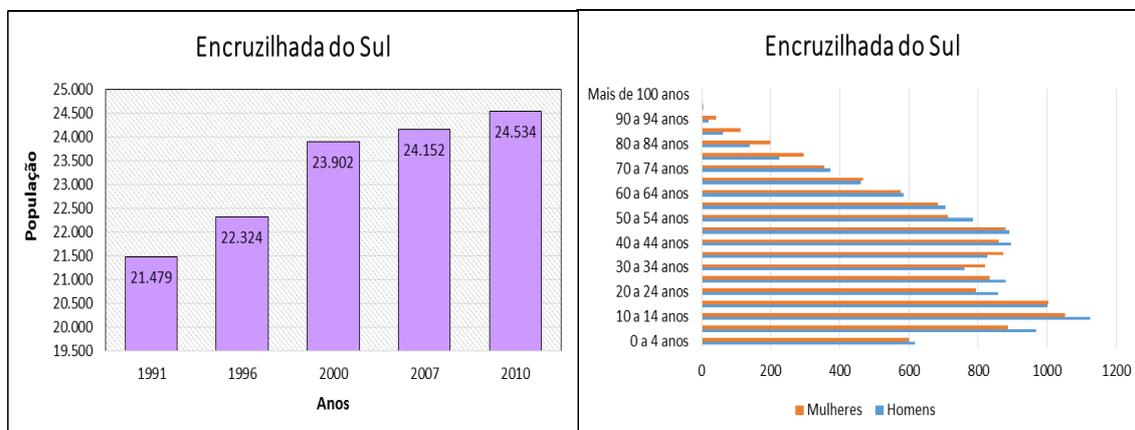


Figura 6 - Censo demográfico 2010 do município de Encruzilhada do Sul - IBGE

A economia de Encruzilhada do Sul é caracterizada pelas culturas permanentes com espécies frutíferas do tipo uva, com 420 hectares, maçã com 130 hectares e laranja com 84 hectares, segundo o IBGE (2012). Em relação às lavouras temporárias, tem-se maior quantidade de áreas plantadas, destacando para a soja com 5.000 hectares plantados, orizicultura com 1.560 hectares plantados, milho com 3.500 hectares e outras menores parcelas de melancia, fumo e trigo que mesmo em menores quantidades auxiliam na economia da região (IBGE, 2007).

Quanto à produção vegetal e silvicultura, o município de Encruzilhada do Sul apresenta uma área de 48.150 hectares de florestas plantadas com essências florestais, tendo como produtos de maior destaque a lenha com quantidade produzida de 600.000 metros cúbicos em 2012, lenha, madeira em tora e derivados da acácia negra (IBGE, 2012).

A pecuária é caracterizada, principalmente por pastagens naturais e plantadas em boas condições, segundo o censo agropecuário do IBGE (2012), totalizando 122.600 hectares.

Além disso, identificou-se 11.703 hectares impróprios para a agricultura ou pecuária, sendo caracterizada por pântanos, areais ou pedreiras.

3.2.3 Município de Piratini

O município de Piratini conforme o censo demográfico do IBGE (2010), obteve como população estimada de 19.841 habitantes, sendo a cidade menos populosa

compreendida na área de estudo, mesmo sua área territorial não sendo a menor dentre as três. A expectativa da contagem da população para o ano de 2014 é de 20.664.

Em relação ao crescimento populacional do município, obteve-se um acréscimo de 2.186 habitantes do ano de 1991 a 2010, sendo que de 2007 a 2010 obteve um decréscimo populacional de 384 pessoas.

A distribuição da faixa etária masculina e feminina apresenta uma tendência parecida com o município de Encruzilhada do Sul de 0 a 24 anos tendo um número maior de homens e de 75 a mais de 100 anos (3 mulheres) se observa um maior número de mulheres, apresentando picos maiores que outras cidades de homens na faixa etária dos 30 aos 54 anos, como se analisa na Figura 7 abaixo.

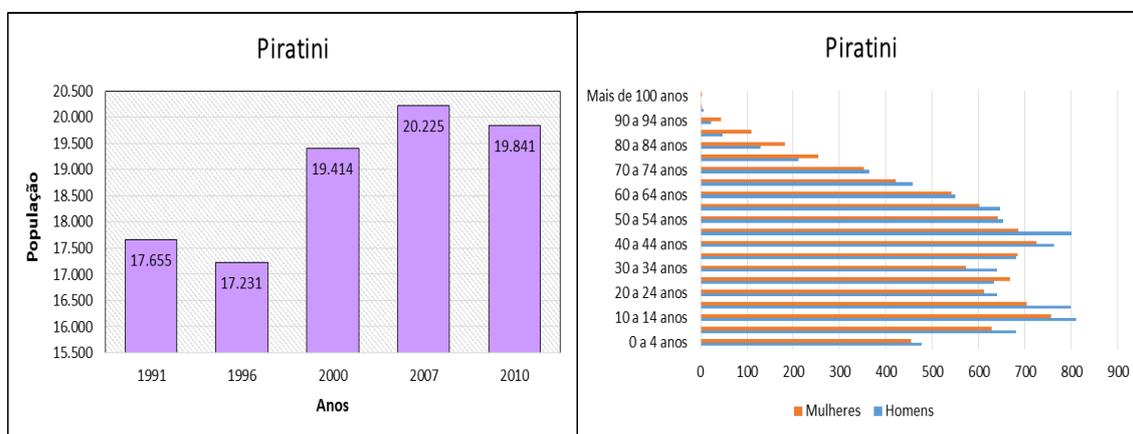


Figura 7 - Censo demográfico 2010 do município de Piratini - IBGE.

Quanto à economia geral da região, o município de Piratini tem uma economia menor que os outros dois municípios da área de estudo, com o seu PIB em torno de 130.000 na parte de serviços e 68.000 na agropecuária, comparando com 130.000 em agropecuária de Canguçu e 380.000 em serviços; e 150.000 em serviços de Encruzilhada do Sul e 70.000 em agropecuária (IBGE, 2012).

Em relação à agropecuária de Piratini tem-se como lavoura permanente em destaque, a cultura da árvore frutífera de Pêssego totalizando uma área de 150 hectares, uma quantidade de área produzida baixa em relação aos outros municípios da área de estudo (IBGE, 2012). Quanto às lavouras temporárias tem-se a cultura de soja com 15.400 hectares, milho com 2.000 hectares, cevada com 1.500 hectares e trigo com 1.200 hectares (IBGE, 2007).

Analisando a produção vegetal e silvicultura, há uma área plantada de florestas com essências florestais de 29.570 hectares, tendo como outros produtos a madeira em tora e carvão vegetal.

Em relação às terras destinadas à pastagem tem-se as naturais e plantadas em boas condições totalizando 155.062 hectares e tendo 12.278 hectares de terras inapropriadas para a pecuária e agricultura (IBGE, 2012).

3.3 Caracterização física da área de estudo

3.3.1 Solos

A heterogeneidade das classes de solos corresponde a uma diversidade de tipos litológicos que em seu potencial de uso requerem adequação das práticas de manejo a essas diversas situações (CPRM, 2010).

A área de estudo pode ser caracterizada pela diversidade de tipos de solos: Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, Planossolo Eutrófico, Solo Litólico Eutrófico e Solos Aluviais Eutrófico, segundo o mapeamento do IBGE (2003). Conforme a classificação atual dos solos da Embrapa (2006), os solos correspondem aos Argissolos, Planossolos e Neossolos.

Os Argissolos eutróficos possuem uma melhor fertilidade natural do que os argissolos distróficos, possuem boas condições físicas e quando associados a relevos com menores declividades apresentam um bom potencial agrícola. Essa classe de solos apresenta limitações em relação a sua baixa fertilidade (distróficos), maior acidez, altos teores de alumínio e sendo considerado suscetível à erosão (EMBRAPA, 2006).

Os neossolos são solos rasos ou profundos, de formação muito recente, que podem ser encontrados nas mais diversas condições de material de origem, relevo e drenagem. São solos constituídos por material mineral, não hidromórficos, ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos (EMBRAPA, 2006).

Os planossolos característicos da região, geralmente, são solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial aluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B ou com transição

abrupta com acentuada diferença de textura do A para o horizonte B, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta.

3.3.2 Geologia

A área de estudo, composta pela parcialidade dos municípios de Encruzilhada do Sul, Piratini e Canguçu está localizada sobre a unidade geológica denominada Escudo Sul-Riograndense.

O Escudo Sul-Riograndense representa a formação geológica mais antiga do estado, localizado na região centro-sul, possuindo cerca de 65.000 km², sendo delimitado ao norte, oeste e sudoeste pela Bacia do Paraná e a leste pela Província Costeira do Rio Grande do Sul – Bacia de Pelotas, pertencentes ao embasamento cristalino na era Pré-Cambriana (CPRM, 2007).

O Escudo Sul-Riograndense ocupa cerca de um terço do Estado do Rio Grande do Sul (VIERA, 2012). A constituição litológica é instituída, principalmente, por rochas metamórficas e ígneas, com distintas composições, representadas por arenitos e conglomerados com grande variedade litológica.

De maneira geral, as rochas do tipo migmatitos, granulitos, gnaisses e cataclastos abrangem tanto o município de Piratini quanto o de Canguçu, já os granitos são expressivos no município de Encruzilhada do Sul. Tem-se também as rochas moscovitas-xistos, talco-clorita-xisto, mármore e quartzitos pertencente ao conjunto das rochas metamórficas inseridas no grupo Porongos (VIERA, 2012).

Segundo o mapeamento geológico do IBGE (2003) na escala 1:250.000, a área de estudo é compreendida pelos Supergrupo Porongos, Complexo Cerro da Árvore, Complexo Cerro das Madeiras, Complexo Canguçu, Complexo Granítico Encruzilhada do Sul, Formação Arroio dos Nobres (Grupo Maricá), Suíte Intrusiva Arroio dos Ladrões (Grupo Maricá), Formação Rosário do Sul (Grupo São Bento), Suíte Alcalina Passo da Capela e Depósitos Aluvionares.

3.3.3 Geomorfologia

A geomorfologia da área de estudo, de uma maneira geral, segundo o IBGE (2003) é composta por domínios morfoestruturais do tipo embasamentos em estilos complexos nas regiões morfológicas Planalto Sul-Riograndense e unidades

geomorfológicas Planaltos Residuais Canguçu – Caçapava do Sul e Planalto Rebaixado Marginal.

O Planalto Rebaixado Marginal ocorre nos três municípios sem orientação definida, em menores porcentagens no município de Encruzilhada do Sul, apresentando em toda a área de estudo uma predisposição a erosão de médio a muito forte. São considerados modelados de dissecação fluvial que não obedecem a nenhum controle estrutural, definida pela combinação das variáveis densidade e aprofundamento da drenagem. Na área de estudo apresentam uma associação de conjuntos de formas de relevo de topos convexos, em geral esculpidas por rochas cristalinas e também em sedimentos e por formas de relevo de topos estreitos e alongados. Os topos de aparência aguçados são resultantes da interceptação de vertentes de declividade acentuada, entalhadas por sulcos e ravinas profundos (IBGE, 2003).

Os planaltos residuais Canguçu-Caçapava do Sul apresentam também associações de modelados de dissecação apresentando formas de relevo com topos convexos e topos estreitos e alongados, mas diferenciando-se pela menor predisposição a erosão que o Planalto Rebaixado Marginal, apresentando valores de fraco a médio.

Quanto aos modelados de aplanamento, ocorrem próximo à Planície Aluvio-Coluvionar, em uma área relativamente pequena da área de estudo, são encontrados planícies fluviais, correspondendo as várzeas atuais com predisposição a erosão muito forte próximos ao Rio Camaquã, Arroio Modesto e Arroio das Pedras. Há também a ocorrência de terraços fluviais, caracterizado por acumulações fluviais de forma plana, levemente inclinada, com mudanças no escoamento e retomada de processos erosivos, possuindo uma predisposição a erosão forte a muito forte (IBGE, 2003).

3.2.4 Vegetação

A área de estudo está inserida inteiramente no bioma Pampa, sendo caracterizada, segundo o sistema de classificação fisionômico – ecológico, pelos tipos de vegetação do tipo Estepe e Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, exemplificado na Figura 8.

Na região há maior predomínio da formação vegetal Estepe, praticamente em toda a extensão dos municípios sendo subdividida em Estepe arborizada com floresta de galeria, Estepe parque com floresta de galeria e Estepe gramíneo lenhosa com floresta de galeria. Nessa região, segundo o IBGE (2003), o clima é caracterizado por dupla estacionalidade com dois períodos por ano de baixa atividade vegetativa. As Estepes estão sempre associadas às interações antrópicas nessa área, seja atividade da pecuária com pastagens, agricultura com culturas cíclicas ou vegetação secundária sem palmeiras.



Figura 8 - Diferentes formações vegetais na área de estudo.

Em relação ao tipo de formação vegetal Florestal Estacional Semidecidual Aluvial ocorre em pontos isolados na área de estudo, apresentando reduzidos agrupamentos residuais, sendo denominadas aluviais por estarem em alguns trechos de drenagem, como o Rio Camaquã, Arroio Mourão, Arroio Pantanoso e Arroio Boici.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

Para a realização desta pesquisa utilizou-se bases cartográficas, mapas temáticos pré-existentes, dados orbitais e dados complementares para auxiliar as análises, como descrito abaixo.

4.1.1 Materiais cartográficos

Como materiais cartográficos foram utilizados a Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul (HASENACK e WEBER, 2010) com informações de hidrografia, curvas de nível e rede viária da área de estudo.

4.1.2 Dados orbitais

As listas de dados orbitais são constituídas por:

- Duas cenas do sensor *OLI (Operational Land Imager)* do satélite *Landsat 8*, 30 metros de resolução espacial (bandas 4, 5 e 6), data da passagem 07/02/2014, estação do ano Verão, disponíveis para download em <http://www.earthexplorer.usgs.gov>, órbita/ponto 222/081 e 222/082;
- Duas cenas do sensor *OLI (Operational Land Imager)* do satélite *Landsat 8*, 30 metros de resolução espacial (bandas 4, 5 e 6), data da passagem 27/10/2014, estação do ano Primavera, disponíveis para download em <http://www.earthexplorer.usgs.gov>, órbita/ponto 222/081 e 222/082;
- Duas cenas do sensor *TM* do satélite *Landsat 5*, 30 metros de resolução espacial (bandas 3, 4, 5), data da passagem 12/10/1991, estação do ano Primavera, disponíveis para download em <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>, órbita/ponto 222/081 e 222/082;
- Imagem Geocover do sensor *TM* do satélite *Landsat 5* para servir como referência para registrar/geo referenciar às imagens orbitais da área, disponível para download em <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>;
- Cenas da missão *SRTM - Shuttle Radar Topography Mission* com o objetivo de adquirir as derivações geomorfológicas da área em estudo foram utilizadas as

quadrículas SH22-Y-A, SH22-Y-B, SH22-Y-C, SH22-Y-D, compatíveis com a articulação 1: 250.000. Adquirido no site EMBRAPA – Brasil em Relevo, disponível para download em <http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br/download/rs/rs.htm>.

4.1.3 Mapas temáticos

Os mapas temáticos utilizados nessa pesquisa foram adquiridos junto ao banco de dados do IBGE. A elaboração desses mapas é baseada no Projeto RADAMBRASIL, com a utilização de dados de radar e intensas atividades de campo. Esses mapas foram importados ao banco de dados do *software* SPRING, vetorizados e suas classes foram associadas aos mapas.

- Mapas de Solos Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C, escala 1: 250.000, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - ano 2003 para confecção do Mapa Pedológico da área de estudo;
- Mapa Geológico (IBGE), escala 1: 250.000, Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C, como base para analisar as diferentes formas de relevo;
- Mapa de Geomorfologia (IBGE), escala 1: 250.000, Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C, a fim de analisar as regiões morfológicas;
- Mapas de Vegetação (IBGE), escala 1: 250.000, Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C, como base para analisar as diferentes formações florestais.

4.1.4 Sistema de Processamento

O sistema utilizado para o processamento das imagens, estruturação do banco de dados e geração dos mapas temáticos foi o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas SPRING, versão 5.2.6, módulo Impima e para finalização do layout dos mapas temáticos será utilizado o *software* ArcGis 10.2. O *Microsoft Office Excel* 2007, para manipulação de dados em gráficos e tabelas, e um GPS (*Global Positioning System*) *Garmin*®, para coleta dos dados a campo.

4.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia de trabalho adotada para o desenvolvimento desta pesquisa compreendeu diversas etapas de procedimentos metodológicos, conforme a Figura 9.

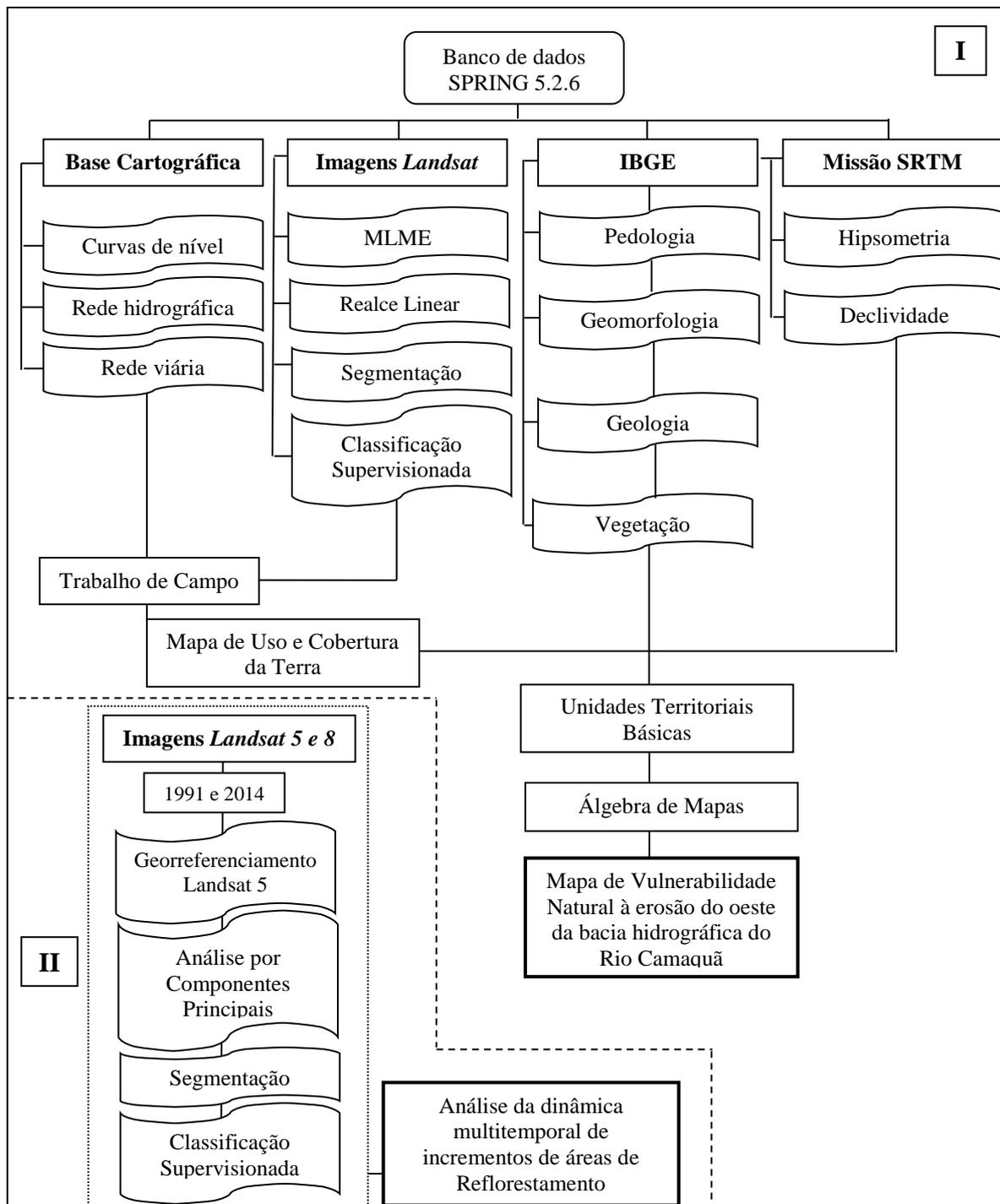


Figura 9 - Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.

Os procedimentos metodológicos foram iniciados com a pesquisa bibliográfica acerca do tema proposto para este trabalho, em nível compilatório de informações.

Inicialmente realizou-se a pesquisa bibliográfica sobre as características da área de interesse, estudos de vulnerabilidade natural à erosão que utilizam técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas.

A partir dessa pesquisa, decidiu-se utilizar a metodologia de mapeamento da vulnerabilidade natural à erosão compiladas por dois trabalhos de Crepani et. al. (1996;2001), que se fundamentam no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977). Este conceito compreende a dinâmica dos ambientes com a avaliação dos processos formadores de solo (pedogênese) e os processos erosivos (morfogênese).

Estes apresentam critérios para a atribuição de valores de vulnerabilidade para as unidades de paisagem natural dos temas Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Uso e Cobertura da terra e Climatologia, seguindo as informações de morfogênese ou pedogênese. Nesse trabalho não foram usadas as informações da climatologia, tendo em vista que somente uma estação climatológica está localizada na região de estudo não tendo diversidade de dados para realizar interpolações e ser significativa.

A análise da morfodinâmica das unidades de paisagem natural foi feita a partir dos princípios da ecodinâmica baseado nos estudos de Tricart, 1977, que estabelecem diferentes categorias resultantes dos processos de morfogênese ou pedogênese. A morfogênese está relacionada aos processos erosivos, modificadores das formas de relevo e a pedogênese é quando prevalecem os processos formadores de solos. A metodologia nos propõe uma classificação do grau de estabilidade ou vulnerabilidade (resistência ao processo natural à erosão), onde são atribuídos valores de vulnerabilidade, conforme a Tabela 3, em uma escala de 1,0 a 3,0 para cada unidade.

Tabela 3 - Valores de vulnerabilidade das unidades de paisagem de acordo com a relação pedogênese/morfogênese.

Unidade	Relação morfogênese/pedogênese	Vulnerabilidade
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio entre pedogênese e morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

Fonte: Crepani et. al (1996) modificada de Tricart (1977).

Para a definição e atribuição dos valores de vulnerabilidade/estabilidade de cada classe temática seguiram-se os critérios propostos por Crepani et al. (1996;2001) e

também utilizou-se o trabalho de campo como subsídio à tomada das posteriores decisões metodológicas (ROVANI, 2013):

- Geologia: história e evolução do ambiente geológico (grau de coesão das rochas);
- Geomorfologia: formas do relevo e os índices morfométricos referentes às unidades geomorfológicas, declividade e hipsometria;
- Solos: o grau de desenvolvimento dos solos (processos de formação de solos ou de relevo);
- Uso e cobertura da terra: a densidade de cobertura vegetal e a intensidade de culturas antrópicas.

A metodologia proposta engloba a análise da vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã associada a dinâmica multitemporal das áreas de incremento e mudanças de reflorestamento com espécies exóticas na área de estudo. Esse fato deve-se a uma significativa mudança na paisagem dessa região de Bioma Pampa, evidenciada com o trabalho de campo, com a intensa atividade de silvicultura nos últimos anos, com a presença de grandes empresas do ramo na região. Nesse caso, utilizou-se de processamentos digitais diferenciados de detecção de mudanças, iniciando com o registro das imagens, posteriormente o realce linear, a técnica de Análise por Componentes Principais e a classificação supervisionada.

4.2.1 Elaboração do banco de dados no SIG - SPRING

O banco de dados utilizado nessa pesquisa foi o *software* SPRING® versão 5.2.6, com a criação de um projeto específico para a área de estudo compreendendo o seu retângulo envolvente. A projeção cartográfica utilizada foi UTM (*Universal Transversa de Mercator*), Datum SIRGAS 2000, Zona 22S e Longitude de Origem: 51°00'00''.

Os modelos de dados compreenderam os tipos raster e vetorial, subdividindo-se em planos de informações (PIs) conforme suas características e informações que se desejou armazenar, como categorias Imagem, Temáticas, Cadastrais e Modelo Numérico do Terreno. Por meio das informações inseridas no banco de dados, permitiu-se interagir essas informações espaciais e gerar novas análises e conclusões.

