

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS LONDRINA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**NARIANE MARSELHE RIBEIRO BERNARDO**

**ANÁLISE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL COM TÉCNICAS DE  
GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO APLICADAS  
AOS MUNICÍPIOS DE PETRÓPOLIS E TERESÓPOLIS, RIO DE  
JANEIRO.**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2013**

**NARIANE MARSELHE RIBEIRO BERNARDO**

**ANÁLISE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL COM TÉCNICAS DE  
GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO APLICADAS  
AOS MUNICÍPIOS DE PETRÓPOLIS E TERESÓPOLIS, RIO DE  
JANEIRO.**

Monografia apresentada como Trabalho de  
Conclusão de Curso, do Curso Superior de  
Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná, Câmpus Londrina.

Orientadora: Prof. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista

**LONDRINA**

**2013**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

### Título da Monografia

Análise de fragilidade ambiental com técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas aos municípios de Petrópolis e Teresópolis, Rio de Janeiro

por

Nariane Marselhe Ribeiro Bernardo

Monografia apresentada no dia 11 de abril de 2013 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dra. Adriana Castreghini De Freitas Pereira  
(UEL – Departamento de Geografia)

---

Prof. MsC. Maurício Moreira dos Santos  
(UTFPR)

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

**A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso**

## AGRADECIMENTOS

Quero registrar meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma maneira colaboraram para a elaboração deste trabalho. Peço desculpas caso algum nome não seja mencionado, mas declaro minha gratidão a todos aqueles que me auxiliaram no cumprimento desta etapa.

Inicialmente gostaria de agradecer a Deus pela conclusão desta fase e por sempre me manter perseverante nos momentos de dificuldade. Agradeço também aos meus pais pelo carinho, paciência e por toda a confiança depositada ao longo destes anos de graduação, a eles dedico este trabalho. Demonstro aqui também agradecimentos aos meus familiares pelo apoio emocional.

Destaco minha gratidão e admiração por minha querida professora orientadora Dra. Lígia Flávia Antunes Batista. Obrigada pela dedicação em minha orientação, pelo exemplo de competência e excelência profissional, e por toda a colaboração em meu crescimento pessoal e profissional. A senhora sempre se mostrou pronta para me ajudar a resolver toda dificuldade acadêmica que eu pudesse ter, muito obrigada!

Agradeço também a banca pela disponibilidade e atenção dada ao longo do desenvolvimento e execução do projeto e trabalho final de conclusão de curso. Ao professor Msc. Maurício Santos, pela orientação e pelo enriquecimento deste trabalho por meio das sugestões realizadas.

Gostaria de tornar explícito também os meus sinceros agradecimentos ao Vinícius José Sichieri por toda a compreensão, amizade, confiança, paciência e carinho principalmente nos últimos e atribulados meses da graduação.

Aos meus colegas de classe, em especial ao Vitor Alvares, Isabela Machado, Veronika Sassen e Carolyne Bueno, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho e também aos meus amigos Rafael Ciciliato e Fernanda Mangili, por compartilhar comigo as aflições e alegrias da jornada acadêmica.

Finalizo agradecendo a todos aqueles que marcaram minha graduação, tornando-a uma época tão especial e importante em minha vida. Independentemente da distância: Alan Nishioka (*in memoriam*), Ana Carolina Jacobs, Khamila Tondinelli, Lívia Deliberador, Lívia Bueno, Marcela Arfelli, Monica Bertachi, Noelle Salsa, Paula Fernanda Gonçalves e Thaís Borini. Cada qual com sua particularidade pôde enriquecer minha formação profissional e pessoal. A todos, meu muito obrigada!

## RESUMO

**BERNARDO, N.M.R. Análise de fragilidade ambiental com técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto aplicadas aos municípios de Petrópolis e Teresópolis, Rio de Janeiro.** 2013. 110 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior em Bacharelado de Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

O uso e ocupação do solo ocorrido de forma não planejada desestabiliza o equilíbrio ambiental. É importante verificar se os recursos naturais existentes são fatores limitantes para uso e ocupação de um local, uma vez que a modificação antrópica em áreas com certas características físicas de declividade e tipo de solo podem provocar sérios danos, como é o caso dos deslizamentos de terra. Para diminuir possíveis consequências negativas dos deslizamentos, é necessária a realização de um planejamento territorial urbano baseado em critérios técnicos, como por exemplo, os estudos de fragilidade ambiental. Tais estudos, por meio da análise integrada de variáveis ambientais, identificam quais áreas possuem maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos. Com o intuito de identificar as áreas de maior fragilidade ambiental nos municípios de Petrópolis e Teresópolis, que sofrem constantemente com problemas de deslizamentos de terra, foi realizada a análise de parâmetros ambientais (declividade, tipo de solo e tipo de cobertura do solo) com o emprego de técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Foram utilizados dois modelos de análise multicritério (booleano e *fuzzy*) para verificar qual dessas abordagens seria mais eficaz na determinação das áreas de maior fragilidade. Pode-se concluir que a abordagem *fuzzy* apresenta resultados um pouco melhores que a booleana e que as geotecnologias são ferramentas poderosas para estudos dessa natureza.

**Palavras-chave:** Inferência. Lógica *fuzzy*. Modelo booleano. Deslizamentos.

## ABSTRACT

**BERNARDO, N.M.R. Environmental Fragility analisys applied geotechnologies Geoprocessing and Remote Sensing in Petropolis and Teresopolis, Rio de Janeiro.** 2013.110 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior em Bacharelado de Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

The use and occupation of the soil in an unplanned way destabilizes the environmental balance. It is important to check whether the existing natural resources are limiting factors for the use and occupation of a place, since the anthropogenic modification in areas with specific physical characteristics of slope and soil type, can lead to the the occurrence of serious issues, such as landslides. To reduce possible negative consequences of landslides it is necessary that the urban land planning is done and based on technical studies, for example of environmental fragility. These studies, through integrated analysis of environmental variables, identify which areas have higher probability of occurrence of landslides. This study aimed to identify the areas of greatest environmental fragility in the cities of Petropolis and Teresopolis, because of their constantly problems with landslide. The study involved the analysis of environmental parameters (slope, soil type and type of land cover) and techniques of remote sensing and geoprocessing. The proposal of this work was to use two models of multi-criteria analysis (Boolean and fuzzy), to verify which of these approaches would be more effective to determine the areas of greatest fragility. It was concluded that the fuzzy approach generated best results than boolean on and the use of geotechnologies are powerful tools for studies like these.

**Keywords:** Inference. Fuzzy logic. Boolean Model. Landslides.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Mapa de localização da área de Estudo.....	15
Figura 2	- Mapa dos municípios do Rio de Janeiro - Petrópolis em destaque.....	16
Figura 3	- Taxa de crescimento da população residente dos municípios de Petrópolis e Rio de Janeiro, RJ.....	17
Figura 4	- Gráfico da população de Petrópolis de 1990 a 2010.....	18
Figura 5	- Densidade demográfica dos municípios do Estado do Rio de Janeiro (Petrópolis em destaque).....	19
Figura 6	- Localização do Parque Nacional da Serra dos Órgãos.....	20
Figura 7	- Serra dos Órgãos e litoral do Rio de Janeiro.....	21
Figura 8	- Esquema da Seção Geológica da Serra dos Órgãos.....	21
Figura 9	- Mapa de localização da APA Petrópolis.....	23
Figura 10	- Mapa dos municípios do Rio de Janeiro - Teresópolis em destaque.....	25
Figura 11	- Gráfico do crescimento da população do município de Teresópolis.....	26
Figura 12	- Gráfico da População de Teresópolis de 1990 a 2010.....	27
Figura 13	- Unidades de Conservação da Área de Estudo.....	29
Figura 14	- Unidades Produtoras de álcool e biodiesel.....	38
Figura 15	- Exemplo de dado cadastral.....	38
Figura 16	- Mapa Geométrico do Paraná: Detalhe em Londrina.....	39
Figura 17	- Exemplo de MNT: curvas de nível.....	40
Figura 18	- Imagem do satélite LANDSAT 7.....	40
Figura 19	- Comprimento de onda eletromagnética.....	44
Figura 20	- Espectro eletromagnético: diversos comprimentos de onda.....	44
Figura 21	- Respostas espectrais de alguns alvos e as respectivas bandas espectrais de alguns sensores.....	45
Figura 22	- Representação de matriz de erros (genérica).....	47
Figura 23	- Dados de entrada (A- Declividade; B - Solo LVAd7; C – Cobertura do solo) e resultados para área de baixa fragilidade ambiental pelo modelo booleano (I) e <i>fuzzy</i> (II).....	50
Figura 24	- Função de pertinência para o modelo booleano (à esquerda) e modelo <i>fuzzy</i> (à direita) e seus respectivos limites.....	51
Figura 25	- Esquema representativo do cruzamento de dados de fragilidade ambiental.....	60
Figura 26	- Comportamento da função senoidal aplicada para a classe de fragilidade alta.....	62
Figura 27	- Classes de fragilidade ambiental para Petrópolis e Teresópolis.....	68
Figura 28	- Áreas de fragilidade ambiental muito forte nos municípios de Petrópolis (I) e Teresópolis (II).....	69
Figura 29	- Áreas de destaque de fragilidade ambiental de Petrópolis (acima) e Teresópolis (abaixo).....	71
Figura 30	- Histograma de classes de fragilidade ambiental determinada pela lógica <i>fuzzy</i> para os municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	73
Figura 31	- Pontos de deslizamento e áreas de fragilidade ambiental determinada pela lógica booleana.....	76
Figura 32	- Pontos de deslizamentos inseridos e áreas de fragilidade ambiental determinada pela lógica <i>fuzzy</i> .....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	-	Identificação da Classe de Declividade e de fragilidade ambiental.....	32
Quadro 2	-	Classificação do solo e Classe de fragilidade ambiental.....	33
Quadro 3	-	Nova nomenclatura para classificação dos solos.....	34
Quadro 4	-	Classificação do tipo de Cobertura vegetal e classe de fragilidade ambiental.....	35
Quadro 5	-	Classificação do tipo de cobertura do solo quanto a sua fragilidade.....	36
Quadro 6	-	Parâmetros ambientais para estudo da fragilidade ambiental.....	58
Quadro 7	-	Matriz de confusão (amostras de teste) e índices de exatidão do produtor e usuário.....	66
Quadro 8	-	Valores ponderados das classes de Fragilidade ambiental da declividade (coluna) e tipo de solo (linha): soma dos valores ponderados (linha + coluna).....	99
Quadro 9	-	Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Água (O valor “3” é a classe de fragilidade ambiental muito baixa (1) multiplicada pelo fator ponderado (3) ).....	99
Quadro 10	-	Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Vegetação (O valor “6” é a classe de fragilidade ambiental muito baixa (2) multiplicada pelo fator ponderado (3) ).....	99
Quadro 11	-	Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Área urbana (O valor “6” é a classe de fragilidade ambiental muito baixa (2) multiplicada pelo fator ponderado (3) ).....	99
Quadro 12	-	Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Solo exposto ((O valor “15” é a classe de fragilidade ambiental muito forte (15) multiplicado pelo fator ponderado (3) ).....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Contribuição das populações dos municípios da região serrana do Rio de Janeiro (2010).....	19
Tabela 2	- Distância da área de influência da fragilidade ambiental.....	61
Tabela 3	- Faixas de declividade e respectivas áreas de abrangência (em km <sup>2</sup> ).....	64
Tabela 4	- Tipos de solos (área em km <sup>2</sup> ) para os municípios em estudo.....	65
Tabela 5	- Cálculo de índices para avaliação de acurácia (em %).....	66
Tabela 6	- Classes de fragilidade ambiental especificamente para área urbana.....	70
Tabela 7	- Características dos pontos de deslizamentos ocorridos entre 2010 e 2011 para os municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	74
Tabela 8	- Resultado de fragilidade ambiental para os pontos de deslizamentos identificados e distância dos pontos de deslizamentos às áreas urbanas.....	75

## LISTA DE SIGLAS

APA – Área de Proteção Ambiental

ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

GDEM - *Global Digital Elevation Model*

GPS – *Global Positioning System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

LEGAL – Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico

METI – *Ministry of Economy, Trade and Industry*

MNT – Modelo Numérico de Terreno

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

REM – Radiação Eletromagnética

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SPRING – Sistema de Processamento de Informações Geográficas

SR – Sensoriamento Remoto

TM – *Thematic Mapper*

UC – Unidade de Conservação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS .....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>15</b>
2.1 PETRÓPOLIS.....	16
2.1.1 Histórico de uso e ocupação do solo.....	16
2.1.2 Características político-administrativas e sociais .....	18
2.1.3 Características Físicas .....	20
2.1.3.1 Relevo .....	20
2.1.3.2 Clima.....	22
2.1.3.3 Vegetação.....	22
2.1.3.4 Pedologia.....	24
2.2 TERESÓPOLIS .....	25
2.2.1 Histórico de uso e ocupação do solo.....	25
2.2.2 Características político-administrativas e sociais .....	26
2.2.3 Características Físicas .....	27
2.2.3.1 Relevo .....	27
2.2.3.2 Clima.....	27
2.2.3.3 Vegetação.....	28
2.2.3.4 Pedologia.....	29
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>30</b>
3.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	30
3.2 GEOPROCESSAMENTO.....	37
3.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG’S .....	41
3.3.1 SPRING .....	42
3.4 SENSORIAMENTO REMOTO.....	42
3.4.1 Processamento digital de imagens e análise dos dados de sensoriamento remoto ..	46
3.5 ANÁLISE MULTICRITÉRIO .....	48
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
4.1 ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOGRÁFICO .....	53
4.1.1 Dados do tipo de cobertura do solo.....	54
4.1.1.1 Escolha e aquisição das imagens .....	54
4.1.1.2 Pré-processamento das imagens .....	55
4.1.1.2.1 Recorte da área de estudo.....	55
4.1.1.2.2 Registro das imagens e modificação do contraste .....	55
4.1.1.3 Processamento digital da imagem: Classificação supervisionada .....	56
4.1.2 Dados de Altimetria .....	57
4.1.3 Dados de Pedologia.....	57
4.2 DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	58
4.2.1 Determinação dos parâmetros .....	58
4.2.2 Manipulação dos dados e Classes de fragilidade ambiental .....	59
4.2.3 Geração de Mapa Síntese de fragilidade ambiental .....	61
4.3 ANÁLISE DAS ÁREAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	62
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>64</b>
5.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS .....	64
5.1.1 Declividade .....	64
5.1.2 Tipos de solo.....	65

5.1.3 Tipos de cobertura do solo .....	65
5.2 FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	67
5.2.1 Lógica booleana .....	68
5.2.2 Lógica <i>fuzzy</i> .....	72
5.3 LÓGICA BOOLEANA X LÓGICA <i>FUZZY</i> : OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS E VALIDAÇÃO DAS ÁREAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL. ....	73
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>107</b>
Anexo 1 - Cruzamento dos dados pela média ponderada dos valores de fragilidade ambiental.....	99
Anexo 2 - Lógica booleana para análise de classes de fragilidade ambiental.....	100
Anexo 3 - Lógica <i>fuzzy</i> para análise das classes de fragilidade ambiental.....	105
Anexo 4 - Mapa de fragilidade ambiental dos municípios de Petrópolis e Teresópolis (lógica booleana).....	106
Anexo 5 - Mapa de fragilidade ambiental dos municípios de Petrópolis e Teresópolis (lógica <i>fuzzy</i> ).....	107
Anexo 6 - Mapa Altimétrico dos municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	108
Anexo 7 - Mapa de declividade dos municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	109
Anexo 8 - Mapa Pedológico dos municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	110
Anexo 9 - Mapa dos tipos de cobertura do solo dos municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	111
Anexo 10- Mapa de fragilidade ambiental da área urbana de Petrópolis e Teresópolis (lógica booleana).....	112
Anexo 11- Mapa de fragilidade ambiental da área urbana de Petrópolis e Teresópolis (lógica <i>fuzzy</i> ).....	113
Anexo 12- Pontos de deslizamentos ocorridos nos anos de 2010 e 2011 nos municípios de Petrópolis e Teresópolis.....	114
Anexo 13- Cicatrizes dos deslizamentos ocorridos nos anos de 2010 e 2011 nos municípios de Petrópolis e Teresópolis para áreas urbanas.....	115

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1950, o Brasil sofreu um intenso processo de urbanização. A principal causa deste processo foi o investimento massivo na industrialização feito pelo governo que ocasionou o aumento da oferta de empregos. Esse fato serviu como atrativo econômico para a população que buscava melhores condições de vida (REIS; OLIVEIRA, 2011, p.3).

Dentro deste contexto, as buscas da população aliadas às necessidades básicas de sobrevivência geraram um grande problema estratégico para estas cidades: o indevido uso e ocupação do solo e a falta de melhorias na infraestrutura urbana para acomodação desse inchaço urbano, resultante da deficiência de planejamentos públicos.

Assim, iniciou-se o processo de instalação de uma grande porção da população, sem respaldo técnico, financeiro ou político, em locais onde os custos de moradia fossem os menores possíveis (NOGUEZ e HARTMAN, 2005), originando grandes cinturões ao redor das cidades em regiões sem condições adequadas para o crescimento de comunidades.

Desde então essa característica demográfica prevalece. A maioria da população vive em grandes centros urbanos, que se caracterizam por um crescimento desordenado, carecendo de políticas públicas. Essa ocupação desordenada colabora indiretamente para o aumento das condições de risco de deslizamentos de algumas áreas já suscetíveis, como as encostas.

A inserção precária e vulnerável da maioria da população na cidade em áreas já suscetíveis gera graves situações de risco de vida em períodos cuja pluviosidade é maior e mais intensa (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2006, p.8). Ocorre então um confronto entre o crescimento populacional e os fatores naturais limitantes desses territórios (RODRIGUES, 2011, p.19).

É necessário verificar as condições de uso e ocupação do solo e as limitações naturais desta área, como por exemplo, os fatores que intervêm diretamente na ocorrência dos deslizamentos, como declividade e tipo de solo (SOUZA et al., 2012, p.150). Por meio da análise desses fatores é possível realizar um planejamento territorial, considerando as localidades com maior probabilidade e registros de deslizamentos, evitando prejuízos à população, ao poder público e ao meio ambiente.

Com a intenção de fornecer “suporte técnico-científico para a geração de zoneamentos utilizados no planejamento territorial ambiental” (SILVA NEVES; NEVES; FORNELOS, 2008, p.125), é recomendável o uso de ferramentas que determinem a

vulnerabilidade ambiental destas regiões por meio de estudo de parâmetros ambientais relevantes.

As ferramentas mais utilizadas são aquelas que possuem maior facilidade de acesso, e que são fontes de informações, como é o caso de tecnologias relacionadas às imagens de satélites e programas específicos de armazenamento, tratamento e análise de dados espaciais em pesquisas ambientais (FIERZ, 2008, p.7).

O estudo das áreas mais vulneráveis à ocorrência de deslizamentos pode ser feito por meio do uso de geotecnologias, como Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, os quais fornecem suporte para elaboração do mapeamento de riscos. Dessa maneira, o presente trabalho visa identificar as áreas de maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos utilizando essas tecnologias.

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo 1, além do conteúdo já exposto, apresenta os objetivos e a justificativa da realização deste trabalho para os municípios de Petrópolis e Teresópolis. O capítulo 2, Área de Estudo, apresenta algumas características dos municípios de Petrópolis e Teresópolis. O capítulo 3, Referencial teórico, discorre sobre os conceitos utilizados para execução deste estudo. Os Materiais e Métodos utilizados estão dispostos no capítulo 4, enquanto os capítulos 5 e 6 apresentam os Resultados e Discussões, e Conclusões, respectivamente.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Identificar as áreas de fragilidade ambiental dos municípios de Teresópolis e Petrópolis, localizados na região Serrana do Rio de Janeiro, a partir dos aspectos do meio físico (declividade, tipo de solo e tipo de cobertura do solo) com o uso de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para o desenvolvimento do trabalho são:

- Compor banco de dados geográfico para caracterização do meio físico da área de estudo por meio do uso de imagens de sensoriamento remoto (SR) e dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Elaborar produtos cartográficos de declividade e tipo de solos;
- Aplicar as imagens de SR e técnicas de interpretação de imagens para geração de mapa do tipo de cobertura do solo;
- Combinar os dados georreferenciados de tipo de solo, declividade e tipo de cobertura do solo por meio de técnicas de análise multicritério, para geração do mapa síntese das áreas de maior fragilidade ambiental;
- Verificar qual das análises multicritérios (booleana ou *fuzzy*) utilizadas neste trabalho, possibilita identificar as áreas de maior fragilidade da área de estudo;
- Validar o mapa de fragilidade gerado pela pesquisa por meio de comparação desse com pontos em que já ocorreram problemas relacionados a movimento de massa e deslizamentos nos municípios estudados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Desastres são causados pelo impacto de um fenômeno natural de grande intensidade sobre área ou região povoada, podendo ou não ser agravado pelas atividades antrópicas (CASTRO, 2003). Segundo Tominaga (2009), “no Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como, inundações e enchentes, escorregamentos de solos e/ou rochas e tempestades”.

Em estudo realizado e divulgado pelo CEPED (2011), a região serrana do Rio de Janeiro, nos últimos 25 anos, teve o registro de oito ocorrências de deslizamentos, sendo o último, ocorrido em 2011, considerado o pior deslizamento em toda a história do Brasil, totalizando 918 óbitos, 8.795 desabrigados e 22.604 desalojados, além dos impactos diretos sobre a vida de mais de 32 mil habitantes (FREITAS et al.,2012), dos quais os municípios de Nova Friburgo, Petrópolis e Teresópolis foram os mais afetados.

Tais deslizamentos aconteceram em decorrência da elevada intensidade de chuvas. Segundo Melo e Coelho (2011) foi registrado pela estação meteorológica, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 166 mm de chuva nos dias 11 e 12 de janeiro. Este valor corresponde a mais de 70% do valor médio histórico para todo o mês. Os altos índices pluviométricos aliados a ocupações irregulares de uma topografia não favorável a ocupação (RODRIGUES, 2011, p.18) foi a combinação necessária para a ocorrência do deslizamento e o elevado índice de mortalidade.

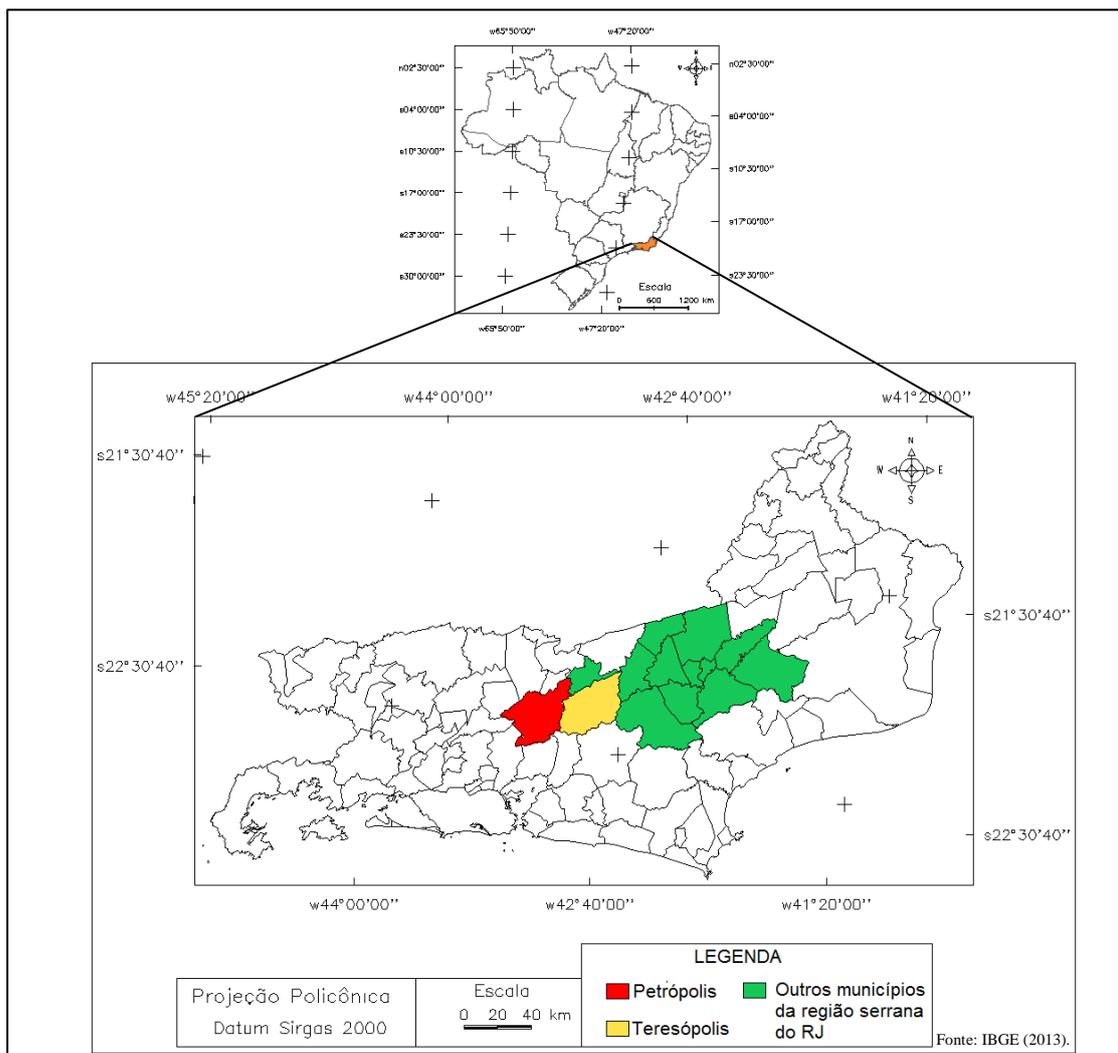
Ressalta-se que danos ambientais e danos econômicos decorrentes destes eventos poderão ser ressarcidos, por meio de programas de restauração da área e colaboração de políticas governamentais respectivamente, mesmo que a um custo elevado. Entretanto, danos sociais devido à perda das moradias e à morte de familiares são de caráter imensurável.

Necessita-se que medidas preventivas sejam executadas conforme um programa de gestão de riscos. Dentre essas medidas, pode-se citar o uso de ferramentas geotecnológicas (Sistema de Informações Geográficas e SR) e estudos preditivos da fragilidade ambiental, viabilizando a identificação de áreas de maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos. Partindo dessa perspectiva, as intervenções humanas feitas no meio ambiente devem ser compatíveis com a potencialidade dos recursos e fragilidade dos ecossistemas e ambientes naturais (ROSS, 1994, p.65).

## 2 ÁREA DE ESTUDO

Como objeto de estudo da fragilidade ambiental, foram escolhidos os municípios de Petrópolis e Teresópolis, localizados na região serrana do Rio de Janeiro (Figura 1). Esses municípios, juntamente com Nova Friburgo, sofreram os maiores impactos devido aos deslizamentos ocorridos em janeiro de 2011, o que permite validar a abordagem aplicada pela comparação dos resultados obtidos com as áreas onde de fato ocorreram estes deslizamentos.

A região serrana é composta por 14 municípios, sendo estes: Bom Jardim, Cantagalo, Carmo, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Nova Friburgo, Petrópolis, Santa Maria Madalena, São José do Vale do Rio Preto, São Sebastião do Alto, Sumidouro, Teresópolis e Trajano de Moraes (Fundação CEPERJ, 2010, p.8; MELLO, 2007, p.59).

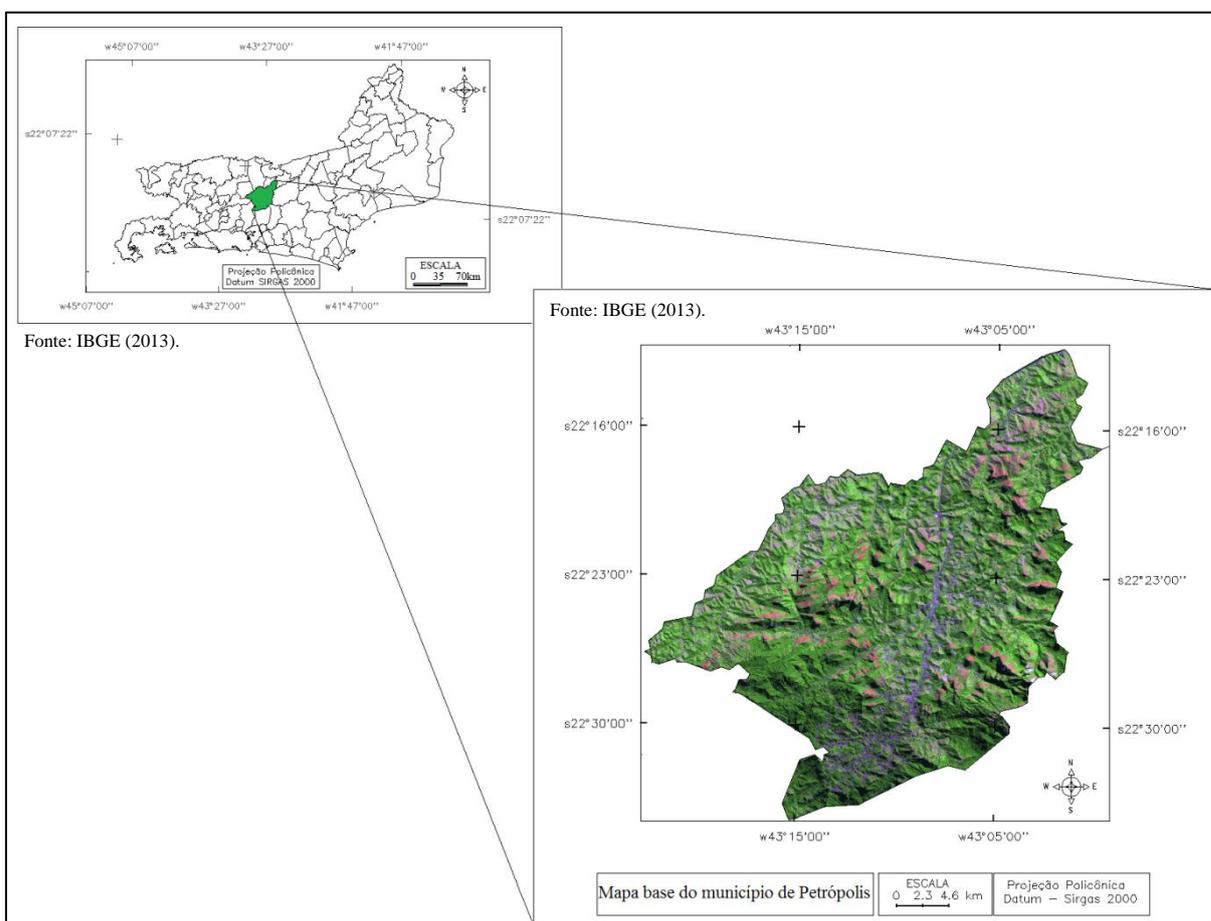


**Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

## 2.1 PETRÓPOLIS

### 2.1.1 Histórico de uso e ocupação do solo

O município de Petrópolis (sede em 22° 30' 18"S e 43° 10' 44"O – Figura 2) foi fundado em 16 de Março de 1843 (Lei Municipal 4753/90) e se localiza no topo da Serra da Estrela junto ao conjunto montanhoso da Serra dos Órgãos (PMP, 2012).



**Figura 2 – Mapa dos municípios do Rio de Janeiro-Petrópolis em destaque.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Segundo Rodrigues (2011, p.56), entre 1845 e 1950 ocorreu um intenso crescimento populacional por meio das migrações de pessoas de outros países e outras cidades do Rio de Janeiro e Minas Gerais em decorrência das facilidades de acesso das estradas implantadas e

da infraestrutura de Petrópolis, transformando a cidade de veraneio em grande centro industrial e comercial.

Nessa época a ocupação urbana seguia as condicionantes naturais da área, restringindo-se aos fundos dos vales e planícies fluviais (GONÇALVES, 1998 *apud* GUERRA; GONÇALVES; LOPES, 2007, p.41). Ainda de acordo com Guerra, Gonçalves e Lopes (2007, p. 40), o planejamento de ocupação do município de Petrópolis foi feito seguindo os três principais rios da cidade: Palatinado, Piabanha e Quitandinha.

Com o processo de transferência da capital do Rio de Janeiro para Brasília durante a década de 1950, aliado ao desenvolvimento industrial com a abertura às indústrias internacionais que se instalaram principalmente na região sudeste do Brasil (São Paulo, Rio de Janeiro, Santo André, São Caetano e São Bernardo), houve um intenso movimento dos trabalhadores rurais para os grandes centros urbanos industriais onde ocorreu um aumento das oportunidades de emprego (GUIMARÃES; REGINATO; OLIVEIRA, 2009, p.12).

Segundo Southern (2007, p. 88) a maior taxa de crescimento do município, desde os primeiros registros do IBGE, foi no período de 1950-1960, como visto na Figura 3. Estes dados coincidem com o desenvolvimento industrial da região, o qual mostra que as taxas de crescimento de Petrópolis e da capital do Brasil nesta época, Rio de Janeiro, quase se equipararam.

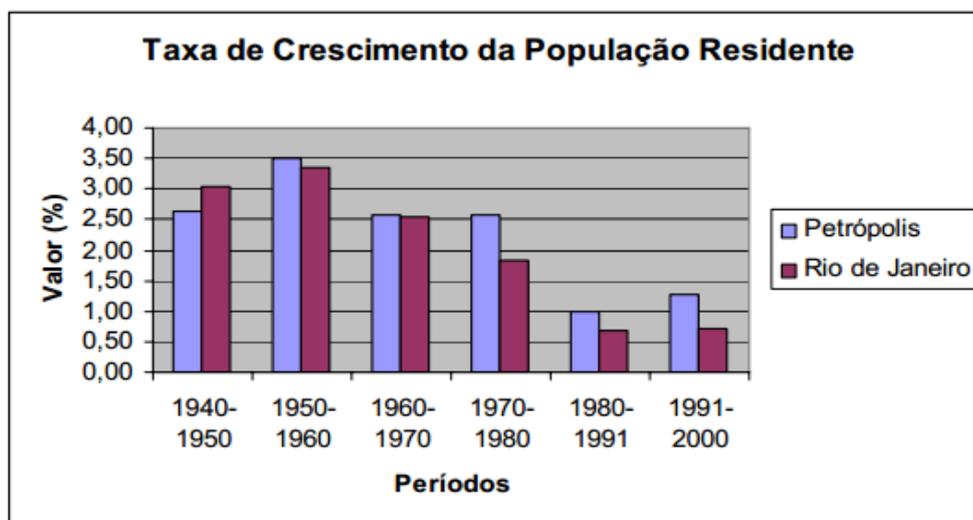


Figura 3 - Taxa de crescimento da população residente dos municípios de Petrópolis e Rio de Janeiro, RJ.

