

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

*Analysis of the Natural Vulnerability to Erosion as a Subsidy to Environmental
Planning of the West Camaqua-RS Watershed*

Manoela Sacchis Lopes & Dejanira Luderitz Saldanha

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP: 90501-970, Porto Alegre - RS, Brasil
manoela.lopes@ufrgs.br, dejanira.saldanha@ufrgs.br

Recebido em 10 de Fevereiro, 2015/Aceito em 6 de Abril, 2016
Received on February 10, 2015/Accepted on April 6, 2016

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, do solo, do relevo, da vegetação e do uso e cobertura da terra. 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, 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 ocorrem, principalmente, onde incidem 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. Assim, o mapeamento da vulnerabilidade natural à erosão pode 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. 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. So, the mapping of natural vulnerability to erosion can assist in future territorial administrations, allowing more organization along the appropriate environmental planning.

Keywords: Camaquã River, Natural Vulnerability, Remote Sensing.

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).

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 preservacionistas 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 do solo. 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). Esta análise é fundamentada 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 da

rocha, do solo, do relevo, da vegetação e do 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 da Mata Atlântica, segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e não se ter identificado trabalhos científicos acerca da vulnerabilidade ambiental dessa região. A intitulação de áreas prioritárias segue as diretrizes da Portaria 126, de 27 de maio de 2004, estabelecendo as áreas prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade. 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 teve 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 geoprocessamento e sensoriamento remoto. Além dos tópicos acima descritos, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

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

2. CARACTERIZAÇÃO 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.

2.1 Localização física da área de estudo

A porção geográfica estudada compreende parcialmente a área de três municípios, sendo eles Encruzilhada do Sul, Piratini e Canguçu, como demonstrado na Figura 1. 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.

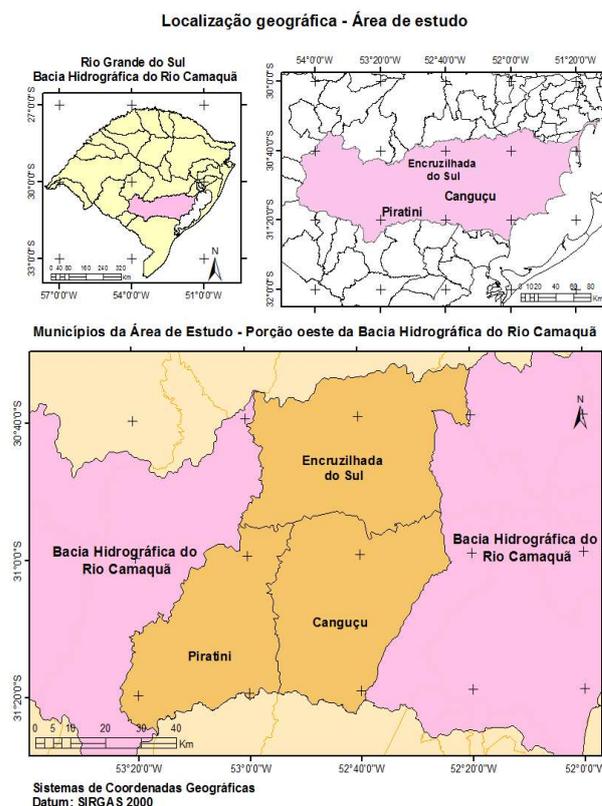


Fig. 1 – Localização da área de estudo.

2.2 Caracterização física da área de estudo

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.

Tabela 1: Áreas dos municípios que compõem a região de estudo

Municípios	Área total - IBGE (Km ²)	Área estudada (Km ²)
Encruzilhada do Sul	3.348,32	2044,57
Canguçu	3.525,29	1571,39
Piratini	3.539,69	1807,29
Total	10.413,30	5423,25

Fonte: IBGE (2010).

Em relação a geologia, é composta pela parcialidade dos municípios de Encruzilhada do Sul, Piratini e Canguçu localizados sobre a unidade geológica denominada Escudo Sul-Riograndense, representando a formação geológica mais antiga do estado. Está 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, 2010).

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.

A região 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 (IBGE, 2003).

3. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos iniciaram com a compilação dos materiais utilizados, escolha do *software* que melhor se adapta ao trabalho e os procedimentos metodológicos detalhados em cada etapa do estudo.