4.2.2 Mapas temáticos

Os mapas temáticos de geomorfologia, geologia e pedologia foram digitalizados a partir das folhas articuladas (1:250.00) de cada tema elaborados pelo IBGE (2003) e transformados em arquivos vetoriais. Realizou-se também a edição vetorial a fim de corrigir alguns erros e indicar as classes temáticas de cada polígono e assim finalizar com o ajuste e poligonização do plano de informação.

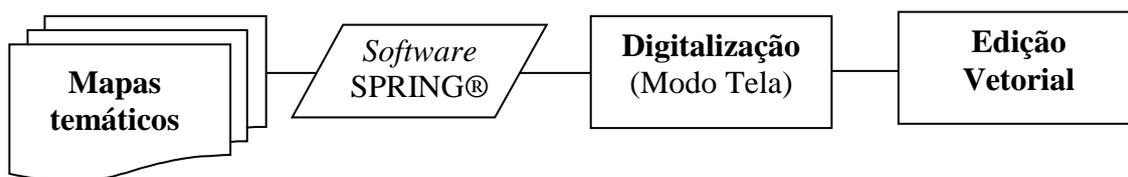


Figura 10 - Etapas de digitalização dos mapas temáticos.

4.2.3 Dados orbitais - Processamentos digitais de imagem

Os dados orbitais utilizados nesse trabalho compreendem duas cenas do satélite *Landsat 8* sensor *OLI*, de resolução 30 metros e as bandas 4, 5 e 6 de 27/10/2014 e 07/02/2014, e duas cenas do satélite *Landsat 5*, bandas 3, 4 e 5 de 19/04/1991, cujas bandas espectrais são referentes ao vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. No *software SPRING®*, foram utilizadas técnicas de pré-processamento digital de imagem, como a aplicação do modelo linear de mistura espectral, análise por componentes principais, realce linear, e classificação do mosaico das cenas.

A etapa de georreferenciamento foi utilizada para a correção geométrica das cenas do satélite *Landsat 5* que não possuem uma boa correção geométrica, lançando-se, portanto, mão do módulo *Impima*, do *software SPRING*, que permitiu a decodificação da imagem orbital para o formato *SPG/GRB* e sua identificação pelo *SPRING*. Para iniciar o registro foram adquiridos os pontos de controle via tela por meio das imagens *Geocover* da *Nasa* e utilizado um polinômio de primeira ordem para a transformação geográfica.

Quanto ao processamento digital de imagens caracterizado pela análise de componentes principais, utilizou-se apenas as bandas equivalentes ao vermelho dos satélites *Landsat 5* e *8* e a banda infravermelho próximo do satélite *Landsat 8*, com

detalhes explicados no item Resultados e Discussões, com o intuito de analisar as detecções de mudanças nas áreas de reflorestamento na porção oeste da bacia hidrográfica.

Após essas etapas iniciais preparatórias realizou-se outro processamento digital das imagens, a segmentação das imagens, antes de aplicar o algoritmo de classificação. Este passo teve como objetivo dividir a imagem em regiões espectralmente homogêneas, de acordo com o limiar de similaridade e área, específico para o estudo. Após a segmentação utilizou-se o método de classificação supervisionada através do classificador por regiões pelo algoritmo fundamentado na medida da distância de Bhathacharya para elaboração do mapa de uso e cobertura do solo.

4.2.4 Técnicas de Realce

A interpretação visual das imagens orbitais é facilitada após a aplicação de técnicas de realce, que tornam mais exatos os critérios subjetivos e tendenciosos do olho humano, sendo considerada uma etapa de pré-processamento. A partir disso, no intuito de melhorar os resultados desse trabalho foram aplicadas diferentes técnicas e obtidos diferentes efeitos sobre as imagens orbitais utilizadas.

Em um primeiro momento, aplicou-se o realce do tipo linear. O realce consiste em expandir a distribuição dos dados originais, concentrados em um pequeno intervalo, para um intervalo maior possível. Em imagens de 8 *bits*, para 255 níveis de cinza, aumentando o contraste, visando, assim, uma melhor discriminação dos alvos (FLORENZANO, 2011).

Anteriormente ao processo de classificação supervisionada, utilizou-se o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), gerando imagens-fração de sombra, vegetação e solo que permitem melhor o desempenho da classificação do uso e cobertura da terra, de acordo com a proporção de cada componente no pixel. A aplicação da técnica de realce linear também foi realizada na composição colorida gerada com a análise por componentes principais, a fim de que a classificação das mudanças ocorridas com as áreas de reflorestamento fossem melhor detectadas.

A etapa de interpretação da imagem concluiu-se com a delimitação das unidades territoriais básicas (UTBs), com o auxílio das técnicas de realce e com a análise da paisagem por meio dos pontos visitados no trabalho de campo.

4.2.5 Unidades Territoriais Básicas - UTBs

Segundo Crepani et al. (2001) a análise da vulnerabilidade natural do ambiente em relação aos processos de erosão é realizada por intermédio da identificação das UTBs - Unidades Territoriais Básicas. A unidade territorial básica é considerada uma entidade geográfica que possui todos os atributos ambientais que interessa ao estudo (geologia, pedologia, vegetação, relevo e uso e cobertura do solo), e que permitem diferenciá-la do seu entorno, mas ainda sim sendo participante de uma rede integrada que possui vínculos dinâmicos e históricos com as outras unidades territoriais.

A delimitação das unidades territoriais básicas é feita sobre o mosaico das cenas de satélite permitindo o acesso às relações de causa e efeito entre os elementos que a compõem, a partir da interpretação na imagem de padrões semelhantes, identificados pelas variações de cores, textura, formas, padrões de drenagem e relevo (Crepani et al., 2001). As UTBs podem ser divididas em categorias de paisagem natural e os polígonos de ação antrópica.

Para a elaboração do mapa cadastral das UTBs, realizou-se a interpretação visual do mosaico das cenas do satélite *Landsat 8*, na composição RGB, com a banda 4, 5 e 6. Nesta etapa realizou-se uma segmentação baseado no algoritmo crescimento por regiões, admitindo um limiar de área 100 e similaridade 80. Posteriormente, visando à melhor delimitação das UTBs, considerando os elementos como textura, relevo, drenagem, níveis de cinza, editou-se os polígonos por meio da edição vetorial. Inicialmente delimitaram-se as unidades de paisagem natural e internamente a elas os polígonos de intervenção antrópica compondo-se, assim, o mapa preliminar de UTBs. As UTBs foram delimitadas na categoria Cadastral, associados à uma categoria Objeto com os seus diferentes atributos.

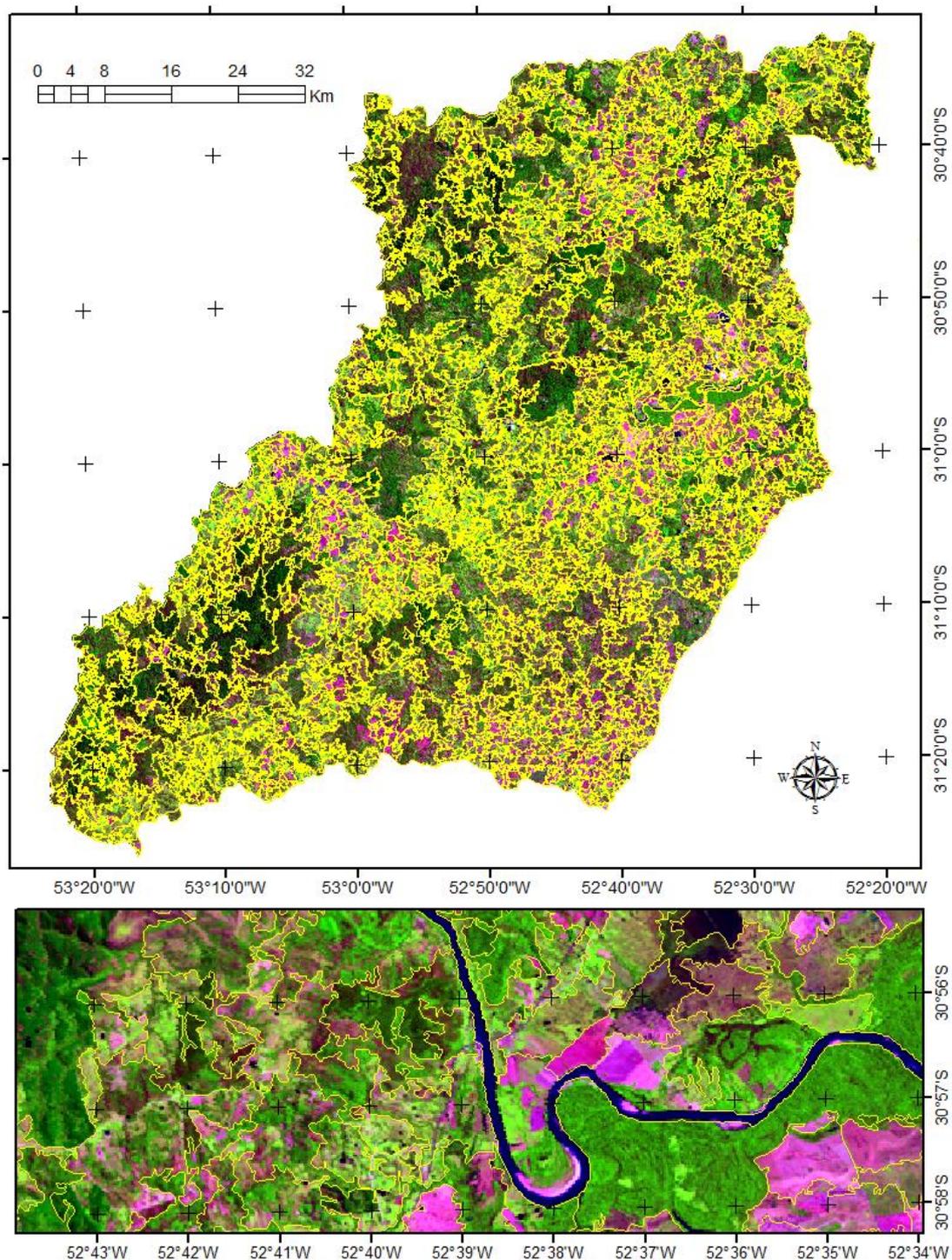


Figura 11 - Mapa Cadastral das Unidades Territoriais Básicas (UTBs).

4.2.6 Análise ecodinâmica – Morfogênese/Pedogênese

O mapa de vulnerabilidade natural à erosão representa a análise do meio físico e biótico para a ocupação racional e o uso sustentável dos recursos naturais. Uma vez atribuídos valores de vulnerabilidade para todas as classes foi realizada a integração de

todos os mapas via álgebra de mapas, com a atribuição dos valores, a descrição da rotina de programação e a definição das classes de vulnerabilidade.

Deste modo, a representação final do mapa de vulnerabilidade natural à erosão tem uma escala de estabilidade/vulnerabilidade com 21 classes, Estável (1,2,3), Moderadamente Estável (1,2,3), Medianamente Estável/Vulnerável, Moderadamente Vulnerável e Vulnerável) (ROVANI, 2013). As unidades mais estáveis apresentarão valores próximos a 1,0, as intermediárias, próximos a 2,0 e as unidades mais vulneráveis, próximos a 3,0.

4.2.6.1 Geomorfologia

O mapa temático de geomorfologia foi elaborado a partir do mapa base de geomorfologia do IBGE (2003), onde foram acrescentadas informações acerca dos índices morfométricos do terreno, declividade e hipsometria, associado às formas de relevo.

A geomorfologia possui diversas metodologias e ferramentas de grande significância para as pesquisas ambientais que nos auxiliam a definir e espacializar os diferentes componentes do meio natural. As inúmeras formas de relevo e suas características garantem uma relação direta com a geologia, os solos e a hidrografia (GUERRA; MARÇAL, 2012).

De acordo com Crepani et al. (1996), o grau de estabilidade/vulnerabilidade do tema geomorfologia, varia de acordo com os índices morfométricos. A partir disso, são denominados valores de vulnerabilidade para as unidades geomorfológicas, hipsometria e para a declividade das encostas (Tabelas 4, 5 e 6).

As classes das unidades geomorfológicas foram especificadas. O mapa hipsométrico e de declividade foi gerado a partir do mosaico das quadrículas da missão SRTM (SH22-Y-A, SH22-Y-B, SH22-Y-C, SH22-Y-D), dos modelos numéricos de elevação, com resolução espacial 90 metros e formato Geotiff. Os arquivos SRTM foram importados como categoria Modelo Numérico do Terreno (MNT), entidade do tipo grade e foi realizado uma análise geoestatística do tipo exploratória a fim de analisar o intervalo de valores máximo e mínimo para a altimetria da região e a partir disso realizou-se o fatiamento com os valores descritos na Tabela 5.

O mapa de declividade foi gerado também a partir do mosaico da missão SRTM, por meio da ferramenta 'Declividade' existente na categoria MNT do *software*

SPRING, gerando a grade de declividade em porcentagem, executando a análise geoestatística do tipo exploratória para saber os intervalos mínimo e máximo existentes na região. Na sequência, realizou-se o fatiamento das classes segundo a Tabela 6, adaptada de Crepani et. al (1996).

Tabela 4 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para as unidades geomorfológicas.

Unidades Geomorfológicas	Vulnerabilidade
Planaltos Residuais	2,0
Planaltos Rebaixados Marginais	2,5
Planície Alúvio Coluvionar	3,0

Tabela 5 - Valores de vulnerabilidade para as classes de hipsometria.

Hipsometria (m)	Vuln.	Hipsometria (m)	Vuln.	Hipsometria (m)	Vuln.
<20	1,0	77-84,5	1,7	141,5-151	2,4
20-29,5	1,1	84,5-94	1,8	151-160,5	2,5
29,5-39	1,2	94-103,5	1,9	160,5-170	2,6
39-48,5	1,3	103,5-113	2,0	170-179,5	2,7
48,5-58	1,4	113-122,5	2,1	179,5-189	2,8
58-67,5	1,5	122,5-132	2,2	189-200	2,9
67,5-77	1,6	132-141,5	2,3	>200	3,0

Fonte: Florenzano (2008) adaptado de Crepani et. al (1996)

Tabela 6 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para a declividade das encostas.

Declividade	Declividade	Declividade	Declividade	Declividade	Declividade
%	Vuln.	%	Vuln.	%	Vuln.
<3,5	1,0	17,4-19,8	1,7	34,6-37,2	2,4
3,5-5,8	1,1	19,8-22,2	1,8	37,2-39,8	2,5
5,8-8,2	1,2	22,2-24,5	1,9	39,8-42,4	2,6
8,2-10,3	1,3	24,5-27,2	2,0	42,4-45,3	2,7
10,3-12,9	1,4	27,2-29,6	2,1	45,3-48,1	2,8
12,9-15,1	1,5	29,6-32,1	2,2	48,1-50	2,9
15,1-17,4	1,6	32,1-34,6	2,3	>50	3,0

Fonte: Florenzano (2008) adaptado de Crepani et. al (1996)

Após a determinação dos valores de vulnerabilidade natural à erosão, referentes a cada índice morfométrico, a vulnerabilidade da UTB com relação ao relevo será definida, pela equação:

$$G = \frac{G^a + H + D}{3} \quad (1.1)$$

G = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia

G^a = vulnerabilidade atribuída às Unidades Geomorfológicas

H = vulnerabilidade atribuída à Hipsometria

D = vulnerabilidade atribuída à Declividade

4.2.6.2 Geologia

A contribuição da geologia para a análise e definição de categoria morfodinâmica da unidade de paisagem compreende as informações relativas à evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e ao grau de coesão das rochas a compõem.

O mapa de geologia foi elaborado com base no mapa preexistente fornecido pelo IBGE (2003) na escala 1: 250.000, com a digitalização e vetorização das suas informações.

Segundo proposto por Crepani et al. (1996), as rochas que apresentam maior grau de coesão receberam valores próximos à estabilidade (1,0), já, para as rochas que apresentam valores intermediários no seu grau de coesão, foram atribuídos valores intermediários (2,0) e, por último, às rochas que possuem os menores valores nos graus de coesão, atribuíram-se valores próximos à vulnerabilidade (3,0).

Segundo Florenzano (2011), adaptado de Crepani et. al (1996), a Tabela 7 apresenta as posições das rochas mais comumente encontradas na superfície terrestre, dentro da escala de vulnerabilidade natural à erosão relacionada à denudação (intemperismo + erosão).

Tabela 7 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade à denudação das rochas.

Rochas	Vuln.	Rochas	Vuln.	Rochas	Vuln.
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0	Milonitos, quartzo, muscovita, biotita, clorita xisto	1,7	Arenitos quartzosos	2,4
Riolito, granito, dacito	1,1	Piroxenito, anfibolito, dunito	1,8	Conglomerados	2,5
Grandiorito, quartzo diorito, granulitos	1,2	Hornblenda, tremolita, actinolita	1,9	Grauvacas, arcózios	2,6
Migmatitos, gnaisses	1,3	Xistos granatíferos	2,0	Siltitos, argilitos	2,7
Fonólito, sienito	1,4	Filito, metassiltito	2,1	Folhelhos	2,8
Andesito, diorito, basalto	1,5	Ardósia, metargilito	2,2	Calcários, dolomitos, margas, evaporitos	2,9
Anortosito, gabro, peridotito	1,6	Mármore	2,3	Sedimentos inconsolidados: aluviões, colúvios	3,0

Fonte: Crepani et al. (1996)

4.2.6.3 Solos

O mapa de solos foi elaborado com base no mapa preexistente fornecido pelo IBGE (2003) na escala 1: 250.000. O primeiro procedimento foi a digitalização e a vetorização das informações nele contidas, de forma que a nomenclatura das classes de solos foi atualizada com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Após isso, definiu-se o grau de estabilidade/vulnerabilidade dos solos, segundo os valores de vulnerabilidades adaptados de Crepani et. al (1996) por Florenzano (2008).

De acordo com Florenzano (2008), na análise de vulnerabilidade do solo, é considerado o grau de maturidade como o produto direto do balanço morfogênese/pedogênese. Ela indica claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênese, que geram solos jovens, pouco desenvolvidos, ou se, no outro extremo, as condições de estabilidade permitem o predomínio dos processos de pedogênese, gerando solos maduros, profundos, lixiviados e bem desenvolvidos (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para tipos de solos.

Classes de solos	Vulnerabilidade/Estabilidade
Latossolo Amarelo	1,0
Latossolo Vermelho-Escuro	
Latossolo Roxo	
Latossolo Bruno-Húmico	
Podzólico Amarelo	2,0
Podzólico Vermelho-Amarelo	
Podzólico Vermelho-Escuro	
Terra Roxa Estruturada	
Bruno Não-Cálcico	
Brunizém	
Brunizém-Avermelhado	
Planossolo	2,5
Cambissolos	
Solos Litólicos	3,0
Solos Aluviais	
Regossolo	
Areia Quartzosa	
Vertissolo	
Solos Orgânicos	
Solos Hidromórficos	
Glei Húmico	
Glei Pouco Húmico	
Plintossolo	
Laterita Hidromórfica	
Solos Concrecionários Lateríticos	
Afloramento Rochoso	

Fonte: Florenzano (2008) adaptado de Crepani et. al (1996).

4.2.6.4 Uso e cobertura da terra

As classes temáticas de uso e cobertura da terra determinadas na classificação das imagens da área de estudo foram: vegetação, reflorestamento, agricultura e

pastagem, solo exposto, e corpos d'água. Na Tabela 9 apresenta-se uma descrição sucinta de cada classe.

Tabela 9 - Definições das classes de uso e cobertura da terra.

Classes de uso e cobertura da terra	Definições
Vegetação/Mata ciliar	Áreas com predomínio vegetal de florestas.
	Áreas com formação vegetal localizada nas margens dos, córregos, lagos, represas e nascentes. Também é conhecida como mata de galeria, mata de várzea. Considerada pelo Código florestal como Área de Preservação Permanente (APP).
Reflorestamento	Áreas com implementação de espécies exóticas, caracterizadas por plantios homogêneos e povoamentos equiâneos.
Agricultura e Pastagem	Áreas com cultivos agrícolas e pastagem.
Solo exposto	Áreas com solo exposto, devido à ação antrópica ou solos em pousio.
Corpos d'água	Correspondem aos corpos d'água como rios, lagos e lagoas.

A classificação foi realizada a partir dos classificadores por regiões baseado na medida da distância de Bhattacharya. As amostras foram selecionadas com base no estudo prévio acerca do uso e cobertura do solo da área de estudo, utilização de imagens de alta resolução do *Google Earth* para fins de observação, auxílio do realce, da segmentação do mosaico e do trabalho de campo. Discriminaram-se as 5 categorias definidas na legenda temática. A classe urbana não foi discriminada já que as sedes urbanas não se encontram dentro dos limites da área de estudo e a classe de pastagem foi incluída na classe agricultura por apresentar comportamento espectral semelhante e a precisão de diferenciação das mesmas não ser objeto desse trabalho.

Associado a isso, foram utilizadas dois mosaicos de cenas do sensor *OLI* do satélite *Landsat 8*, dos anos de 1991 e 2014, a fim de estabelecer a comparação em relação às culturas temporárias e as regiões de solo exposto. Com o intuito de classificar com maior acurácia as áreas de agricultura e solo exposto utilizou-se o mosaico das cenas com a data de fevereiro que condizia com as épocas de verdor da maioria das culturas agrícolas da região, conforme a Tabela 10.

Após à classificação das temas de uso e cobertura da terra realizou-se a atribuição dos valores de vulnerabilidade natural à erosão de cada tema, conforme a Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para as classes de uso e cobertura da terra.

Classes de Uso e Cobertura da Terra	Vulnerabilidade
Floresta nativa	1,3
Corpos d'água	1,5
Floresta exótica	2,2
Pastagem	2,5
Campos	2,6
Agricultura	2,8
Solo exposto	3,0
Área urbanizada	3,0

Fonte: Adaptado de Manual Técnico de Uso e Cobertura da Terra – IBGE (2006).

4.3 Trabalho de Campo

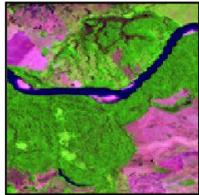
O trabalho de campo foi realizado nos dias 19 a 23 de fevereiro de 2014 na porção oeste da bacia hidrográfica do rio Camaquã. Para a definição dos pontos a serem coletados a campo utilizou-se a ferramenta do *Random Points*, do *software* ArcGis® 10.2. Ao todo foram analisados 126 pontos amostrais na área de estudo, avaliando as coordenadas geográficas, as características antrópicas e suas características quanto às relações de vulnerabilidade.

Essa ferramenta possibilitou a demarcação de pontos aleatórios na área de estudo, de modo que não ocorresse nenhuma coleta de maneira tendenciosa e sem representatividade. A partir das coordenadas geográficas desses pontos procedeu-se com a coleta dos dados referentes aos tipos de uso e cobertura do solo para validação do processo de classificação da imagem, conforme a Tabela 12, compilação de características para elaboração dos mapas específicos e informações para analisar as áreas que serão identificadas como vulneráveis à erosão na área de estudo.

As ferramentas do trabalho de campo foram um *GPS Garmin®*, máquina fotográfica, prancheta para a notação e cartas topográfica e geológicas da área. Junto a isso obteve-se uma planilha de informações de cada ponto coletado a fim de também

possibilitar a orientação da classificação supervisionada das imagens de satélite quanto ao uso e cobertura da terra.

Tabela 12 - Classes de uso e cobertura da terra e suas associações no campo e na imagem de satélite.

Classe	Campo	Imagem orbital
Vegetação/Mata Ciliar		
Reflorestamento		
Agricultura		
Solo exposto		
Corpos d'água		

4.4 Mapa Cadastral – UTBs

O mapa cadastral das UTBs foi gerado após a interpretação da imagem, a partir de padrões semelhantes, identificados pelas variações de cores, textura, formas, padrões de drenagem. Este tipo de mapa permitiu identificar polígonos como objetos geográficos e associá-los a cada um, os atributos informados.