Fonte: Southern (2007, p. 89).

Decorrentes deste contexto muitas mudanças sociais aconteceram, como o caso das migrações internas marginalizadas. Em Petrópolis, com o aumento da população local, o

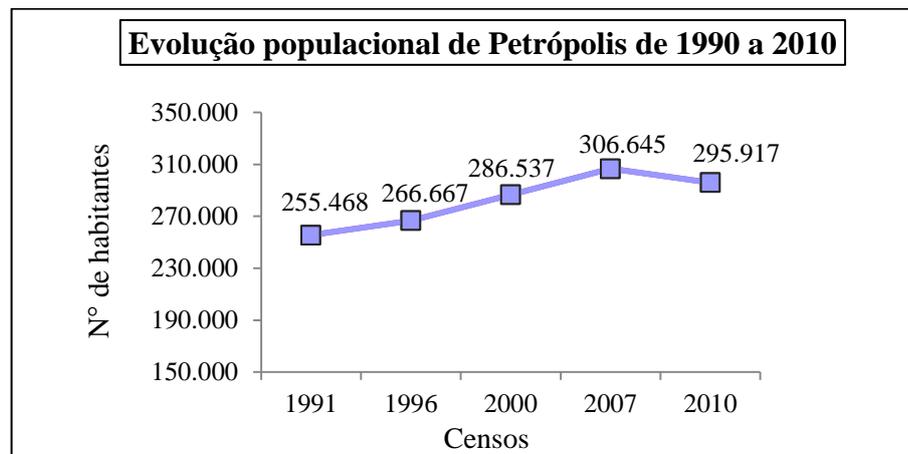
crescimento desordenado de moradias irregulares, incluindo as encostas dos morros, modificou totalmente os limites inicialmente estabelecidos pelo planejamento proposto por Köeler (SANTOS FILHO, 2007, p.58; GUERRA; GONÇALVES; LOPES, 2007, p.41).

Rodrigues (2011, p.57) destaca que, com os fundos de vales já previamente ocupados, as famílias sem ter onde morar e sem recursos, iniciaram a ocupação das encostas de topografia acentuada e preservadas por sua cobertura vegetal. Assim, houve o aceleramento do desmatamento pela ocupação e parcelamento sem critério, resultando em loteamentos irregulares desprovidos de saneamento básico, estabelecendo uma população de baixo poder aquisitivo (GUERRA; GONÇALVES; LOPES, 2007, p.41).

Atualmente esta problemática ainda existe. Segundo Santos Filho (2007, p.10), é possível identificar as áreas que possuem ocupação ilegal e informal, com perfis socioeconômicos de baixa renda em encostas onde a situação para uso e ocupação do solo por áreas urbanas é crítica.

#### 2.1.2 Características político-administrativas e sociais

De acordo com o último Censo demográfico, divulgado em 2010, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Petrópolis possui 295.917 habitantes como visualizado na Figura 4.



**Figura 4 - Gráfico da população de Petrópolis de 1990 a 2010.**  
**Fonte: IBGE (2010).**

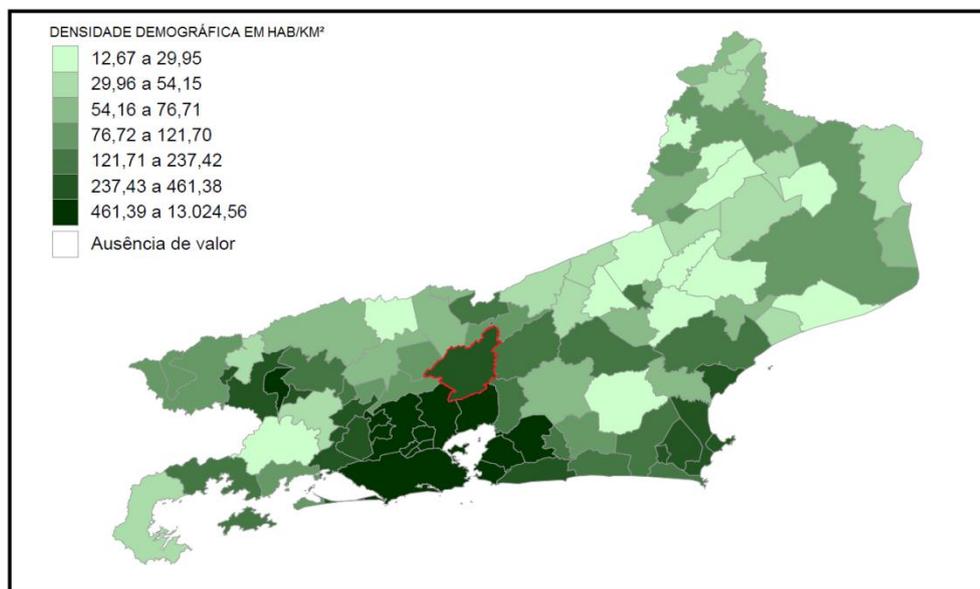
Mesmo com o decaimento da população total do município de 2007 para 2010, a cidade representa 36,73% da população da região serrana do Rio de Janeiro (Tabela 1).

**Tabela 1- Contribuição das populações dos municípios da região serrana do Rio de Janeiro (2010)**

Municípios da Região Serrana	Contribuição da População (%)
Bom Jardim	3,14%
Cantagalo	2,46%
Carmo	2,16%
Cordeiro	2,54%
Duas Barras	1,36%
Macuco	0,65%
Nova Friburgo	22,60%
<b>Petrópolis</b>	<b>36,73%</b>
Santa Maria Madalena	1,28%
São José do Vale do Rio Preto	2,51%
São Sebastião do Alto	1,10%
Sumidouro	1,85%
Teresópolis	20,33%
Trajano de Moraes	1,28%
<b>TOTAL (habitantes)</b>	<b>805.627</b>

**Fonte: IBGE Cidades (2010).**

O município tem uma área total de 771 quilômetros quadrados, resultando em uma densidade demográfica de 371,85 habitantes/km (IBGE Cidades, 2010), como pode ser visualizado na Figura 5.

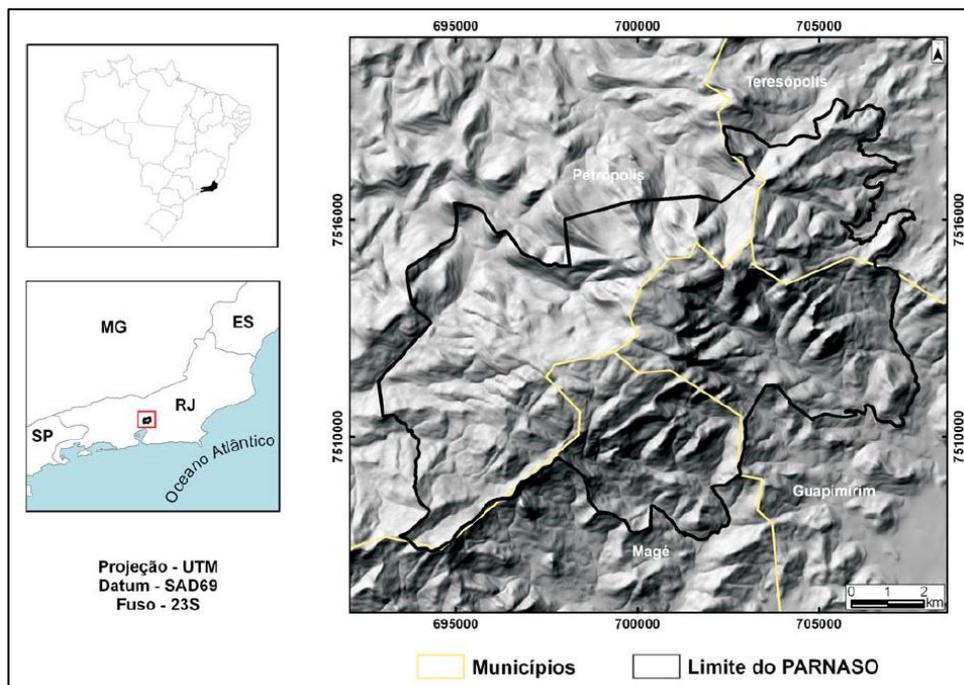


**Figura 5 - Densidade demográfica dos municípios do Rio de Janeiro (Petrópolis em destaque).  
Fonte: WebCart Beta - IBGE (2010).**

### 2.1.3 Características Físicas

#### 2.1.3.1 Relevo

Petrópolis se localiza na Região das Escarpas e Reversos da Serra do Mar (GUERRA; GONÇALVES; LOPES, 2007, p.37), localizado no planalto da Serra dos Órgãos (RODRIGUES, 2011, p.93). É nesta região que se encontra o Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), o qual também abrange os municípios de Magé e Teresópolis (Figura 6). O local possui variação altimétrica de 200 a 2.263 metros, sendo o máximo valor ocorrido na Pedra do sino, que é caracterizado o pico culminante da região (ALVES, 2007, p.32).

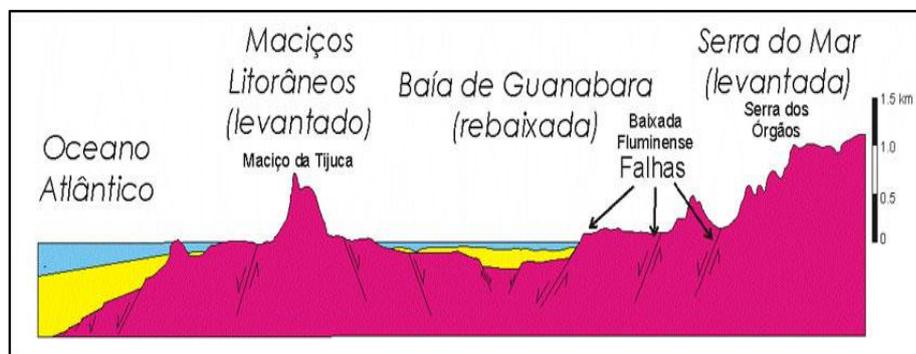


**Figura 6 - Localização do Parque Nacional da Serra dos Órgãos.**  
Fonte: Martins et al. (2007, p.48).

A altimetria média do município é de aproximadamente 845 metros (IBGE Cidades, 2010). O relevo do município é marcado por “encostas abruptas e montanhas de largas pedreiras” (PMP, 2012, p.8; RODRIGUES, 2011, p.97).

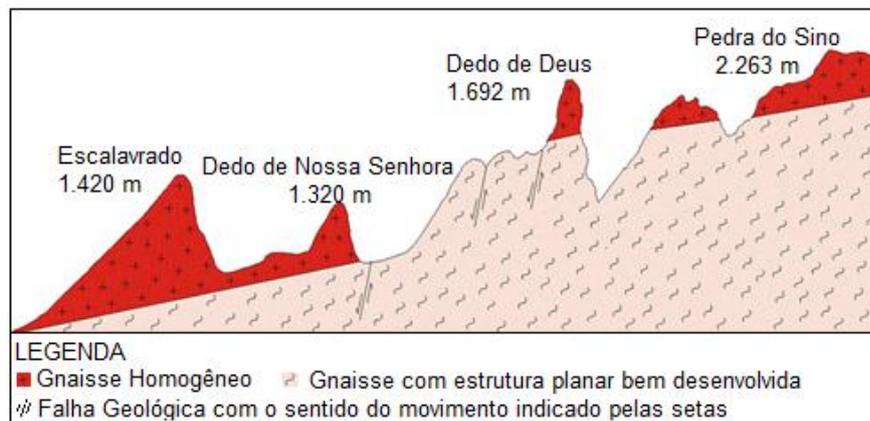
Segundo Santos Filho (2007, p. 62-63), a paisagem é “tipicamente escarpas de planalto, com predominância de declives íngremes” principalmente na zona urbana do município. Segundo Guerra, Lopes e Santos Filho (2007, p.80) as declividades chegam a apresentar mais de 45°.

A orogenia local se deve a dois fatores principais (DRM-RJ, 2006). O primeiro fator é devido à existência de falhas geológicas (rupturas na superfície terrestre) que realizam movimentos entre dois blocos rochosos, ocorrendo simultaneamente o levantamento de um dos blocos (Serra do Mar) e o rebaixamento de outro (Baía de Guanabara) - Figura 7.



**Figura 7 - Serra dos Órgãos e litoral do Rio de Janeiro.**  
Fonte: DRM-RJ (2006).

O segundo fator é a composição das rochas das montanhas que são formadas por granito na parte superior e gnaiss na base das montanhas - Figura 8. Assim, o granito sendo uma rocha homogênea que possui maior resistência do que o gnaiss se mantém preservado nos pontos mais altos dos morros, enquanto o gnaiss se desgasta esculpindo os morros da Serra (DRM-RJ, 2006).



**Figura 8 - Esquema da Seção Geológica da Serra dos Órgãos.**  
Fonte: Adaptado de DRM-RJ (2006).

### 2.1.3.2 Clima

Segundo Fróes (1964), o município possui clima úmido, caracterizando-se como tropical de altitude – elevada pluviosidade no decorrer de todo o ano, principalmente no verão. Durante os verões, a abundância das precipitações nos meses de outubro a março chega à faixa de 70 a 80% da pluviosidade total do ano (OLIVEIRA et. al, 2007, p.90), enquanto as temperaturas ficam entre 10°C e 15°C nos meses mais frios e são amenas nos meses mais quentes (SANTOS FILHO, 2007, p.60).

A região tem predominância de um clima mesotérmico e a cidade permanece a maior parte do ano sob o domínio da massa Tropical Atlântica, sendo algumas vezes alvo da massa Polar (GUERRA; LOPES; SANTOS FILHO, 2007, p.81; OLIVEIRA et al., 2007, p.90). Confirma-se então a classificação de Köppen que enquadra o clima de Petrópolis como *Cfb*, ou seja, com condições mesotérmicas com verões amenos e invernos frescos (ALVES, 2007, p. 35), sendo a umidade relativa do ar em torno de 80 a 90% (OLIVEIRA et al., 2007, p.90).

Rodrigues (2011, p.99) ressalta que devido à posição e o arranjo dos fatores geográficos, a região é envolvida pelas principais correntes de circulação atmosférica que atuam no Sudeste brasileiro, justificando a ocorrência das chuvas orográficas, os altos índices pluviométricos e a elevada umidade relativa.

### 2.1.3.3 Vegetação

O bioma predominante no município é a Mata Atlântica (IBGE Cidades, 2010). Segundo Rodrigues (2011, p.104), no município de Petrópolis, devido ao relevo, se encontra a Floresta Ombrófila Densa, com alguns tipos de cobertura vegetal: Floresta Submontana (50-500 m), Floresta Montana (500-1500 m), Floresta Alto Montana (acima de 1500 m) e Vegetação Secundária (áreas desmatadas, capoeiras e capoeirão).

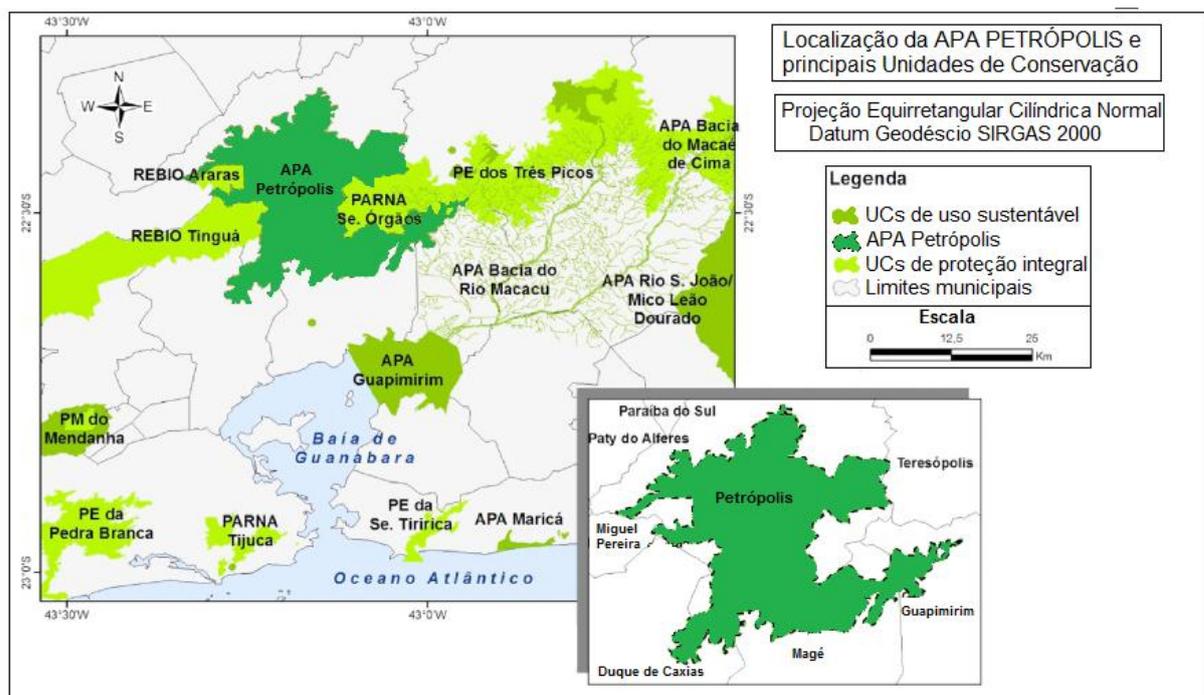
A Floresta Submontana e Montana é caracterizada pela ocorrência de caméfitas, epífitas e lianas, cujos estratos superiores atingem de 25 a 30 metros para Floresta Submontana e até 25 metros para a Montana (ALVES, 2007, p.36). Segundo Putz (2005), as

lianas são plantas trepadeiras que crescem utilizando como suporte outras árvores, mesmo que germinem no solo e mantenham algum contato com ele.

Já as epífitas são organismos vivos que se estabelecem diretamente sobre o tronco, galhos, ramos ou sobre folhas de árvores, mas sem utilizar-se de seus nutrientes (DAMASCENO, 2005, p.24). Quanto às caméfitas, Mioduski e Moro (2011, p.242) define como sendo “plantas sublenhosas ou ervas com gemas e brotos de crescimento situados acima do nível do solo, atingindo até 1 metro de altura”.

No caso da Floresta Alto Montana, as árvores possuem troncos tortuosos cobertos por camada de musgos e epífitas, sendo típica de mata úmida, localizada principalmente em solos rasos, como Cambissolos (MARTINS et al. 2007, p.50). A redução volumétrica do porte das árvores em elevadas altitudes é pelo fato de ocorrer solos menos profundos em algumas áreas e também pelo clima mais frio no inverno (SANTOS FILHO, 2006, p.62).

Com toda essa biodiversidade era necessário que de alguma forma se preservasse esta região da intensa modificação antrópica que ocorreu em meados da década de 1950. Com o intuito de preservar o conjunto paisagístico e cultural, em 1952 foi criada a primeira Área de Proteção Ambiental (APA) do país: a APA Petrópolis (Figura 9), localizada na região central do estado do Rio de Janeiro e com uma área de 592, 25 km<sup>2</sup> (GUERRA; LOPES; SANTOS FILHO, 2007, p.78).



**Figura 9 – Mapa de localização da APA Petrópolis.**  
Fonte: Adaptado de Sousa, Santos e Fernandes (2012, p.523).

Além da APA Petrópolis, ainda existem Unidades de Conservação que abrangem o território do município, como é o caso da Reserva Biológica do Tinguá, da Zona da Vida Silvestre da Maria Comprida, da Reserva Biológica de Araras, Unidade de Conservação “Parque da Serra da Estrela” e da Reserva Biológica da Alcobaça (Rodrigues, 2011, p.80).

#### 2.1.3.4 Pedologia

De acordo com Silva (2006, p.39) não há levantamentos de solos com detalhamento para o Município de Petrópolis em sua totalidade, entretanto, Reimer (2006, p.39) destaca que no município há três tipos fundamentais de solo: “o Latossolo Vermelho na região oeste do município e em suas imediações [...], o Latossolo Alaranjado que prevalece nas partes sul e leste do município [...] e o Litossolo que ocupa 13,4% do total”. No distrito de Cascatinha se encontram também os Cambissolos Aluvionares.

Outro levantamento pedológico realizado por Guerra, Lopes e Santos Filho (2007, p.81) indica a ocorrência do predomínio dos Latossolos Vermelho-Amarelos e dos Argissolos Vermelho-Amarelos, bem como dos Cambissolos na APA Petrópolis.

De acordo com Silva et al. (2010, p.3), existe uma relação entre o relevo e a ocorrência desses solos, como por exemplo, o Latossolo Vermelho-Amarelo ocorre na alta e média encosta, enquanto o Argissolo Vermelho-Amarelo ocorre no terço inferior de vertentes suavizadas e o Cambissolo em trechos mais elevados.

Argissolos são solos com aumento de argila do horizonte superficial A para o subsuperficial, geralmente possui variação de cores e de outras características, sendo “as cores do horizonte A normalmente mais escuras, enquanto do horizonte B (do tipo textural) variam de acinzentadas a avermelhadas”. São solos de profundidade variável, mas em geral, são pouco profundos (IBGE, 2007).

Os Cambissolos apresentam grande variação quanto à profundidade, desde solos rasos a profundos, sendo muitas vezes pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos, ocorrendo preferencialmente em regiões montanhosas ou serranas (IBGE, 2007; CARVALHO FILHO et al., 2000, p.14).

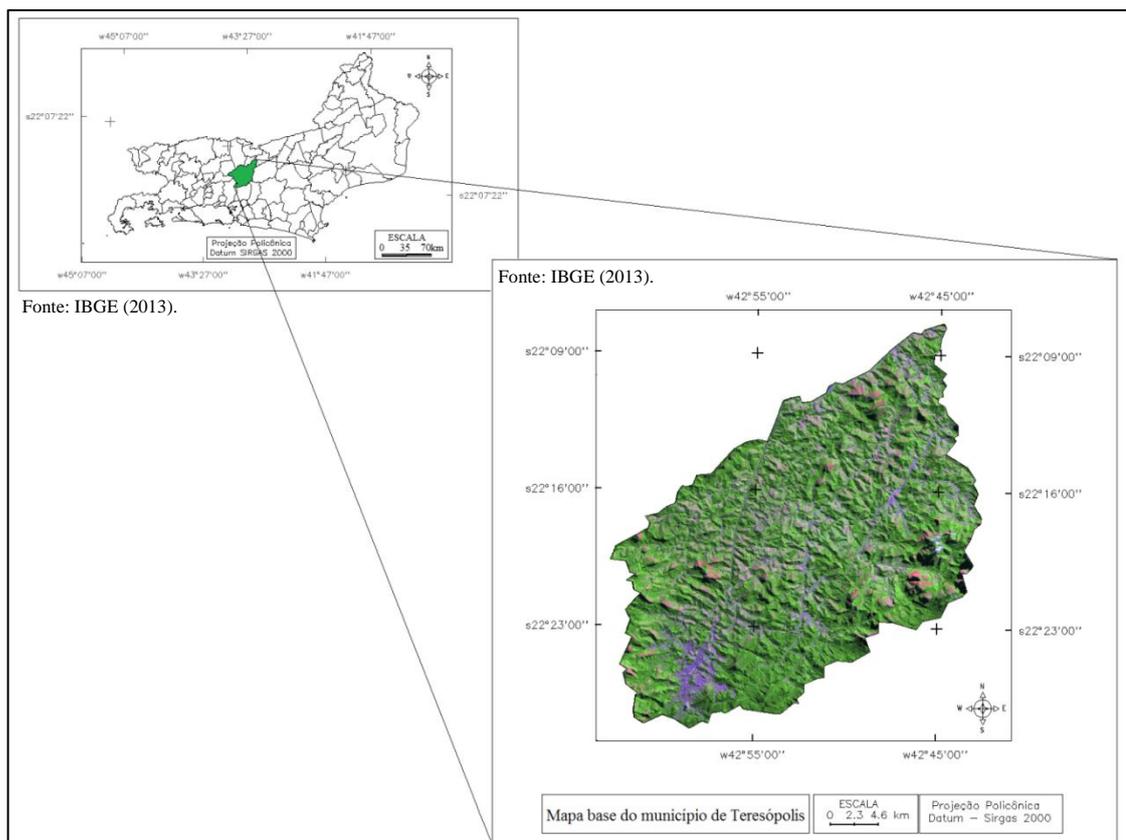
Caracterizado como solos muito intemperizados, profundos e de boa drenagem, os Latossolos possuem homogeneidade de características ao longo do perfil, e se manifesta em grande parte do país, assim como o Argissolo (IBGE, 2007). A presença de óxidos de ferro e

sua coloração são fatores que determinam a classificação desse solo, como por exemplo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo ou Latossolo Amarelo.

## 2.2 TERESÓPOLIS

### 2.2.1 Histórico de uso e ocupação do solo

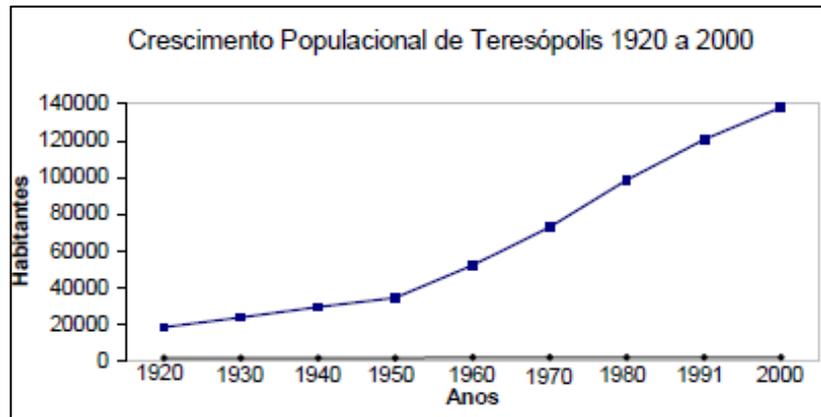
Teresópolis (sede em  $22^{\circ} 24' 43''\text{S}$  e  $42^{\circ} 57'57''\text{O}$  - Figura 10) se encontra no topo da Serra dos Órgãos, alcançando a condição de município no dia 6 de julho de 1891, com o Decreto n° 280 assinado pelo governador Francisco Portela.



**Figura 10 – Mapa dos municípios do Rio de Janeiro - Teresópolis em destaque.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

O crescimento populacional da cidade teve contribuição da implantação de estradas, como por exemplo, a BR-116 pelo governo de Juscelino Kubitschek (PEREIRA, 2011, p.5).

Os índices de crescimento alcançaram 52,1% entre as décadas de 1950-1960 (Figura 11). Essa taxa de crescimento se manteve até a década de 1990, quando o crescimento populacional diminuiu para 14,4%. (COSTA, 2005, p.37).

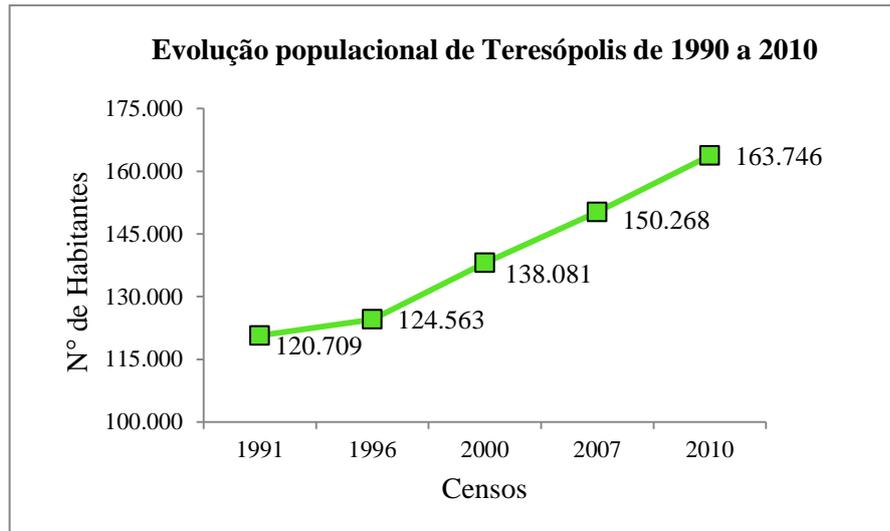


**Figura 11 - Gráfico do crescimento da população do município de Teresópolis.**  
**Fonte: Ferreira et al. (1998).**

O crescimento populacional acelerado no município sem o devido planejamento urbano, aliado às condições financeiras deficitárias e às características físicas da região, resultou em um mau uso e ocupação do espaço por parte da população menos favorecida, uma vez que, mesmo as áreas de encostas muito íngremes acabaram sendo habitadas por possuírem menor custo que as áreas centrais do município (SILVA; SCHUMM e FERREIRA, 2007, p.133).

### 2.2.2 Características político-administrativas e sociais

De acordo com dados divulgados em 2010 pelo IBGE, o município de Teresópolis possui 163.746 habitantes ( Figura 12). A área total é de 770,6 km<sup>2</sup>, o que resulta em uma densidade demográfica de aproximadamente 212,4 habitantes/km<sup>2</sup>. Ao analisar a população de Teresópolis na Tabela 1, que representa 20,33% da população total da região serrana do Rio de Janeiro, nota-se que este é o terceiro município mais populoso dessa região.



**Figura 12 - Gráfico da População de Teresópolis de 1990 a 2010.**  
**Fonte: IBGE (2010).**

### 2.2.3 Características Físicas

#### 2.2.3.1 Relevô

A região é caracterizada, assim como Petrópolis, pelo aspecto montanhoso com uma das áreas mais acidentadas da Serra do Mar (QUEIROZ, 2011, p.27). Algumas das escarpas presentes no município possuem altitudes que variam de 400 a 2.263 m (ROCHA et al., 2011, p.2).

Segundo Melo (2012, p.1) as zonas com maiores declividades possuem rochas aflorantes e que impossibilitam o desenvolvimento do solo. Com a diminuição da declividade, desenvolvem-se solos incipientes e rasos, enquanto que na parte inferior (base das escarpas), ocorre o desenvolvimento de solos mais profundos.

#### 2.2.3.2 Clima

De acordo com Rocha et al. (2011, p.3), o clima é considerado ameno como tropical de altitude com temperatura média anual de 17°C e umidade relativa na média de 84%.

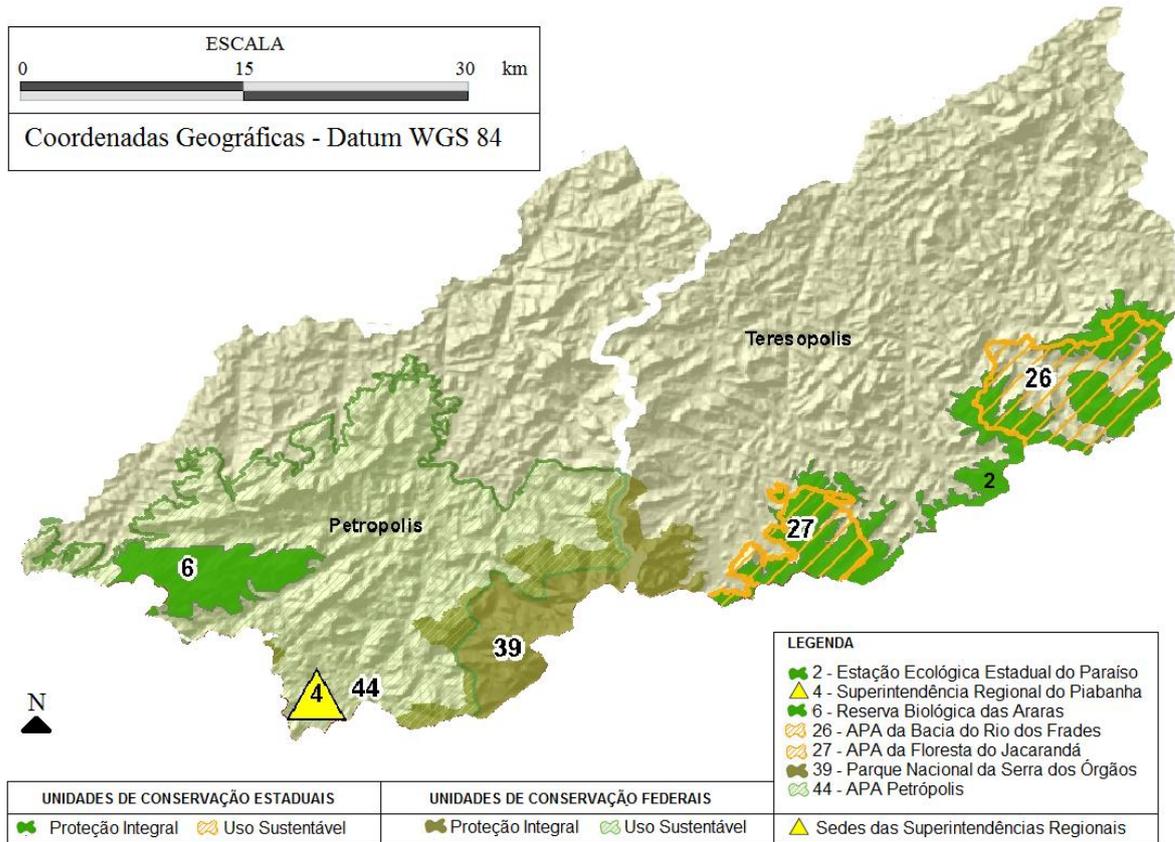
Köppen classifica a região como sendo de clima mesotérmico brando úmido do tipo *Cwa* (COMPERJ, 2011), com chuvas ocorrentes no verão e seca no inverno (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009, p.20).

### 2.2.3.3 Vegetação

Situado em uma área de Mata Atlântica (QUEIROZ, 2011, p.29), a região com altitudes de até 1.200 metros é composta pela Floresta Ombrófila Densa Montana, com uma formação vegetal de caráter tropical de dosséis que atingem de 20 a 30 metros, podendo haver emergentes de até 40 metros. Já as altitudes superiores a 1.200 metros tem predomínio da Floresta Ombrófila Densa Alto Montana, com formações de cerca de 20 metros de altura sendo uma vegetação densa e baixa em decorrência das condições ambientais desses locais (COMPERJ, 2011).

O município possui extensas áreas de parques e APAs (Figura 13), sendo esses uma parte do PARNASO, a APA da Floresta do Jacarandá, a APA dos Frades e o Parque Estadual dos Três Picos (SILVA et al., 2009). Este último criado pelo Decreto Estadual nº 31.343 de 05 de junho de 2002, com o objetivo de assegurar os remanescentes de Mata Atlântica da porção fluminense da Serra do Mar, preservar espécies endêmicas (raras ou com risco de extinção), integrar o corredor ecológico central da Mata Atlântica do Rio de Janeiro e preservar os mananciais que abastecem os municípios circunvizinhos (SIQUEIRA; CABRAL, 2007, p.9).