3.1 Materiais utilizados

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

3.1.1 Materiais cartográficos

Como material cartográfico foi utilizado a Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio

Grande do Sul (HASENACK & WEBER, 2010), escala 1:50.000, com informações de hidrografia, curvas de nível e rede viária da área de estudo.

3.1.2 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;
- Cenas da missão SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* com o objetivo de adquirir as derivações geomorfométricas da área em estudo foram utilizadas as quadriculas 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>.

3.1.3 Mapas temáticos

Os mapas temáticos utilizados nessa pesquisa foram adquiridos junto ao banco de dados do IBGE. 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-

Municípios	Área total - IBGE (Km ²)	Área estudada (Km ²)
Encruzilhada do Sul	3.348,32	2044,57
Canguçu	3.525,29	1571,39
Piratini	3.539,69	1807,29
Total	10.413,30	5423,25

- 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 formas de relevo.

3.1.4 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 foi utilizado o *software* ArcGis 10.2. O Microsoft Office Excel 2007 foi utilizado para manipulação de dados em gráficos e tabelas, e um GPS (Global Positioning System) *Garmin*, para coleta dos dados a campo.

3.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia de trabalho adotada para o desenvolvimento desta pesquisa compreendeu diversas etapas de procedimentos metodológicos, conforme a Figura 2.

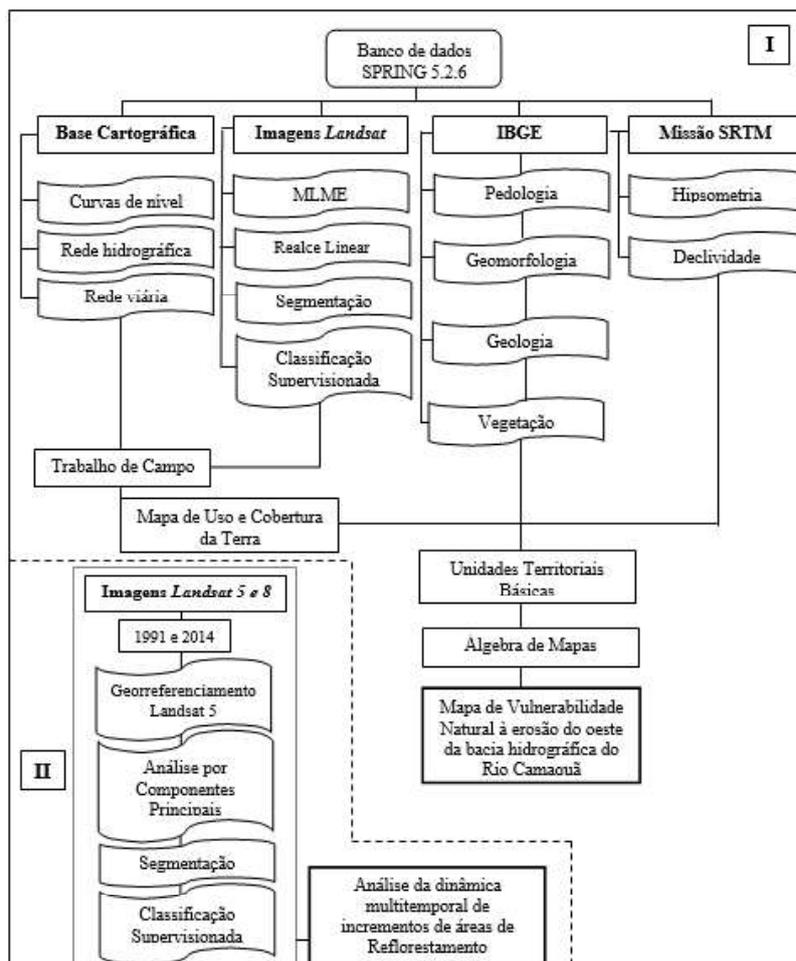


Fig. 2 - Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.

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 significativas.

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 estabilidade em uma escala de 1,0 a 3,0 para cada unidade.

Tabela 2: Valores de estabilidade /vulnerabilidade das unidades de paisagem de acordo com a relação pedogênese /morfogênese

Unidade	Relação morfogênese/ pedogênese	Valor
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 se utilizou o trabalho de campo como auxílio à tomada das 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.