Para a geração de um mapa cadastral, diversas etapas foram realizadas *software* SPRING. Foi gerado um PI de categoria Cadastral com as UTBs editadas e criou-se uma categoria Objeto para agrupar os atributos obtendo-se um total de objetos definidos a partir dos quais foram realizadas as álgebras entre mapas para se obter o produto desejado.

O módulo cadastral – edição vetorial, do *software* SPRING permitiu que as linhas que delimitavam as UTBs fossem editadas e ajustadas, e os polígonos obtiveram a sua topologia por meio da poligonalização. Na área de estudo foram criados 3017 polígonos referentes a cada UTB.

No Modelo de Dados criou-se uma categoria chamada UTBs, cuja classificação é chamada de objeto. Dentro dessa categoria foram editados os objetos e criou-se uma tabela com os atributos referentes a cada uma das classes e 3017 rótulos para cada polígono.

A partir disso, obteve-se um mapa cadastral das unidades territoriais básicas, onde os polígonos representam uma unidade com rótulo e nome iguais. O rótulo associa os polígonos a uma tabela (GEOID) com os atributos adequados aos temas Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Uso e Cobertura da Terra com seus valores de estabilidade/vulnerabilidade e a um valor médio final entre as classes.

Após essa etapa realizou-se a implementação em LEGAL de um conjunto de operadores, denominados como zonais, os quais permitem estabelecer relações espaciais entre regiões de mapas distintos (CÂMARA et al., 2005). A partir disso tem-se um modelo geo-relacional, onde cada objeto apresenta na tabela seus dados e seus relacionamentos, podendo ser realizadas consultas sobre cada uma das UTBs, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Atributos das UTBs. (Continua)

ATRIBUTOS	SIGNIFICADO
ID	Identificador gerado pelo SPRING
NOME	Nome estabelecido pelo usuário
AREA	Área de cada objeto
PERIMETRO	Perímetro de cada objeto
GEOL_VUL	Valores de estabilidade/vulnerabilidade para a geologia
GEOL_CLS	Classes de geologia

ATRIBUTOS	SIGNIFICADO
HIPS_VUL	Valores de estabilidade/vulnerabilidade para a hipsometria
HIPS_CLS	Classes de hipsometria
GEOM_VUL	Valores de estabilidade/vulnerabilidade para a geomorfologia
GEOM_CLS	Classes de geomorfologia
USO_VUL	Valores de estabilidade/vulnerabilidade para o uso e cobertura da terra
USO_CLS	Classes de uso e cobertura da terra.
SOL_VUL	Valores de estabilidade/vulnerabilidade para os solos
SOL_CLS	Classes de solos
MED_VUL	Valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão para todas as UTBs

4.5 Álgebra de Mapas

A álgebra de mapas permitiu que as classes temáticas fossem analisadas individualmente conforme a sua relação pedogênese/morfogênese de acordo com os valores indicados nas Tabelas 4, 5, 6, 7, 8 e 10, transformando-os em mapas numéricos.

Na etapa de álgebra de mapas, os mapas temáticos e numéricos (geo-campos temáticos e numéricos) são associados de maneira que contenham os valores de cada classe, utilizando parâmetros temáticos de entrada e parâmetros numéricos de saída, principalmente com operações de ponderação. Nessa etapa são utilizadas várias operações, descritas abaixo, para que seja gerada a carta final de vulnerabilidade à erosão.

A álgebra de mapas garante a realização de operações pontuais e zonais através da LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) incorporada no ambiente do *software* SPRING. A programação em LEGAL é realizada por meio de uma sequência de comandos que apresentam operações específicas para cada tipo de objetivo final, quando interligados determinam a ação a ser executada pelo sistema. É caracterizada como uma linguagem de consulta e manipulação espacial que realiza operações sobre dados do tipo Temático, Modelo Numérico de Terreno e Imagem. A estrutura do programa em LEGAL é composta por três partes: declarações, instanciações e operações; possui três tipos de operações: pontuais, de vizinhança e zonais.

Nesse trabalho, inicialmente executou-se uma operação pontual de ponderação para todos os temas utilizados, transformando os geo-campos temáticos (PI de entrada) em geo-campos numéricos (PI de saída), com o operador *Pondere*. As operações pontuais geram como saída um PI cujos valores são função apenas dos valores dos PIs de entrada em cada localização correspondente. Com isso, a programação define uma nova tabela que expõe o mapeamento, conforme a rotina explicitada nos Apêndices. Posteriormente a isso os programas de ponderação em LEGAL são definidos de acordo com os valores de estabilidade/vulnerabilidade utilizados para cada tema. Portanto, realizou-se uma operação *Pondere* para os temas Solos, Geologia, Declividade e Uso da Terra.

Em seguida, lançou-se mão dos operadores zonais, que são realizados sobre regiões específicas de um mapa de entrada (UTBs), tendo restrições fornecidas por outro mapa. Essas transformações zonais operam sobre um mapa base e um agrupamento de regiões delimitadas por polígonos, que podem estar tanto na forma matricial ou vetorial (BARBOSA et al., 1998).

Aliado a isso, a etapa seguinte consistiu na aplicação da operação de média zonal, exemplificado na Figura 12, onde o valor resultante é igual à média aritmética dos valores da variável espacial nas localizações do mapa base das UTBs. Através do operador *Atualize*, associado ao operador *MedZ* (média zonal), os valores médios de estabilidade/vulnerabilidade foram inseridos na tabela de geo-objetos UTBs. O operador *Atualize* possibilita que o conteúdo de um geo-campo seja inserido na tabela alfanumérica de geo-objetos.

Para complementar os geo-objetos da tabela UTBs realizou-se a operação de maioria zonal que determina o conteúdo mais frequente no geo-campo e insere para a tabela de atributos UTBs, através do operador *Atualize*, associado ao operador *MaiZ* (maioria zonal). Por meio das rotinas de programação no LEGAL, com os operadores *atualize* e *MaiZ*, é possível inserir, automaticamente, as informações do geo-campo temático, por exemplo, pedologia, e do geo-campo numérico de vulnerabilidade de pedologia nas colunas referentes à classe de pedologia (SOLO_CLS) e à vulnerabilidade da pedologia (SOLO_VUL).

Além dessas operações foram executadas a operação de espacialização, por meio do operador *Espacialize*, para os valores de estabilidade/vulnerabilidade nas UTBs, originando um novo geo-campo numérico com um único valor para as UTBs e a

operação pontual de fatiamento, operador *Fatie*, para a definição dos intervalos de classes dos mapas vulnerabilidade natural à erosão.

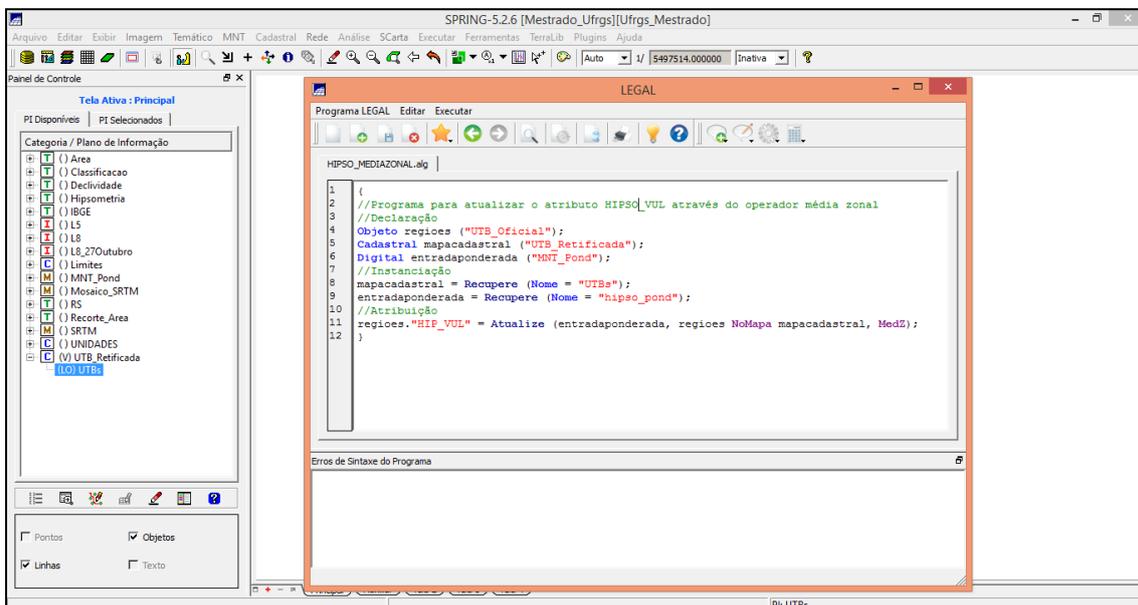


Figura 12 - Exemplo da rotina de programação em LEGAL para operação Média Zonal para o tema Hipsometria.

4.5.1 Mapa de Vulnerabilidade à erosão

Com a delimitação adequada das UTBs no *software* SPRING como categoria *Cadastral*, criou-se uma categoria *Objeto* para cada unidade com as informações dos atributos específicos. As unidades caracterizadas em objetos possuem nome e rótulo, com uma tabela com os diferentes atributos definidos para as UTBs. Esse modelo geo-relacional permite realizar consultas sobre cada uma das unidades (nome, área, perímetro, classes), e a álgebra de mapas possibilita uma relação dos diferentes temas (pedologia, geologia, relevo e uso e cobertura da terra) a cada uma das unidades.

A álgebra de mapas tem como objetivo principal integrar os dados referentes aos mapas temáticos de geologia, geomorfologia, solos, uso e ocupação da terra (meio físico) ao mapa cadastral das UTBs.

De maneira geral, para cada uma das UTBs foram associados valores de estabilidade/vulnerabilidade para cada um dos temas: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, e Uso da Terra, organizados na tabela de geo-objetos denominada UTBs. Como explicado anteriormente aplicou-se, primeiro a operação pontual para os geo-campos numéricos, com a operação *Pondere* e a partir deste geo-campo numérico

executou-se uma operação de média zonal e depois uma operação de espacialização dos valores de estabilidade/vulnerabilidade das UTBs, através do operador *Espacialize*.

Após essas etapas, lançou-se mão da operação pontual de fatiamento com o intuito de organizar os intervalos das classes de estabilidade/vulnerabilidade conforme a Tabela 14.

Em relação à representação cartográfica da vulnerabilidade, ou estabilidade, das unidades de paisagem natural foram selecionadas 21 cores, organizadas a partir da combinação das três cores aditivas primárias (Azul, Verde e Vermelho) com o objetivo de associar a cada classe de vulnerabilidade sempre a mesma cor, obedecendo ao critério de que ao valor de maior estabilidade (1,0) se associa a cor azul, ao valor de estabilidade intermediária (2,0) se associa a cor verde e ao valor de maior vulnerabilidade (3,0) a cor vermelha.

Aos valores situados entre 1,1 e 1,9 na escala de vulnerabilidade associam-se cores resultantes da combinação entre o azul e o verde, crescendo a participação do segundo na medida em que se aproxima de 2,0, enquanto que aos valores situados entre 2,1 e 2,9 associam-se cores resultantes da combinação entre o verde e o vermelho, crescendo a participação do segundo na medida em que o valor da vulnerabilidade se aproxima de 3,0 (CREPANI et al, 1996).

Tabela 14 - Representação da vulnerabilidade e/ou estabilidade das UTBs. (Continua)

Unidade de Paisagem	Média		Grau de Vulnerabilidade	Grau de Saturação				
				VERM	VERD	AZUL	CORES	
U1	Vulnerabilidade	3,0	Estabilidade	255	0	0		
U2		2,9		255	51	0		
U3		2,8		VULNERÁVEL	255	102	0	
U4		2,7			255	153	0	
U5		2,6			255	204	0	
U6		2,5		MODERADAM.	255	255	0	
U7		2,4		VULNERÁVEL	204	255	0	
U8		2,3			153	255	0	
U9		2,2			102	255	0	
U10		2,1		MEDIANAM.	51	255	0	
U11		2,0		ESTÁVEL/	0	255	0	
U12		1,9		VULNERÁVEL	0	255	51	
U13		1,8			0	255	102	
U14		1,7			0	255	153	

Unidade de Paisagem	Média		Grau de Vulnerabilidade	Verm	Verde	Azul	CORES
U15	1,6		MODERADAM.	0	200	204	
U16	1,5		ESTÁVEL	0	255	255	
U17	1,4			0	204	255	
U18	1,3			0	153	255	
U19	1,2			0	102	255	
U20	1,1		ESTÁVEL	0	51	255	
U21	1,0			0	0	255	

4.6 Detecção de mudanças da paisagem – Dinâmica multitemporal

Os procedimentos para a análise de detecção de mudanças foram compreendidos, primeiramente, pelo registro das imagens do satélite *Landsat 5* de 12/10/1991 que não possuem uma correção geométrica eficiente, seguida pela aplicação da técnica de análise por componentes principais e classificação supervisionada com edição matricial.

4.6.1 Registro

O registro das imagens foi necessário apenas nas cenas do sensor *TM*, do satélite *Landsat 5*, data de 12/10/1991, e visou eliminar os tipos de erros que, frequentemente, ocorrem nos dados de satélites: erros geométricos causados pela curvatura e rotação da Terra, movimento do espelho de imageamento dos sensores ópticos de varredura mecânica, atitude do sensor, altura e posição do satélite e distorções panorâmicas e topográficas.

Nesse trabalho foi realizado o método de reamostragem dos pixels, utilizando como base cartográfica o mosaico Geocover da NASA para a escolha dos pontos de controle. No método de reamostragem dos pixels utilizou-se o interpolador vizinho mais próximo, por ser rápido, menor custo computacional e não alterar os níveis de cinza.

A qualidade desse registro foi garantida pelas regras básicas para atingir a precisão dos pontos de controle que foram selecionados de acordo com sua localização (visibilidade), distribuição em toda a imagem e quantidade condizente com o polinômio de 2º grau utilizado que requer no mínimo nove pontos de controle.

O registro das imagens foi realizado no *software* SPRING. A primeira etapa é caracterizada por transformar as cenas 222/081 e 222/082 para o formato .spg e

registradas com uma média de 20 pontos de controle, aceitando o erro de menos de um pixel, com o valor máximo de 0,736, sabendo que o pixel possui 30x30m.

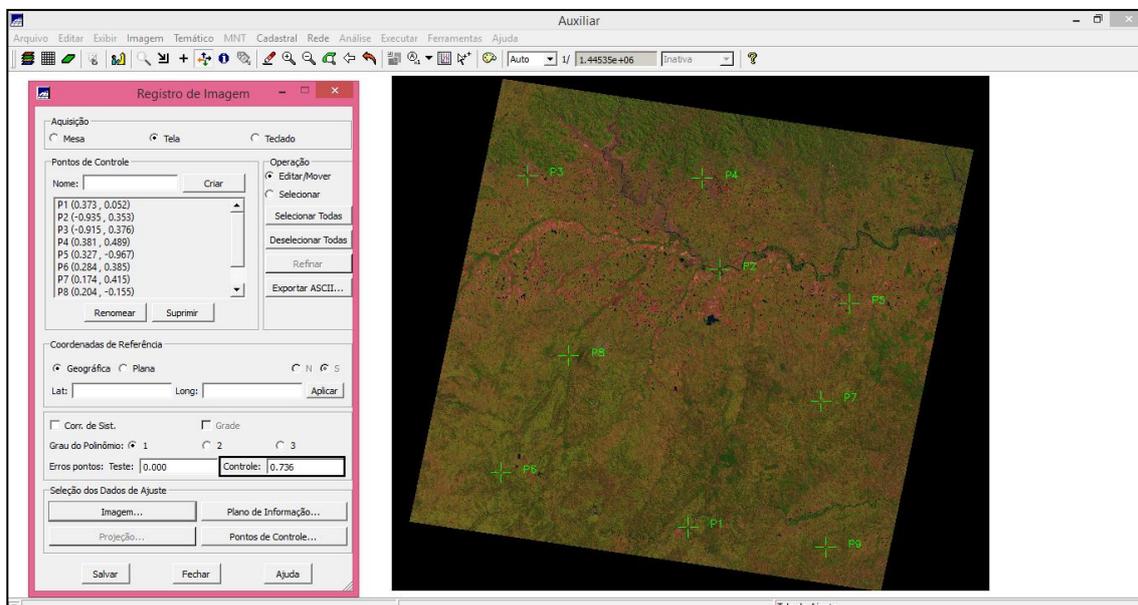


Figura 13 - Registro da cena 222/081 para posteriormente ser mosaicada com a cena 222/082.

A partir disso, com as cenas georreferenciadas realizou-se o mosaico e recortou-se com o limite da área de estudo. Após isso, realizou-se os procedimentos referentes à análise temporal de mudança da paisagem com espécies florestais exóticas, como a técnica de Análise por Componentes Principais.

4.6.2 Análise por Componentes Principais

Aliado a metodologia da vulnerabilidade natural à erosão realizou-se a dinâmica multitemporal de 1991 a 2014 das áreas de incrementos de reflorestamento na região, modificando a paisagem do Bioma Pampa. A metodologia de detecção de mudanças da área de estudo foi realizada por intermédio da aplicação da técnica de processamento digital de imagens Análise por Componentes Principais (ACP).

A primeira componente principal é composta pelas informações que são comuns a todas as bandas originais (1ª CP), a segunda componente principal irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto e quanto mais alto a ordem das CPs, as feições espectrais serão menos significantes e a última terá somente a informação que sobrar no conjunto.

A primeira atividade executada pela ACP pode ser explicada da seguinte maneira: analisou-se as correlações das bandas referente ao comprimento de onda do Vermelho do satélite *Landsat 5* (TM3 - 1991) e *Landsat 8* (TM4 - 2014) juntamente com a banda 5 (infravermelho próximo) do satélite *Landsat 8* e gerou-se um novo conjunto de imagens, chamadas componentes principais, em um total de 3 CPs.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trata da apresentação dos resultados e suas discussões abrangendo a divisão em processamento digital, interpretação das imagens orbitais e análise e interpretação dos dados. O produto final é caracterizado por um mapa apresentando as áreas com maior ou menor vulnerabilidade aos processos erosivos e um capítulo à parte com a dinâmica multitemporal (1991 a 2014) das áreas de silvicultura na área de estudo.

5.1 Processamento Digital de Imagens

Na etapa de processamento digital de imagens, como explicado no item materiais e métodos, foram realizados o registro das imagens do satélite *Landsat 5*, sensor *TM*, aplicação da técnica de Análises por Componentes Principais, aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), realce do tipo linear, e segmentação e classificação supervisionada das cenas orbitais. Os dois primeiros itens, como o registro e análise por componentes principais foram detalhados no capítulo referente à dinâmica multitemporal das áreas de reflorestamento, cujos processamentos foram aplicados para o fim de detecção de mudanças da paisagem.

5.1.2 Modelo Linear de Mistura Espectral

O Modelo Linear de Mistura Espectral, relatado no item Referencial Teórico, é uma técnica utilizada por vários autores que permite melhorar a precisão da classificação supervisionada de uso e cobertura da terra. Neste trabalho utilizou-se o modelo linear de mistura espectral, expresso através da equação 1.1, implementada no *software* SPRING 5.2.6.

As bandas utilizadas como dados de entrada para a implementação do modelo linear de mistura espectral foram as bandas 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo) e 6

(infravermelho médio), as quais foram selecionadas de acordo com a melhor distinção dos alvos estudados, em função do seu comportamento espectral.

O Modelo Linear de Mistura Espectral foi aplicado no mosaico das cenas do sensor *OLI* do satélite *Landsat 8* da data de 27/10/2014, o qual foi utilizado para classificação de uso e cobertura da terra. Com a aplicação do modelo originou-se três novas imagens intituladas imagens fração solo, vegetação e sombra/água.

As imagens fração solo, vegetação e sombra são geradas a partir da decomposição da resposta espectral em cada pixel, onde qualquer banda pode ser considerada como uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente que constitui uma mistura espectral. O MLME gera a proporção dos componentes dessa mistura, como resultado tem-se as imagens fração. Essa decomposição só é possível quando identificados os denominados “pixels puros” de vegetação, solo e sombra/água.

Os pixels puros foram selecionados conforme a resposta espectral base desses pixels, como indicado em Shimabukuro e Ponzoni (2009), e também verificou se os valores de reflectância adicionados eram coerentes com as respostas espectrais teórico padrão destes alvos, conforme a Figura 13 e 14.

Conforme indicado na Figura 15, as imagens fração resultantes do MLME apresentam seus alvos contrastados. A imagem fração solo realça as áreas de solo exposto, a imagem fração vegetação realça as áreas compostas por espécies vegetais e a imagem fração sombra/água realça as áreas ocupadas sombra de relevo, corpos d’água (rios, lagos e áreas alagadas como plantações de arroz irrigado) e também áreas de queimadas (MOREIRA, 2011).

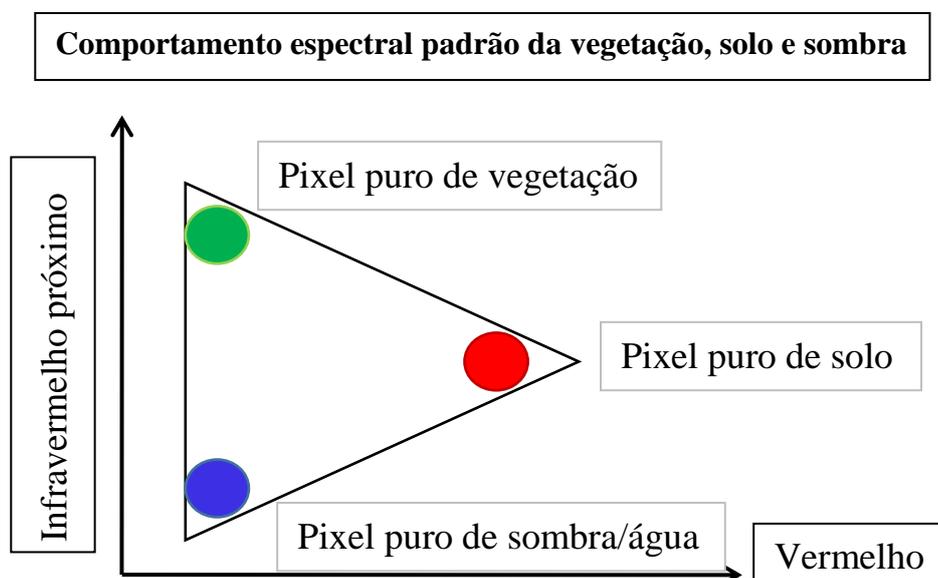


Figura 14 - Comportamento espectral padrão a ser orientado para seleção manual de pixels puros.

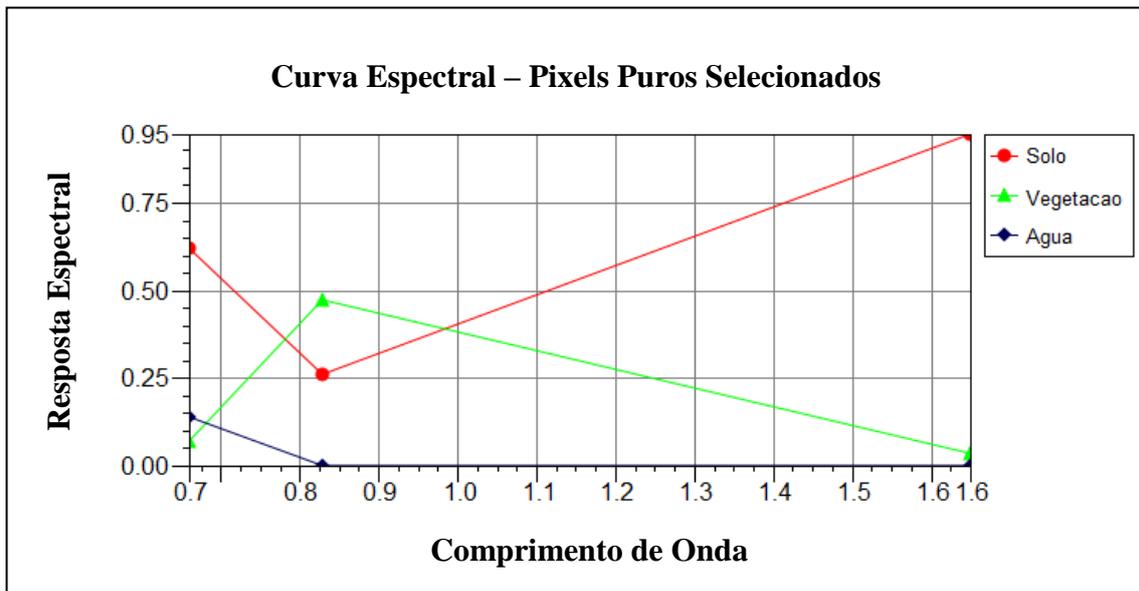


Figura 15 - Resposta espectral com a seleção manual dos pixels puros no *software* SPRING.