Teresópolis ainda possui o Parque Estadual dos Três Picos, a maior UC do grupo estadual do Rio de Janeiro. Este Parque também está presente os municípios de Cachoeiras de Macacu, Nova Friburgo, Silva Jardim e Guapimirim (SIQUEIRA; CABRAL, 2007, p.9).



**Figura 13 - Unidades de Conservação da Área de Estudo.**  
**Fonte: Adaptado de INEA (2012).**

#### 2.2.3.4 Pedologia

De acordo com Melo (2012, p.1) as montanhas e escarpas serranas da região de Teresópolis têm solos bastante lixiviados, como Cambissolos, Neossolos e em alguns locais Latossolos Vermelho-Amarelos. Na paisagem da região, pode-se observar que provavelmente o Cambissolo está adjunto ao relevo ondulado, oposto do Latossolo, que se posiciona no relevo plano ou suavemente ondulado.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL

Tricart (1977, p.35) expõe que “estudar a organização do espaço é determinar como uma ação se insere na dinâmica natural, para corrigir certos aspectos desfavoráveis e para facilitar a exploração dos recursos ecológicos que o meio oferece”. Dessa maneira, para estudar a organização do espaço e seu dinamismo, o autor classifica o meio de três formas: meio estável; meio instável e meio intergrades.

Os três meios são classificados de acordo com a sua velocidade de alteração, a influência da vegetação na dinâmica ambiental e na morfogênese. Assim, o meio estável é aquele em que os processos mecânicos atuam de modo lento e a evolução deste meio é dificilmente perceptível, ocorrendo de forma demorada e constante (TRICART, 1977, p.36).

O meio intergrades é considerado por Tricart (1977, p. 47) como sendo o meio caracterizado de passagem do estável para o instável, ou seja, o meio intermediário entre os meios estável e instável. Já o meio instável caracteriza-se por se alterar de forma acelerada o suficiente para aparentar as variações ocorridas.

Baseando-se no conceito criado e divulgado por Tricart (1977), Ross (1994, p.65) analisa o ambiente dentro da concepção ecológica e pressupõe que “na natureza as trocas de energia e matéria se processam através de relações em equilíbrio dinâmico”.

Segundo Fierz (2008, p.90), equilíbrio dinâmico são as trocas de energia e matéria necessárias para o desenvolvimento dos processos que regem o sistema natural, quando esses atingem um estágio em que as mudanças são somente percebidas em escala de tempo geológico.

Porém o equilíbrio dinâmico é constantemente alterado por intervenções antrópicas, gerando estados de desequilíbrios permanentes ou temporários. Assim, o conceito de Tricart sobre estabilidade (meio em equilíbrio) e instabilidade (meio desequilibrado), é ampliado por Ross, categorizando as unidades ecodinâmicas instáveis e estáveis em cinco níveis de fragilidade (ROSS, 1994, p.66). Ross, ao desenvolver uma nova abordagem, denomina as unidades ecodinâmicas instáveis de unidades ecodinâmicas de instabilidade emergente, enquanto que as unidades ecodinâmicas estáveis são nomeadas como unidades ecodinâmicas

de instabilidade potencial, uma vez que toda a área natural que se encontra em equilíbrio está sujeita a interferência antrópica (ROSS, 1994, p.66).

Segundo Santos (2011, p.52), Tricart em sua teoria considera as unidades ecodinâmicas instáveis e estáveis como sendo essencialmente relacionadas à intensidade de processos morfogenéticos e pedogenéticos. Quando houver a predominância da pedogenese a tendência é de maior estabilidade e, no caso da morfogênese ser predominante, configuraria uma tendência a menor estabilidade.

Alguns autores (ROSS, 1994, p.65; SANTOS, 2011; p.54) encontram limitações dessa análise, pois uma vez que só são considerados fatores naturais para análise da área, torna-se difícil a aplicação deste conceito em áreas urbanizadas que sofreram intensiva modificação antrópica.

Assim, para a classificação de uma área quanto a seu grau de fragilidade ambiental, o fator da modificação antrópica deve ser considerado. No caso da fragilidade ambiental potencial, a análise feita é por meio da integração das características naturais, como por exemplo, relevo e solos. Para obter resultados quanto à fragilidade emergente, basta considerar a relação entre a fragilidade potencial e os diferentes tipos de cobertura do solo (MAGANHOTTO; SANTOS; OLIVEIRA FILHO, 2011, p.233, ROSS, 1994; p. 66).

Spörl (2007, p.81), expõe que a fragilidade potencial pode ser encontrada em áreas onde a interferência humana não alterou a situação de equilíbrio do meio, predominando somente os agentes naturais de modificação, como o intemperismo físico-químico. Já emergente, é a própria característica de uso da terra, que gera situações de desestabilização do equilíbrio dinâmico da paisagem.

Esta ampliação feita por Ross (1994, p.66) do conceito de Tricart (1977) permite caracterizar de forma mais coerente o meio ambiente urbano visando o planejamento territorial. Possibilita também, a identificação de áreas de fragilidade do ambiente que são determinadas a partir da análise de forma integrada em conhecimentos setorializados, ou seja, análise de cada característica que influencia na determinação da fragilidade ambiental.

Segundo Graça e Silveira (2011, p.67), é necessário que as características peculiares de cada território sejam consideradas na determinação da fragilidade ambiental emergente e potencial, de forma que essas definam as unidades ecodinâmicas estáveis e instáveis. Alguns estudos levam em consideração fatores físicos locais como:

- Relevo (ROSS, 1994; RUHOFF et al., 2004; SPÖRL; ROSS, 2004; DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006; FIERZ, 2008; GONÇALVES et al., 2009; MORO; SOUZA; ALMEIDA, 2011);

- Tipos de solo (ROSS, 1994; RUHOFF et al., 2004; SPÖRL;ROSS, 2004; DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006; KAWAKUBO et al., 2005; MORO; SOUZA; ALMEIDA, 2011);
- Distância de rios (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006);
- Índices pluviométricos (ROSS, 1994; SPÖRL;ROSS, 2004; MORO; SOUZA; ALMEIDA, 2011);
- Geologia (RUHOFF et al., 2004; KAWAKUBO et al., 2005;GONÇALVES et al., 2009; MORO; SOUZA; ALMEIDA, 2011).

Para o estudo da fragilidade emergente, também se leva em consideração o tipo de uso e cobertura do solo relacionado às construções civis e modificações antrópicas do meio (RUHOFF et al., 2004; DONHA;SOUZA;SUGAMOSTO, 2006; KAWAKUBO et al., 2005; FIERZ, 2008) ou o próprio tipo de cobertura vegetal existente (ROSS, 1994; SPÖRL;ROSS, 2004; FIERZ, 2008; GONÇALVES et al., 2009) .

No quesito declividade e topografia do terreno, Ross (1994, p.5) propõe uma classificação de acordo com a influência desta na fragilidade ambiental do local, como apresentado no Quadro 1.

CLASSE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	DECLIVIDADE
1 – Muito Baixa	< 3%
	3 a 6%
2 - Baixa	6 a 12%
3 - Média	12 a 20%
4 – Forte	20 a 30%
5 – Muito forte	Acima de 30%

**Quadro 1 – Identificação da Classe de Declividade e de fragilidade ambiental.**

**Fonte: Adaptado de Ross (1994, p.66).**

Ross (1994) propõe que quanto maior a declividade, maior o nível de fragilidade. Estes valores são justificados pelo autor por terem sido baseados em “intervalos consagrados nos estudos de Capacidade de Uso/Aptidão Agrícola associados aos valores já conhecidos de limites críticos de geotecnia” (SPÖRL; ROSS, 2004, p.42) e são “indicativos respectivamente do vigor dos processos erosivos, dos riscos de escorregamentos/deslizamentos e inundações frequentes” (ROSS, 1994, p.66).

A classificação utilizada por Ross (1994) quanto aos tipos de solo, correlacionando-os com o nível de fragilidade ambiental em relação à sua erodibilidade, está disposta no Quadro 2.

CLASSE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	TIPO DE SOLO
1 – Muito Baixa	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho Escuro e Vermelho Amarelo de Textura Argilosa
2 – Baixa	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa
3 - Média	Latossolo VermelhoAmarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/argilosa.
4 - Forte	Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/arenosa, Cambissolos
5 – Muito Forte	Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas.

**Quadro 2– Classificação do solo e Classe de fragilidade ambiental.**  
**Fonte: Ross (1994, p.68).**

Sabe-se que o trabalho desenvolvido por Ross (1994) utilizou a classificação dos solos provenientes dos resultados das pesquisas desenvolvidas por pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas – Estado de São Paulo e pelo IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná.

Os níveis de fragilidade para os diferentes tipos de solos foram determinados por meio da consideração de características como “textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade/espessura dos horizontes superficiais e subsuperficiais (ROSS, 1994, p.67)”.

Ainda, segundo Nascimento e Domingues (2009, p.400), outra característica que pode ser considerada para determinação da fragilidade do solo é a sua maturidade, ou seja, para os solos mais desenvolvidos são atribuídos menores valores de fragilidade, enquanto que, para os solos menos evoluídos, constituídos por sedimentos inconsolidados, são atribuídos os valores maiores.

Desde o estudo realizado por Ross (1994), a classificação dos solos passou por algumas mudanças quanto aos critérios analisados, principalmente em relação à nomenclatura utilizada. Pode ser observada no Quadro 3, a correlação dos nomes do antigo Sistema Brasileiro de Classificação dos solos, com os nomes utilizados atualmente.

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS <sup>1</sup>		CLASSIFICAÇÃO ANTERIOR
ORDENS	SUBORDENS	
Latosolos	Bruno	Latosolo Bruno e Latossolo Variação Una
	Amarelo	Latosolo Amarelo e Latossolo Variação Una
	Vermelho	Latosolo Vermelho-Escuro, Latossolo Roxo e Latossolo Ferrífero
	Vermelho-Amarelo	Latosolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Variação Una
Luvissolos	Crômico	Bruno não Cálxico, Parte de Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico com argila de atividade alta (Ta) e Podzólico Vermelho-Escuro eutrófico com argila de atividade alta (Ta)
	Hipocrômico	Podzólico Acinzentado eutrófico com argila de atividade alta (Ta) Parte de Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico com argila de atividade alta (Ta) Podzólico Bruno-Acinzentado eutrófico com argila de atividade alta (Ta)
Nitossolos	Bruno	Terra Bruna Estruturada e Terra Bruna Estruturada intermediária para Terra Roxa Estruturada
	Vermelho	Terra Roxa Estruturada, Terra Roxa Estruturada Similar, Podzólico Vermelho-Escuro com argila de atividade baixa (Tb), Terra Vermelha-Brunada, Rubrozém (parte)
	Háplico	Outras Terras e Podzólicos Vermelho-Amarelos com baixa relação textural e argila de atividade baixa (Tb)
Argissolos	Bruno-Acinzentado	Podzólico Bruno-Acinzentado
	Acinzentado	Podzólico Acinzentado
	Amarelo	Podzólico Amarelo
	Vermelho	Podzólico Vermelho-Escuro com argila de atividade baixa (Tb), Terra roxa Estruturada Similar e Terra Roxa Estruturada, com gradiente textural e Rubrozém (parte)
	Vermelho-Amarelo	Podzólico Vermelho-Amarelo e Rubrozém
Cambissolos	Háplico	Demais Cambissolos, exceto com A chernozêmico, eutrófico e argila de atividade alta (Ta)
	Flúvico	Cambissolos de sedimentos Aluviais e Solos Aluviais (parte)
	Húmico	Cambissolo com A húmico

**Quadro 3 - Nova nomenclatura para classificação dos solos.**

**Fonte: EMBRAPA (2006).**

Carvalho Filho (2000), em estudo realizado para os solos do estado do Rio de Janeiro, mostra que os solos do tipo Cambissolo são pouco evoluídos, com características bastante variáveis, sendo geralmente pouco profundos ou rasos. Quanto ao Latossolo presente na área de estudo, ocorre o reflexo direto das condições climáticas (temperaturas amenas e

região chuvosa) em suas características, com a tendência de solos em regiões mais altas possuírem o horizonte superficial mais rico em matéria orgânica e são considerados como solos bem desenvolvidos.

Ainda segundo Carvalho Filho (2000), os Argissolos podem ser encontrados de duas maneiras: vermelho, e vermelho amarelo. Problemas sérios de erosão são verificados nesse tipo de solo, sendo que há uma grande diferença entre as texturas do horizonte A e B, e a erodibilidade se intensifica devido a elevadas declividades e regiões onduladas (LOBATO; SOUSA, 2012).

Ross (1994) ainda considera o parâmetro do tipo de cobertura vegetal como fator de influência na determinação da fragilidade ambiental (Quadro 4).

<b>CLASSE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL</b>	<b>TIPO DE COBERTURA DO SOLO</b>
1 – Muito Baixa a Nula	Florestas/Matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade.
2 – Baixa	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso ou arbustivas densas (mata secundária, Cerrado Denso, Capoeira Densa), Pastagens cultivadas com pisoteio de gado, cultivo de ciclo longo.
3 - Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento, pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de espécies nativas.
4 - Alta	Culturas de ciclo longo, de baixa densidade, culturas de ciclo curto com cultivo em curvas de nível/terraceamento.
5 – Muito Alta	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto, terraplanagens, culturas de ciclos curtos sem práticas conservacionistas.

**Quadro 4 - Classificação do tipo de Cobertura vegetal e classe de fragilidade ambiental.**

Fonte: Adaptado de Ross (1994, p. 68-69).

O parâmetro de tipo de cobertura vegetal tem pouca relação com a questão da interferência antrópica no meio natural, uma vez que muitas dessas características descritas nos parâmetros são naturais do meio.

Logo, levando em consideração a aplicabilidade da teoria desenvolvida por Ross (op.cit.) e a área de estudo do presente trabalho, outras categorias de tipo de cobertura do solo foram utilizadas, como as propostas em estudo realizado por Rocha e Cabral (2011), visualizadas no Quadro 5.

CLASSE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	TIPO DE COBERTURA DO SOLO
1 - Muito Baixa a Nula	Corpos d'água
2 - Baixa	Mata/Cerradão
3 - Média	Pastagem
4 - Alta	Cultura
5 – Muito Alta	Solo exposto, Área Urbana

**Quadro 5 – Classificação do tipo de cobertura do solo quanto a sua fragilidade.**

**Fonte: Rocha e Cabral (2011, p.8).**

A análise desses fatores (tipo de solo, tipo de cobertura do solo e declividade), caracteriza a fragilidade ambiental da área de estudo, ou seja, qual a vulnerabilidade do solo à erosão (Kawakubo, 2005, p.2204). De acordo com Spörl e Ross (2004, p.40), a identificação dos ambientes naturais e das fragilidades potenciais e emergentes “proporcionam uma melhor definição das diretrizes e ações a serem implementadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento e fornecendo subsídios à gestão do território”. Mas para que a análise seja feita, são necessários produtos intermediários que a subsidiem.

A metodologia proposta por Ross foi utilizada em diversos estudos, como o realizado por Souza, Costa e Carvalho (2011) cujo trabalho teve por objetivo avaliar a fragilidade ambiental na área de influência da usina hidrelétrica de Belo Monte, a partir do uso de geoprocessamento e de produtos intermediários como mapas de solos, declividade e imagens de sensoriamento remoto para identificação do tipo de cobertura do solo existente.

Em outro estudo de fragilidade ambiental realizado por Maganhotto, Santos e Oliveira Filho (2010), baseado na metodologia proposta por Ross (1994), o objetivo era analisar a fragilidade ambiental por meio do uso de variáveis ambientais e cálculo de alguns parâmetros. A fragilidade ambiental neste caso pôde ser determinada como ferramenta para orientar a implantação e execução de atividades de ecoturismo em unidades de conservação na cidade de Irati –PR.

Os produtos intermediários para estudos de fragilidade ambiental normalmente provêm de informações cartográficas, como mapas de tipo de solos, imagens de SR classificadas em conformação com a cobertura do solo, ou até mesmo extensas séries de dados ambientais, como níveis de pluviosidade, que devem ser espacialmente distribuídas.

A interpretação, leitura e cruzamento de grandes informações disponíveis em mapas devem contar com o auxílio de ferramentas poderosas de armazenamento, manipulação e interpretação desses dados (OLIVEIRA, 2010, p.46), e consequentemente, proporcionar

resultados que sirvam de subsídio para um planejamento territorial cujo objetivo seja minimizar os efeitos negativos de possíveis deslizamentos (COSTA, 2005, p.46).

### 3.2 GEOPROCESSAMENTO

Considerando que a fragilidade ambiental está intimamente relacionada com a questão espacial e com diversos dados ambientais, devem ser utilizadas tecnologias que contemplem esses assuntos de forma completa, como é o caso das geotecnologias (MARCELINO, 2008, p.33). Outra vantagem do uso dessas tecnologias é facilitar a manipulação dos dados e trazer maior confiabilidade aos resultados.

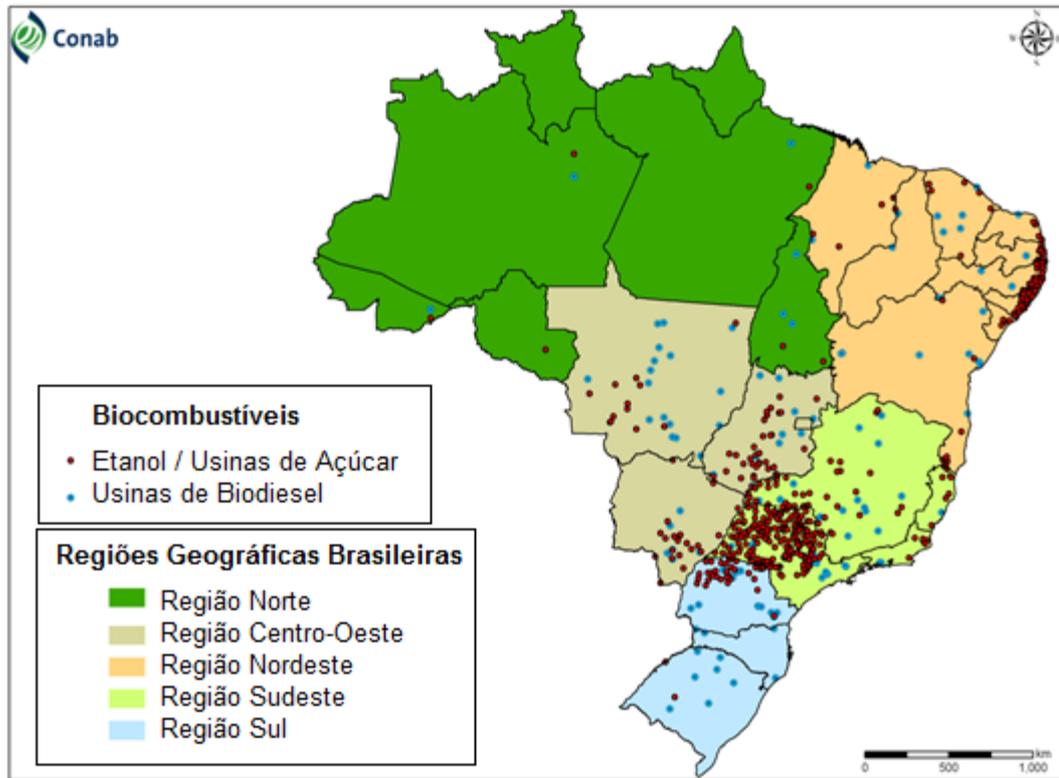
Segundo Rosa (2005, p.81), geotecnologias, também conhecidas como geoprocessamento, são o conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e oferta de informações com referência geográficas. Dentre as geotecnologias existentes, destaca-se a cartografia digital, o sensoriamento remoto, o sistema de posicionamento global (GPS) e Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Portanto, o uso de geotecnologias é uma ferramenta poderosa e vantajosa especialmente por explorar as informações disponíveis e extrair os dados de interesse, interpretando-os com eficiência e redução de tempo e custos (COSTA, 2005, p.157).

Segundo Fitz (2008, p.24) “pode-se considerar o geoprocessamento como uma tecnologia, ou mesmo um conjunto de tecnologias, que possibilita a manipulação, a análise, a simulação de modelagens e a visualização de dados georreferenciados”. Tal tecnologia é considerada por Câmara, Davis e Monteiro (2001) como “uma tecnologia interdisciplinar, que permite a convergência de diferentes disciplinas científicas para o estudo de fenômenos ambientais e urbanos”.

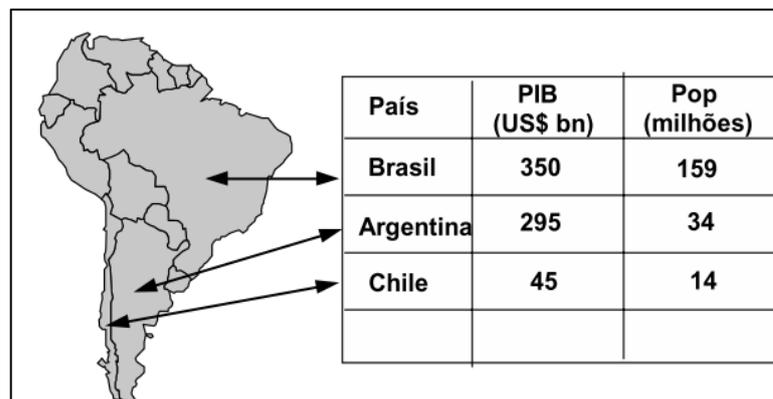
Geoprocessamento, conforme Nascimento (2009, p.58), é uma área do conhecimento onde diversos tipos de informações geográficas são processadas por meio de técnicas matemáticas e computacionais. Lima (2011, p.14) define que esse conjunto de técnicas manipulam bases analógicas e digitais para a elaboração de mapas-base digitais em programas especialistas. É importante também considerar os diferentes tipos de dados utilizados no geoprocessamento (CAMÂMARA; DAVIS; MEDEIROS, 2001):

➤ Dados temáticos: são dados que descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica qualitativamente. Esse tipo de dado pode ser obtido por levantamento em campo ou inseridos no sistema por digitalização ou por classificação de imagens (Figura 14).



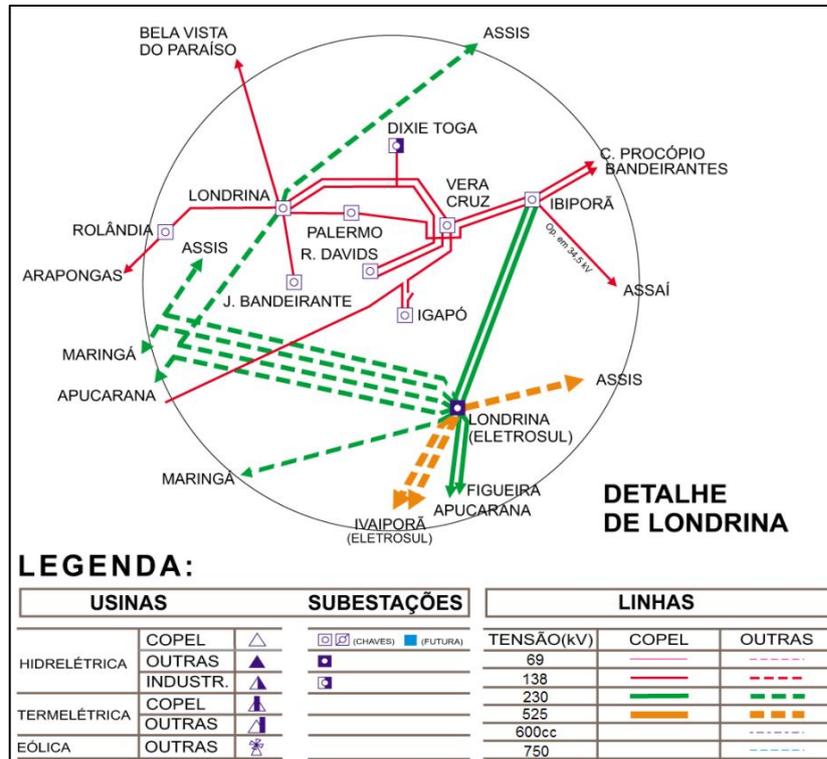
**Figura 14 – Unidades Produtoras de álcool e biodiesel.**  
**Fonte: Adaptado de CONAB (2005).**

➤ Dados cadastrais: cada um dos seus elementos é um objeto geográfico possuindo atributos que podem estar associados a várias representações geográficas, como o mapa da Figura 15. Outro exemplo de dados cadastrais são os lotes de uma cidade.



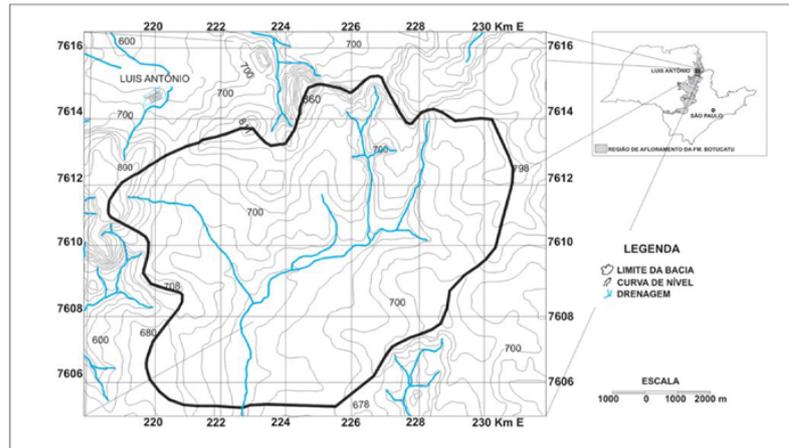
**Figura 15 - Exemplo de dado cadastral.**  
**Fonte: Câmara, Davis e Medeiros (2001, p.13).**

➤ Redes: são dados que estão associados a serviços de utilidade pública, como água, luz (Figura 16) e telefone; a rede de drenagem (como as bacias hidrográficas) e rodovias.



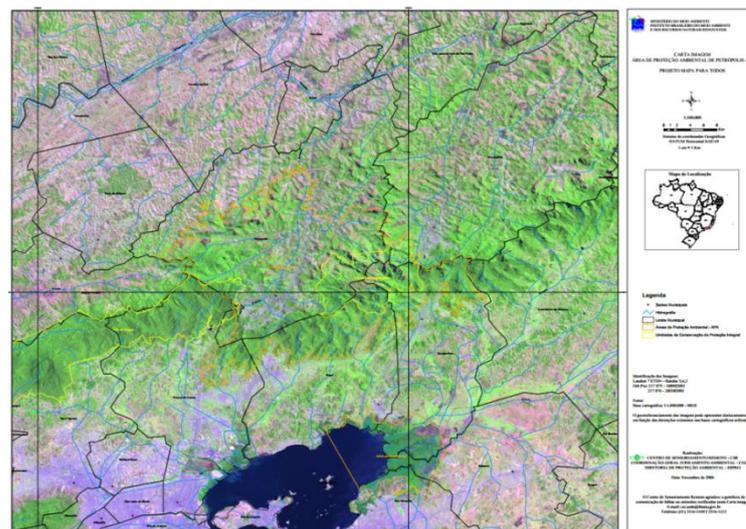
**Figura 16 – Mapa Geométrico do Paraná: Detalhe em Londrina.**  
**Fonte: COPEL (2012).**

➤ Modelos Numéricos de Terreno (MNT): usado para denotar quantitativamente uma grandeza de variação contínua no espaço. Esse tipo de dado é normalmente associado à altimetria (Figura 17), mas também pode modelar unidades geológicas, como teor de minerais ou aeromagnetismo do solo. Pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real por meio de conjuntos de pontos de localização (x,y), com características denotadas em um terceiro eixo, como por exemplo o eixo z para altimetria.



**Figura 17 - Exemplo de MNT: curvas de nível.**  
**Fonte: Zuquette e Palma (2006, p. 82).**

➤ **Imagens:** são obtidas por satélites, fotografias aéreas ou “scanners” aerotransportados (Figura 18). As imagens representam uma captura direta da informação espacial. São armazenadas como matrizes e cada elemento (o “pixel”) tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre. Para que os objetos contidos na imagem sejam identificados são necessárias técnicas de interpretação de imagens e classificação.



**Figura 18 - Imagem do satélite LANDSAT 7.**  
**Fonte: SISCOM, 2006.**

O uso de imagens de sensoriamento por meio da aplicação das ferramentas de geoprocessamento subsidia estudos como: Mapeamento Temático, Diagnóstico Ambiental, Avaliação de Impacto Ambiental, Ordenamento Territorial e os Prognósticos Ambientais. A execução do geoprocessamento é viabilizada por meio da utilização de ferramentas

computacionais, denominadas de Sistema de Informações Geográficas - SIG (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001; AGUIAR, 2005, p.32).

### 3.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG’S

O uso do SIG permite realizar a aquisição e manipulação de dados georreferenciados de acordo com o interesse do usuário, bem como a análise e representação desses e o gerenciamento do banco de dados (FITZ, 2008, p. 80). Os dados trabalhados em um SIG devem ser georreferenciados, isto é, devem estar associados a um sistema de coordenadas, e se subdividem em dois grandes grupos: vetorial ou matricial (DAVIS e ROCHA, 2012).

O formato vetorial consiste em um mapa composto de pontos, linhas e polígonos, representados por um conjunto de coordenadas métricas (planas) ou geográficas. Já no formato matricial (ou raster), há uma matriz de células, denominadas *pixel*. Essa é representada por conjunto de coordenadas que indicam linhas e colunas (COSTA, 2005, p.100).

A geotecnologia SIG possibilita a avaliação integrada de um grande número de variáveis de forma simples, como é o caso dos estudos de fragilidade ambiental (Spörl, op.cit.).

Um dos procedimentos mais importantes relacionados à funcionalidade do SIG é quanto à execução de sobreposição de camadas de dados espaciais (*overlay mapping*). Normalmente, os SIGs separam os dados georreferenciados (em arquivo raster ou vetorial), em camadas (*layers*) que podem ser facilmente sobrepostas (FITZ, 2008, p.85).

Segundo Câmara, Davis e Monteiro (2001, p.42), há pelo menos três grandes maneiras de usar o SIG: como ferramenta para produzir mapas, como suporte para análise de fenômenos e como banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial. Têm-se como exemplos de SIG os desenvolvidos pela Esri (ArcGis), pela Clark University (Idrisi), e o que foi utilizado neste trabalho, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, INPE (SPRING).

### 3.3.1 SPRING

O SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) é um SIG com funções de processamento de imagens, análise espacial, consulta a banco de dados espaciais e modelagem numérica de terreno (BINDA; MASCARELLO; SILVA, 2009, p.79).

O SPRING opera como um banco de dados, dando suporte a grande volume de dados, e administra tanto dados vetoriais como dados matriciais. O sistema é composto por três módulos: IMPIMA, SPRING, SCARTA.

Segundo Câmara, Davis e Monteiro (2001, p.102), o SPRING é o módulo principal de entrada, manipulação e transformação de dados geográficos, e realiza funções quanto à criação e manipulação do banco de dados, processamento digital de imagens, MNT, e análise geográfica de dados.

O IMPIMA executa a importação e conversão de formatos de imagens digitais de satélites (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001, p.102).

O SCARTA é o editor de produtos cartográficos como mapas e cartas, e também serve para gerar arquivos para impressão a partir dos resultados obtidos no SPRING, permitindo manipular textos, símbolos, legendas, linhas quadros e grades em coordenadas planas ou geográficas (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001, p.102).

O SPRING possui uma área, denominada LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), classificada como a interface por linguagem de programação. Essa interface tem o objetivo de prover um ambiente flexível e aberto para implementação de funções que não estão disponíveis nos menus do programa.

### 3.4 SENSORIAMENTO REMOTO

O termo Sensoriamento Remoto (SR) apareceu pela primeira vez na literatura científica em 1960 e significava a obtenção de informações sem contato físico com os objetos (NOVO, 2008, p. 6).

Nas décadas de 1970 e 1980, o SR estava relacionado ao mapeamento ambiental em escalas pequenas e médias, como os sistemas LANDSAT e SPOT. Em 1997, surgiram novos

satélites com resoluções melhores, ampliando o nível de detalhe obtido e o campo de aplicação desta geotecnologia (ANTUNES, 2011, p.17). Atualmente, SR é definido por:

“utilização conjunta de sensores, equipamentos para transmissão e processamento de dados, sendo estes equipamentos colocados em aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõe em suas mais diversas manifestações. (NOVO, 2008, p.4)”

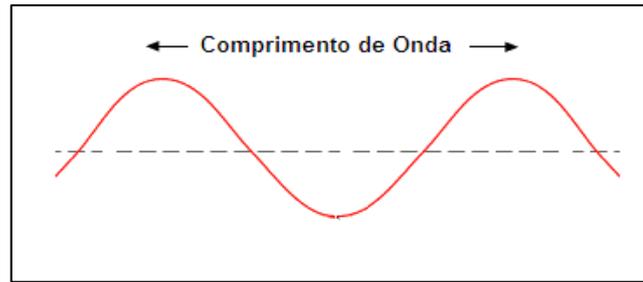
Existem diversas aplicações para as informações obtidas a partir do SR, como na área planejamento urbano, suporte ao setor agrícola (condições das culturas, erosão dos solos), ecológicas (identificação de regiões alagadas, solos florestas e águas continentais), florestais (como identificação de áreas que sofreram queimadas, controle do desflorestamento), cartográficas (mapeamentos topográficos e temáticos), hidrológicas (áreas afetadas por inundação), entre muitas outras (NOVO, 2008, p.7).

Uma vantagem da utilização do SR é a possibilidade de obter sistematicamente informações de áreas geográficas muito grandes, podendo ser utilizadas no estudo de diversos fenômenos naturais, como poluição por fontes não pontuais, ou mesmo processos de eutrofização, provendo a informação de forma eficiente e econômica (JENSEN, 2009, p.8).

Há uma pequena restrição quanto ao uso desse tipo tecnologia, e está relacionada à quantidade de dados de SR disponível para os estudos, por exemplo, a frequência de aquisição de dados cujas imagens devem ser livres de coberturas de nuvens (BARBOSA, 2007, p.31).