3.2.1 Análise ecodinâmica Morfogênese/Pedogênese

O mapa de vulnerabilidade natural à erosão representa a análise do meio físico e biótico para a ocupação racional dos recursos naturais. Uma vez atribuídos os valores de vulnerabilidade para todas as classes é feita a integração de todos os mapas via álgebra de mapas com a descrição da rotina de programação e a definição das classes de vulnerabilidade.

Deste modo, conforme descreve Crepani (1996;2001), 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.

O produto final apresenta informações sobre o território necessárias para planejar a sua ocupação racional e o uso sustentável dos recursos naturais, integradas em uma base geográfica de dados. Juntamente a isso, é possível identificar áreas do território, 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.

3.2.1.1 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 3, 4 e 5). O mapa temático de geomorfologia foi adquirido por meio da digitalização das folhas articuladas do IBGE

(2003) e 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. Após isso, realizou-se o fatiamento das classes segundo a Tabela 6, adaptada de Crepani *et al.* (1996). fatiamento das classes segundo a Tabela 6,

Tabela 3: Valores de vulnerabilidade/estabilidade para as unidades geomorfológicas

Unidades Geomorfológicas	Vulnerabilidade (Vuln.)
Planaltos Residuais	2,0
Planaltos Rebaixados Marginais	2,5
Planície Alúvio Coluvionar	3,0

Tabela 4: Valores de vulnerabilidade/estabilidade para a 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 5: Valores de vulnerabilidade/estabilidade para a declividade das encostas

Declividade		Vu ln	Declividade		Vu ln	Declividade		Vu ln
Graus	Porc.		Graus	Porc.		Graus	Porc.	
<2	<3,5	1,0	9,9-11,2	17,4-19,8	1,7	19,1-20,4	34,6-37,2	2,4
2-3,3	3,5-5,8	1,1	11,2-12,5	19,8-22,2	1,8	20,4-21,7	37,2-39,8	2,5
3,3-4,6	5,8-8,2	1,2	12,5-13,8	22,2-24,5	1,9	21,7-23,0	39,8-42,4	2,6
4,6-5,9	8,2-10,3	1,3	13,8-15,2	24,5-27,2	2,0	23,0-24,4	42,4-45,3	2,7
5,9-7,3	10,3-12,9	1,4	15,2-16,5	27,2-29,6	2,1	24,4-25,7	45,3-48,1	2,8
7,3-8,6	12,9-15,1	1,5	16,5-17,8	29,6-32,1	2,2	25,7-27	48,1-50	2,9
8,6-9,9	15,1-17,4	1,6	17,8-19,1	32,1-34,6	2,3	>27	>50	3,0

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:

$$G = \frac{G^a + H + D}{3} \quad (1)$$

G = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia

G^a = vulnerabilidade atribuída às Unidades Geomorfológicas

H = vulnerabilidade atribuída à Hipsometria

D = vulnerabilidade atribuída à Declividade

3.2.1.2 Geologia

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

O mapa de geologia foi elaborado com base no mapa preexistente fornecido pelo IBGE (2003) na escala 1: 250.000, com a vetorização e digitalização 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 com os menores valores nos graus de coesão, atribuíram-se valores próximos à vulnerabilidade (3,0).

3.2.1.3 Solos

O mapa de solos foi elabora com base no mapa pré-existente fornecido pelo IBGE (2003) na escala 1: 250.000. O primeiro procedimento foi a digitalização e a vetorização das informações nele contidas. 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).

Tabela 6: Valores de vulnerabilidade/estabilidade para tipos de solos

Classe de Solos	Vuln.
Solos Aluviais	1.0
Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico	2.0
Planossolo Eutrófico	2.5
Podzólico Vermelho Amarelo Distrófico	2.8
Solos Litólicos Eutróficos	3.0

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.

3.2.1.4 Uso e cobertura do solo

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.

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, auxílio do realce, da segmentação do mosaico e do trabalho de campo.

Associado a isso, foram utilizadas dois mosaicos de cenas do sensor OLI do satélite Landsat 8, com datas distintas a fim de estabelecer a comparação em relação às culturas temporárias e

as regiões de solo exposto, para que a classificação obtivesse o melhor resultado e eficácia em relação às amostras de treinamento.