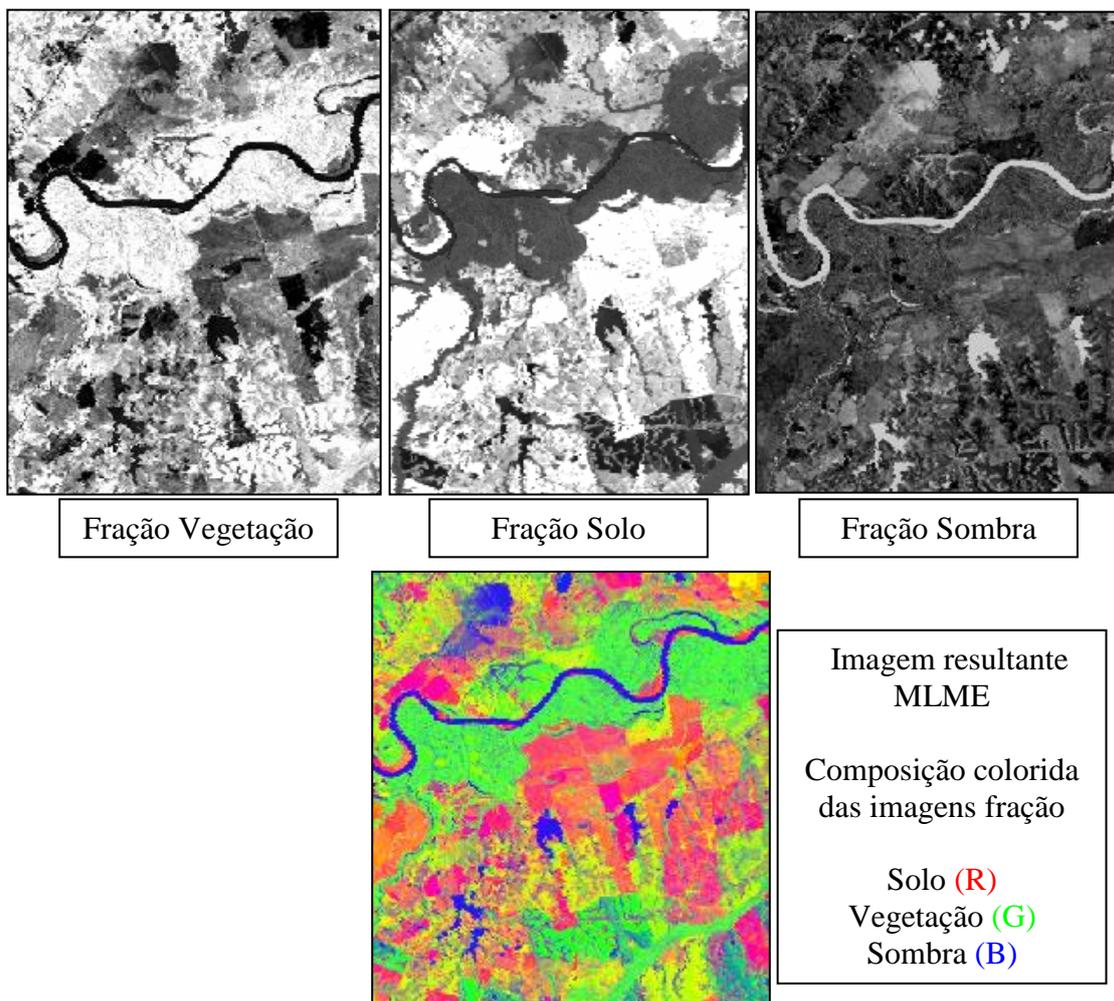


Figura 16 - Imagens fração vegetação, solo e sombra gerados pelo MLME, cenas do satélite *Landsat8* e respectiva composição colorida.

5.1.3 Realce Linear

A técnica mais utilizada nesse trabalho no que se refere a melhorar a interpretação visual dos alvos nas imagens de maneira rápida, correta e eficaz, foi o aumento linear de contraste.

O realce linear de contraste permitiu a manipulação do histograma em todas as bandas utilizadas e desencadeou uma melhor visualização dos alvos de interesse. No caso do mosaico das cenas do satélite *Landsat 8*, data de 27/10/2014, foi aplicado o realce linear após a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral, a fim de garantir que a aplicação do modelo não obtivesse nenhuma interferência.

Quanto às outras imagens como as cenas do satélite *Landsat 8* de 07/02/2014 que serviram apenas como base para a classificação de uso e cobertura da terra, e as cenas do satélite *Landsat 5* utilizadas para a análise temporal das espécies exóticas aplicou-se normalmente o realce linear após técnica de análise por componentes principais, para a realização da segmentação e classificação das áreas de reflorestamento em 1991 e 2014.

As mudanças e alterações visuais das imagens antes e depois da aplicação do realce linear podem ser analisadas na Figura 16.

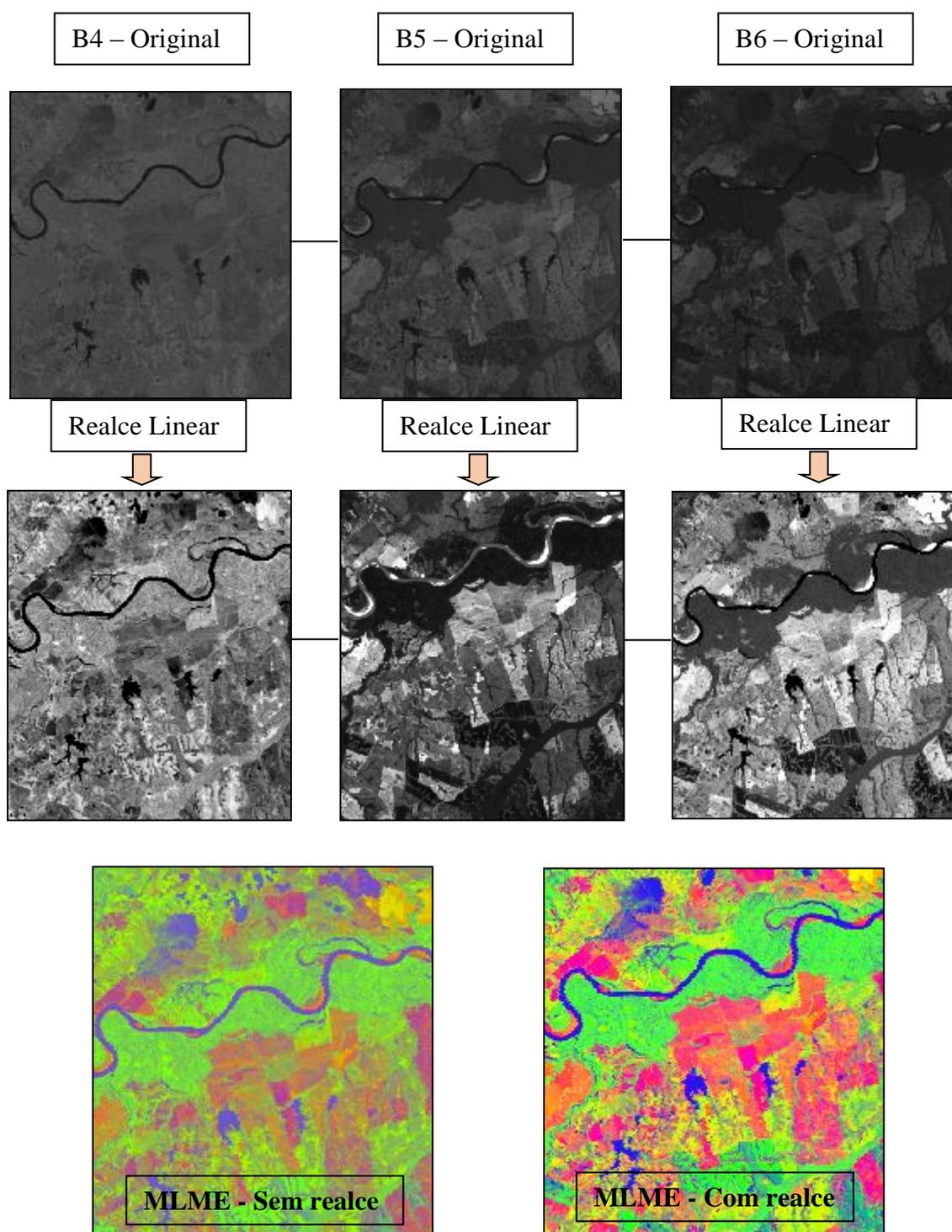


Figura 17 - Aplicação do realce linear nas bandas originais do satélite *Landsat8* e na composição do MLME.

A segmentação é a etapa posterior a aplicação do realce linear nas imagens fração originadas no Modelo Linear de Mistura Espectral. Foram utilizadas essas imagens como dados de entrada para a realização da segmentação, a qual de uma forma

geral é um processamento digital caracterizado pela subdivisão da imagem em áreas homogêneas.

As subdivisões apresentam uniformidade interna e as regiões diferem-se da vizinhança, expondo as características de descontinuidade e de similaridade de acordo com o algoritmo e os valores dos limiares de área e similaridade indicados manualmente. O algoritmo de segmentação utilizado nesse trabalho foi o de crescimento de regiões que considera a similaridade, baseado na busca de pixels vizinhos parecidos e então são agrupados em regiões homogêneas (SHIMABUKURO e ALMEIDA FILHO, 2002).

O limiar de área indica qual o tamanho mínimo que se deseja delimitar, associado ao limiar de similaridade que é a distância máxima entre os centros espectrais de duas regiões. Nessa etapa realizou-se vários testes até atingir os limiares que melhor delimitavam os alvos de interesse a serem classificados. O limiar de área utilizado foi de 30 e limiar de similaridade 70.

A segmentação pelo algoritmo de crescimento de regiões também foi aplicada para identificação das UTBs, com seus polígonos de intervenção antrópica, a fim de dividir precisamente as áreas territoriais associada às informações dos elementos como relevo, drenagem, níveis de cinza, possibilitando a análise da vulnerabilidade à erosão.

5.1.5 Classificação Supervisionada

A técnica de classificação supervisionada foi utilizada para a elaboração do mapa de uso e cobertura da terra da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã. Segundo NOVO (2010), a classificação é caracterizada pelo processo de atribuir uma classe a um *pixel* em função dos seus níveis de cinza, onde cada pixel é representado por coordenadas geográficas e apresenta o comportamento espectral dos alvos que o inserem.

Nesse trabalho utilizou-se o método supervisionado de classificação evidenciando a interferência do analista no processo classificatório e exige que se tenha um conhecimento prévio da área de estudo, nesse caso foram realizados trabalho de campo a fim de conhecer a paisagem da área.

A classificação supervisionada pode ser realizada tanto em nível de pixel quanto à de regiões. O classificador por regiões foi utilizado associando às regiões homogêneas originadas pelo processo de segmentação, explicado no item anterior, e possui

parâmetros estatísticos de cada região como dados de entrada para o cálculo das medidas de similaridade entre as regiões.

A classe solo exposto foi classificada com maiores restrições, sendo necessária a utilização de outras imagens orbitais para gerar um produto confiável e correto. Nesse caso, lançou-se mão das cenas do satélite *Landsat 8* da data de 07/02/2014 para confrontar com a imagem a ser classificada, a fim de conseguir diferenciar as áreas que realmente estariam impróprias para cultivo ou em maior tempo de pousio, daquelas que apresentavam culturas agrícolas e recém tinham sido colhidas.

Adquiriu-se uma média de 320 amostras de treinamento e teste na classificação das imagens fração solo, vegetação e sombra. Com a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral houve reduções significativas no tempo de classificação da área de estudo, tanto em relação à menor quantidade de amostras como também pela melhor discriminação das classes temáticas. Após a classificação temática das classes temáticas realizou-se a pós-classificação e edição matricial das classes de solo exposto para áreas de agricultura que recém tinham passado por processos de colheita ou culturas que ainda não tinham sido plantadas, como se exemplifica na Figura 17.

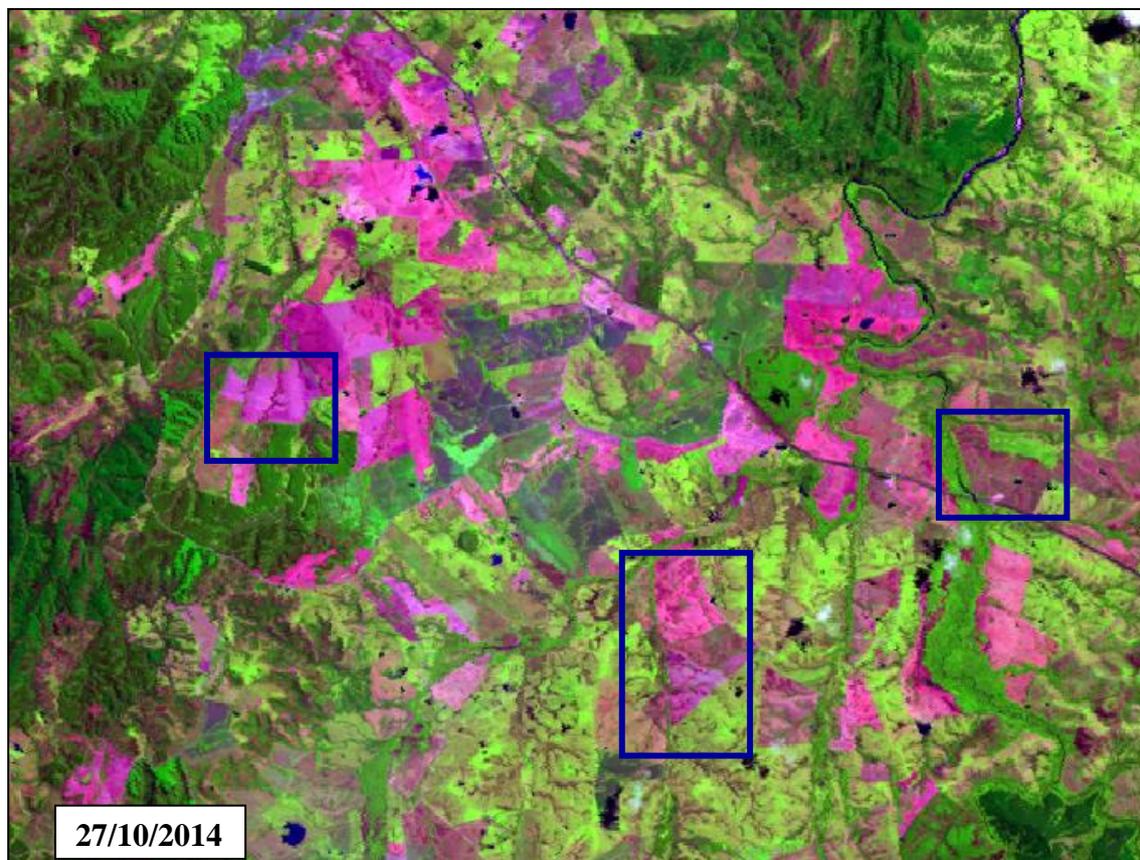
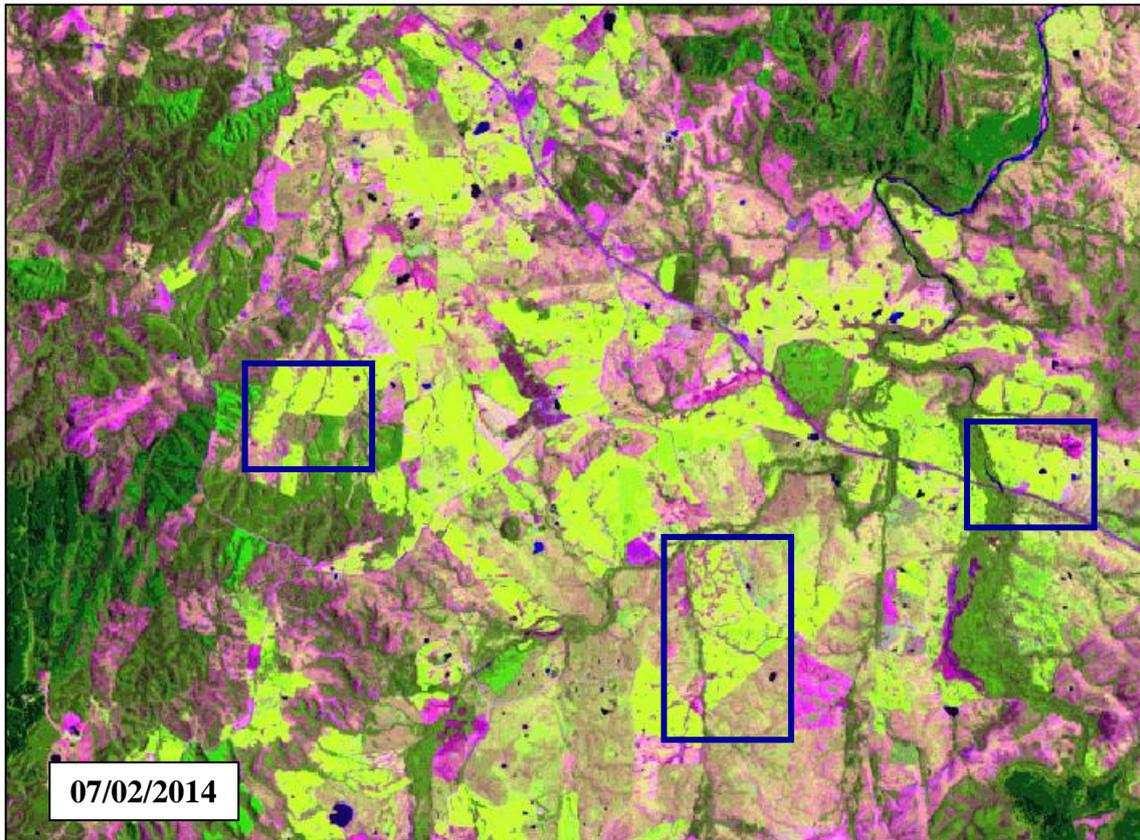


Figura 18 - Exemplificação da classe temática solo exposto e agricultura na mesma área no mosaico em épocas diferentes.

5.2 Análise da vulnerabilidade natural a erosão da área de estudo

A análise de cada mapa temático utilizado, juntamente com a sua caracterização quanto aos valores de estabilidade ou vulnerabilidade relaciona-se aos processos de morfogênese e pedogênese. O mapa final de vulnerabilidade natural à erosão da área de estudo é representado pela álgebra de mapas do conjunto de todos os mapas temáticos já descritos.

5.2.1 Uso e Cobertura da Terra

O mapa de uso e cobertura da terra foi elaborado a fim de espacializar e medir os diferentes usos destinados ao solo da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã. A partir disso, foram classificadas as áreas compostas por reflorestamentos, agricultura, solo exposto, vegetação/mata ciliar e corpos d'água.

A análise da vulnerabilidade natural à erosão se relaciona também com a estabilidade que a cobertura de vegetação garante ao solo e as atividades antrópicas que se realizadas em áreas equivocadas ou de maneiras prejudiciais promovem instabilidade.

As áreas onde há interferência das atividades antrópicas, como a agricultura incluindo as pastagens, permitem haver maior vulnerabilidade nessas regiões. Esse fato deve-se, principalmente, ao constante preparo e revolvimento dos solos para essas culturas, além da utilização indiscriminada desses solos sem a realização de pousio. Muitas vezes ocorre a falta de manejo adequado do solo sem práticas conservacionistas que visam reduzir os impactos causados pela agricultura.

Em relação ao reflorestamento, obteve-se maior destaque nesse trabalho devido ao grande aumento de áreas com espécies florestais exóticas, como Eucalyptus, Pinus e Acácia Negra, ocorrendo em mais de 24% do total da área de estudo. Essa ênfase quanto ao reflorestamento deve-se principalmente a mudança que ocorreu na paisagem dessas regiões com a inserção das espécies exóticas de maneira mais intensa.

A porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã está inserida no Bioma Pampa, que apresenta uma diversidade enorme na sua vegetação campestre natural e que está sendo convertida em lavouras agrícolas e cultivo de espécies exóticas. A inserção de áreas de reflorestamento na região deve-se ao fato de que as empresas multinacionais como Votorantin Celulose e Papel e a Celulose Riograndense.



Figura 19 - Áreas de reflorestamento no município de Piratini.

Por meio da operação de medida de classes do *software* SPRING, obteve-se os valores em hectares e porcentagem das áreas ocupadas por cada tipo de uso e cobertura da terra classificado, conforme exemplifica a Tabela 15.

Tabela 15 – Medidas de classes de uso e cobertura da terra da área de estudo em Hectares e %.

Uso e Cobertura da Terra	Área das classes (ha)	Área das classes (%)
Corpos d'água	3.825,2	0,71%
Solo Exposto	101.753,8	18,76%
Agricultura	124.507,6	22,96%
Vegetação	180.628,9	33,30%
Reflorestamento	131.648,6	24,27%
Total	542.364,1	100%

Conforme mostram os dados, a classe de uso e cobertura da terra mais significativa na área de estudo foi a vegetação, abrangendo 180.628,9 hectares com uma taxa de ocupação de 33,30%.

Essas áreas estão distribuídas ao longo dos limites da área de estudo, sendo caracterizada pelas regiões de matas ciliares ao longo do Rio Camaquã e de seus afluentes, como Arroio das Pedras em Canguçu e Arroio Abranjo em Encruzilhada do Sul.



Figura 20 - Rio Camaquã na divisa entre Encruzilhada do Sul e Canguçu.

Fonte: Panoramio, 2010.

Porém, apesar de significativa na área de estudo, não se pode afirmar que a porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã é considerada preservada. Ao analisar vários trechos do mosaico das imagens de satélite e com auxílio do Google Earth, se percebe que no trecho do Rio Camaquã, no limite dos municípios de Encruzilhada do Sul e Canguçu há pouca evidência de mata ciliar com pequenas áreas de vegetação nativa dispersas. A maior evidência ocorre para plantações de espécies exóticas típicas do reflorestamento, nas proximidades das margens do Rio Camaquã, associada às plantações agrícolas.

A média da largura do trecho do Rio Camaquã que compõe a área de estudo é de 100 metros, fato esse que segundo o Código Florestal (Lei nº 12.651 de 2012) prevê uma área de preservação permanente nas faixas marginais do rio com largura mínima de 100 metros para os cursos d'água de 50 a 200 metros de largura. Frente a isso, observa-se que valores significativos de vegetação de uma maneira geral não condizem com uma realidade local de preservação e conservação ambiental.

Associado a isso, tem-se aproximadamente 23% da área composta por agricultura e pastagem, as quais se distribuem por toda a área. Estas são caracterizadas por culturas temporárias como milho, soja, fumo, lavouras permanentes abrangendo as fruticulturas e também por pastagens plantadas e naturais.

Quanto às áreas de solo exposto obteve-se aproximadamente 18% da área total. Essas áreas correspondem às regiões que possuem solos desnudos seja referente às áreas

inapropriadas por intensa agricultura e falta de práticas conservacionistas, seja por áreas em pousio de mais de um ano ou aquelas próximas aos reflorestamentos como vias de acesso às plantações. Segundo o IBGE (2010), só em Encruzilhada do Sul tem-se 11.703 hectares de áreas impróprias para a agricultura ou pecuária, sendo caracterizada por pântanos, areais ou pedreiras.