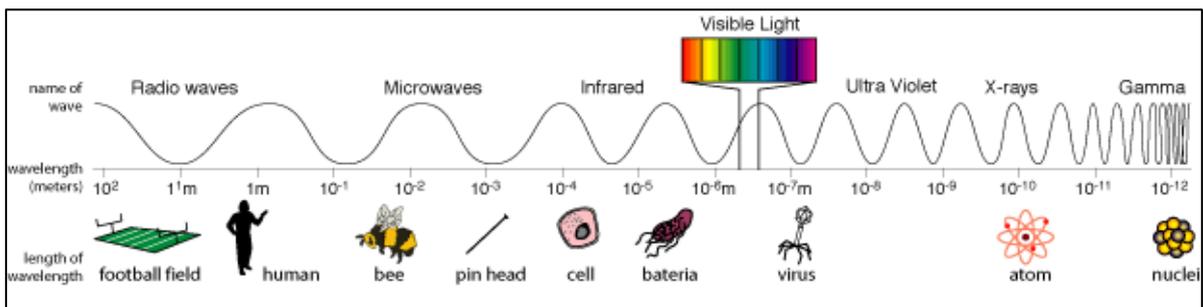
As atividades que permitem obter informações dos objetos da superfície terrestre envolvem a detecção, aquisição e análise das informações da energia eletromagnética que é emitida ou refletida pelos próprios objetos terrestres e registradas por sensoriamento remoto. Essa energia emitida é também denominada de Radiação Eletromagnética - REM (MORAES, 2002, p.7).

Segundo Moraes (2002, p.8), a REM não precisa de meio material para propagar-se e define-se como uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz - 300.000 km/s. Existem duas propriedades inerentes às ondas eletromagnéticas: o comprimento da onda (a distância entre dois pontos semelhantes (Figura 19)), e a frequência da REM (número de ondas que passa em um determinado ponto em um intervalo de tempo). O comprimento da onda e a frequência são inversamente proporcionais (JENSEN, 2009, p.41).



**Figura 19 - Comprimento de onda eletromagnética.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A REM pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência (MORAES, 2002, p.9), sendo esta disposição chamada de espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético representa todos os comprimentos de ondas conhecidos, desde raios gama até ondas de rádio (NOVO, 2008, p.16), como visualizado na Figura 20.



**Figura 20 - Espectro eletromagnético: diversos comprimentos de onda.**  
**Fonte: NASA (2010).**

Antunes (2011, p.20) explicita que o conhecimento da interação entre a dependência da janela espectral da atmosfera (regiões de alta percentagem de transmissão de REM) e a energia usada pelo sensoriamento remoto é requisito básico do sensoriamento, desde a construção do sensor para captação da radiação até a análise do comportamento espectral e reconhecimento dos alvos.

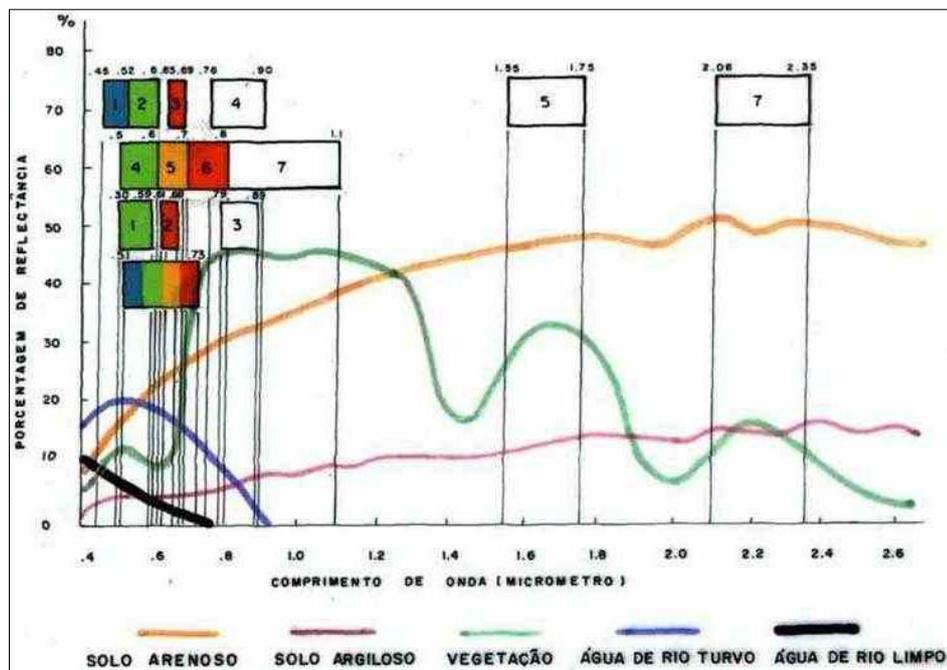
O processo de interação da REM e do alvo está intrinsicamente ligado à radiação incidente, absorvida, refletida e transmitida, sofrendo alterações de acordo com o material que a compõe (MORAES, 2002, p.15). Considera-se que cada objeto/alvo tem proporção de absorção, reflexão e transmissão diferentes, e isso possibilita a identificação dos objetos.

Vale ressaltar que para um mesmo objeto, as proporções de absorção, reflexão e transmissão são diferentes em relação ao comprimento da onda, assim, um objeto pode ser diferenciado em relação a outro em diferentes comprimentos de onda (ANTUNES, 2011,

p.21). “Dessa forma cada objeto tem um comportamento espectral distinto (SAUSEN, 2005, p.15)”.

O comportamento espectral de um objeto pode ser definido como o conjunto dos valores sucessivos da reflectância do objeto ao longo do espectro eletromagnético, conhecido também como assinatura espectral do objeto (MORAES, 2002, p.15).

Na Figura 21 estão representadas as assinaturas espectrais de alguns alvos específicos na proporção da radiação refletida ou emitida pelos sensores nos diversos comprimentos de onda. Segundo NOVO (2008, p.219), a assinatura espectral é a reflectância de um objeto medida em várias faixas espectrais adjacentes ao longo da região reflexiva do espectro.



**Figura 21- Respostas espectrais de alguns alvos e as respectivas bandas espectrais de alguns sensores.**

Fonte: Adaptado de Sausen (1999).

Captar e registrar a energia eletromagnética dos objetos da superfície terrestre é função dos sistemas sensores (ANTUNES, 2011, p.24). Moraes (2002, p.18) define sensores remotos como “dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética (em determinadas faixas do espectro eletromagnético) proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las”.

Um dos principais sensores está a bordo do satélite LANDSAT, desenvolvido pela NASA, cujas imagens podem ser adquiridas gratuitamente pelo site do INPE.

### 3.4.1 Processamento digital de imagens e análise dos dados de sensoriamento remoto

A partir do estudo de imagens de SR é possível analisar as alterações ambientais. O processamento digital das imagens de SR melhora o aspecto visual das feições estruturais auxiliando nas interpretações dos resultados obtidos pelo analista (ANTUNES, 2011, p.44).

“O processo de atribuir significado a um *pixel* em função das propriedades numéricas é chamado genericamente de classificação (NOVO, 2008, p.289)”. Assim, a identificação de determinados elementos na imagem é feita por associar cada um de seus *pixels* a uma classe previamente estabelecida (FITZ, 2008, p.129).

O primeiro procedimento para realizar a classificação de uma imagem é o processo de fotointerpretação ou interpretação da imagem, pois os elementos devem ser reconhecidos para a aplicação da classificação digital. Alguns elementos básicos de leitura que auxiliam no processo de identificação na imagem são: tonalidade e cor; forma e tamanho; padrão; textura; associação e sombra (ANTUNES, 2011, p.60).

A classificação supervisionada faz uso da capacidade interpretativa do técnico que a realiza, pois o analista terá de ter conhecimento prévio sobre a localização espacial de algumas amostras de interesse. Para realização de uma seleção adequada de amostras na imagem, deve-se considerar que as amostras sejam as mais homogêneas possíveis e suficientemente representativas quanto às categorias que forem classificadas (ANTUNES, 2011, p.68-69).

A escolha das áreas, ou polígonos representativos ou de treinamento da imagem, servirá como uma base de padronização, sendo sua precisão relacionada com a resolução espacial da imagem.

O método da classificação supervisionada por máxima-verossimilhança avalia a variância e a covariância das categorias de padrões de resposta espectral quando se classifica um *pixel* desconhecido, assumindo que a distribuição da nuvem de pontos que forma a categoria dos dados é a distribuição normal.

Segundo Meneses e Almeida (2012, p.202) esse método é um classificador mais eficiente, pois “as classes de treinamento são utilizadas para estimar a forma de distribuição dos *pixels* contidos em cada classe no espaço de todas as bandas, e também a localização do centro de cada classe”.

Após o processo da classificação, é necessário que seja feita a avaliação da acurácia do processo para verificar a acurácia da classificação da imagem em relação à realidade. O

método mais utilizado para representar a exatidão da classificação é a “comparação do mapa derivado da imagem com um mapa de referência a partir de uma matriz de erro, conhecida também como matriz de confusão” (NOVO, 2008, p.296).

Normalmente, a acurácia é expressa por meio de cálculos de alguns índices baseados nessas matrizes de erros. São calculados por essa matriz os erros de omissão e erros de inclusão (MENESES; ALMEIDA, 2012, p.207).

Os erros de omissão podem ser calculados pela razão entre os números de uma coluna que não estão na diagonal principal ( $x_{i+}$  da Figura 22), pela marginal da coluna ( $x_{+1}$  da Figura 22). No caso dos erros de inclusão, tem-se que ao invés de serem os valores da coluna, são os valores da mesma linha ( $x_{+i}$  da Figura 22) divididos pela marginal da linha ( $x_{1+}$  da Figura 22) (FERREIRA; DANTAS; MORAIS, 2007, p.888).

		J = colunas - DADOS DE REFERÊNCIA			
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>k</b>	Total - Linha <b><math>x_{i+}</math></b>
I = linhas CLASSIFICAÇÃO	<b>1</b>	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{1k}$	$x_{1+}$
	<b>2</b>	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{2k}$	$x_{2+}$
	<b>k</b>	$x_{k1}$	$x_{k2}$	$x_{kk}$	$x_{k+}$
	Total - coluna <b><math>x_{+j}</math></b>	$x_{+1}$	$x_{+2}$	$x_{+k}$	<b>X</b>

Figura 22 - Representação de matriz de erros (genérica).

Fonte: Adaptado de CONGALTON (1992, p.36).

Por exemplo, o valor resultante do cálculo de erro de omissão para a classe solo exposto indica a porcentagem de *pixels* que deveriam ser classificados como solo exposto e não foram. Já o índice de erro de inclusão da área urbana indica a porcentagem de *pixels* que foram indevidamente incluídos em outra categoria indicando a delimitação excessiva da categoria (FERREIRA; DANTAS; MORAIS, 2007, p.892).

Existem muitos indicadores para verificar a acurácia da classificação. Dentre eles está a exatidão global e a exatidão do produtor e usuário. A exatidão global resulta da divisão do total de pontos que foram corretamente classificados (valores de *pixels* da diagonal principal da matriz de erros) pelo número total de pontos (*pixels*) da validação (FERREIRA; DANTAS; MORAIS, 2007, p.888).

A exatidão do produtor é calculada pela divisão entre o número de *pixels* de uma classe pela somatória total da coluna que contém essa categoria, enquanto que a exatidão do

usuário determina o número de *pixels* que não foram incluídos na sua categoria, sendo calculado pela divisão do número de *pixels* de uma classe pela soma da linha que se encontra essa classe (SCHEER; ROCHA, 2009, p.6214).

Ainda pode ser usado outro parâmetro para determinar a acurácia da classificação: o índice Kappa, compreendido entre 0 (concordância nula) e 1 (concordância perfeita) (MENESES; ALMEIDA, 2012, p.208). Esse índice é um método muito utilizado para avaliar a concordância entre a verdade terrestre com o mapa temático (SOARES et al., 2009, p.8474). O índice Kappa encontra-se expresso na Eq.1.

$$K = (n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}) / (n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde k é o número de linhas da matriz de erros, n é o número total de observações realizadas (amostras),  $n_{ii}$  consiste no número de observações na linha i e coluna i,  $n_{i+}$  é o total das amostras da linha i e  $n_{+i}$  é o total das amostras da coluna i (FREITAS JUNIOR, 2011, p.91). É importante que o valor obtido seja superior a 0,70 no caso de mapas temáticos para indicar que a classificação é satisfatória (ANTUNES, 2011, p.76).

### 3.5 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Para realizar análises de múltiplos dados georreferenciados disponíveis e combiná-los, torna-se necessário o emprego de uma metodologia e de um conjunto de técnicas de inferência espacial, as quais consistem em ferramentas para integração de dados espaciais multifontes. Entre as técnicas pode-se citar o modelo booleano, que produz representações temáticas e o modelo *fuzzy*, que produz resultados numéricos (MUÑOZ, 2005, p.4).

Pode-se verificar a aplicação da regra booleana em um exemplo simples. Em estudo realizado por Ross (1994), a metodologia empregada foi realizar o cruzamento das variáveis ambientais e verificar, qual o conjunto de dados caracteriza uma das cinco classes de fragilidade ambiental. Ao analisar os resultados do trabalho de Ross (1994), verifica-se que se o conjunto de variáveis ambientais tiverem características de fragilidade “Muito baixa, Muito Baixa e Baixa”, essa área será classificada como sendo de pouca fragilidade ambiental, ou

seja, neste caso ao realizar a combinação da variável da declividade, de tipo de solo e tipo de cobertura vegetal, o resultado obtido será uma área de fragilidade ambiental muito baixa.

Assim, quando se aplica a lógica booleana na proposta de Ross (1994), o cruzamento das informações se dá por uso de operadores lógicos, ou seja, para que a classe de fragilidade ambiental seja muito baixa, é necessário que a área possua uma declividade menor ou igual a 6% E solo LVAd7 E culturas de ciclo longo.

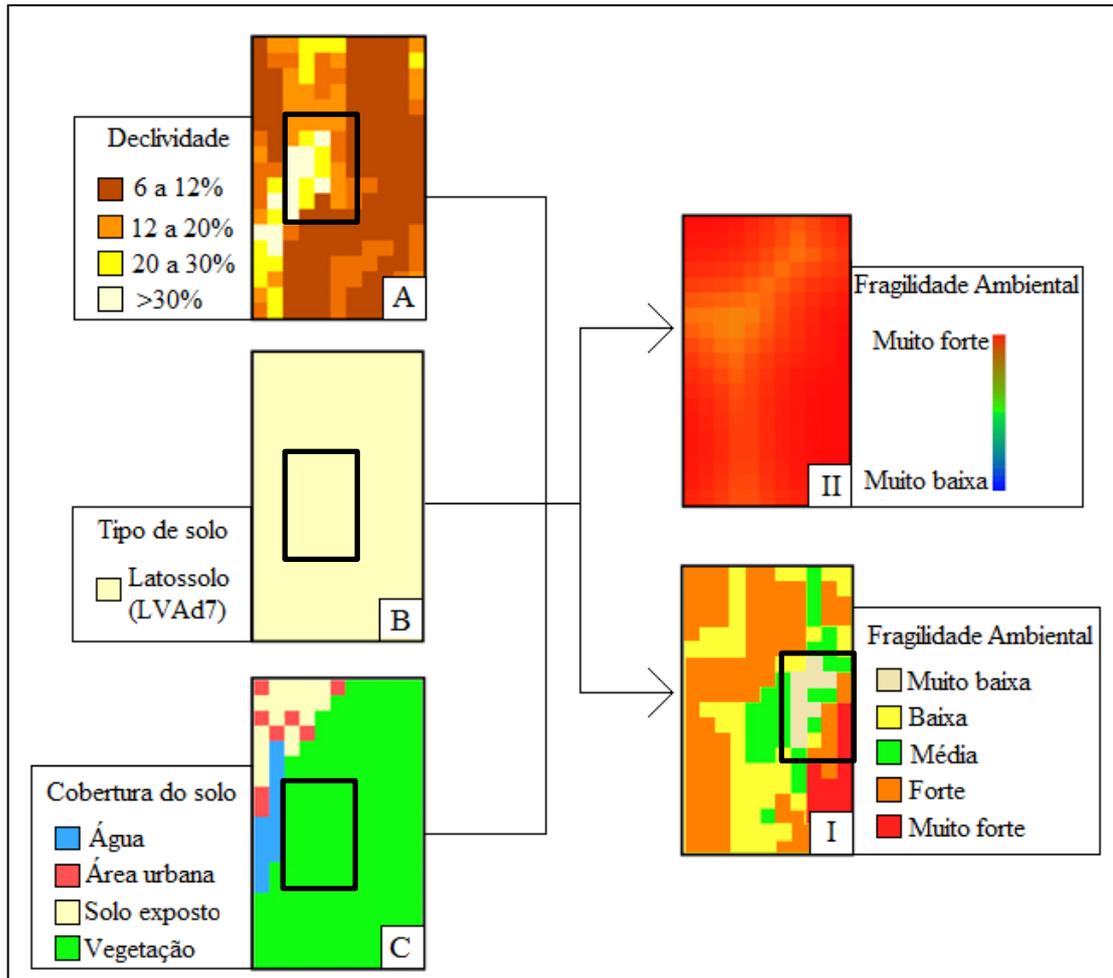
É por meio do uso do operador booleano “E” que as informações são cruzadas e conectadas. Conclui-se que, os três parâmetros ao ocorrerem simultaneamente em uma mesma área, resultarão em uma área de fragilidade muito baixa. Em estudos realizados por Marcelino (2004) com o uso do operador de intersecção “E” foram essenciais para realizar uma combinação lógica dos dados para análise da fragilidade ambiental cujas classes identificadas foram favorável (considerado como “1”) e não favorável (considerado “0”) a escorregamentos.

Os resultados da aplicação do método booleano apresentam respostas com limites rígidos que nem sempre retratam totalmente a realidade, uma vez que a lógica booleana estabelece se um conjunto de variáveis combinadas entre si pertencem a uma classe específica ou não.

É necessário que haja hipóteses intermediárias entre as classes, suavizando os resultados, criando zonas de transição (ANTUNES,2011,p.72). A metodologia que permite a caracterização das classes, mas não define limites precisos (ou “0” ou “1”) é a do conjunto *fuzzy*.

Ao retomar o exemplo de classe de fragilidade ambiental muito baixa em decorrência da declividade menor ou igual a 6% E solo LVAd7 E culturas de ciclo longo, verifica-se que os resultados obtidos pelo modelo *fuzzy* são suaves quando comparados ao resultado booleano.

Pode-se visualizar essa aplicação na Figura 23, onde as classes de declividade (A), o latossolo (B), e a classe vegetação (C - em verde), ao serem combinadas entre si por meio da média ponderada e com o uso da lógica booleana, resultam em uma classe de fragilidade baixa (I-destacada pelo retângulo). Para que esses resultados sejam suavizados, ou seja, não possuam um limite bem determinado entre classes diferentes, utilizou-se o modelo *fuzzy* cujo resultado está expresso na Figura 23 – II.



**Figura 23 - Dados de entrada (A- Declividade; B - Solo LVAd7; C – Cobertura do solo) e resultados para área de baixa fragilidade ambiental pelo modelo booleano (I) e *fuzzy* (II).**

**Fonte: Autoria Própria.**

De acordo com Câmara, Davis e Monteiro (2001), tal conjunto tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes. Como exemplo, no caso de tipos de solo, o modelo booleano representaria diferentes tipos de solo com limites rígidos, como na Figura 24(direita) e no modelo *fuzzy* o solo seria representado como na Figura 24 (esquerda).

A lógica difusa, ou também denominada lógica *fuzzy*, é uma extensão da lógica booleana que admite valores intermediários entre o falso (0) e o verdadeiro (1) (OLIVEIRA, 2010, p.56). A padronização através do comando *fuzzy* permite que haja a possibilidade de criar uma curva que represente a variação dos valores de cada fator em função da sua influência no estudo (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006, p.176).

Enquanto o método booleano atribui à classe de solo A ou B como no exemplo dado anteriormente, o método *fuzzy* permite suavizar o efeito desta classificação por uso de funções

de pertinências, determinando que os dados se encontrem em uma zona de transição do solo A e B (KOHAGURA, 2007, p.14).

Segundo Câmara, Davis e Monteiro (2001, p.94), estas funções pertinências são funções matemáticas cujos principais parâmetros são a variação do atributo ( $z$ ) dos elementos analisados (eixo das abscissas) e a faixa de valores possíveis para a função pertinência ( $F_p$  dado no eixo das ordenadas), representadas graficamente na Figura 24.

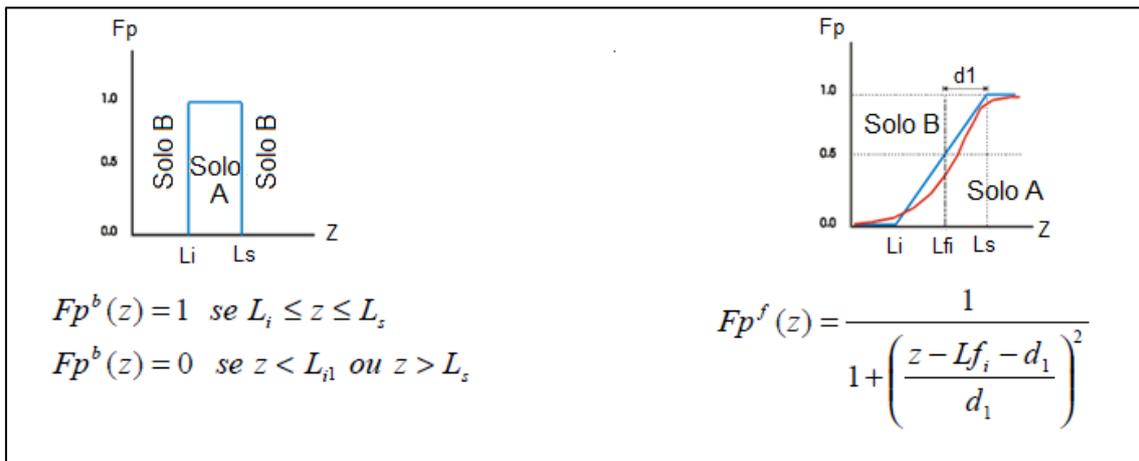


Figura 24 - Função de pertinência para o modelo booleano (à esquerda) e modelo *fuzzy* (à direita) e seus respectivos limites.

Fonte: Câmara, Davis e Monteiro (2001, p. 94).

Verifica-se que na Figura 24 (à esquerda), pelo modelo booleano, se o valor do elemento a ser analisado estiver entre os limites inferior ( $L_i$ ) e superior ( $L_s$ ), o solo será do tipo A, uma vez que o atributo ( $z$ ) do elemento assumirá valor 1. Caso isso não ocorra, o valor de  $z$  assumirá o valor 0, conforme as equações demonstradas.

Essa rigidez dos limites do modelo booleano não existe para o modelo *fuzzy* (com limites suavizados e contínuos). No modelo *fuzzy* (Figura 24 - à direita), a função encontra um valor entre 0 e 1 (fator de pertinência) caso o atributo  $z$  esteja entre  $L_i$  e  $L_s$ , destacando que o valor  $L_{fi}$  indica, a zona de transição (CÂMARA, DAVIS E MONTEIRO, 2001, P.94 ).

O fator de pertinência pode assumir qualquer valor entre 0 e 1, onde o 0 implica completa exclusão de um membro em determinado conjunto, e 1, representa completa pertinência (GOMIDE, GUDWIN, TANSCHKEIT, 1995, p.3).

As funções pertinências do modelo *fuzzy* podem ser de diversos tipos, como triangular, trapezoidal e gaussiana (PADILHA, 2001, p.21), sendo as de uso mais comum as funções de comportamento linear e senoidal (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Ao se fazer o uso da lógica booleana, enquadra-se uma parte da imagem somente a uma classe, enquanto que na teoria *fuzzy*, a mesma área pode pertencer a duas ou mais classes com graus de pertinência diferentes, sendo essa a questão de transição fundamental do sistema booleano para o *fuzzy* (FREITAS JUNIOR, 2011, p.25).

Mesmo que ao final de todo o processo de análise multicritério se tenha um produto booleano, é possível modificá-lo para um produto de lógica *fuzzy* e verificar o grau de associação de cada objeto a cada classe existente (FREITAS JUNIOR, 2011, p.25).

Segundo Donha, Souza e Sugamoto (2006,p.117), o resultado contínuo obtido pela lógica *fuzzy* é “claramente a melhor aproximação da realidade”, justificado por uma variável gradual (FREITAS JUNIOR, p.24), a qual não estabelece limites rígidos e não naturais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A determinação da fragilidade ambiental leva em consideração fatores que interferem diretamente no equilíbrio do meio a partir das características que determinam o grau de fragilidade ambiental.

Será utilizado para este estudo o conceito de fragilidade ambiental emergente proposto por Ross (1994), pois a área de estudo se trata de local com intensa modificação antrópica, sendo este um dos motivos para a avaliação da vulnerabilidade da área a escorregamentos.

Vale ressaltar que Ross (1994) classifica os cinco níveis de fragilidade ambiental em muito fraca (muito baixa), fraca (ou baixa), média, forte e muito forte. No presente trabalho as duas primeiras classes serão denominadas muito baixa e baixa.

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, foram necessárias algumas etapas intermediárias até se obter um mapa síntese indicativo das áreas mais suscetíveis aos movimentos de massa, ou seja, de maior fragilidade ambiental. Esses produtos intermediários foram produzidos por meio da criação de um banco de dados geográfico e de geoprocessamento com o uso do SPRING.

### 4.1 ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOGRÁFICO

O banco de dados geográfico que subsidiou o estudo da fragilidade ambiental dos municípios de Petrópolis e Teresópolis foi composto pelo mapa temático dos tipos de solo da região, por imagens de sensoriamento remoto e respectiva classificação dos tipos de cobertura do solo, por informações cadastrais (limites dos municípios) e imagens do sensor ASTER para gerar mapas de altimetria. Tais mapas serão descritos na seção de resultados e estarão dispostos nos anexos. O banco possui os limites de área de estudo definidos em: 44°38'26,26"O (X1) e 24°03'4,5"S (Y1), 41°52'57,3"O (X2) e 20°43'39,8"S (Y2).

Após a organização e manipulação desses dados por meio da comparação dos valores de fragilidade ambiental de cada uma das variáveis ambientais analisadas, deu-se início ao uso da Linguagem de Programação LEGAL no SPRING para a análise multicritérios.

A análise multicritérios foi feita pelo uso da lógica booleana e da lógica *fuzzy*, resultando na geração de mapas síntese da área de fragilidade ambiental. Para validação do resultado obtido, foram comparados os pontos da área de estudo onde de fato ocorreram os deslizamentos em 2011 com os resultados de fragilidade ambiental obtidos pelo desenvolvimento deste trabalho. Cada uma dessas etapas será detalhada nas seções seguintes.

#### 4.1.1 Dados do tipo de cobertura do solo

##### 4.1.1.1 Escolha e aquisição das imagens

A partir do Catálogo de Imagens CBERS/LANDSAT (INPE, 2012), disponível para *download* gratuito, foi possível escolher imagens multiespectrais a serem utilizadas na pesquisa para análise da cobertura do solo do satélite LANDSAT 5 TM .

realizar a classificação da imagem para identificação do tipo de cobertura do solo para a área de estudo, a partir das imagens do satélite LANDSAT 5 TM.

Foi realizado o *download* de duas imagens para garantir a total cobertura das áreas dos municípios em estudo, sendo essas correspondentes aos dias 04 de junho de 2009 e 06 de maio de 2010, pertencentes a órbita 217, pontos 76 e 75 respectivamente.

Justificam-se as datas escolhidas, pois, o desenvolvimento do trabalho prioriza analisar as características locais anteriormente ao deslizamento ocorrido em 12 de janeiro de 2011, para verificar se era possível saber de forma preditiva a elevada probabilidade de ocorrência de um deslizamento. Ressalta-se ainda que as imagens do local, obtidas em outras datas, que estavam disponíveis no catálogo para *download* se encontravam com elevada cobertura de nuvens e por este motivo não foram utilizadas. Ao finalizar esta etapa, iniciou-se a etapa de processamento dos dados adquiridos.

#### 4.1.1.2 Pré-processamento das imagens

##### 4.1.1.2.1 Recorte da área de estudo

As imagens adquiridas foram recortadas no programa IMPIMA 5.1.8 a fim de poupar esforço computacional, já que a área de estudo não abrangia toda a cena, e sim parte de cada uma delas.

##### 4.1.1.2.2 Registro das imagens e modificação do contraste

Foi realizado inicialmente o registro das imagens, ou seja, transformações polinomiais que fazem o vínculo entre as coordenadas do sistema de referência (geográfica ou de projeção) e as coordenadas da imagem (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001). Como referência para este procedimento foram utilizadas imagens já georreferenciadas, disponibilizadas pelo Projeto Mosaico Geocover (NASA, 2012).

A imagem georreferenciada e as imagens recortadas da área de estudo foram importadas no software SPRING v.5.1.8 em diferentes Planos de Informação (PIs), dentro da categoria Imagem.

Por meio das bandas da imagem do satélite LANDSAT 5, foi realizada a composição colorida (3B4G5R) com o objetivo de proporcionar uma melhor identificação dos pontos de controle que seriam adquiridos no processo de registro.

Como a imagem recortada ainda compreendia uma área muito maior que a necessária, foi realizado um novo recorte dos planos de informação que continham as imagens do satélite LANDSAT 5 utilizando os limites dos municípios (importados anteriormente na categoria Cadastral no mesmo banco de dados). Em sequência, iniciou-se o processo de registro das imagens propriamente dito.

Foram utilizados pontos de controle para realizar o georeferenciamento. Como as imagens do processo de registro possuíam datas diferentes, os pontos de controle escolhidos foram estruturas artificiais que não se alteraram rapidamente, como por exemplo, estradas e esquinas.

Foram escolhidos dez pontos de controle para cada uma das imagens, tanto para a órbita 75, quanto para a órbita 76, totalizando 20 pontos de controle. O procedimento de registro foi feito para os dois PIs (um para cada imagem), e posteriormente um terceiro PI foi criado com o propósito de agrupar as duas imagens registradas.

A união das imagens registradas em um terceiro PI foi feita com o uso da função “mosaico”, que tem por finalidade juntar duas (ou mais) imagens (georreferenciadas ou registradas) para gerar uma imagem maior, promovendo uma visão completa da cena de interesse (BAGLI, 2005, p.11). O procedimento do registro e do mosaico foi feito para as seis bandas das imagens originais.

Para que os objetos contidos na imagem fossem visualizados de forma mais nítida, realizou-se a aplicação do contraste nas bandas 3,4 e 5. A aplicação do contraste tem por objetivo modificar os níveis de cinza de uma imagem, de forma que algumas informações espectrais sejam destacadas (SANTOS; PELUZIO; SAITO, 2010, p.38), não aumentando a quantidade de informação, mas melhorando a sua percepção (ANTUNES, 2011, p.46).

#### 4.1.1.3 Processamento digital da imagem: Classificação supervisionada

A partir da imagem registrada foi realizada a classificação supervisionada. Para tornar mais fácil a identificação dos elementos presentes na paisagem durante a etapa de coleta de amostras (treinamento), foi utilizada a composição colorida 3B4G5R.

Dessa forma, foram estabelecidas classes temáticas para o processamento digital da classificação, sendo essas: água, área urbana, solo exposto e vegetação. A predefinição das classes para classificação supervisionada foi baseada nos alvos identificados na imagem registrada e as amostras da classificação foram obtidas com o auxílio de características como cor, textura, tonalidade e sombra.

Por ser uma classificação supervisionada, as classes foram representadas por no mínimo dez amostras (dez amostras no modo de aquisição e mais dez para teste), sendo todas elas escolhidas em regiões bem homogêneas para evitar erros de classificação. O método utilizado foi de máxima verossimilhança, por *pixel*, com limiar de 100%. O limiar indica “a porcentagem de *pixels* da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente a esta classe (SANTOS; PELUZIO; SAITO, 2010, p.103)”.

É importante relatar que antes da realização deste tipo de classificação foram feitas algumas tentativas de classificação por regiões utilizando o processo de segmentação (classificação não supervisionada) e uso do algoritmo Battacharrya, porém ao analisar os índices de acurácia, verificou-se que os valores obtidos foram insatisfatórios.

Finalizado o processo de classificação supervisionada, foi realizada a etapa de análise das amostras para averiguar a acurácia da classificação, a partir do cálculo e verificação de alguns índices, sendo esses de exatidão do produtor e usuário, exatidão global, os erros de omissão e inclusão, e o índice Kappa.

#### 4.1.2 Dados de Altimetria

Os dados de altimetria foram provenientes do produto GDEM (*Global Digital Elevation Mode*), elaborado a partir de imagens orbitais estereoscópicas do sensor Aster (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) de resolução espacial de 30 metros, produzidos em um consórcio entre o METI (Japão) e a NASA dos Estados Unidos (TOMAZONI et al., 2011, p.4339).

Após o *download* da imagem (LP DAAC, 2012), foi iniciado o processo de produção da carta hipsométrica. A partir da grade numérica do relevo, foi gerada a carta de declividade.

As grades podem ter duas formas de representação: em porcentagem e em graus. Para a análise da fragilidade ambiental somente a grade em porcentagem foi utilizada, seguindo a proposta de Ross (1994). Após o procedimento da geração do mapa de declividade, foi realizado o fatiamento, em conformidade com os valores mínimos e máximos da grade numérica gerada.

#### 4.1.3 Dados de Pedologia

A carta pedológica da área de estudo foi obtida por meio de *download* junto ao site do IBGE. O mapa se encontra na escala de 1:5.000.000 (AMBDATA, 2010).

Os solos constituintes dos municípios de Petrópolis e Teresópolis, são o Argissolo Vermelho Distrófico (PVd1), Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd1), Cambissolo Háplico Tb eutrófico (CXbe1), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd5 e LVAd7).

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

Após a elaboração do banco de dados geográfico foram determinados os níveis de fragilidade ambiental da área de estudo considerando os parâmetros que compunham o banco. O desenvolvimento dos mapas síntese foi realizado por meio do uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento a partir dos modelos *fuzzy* e booleano.

##### 4.2.1 Determinação dos parâmetros

Os parâmetros escolhidos para análise da fragilidade ambiental foram baseados na metodologia proposta no estudo de Ross (1994), sendo estes: o tipo de cobertura do solo, o tipo de solo e a declividade. Cada conjunto de variáveis ambientais, que compõe esses parâmetros, foi classificado de acordo com uma classe de fragilidade (CF), como pode ser visualizado no Quadro 6.

DECLIVIDADE (em %)*	CF	TIPOS DE SOLOS**	CF	COBERTURA DO SOLO***	CF
0 a 6	1	CXbd3	4	Água	1
6 a 12	2	CXbe1	4	Área Urbana	2
12 a 20	3	LVAd5	1		
20 a 30	4	LVAd7	1	Solo exposto	5
> 30	5	PVd1	5	Vegetação	2

**Quadro 6 - Parâmetros ambientais para estudo da fragilidade ambiental.**

**Fonte: Ross (1994)\*; Ross(1994)\*\* ; Rocha e Cabral (2011)\*\*\*.**

Os valores numéricos das classes de fragilidade ambiental representam: 1 – Muito Baixa, 2 – Baixa, 3 – Média, 4 – Forte, 5 – Muito Forte. Os valores para a fragilidade ambiental dos parâmetros declividade e tipo de solo foram baseados nos estudos de Ross (1994), enquanto os valores para o tipo de cobertura do solo foram análogos ao estudo

realizado por Rocha e Cabral (2011), exceto o valor estipulado para a classe “área urbana”, pois no trabalho desenvolvido por esses autores, as classes “área urbana” e “solo exposto” são classificados em um mesmo nível de fragilidade ambiental.