Tabela 7: Valores de vulnerabilidade/estabilidade para as classes de uso e cobertura da terra

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

3.3 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 em 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 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, 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.

3.4 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 programa *SPRING* permitiu que as linhas que delimitavam as UTBs fossem editadas e ajustadas, e os polígonos obtiveram a sua topologia por meio da poligonalização.

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, 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.

3.5 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 3, 4, 5, 6 e 7, 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 Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (*LEGAL*), 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. 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.

Após isso, 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, 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.

3.6 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 georrelacional 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 8.

Tabela 8: Rpresentação da vulnerabilidade/estabilidade das UTBs

Unidade de Paisagem	Média	Grau de Vulnerabilidade	Grau de Saturação
U1	3,0		
U2	2,9		
U3	2,8	VULNERÁVEL	
U4	2,7		
U5	2,6		
U6	2,5	MODERADAM.	
U7	2,4	VULNERÁVEL	
U8	2,3		
U9	2,2		
U10	2,1	MEDIANAM.	
U11	2,0	ESTÁVEL/	
U12	1,9	VULNERÁVEL	
U13	1,8		
U14	1,7		
U15	1,6	MODERADAM.	
U16	1,5	ESTÁVEL	
U17	1,4		
U18	1,3		
U19	1,2		
U20	1,1	ESTÁVEL	
U21	1,0		

Fonte: Crepani *et al.* (1996)

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).

3.7 Processamento Digital de Imagens

No *software SPRING*, foram utilizadas técnicas de 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.

3.7.1 Modelo Linear de Mistura Espectral

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) é uma técnica utilizada por vários autores que permite melhorar a precisão da classificação supervisionada de uso e cobertura da terra.

As bandas utilizadas como dados de entrada para a implementação do MLME foram as bandas 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo) e 6 (infravermelho médio). As bandas 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 & Ponzoni (2010), e também verificou se os valores de reflectância adicionados eram coerentes com as respostas espectrais padrão destes alvos.

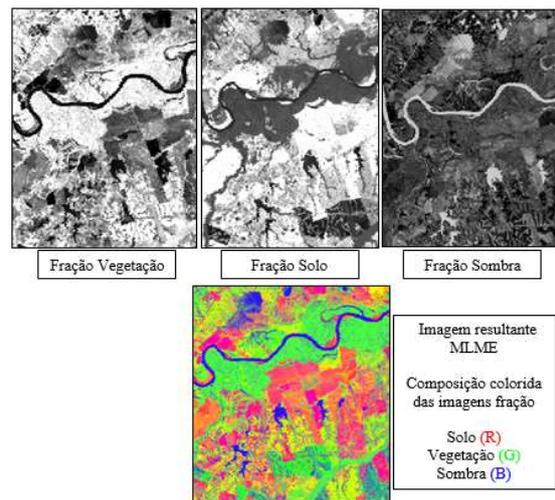


Fig. 3 - Imagens fração vegetação, solo e sombra gerados pelo MLME, cenas do satélite Landsat8.

Conforme indicado na Figura 3, 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).

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 & 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.

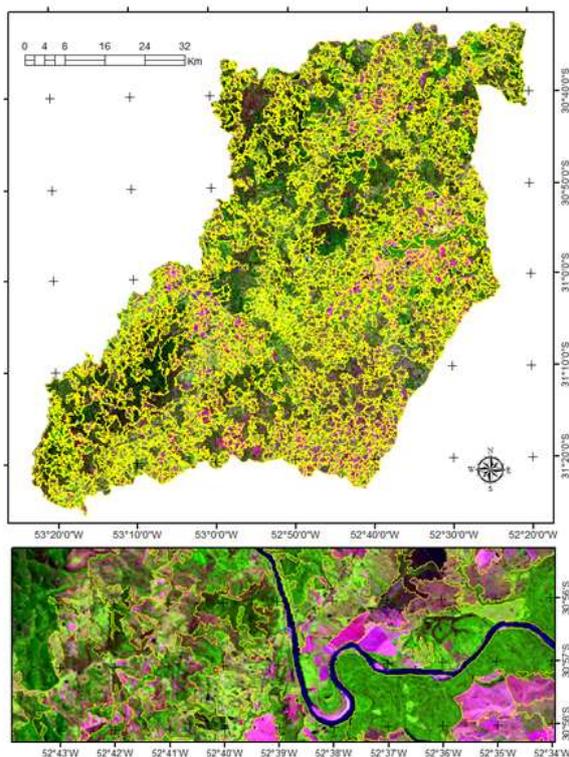


Fig. 4 - Mapa Cadastral das Unidades Territoriais Básicas (UTBs).