A partir dessas características, para cada uma das classes estabelecidas, foram adotados valores de vulnerabilidade como descrito na Tabela 16.

Tabela 15 - Valores de Estabilidade/Vulnerabilidade para as classes de uso e cobertura da terra.

Classes de Uso e Cobertura da Terra	Vulnerabilidade
Vegetação	1,3
Corpos d'água	1,5
Floresta exótica	2,2
Agricultura	2,8
Solo exposto	3,0

Fonte: Adaptado de Manual Técnico de Uso e Cobertura da Terra – IBGE (2006).

A análise da vulnerabilidade natural à erosão baseia-se no nível de cobertura do solo, as associações naturais do meio físico e os tipos de atividade antrópica presente nessa área, exemplificado na Figura 20. A partir disso, pode-se considerar que áreas mais estáveis são aquelas que possuem uma cobertura de vegetação nativa mais densa como a classe vegetação, onde foi dado o valor mais baixo de vulnerabilidade, indicando estabilidade dessas áreas, que permitem uma maior infiltração das precipitações pluviais, diminuindo o escoamento superficial e a capacidade de erosão do solo. Segundo Florenzano (2008), a cobertura vegetal é de extrema importância na caracterização da morfodinâmica da unidade de paisagem e infere a sua capacidade de proteção.

Quanto às áreas ditas antropizadas, incluem-se as culturas temporárias e perenes, as pastagens, os solos expostos e as florestas exóticas. Essas áreas possuem um alto valor de vulnerabilidade à erosão, por apresentarem baixa cobertura do solo, intenso preparo para a agricultura, além de não possuírem um manejo adequado do solo com práticas conservacionistas a fim de minimizar o impacto e o desgaste do solo.

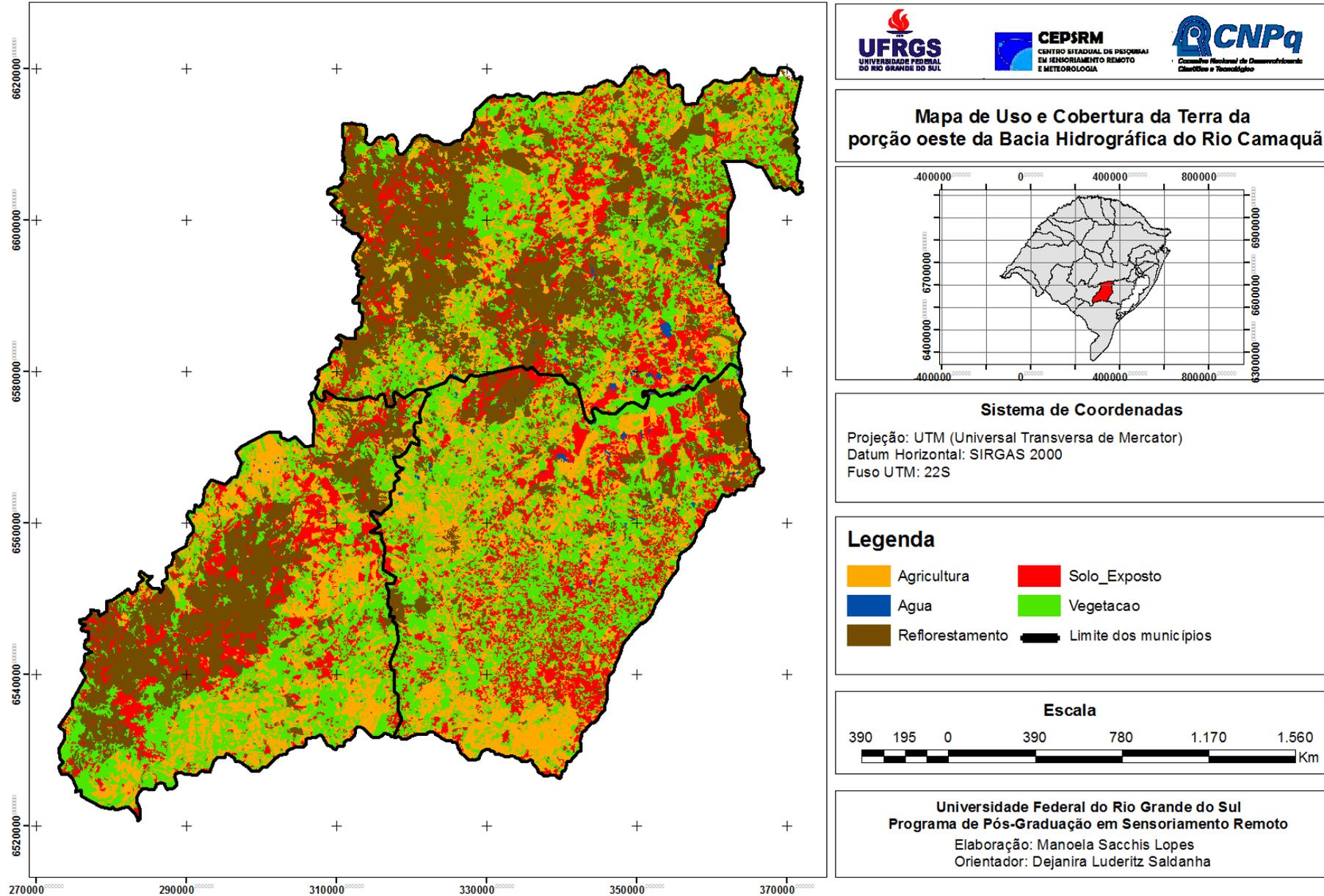


Figura 21 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra da porção oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã.

5.2.2 Geomorfologia

Os critérios utilizados para analisar este item foram englobados pelas unidades geomorfologia, hipsometria e declividade. O mapa das unidades geomorfológicas é apresentado na Figura 21, demonstrando as principais classes, mapeadas na escala de trabalho.

A partir disso, foram indicados os valores de vulnerabilidade para cada um dos temas acima descritos. Primeiramente, em relação às unidades geomorfológicas, identificou-se no mapeamento de 1:250.000, três classes significativas na área: Planalto Rebaixado Marginal, Planalto Residual e Planície Alúvio-Coluvionar.

O menor valor de vulnerabilidade, como exemplificado na Tabela 4, pertence à região morfológica Planalto Residual, inserida na região morfológica Planalto Sul Riograndense e é considerado um modelado de dissecação, um relevo com topos convexos e topos estreitos e alongados, mas diferenciando-se pela menor predisposição a erosão que o Planalto Rebaixado Marginal, apresentando valores de vulnerabilidade de fraco a médio.

O Planalto Rebaixado Marginal é característico de um relevo que está bastante dissecado, organizado em colinas, com encostas geralmente íngremes. Destacam-se relevos alongados de topo convexo, com vertentes de forte declividade (SOARES, 2009). Às áreas de Planalto Rebaixado Marginal na área de estudo apresentam um modelado de dissecação de forte a muito forte predisposição a erosão possuindo um valor de vulnerabilidade de 2,5.

Em relação à Planície Alúvio-Coluvionar caracteriza-se como a região mais instável das classes, pois nesse tipo de relevo ocorre acumulação de sedimentos, oriundos do arraste de outras áreas pela erosão hídrica e são decorrentes de processos de modificações do relevo e das áreas ao redor (GOMES, 2005).

A unidade geomorfológica mais significativa da área de estudo é Planalto Residual abrangendo 268.117 hectares, seguido do Planalto Rebaixado Marginal com 235.442 hectares e da Planície Alúvio Coluvionar presente em 18.511 hectares do oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

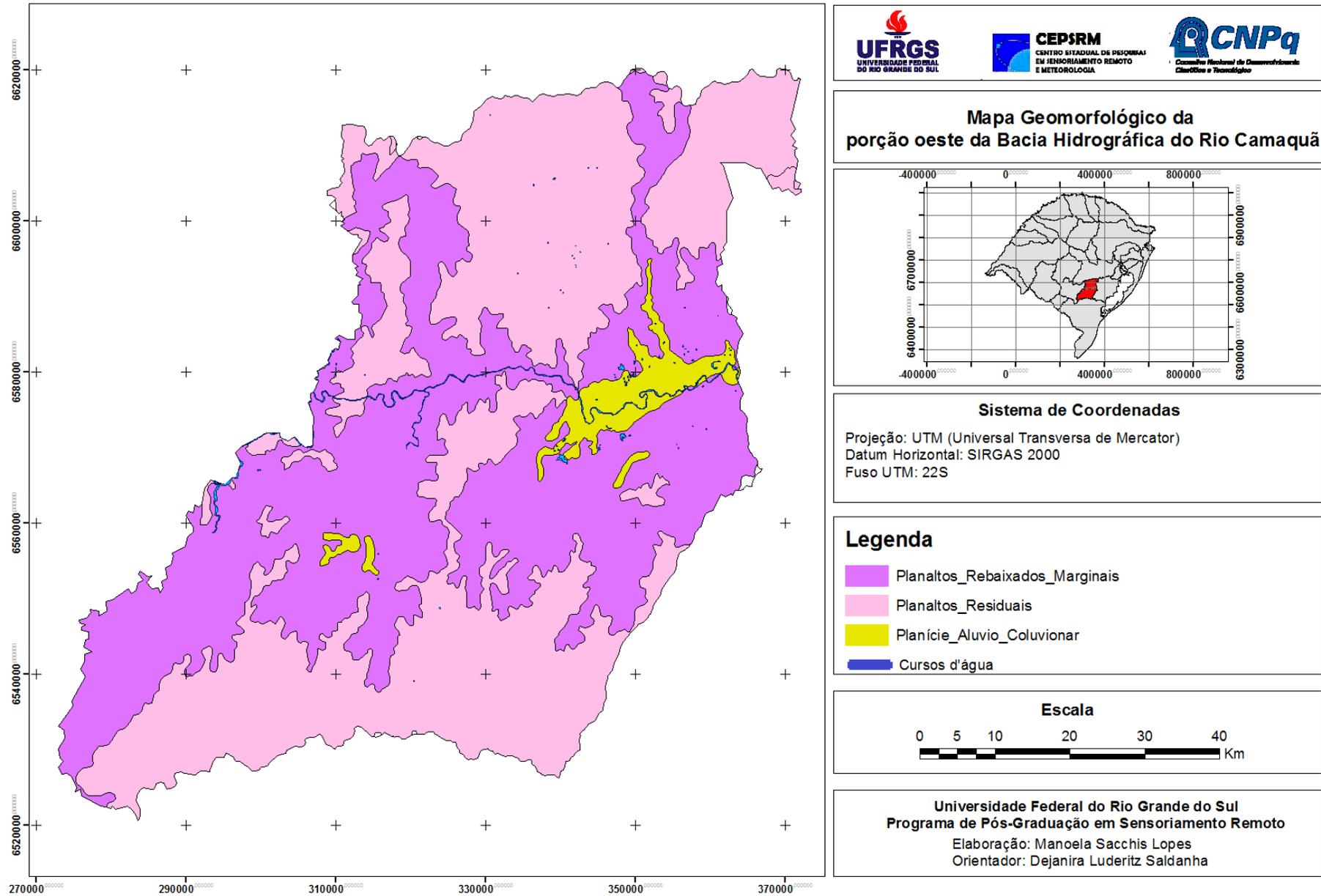


Figura 22 - Mapa geomorfológico da porção da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã.

Quanto à variável hipsometria, a Tabela 5 evidencia que as áreas onde apresentam uma altitude menor que 20 metros são consideradas estáveis com valor de estabilidade igual a 1,0 e as áreas com altitude maior que 200 metros são consideradas instáveis e vulneráveis com valor de vulnerabilidade igual a 3,0. Pode-se perceber, que quanto menor a altitude mais estável é a unidade geomorfológica, apresentando um relevo mais plano. Neste caso o relevo é mais plano e a perda de solo por processos erosivos é considerada mais lenta do que em relevos mais acidentados.

Por meio da ferramenta de análise exploratória com estatísticas descritivas do *software* SPRING, analisou-se que área de estudo apresenta valores altimétricos amplos com intervalo mínimo de 29 metros e máximo de 600 metros, tendo uma média de altitude de aproximadamente 135 metros e tendo áreas com 200, 300 e 600 metros de altitude. As regiões mais representativas da área de estudo correspondem a classe maior que 200 metros, abrangendo 359.364 hectares, 66% da área total.

Juntamente a análise da geomorfologia, outra variável analisada foi a declividade. A declividade é caracterizada por ser a inclinação que a superfície do terreno possui em relação ao plano horizontal em que se encontra (LIMA et. al, 2010). Essa inclinação influencia o escoamento superficial decorrente das precipitações pluviométricas sobre o terreno e é altamente responsável pelo aumento da erosão, sendo importante o conhecimento dessas inclinações para poder controlar os diversos tipos de perdas de solo.

A Figura 23, os níveis de vulnerabilidade foram divididos segundo Florenzano (2008), conforme a Tabela 5. As áreas que possuem declividade menor que 3,5% são consideradas estáveis, as áreas com declividade no intervalo de 3,5% a 27,2% são intermediárias e as aquelas com declividades maiores que 27,2% são declaradas como áreas vulneráveis, onde se processa os eventos erosivos.

A porcentagem de declividade mais significativa da área de estudo é a classe de 5,8 a 8,2% abrangendo 109.706 hectares, seguida das classes 3,5 a 5,8% com 104.920 hectares e a classe de 0-3,5% com 97.128 hectares. Em termos dos valores de vulnerabilidade, conforme a Tabela 5, os valores que se apresentam mais significativos são aqueles mais próximos a estabilidade, porém apesar de se apresentarem em menores áreas, as regiões de maiores declividades são levadas em consideração e afetam o cálculo da vulnerabilidade natural à erosão.

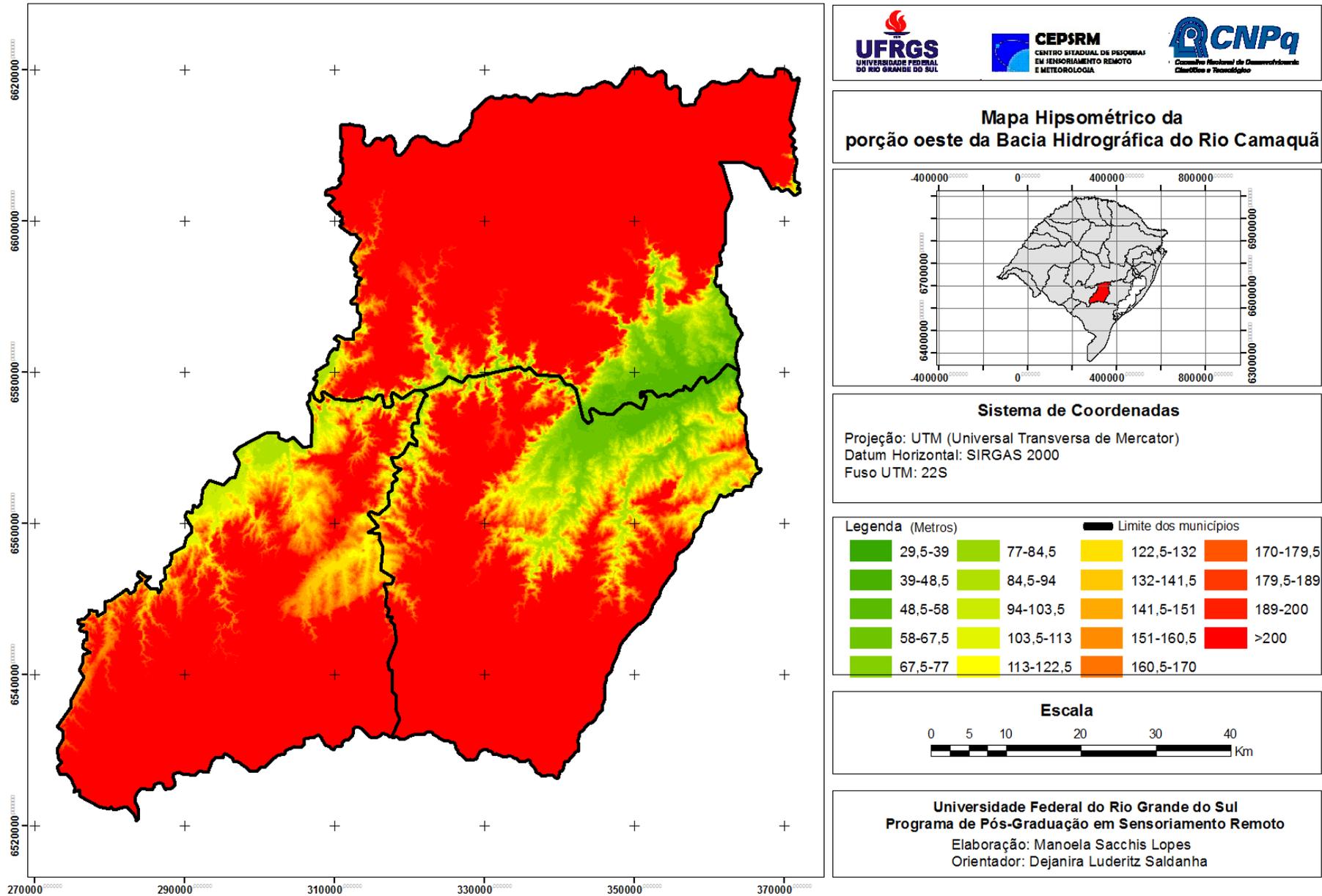


Figura 23 - Mapa Hipsométrico da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

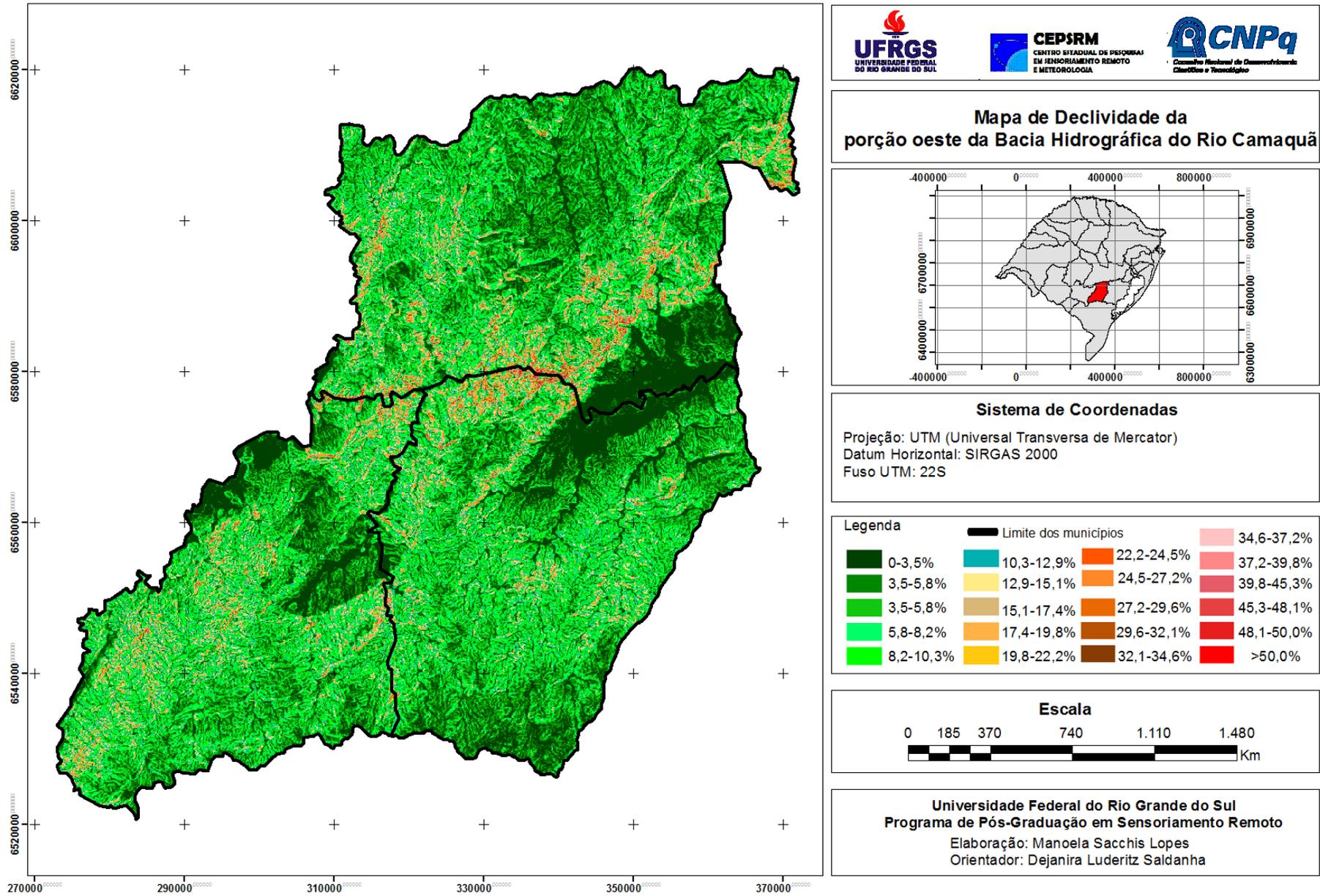


Figura 24 - Mapa de Declividade da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

5.2.3 Pedologia

De acordo com o mapa pedológico pré-existente do IBGE (2003), na área de estudo foram identificados cinco tipos de solos (Figura 24), denominados Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, Planossolo Eutrófico, Solo Litólico Eutrófico e Distróficos e Aluviais Eutróficos, na escala 1:250.000. Conforme a classificação atual dos solos da Embrapa (2006), esses solos correspondem aos Argissolos, Planossolos, e Neossolos. A análise para os valores de vulnerabilidade das classes dos solos foi realizada de acordo com suas características principais e sua propensão à erosão.

Os argissolos, segundo a Embrapa (2006), possuem limitação relacionadas a baixa fertilidade, acidez, altos teores de alumínio e a suscetibilidade à erosão, devido à relação textural destes solos que apresentam diferenças de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais. Os argissolos eutróficos apresentam melhor fertilidade natural em relação aos distróficos, pois os solos distróficos não apresentam eficiência dos produtos de adubação para culturas agrícolas, principalmente se estiverem localizados em relevos acidentados. A partir disso, esses solos para serem conservados de maneira correta precisam de práticas conservacionistas para evitar o descaminho de fertilizantes e também tentar conter os processos erosivos já existentes.

Em relação aos planossolos, os mesmos ocorrem em áreas de relevo plano ou suave ondulado e na área de estudo, estão relacionados a cultura do arroz irrigado. Possuem baixa permeabilidade, altos teores de alumínio e apresentam deficiência nutricional que acarretam em baixo desenvolvimento das culturas, devendo ocorrer um manejo adequado para plantios.

Os neossolos são característicos da área de estudo, e anteriormente à nova classificação de solos da Embrapa (2006) eram considerados como Latossolos. Os neossolos variam desde sedimentos de origem aluviais como os solos aluviais eutróficos até decomposição de rochas da era pré-cambriana. Em áreas próximas aos cursos d'água são considerados áreas de preservação permanente e sendo assim não devendo ser utilizado para plantios agrícolas. Na maioria das vezes esse fato não é respeitado.

Em ambientes com maiores declividades, os neossolos rasos apresentam limitação para agricultura com restrição para utilização de mecanização e uma forte suscetibilidade aos processos erosivos, possuindo necessidades de práticas conservacionistas nas encostas. Os neossolos são os solos mais significativos da área de

estudo, ocorrendo nas regiões onde o relevo é ondulado a forte ondulado, assim tendo limitações próprias ao cultivo agrícola, o que deve ser analisado nas escolhas das culturas e nas características do plantio e tipo de mecanização utilizada para não acarretar em processos erosivos severos. Vale ressaltar, como descrito no item de uso e cobertura da terra que as áreas de neossolos são utilizadas para diversas culturas, como soja, fumo e reflorestamentos.

Tabela 16 - Medidas de classes para os solos da área de estudo em Ha e %.