Entretanto, a classe “solo exposto” está muito mais vulnerável a sofrer processos erosivos do que a classe “área urbana”, e por esta razão ao verificar estudo realizado por Gonçalves et al. (2009), a classe “área urbana” teve seu nível de fragilidade alterado para 2 (baixa).

#### 4.2.2 Manipulação dos dados e Classes de fragilidade ambiental

Após a determinação dos níveis de fragilidade ambiental, foi realizado o cruzamento e manipulação dos dados com o uso de planilhas eletrônicas, cujos quadros estão no Anexo 1.

Foram comparados entre si primeiramente os valores de declividade e tipos de solo. Após isso, o valor resultante desse cruzamento de dados foi comparado com o valor da fragilidade ambiental do tipo de cobertura do solo, fixando-se uma classe por vez (SILVEIRA, 2005, p.3).

A comparação entre as variáveis foi feita por meio do cruzamento das informações de fragilidade ambiental, com o uso da média ponderada (Eq.2), onde  $r$  representa a fragilidade ambiental,  $w_{ij}$  o peso da classe “i” do plano de informação “j”, e  $y_i$  o peso do plano de informação “j” (CÂMARA ; DAVIS; MONTEIRO, 2001, p.99).

$$r = (\sum_{i=1}^n w_{ij} * y_i) / (\sum_{i=1}^n y_i) \quad (\text{Eq. 2})$$

Cada parâmetro estudado, responsável por um mapa de entrada, recebe um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese do estudo. Assim como cada mapa recebe um peso, cada classe (variável) presente no mapa também recebe (MOREIRA et al., 2001).

Com base nos estudos realizados por Marcelino (2004), Donha, Souza e Sugamoto (2006) e Silveira (2005), foram atribuídos pesos a cada um desses parâmetros ambientais em uma escala de 1 a 5, sendo 1 pouca interferência do parâmetro na ocorrência dos deslizamentos e 5 nível máximo de interferência do parâmetro nesses eventos.

Os pesos atribuídos neste trabalho foram 2, 3 e 5 para tipo de solo, cobertura do solo e declividade respectivamente.

Um esquema do cruzamento de dados realizado está disposto na Figura 25. Os níveis de fragilidade ambiental dos parâmetros de declividade e tipo de solo (I) são ponderados de acordo com um peso pré-estabelecido, resultando em um valor numérico (II). Esses valores são somados (III), e se realiza um novo cruzamento de dados com cada classe de cobertura do solo já ponderada (IV).

Os valores ( III E IV) são novamente somados para cada classe de cobertura do solo (Figura 25 - V), e posteriormente divididos pelo somatório dos pesos utilizados (igual a 10). O resultado final (VI) representa o conjunto de variáveis ambientais com seu respectivo nível de fragilidade.

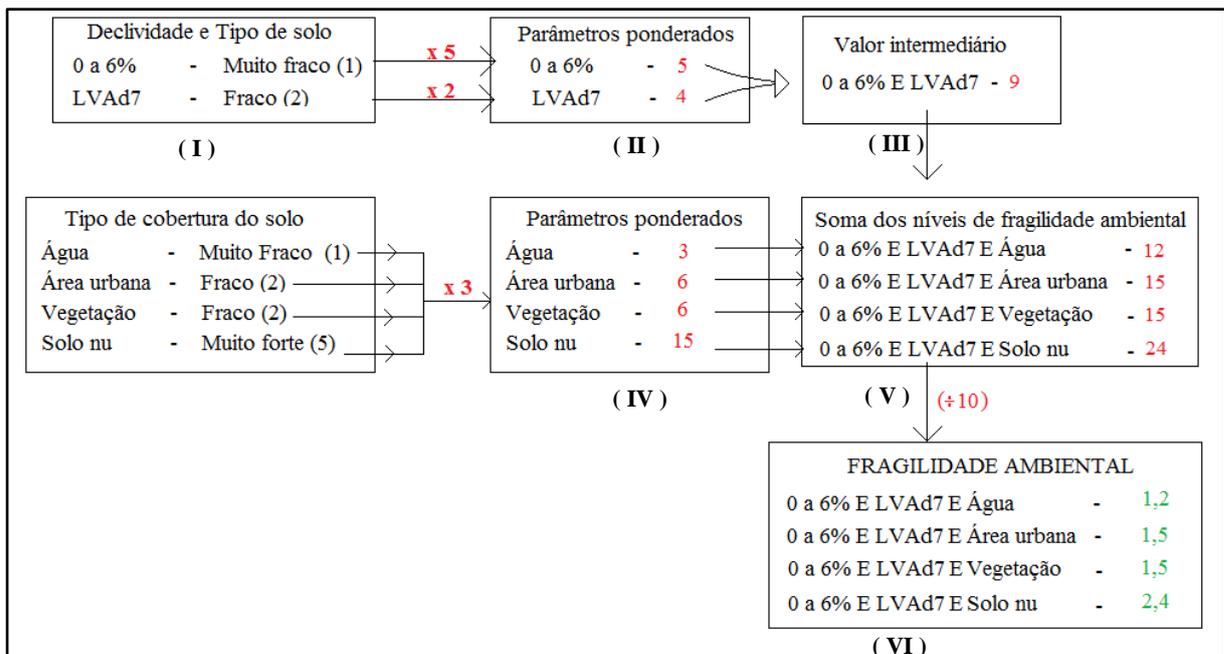


Figura 25 - Esquema representativo do cruzamento de dados de fragilidade ambiental.

No Anexo 1, os números entre parênteses do Quadro 8 representam os parâmetros da declividade e do tipo de solo ponderados, e os dados do quadro são as somas da linha e coluna dos parâmetros.

Neste mesmo anexo, os Quadros 9, 10, 11 e 12 mostram os valores de fragilidade ambiental, resultante do cruzamento do Quadro 8 com cada classe de cobertura do solo já ponderada.

O maior valor da ponderação, atribuído para a classe relevo, foi baseado nos estudos de Ross (1994) e também por Silveira (2005), onde o relevo foi considerado como parâmetro de maior influência em relação aos outros parâmetros.

Foi atribuído maior valor de ponderação para a classe de cobertura do solo em comparação ao parâmetro “tipo de solo”, considerando a seguinte premissa: se o solo for pouco profundo, mas a cobertura deste solo for adequada às características do solo existente, as chances de processos erosivos ocorrerem são atenuadas. Entretanto se o solo, indiferentemente do grau de seu desenvolvimento, sofrer uma intensa modificação antrópica, a área poderá ter uma maior probabilidade de ocorrência de deslizamento, logo o tipo de cobertura do solo tem maior interferência nos processos erosivos do que o tipo de solo em si.

Ressalta-se que as classes de fragilidade ambiental, determinadas pelo uso da média ponderada entre todos os parâmetros, foram 0 a 1 Muito Baixa; 1,1 a 2 – Baixa; 2,1 a 3 – Média; 3,1 a 4 – Forte; e, de 4,1 a 5 – Muito Forte. Os valores estabelecidos para as classes foram assim determinados para que o intervalo de classificação das classes fosse o mais parecido possível com o estipulado por Ross (1994). Os resultados da média ponderada são encontrados nos Quadros 9,10,11 e 12 do Anexo 1.

#### 4.2.3 Geração de Mapa Síntese de fragilidade ambiental

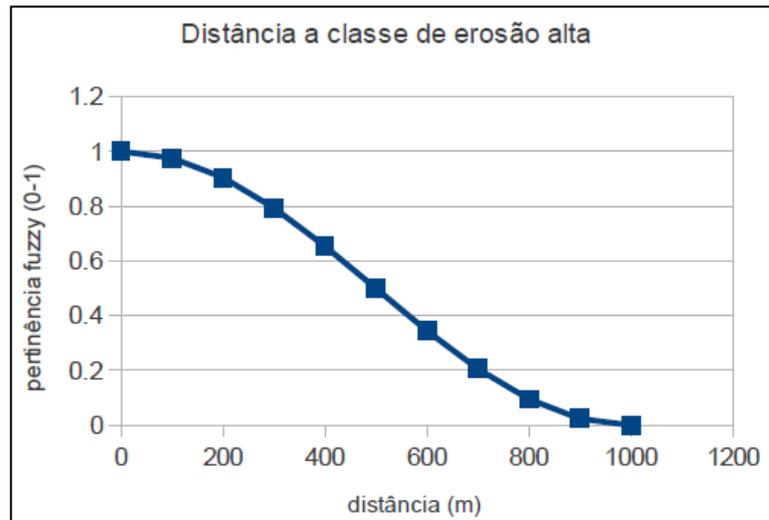
Realizado o cruzamento de dados e identificação das classes de fragilidade ambiental de cada conjunto de variáveis, as informações obtidas foram compiladas por meio da lógica booleana na interface LEGAL, desenvolvendo o mapa síntese com as áreas das cinco classes de fragilidade ambiental (baixa, muito baixa, média, forte, muito forte).

Após a elaboração do mapa síntese de fragilidade ambiental, foi feito um mapa de distâncias. O mapa de distâncias foi desenvolvido para identificar a área de influência espacial de cada classe de fragilidade ambiental. As distâncias utilizadas estão dispostas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Distância da área de influência da fragilidade ambiental**

Fragilidade Ambiental	Distância (m)
Muito baixa	200
Baixa	400
Média	600
Forte	800
Muito forte	1000

A partir dos mapas de distâncias elaborados, foi executada a *lógica fuzzy* utilizando a função de pertinência de comportamento senoidal, representado na Figura 26.



**Figura 26 - Comportamento da função senoidal aplicada para a classe de fragilidade alta.**

Fonte: BATISTA, L.F.A. (2012).

As linhas de comando das duas lógicas realizadas, do modelo booleano e do *fuzzy*, se encontram no Anexo 2 e Anexo 3 respectivamente, enquanto os mapas de fragilidade ambiental resultante dos modelos utilizados estão dispostos nos Anexo 4 e Anexo 5.

#### 4.3 ANÁLISE DAS ÁREAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL

Após a obtenção do mapa pelo modelo booleano, foi utilizada a ferramenta “medidas de classe” para verificar a área resultante de cada classe de fragilidade. Para o mapa obtido pela *lógica fuzzy*, foi realizada a análise de seu histograma para identificação da maior concentração de área dos níveis de fragilidade ambiental.

Para verificação dos resultados obtidos, realizou-se a comparação desses com uma imagem de sensoriamento remoto obtido pós-deslizamento. O objetivo foi identificar as áreas afetadas pelos eventos de deslizamentos ocorridos durante os anos de 2010 e 2011, e verificar se esses acontecimentos estavam inseridos nos limites das áreas de maior fragilidade ambiental. Porém, a resolução espacial de 30 metros da imagem do satélite LANDSAT 5 TM,

com livre acesso para *download* e manipulação, não permitiu a identificação das feições de deslizamentos.

Como alternativa, foram utilizadas imagens disponíveis no *software Google Earth*, em que puderam ser identificadas as cicatrizes dos deslizamentos ocorridos entre 2010 e 2011. A identificação das cicatrizes foi realizada por análise visual, ou seja, a cicatriz do deslizamento que não existia em 2010, foi visualmente percebida no ano de 2011.

Sabe-se que o aplicativo *Google Earth* possui limitações no que se refere a acurácia posicional, mas há trabalhos que avaliaram a qualidade cartográfica das imagens e mostraram sua viabilidade até a escala 1:5.000 com 90% de confiança (SILVA; NAZARENO, 2009, p. 1730). Como neste trabalho a escala não é tão grande e devido a dificuldade de obter dados sobre as coordenadas dos deslizamentos, optou-se por essa alternativa.

As imagens com as cicatrizes identificadas foram identificadas como pontos de ocorrência e puderam ser comparadas com o estudo realizado, pois, as imagens do *Google Earth* tinham o *datum* geocêntrico WGS-84 (GUIMARÃES, LANDAU, BARROS, 2011, p. 1186), assim como o projeto desenvolvido para este estudo.

É necessário que o *datum* das imagens seja igual, uma vez que o *datum* indica o ponto de referência a partir do qual a representação gráfica de paralelos e meridianos está relacionado (MARQUES, 2012, p.22). O uso de dois sistemas de referência diferentes prejudica os resultados do trabalho, pois as coordenadas de localização de um determinado local não seriam as mesmas, gerando erros de posicionamento (ICMBIO, 2010, p.1).

As coordenadas dos pontos de deslizamento identificados no *Google Earth* foram anotadas, e os pontos (Anexo 12), respectivos a essas coordenadas, foram inseridos no banco de dados do estudo.

Por meio da análise visual junto com a ferramenta “informação” do SPRING, foram identificadas as respectivas classes de fragilidade ambiental para os pontos de ocorrência de deslizamentos.

Sendo assim, foi avaliado se o uso da ferramenta computacional SIG, aliada ao estudo das características locais e a determinação das classes de fragilidade ambiental eram critérios suficientes para identificar pontos de alta fragilidade dos municípios de Petrópolis e Teresópolis.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS

Para realizar a análise da fragilidade ambiental da área de estudo, foram necessários alguns produtos intermediários de parâmetros ambientais como declividade, o tipo de solo e o tipo de cobertura do solo.

#### 5.1.1 Declividade

Para análise do parâmetro da declividade, foram feitos os mapas de altimetria (Anexo 6) e declividade (Anexo 7). As cotas altimétricas da área de estudo se encontram entre 5,0 e 2,278 metros.

As classes estabelecidas para o parâmetro de declividade por meio dos dados de altimetria, e suas respectivas áreas de abrangência estão dispostas na Tabela 3. As faixas de declividades utilizadas no trabalho foram as mesmas sugeridas por Ross (1994).

**Tabela 3 – Faixas de declividade e respectivas áreas de abrangência**

Declividade (em %)	Petrópolis (em km <sup>2</sup> )	Petrópolis (em %)	Teresópolis (em km <sup>2</sup> )	Teresópolis (em %)
0 a 6%	13,41	1,73	17,45	2,26
6 a 12%	35,03	4,52	43,27	5,62
12 a 20%	74,33	9,61	84,40	10,95
20 a 30%	128,01	16,54	132,85	17,24
> 30%	523,22	67,60	492,64	63,93
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>774,00</b>	<b>100</b>	<b>770,61</b>	<b>100</b>

Como observado na Tabela 3, a maior área de Petrópolis e Teresópolis possui declividade maior que 30%, o que já era esperado uma vez que os municípios se encontram na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

### 5.1.2 Tipos de solo

O mapa pedológico utilizado para avaliar o parâmetro tipo de solo, encontra-se no Anexo 8. Foram utilizadas informações do IBGE para ser elaborado. A Tabela 4 expressa a área (em km<sup>2</sup>) dos tipos de solos existentes nos municípios estudados.

**Tabela 4 – Tipos de solos para os municípios em estudo**

Tipos de solo	Petrópolis (em km <sup>2</sup> )	Petrópolis (em %)	Teresópolis (em km <sup>2</sup> )	Teresópolis (em %)
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd5)	0,94	0,12	0	0
Cambissolo Háplico Tb eutrófico (CXbe1)	771,71	99,70	173,78	22,55
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd7)	1,35	0,18	286,00	37,13
Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd3)	0	0	299,86	38,91
Argissolo Vermelho distrófico (PVd1)	0	0	10,86	1,41
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>774,00</b>	<b>100</b>	<b>770,61</b>	<b>100</b>

### 5.1.3 Tipos de cobertura do solo

Como já exposto, o nível de fragilidade ambiental também considera o tipo de cobertura do solo. Sendo assim, foi elaborada a classificação da imagem de sensoriamento remoto para a área de estudo, resultando no mapa de tipo de cobertura do solo encontrado no Anexo 9.

Para verificar se a classificação realizada está coerente com as informações da imagem, foram calculadas as métricas de exatidão do mapa temático gerado. No Quadro 7 encontra-se a matriz de confusão (matriz de erros) e alguns índices das amostras teste.

	MATRIZ DE ERROS DE CLASSIFICAÇÃO (coluna: dados de referência)					OUTROS ÍNDICES	
	Água	Área Urbana	Vegetação	Solo	$\Sigma$	Exatidão do produtor	Exatidão do usuário
Água	55 10,15%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	55	100%	100%
Área Urbana	0 0%	121 22,32%	0 0%	0 0%	121	98,37%	100%
Vegetação	0 0%	0 0%	224 41,33%	0 0,00%	224	100%	100%
Solo	0 0%	2 0%	0 0%	140 25,38%	142	100%	98,59%
$\Sigma$	55	123	224	140	542		

**Quadro 7 - Matriz de confusão (amostras de teste) e índices de exatidão do produtor e usuário.**

A exatidão do produtor reflete os erros de inclusão no processo de classificação, o que indica a probabilidade de uma amostra ser agrupada em uma determinada classe realmente pertencer à mesma classe, ou seja, apenas a classe “área urbana” teve uma pequena porcentagem de *pixels* que não foram agrupadas corretamente em uma única classe (ROVEDDER, 2007, p.18) devido a inerente heterogeneidade desta classe.

A exatidão do usuário indica a probabilidade de um *pixel* da imagem ser rotulado como de uma determinada classe, baseando-se na verdade terrestre dos dados de referência. Verifica-se que somente a classe solo teve *pixels* dos quais não foram classificados de acordo com a amostra. Os erros de omissão e inclusão estão representados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Cálculo de índices para avaliação de acurácia (em %)**

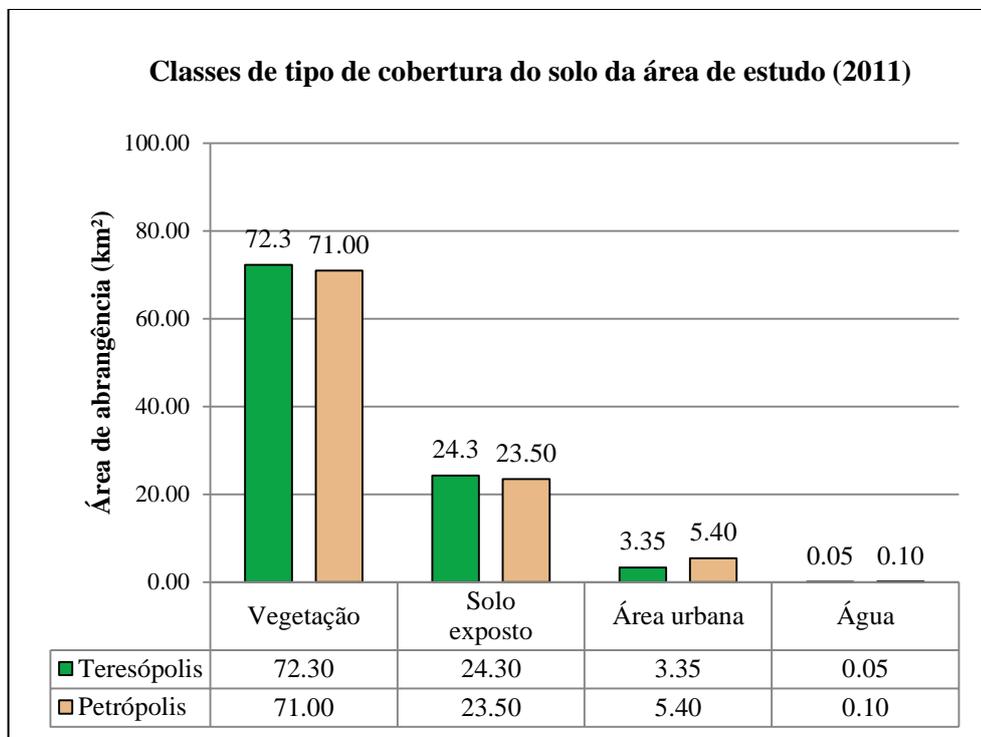
Classe	Erro de Inclusão	Erro de Omissão
Água	0,0	0,0
Área Urbana	0,0	1,6
Vegetação	0,0	0,0
Solo exposto	1,4	0,0

Ainda para verificar a qualidade da classificação, foram calculados outros índices de classificação: a exatidão global cujos valores foram 100% e 99,63% para as amostras de aquisição e teste respectivamente. Esses valores indicam uma boa classificação, uma vez que

expressa a quantidade de *pixels* classificados em relação ao mapa base (FREITAS, 2010, p.20).

Por fim, o Índice Kappa para a classificação da imagem realizada foi de 0,85. Segundo Araújo, Johann e Rocha (2009, p. 69), os valores superiores a 0,81 desse índice indicam uma qualidade de classificação excelente.

A partir dos índices de classificação calculados para cada município, verifica-se que o resultado da classificação foi satisfatório. Assim, as porcentagens das áreas de cada classe de cobertura do solo para Petrópolis e Teresópolis estão expostas no Gráfico 1, enquanto o mapa de tipo de cobertura do solo se encontra no Anexo 9.



**Gráfico 1 - Distribuição das áreas das classes de tipo de cobertura do solo para os municípios de Petrópolis e Teresópolis.**

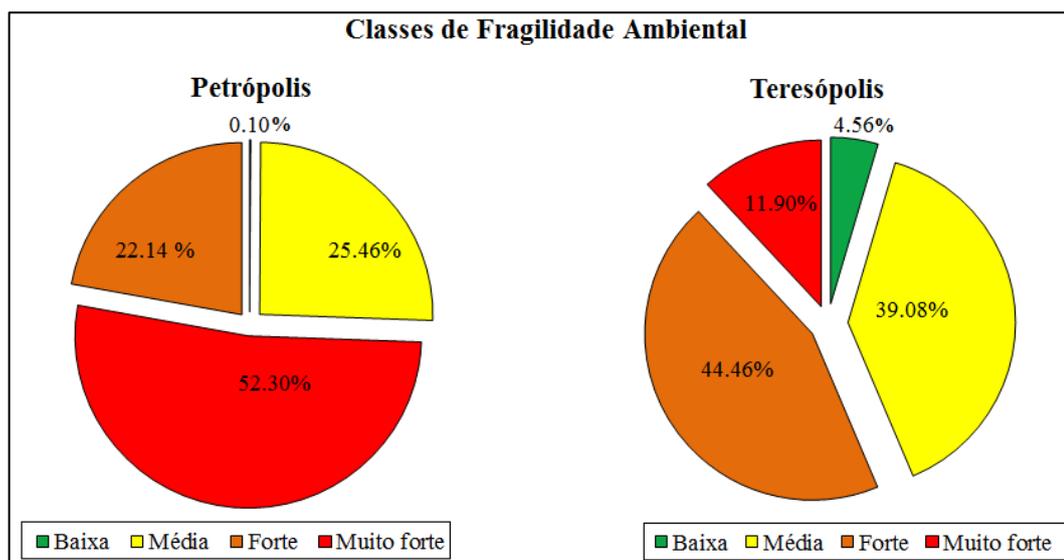
## 5.2 FRAGILIDADE AMBIENTAL

Com o uso dos dados georreferenciados preparados no banco de dados geográfico e com o cruzamento de suas informações (Anexo 1) foi realizado o estudo para identificação das áreas de maior fragilidade ambiental, a partir da aplicação das lógicas booleana e *fuzzy*.

### 5.2.1 Lógica booleana

Utilizou-se a lógica booleana (exposta no Anexo 2) para combinação dos mapas de pedologia, de cobertura do solo e de declividade. Esta lógica gerou o mapa de fragilidade ambiental da área de estudo encontrado no Anexo 4.

Os resultados de fragilidade ambiental obtidos foram expressos em termos da área de abrangência (em km<sup>2</sup>) e estão dispostos na Figura 27.



**Figura 27 - Classes de fragilidade ambiental para Petrópolis e Teresópolis.**

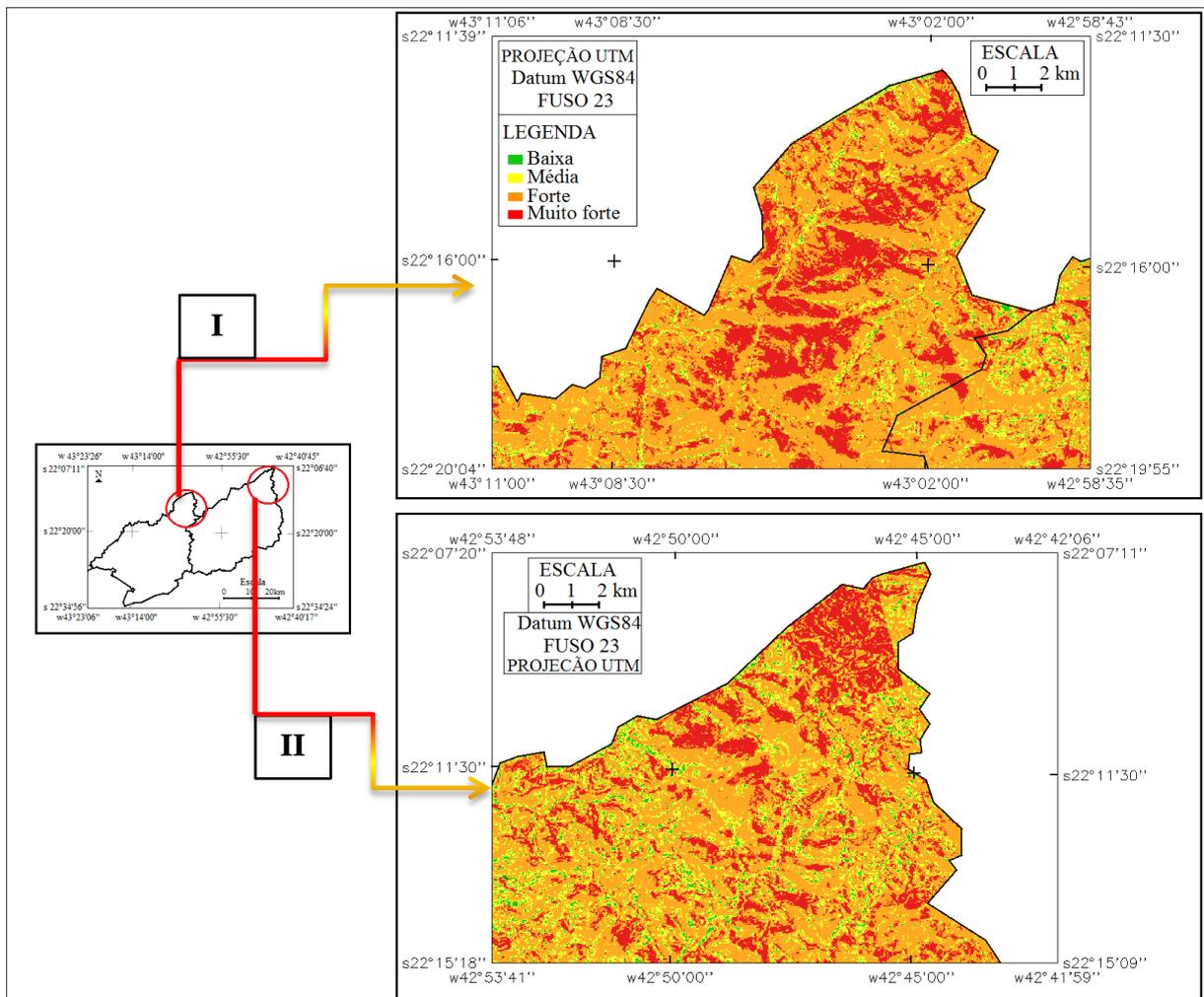
De acordo com o estudo realizado, a cidade de Petrópolis possui mais de 50% da sua área territorial enquadrada como de fragilidade muito forte. É importante ressaltar que as classes de fragilidade média e forte, juntas, quase totalizam o restante da área do município. Isso indica que apenas uma pequena parcela da área de Petrópolis (aproximadamente 0,10%) possui fragilidade ambiental baixa. A classe muito baixa de fragilidade ambiental não foi encontrada nesse município.

Analisando o mapa encontrado no Anexo 4, resultante da lógica booleana, verifica-se que Petrópolis possui uma grande área de fragilidade muito forte ao norte deste município (Figura 28 - I), justificando-se pelos parâmetros dessa área: há uma grande concentração de altas declividades e solo exposto.

Para o município de Teresópolis, existe uma área de 0,02 km<sup>2</sup> classificada como fragilidade muito baixa. Em termos de porcentagem essa representação não é significativa, e

por essa razão essa fração não está representada na Figura 27. A classe de maior representatividade de fragilidade ambiental nesse município é a classe forte (44,46%).

As áreas de Teresópolis com fragilidade muito forte são locais com altas declividades e solo exposto espalhado por todo município. No extremo norte do município (Figura 28 - II) se encontra uma região de fragilidade ambiental muito forte, consequência dos parâmetros tipo de solo e declividade (solo PVD1 e declividades > 30% respectivamente).



**Figura 28 - Áreas de fragilidade ambiental muito forte nos municípios de Petrópolis (I) e Teresópolis (II).**

Com o propósito de utilizar as áreas de maior fragilidade ambiental para auxiliar no planejamento urbano, e assim, seguir o objeto proposto, foi realizado o recorte dos mapas de fragilidade ambiental. Esses recortes são relativos às áreas urbanas e adjacências de até 500 metros (Anexo 10) e foi gerado a partir do cálculo do mapa de distância. As áreas relativas à fragilidade ambiental de cada município para este recorte estão na Tabela 6.

**Tabela 6 – Classes de fragilidade ambiental especificamente para área urbana**

Classe de Fragilidade Ambiental	Petrópolis (em km <sup>2</sup> )	Petrópolis (em %)	Teresópolis (em km <sup>2</sup> )	Teresópolis (em %)
Muito baixa	0	0	0	0
Baixa	5,73	1,91	9,99	3,44
Média	41,28	13,77	52,28	18,01
Forte	195,28	65,15	175,38	60,42
Muito forte	57,47	19,17	52,62	18,13
<b>ÁREA URBANA TOTAL</b>	<b>299,75</b>	<b>100</b>	<b>290,27</b>	<b>100</b>

Para a área urbana do município de Petrópolis, a classe de fragilidade ambiental mais representativa neste estudo foi a classe forte (65,14% da área urbana), seguida de muito forte (19,17%) e média (13,77%).

Verifica-se que as áreas de fragilidade ambiental baixa e média, são coincidentes com os locais onde estão as “manchas urbanas” no eixo Norte-Sul do município de Petrópolis, formando caminhos em amarelo (Figura 29 – AI contorno em preto). É possível verificar também que a maior ocorrência da fragilidade forte está nas adjacências da área urbana (Figura 29 – AII contornos em roxo).

O município de Teresópolis tem uma maior área de baixa fragilidade ambiental, e assim como o município de Petrópolis, a classe forte de fragilidade ambiental é predominante (60,42% da área urbana total). As classes de fragilidade muito forte e média quase se equivalem em termos de representatividade na área urbana, como visualizado na Tabela 6.

É importante destacar que, segundo este estudo, ao analisar a área urbana de Teresópolis propriamente dita, encontra-se na região sudoeste uma porção central classificada como de baixa e média fragilidade ambiental (Figura 29 – BI contornos em preto), enquanto seu entorno também é classificado como áreas de forte fragilidade e até muito forte (Figura 29 – BII contornos em roxo).

Apesar da simplicidade e fácil aplicação da lógica booleana, os limiares rígidos do resultado gerado nem sempre representam os fenômenos naturais de forma correta (RUHOFF et al., 2005, p.2358), como em algumas áreas do mapa de fragilidade ambiental obtido, onde área de fragilidade ambiental muito baixa e muito alta podem ser encontradas lado a lado.

É mais proveitoso que seja utilizado um resultado cuja diferença de classes de fragilidade seja suavizada, e que os limites sejam separados por uma faixa de transição,

transformando os dados obtidos para o espaço de referência entre 0 e 1, combinados numericamente, com o uso da lógica *fuzzy* (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

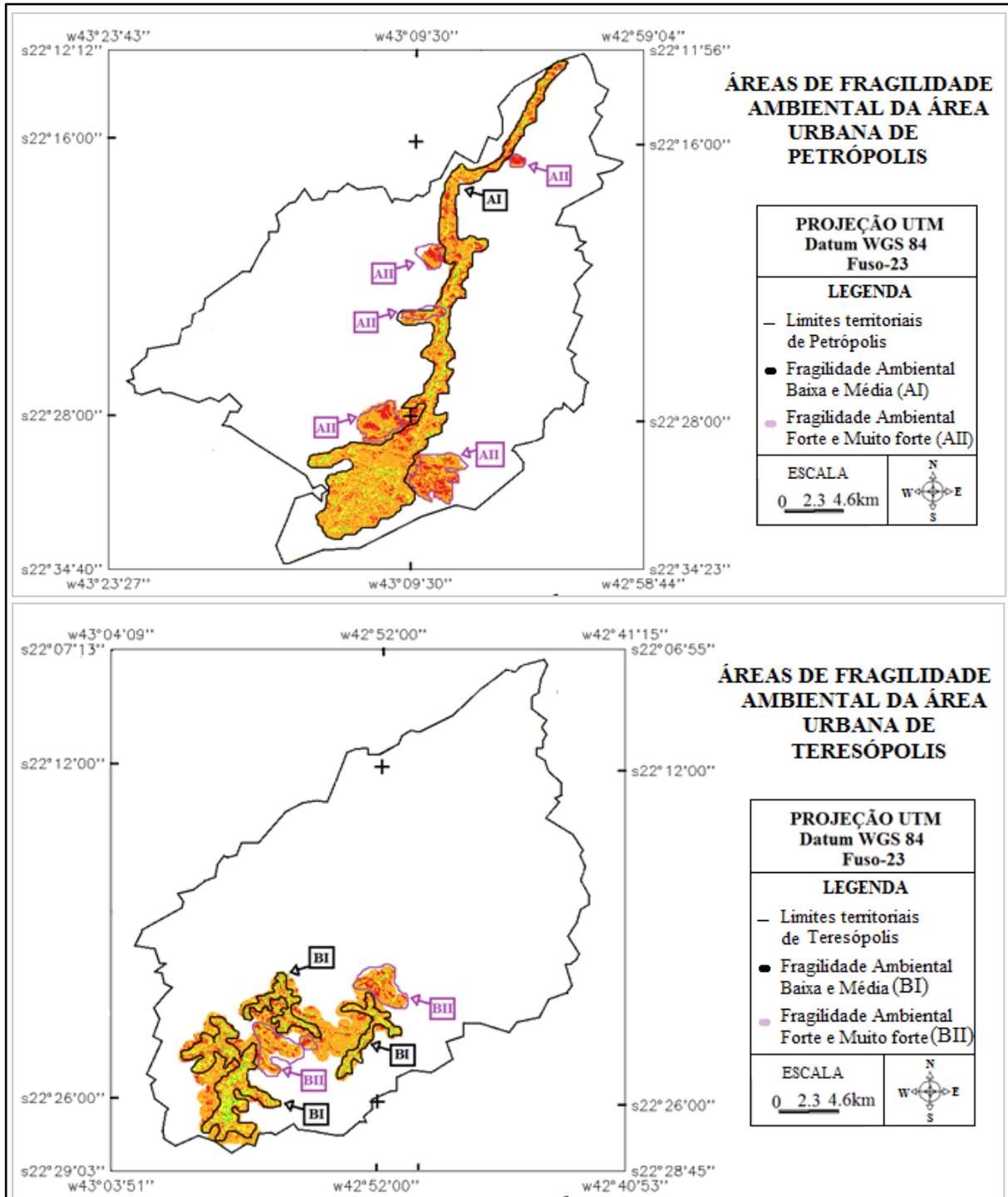


Figura 29 - Áreas de destaque de fragilidade ambiental de Petrópolis (acima) e Teresópolis (abaixo).