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 associadas às informações dos elementos como relevo, drenagem, níveis de cinza, possibilitando a análise da vulnerabilidade à erosão.

3.7.2 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 trabalhos 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 acima, e possui parâmetros estatísticos de cada região como dados de entrada para o cálculo das medidas de similaridade entre as regiões.

A partir da aplicação do classificador por regiões baseado na medida da distância de Bhattacharya, foram discriminadas as 5 categorias, como corpos d'água, reflorestamento, solo exposto, agricultura e vegetação. 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.

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. 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 verdores da maioria das culturas agrícolas da região.

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.

4. 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.

4.1 Análise da vulnerabilidade natural a erosão da área de estudo

A análise de cada mapa temático utilizado nesse trabalho, 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 aqui descritos.

4.1.1 Uso e Cobertura da Terra

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.

A porção oeste da bacia hidrográfica do rio Camaquã está inserida no Bioma Pampa, que apresenta uma diversidade na sua vegetação campestre natural e que está sendo convertida em lavouras e plantações de espécies exóticas, conforme evidenciou-se em trabalho de campo. As inserções de áreas de reflorestamento na região devem-se ao fato de que as empresas multinacionais como Votorantin Celulose e Papel e a Celulose Riograndense que atuam nos municípios propõem um desenvolvimento econômico na região, o que desencadeia processos erosivos, mudança da paisagem original e possível extinção das espécies vegetais originais.

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%. 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, pequenas áreas de vegetação nativa dispersas, evidenciando-se as plantações de espécies exóticas típicas do reflorestamento, praticamente nas 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 acarreta segundo o Novo Código Florestal (Lei nº 12.651 de 2012) uma área de preservação permanente nas faixas marginais do rio em uma largura mínima de 100 metros para os cursos d'água de 50 a 200 metros de largura. Frente a isso, conclui-se que valores significativos de vegetação de uma maneira geral não condizem com uma realidade local de preservação e conservação ambiental, pois apesar de termos a presença de vegetação, esses valores se encontram abaixo do obrigatório.

Além disso, tem-se aproximadamente 23% de área composta por agricultura e pastagem, tendo uma distribuição em toda a área e sendo 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 uma porcentagem de 18% da área total, essas áreas condizem com as 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 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. 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. 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.