Classe de Solos	Vuln.	Área (Ha)	Área (%)
Ae (Solos Aluviais Eutróficos)	1,0	2.923,79	0,54
Pve (Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico)	2,0	45.052,88	8,31
Ple (Planossolo Eutrófico)	2,5	22.406,42	4,13
PVd (Podzólico Vermelho Amarelo Distrófico)	2,8	196.934,57	36,32
Rd (Solos Litólicos Eutróficos)	3,0	274.919,81	50,70

As classes que englobam maior parte da área de estudo são classificadas como Litólicos Eutróficos abrangendo 50,70% da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã, seguida pelos solos Podzólicos Vermelho Amarelo Distrófico com 36,32%. Os valores de vulnerabilidade foram indicados de acordo com a predisposição à erosão de cada classe pedológica, os solos litólicos eutróficos apresentam valor de vulnerabilidade igual a 3,0, Podzólico Vermelho Amarelo Distrófico 2,8, Planossolo Eutrófico 2,5, Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico 2,0 e Solos Aluviais Eutróficos 2,2. Em termos de vulnerabilidade dos solos, a área de estudo se mostra preocupante, uma vez que a maior porcentagem é de solos Litólicos Eutróficos (Neossolos), que necessitam de atenção especial em relação ao manejo adequado do solo.

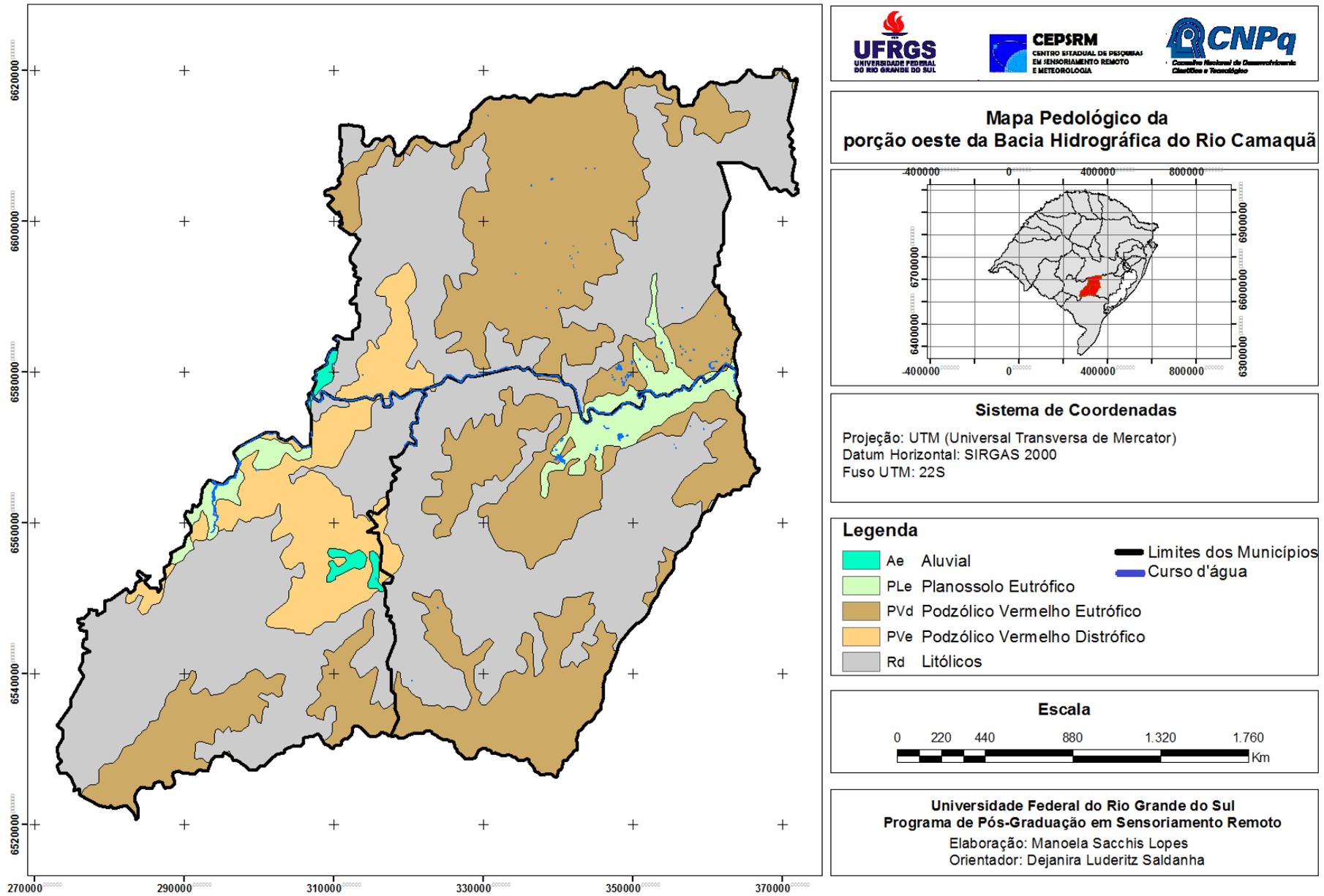


Figura 25 - Mapa de Solos da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

5.2.4 Geologia

A análise da vulnerabilidade das formações geológicas foi realizada de acordo com a Tabela 7, segundo os estudos de Crepani et. al (1996;2001). Esses valores foram adaptados para a área de estudo e definidos de acordo com as litologias e o grau de coesão das rochas que as compõem.

O grau de coesão das rochas, indica o nível da ligação entre os minerais e partículas que as constituem, indicando a resistência ao intemperismo das rochas e também a capacidade de resistir à desagregação entre os minerais. Associado a isso, percebe-se que rochas pouco coesas indicam uma maior predisposição à vulnerabilidade, prevalecendo os processos erosivos e as rochas mais coesas, indicam os processos formados de solos. Na área de estudo foram encontradas distintas formações geológicas, como pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 17 - Formações geológicas presentes na área de estudo.

Formações Geológicas	Características gerais	Vuln.
Supergrupo Porongos	Micaxistos, quartzitos.	1,0
Complexo Granítico Encruzilhada do Sul	Associação de granitoides, representada por granodioritos, quartzos monzonitos. Justapõem de modo complexo rochas graníticas mais evoluídas.	1,2
Complexo Canguçu	Associação de rochas magmáticas e metamórficas.	1,3
Suíte Intrusiva Arroio dos Ladrões	Granitos a álcali-feldspato granitos, localmente porfíricos. Com posicionamento controlado por zonas rúpteis.	1,5
Suíte Alcalina Passo da Capela	Rochas alcalinas feldspatóldicas, chaminés e diques de fonólitos.	1,4
Complexo Cerro da Árvore	Metandesitos, metarriolitos, metatufitos.	1,5
Complexo Cerro das Madeiras	Metarcóseos a muscovita e/ou biotita, micaxistos, mármore. O conjunto sobrepõe aos gnaisses do Complexo Cambaí.	1,7
Formação Arroio dos Nobres	Conglomerados petromíticos, grosseiros e espessos.	2,5
Formação Rosário do Sul	Arenitos médios a finos, siltitos argilosos e lamitos friáveis.	2,7
Depósitos Aluvionares	Areias, cascalheiras, e sedimentos siltico-argilosos de planície de inundação, terraços e depósitos da rede fluvial atual.	3,0

O estudo de Crepani et.al (2001) acerca da vulnerabilidade das rochas envolve os processos de intemperismo das rochas, e a partir disso os valores utilizados de vulnerabilidade/estabilidade seguem essa metodologia e estão indicados na Tabela 18.

Os mais destacados processos que causam o intemperismo são os processos físicos e químicos. O intemperismo físico é caracterizado pela quebra do material rochoso por procedimentos totalmente mecânicos atuando com forças internas e externas à rocha, como por exemplo, a esfoliação do afloramento rochoso, crescimento de cristais dentro da rocha (congelamento ou precipitação de sais) e insolação. Já com o intemperismo químico ocorrem os processos de decomposição, facilitam a destruição da estrutura cristalina dos minerais constituintes das rochas e geralmente ocorrem por interferência da água.

Além da estrutura e composição química, a taxa de intemperismo de um mineral depende do tamanho do cristal, da forma do cristal, sua perfeição e pureza e agente do intemperismo, associado também ao comportamento do agregado de minerais.

Quanto às características geológicas da área de estudo, composta por rochas ígneas e metamórficas, adaptou-se os valores de vulnerabilidade. Sabe-se que as rochas ígneas são provenientes de material rochoso móvel na natureza, tendo ocorrido uma fusão de silicatos na sua fase líquida. As rochas ígneas participam de uma transformação exotérmica, ao contrário do processo das rochas metamórficas, que são endotérmicos agindo sobre um material já consolidada.

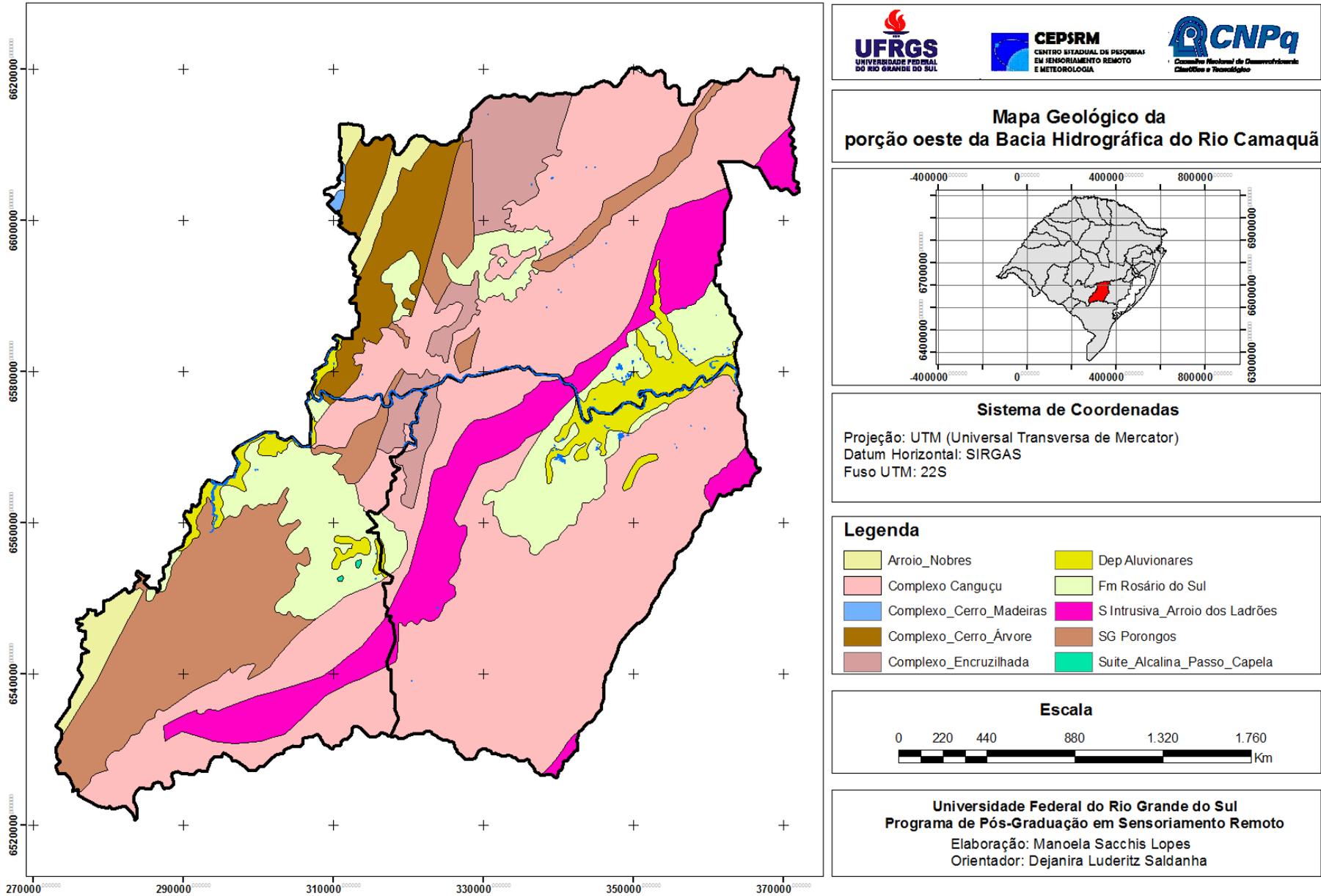


Figura 26 - Mapa Geológico da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

5.3 Vulnerabilidade Natural à Erosão

A partir da metodologia proposta, dos valores de vulnerabilidade definidos e das operações com álgebra de mapas possibilitou-se a obtenção do mapa de vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã, conforme a Figura 26. Neste mapa foram relacionadas 21 classes de vulnerabilidade e suas extensões na área de estudo.

As unidades foram classificadas de modo que as classes com valores entre 1,0 a 1,39 foram definidas como estáveis, as que apresentaram valores de 1,4 a 1,79 foram classificadas como moderadamente estável. Os valores no intervalo de 1,8 a 2,29 definiram a classe de medianamente estável/vulnerável, os valores entre 2,3 a 2,69 determinaram a classe de moderadamente vulnerável e, por fim, as unidades com valores entre 2,7 a 3,0 foram classificadas como vulneráveis.

Conforme a Tabela 19 e a Figura 26, a área de estudo não pode ser considerada uma região estável. As classes, Estável e Moderadamente Estável das Unidades Territoriais Básicas (UTBs) não são significativas, abrangendo menos de 1% da área total da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

Tabela 19 - Medidas de classes de vulnerabilidade natural à erosão.

Classes Vulnerabilidade Natural	Área das Classes (ha)	Área das Classes (%)
Moderadamente Estável 1	67,68	0,013
Moderadamente Estável 2	22,68	0,004
Moderadamente Estável 3	254,61	0,05
Medianamente Estável	4304,88	0,80
Medianamente Estável/Vuln.	15404,85	2,85
Medianamente Estável/Vuln. 2	142762,10	26,40
Medianamente Vuln./Est.	219901,2	40,66
Medianamente Vulnerável	85520,43	15,81
Moderadamente Vulnerável	37402,11	6,91
Moderadamente Vulnerável 1	25177,23	4,66
Moderadamente Vulnerável 2	9551,07	1,77
Moderadamente Vulnerável 3	428,49	0,08

As UTBs mais estáveis (Moderadamente Estável e Medianamente Estável) estão localizadas em áreas com menos predisposição à erosão referente às características geomorfológicas, geológicas, hipsométricas e de declividades, associadas ao solo com

cobertura de vegetação nativa. Estas são unidades que representam um equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese. A identificação dessas estabilidades e vulnerabilidades se processam no estilo de autocompensação, por exemplo, se a UTB apresenta um solo com alta predisposição à erosão, porém apresenta declividade baixa, altitude média, formações geológicas com alto poder de coesão de rochas e cobertura do solo com vegetação nativa, as variáveis com alta vulnerabilidade acabam se amortizando, pois o que comanda a estabilidade/vulnerabilidade de uma UTB é o conjunto do seu meio físico e não apenas um quesito analisado separadamente.

As áreas medianamente estáveis/vulneráveis correspondem à 82% da área total e são consideradas de transição para a vulnerabilidade, como indica a Tabela 19, 56% da totalidade da área de estudo já são consideradas medianamente vulneráveis. Essas áreas são as mais significativas na área de estudo e ocorrem de forma ampla em toda a região, principalmente nas limitações dos solos Podzólico Vermelho Distrófico, unidade geomorfológica Planalto Residual, altitudes maiores que 200 metros e classes de uso e cobertura da terra como reflorestamento e agricultura.

As áreas moderadamente vulneráveis predominaram na porção central, noroeste e sudoeste, ao total somam 12% do território estudado. Essas áreas ocorrem, principalmente, onde ocorrem as formações geológicas Rosário do Sul e Depósitos Aluvionares, associadas às outras variáveis com média/alta vulnerabilidade, como solos Litólicos Eutróficos e Podzólico Vermelho Distrófico, unidade geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal, altitudes maiores que 200 metros e classes de uso e cobertura da terra como solo exposto, reflorestamento e agricultura.

Essa classificação deve-se ao fato de que os Depósitos Aluvionares são as áreas consideradas mais instáveis das classes geológicas, pois nessa classificação apresentam-se as areias, cascalheiras, siltitos e sedimentos da planície de inundação e depósitos da rede fluvial. Coincidem com a acumulação de sedimentos, decorrentes dos processos de modificação do relevo. Além disso, o uso do solo nas várzeas das planícies fluviais, como culturas de arroz irrigado e até mesmo plantações de espécies exóticas nas margens dos rios, favorecem a erosão por perda de solo, pois é uma região frágil em termos geológico, geomorfológico e pedológico, podendo ocorrer degradações de forma acelerada.

A área de estudo apresenta vários tipos de culturas agrícolas e inserção de pecuária, esse tipo de uso e cobertura da terra está associado a uma maior predisposição a erosão, principalmente pelo processo de escoamento superficial ser mais acentuado

com o revolvimento do subsolo para cima e para baixo. Esse fato deve-se à mecanização das lavouras, que também ocorre em alguns plantios florestais exóticos, possibilitando a diminuição da espessura do topo do solo e diminuindo o teor de matéria orgânica e outros nutrientes, podendo afetar tanto na sua fertilidade natural quanto na sua resistência aos impactos das gotas da chuva (GUERRA;MARÇAL, 2011).

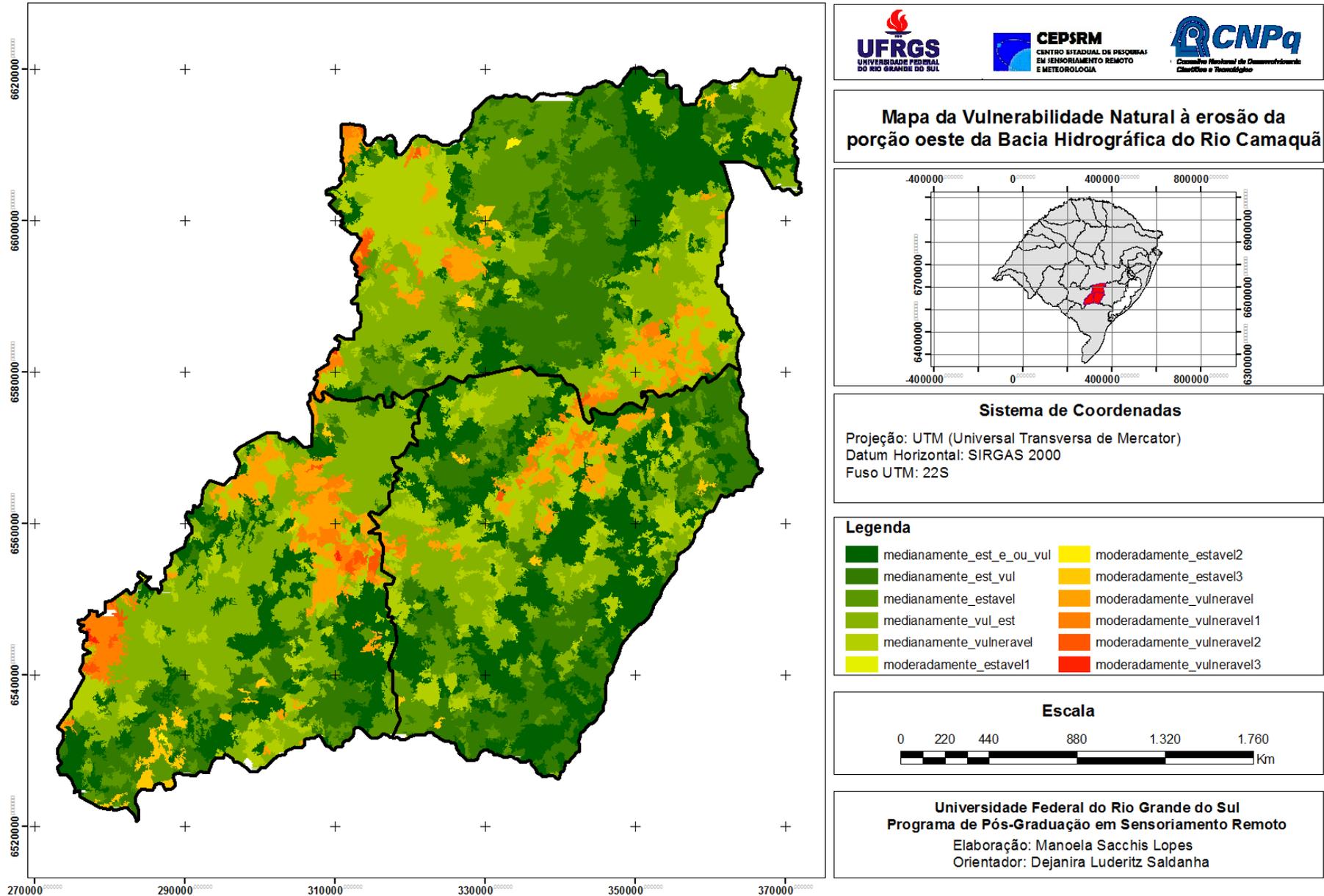
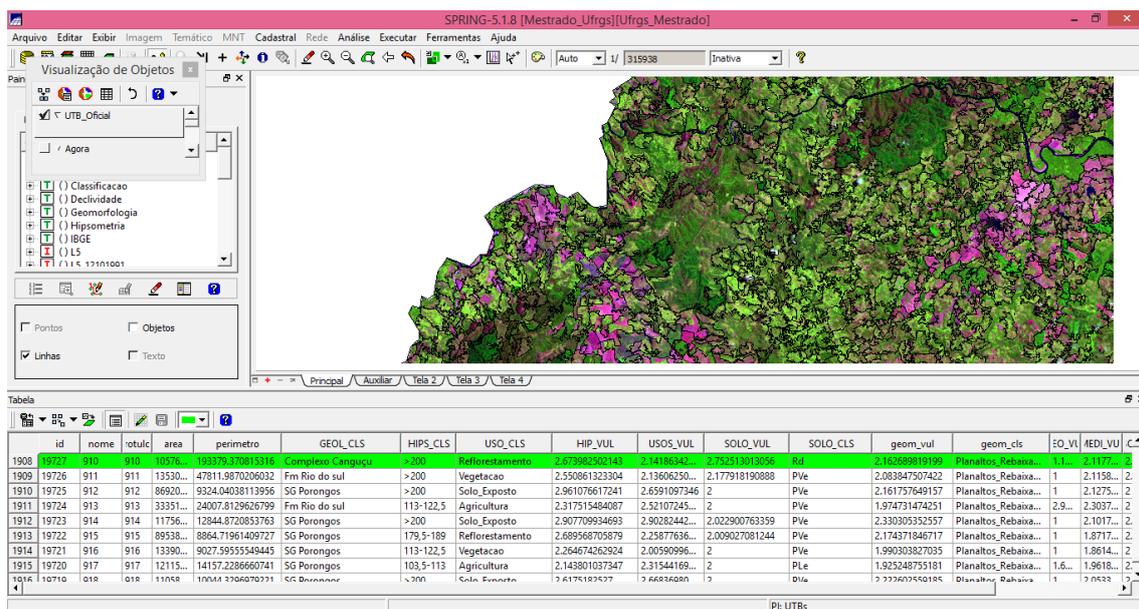


Figura 27 - Mapa da vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

5.4 Banco de dados geo-relacional

Esse trabalho também teve como resultado, a elaboração juntamente com as análises e processamentos para gerar o mapa de vulnerabilidade natural à erosão, um banco de dados geo-relacional. Na parte de Modelo de Dados do *software* SPRING criou-se uma categoria chamada UTBs, cuja classificação é chamada de objeto. Dentro dessa categoria editou-se os objetos e foi criada uma tabela com os atributos referentes a cada uma das classes e 3017 rótulos para cada polígono, conforme mostra a Figura 27.