### 5.2.2 Lógica *fuzzy*

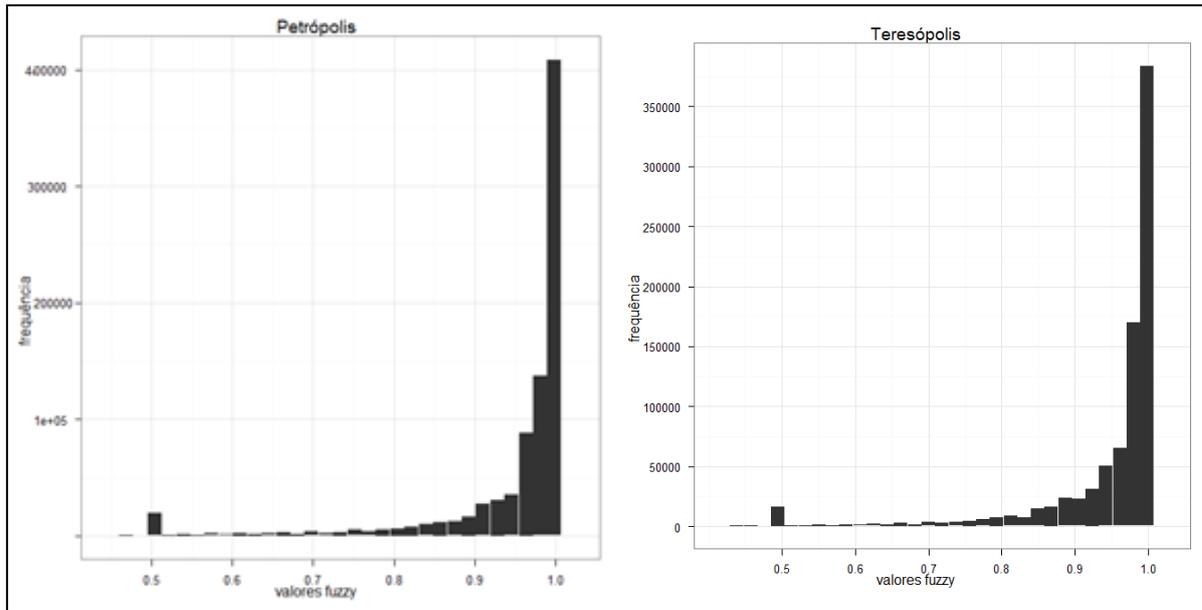
A lógica booleana resultou em áreas com limites rígidos para diferentes níveis de fragilidade ambiental. É preciso determinar a influência destas áreas de fragilidade no seu entorno, suavizando a quebra existente de uma determinada classe para outra, suavizando os resultados, por uso da lógica *fuzzy* (Anexo 3).

Partindo desse princípio, foi utilizada a lógica *fuzzy* para estabelecer zonas de transição entre as classes de fragilidade ambiental determinadas pela lógica booleana. Essas zonas de transição foram obtidas por meio do uso do mapa de distâncias a partir das áreas de influências de cada classe

As distâncias foram determinadas da seguinte forma: quanto maior o grau de fragilidade ambiental, maior a distância de sua influência territorial. A lógica *fuzzy* permitiu determinar as regiões de abrangência da fragilidade ambiental e qual o nível que predominará em uma determinada área. Os resultados obtidos podem ser verificados no Anexo 5.

Os resultados das áreas de fragilidade ambiental são suavizados quando se realiza a ponderação dos parâmetros e o uso da lógica *fuzzy*. Verifica-se que a lógica *fuzzy* resulta em áreas homogêneas de mesma classe de fragilidade ambiental, e não pontos isolados como é o caso da lógica booleana.

Observando a legenda do mapa de fragilidade ambiental obtido pela lógica *fuzzy* (Anexo 5), o fator, obtido pela aplicação da função pertinência e descrito na legenda, resultou em valores entre 0,44 e 1, considerando 0 como ocorrência de uma baixa fragilidade ambiental, e 1 sendo o valor máximo, ou seja, de fragilidade ambiental muito forte. A frequência dos valores em termos de área pelo seu respectivo fator de pertinência está disposta no histograma da Figura 30.



**Figura 30 - Histograma de classes de fragilidade ambiental determinada pela lógica *fuzzy* para os municípios de Petrópolis e Teresópolis.**

Os menores valores do fator de pertinência para os municípios, ou seja, níveis de fragilidade ambiental mais baixos (próximos a cor azul, com valores próximos a 0,5 - Anexo 5) estão dispostos em pequenas regiões na parte sudoeste de Petrópolis e Teresópolis, enquanto a parte urbana propriamente dita (Anexo 11), apresenta fatores de pertinência elevados, ou seja, bem próximos a 1, indicando a predominância de áreas de fragilidade ambiental forte ou muito forte.

### 5.3 LÓGICA BOOLEANA X LÓGICA *FUZZY*: OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS E VALIDAÇÃO DAS ÁREAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL.

O objetivo inicial proposto pelo trabalho foi identificar quais são as áreas de maior fragilidade ambiental e verificar qual dos dois modelos, booleano ou *fuzzy*, representam melhor a realidade ambiental da área de estudo.

Para isso, foi realizada uma comparação entre os pontos de deslizamentos ocorridos (entre 2010 a 2011) nos municípios de Petrópolis e Teresópolis e as áreas de fragilidade ambiental (para a área urbana recortada) que foram identificadas neste trabalho, com o propósito de verificar qual das duas abordagens consegue melhor identificar as áreas de maior fragilidade ambiental.

Dentre as regiões de ocorrência de deslizamento visualizadas nas imagens do *Google Earth*, 18 pontos na região urbana e proximidades (Anexo 12), foram escolhidos para validação dos mapas de área de fragilidade ambiental. As coordenadas geográficas desses 18 pontos foram utilizadas para inserção desses pontos no banco de dados do trabalho. As cicatrizes identificadas nas imagens se encontram no Anexo 13.

Por uso da sobreposição dos planos de informação (*overlay mapping*), foi possível obter as características de cada um dos 18 pontos conforme os parâmetros analisados (Tabela 7).

Desses 18 pontos, 7 pontos estão na classe urbana, 4 pontos são de solo exposto e 7 pontos são de vegetação. De acordo com a carta hipsométrica elaborada, aproximadamente 67% dos pontos de deslizamento possuem declividade maior que 20%. Quanto ao tipo de solo, os deslizamentos identificados ocorreram nos solos do tipo Latossolo e Cambissolo.

**Tabela 7 – Características dos pontos de deslizamentos ocorridos entre 2010 e 2011 para os municípios de Petrópolis e Teresópolis.**

ID	Tipo de Solo	Declividade	Tipo de Cobertura do solo
1	Cambissolo (CXBe1)	20% a 30%	Área urbana
2	Cambissolo (CXBe1)	> 30%	Solo exposto
3	Latossolo (LVAd7)	6% a 12%	Área urbana
4	Cambissolo (CXBe1)	20% a 30%	Área urbana
5	Cambissolo (CXBe1)	20% a 30%	Vegetação
6	Cambissolo (CXBe1)	20% a 30%	Vegetação
7	Cambissolo (CXBe1)	12% a 20%	Área urbana
8	Cambissolo (CXBe1)	> 30%	Área urbana
9	Latossolo (LVAd7)	12% a 20%	Área urbana
10	Cambissolo (CXBe1)	12% a 20%	Vegetação
11	Cambissolo (CXBe1)	20% a 30%	Área urbana
12	Cambissolo (CXBe1)	> 30%	Vegetação
13	Cambissolo (CXBe1)	> 30%	Solo exposto
14	Cambissolo (CXBe1)	6% a 12%	Vegetação
15	Latossolo (LVAd7)	> 30%	Solo exposto
16	Latossolo (LVAd7)	12% a 20%	Vegetação
17	Latossolo (LVAd7)	> 30%	Vegetação
18	Cambissolo (CXBe1)	> 30%	Solo exposto

Alguns desses pontos, como os pontos 1, 3, 4, 7, 8, 9 e 11 estão inseridos na área urbana, entretanto, outros pontos de deslizamento que não se encontram na área urbana podem afetar essa área diretamente, dependendo da magnitude do evento de deslizamento e do raio de influência desse fenômeno.

Por isso, após a caracterização dos pontos de deslizamentos, foi verificado qual o grau de fragilidade ambiental em que foram classificados esses pontos de deslizamento e a distância dos pontos de deslizamentos até as áreas urbanas. Na Tabela 8 estão indicadas as classes de fragilidade ambiental dos 18 pontos, pela lógica booleana, o fator de pertinência da lógica *fuzzy*, e a distância euclidiana entre os pontos de deslizamentos e área urbana.

**Tabela 8 – Resultado de fragilidade ambiental para os pontos de deslizamentos identificados e distância dos pontos de deslizamentos às áreas urbanas.**

ID	Classe*	Fator de pertinência*	Distância até região urbana (em m) e sentido
1	Média	0,994	-
2	Muito forte	1	450,83 (E)
3	Baixa	0,948	-
4	Forte	0,996	-
5	Forte	0,998	216,97 (E)
6	Forte	0,999	410,01 (NE)
7	Forte	0,993	-
8	Forte	0,996	-
9	Forte	0,977	-
10	Média	0,980	56,46 (S)
11	Forte	0,999	-
12	Forte	0,988	580,96 (NO)
13	Muito forte	0,999	486,81 (NO)
14	Média	0,982	150,40 (NO)
15	Muito forte	1	1381,70 (NE)
16	Baixa	0,855	609,12 (NE)
17	Forte	0,957	483,56 (SE)
18	Muito forte	1	4351,18 (NE)

\* referentes à fragilidade ambiental

Analisando os resultados da lógica booleana quanto às classes encontradas, verifica-se que dentre as 18 cicatrizes identificadas, nenhuma delas encontrou-se em áreas de risco muito baixo.

O menor nível de fragilidade ambiental (baixa) foi identificado para os pontos 3 e 16 (Figura 31 – C e Q). Isso pode ser justificado pelo conjunto declividade e tipo de solo cujas características não apresentam níveis de fragilidade tão elevados.

É importante verificar que, no caso do ponto 3 (Figura 31 – C), a declividade é baixa (6 a 12%) e o tipo de solo é bem estável. Porém, a região é classificada como área urbana, e mesmo que a fragilidade ambiental seja baixa, as consequências de qualquer deslizamento que venha ocorrer afetarão diretamente a população local.

Para os outros pontos localizados na área urbana, verifica-se que o ponto 1 é classificado como de fragilidade média (Figura 31– A). Todos os outros pontos (4, 7, 8, 9 e 11) estão em áreas de fragilidade ambiental forte (Figura 31 – D, G, H, I, L) o que é preocupante, pois as ocupações urbanas deveriam estar localizadas em áreas de muito baixa ou baixa fragilidade ambiental.

Nota-se que, os parâmetros de cobertura (solo exposto) e de declividade (maior que 30%) são iguais para os pontos 2, 13, 15 e 18, sendo classificados como de fragilidade muito forte (Figura 31 – B,N,P,S). O ponto 11 (Figura 31 – L) possui uma configuração diferente, pois está próximo ao limite da divisão territorial do município, que corresponde a área branca.

É possível afirmar por meio do estudo realizado que, se duas características de um determinado local forem de alto nível de fragilidade ambiental e ocorrerem forma combinada, a tendência de ocorrer um deslizamento também será elevada. Os pontos de deslizamento e as áreas de fragilidade ambiental resultantes da lógica booleana estão Figura 31.

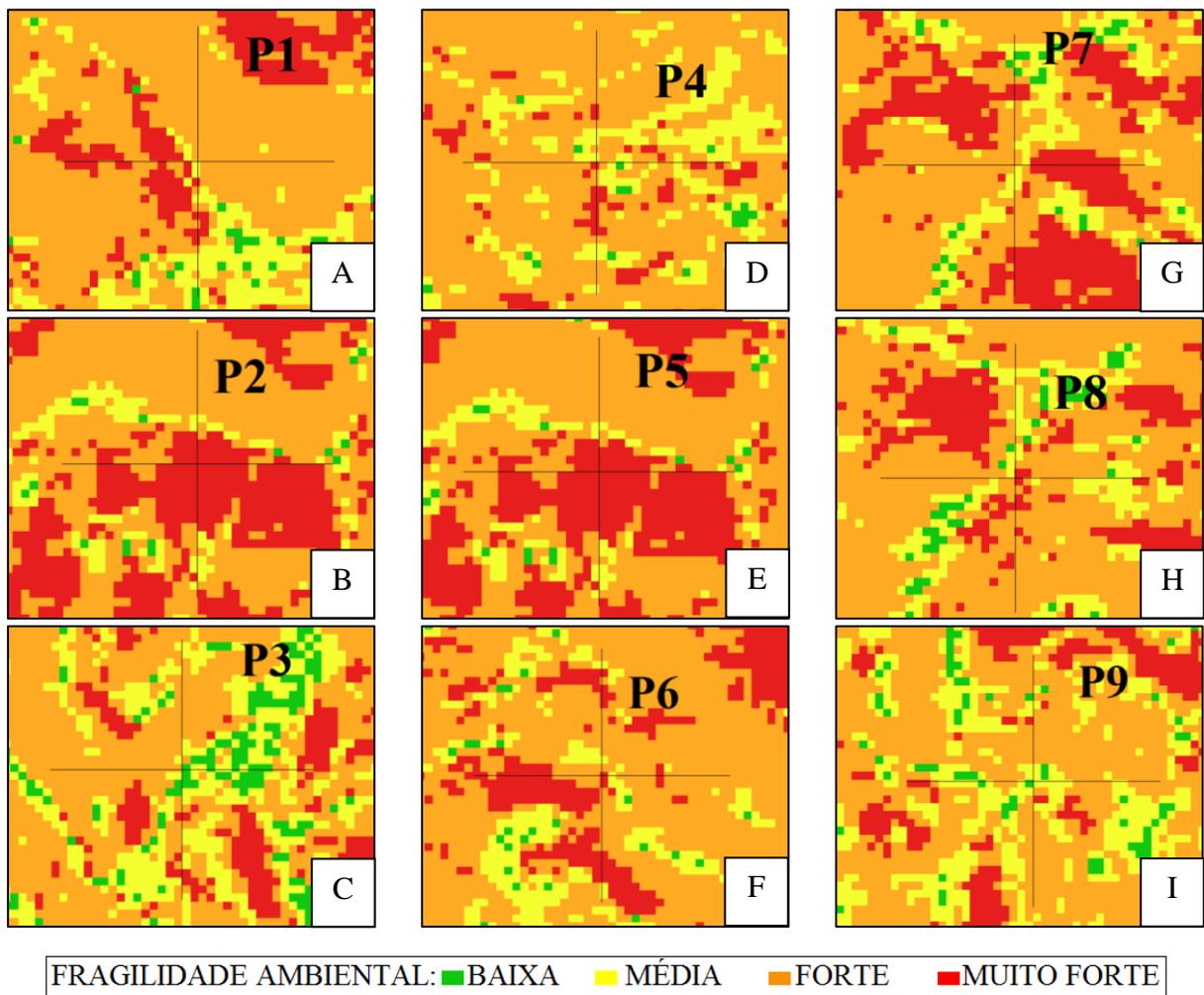
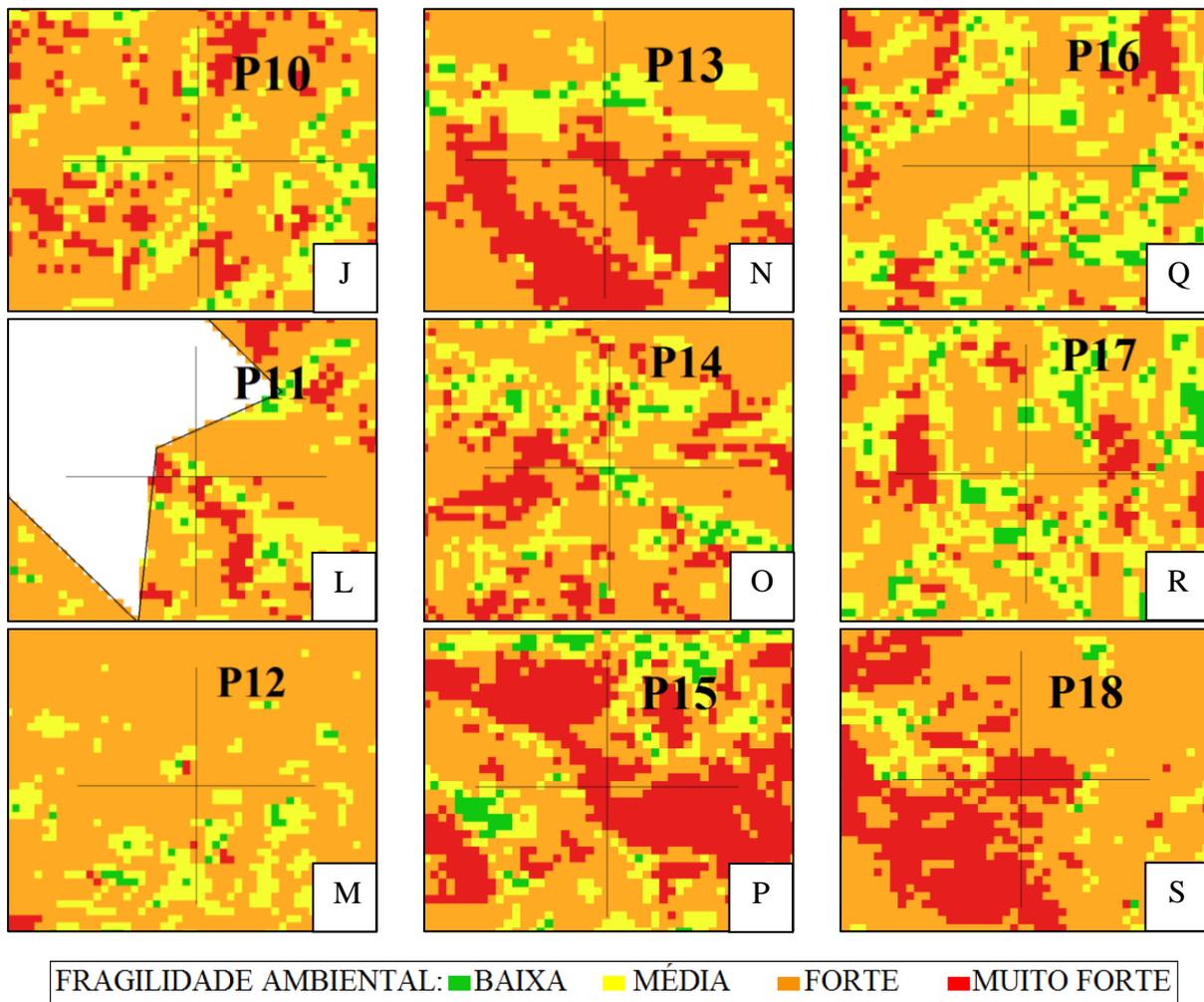


Figura 31 (Continua) - Pontos de deslizamento e áreas de fragilidade ambiental determinada pela lógica booleana.



**Figura 31 (Fim) - Pontos de deslizamento inseridos nas áreas de fragilidade ambiental determinada pela lógica booleana.**

Pela lógica *fuzzy*, verifica-se que, quanto maior o valor próximo a 1, maior a probabilidade de pertencer a classe de fragilidade muito forte, e quanto mais próximo de 0, maior probabilidade de pertencer a classe de fragilidade muito fraca.

Os valores da lógica *fuzzy* para os 18 pontos variam de 0,855 a 1 (Tabela 8), sendo que os pontos 2, 15 e 18 (Figura 32 – B, P e S) assumiram o valor máximo de pertinência, ou seja, todas as características possuem alto nível de fragilidade ambiental, e dentre todos os deslizamentos, esses pontos eram os que tinham a maior probabilidade de ocorrência de um evento deste tipo.

Os pontos de área urbana 1, 3, 4, 7, 8, 9 e 11 (Figura 32 – A, C, D, G, H, I e L), tiveram como fatores de pertinência, 0,994; 0,948; 0,996; 0,993; 0,996; 0,977 e 0,999 respectivamente, o que indica a proximidade à fragilidade ambiental muito forte (1). Para os pontos de cobertura com vegetação, os valores do fator de pertinência variaram entre 0,855

(combinação entre declividade de 12 a 20% e Latossolo) e 0,999 (combinação entre declividade de 20 a 30% e Cambissolo). Os pontos de deslizamento no mapa síntese resultante da lógica *fuzzy* podem ser vistos na Figura 32.

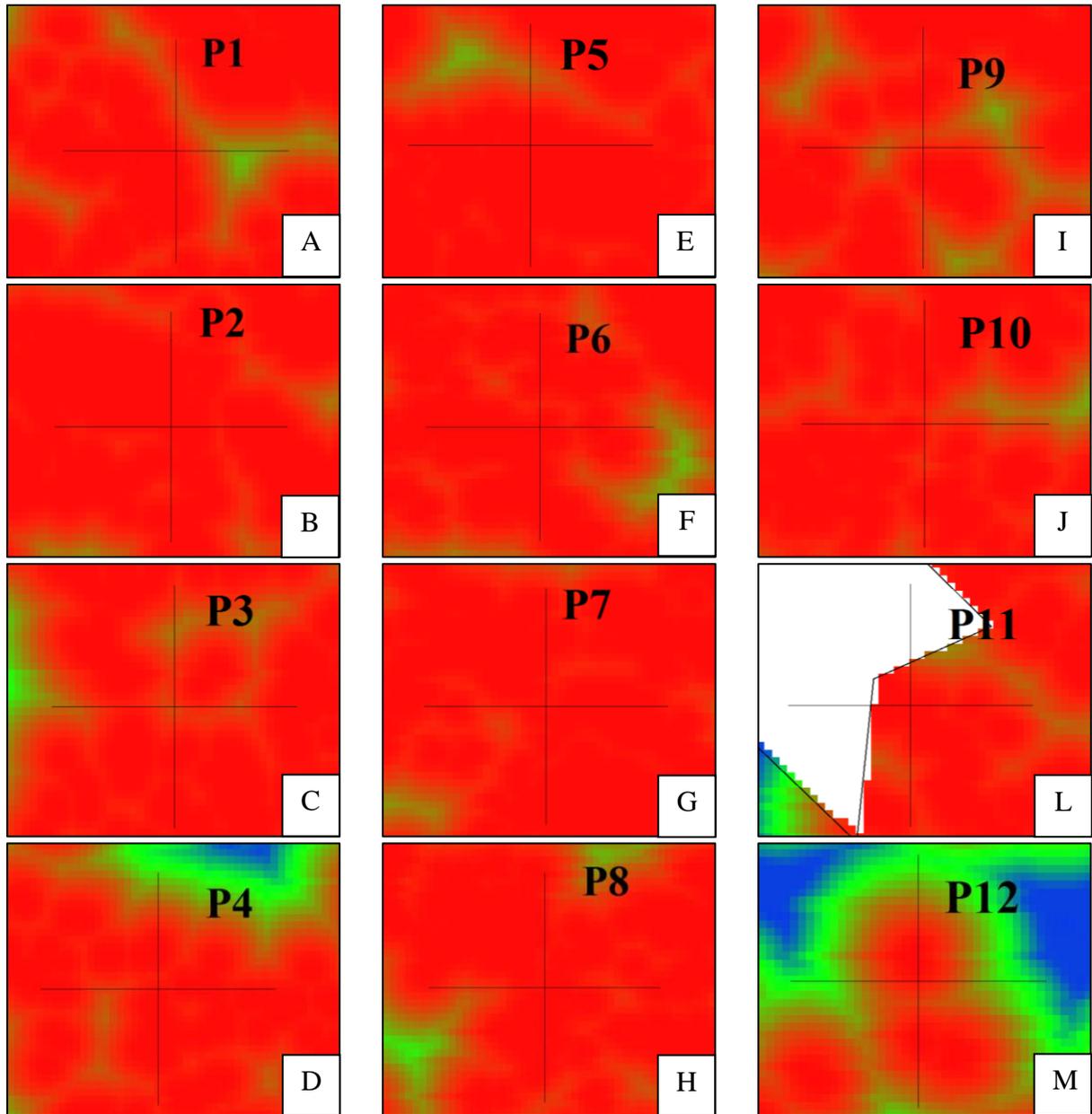
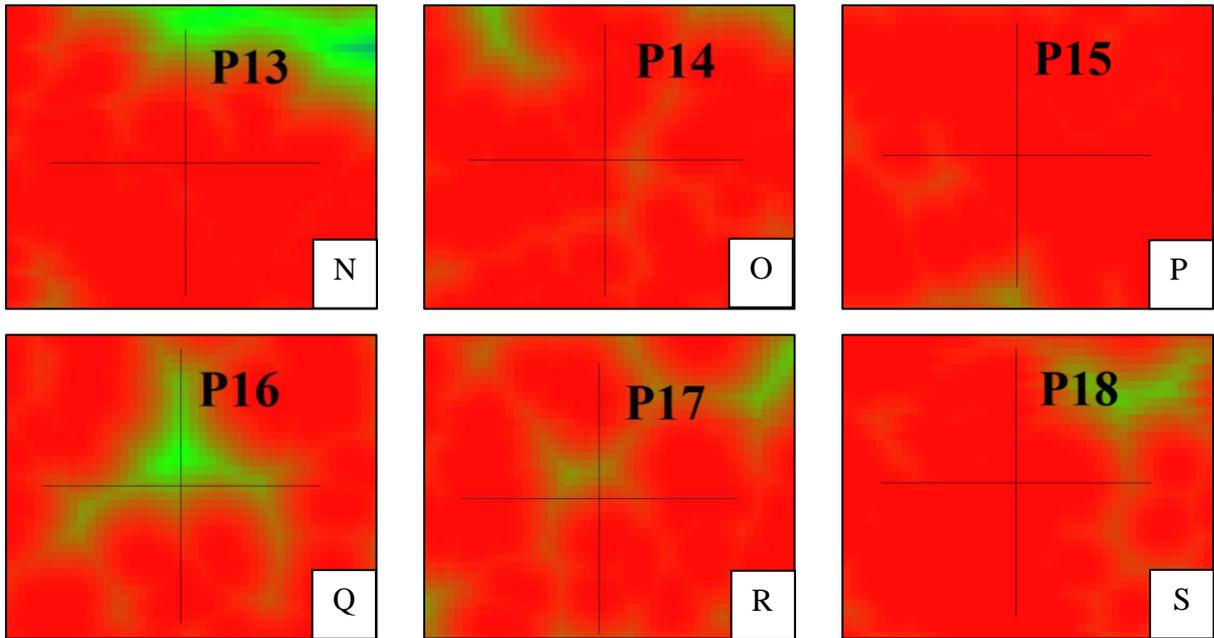


Figura 32 (continua) - Pontos de deslizamentos e áreas de fragilidade ambiental determinada pela lógica *fuzzy*.



**Figura 32 (Fim) - Pontos de deslizamentos inseridos no mapa síntese de fragilidade ambiental – lógica *fuzzy*.**

Pela lógica booleana, 13 dos 18 pontos de deslizamentos identificados, ou seja 72,2% dos pontos de deslizamento, foram classificados como de fragilidade forte ou muito forte. No caso da lógica *fuzzy*, nenhum fator de pertinência teve valor menor que 0,85, ou seja, mesmo esse valor sendo o valor mínimo obtido, ainda é um valor elevado para fragilidade ambiental, demonstrando que todos os pontos indicam elevada fragilidade.

Com base nisso, pode se verificar neste trabalho que o método *fuzzy* apresentou melhores resultados para os pontos que foram avaliados.

## 6 CONCLUSÃO

Por meio deste estudo foi visto que identificar áreas de fragilidade ambiental é resultado de um processo trabalhoso e que deve contar com o auxílio de ferramentas que facilitem a manipulação dos dados georreferenciados.

Um conjunto de fatores que influenciam a ocorrência de deslizamentos deve ser considerado. Um único parâmetro ambiental não é responsável pela ocorrência de um desastre, mas sim vários, os quais devem ser analisados para entender a sua correlação e a influencia dessa em um fenômeno de deslizamento de terras.

A lógica booleana utilizada gerou bons resultados, pois a partir dos parâmetros analisados, 72% dos pontos onde havia ocorrido o deslizamento foram classificados como sendo de fragilidade ambiental forte e muito forte. Entretanto, ao observar regiões adjacentes aos 18 pontos de deslizamento, verifica-se a presença de classes de fragilidades forte e fraca próximas entre si, tornando o resultado bem heterogêneo espacialmente.

Esse resultado não fornece uma resposta positiva em termos de planejamento territorial, pois é necessário que sejam identificadas as áreas que possuem os maiores níveis de fragilidade, e não somente pontos localizados. Assim, por meio da lógica *fuzzy*, os resultados são suavizados, tornando-se homogênea as regiões que possuem uma maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos.

Os resultados da lógica *fuzzy* mostram que o menor valor encontrado para os pontos de deslizamento foi de 0,85. Esse valor mesmo sendo o menor entre todos, ainda expressa um valor elevado numa escala de 0 a 1, representando uma boa abordagem para identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos quando se trata dos 18 pontos identificados.

Ao observar o resultado obtido pela aplicação da lógica *fuzzy*, verifica-se que boa parte da área dos municípios estudados foi classificada como de fragilidade forte ou muito forte.

Apesar de ser um bom método para determinação da fragilidade ambiental para os pontos de deslizamento, o resultado obtido pode não ser eficaz para subsidiar execução de políticas públicas, uma vez que a grande extensão das áreas de fragilidade ambiental forte ou muito forte poderia tornar custoso o processo de elaboração e execução dessas políticas.

Uma das causas deste resultado pode ter sido o método da ponderação dos parâmetros, uma vez que, ao se determinar o maior peso para a declividade em uma região serrana, os resultados obtidos foram bastante influenciados por este fator. Além disso, é

possível verificar que o resultado obtido poderia ter sido diferente caso fosse utilizada outra função matemática para a lógica *fuzzy*, ou que fossem adotados outros parâmetros de distância.

Outra questão que pode ter influenciado no resultado da determinação das áreas de fragilidade foi o processo de classificação. A resolução das imagens de sensoriamento remoto utilizadas neste trabalho podem não ter fornecido o nível de detalhamento necessário para que resultasse em classes de cobertura do solo com o menor grau de confusão possível.

Mesmo com essas considerações, comparando a abordagem booleana e *fuzzy* para os pontos de deslizamento, é possível verificar que a abordagem *fuzzy*, gera bons resultados, pois considera a influência das áreas de fragilidade ambiental adjacentes, resultando em regiões mais homogêneas de fragilidade ambiental quando comparadas a metodologia booleana.

Ao observar o recorte da área urbana dos municípios estudados neste trabalho, verifica-se que pela lógica booleana são encontradas classes de fragilidade baixa e média, enquanto as regiões adjacentes são classificadas como de forte a muito forte fragilidade, além de que alguns pontos de deslizamento foram classificados como de baixa e média fragilidade ambiental.

Isso não ocorreu para a abordagem *fuzzy*, pois os valores de pertinência foram elevados para todos os pontos de deslizamentos, devido ao raio de influência de áreas de elevados níveis de fragilidade ambiental, que são maiores do que as áreas de níveis mais baixos.

O foco na área urbana foi assim estabelecido, pois movimentos de terras são fenômenos passíveis de ocorrer naturalmente, porém quando esses ocorrem próximos a áreas urbanas as consequências transformam um fenômeno natural em um desastre ambiental.

Dessa forma, o uso de geotecnologias aliado a lógica *fuzzy* para avaliação da fragilidade ambiental pode ser considerado por este estudo como uma poderosa ferramenta para identificação de pontos suscetíveis a escorregamentos, principalmente para as áreas urbanas que sofrem as piores consequências quando eventos como esses ocorrem.

Releva-se também a importância dos fundamentos apresentados por Ross (1994) os quais possibilitaram realizar a identificação das áreas de maior fragilidade ambiental emergente, ou unidades ecodinâmicas instáveis, atribuídas a maior parte da área dos municípios.

É importante ressaltar que o estudo de fragilidade ambiental para áreas com frequentes episódios de deslizamentos, como é o caso de Petrópolis e Teresópolis, serve como

uma ferramenta técnica para subsidiar o planejamento territorial dos municípios. Entretanto, a implantação e execução deste planejamento dependem de fatores que extrapolam os projetos técnicos, tais como políticas públicas efetivas que consigam realocar os moradores das áreas de alto risco para regiões mais seguras.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos podem ainda ser aprimorados em trabalhos futuros, sendo esses:

- O uso de outros métodos de ponderação de parâmetros, como o método AHP, ou Inferência Bayesiana, para identificação das melhorias ocorridas nos resultados obtidos quanto à identificação das áreas de fragilidade ambiental;
- Utilização de outras funções de pertinência para análise multicritérios da lógica *fuzzy*;
- Aperfeiçoamento do método de classificação das imagens de sensoriamento remoto, utilizando imagens com maiores resoluções, garantindo a subdivisão das classes existentes (como subdividir a classe da vegetação em vegetação rasteira, densa, cultura de longo prazo, entre outras);
- Ampliação da quantidade de parâmetros analisados para determinação de fragilidade ambiental, como distância de estradas, distância de áreas de APP, utilização de dados climáticos e índices pluviométricos;
- Validação do modelo empírico com estudos aprofundados *in locu* para determinação das características ambientais e averiguação da perda de solo por meio do uso da equação da perda de solo;
- Desenvolvimento de modelos matemáticos que possibilitem integrar outras variáveis ambientais estudadas, considerando os históricos de ocorrência de deslizamentos, para que possa ser possível prever a ocorrência desses deslizamentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D.B.de. **Análise socioambiental do uso e ocupação do solo no morro do Forno, Arraial do Cabo –RJ.** 122 f. 2005. Dissertação (Mestre em Ciência Ambiental)- Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental. Universidade Federal Fluminense; Niterói. 2005.