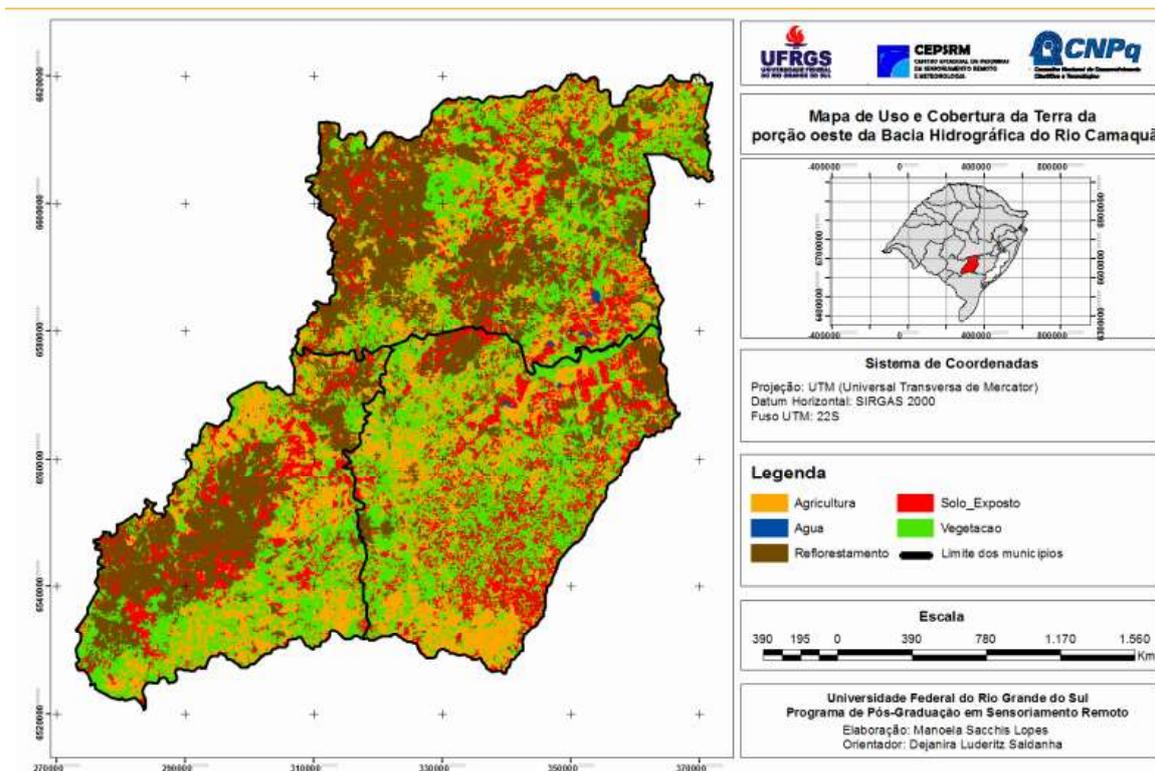


Fig. 5 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra da porção oeste da Bacia Hidrográfica do rio Camaquã.

4.1.2 Geomorfologia

Em relação às unidades geomorfológicas, identificou-se no mapeamento 1:250.000, três classes significativas na área: Planalto Rebaixado Marginal, Planalto Residual e Planície Alúvio-Coluvionar. O menor valor de vulnerabilidade ou estabilidade, pertence à região morfológica Planalto Residual, pertence a 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 fraco a médio.

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, 2000).

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.

Quanto à variável hipsometria percebe-se que quanto menor a altitude mais estável é

a unidade geomorfológica, apresentando um relevo mais plano. Neste caso 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.

As regiões mais representativas da área de estudo correspondem a classe maior que 200 metros, abrangendo 359.364 hectares, 66% da área total.

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 de vulnerabilidade, 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.

4.1.3 Pedologia

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. Os valores de vulnerabilidade ou estabilidade 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 no sentido de possuir a maior porcentagem de solos Litólicos Eutróficos (Neossolos) que necessitam de atenção especial em relação ao manejo adequado do solo.

4.1.4 Geologia

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, modificadores das formas de relevo e as rochas mais coesas, indicam os processos formados de solos.

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/estabilidade. 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 endotérmicas agindo sobre um material já consolidada.

4.2 Vulnerabilidade Natural à Erosão

A partir da metodologia proposta, dos valores de vulnerabilidade/estabilidade 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 5. Neste mapa foram relacionadas 21 classes de vulnerabilidade/estabilidade 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 de 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 de vulneráveis.

Conforme a Tabela 8 e a Figura 6, 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.

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. As identificações 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.

Tabela 8: Medidas de classes de vulnerabilidade natural à erosão.

Vulnerabilidade Natural	Área (ha)	Área (%)
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 áreas medianamente estáveis/vulneráveis correspondem à 82% da área total e são consideradas de transição para a vulnerabilidade, como indica a Tabela 8, 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 os impactos das gotas da chuva (GUERRA & MARÇAL, 2012).