The screenshot shows the SPRING-5.1.8 software interface. The main window displays a map of a landscape with various colored polygons representing different land use or geological classes. The interface includes a menu bar, a toolbar, and a 'Visualização de Objetos' panel on the left. Below the map, a 'Tabela' (Table) is displayed, showing a list of objects with their attributes.

id	nome	totulc	area	perimetro	GEOL_CLS	HIPS_CLS	USO_CLS	HIP_VUL	USOS_VUL	SOLO_VUL	SOLO_CLS	geom_vul	geom_cls	EO_VI	AEDELVU	c
1908	19727	910	10576...	193379.370815316	Complexo Canquicu	>200	Reflorestamento	2.673982502143	2.14196342...	2.752513013056	Rd	2.352499819199	Planaltos_Rebaixa...	1.1...	2.1177...	2
1909	19726	911	13530...	47811.9870206032	Fm Rio do sul	>200	Vegetacao	2.550861323304	2.13606250...	2.177918190888	PVe	2.083847507422	Planaltos_Rebaixa...	1	2.1158...	2
1910	19725	912	86920...	9324.04038113956	SG Porongos	>200	Solo_Exposto	2.961076617241	2.6591097346	2	PVe	2.161757649157	Planaltos_Rebaixa...	1	2.1275...	2
1911	19724	913	33351...	24007.8129626799	Fm Rio do sul	113-122,5	Agricultura	2.317515484087	2.52107245...	2	PVe	1.974731474251	Planaltos_Rebaixa...	2,9...	2.3037...	2
1912	19723	914	11756...	12844.8720853763	SG Porongos	>200	Solo_Exposto	2.907709934693	2.90282442...	2.022900763359	PVe	2.330305352557	Planaltos_Rebaixa...	1	2.1017...	2
1913	19722	915	89538...	8864.71961409727	SG Porongos	179,5-189	Reflorestamento	2.689568705879	2.25877636...	2.009027081244	PVe	2.174371846717	Planaltos_Rebaixa...	1	1.8717...	2
1914	19721	916	13390...	9027.59555549445	SG Porongos	113-122,5	Vegetacao	2.264674262924	2.00590996...	2	PVe	1.990303827035	Planaltos_Rebaixa...	1	1.8614...	2
1915	19720	917	12115...	14157.2286660741	SG Porongos	103,5-113	Agricultura	2.143881037347	2.31544169...	2	PLe	1.925248755181	Planaltos_Rebaixa...	1,6...	1.9618...	2
1916	19719	918	11158...	11904.37564070731	SG Porongos	< 200	Solo Exposto	2.8175187577	2.66826681	?	Dna	2.22667050185	Planaltos_Rebaixa...	1	2.1823...	2

Figura 28 - Banco de dados geo-relacional.

Esse banco de dados geo-relacional permitiu que consultas sejam realizadas automaticamente e possibilitou a realização de cruzamentos entre informações. Com o mapeamento das UTBs e a elaboração de um banco de dados geo-relacional, pode-se consultar cada uma das unidades de paisagem, tendo acesso as características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, climatológicas e uso e cobertura da terra.

Assim, nesse tipo de banco de dados podem-se descobrir as características que se deseja e cruzar as informações, para achar uma área que apresente Neossolos em áreas de altitude baixa e com presença de agricultura, por exemplo. Essas consultas sobre o mapa cadastral e a tabela de atributos ocorrem porque o banco de dados é geo-relacional e permite a realização de operadores de geo-objetos

5.5 Detecção de mudanças da paisagem – Espécies Exóticas

Este item decorre da análise realizada por meio do trabalho de campo visando verificar a extrema mudança da paisagem do Bioma Pampa evidenciada nos municípios de Piratini, Encruzilhada do Sul e Canguçu. Essas diferenciações ocorrem, principalmente pelo incremento de plantações de espécies exóticas na região, sendo característicos da presença de grandes empresas de celulose e seus latifúndios de plantações de espécies como Pinus, Eucalyptus e Acácia Negra.

5.5.1 Análise por Componentes Principais - ACP

A técnica de Análise por Componentes Principais permitiu a integração dos dados orbitais multitemporais, realçando as áreas da dinâmica entre as datas de 1991 a 2014. Como visto anteriormente, a ACP permite uma redução da dimensionalidade dos dados e das informações redundantes.

A partir disso, aplicou-se a técnica por meio da ferramenta existente no *software* SPRING. Para chegar a um produto que demonstrasse a detecção de mudanças da área de estudo foram realizados diversos testes com combinações das bandas do *Landsat 5* e *Landsat 8*, até chegar à conclusão de utilizar as bandas 3 e 4 (Vermelho) de 1991 e 2014 associada banda 5 (infravermelho próximo) de 2014 (*Landsat 8*), apresentando a melhor dinâmica das áreas de reflorestamento.

A análise por componentes principais é realizada por meio da matriz de covariância onde se calculam os autovalores e autovetores da matriz que são de suma importância para a utilização da ACP, onde os autovalores indicam a contribuição de cada componente em termos de variância total dos conjuntos de dados e os autovetores indicam a contribuição de cada banda específica para a geração de cada componente principal.

A Figura 29 a seguir evidencia a contribuição das componentes para a detecção de mudanças na área de estudo, indicando que a banda 5 (*Landsat 8* – Infravermelho próximo - 2014) obtém a maior variância do conjunto, que a primeira componente apresenta 45,58% da variância total do conjunto, a segunda componente 39,41% e a terceira componente 15,01%. A partir disso, sabe-se que a segunda e terceira componente são não correlacionadas, permitindo a análise das mudanças entre as datas de 1991 e 2014.

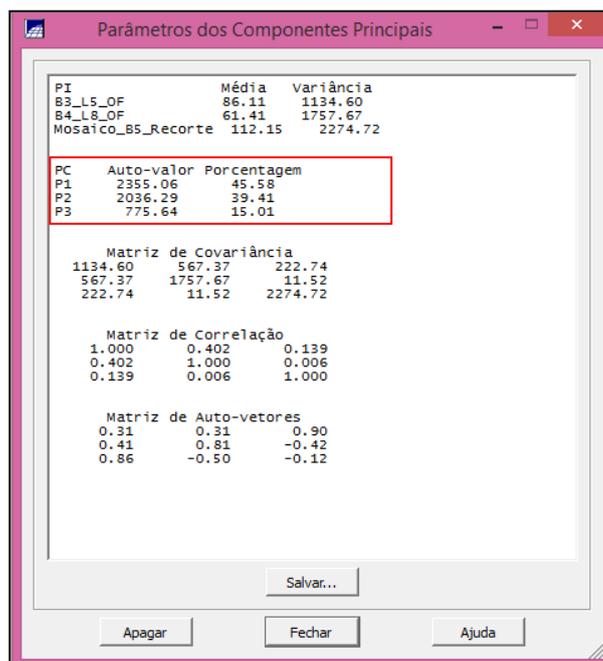


Figura 29 - Parâmetros dos Componentes Principais.

Após a análise dos parâmetros, realizou-se a combinação das bandas na composição RGB, onde a segunda componente refere-se ao canal verde (G), terceira componente ao canal vermelho (R) e a banda 5 (infravermelho próximo – L8 – 2014) ao canal azul (B), conforme a Figura 30.

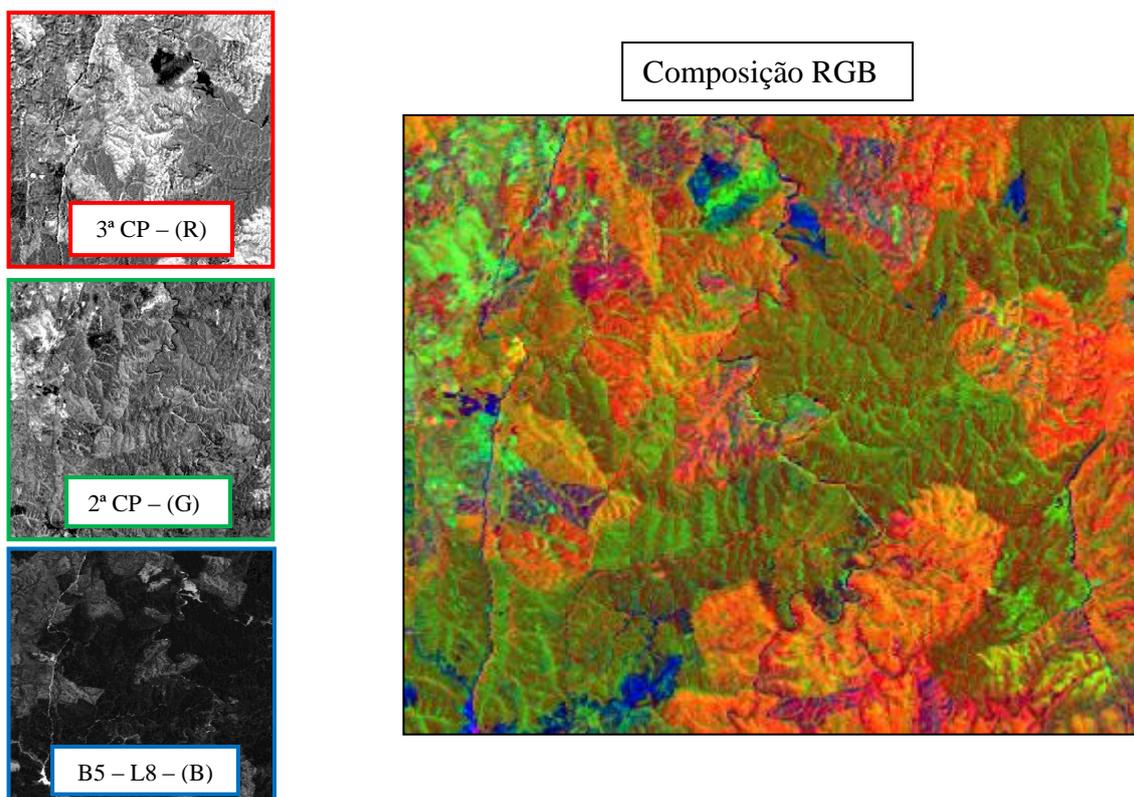


Figura 30 - Composição colorida entre a 1ª e 2ª Componente Principal e a Banda 5 do satélite *Landsat 8* (2014).

Essa composição de bandas foi escolhida após inúmeros testes e foi a que melhor atendeu o objetivo da detecção de mudanças das áreas de reflorestamento entre 1991 a 2014. Percebe-se na imagem que as áreas em que aparecem na combinação falsa-cor em verde escuro simbolizam as áreas de reflorestamento que já existiam em 1991 e continuaram em 2014, já as áreas que apresentam coloração laranja claro e laranja escuro representam os incrementos de espécies exóticas nos últimos 23 anos. Essa combinação demonstra de maneira muito eficaz as respectivas mudanças e conforme a Figura 31, as comparações entre as imagens de 1991 e 2014 percebe-se que essa composição colorida atende a análise de detecção de mudanças para a área de estudo.

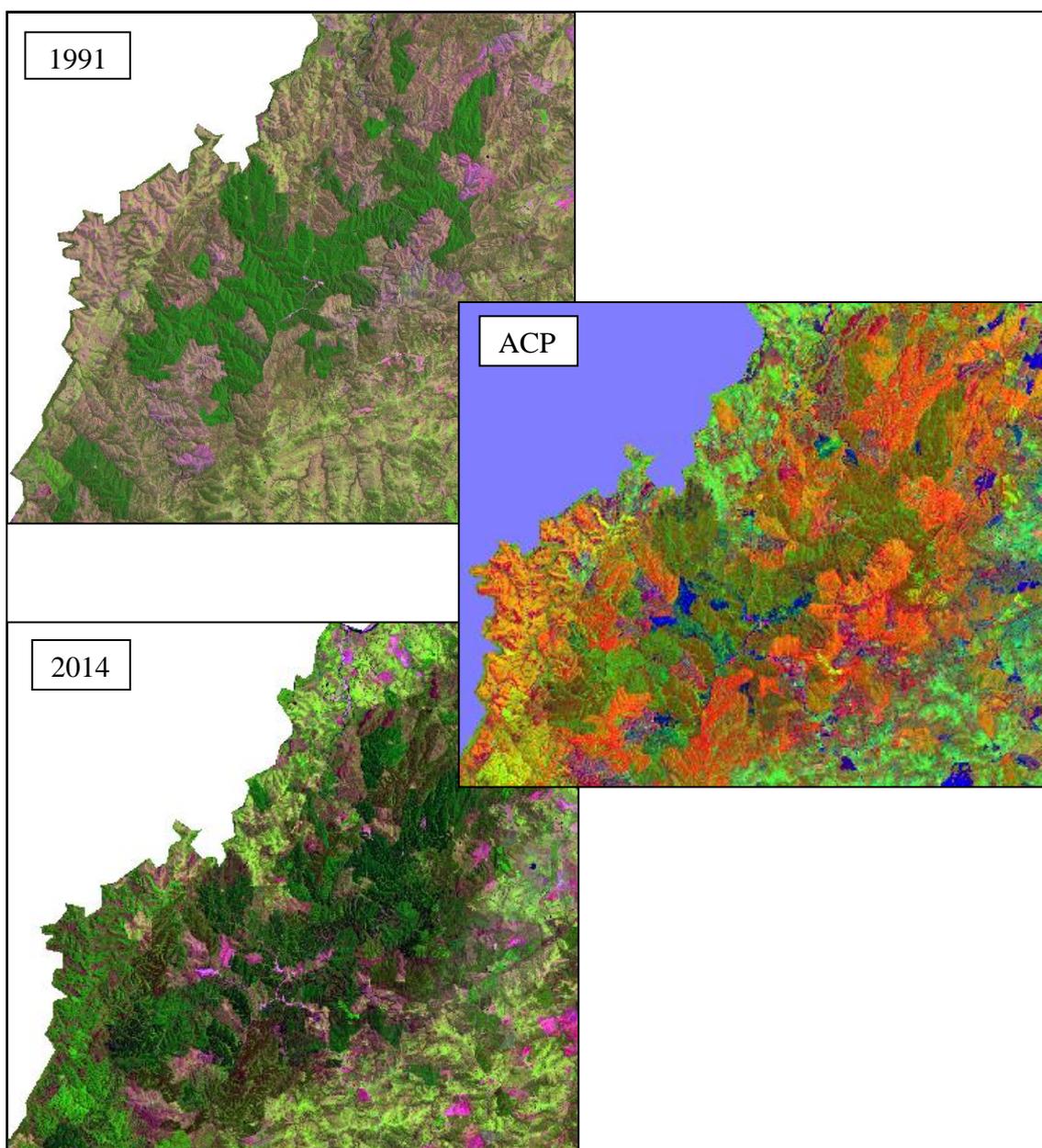


Figura 31 - Detecção de mudanças das áreas de reflorestamento de 1991 a 2014.

Como é possível observar na Figura 31, há um grande incremento das áreas de reflorestamento na porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã. As áreas alaranjadas demonstram os incrementos das espécies exóticas nos últimos 23 anos, as áreas de coloração verdes claras são áreas de agricultura e as áreas em azul demonstram as regiões de solo exposto que se coincidem tanto no ano de 1991 e 2014.

Após essas análises e aplicação da técnica de componentes principais realizou-se a classificação supervisionada a fim de detectar as áreas que eram reflorestamento em 1991 e continuaram em 2014 e as novas áreas de incremento de espécies exóticas na região, no mesmo período.

5.5.2 Classificação das áreas de mudança e não mudança

A classificação das áreas de reflorestamentos em 1991 e 2014 foi realizada por meio do método de classificação supervisionada através do classificador por regiões pelo algoritmo fundamentado na medida da distância de Bhathacharya.

A classificação foi realizada sobre o mosaico com o processamento digital da técnica de Análises por Componentes Principais (ACP) que permitiu a classificação de apenas duas classes: áreas antigas de reflorestamento, que já existiam no ano 1991 e permaneceram em 2014 e áreas novas de reflorestamento que surgiram durante os anos até 2014.

Essas áreas são entendidas como áreas de mudança e não mudança. Por meio da técnica de ACP com a composição colorida das bandas em que a segunda componente refere-se ao canal verde (G), terceira componente ao canal vermelho (R) e a banda 5 (infravermelho próximo – L8 – 2014) ao canal azul (B), foi permitido a realização de apenas uma classificação, não necessitando classificar as imagens 1991 e 2014 e depois comparar as classificações. Nesse último caso, a propagação de erros é maior, aumenta muito mais o custo computacional e volume de dados.

Por meio da técnica ACP e classificação supervisionada pode-se aferir acerca da dinâmica multitemporal das áreas de reflorestamento da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

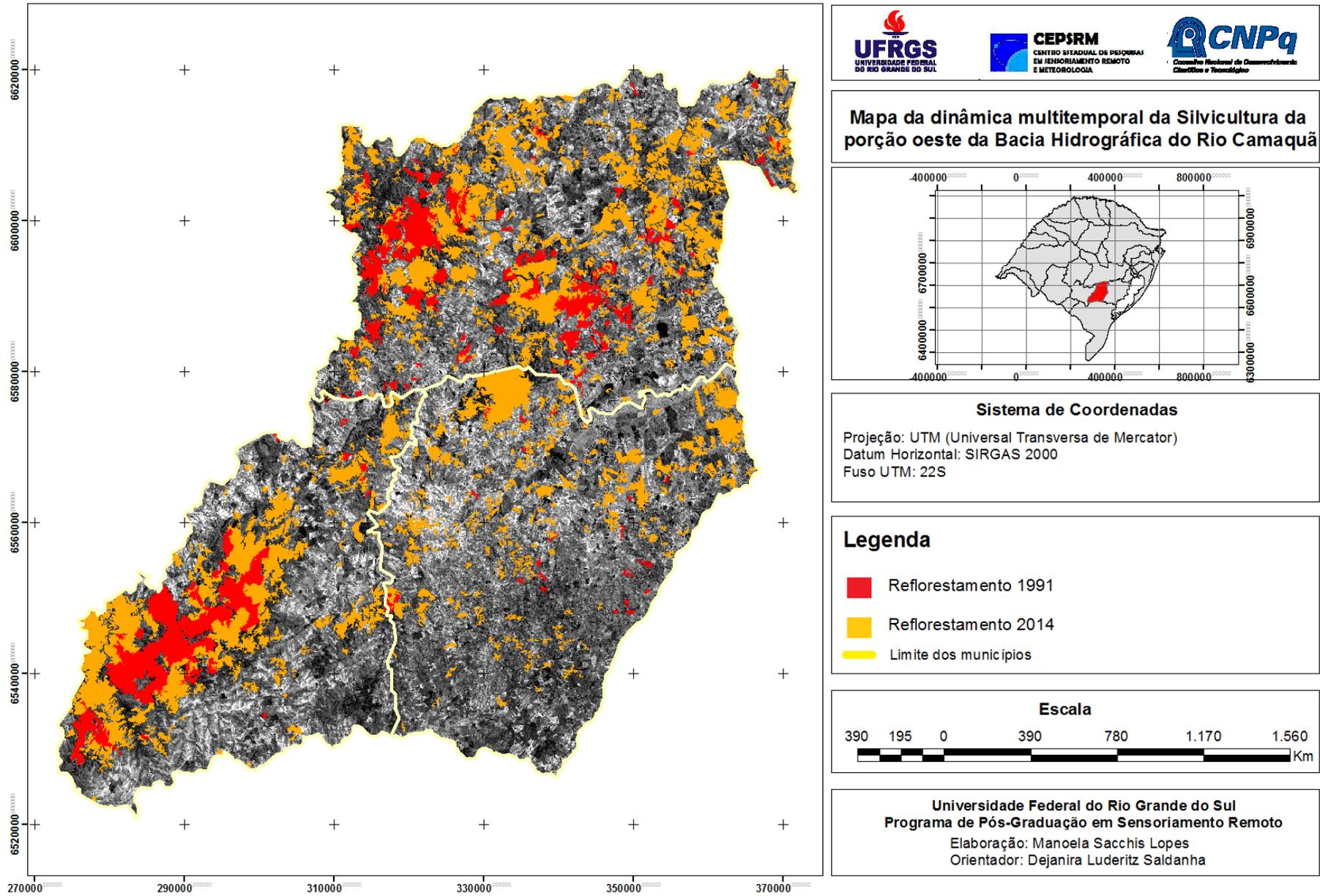


Figura 32 - Mapa da dinâmica temporal da Silvicultura na porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

5.5.3 Análise multitemporal – 1991 a 2014

A área de estudo está localizada na metade sul do estado do Rio Grande do Sul, inserida no bioma Pampa, que ocupa uma área de 176.496 km², correspondendo a 63% do território do Estado (IBGE, 2004). A paisagem natural do bioma é ampla e variada apresentando uma imensa biodiversidade, com predomínio de campos nativos, mas também matas ciliares, matas de encosta, formações arbustivas, butiazais, banhados e afloramentos rochosos. O bioma não é completamente descrito pela ciência, pois há estimativas que existam 3000 espécies de plantas e somente de gramíneas, mais de 450 espécies, além de mais de 500 espécies de aves na fauna.

Apesar do bioma Pampa possuir toda essa biodiversidade de espécies e ser um bioma único do Rio Grande do Sul, sabe-se que em 2002 restava apenas 41,32% do habitat e em 2008 restavam 36,03% (IBAMA, 2010).

Estimativas recentes indicam que esta região é composta de pelo menos 3.000 plantas vasculares, com 450 espécies de gramíneas e 150 de leguminosas, além de 385 aves e 90 mamíferos, sendo parte destas espécies chamadas endêmicas, pois só ocorrem neste ecossistema (Picolli e Schnadelbach, 2007).

Esses valores são preocupantes e são decorrentes da progressiva inserção e expansão das monoculturas e pastagens com espécies exóticas nessas regiões, favorecendo a degradação ambiental e uma mudança significativa da paisagem natural do bioma Pampa. Sabe-se que qualquer tipo de monocultura provoca um desequilíbrio ambiental provocando a diminuição de algumas espécies e a propagação desenfreada de outras, podendo alterar a dinâmica ecológica básica do ecossistema.

Associada às essas informações e ao trabalho de campo percebeu-se uma mudança severa na paisagem dos municípios Piratini, Encruzilhada do Sul e Canguçu. Essa mudança deve-se ao fato da inserção de muitos hectares de florestas plantadas com espécies exóticas como Eucalyptus, Acácia e Pinus.

O que deve ser levado em consideração também, além da mudança da paisagem e desmatamento das espécies nativas do bioma, é o modo como são conduzidos os plantios de espécies florestais. É necessário em declividades acentuadas que o plantio seja em curvas de nível, a fim de evitar a erosão. Além disso, após a colheita as áreas geralmente ficam expostas, favorecendo a ação da chuva e do vento e podendo aumentar os processos erosivos.

Como visto na classificação de uso e cobertura da terra, percebe-se vários hectares de reflorestamento nas margens do Rio Camaquã sendo que essas áreas são de preservação permanente e deveriam estar preservadas, segundo o Código Florestal.

Sendo assim, há muita preocupação com as plantações de florestas exóticas principalmente pela possibilidade de causar impactos nos habitats naturais, reduzindo a biodiversidade e mudando totalmente a fisionomia da paisagem.

Conforme a Figura 32, houve uma mudança significativa nas áreas com atividades de Silvicultura, ocorrendo de 1991 a 2014 uma inserção de novas áreas e novos plantios em toda a extensão do território estudado. Os municípios que apresentam maior quantidade de reflorestamentos em 1991 e que se expandiram em 2014, são Encruzilhada do Sul e Piratini pela aumento da atuação de empresas multinacionais como Votorantin Celulose e Papel e a Celulose Riograndense.

A área de estudo se encontra em um bioma peculiar do Rio Grande do Sul, o bioma Pampa, devido à quantidade de espécies e sua biodiversidade. Não se aplica nesse trabalho, a oposição quanto ao reflorestamento e plantios de florestas exóticas, mas sim a não extensão de grandes áreas em um bioma de tanta importância e que segundo o Ministério do Meio Ambiente deve ter constante cuidado e preservação. As informações que priorizam o crescimento econômico de uma metade sul intitulada de pobre erroneamente deve ser constantemente observada e não ter o objetivo de mudar toda uma paisagem e um habitat de várias espécies que se desenvolvem apenas nessa região.

Segundo o mapeamento da dinâmica temporal de 1991 a 2014, aferiu-se que as áreas de reflorestamento em 1991 abrangiam, aproximadamente, 32.025 hectares de áreas com silvicultura e em 2014 esse número chegou a 124.256 hectares. Percebeu-se que as áreas que já existiam plantações acabaram sendo expandidas ao redor das mesmas, sem nenhuma zona de proteção que impeça a invasão agressiva das espécies exóticas nas áreas de mata nativa.