ALVES, G.T.R. **Aspectos da história de vida de *Guadua tagoara* (Nees) Kunth (*Poaceae: Bambuseae*) na Serra dos Órgãos, RJ.** 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2007.

AMBDATA. Variáveis Ambientais para Modelagem de Distribuição de Espécies. **Mapa de Solos.** Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/amb\\_data/Shapefiles](http://www.dpi.inpe.br/amb_data/Shapefiles)>. Acesso em: 23 ago.2012.

ANTUNES, A.F.B. Fundamentos de Sensoriamento Remoto em ambiente de geoprocessamento. 2011. **Apostila de SIG.** UFPR. Geoprocessamento. Disponível em: <<http://people.ufpr.br/~felipe/sig.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2013.

ARAUJO, G.K.D.; JOHANN, J.A.; ROCHA, J.V. Criação de um mapa temático de uso da terra com diferentes classificadores. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Editor: INPE. Natal, p.67-74, 2009.

BAGLI, V.V. **Mosaico de Imagens de Sensoriamento Remoto.** 60 f. 2005. Proposta de Dissertação de mestrado em Computação Aplicada. INPE. São José dos Campos. 2005.

BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas.** 282 f. 2007. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, São José dos Campos, 2007.

BATISTA, L.F.A. Inferência Geográfica: Lógica Booleana, Lógica Fuzzy, Técnica AHP. **Notas de aula.** Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ligia/disciplinas/materiais/geoprocessamento>>. Acesso em: 14 mar. 2013.

BRASIL. Decreto-Lei n° 2.096, de 29 de Março de 1940. Cria, na cidade de Petrópolis, o Museu Imperial. **Diário Oficial da União.** Seção 1. p 5426. Disponível em: <[http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaNormas.action?numero=2096&tipo\\_norma=DE L&data=19400329&link=s](http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaNormas.action?numero=2096&tipo_norma=DE L&data=19400329&link=s)>. Acesso em: 28 dez. 2012.

BINDA, A.L.; MASCARELLO, L.V.; SILVA, W. B. da. Alterações geomorfológicas no perímetro urbano da cidade de Guarapuava-PR. **Revista Caminhos de Geografia**. Uberlândia, v.10, n.32, p.78-86, 2009.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.M. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2001. São José do Campo. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>>. Acesso em: 07 abr. 2012.

CARVALHO FILHO, A. et al. **Os solos do Estado do Rio de Janeiro**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CRPM). Brasília, 2000. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/arquivos/pdf/rj/solo/solos\\_solos.pdf](http://www.cprm.gov.br/arquivos/pdf/rj/solo/solos_solos.pdf)>. Acesso em: 03 jan. 2013.

CASTRO, A.L.C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília: MIN, 2003. 174 p.

CEPED - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Diretrizes em redução de riscos de desastres: região serrana do Rio de Janeiro**. 2011. 50 f. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

COMPERJ (Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro). **Projeto Agenda 21 – Histórico**. 2011. Disponível em: <[http://www.comperjagenda21.com.br/sites/localhost/files/Hist%C3%B3rico%20e%20dados\\_Teres%C3%B3polis.pdf](http://www.comperjagenda21.com.br/sites/localhost/files/Hist%C3%B3rico%20e%20dados_Teres%C3%B3polis.pdf)> . Acesso em: 03 jan. 2013.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Mapas temáticos: **Unidades Produtoras de Álcool e Biodiesel**, 2005. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_04\\_05\\_16\\_38\\_28\\_projeto\\_gustavo\\_mapa.png](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_04_05_16_38_28_projeto_gustavo_mapa.png)>. Acesso em: 06 mar. 2013.

CONGALTON, R.G. *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data*. **Remote Sens. Environm.** n.37, p.35-46.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica. **Mapa Geométrico do Paraná: Detalhe Londrina**. Disponível em: [http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/mapa\\_geol\\_londrina\\_gde.jpg/\\$FILE/mapa\\_geol\\_londrina\\_gde.jpg](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/mapa_geol_londrina_gde.jpg/$FILE/mapa_geol_londrina_gde.jpg). Acesso em: 06 mar. 2013.

COSTA, D.P. de. **Utilização de Geotecnologias na análise da transformação sócio-espacial urbana da região serrana fluminense: o estudo de caso do distrito sede de Teresópolis**. 186 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia na área de concentração em Análise da Informação Espacial. Universidade Estadual Paulista, câmpus Rio Claro. São Paulo, 2005.

DAMASCENO, A.C.F. **Macrofauna edáfica, regeneração natural de espécies arbóreas, lianas e epífitas em florestas em processo de restauração com diferentes idades no Pontal do Paranapanema**. 107 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais, com opção em Conservação de Ecossistemas Florestais). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2005.

DAVIS, C.; ROCHA, C.H.B; **Fundamentos de Geoprocessamento**. Disponível em: <<http://www.ltc.ufes.br/geomaticsce/Modulo%20Geoprocessamento.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2012.

DONHA, A.G.; SOUZA, L.C.de P.; SUGAMOSTO, M.L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p.175-181, 2006.

DRM-RJ. Divisão de Recursos Minerais. **Teresópolis - A Serra dos Órgãos e o Pico do Dedo de Deus**. Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em:<[http://www.caminhosgeologicos.rj.gov.br/pg\\_placa.php?p=38](http://www.caminhosgeologicos.rj.gov.br/pg_placa.php?p=38)>. Acesso em: 29 dez. 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2006. Brasília, DF: Embrapa, Serviço de Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006.

FERREIRA, E.; DANTAS, A.A.A.; MORAIS, A.R.de. Exatidão na classificação de fragmentos de matas em imagem do satélite Cbers-CCD, no município de Lavras, MG. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Editor: INPE. Florianópolis, p.887-894, 2007.

FERREIRA et al. **Estudo ambiental como subsídio à metodologia para o ordenamento territorial através de análise de caso: Município de Teresópolis, RJ**. Rio de Janeiro. 1998. v.1 e v. 3.

FIERZ, M. de S. M. **As abordagens sistêmica e do equilíbrio dinâmico na análise da fragilidade ambiental do litoral do estado de São Paulo: Contribuição à geomorfologia das planícies costeiras**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física. 394 f. 2008. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2008. p. 160

FREITAS, C. M. de et al . Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência: lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, jun. 2012

FREITAS, L. **Avaliação da Utilização de Imagens CBERS em Estudos de Uso e Cobertura do Solo**. 35 f. 2010. Monografia (Especialização). Curso de especialização em Geoprocessamento. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2010. Disponível em: < <http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/LETICIA.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2013.

FREITAS JUNIOR, R.L.de. **Segmentação e classificação de imagens destinadas ao mapeamento digital do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO)**. 111 f. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação - Geomática .Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2011.

FRÓES, G. K. **Resumo Histórico – Petrópolis**. Petrópolis: Instituto Histórico de Petrópolis/Secretaria de Educação e Assistência Social-Seção de Educação e Cultura, 1964. Disponível em: < [http://www.ihp.org.br/lib\\_ihp/docs/gkf19640724.htm](http://www.ihp.org.br/lib_ihp/docs/gkf19640724.htm) >. Acesso em: 29 dez. 2012.

Fundação CEPERJ (Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro). **Produto Interno Bruto dos Municípios – 2010**. Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: < [http://www.fesp.rj.gov.br/ceep/pib/PIB\\_municipios\\_RJ\\_2010.pdf](http://www.fesp.rj.gov.br/ceep/pib/PIB_municipios_RJ_2010.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2012.

GOMIDE, F.A.C; GUDWIN, R.R.; TANSCHKEIT, R. "Conceitos fundamentais da Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e Aplicações". **Tutorials**. In: *6TH INTERNATIONAL FUZZY SYSTEMS ASSOCIATION WORLD CONGRESS - IFSA 95*. São Paulo - SP - Brasil, 1995.

GONÇALVES, L.F.H. **Avaliação e diagnóstico da distribuição espacial e temporal dos movimentos de massa com a expansão da área urbana em Petrópolis - RJ**. 170 f. 1998. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1998.

GONÇALVES, G.G.G. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas – o caso da bacia do Rio Dourados – MS. In: 2º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. **Anais...** Editor: Embrapa/INPE, Corumbá, p.422-432, 2009.

GRAÇA, C.H.de.; SILVEIRA, H. Aspectos físicos e socioeconômicos como auxílio a análise da fragilidade ambiental na bacia do Córrego Mandacaru, Maringá (PR). **Revista Geografia**, Londrina, v.20, n.1, p.66-86, 2011.

GUERRA, A.J.T.; GONÇALVES, L.F.H.; LOPES, P.B.M. Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, v.8, n.1, p.35-43, 2007.

GUERRA, A.J.T.; LOPES, P.B.M.; SANTOS FILHO, R.D.dos. Características Geográficas e Geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, v.8, n.1, p.77-86, 2007.

GUIMARÃES, A.V.de A.; REGINATO, C.E.C.; OLIVEIRA, S; N; de. **A crise econômica financeira de 2008 e os impactos para as micro e pequenas empresas**. 2009. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Administração. Centro Universitário Eurípedes de Marília. Marília, 2009.

GUIMARÃES, D.P., LANDAU, E.C., BARROS, C.A. Uso do *Google Earth* para a estimativa da extensão do Rio São Francisco. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011. **Anais...** Editor: INPE. Curitiba, p.2203-2210, 2005.

HOLANDA, F. et al. Percepção dos ribeirinhos sobre a erosão marginal e a retirada da mata ciliar do rio São Francisco no seu baixo curso. 2011. **RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise**. Jun 2011. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs-2.2.4/index.php/raega/article/view/21773/14171>>. Acesso em: 21 abr. 2012.

IBGE Cidades: **Petrópolis - RJ**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>> . Acesso em: 27 dez. 2012.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 2ª edição.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Curso Básico de GPS**. 2010. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/cggp/download/apresentacao\\_GPS\\_Leonardo\\_2.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cggp/download/apresentacao_GPS_Leonardo_2.pdf)>. Acesso em: 12 mar. 2013.

INEA, RJ. Instituto Estadual do Ambiente. **Regiões Hidrográficas e Unidades de Conservação da Natureza do Estado do Rio de Janeiro**. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/unidades/conteudo.asp>>. Acesso em: 04 jan. 2013.

INPE – **Instituto Nacional de Pesquisa Espacial**. CATÁLOGO DE IMAGENS. Disponível em: < <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>>. Acesso em: 18 ago. 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

KAWAKUBO, F.S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005. **Anais...** Editor: INPE. Goiânia, p.2203-2210, 2005.

KOHAGURA, T. **Lógica Fuzzy e suas aplicações**. 2007. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Departamento de Computação. Universidade Estadual de Londrina. 2007. Disponível em: <<http://www2.dc.uel.br/nourau/document/?view=601>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

LIMA, P.E.F. **Índices para consultas espaciais em banco de dados**. 53 f. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira. 2011.

LOBATO, E.; SOUSA, D. M.G.de. Podzólicos/Argissolos. **Agência de Informação Embrapa**. Bioma Cerrado. 2005-2007. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_97\\_10112005101957.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_97_10112005101957.html)>. Acesso em: 11 jan. 2013.

LP DAAC – *Land Processes Distributed Active Archive Center*. **NASA**. Disponível em: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>. Acesso em: 09 set. 2012.

MAGANHOTTO, R.F.; SANTOS, J.C.L, OLIVEIRA FILHO, P.D. de. Análise da fragilidade ambiental como suporte ao planejamento ao ecoturismo em unidades de conservação: estudo de caso Flona de Irati –PR. **Revista Floresta**, Curitiba, v.41, n.2, p.231-242, 2011.

MARCELINO, E. V.. Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. 2008. **Caderno Didático** nº 1. INPE/CRS, Santa Maria, 2008. Disponível em: < <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf> >. Acesso em: 13 jun. 2012.

MARCELINO, E.V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de Sensoriamento Remoto**. 228 f. 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. INPE, São José dos Campos, 2004.

MARQUES, R. **Fundamentos de Geodésia**. Disciplina de Cartografia Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2012. Disponível em: <<http://www.geociencias.ufpb.br/leppan/disciplinas/cartografia/aula5.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2013.

MARTINS, E. de S. et al. Relação solo-relevo em vertentes assimétricas no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, v.8, n.1, p.45-62, 2007.

MELLO, M.F. de F. **Mecanismos de inovação na gestão pública: Perspectivas estratégicas de desenvolvimento sustentável dos municípios do estado do Rio de Janeiro**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas – Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2007.

MELO, A.B.C. de; COELHO, C.A. S. **INFOCLIMA** - Boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE. 18 de fevereiro de 2011. n 2, ano 18. Disponível em: <[http://infoclima.cptec.inpe.br/~rinfo/pdf\\_infoclima/201102.pdf](http://infoclima.cptec.inpe.br/~rinfo/pdf_infoclima/201102.pdf)>. Acesso em: 17 out. 2012.

MELO, N.M. de. LABOGEO: Diagnóstico Ambiental dos solos do Município de Teresópolis-RJ. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL. 2012. Goiânia. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/XI-044.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2013.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. de.(Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNB e CNPq. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 07 jan. 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas. **Guia para Elaboração de Políticas Municipais**. Carvalho, C.S.; Galvão, T. (org.). Brasília, 111 p. 2006.

MIODUSKI, J.; MORO, R.S. Grupos funcionais da vegetação campestre de Alagados, Ponta Grossa, Paraná. **Revista IHERINGIA**, Sér. Bot., Porto Alegre, v. 66, n.2, p. 241-256, Dez. 2011.

MORAES, E.C.de. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. Capítulo 1. DSR/INPE. 2002. Disponível em: <[http://www.selperbrasil.org.br/cursos/SPRING/SenRemoto\\_intro.pdf](http://www.selperbrasil.org.br/cursos/SPRING/SenRemoto_intro.pdf)> . Acesso em: 07 jan. 2013.

MOREIRA, F.R. et al. Inferência Geográfica e Suporte à Decisão. Capítulo 9. In: **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Editor: INPE. São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap9-inferencia.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Atualização do livro. Sistemas Sensores. 2001. Editora: INPE. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Topo/leb210/Angulo/sensores.pdf>>. Acesso em: 14 jan.2013.

MORO, G.T.; SOUZA, L.V.M.P.de.; ALMEIDA, E.S. Levantamento de susceptibilidade a deslizamento e erosão em encostas – estudo de caso: Morro da Cruz – Itajaí – SC. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR). **Anais...** Editor INPE. Curitiba, p.4162-4169, 2011.

MUÑOZ, V.A. **Avaliação Comparativa de Técnicas de Inferência Espacial para Identificação de Unidades de suscetibilidade aos movimentos de massa na Região de São Sebastião, São Paulo, Brasil**. 61 f. 2005. Monografia (Especialização do XVIII Curso Internacional em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica). INPE. São José dos Campos. Disponível em: <[http://www.inpe.br/crs/geodesastres/conteudo/teses/Munoz\\_2005\\_Analise\\_comparativa\\_de\\_tecnicas\\_de\\_inferencia\\_espacial\\_para\\_identificacao.pdf](http://www.inpe.br/crs/geodesastres/conteudo/teses/Munoz_2005_Analise_comparativa_de_tecnicas_de_inferencia_espacial_para_identificacao.pdf)>. Acesso em: 11 abr 2012.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). Science Mission Directorate. 2010. **Introduction to The Electromagnetic Spectrum**. Disponível em: <[http://missionscience.nasa.gov/ems/01\\_intro.html](http://missionscience.nasa.gov/ems/01_intro.html)>. Acesso em: 07 jan. 2013.

\_\_\_\_\_. **Projeto Mosaico Geocover**. Disponível em: <<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>>. Acesso em: 18 set. 2012.

NASCIMENTO, D.M.C.; DOMINGUEZ, J.M.L. Avaliação da vulnerabilidade ambiental como instrumento de gestão costeira nos municípios de Belmonte e Canavieiras, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v.39, n.3, p.395-408, 2009.

NASCIMENTO, M. D. do. **Fragilidade ambiental e expansão urbana da região administrativa nordeste da sede do município de Santa Maria – RS.** 2009.181 f. Tese(Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências) - Área de Concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Espacial para o título de Mestre em Geografia. UFSM, Santa Maria, RS. 2009. Disponível em: <[http://w3.ufsm.br/ppggeo/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=38&Itemid=30](http://w3.ufsm.br/ppggeo/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=38&Itemid=30)>. Acesso em: 22 abr. 2012.

NOGUEZ, C.T; HARTMAN, C. Aspectos ambientais e sociais da ocupação irregular do loteamento querência III, da cidade do Rio Grande, RS, Brasil. 2005. **Revista Sociedade e Natureza.** Uberlândia. v.17. n.33. dez. 2005.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008.

OLIVEIRA, S.N. et al. Identificação de unidades de paisagem e sua implicação para o ecoturismo no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** Porto Alegre, v.8, n.1, p.87-107, 2007.

OLIVEIRA, W.C.F. de. **Determinação de risco ambiental na drenagem fluvial da bacia do Rio Verde-PR através do uso de sistemas de informação geográfica.** 184 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Análise Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

PADILHA, P.C.C. **Desenvolvimento de uma metodologia de sintonia de controladores “Fuzzy” utilizando redes neurais.** Aplicações em processos petroquímicos. 95 f. 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <[http://www.pgee.ime.eb.br/pdf/paulo\\_padilha.pdf](http://www.pgee.ime.eb.br/pdf/paulo_padilha.pdf)>. Acesso em: 06 mar. 2013.

PEREIRA, L.A.de S. **Falta de planejamento urbano e tragédia “ambiental” no verão de 2011 em Teresópolis – RJ.** Disponível em: <<http://xiisimpurb2011.com.br/app/web/arq/trabalhos/8f2b39a8031af685e40899019202e4c3.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2013.

PETRÓPOLIS. **Lei n° 4753,** de 26 de setembro de 1990. Fixa as datas dos feriados e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.leismunicipais.com.br/legislacao-de-petropolis/398641/lei-4753-1990-petropolis-rj.html>>. Acesso em: 28 dez. 2012.

PMP (Prefeitura Municipal de Petrópolis). **Guia do investidor** – Elaborado pela Secretaria de Ciência e Tecnologia, Desenvolvimento econômico e Agricultura. Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.petropolis.rj.gov.br/sta/images/guia\\_do\\_investidor.pdf](http://www.petropolis.rj.gov.br/sta/images/guia_do_investidor.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2012.

PUTZ, F. E. Ecologia das trepadeiras: **Ecologia Informativo 24** (2005). Disponível em: <<http://www.ecologia.info/trepadeiras.htm>>. Acesso em: 29 dez. 2012.

QUEIROZ, L.A.V.de. **Hidrogeoquímica fluvial da bacia do rio Paquequer, Teresópolis-RJ**. 98f. 2011. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) – Programa de Pós-Graduação e Geociências. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2011.

REIMER, E. da S. **Inventário dos movimentos de massa e análise da suscetibilidade aos escorregamentos rasos em solo no Distrito de Cascatinha, Petrópolis, RJ**. 122 f. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

REIS, M.F.dos.; OLIVEIRA, R.F.de. A relação planejamento urbano e qualidade de vida: análise sobre a cidade de Campinas – SP, Brasil. **Revista Geográfica da América Central**. Costa Rica, p.1-12, 2011.

ROCHA et al. Variação da nematofauna do solo sob influencia de duas diferentes fisionomias vegetais em Teresópolis, RJ. 2011. Resumo do VII Congresso Brasileiro De Agroecologia. Ceará. In: **Cadernos de Agroecologia**, v. 6, n.2. 2011.

ROCHA, I. R., CABRAL, J. B. P. Uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na análise da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica da UHE Barra dos Coqueiros – GO. In: XIX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA / VIII COMPEX, 2011, Goiânia. **Anais...**Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 2011.

RODRIGUES, V.E.S. **Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro e a expansão dos riscos ambientais, ações preventivas e catástrofes: o caso de Petrópolis**. 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Estruturação do Espaço Geográfico) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, v.16, p.81-90, 2005. Disponível em: <[http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG\\_16/Roberto\\_Rosa.pdf](http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG_16/Roberto_Rosa.pdf)>. Acesso em: 05 jan.2013.

ROSS, J. L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n.8, p.63-74. 1994. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/225/204>>. Acesso em: 04 jan. 2013.

ROVEDDER, J. **Validação da classificação orientada a objetos em imagens de satélite IKONOS II e elaboração de indicadores ambientais georreferenciados no município de torres, planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. 83 f. 2007. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2007.

RUHOFF, A.L. et al. Lógica *Fuzzy* e Zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande. In: XII ANIS SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Editor: INPE. Goiânia, p.2355-2362, 2005.

SANTOS, J.de O. **Fragilidade e Riscos Socioambientais em Fortaleza-CE: contribuições ao ordenamento territorial**. 311 f. 2011. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SANTOS FILHO, R.D. dos. **Antropogeomorfologia da ocupação de áreas de risco em Petrópolis (RJ): análise ambiental urbana**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, A.R. dos; PELUZIO, T.M.de O.; SAITO, N.S. **SPRING 5.1.2: passo a passo – Aplicações Práticas**. 153 p, 2010. Alegre, Espírito Santo: CAUFES, 2010.

SAUSEN, T.M. Desastres naturais e geotecnologias-sensoriamento remoto, **Cadernos didáticos** n°2. INPE, São José dos Campos, 2008.

SAUSEN, T.M. **Projeto Educa SeRe III: Elaboração de carta imagem para o ensino de sensoriamento Remoto – Utilização de Cartas Imagens-CBERS como recurso didático em sala de aula**. 1999. Disponível em: <[http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/capitulo\\_14.pdf](http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/capitulo_14.pdf)>. Acesso em 16 abr. 2012.

SCHEER, M.A.P. da S.; ROCHA, J.V. Estudo das transformações do uso da terra em municípios componentes da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu (SP) por meio de Geoprocessamento e do modelo Shift-Share, 1979 a 2001. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Editor: INPE. Natal, p. 6211-6218, 2009.

SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R. LCE306 - Meteorologia Agrícola. Aula 3: **Climatologia/Classificação Climática**. ESALQ/USP, 2009. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula3.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2013.

SILVA, A.S. da et al. Micromorfologia dos solos em uma topossequencia em Petrópolis (RJ-Brasil). In: VI SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA e II SEMINÁRIO IBERO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA. 2010. **Anais ...** Disponível em: < [http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/a\\_soares](http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/a_soares)>. Acesso em: 03 jan. 2013.

SILVA, C. da. **Caracterização da Bacia do Rio Fiúza para aplicação na prevenção de enchentes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) de Engenharia Civil. UNIJUÍ, Ijuí, RS.2006. Disponível em: <<http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/2010/03/TCC-Celso-da-Silva.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2012

SILVA, L.A; NAZARENO, N.R.X.de. Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do *Google Earth* tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Editor: INPE. Natal, p.1723-1730, 2009.

SILVA NEVES; S. M. A. da.; NEVES, R.J.; FORNELOS,L.F. O uso de imagens do radar interferométrico (SRTM) na avaliação da fragilidade da bacia do córrego Cachoeirinha, nos municípios de Cáceres e Porto Estrela/MT. **Revista Geográfica Acadêmica**. América do Norte, v.2, n.2, p.124-137, 2008.

SILVA,V.V. da.; SCHUMM,L.; FERREIRA, A.M.M. Dinâmica da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do Rio Paquequer, Teresópolis, RJ. 2007. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v.7, n.2, p-132-139, 2007.

SILVEIRA, C.T.da. **Estudo das unidades ecodinâmicas da paisagem na APA de Guaratuba/PR: Subsídios para o planejamento ambiental**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia. 143 f.2005. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

SIQUEIRA, J.R.M.. de; CABRAL, I. Convergência entre a mitigação do déficit habitacional e a questão ambiental: Um estudo de caso na região de Teresópolis. 2007. In: IX ENGEMA – ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE. **Anais eletrônicos...** Disponível em: < [http://urutau.proderj.rj.gov.br/inea\\_imagens/downloads/pesquisas/PE\\_Tres\\_Picos/Siqueira\\_Cabral\\_2007.pdf](http://urutau.proderj.rj.gov.br/inea_imagens/downloads/pesquisas/PE_Tres_Picos/Siqueira_Cabral_2007.pdf)>. Acesso em: 04 jan. 2013.

SISCOM (Sistema Compartilhado de Informações Ambientais). **Unidades de Conservação: APA Petrópolis**. Disponível em: <<http://siscom.ibama.gov.br/mpt/rj/>>. Acesso em: 05 jan.2013.

SOARES, M.C.E. et al. Avaliação da exatidão de mapa de uso do solo através do índice Kappa. 2009, p.8474-8477. Disponível em: <[http://prope.unesp.br/xxi\\_cic/27\\_36994630870.pdf](http://prope.unesp.br/xxi_cic/27_36994630870.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2013.

SOUSA, G.M. de. ; SANTOS, F.V. dos. ; FERNANDES, M. do C. Mapeamento da cobertura da terra da APA Petrópolis/ RJ utilizando análise baseada em objeto no sistema interimage. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, n.64, p.517-530, 2012.

SOUTHERN, B.C. **Transporte inter-urbano e consequências na estrutura recente do município de Petrópolis: o caso da rodovia Washington Luiz – BR 040**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, J.M. et al. Movimentos de massa na bacia do Rio São Pedro, município de Nova Friburgo, associado ao evento de janeiro de 2011. **ACTA Geográfica**, Boa vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, p.149-163, 2012.

SOUZA, M.M; COSTA, L.H. de; CARVALHO, D.A.S. de. Utilização de ferramentas de geoprocessamento para mapear as fragilidades ambientais na área de influencia direta da UHE de Belo Monte, no estado do Pará. **Espaço Plural**, n.25, ano 12, p.73-85, 2011.

SPÖRL, C; ROSS, J.L.S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Revista GEOUSP: Espaço e tempo**, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 185 f. 2007. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

SPÖRL, C.; CASTRO, E. G.; LUCHIARI, A. Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Construção de Modelos de Fragilidade ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo. USP, v.21, p.113-135, 2011.

TOMAZONI, J.C. et al. Uso de Modelo Digital de Elevação gerados a partir do ASTER GDEM, para Caracterização Altimétrica do Município de Renascença no Sudoeste do Estado do Paraná. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Editora: INPE. Curitiba, p.4344-4338, 2011.

TOMINAGA, L.K. Desastres Naturais: Por que ocorrem? In: \_\_\_\_\_ et al. (Org.). **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. 2009. p.11-23. Disponível em: <<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2012

TRICART, J. **ECODINÂMICA**. Rio de Janeiro: SUPREN e IBGE, 1977. 91 p.

WebCart Beta – IBGE. Densidade Demográfica a partir dos dados do CENSO realizado em 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/webcart/swf/swf.php?nFaixas=7&ufs=33>> . Acesso em: 04 mar 2013.

ZUQUETTE, L.V.; PALMA, J.B. Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu. **Revista Escola de Minas (REM)** , São Paulo, v.59, n. 1, p. 81-87, 2006. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=56416732011>>. Acesso em: 05 jan.2013.

## **ANEXOS**

Anexo 1- Cruzamento dos dados pela média ponderada dos valores de fragilidade ambiental.

DECLIVIDADE X TIPO DE SOLO						
	8 -Cxbd3	8 -Cxbe1	2-LVAd5	2-LVAd7	10-PVd1	6-PVAd14
5 - 0 a 6%	13	13	7	7	15	11
10 - 6 a 12%	18	18	12	12	20	16
15 - 12 a 20%	23	23	17	17	25	21
20 - 20-30 %	28	28	22	22	30	26
25 - >30%	33	33	27	27	35	31

**Quadro 8 – Valores ponderados das classes de Fragilidade ambiental da declividade (coluna) e tipo de solo (linha): soma dos valores ponderados (linha + coluna).**

Quadro 8 X ÁGUA (3)					
1,6	1,6	1	1	1,8	1,4
2,1	2,1	1,5	1,5	2,3	1,9
2,6	2,6	2	2	2,8	2,4
3,1	3,1	2,5	2,5	3,3	2,9
3,6	3,6	3	3	3,8	3,4

**Quadro 9 – Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Água (O valor “3” é a classe de fragilidade ambiental muito baixa (1) multiplicada pelo fator ponderado (3) ).**

Quadro 8 X VEGETAÇÃO (6)					
1,9	1,9	1,3	1,3	2,1	1,7
2,4	2,4	1,8	1,8	2,6	2,2
2,9	2,9	2,3	2,3	3,1	2,7
3,4	3,4	2,8	2,8	3,6	3,2
3,9	3,9	3,3	3,3	4,1	3,7

**Quadro 10 - Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Vegetação (O valor “6” é a classe de fragilidade ambiental muito baixa (2) multiplicada pelo fator ponderado (3) ).**

Quadro 8 X ÁREA URBANA (6)					
1,9	1,9	1,3	1,3	2,1	1,7
2,4	2,4	1,8	1,8	2,6	2,2
2,9	2,9	2,3	2,3	3,1	2,7
3,4	3,4	2,8	2,8	3,6	3,2
3,9	3,9	3,3	3,3	4,1	3,7

**Quadro 11 - Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Área urbana (O valor “6” é a classe de fragilidade ambiental muito baixa (2) multiplicada pelo fator ponderado (3) ).**

Quadro 8 X SOLO EXPOSTO (15)					
2,8	2,8	2,2	2,2	3	2,6
3,3	3,3	2,7	2,7	3,5	3,1
3,8	3,8	3,2	3,2	4	3,6
4,3	4,3	3,7	3,7	4,5	4,1
4,8	4,8	4,2	4,2	5	5,6

**Quadro 12- Média ponderada dos dados de Fragilidade ambiental resultantes do Quadro 8 com classe Solo exposto ((O valor “15” é a classe de fragilidade ambiental muito forte (15) multiplicado pelo fator ponderado (3) ).**

## Anexo 2 (continua) – Lógica Booleana para análise das classes de fragilidade ambiental

"muito baixa" : ((pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "agua")),

"baixa" : ((pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "areaurbana")),

"media" : ((pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "agua"))

## Anexo 2 (continua) – Lógica Booleana para análise das classes de Fragilidade ambiental

```

"media" :(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "PVD1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "PVD1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "agua")||
(pisosolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "PVD1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "PVD1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisosolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisosolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||

```

## Anexo 2 (continua) – Lógica Booleana para análise das classes de Fragilidade ambiental

"media" : (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "0a6" && piusosolo.Classe == "soloexposto")),

"forte" : ((pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "agua")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||  
 (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "vegetacao"))||

## Anexo 2 (continua) – Lógica Booleana para análise das classes de Fragilidade ambiental

```

"forte":(pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "6a12" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "12a20" && piusosolo.Classe == "soloexposto")),

"muito forte":((pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "vegetacao")||
(pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "areaurbana")||
(pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "CXbd3" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||
(pisolos.Classe == "CXbe1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "soloexposto"))

```

## Anexo 2 (fim) – Lógica Booleana para análise das classes de Fragilidade ambiental

```
"muito forte" :((pisolos.Classe == "LVAd5" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
  (pisolos.Classe == "LVAd7" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
  (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
  (pisolos.Classe == "PVd1" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
  (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == "20a30" && piusosolo.Classe == "soloexposto")||  
  (pisolos.Classe == "PVAd14" && pidecliv.Classe == ">30" && piusosolo.Classe == "soloexposto"))  
  
}
```