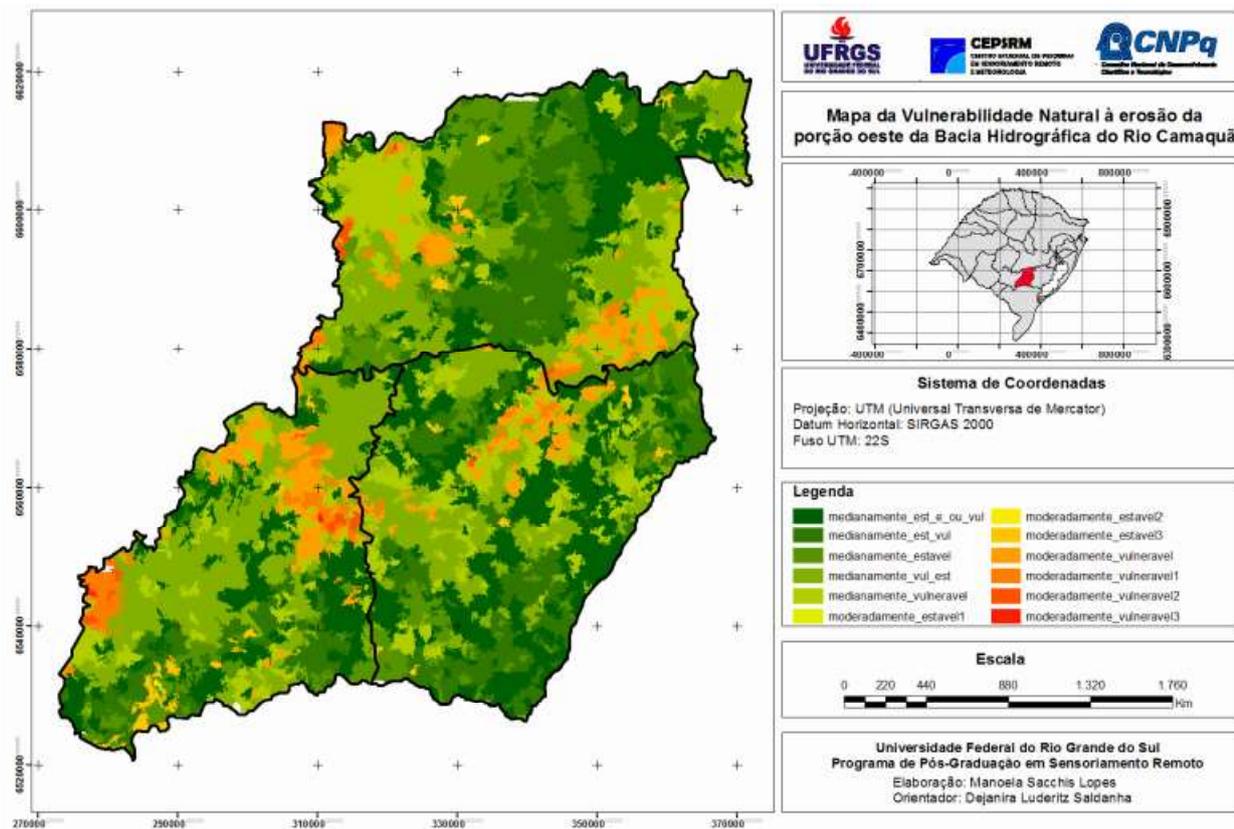


Fig. 6 – Mapa de vulnerabilidade natural à erosão da porção oeste da Bacia Hidrográfica do rio Camaquã.

5. 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 a fauna (PICCOLI & SCHNALDEBACH, 2007).

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 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 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 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.

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. Associado a isso, recomenda-se outro tipo de estimativa a fim de avaliar os processos morfo-pedogenéticos com a técnica Analytic Hierarchy Process (AHP), uma programação multicritério, com objetivo de organizar uma decisão de maneira hierárquica, qualitativa e mensurável, distribuindo pesos distintos a cada variável do meio físico.

Em relação à aplicabilidade, utilização das técnicas e procedimentos para a realização da metodologia de Crepani, concluiu-se que a os parâmetros utilizados foram eficazes e adequados para garantir que os objetivos finais fossem alcançados. 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.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

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.

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

CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. A; CÂMARA, G; DAVIS JR., C.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. (Ed.). **Bancos de dados geográficos**. São José dos Campos: Mundogeo, 2005. v. v.1, p. 11-52.

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. p. 1-26.

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.

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

FAMBRINI, G.L; JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Evolução

- Estratigráfica e paleogeográfica do grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camapuã Central, RS. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 7, n. 2, 2007. p. 1-24.
- FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias atuais**. 318pg. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- GOMES, A. R. **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo em região semi-árida utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento - área piloto de Parnamirim (PE)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000. 163 p.
- GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. Dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2012. 189 p.
- 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).
- IBGE. **Geologia, Solos, Geomorfologia e Vegetação**. 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://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/>.
- IBGE. **Censo Demográfico**, 2010. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>
- 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 esteatigrafia, 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**. 4.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 388 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. 64p.
- 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.
- 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.
- 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, 2002, p. 81-96.
- SHIMABUKURO, Y.; PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 127 p.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 91 p.