Além disso, segundo Sell (2012), no município de Piratini, por exemplo, há impactos visíveis das lavouras de Acácia, principalmente pelo plantio se estender até as margens do Rio Camaquã, invadindo as áreas de preservação permanente e também haver incoerências nos plantios em declividades mais altas sem obedecer as curvas de nível do terreno.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo da vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã é uma metodologia eficaz para auxiliar o planejamento territorial ambiental, permitindo analisar as potencialidades e as restrições do meio ambiente. Também possibilitou compreender melhor os processos que podem levar a degradação da área, juntamente com as regiões mais propícias e menos propícias à sua ocupação, utilizando variáveis do meio físico aliado à intervenção humana.

A área de estudo é considerada de elevado interesse ambiental por estar localizada no Bioma Pampa, apresentando uma paisagem natural ampla e variada com imensa biodiversidade, com predomínio de campos nativos, mas também matas ciliares, matas de encosta, formações arbustivas, butiazais, banhados e afloramentos rochosos, com estimativas que existam 3000 espécies de plantas e somente de gramíneas, mais de 450 espécies, além de mais de 500 espécies de aves na fauna.

A partir de toda essa peculiaridade a análise da vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã trouxe como resultados que a área de estudo não é considerada Estável em relação às suas características do meio físico e influência da atividade antrópica. As UTBs mais estáveis (Moderadamente Estável e Medianamente Estável) estão localizadas em áreas com menos predisposição à erosão referente às características geomorfológicas, geológicas, hipsométricas e de declividades, associadas ao solo com cobertura de vegetação nativa, apresentando equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese.

As áreas medianamente estáveis/vulneráveis correspondem à 82% da área total e são consideradas de transição para a vulnerabilidade e 56% da totalidade da área de estudo já são consideradas medianamente vulneráveis. Essas áreas são as mais expressivas na área de estudo e ocorrem de forma ampla em toda a região, principalmente nas limitações dos solos podzólico vermelho distrófico, unidade geomorfológica Planalto Residuais, altitudes maiores que 200 metros e classes de uso e cobertura da terra como reflorestamento e agricultura.

As áreas moderadamente vulneráveis predominaram na porção central, noroeste e sudoeste, ao total somam 12% do território estudado. Essas áreas ocorrem, principalmente, onde ocorrem as formações geológicas Rosário do Sul e Depósitos Aluvionares, associadas às outras variáveis com média/alta vulnerabilidade, como solos

solos litólicos eutróficos e podzólico vermelho distrófico, unidade geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal, altitudes maiores que 200 metros e classes de uso e cobertura da terra como solo exposto, reflorestamento e agricultura. Essa classificação deve-se ao fato de que os Depósitos Aluvionares são as áreas consideradas mais instáveis das classes geológicas, pois nessa classificação apresentam-se as areias, cascalheiras, siltitos e sedimentos da planície de inundação e depósitos da rede fluvial. Vale ressaltar que a variável climatológica não foi inserida no cálculo da vulnerabilidade natural à erosão devido à existência de apenas uma estação meteorológica na área estudo, evidenciando a dificuldade de incluir esse tema importante no trabalho.

Em relação a dinâmica multitemporal das áreas de silvicultura, concluiu-se que áreas de reflorestamento em 1991 abrangiam, aproximadamente, 32.025 hectares de áreas com silvicultura e em 2014 esse número chegou a 124.256 hectares. Percebeu-se que as áreas que já existiam plantações acabaram sendo expandidas ao redor das mesmas, sem nenhuma zona de proteção que impeça a invasão agressiva das espécies exóticas nas áreas de mata nativa. Além disso, apesar do bioma Pampa possuir toda essa biodiversidade de espécies e ser um bioma único do Rio Grande do Sul, sabe-se há um intenso decréscimo das suas áreas nativas.

Entretanto, não se aplica nesse trabalho, a oposição quanto ao reflorestamento e plantios de florestas exóticas, mas sim a não extensão de grandes áreas em um bioma de tanta importância e que segundo o Ministério do Meio Ambiente deve ter constante cuidado e preservação, para que se atinjam menores impactos ambientais, melhores técnicas para o desenvolvimento das plantas e que se organizem plantios sustentáveis baseados na conservação do meio físico.

Associado à isso, a silvicultura pode ser um aliado dos pequenos produtores e do desenvolvimento econômico da região, desde que não ocupem grandes áreas mudando totalmente a paisagem do bioma Pampa, como ocorre nesses municípios. As plantações de espécies exóticas devem seguir padrões básicos de conservação e serem limitadas para que não se expanda de forma desenfreada favorecendo apenas o lucro de grandes empresas. Para que a silvicultura seja uma prática ambientalmente aceitável deve-se realizar preparo do solo com o menor número de revolvimentos e operações para que se consiga atingir um equilíbrio com as limitações do solo e também manter resíduos florestais sobre o solo. O cultivo mínimo deve ser a opção dessas florestas, para que se lancem mão de operações mínimas sobre o solo, para que se atinjam menores impactos

ambientais, melhores técnicas para o desenvolvimento das plantas e que se organizem plantios sustentáveis baseados na conservação do meio físico.

A partir disso, os valores da classificação das áreas com silvicultura se mostraram muito próximas às informações do IBGE (2012) para cada município, identificando a metodologia da Análise por Componentes Principais como uma ferramenta eficaz na caracterização da dinâmica temporal das áreas de reflorestamento na porção oeste da bacia hidrográfica do Rio Camaquã.

Em relação à aplicabilidade, utilização das técnicas, métodos para a realização da metodologia de Crepani e para analisar a dinâmica multitemporal de reflorestamentos na área de estudo concluiu-se que a metodologia e os parâmetros utilizados foram eficazes e adequados para garantir que os objetivos finais fossem alcançados.

Como recomendação para trabalhos futuros, pode ser realizada juntamente com a análise de vulnerabilidade natural à erosão das variáveis do meio físico, um diagnóstico socioeconômico a fim de investigar os potenciais sociais da região. Associado a isso, recomenda-se avaliar os processos morfo-pedogenéticos com a técnica Analytic Hierarchy Process (AHP) utilizando uma programação multicritério, com objetivo de organizar uma decisão de maneira hierárquica, qualitativa e mensurável, distribuindo pesos distintos a cada variável do meio físico.

As metodologias aqui aplicadas são úteis para as gestões territoriais e possibilitam um ordenamento mais adequado do ambiente, tendo em vista que as áreas mais vulneráveis ambientalmente já são conhecidas e necessitam de fiscalizações para que não ocorra desgaste precoce do solo, maiores degradações ambientais e mudança extrema da paisagem natural. Assim, o mapeamento da vulnerabilidade natural à erosão e o estudo referente à dinâmica multitemporal das áreas de reflorestamento podem auxiliar nas futuras gestões territoriais, possibilitando um maior ordenamento juntamente ao planejamento ambiental adequado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACSELRAD, H. **Vulnerabilidade Ambiental, Processos e Relações**. II Encontro Nacional de Produtores e Usuários de Informações Sociais, Econômicas e Territoriais, FIBGE, Rio de Janeiro, 2006.

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, p. 268-281, 2006.

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira / Burn scar detection based on linear mixture model and vegetation indices using multitemporal data from MODIS/ TERRA sensor in Mato Grosso State, Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 4, p. 445 - 456, 2005.

AMARAL, E. F.; LANI, J.L.; BARDALES, N.L.; OLIVEIRA, H. Vulnerabilidade ambiental de uma área piloto na Amazônia Ocidental: Trecho da Br-364 entre Feijó e Mâncio Lima, Estado do Acre. **Natureza & Desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 87-102, 2005.

BARBOSA, C. C.; CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E.; NOVO, E. M. L. M.; CORDEIRO, J. P. C. Operadores zonais em álgebra de mapas e sua aplicação a zoneamento ecológico-econômico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. (SBSR), 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 487-500.

BAUSH, M. A.; QUARESMA, V. B. Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral para monitoramento de planos de manejo e desmatamento progressivo, no município de Paragominas-PA, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5107-5113.

BIAS, E. S.; BARBOSA, F. L. R. Aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral para Análise dos tipos Água no Lago Paranoá, Brasília - DF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 760-767.

BRADERSCO RURAL. **Calendário Agrícola**. Disponível em: <http://www.bradercorural.com.br/site/conteudo/calendarioagricola/default.aspx>. Acesso: 13 jun. 2014.

BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL. **Projeto de Lei da Câmara nº 30/2011**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro

de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Disponível em: < <http://legis.senado.gov.br/mate-pdf/95433.pdf>>. Acesso em: 21 abril de 2013.

BORGES, K. M. R.; SANTOS, P. M. C. Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME aplicado ao monitoramento do Cerrado, Bacia do Rio Carinhanha (MG-BA). In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p.5663-5669.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. **Princípios básicos em Geoprocessamento**. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1998.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 344 p.

CÂMARA, G. **Representação computacional de dados geográficos**. Bancos de dados geográficos. São José dos Campos: Mundogeo, 2005. v. v.1, p. 11-52.

CORDEIRO, J.P; BARBOSA, C.C.; CÂMARA, G. Álgebra de campos e objetos. Análise espacial de dados geográficos. INPE, São José dos Campos, SP, 2007. 26 p.

COUTINHO, M. D. L.; COUTINHO, M. D. L.; BRITO, I. B. Análise de componentes principais com dados pluviométricos no estado do Ceará. In: AMAZÔNIA E O CLIMA GLOBAL, 2010, Belém. **Anais...** 2010.

CPRM-Serviço Geológico do Brasil. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: CPRM, 2010. 250 p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. INPE, São José dos Campos, SP, 1996.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; Filho, P.H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico – econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos, INPE, 2001. 124 p.

CROSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. IG/UNICAMP, Campinas, SP, 1992, 170p.

DUARTE, C. C.; SOUZA, S. F.; GALVÍNCIO, J. D.; MELO, I. D. F. Detecção de mudanças na cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Tapacurá - PE através da Análise por Componentes Principais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5765-5772.

ELACHI, C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. New York, Wiley, 1987.

EMBRAPA. **Análise da vulnerabilidade ambiental**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010. Disponível em:<http://www.cnpat.embrapa.br/cnpat/cd/jss/acervo/Dc_127.pdf>. Acesso em: 20 de novembro 2013.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006, 306 p.

FAMBRINI, Gelson Luís et al. Evolução Estratigráfica e paleogeográfica do grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Central, RS. **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 7, n. 2, 2007 .

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FLORENZANO, T.G (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias atuais**. 318pg. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GALLOPIN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. **Global Environmental Change**, v. 16, n.3, p. 293-303, 2006.

GOMES, A. R.; XX. **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo em região semi-árida utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento - área piloto de Parnamirim (PE)**. 2000. 163 p. (INPE-12295-TDI/987). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000. Disponível em:<<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD7/FLa9v>>. Acesso em: 11 maio 2014.

Gravataí - SH.22-X-C-V, escala 1:100.000: nota explicativa. Ari Roisenberg, Juliana Charão Marques, Flávio Antônio Bachi, José Carlos Frantz.- Rio Grande do Sul: **UFRGS/CPRM**, 2007.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. Dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2012.

HASENACK, H.; WEBER, E.(org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3).

IBAMA. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite**. Acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA. Brasília. 2010. 36p.

IBGE. **Censo demográfico**. Banco de Dados Agregados. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=202&z=t&o=3&i=P>>. Acesso em: 17 out. 2014.

IBGE. 2004. **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 outubro. 2013.

IBGE. 2012. Perfil dos municípios brasileiros. Rio de Janeiro:IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2012/>. Acesso em: 03 agos. 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 672 p.

KAWAKUBO, Fernando Shinji; MORATO, Rúbia Gomes; CORREIA JUNIOR, Paulo Almeida y LUCHIARI, Ailton. Caracterização atual do uso da terra e da cobertura vegetal na região da Terra Indígena Sangradouro/Volta Grande-Mato Grosso, Brasil. **Invest. Geog** [online]. 2004, n.53, pp. 27-38.

LIMA, L. C.; MORAIS, J. O.; SOUZA, M. J. N. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: UNECE, 2000.

LIMA, J.M.; OLIVEIRA, G. C.; MELO, C. R. **Conservação dos solos e da água**. Minas Gerais: UFLA, 2010. 62f.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande-MS: UNIDERP, 2006.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. Tradução: André Schneider, Eliseu José Weber, Heinrich Hasenack, Jugurta Lisboa Filho, Luis Cavalcanti da Cunha Bahiana, Paulo Roberto Fitz. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.

MELO, A. S. R.; SILVA, C. B.; BARBOSA NETO, M. V.; ARAÚJO, M. S. B. Estimativa da vulnerabilidade à erosão hídrica da bacia do rio Goitá-PE, utilizando técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 3719-3726.

MISUSAKI, A.M.P. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-Riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica**. 2006. 121f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de Aplicação**. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto princípios e aplicações**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. 388 p.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto princípios e aplicações**. 4.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 388 p.

PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Phil. Mag.*, v. 6, p. 559-72, 1901.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. v. 1, 127 p.

PICOLLI, L.R., SCHNADELBACH, C. V. **O Pampa em Disputa: A biodiversidade ameaçada pela expansão das monoculturas de árvores**. Porto Alegre: Amigos da Terra Brasil. 2007.

RAFFO, J. G. G. O processo analítico hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia**. Volume Especial 30 anos, pg. 26-37, 2012.

ROVANI, F.F.M. **Cartografia ambiental de Barão do Cotegipe, RS: Subsídios para planejamento municipal**. 2013. 158f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

ROSS, J. L. S. Análises e sínteses na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental. **Geografia**, v.9, p. 65-75, 1994.

SANTOS, M.G.M. **Tectônica e sedimentação na Bacia do Camaquã Central (RS): Exemplos do Grupo Guaritas e do Grupo Santa Bárbara**. 2010. 65f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, 2010.

SELL, J.C. Transformação da paisagem e impactos socioambientais no bioma pampa: uma análise no município de Piratini, RS, (Brasil). **Revista Anpege**, v. 7, n.8, 2011.

SHIMABUKURO, Y. E.; ALMEIDA FILHO, R. Processamento digital de imagens multitemporais Landsat-5 TM e Jers-1 SAR aplicado ao mapeamento e monitoramento de áreas de alteração antrópica na Amazônia, **Geografia**, v. 27, no. 2, UNESP, Brasil, pp. 81-96.

SHIMABUKURO, Y.; PONZONI, F. J.; E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 127 p.

SOARES, M. N. 2009. **Proposta de Zoneamento Ecológico Econômico para o Município de Pedras Altas**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS. 176 p.

TAMANINI, M. S. A. **Diagnóstico físico-ambiental para determinação da fragilidade potencial e emergente da Bacia do Baixo Curso do Rio Passaúna em**

Araucária - PR. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

TOMLIN, C.D. **Geographic information systems and cartographic modelling.** New York: Prentice Hall, 1990. 249p.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 91 p.

VIERA, V. **Município de Canguçu/RS: o relevo e sua morfodinâmica como condicionantes do dinamismo agrícola.** 2012. 160f. Tese de Doutorado (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

VITTAE, A. C.; MELLO, J. P. Determinação da fragilidade ambiental na bacia do Rio Verde, região Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil. **Territorium**, Portugal, v. 2, n. 16, 2009. Disponível em: <http://www1.ci.uc.pt/nicif/riscos/downloads/t16/fragilidade_ambiental.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat Project Description.** Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php> Acesso em: 02 dez. 2013.

ZIMMERMANN, F.T. **Aplicação da técnica *Analytic Hierarchy Process (AHP)* na priorização e seleção de projetos.** 2012. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Ciência da Computação) – Universidade Regional de Blumenau. 2012.

YOKOYA, N.; CHANUSSOT, J.; IWASAKI, A. Nonlinear unmixing of hyperspectral data using semi-nonnegative matrix factorization. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, vol. 52, no. 2, pp. 1430-1437, 2014.

_____. **Geologia.** Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. Escala: 1/250000. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/geologia/cartas_escala_250mil/sh22ya_geol.pdf>

_____. **Solos.** Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. Escala: 1/250000. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/cartas_escala_250mil/sh22ya_ped.pdf>

_____. **Geomorfologia.** Cachoeira do Sul e Pedro Osório – RS, folhas SH22-Y-A e SH22-Y-C. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. Escala: 1/250000. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/cartas_escala_250mil/sh22ya_ped.pdf>

_____. Manual Técnico de Uso da Terra. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro, n. 7, p. 1 – 91, 2006

APÊNDICES

Apêndice A – Exemplo da programação para a análise do grau de Vulnerabilidade/Estabilidade dos Solos.

Apêndice A1 - Ponderação dos valores para os Solos

```
{
//Programa para Ponderação dos Valores de Solos
Tematico variavel ("IBGE");
Digital solospond("MNT_Pond");
// Tabelas
Tabela solostabela (Ponderacao);
// Instanciação de Variáveis
variavel = Recupere(Nome="Solos_Estudo");
solospond= Novo (Nome="solos_pond", ResX=30, ResY=30, Escala=250000,Min=0,
Max=3);
// Instanciar Tabelas
solostabela= Novo(CategoriaIni="IBGE",
"Ae": 1.0 ,
"PVd": 2.8 ,
"PLe": 2.5,
"PLe": 2.0,
"Rd": 3.0);
//Operações
solospond = Pondere (variavel, solostabela);
}
```

Apêndice A2 - Operação média zonal dos Solos

```
{
//Programa para atualização do atributo SOL_VUL por meio do operador média zonal
Objeto regioes ("UTB_Oficial");
Cadastral mapacadastral ("UTB_Retificada");
Digital entradasolosponderado ("MNT_Pond");
//Instanciação de Variáveis
mapacadastral = Recupere (Nome = "UTBs");
entradasolosponderado = Recupere (Nome = "solos_pond");
//Atribuição
regioes. "SOL_VUL" = Atualize (entradasolosponderado, regioes OnMap
mapacadastral, MedZ);
}
```

Apêndice A3 – Operação maioria zonal dos Solos

```
{
//Programa para atualização dos atributos SOL_CLS por meio do operador maioria
zonal
```

```
//Declaração
Objeto regioes ("UTB_Oficial");
Cadastral mapacadastral ("UTB_Retificada");
Tematico entradasolos ("IBGE");
//Instanciação
mapacadastral = Recupere (Nome = "UTBs");
entradasolos = Recupere (Nome = "Solos_Estudo");
//Atribuição
regioes. "SOL_CLS" = Atualize (entradasolos, regioes OnMap mapacadastral, MaiZ);
}
```

Apêndice B – Programação para a análise do grau de Vulnerabilidade/Estabilidade da Geomorfologia

```
{
//Programa para elaboração da grade do mapa final Geomorfológico
//Declaração
Digital entradagradeddeclividade ("MNT_Pond");
Digital entradagradehipsometria ("MNT_Pond");
Digital entradagradegeomorfologia ("MNT_Pond");
Digital saidagradeGeomorfologia ("MNT_Pond");
//Instanciação
entradagradeddeclividade = Recupere (Nome= "declividade_pond");
entradagradehipsometria = Recupere (Nome= "hipso_pond");
entradagradegeomorfologia = Recupere (Nome= "geomorfologia_pond");
saidagradeGeomorfologia = Novo (Nome="geomorfologiamedia_pond",ResX=30,
ResY=30, Escala=250000, Min=0, Max=3);
//Atribuição
saidagradeGeomorfologia = (entradagradeddeclividade+ entradagradehipsometria +
entradagradegeomorfologia)/3;
}
```

Apêndice C – Programação para calcular a Vulnerabilidade média final, espacializar e fatiar a grade

Apêndice C1 – Programa para calcular o valor da Vulnerabilidade média final

```
{
//Programa para calcular o valor da Vulnerabilidade Media Final com os temas
Geologia, Geomorfologia, Solos, Uso e Cobertura
//Declaração
Digital entradaGeologiagradeponderado("MNT_Pond");
Digital entradaGeomorfologiagradeponderado("MNT_Pond");
Digital entradaSolosgradeponderado("MNT_Pond");
Digital entradaUsogradeponderado("MNT_Pond");
Digital entradaDeclividadegradeponderado("MNT_Pond");
Digital saidaVulnerabilidadegrade("MNT_Pond");
//Instanciação
```

```

entradaGeologiagradeponderado=Recupere(Nome="geologia_pond");
entradaGeomorfologiagradeponderado=Recupere(Nome="geomorfologiamedia_pond");
entradaSolosgradeponderado=Recupere(Nome="solos_pond");
entradaUsogradeponderado=Recupere(Nome="uso_pond");
saidaVulnerabilidadegrade = Novo(Nome = "Vulnerabilidade_Oficial", ResX = 30,
ResY = 30, Escala =250000, Min = 0, Max = 3);
//Atribuição
saidaVulnerabilidadegrade          =(entradaGeologiagradeponderado          +
entradaGeomorfologiagradeponderado  +      entradaSolosgradeponderado      +
entradaUsogradeponderado)/4;
}

```

Apêndice C2 – Programa para atualizar o atributo da Vulnerabilidade média

```

{
//Programa para atualizar o atributo MED_VUL
//Declaração
Objeto regioes ("UTB_Obj");
Cadastral mapacadastral ("Mapa_Cadastral");
Digital entradaVulnerabilidadeponderado("MNT_Pond");
//Instanciação
mapacadastral= Recupere (Nome="UTBs"); entradaVulnerabilidadeponderado=
Recupere (Nome="vulnerabilidade_pond");
//Atribuição
regioes."MED_VUL" = Atualize (entradaVulnerabilidadeponderado,regioes OnMap
mapacadastral, MedZ);
}

```

Apêndice C3 – Programa para espacializar a Vulnerabilidade média

```

{
//Programa para espacializar o atributo MED_VUL
//Declaração
Objeto regioes ("UTB_Oficial");
Cadastral mapacadastral ("UTB_Retificada");
Digital saidavulnerabilidadegradeponderado ("MNT_Pond");
//Instanciação
mapacadastral =Recupere (Nome ="UTBs");
saidavulnerabilidadegradeponderado          =          Novo          (Nome          =
Vulnerabilidade_OFICIAL_pond", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 250000, Min = 0,
Max = 3);
//Atribuições
saidavulnerabilidadegradeponderado = Espacialize ( regioes."testevul" OnMap
mapacadastral);
}

```

Apêndice C4 – Programa para fatiar a Vulnerabilidade média em 21 classes

```

{
// Programa para fatiar a grade de Vulnerabilidade em 21 classes
Digital Vulnerabilidadegrade ("MNT_Pond");
Tematico Vulnerabilidadetematica ("Vulnerabilidade_Natural");
Tabela TBvulnerabilidade (Fatiamento);
Vulnerabilidadegrade = Recupere (Nome= "grade_vulnerabilidade_pond");
Vulnerabilidadetematica = Novo (Nome= "utbs_vulnerabilidade_final",
ResX=30,ResY=30, Escala=250000);
TBvulnerabilidade = Novo (CategoriaFim= "Vulnerabilidade_Natural"
[1.0, 1.09] : "estavel",
[1.09,1.19] : "estavel1",
[1.19,1.29] : "estavel2",
[1.29,1.39] : "estavel3",
[1.39,1.49] : "moderadamente_estavel",
[1.49,1.59] : "moderadamente_estavel1",
[1.59,1.69] : "moderadamente_estavel2",
[1.69,1.79] : "moderadamente_estavel3",
[1.79,1.89] : "medianamente_estavel",
[1.89,1.99] : "medianamente_est_vul",
[1.99,2.09] : "medianamente_est_e_ou_vul",
[2.09,2.19] : "medianamente_vul_est",
[2.19,2.29] : "medianamente_vulneravel",
[2.29,2.39] : "moderadamente_vulneravel",
[2.39,2.49] : "moderadamente_vulneravel1",
[2.49,2.59] : "moderadamente_vulneravel2",
[2.59,2.69] : "moderadamente_vulneravel3",
[2.69,2.79] : "vulneravel",
[2.79,2.89] : "vulneravel1",
[2.89,2.99] : "vulneravel2",
[2.99,3.0] : "vulneravel3");
Vulnerabilidadetematica = Fatie (Vulnerabilidadegrade, TBvulnerabilidade);
}

```