Anexo 3- Lógica *fuzzy* para análise das classes de fragilidade ambiental

```

{
MNT x("mapa_distancias_booleanap2");
MNT erosaoFuzzy, ef1, ef2, ef3, ef4,ef5("resultado_fuzzy_ponderada2");
MNT x1, x2, x3, x4, x5 ("mapa_distancias_booleanap2");
    x1 = Recupere( Nome = "distancia_muitoforte" );
    x2 = Recupere( Nome = "distancia_forte" );
    x3 = Recupere( Nome = "distancia_media" );
    x4 = Recupere( Nome = "distancia_baixa" );
    x5 = Recupere( Nome = "distancia_muitobaixa" );

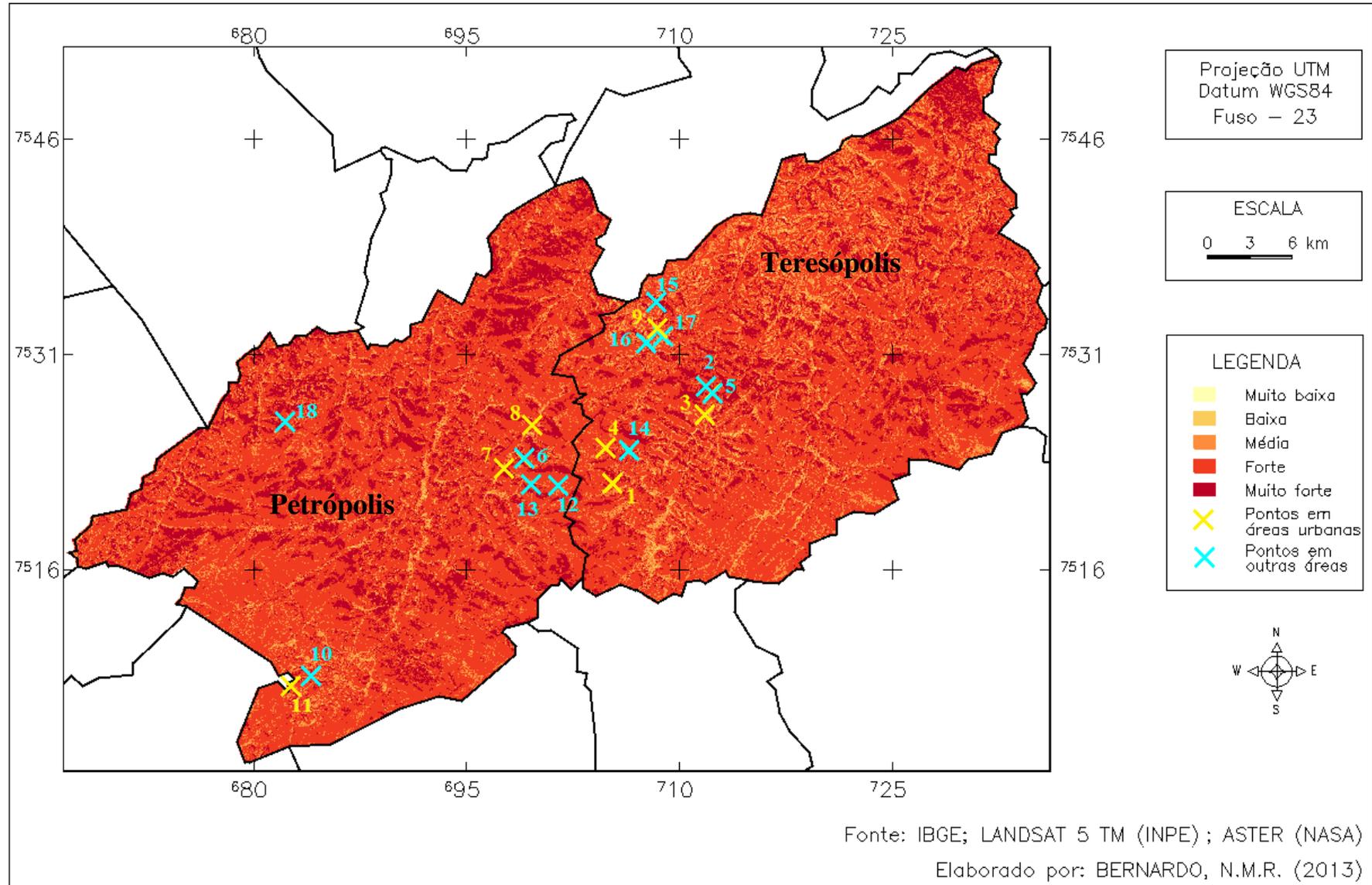
erosaoFuzzy = Novo( Nome = "erosaoFuzzyNovo" , ResX = 30 , ResY = 30 );
    ef1 = Novo( Nome = "erosaoFuzzyMuitoForteNovo" , ResX = 30 , ResY = 30 );
    ef2 = Novo( Nome = "erosaoFuzzyForteNovo" , ResX = 30 , ResY = 30 );
    ef3 = Novo( Nome = "erosaoFuzzyMediaNovo" , ResX = 30 , ResY = 30 );
    ef4 = Novo( Nome = "erosaoFuzzyBaixaNovo" , ResX = 30 , ResY = 30 );
    ef5 = Novo( Nome = "erosaoFuzzyMuitoBaixaNovo" , ResX = 30 , ResY = 30 );

//funcao sigmoidal monotonicamente decrescente para dist. a erosao
    d1 = 1000; //distancia máxima a muitoforte
    d2 = 800; //distancia máxima a forte
    d3 = 600; //distancia máxima a media
    d4 = 400; //distancia máxima a baixa
    d5 = 200; //distancia máxima a muitoabaixa

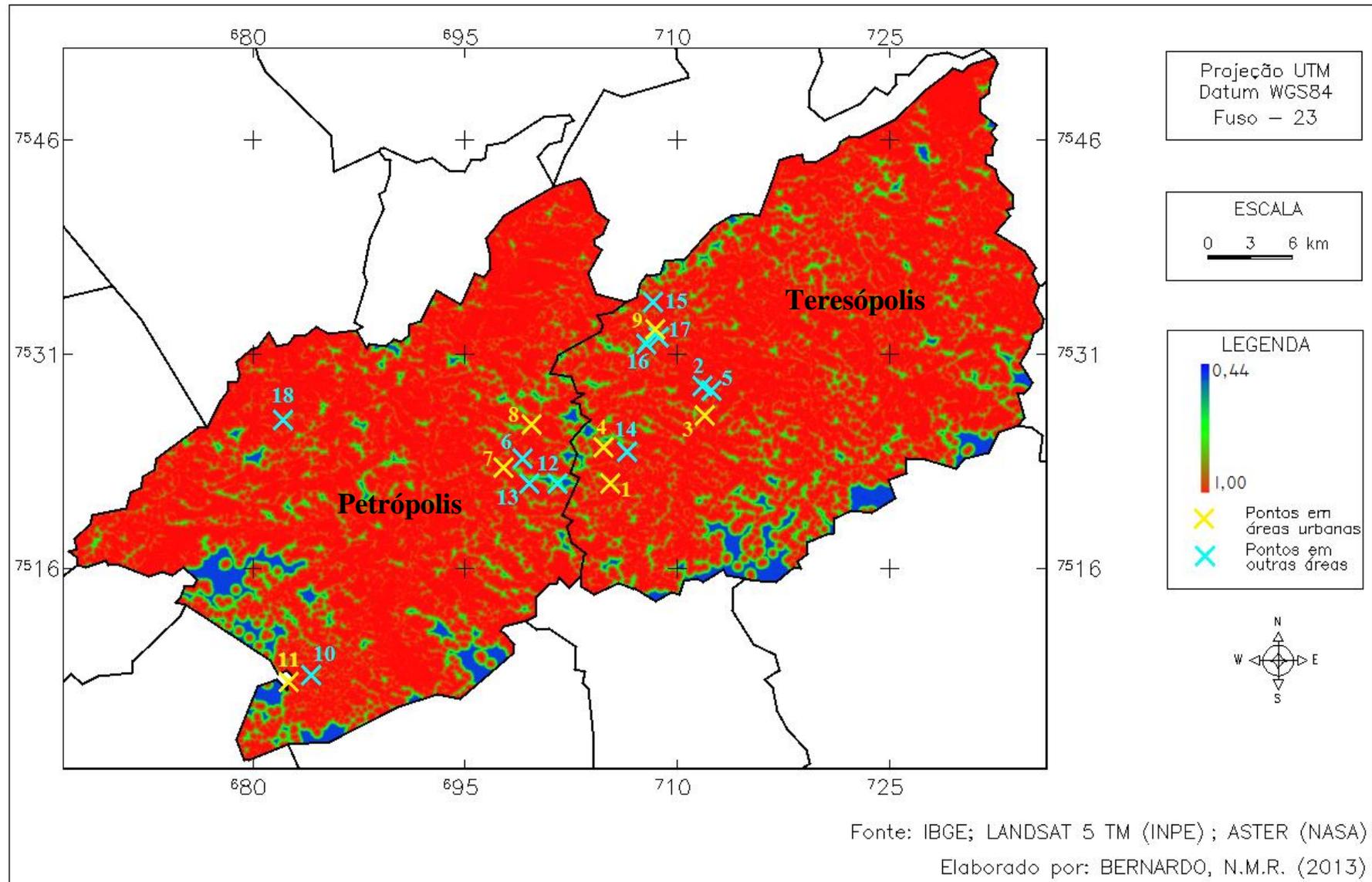
//monotonicamente decrescente
    ef1 = x1 <= d1 ? cos((x1)/(d1)*3.14159/2)^2 : 0;
//esta dividindo por 2 para dar menor efeito da pertinência
    ef2 = x2 <= d2 ? (cos((x2)/(d2)*3.14159/2)^2)/2 : 0;
//esta dividindo por 4 para dar menor efeito da pertinência
    ef3 = x3 <= d3 ? (cos((x3)/(d3)*3.14159/2)^2)/4 : 0;
//esta dividindo por 4 para dar menor efeito da pertinência
    ef4 = x4 <= d4 ? (cos((x4)/(d4)*3.14159/2)^2)/6 : 0;
//esta dividindo por 4 para dar menor efeito da pertinência
    ef5 = x5 <= d5 ? (cos((x5)/(d5)*3.14159/2)^2)/8 : 0;
//funcao fuzzy de máximo (AND)
    erosaoFuzzy = ef1 >= ef2 && ef1 >= ef3 && ef1 >= ef4 && ef1 >= ef5 ? ef1 :
    ef2 >= ef3 && ef2 >= ef4 && ef2 >= ef5 ? ef2:
    ef3 >= ef4 && ef3 >= ef5 ? ef3 :
    ef4 >= ef5 ? ef4 :
    ef5 ;
}

```

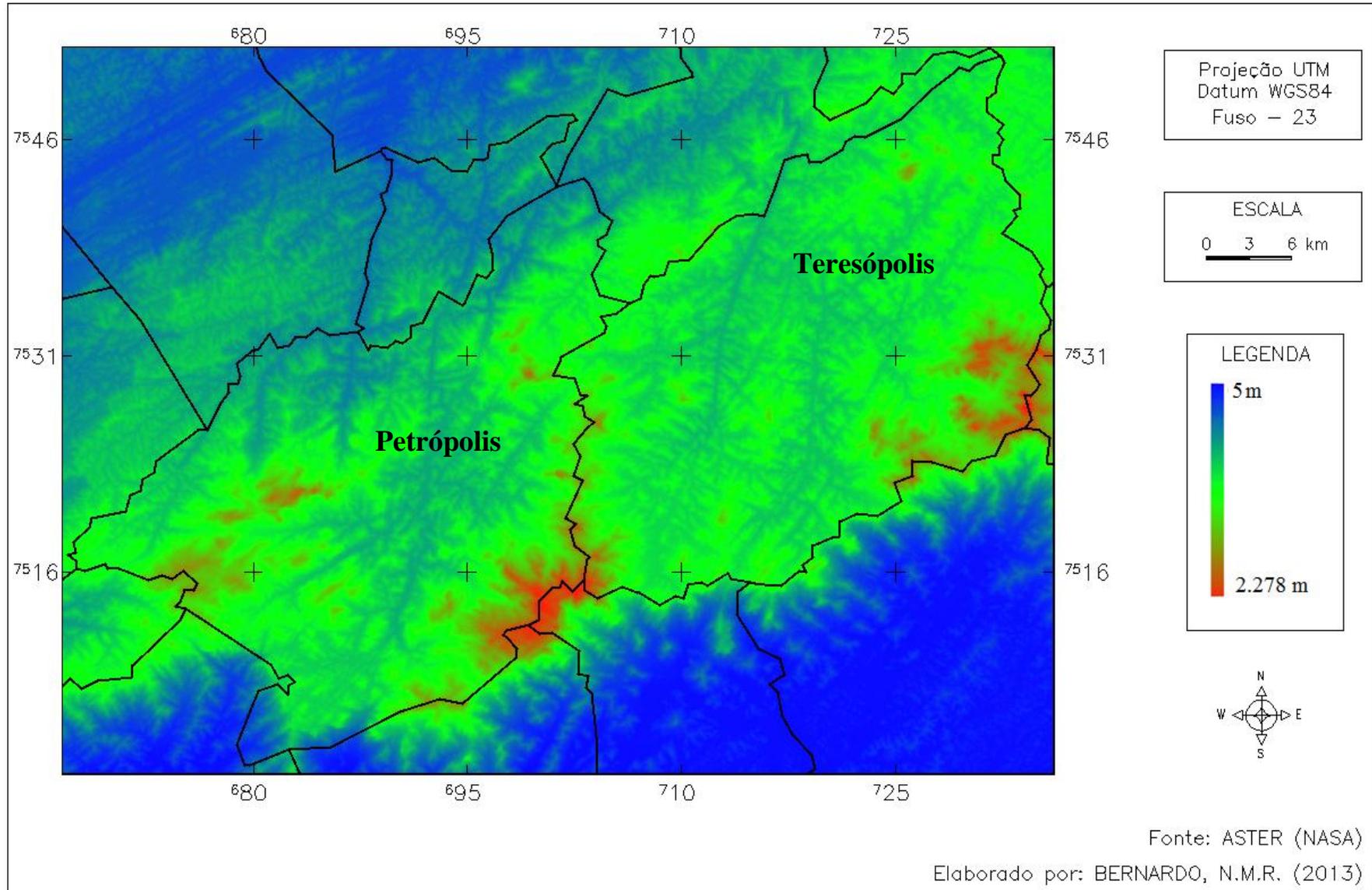
Anexo 4 - Mapa de fragilidade ambiental dos municípios de Petrópolis e Teresópolis (lógica booleana)



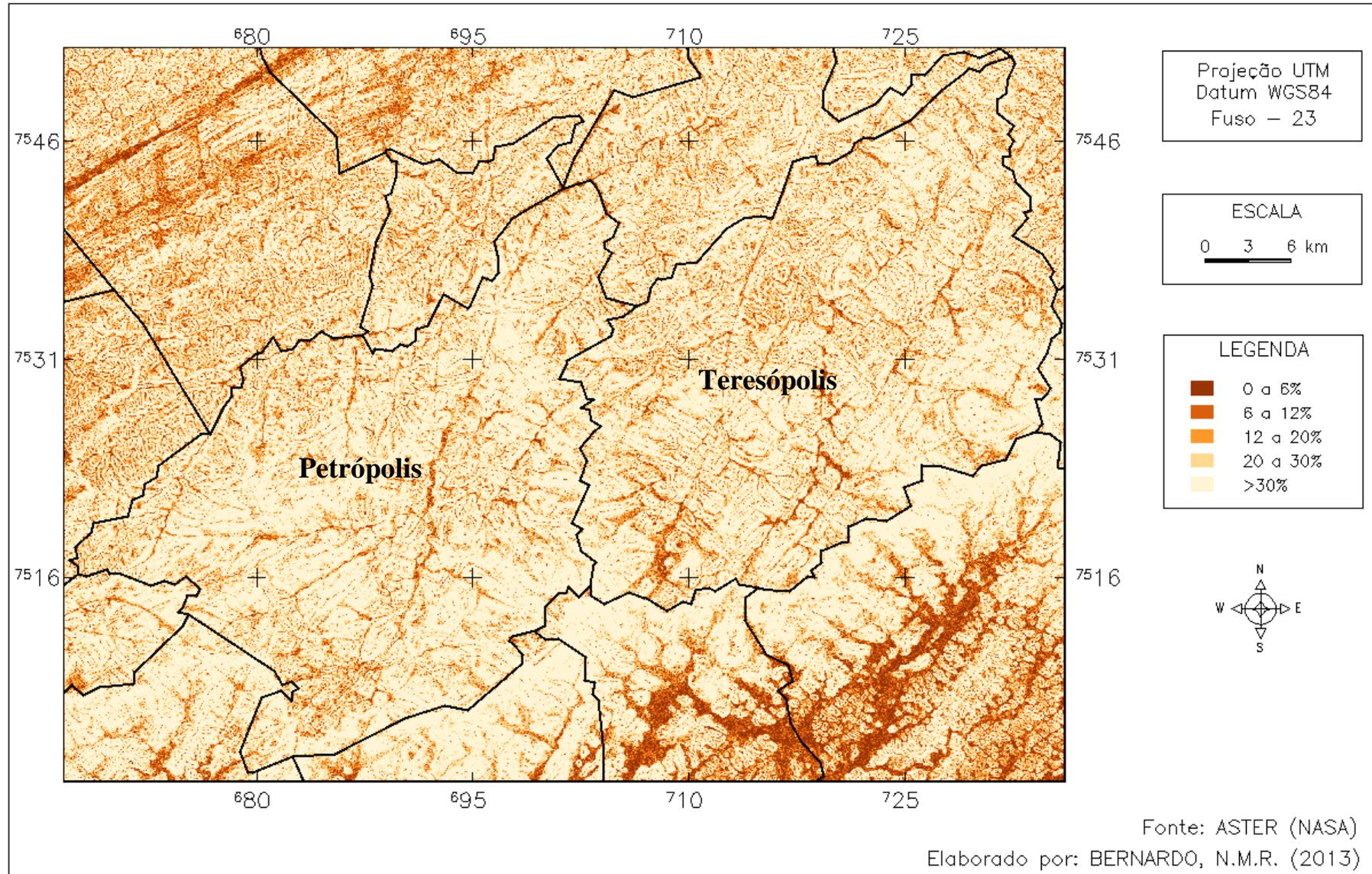
Anexo 5 - Mapa de fragilidade ambiental dos municípios de Petrópolis e Teresópolis (lógica fuzzy)



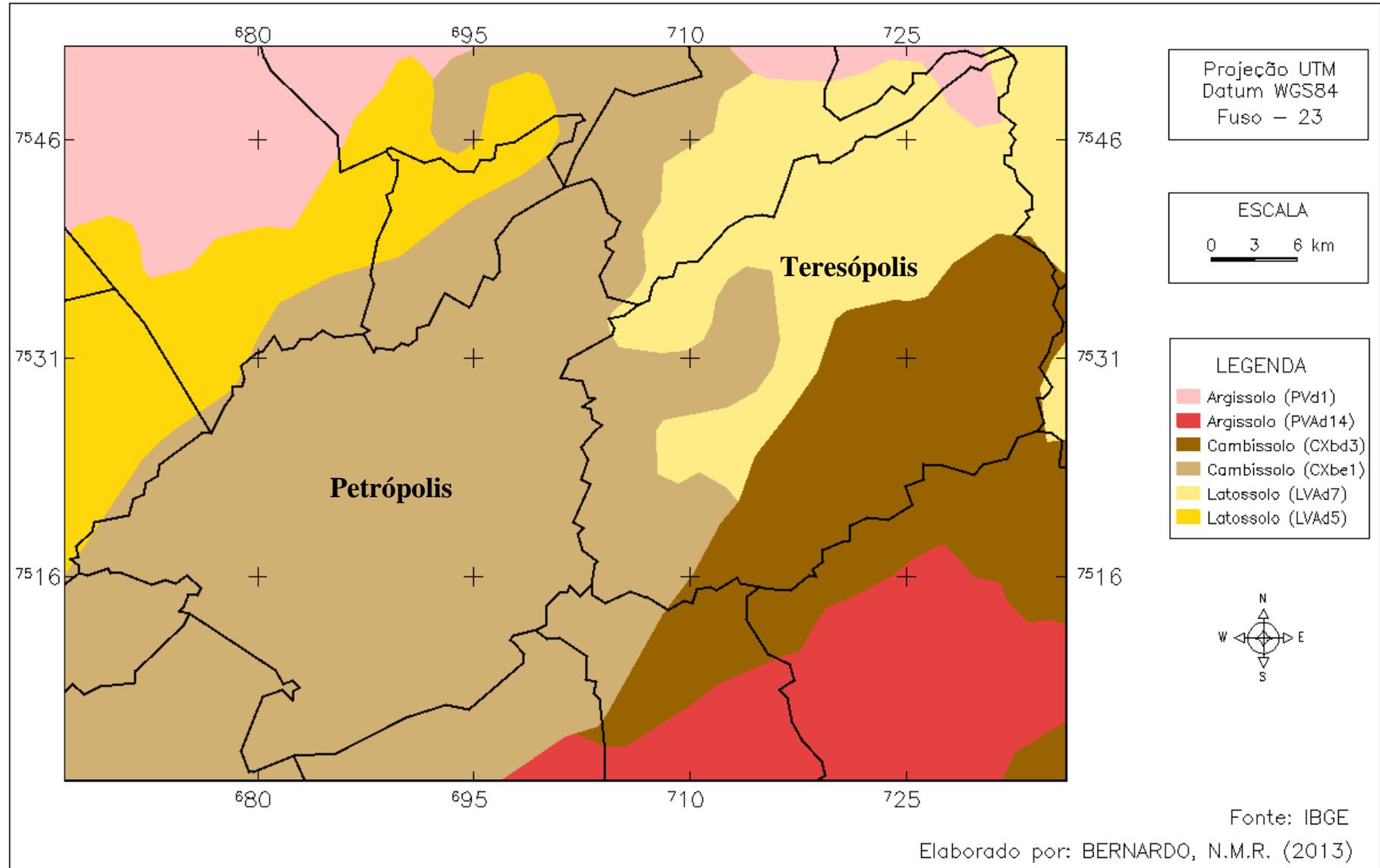
Anexo 6 – Mapa Altimétrico dos municípios de Petrópolis e Teresópolis



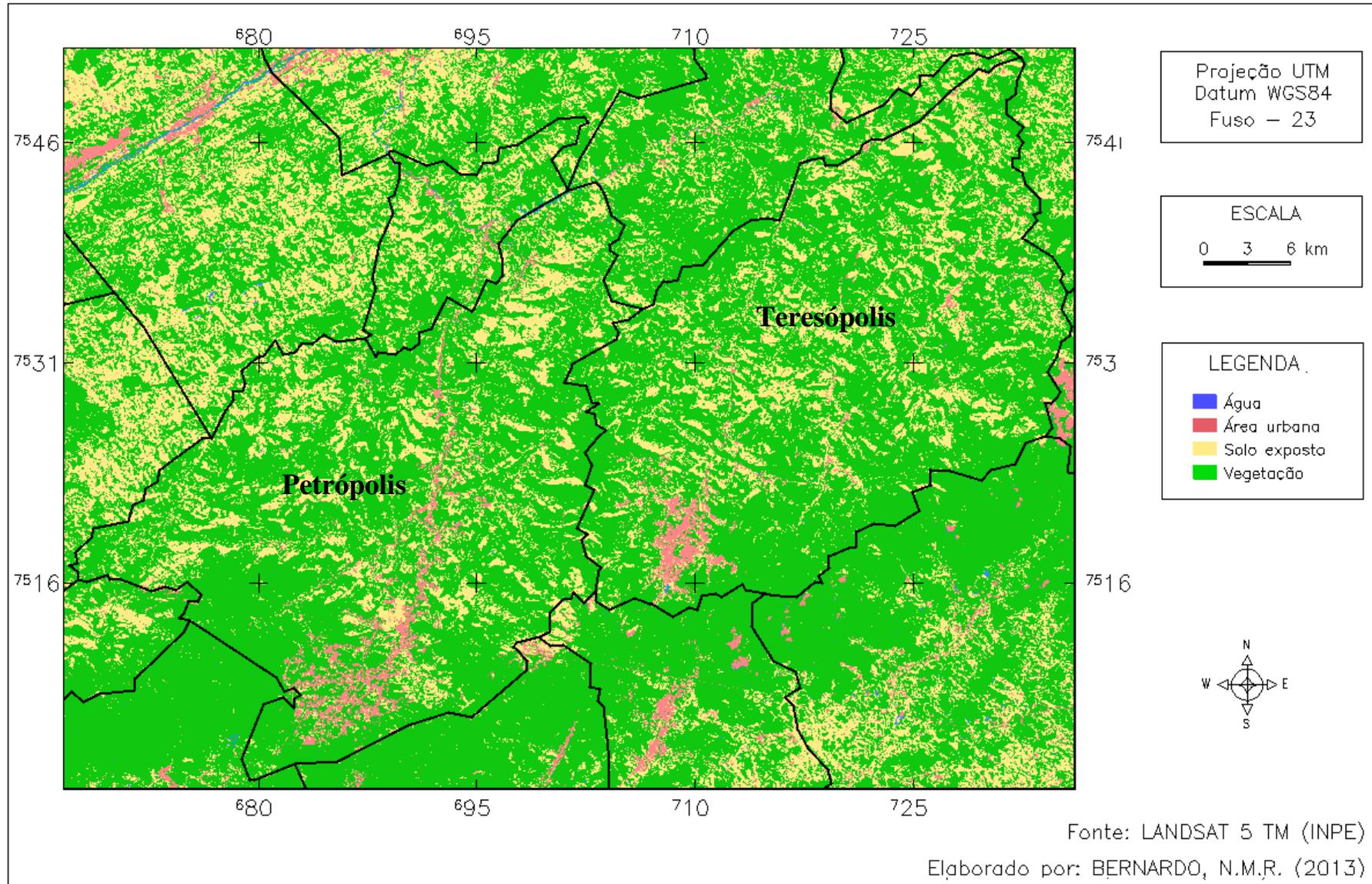
Anexo 7 – Mapa de declividade dos municípios de Petrópolis e Teresópolis



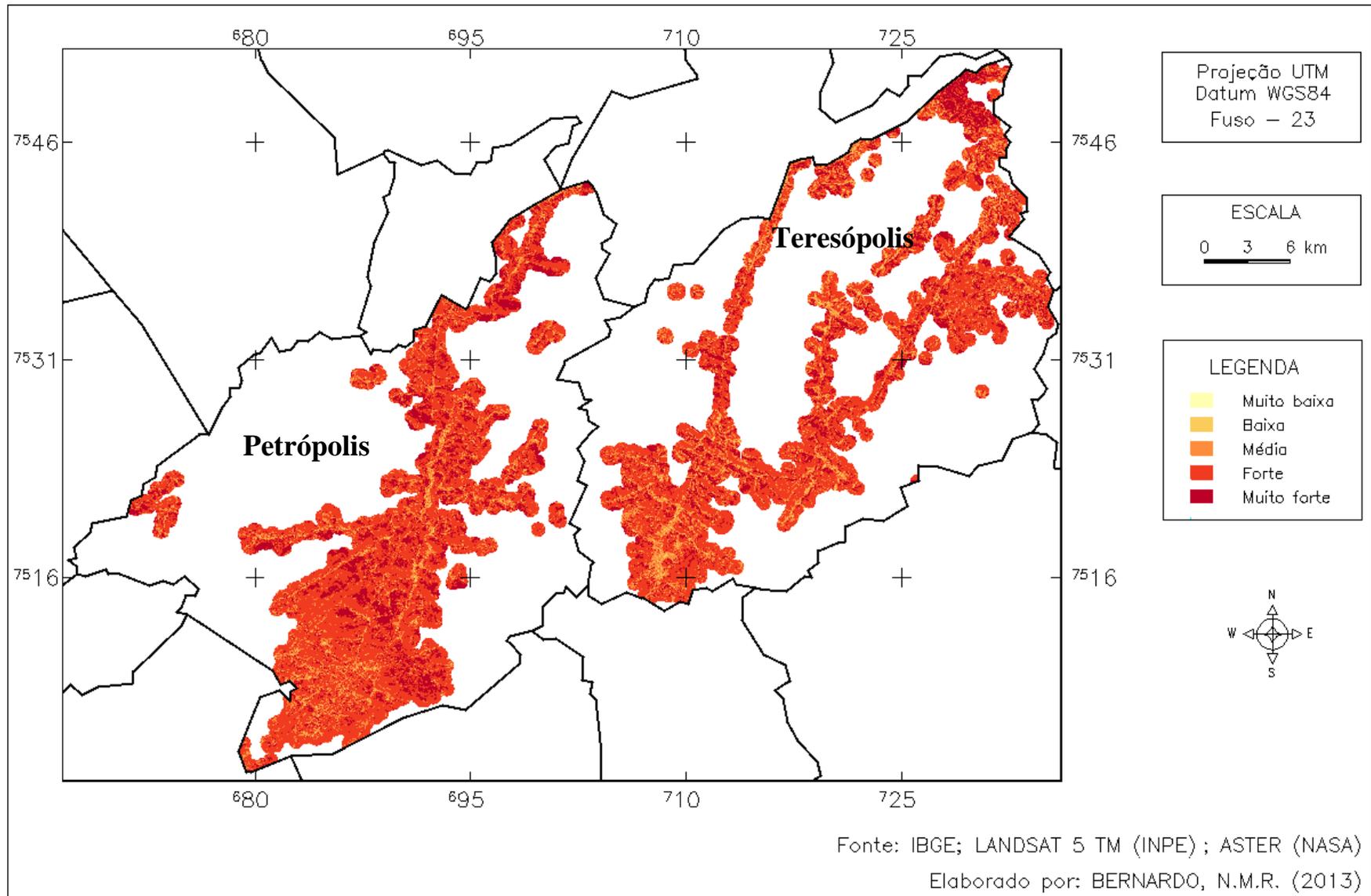
Anexo 8 - Mapa Pedológico dos Municípios de Petrópolis e Teresópolis



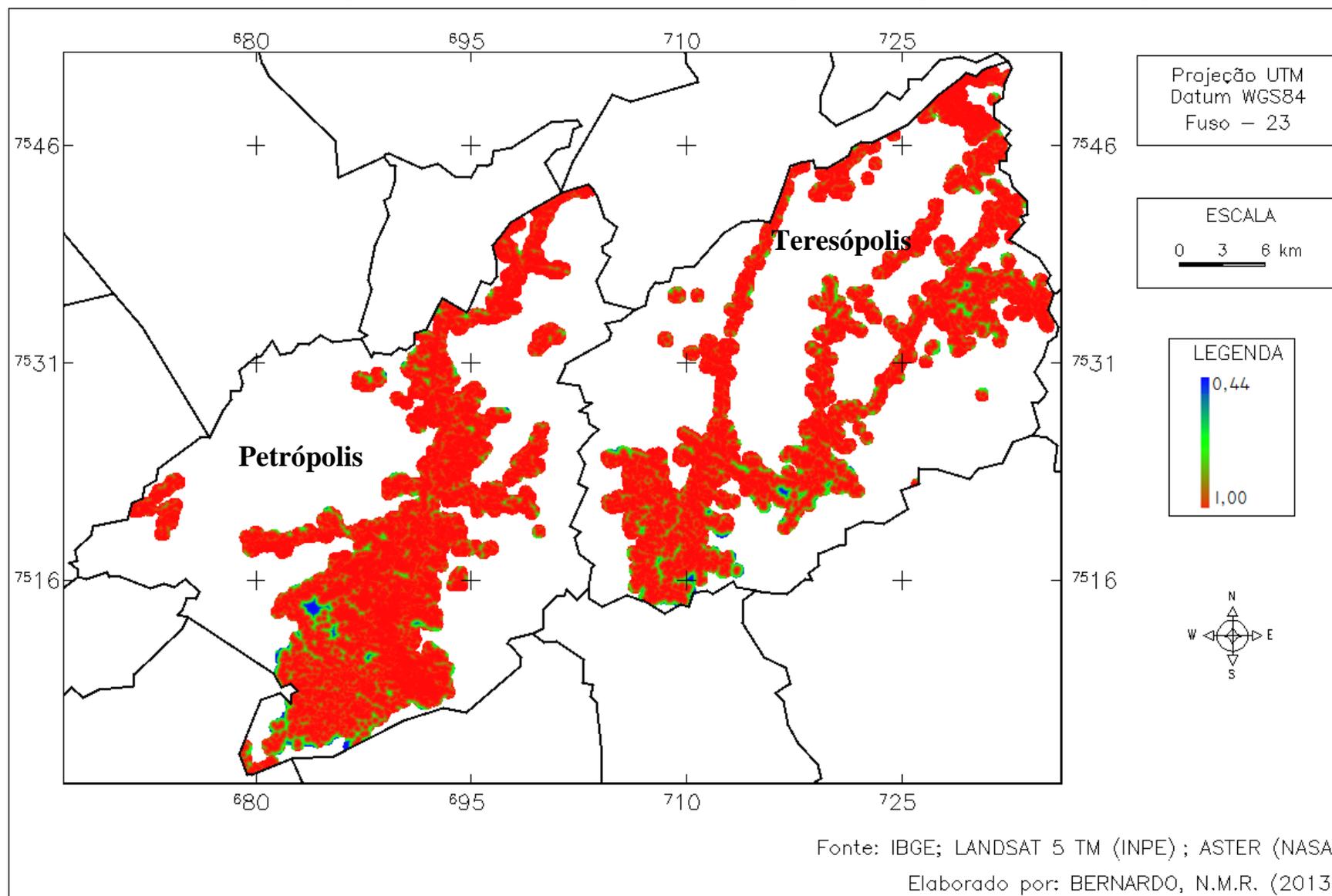
Anexo 9 - Mapa dos tipos de cobertura do solo dos municípios de Petrópolis e Teresópolis



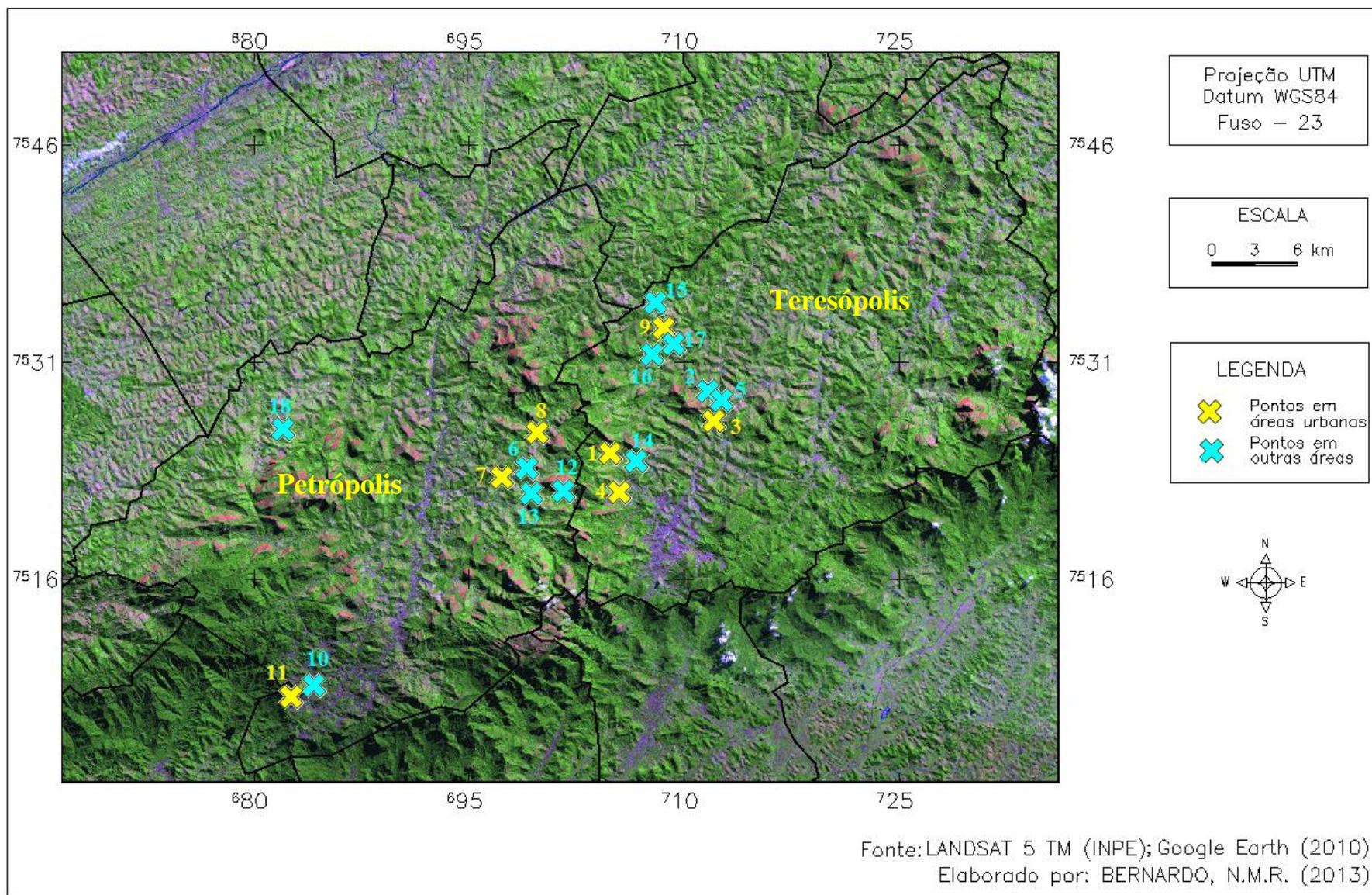
Anexo 10 - Mapa de fragilidade ambiental da área urbana de Petrópolis e Teresópolis (lógica booleana)



Anexo 11 - Mapa de fragilidade ambiental da área urbana dos municípios de Petrópolis e Teresópolis (lógica fuzzy)



## Anexo 12 - Pontos de deslizamentos ocorridos nos anos de 2010 e 2011 nos municípios de Petrópolis e Teresópolis



Anexo 13 – Cicatrizes dos deslizamentos ocorridos nos anos de 2010 e 2011 nos municípios de Petrópolis e Teresópolis para áreas urbanas

