

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

LEANDRO TSUNEKI HIGA

**UTILIZAÇÃO DE DADOS ORBITAIS NA IMPLEMENTAÇÃO
DE UM MODELO DA ESTABILIDADE DOS SOLOS**

Campo Grande - MS
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

LEANDRO TSUNEKI HIGA

**UTILIZAÇÃO DE DADOS ORBITAIS NA IMPLEMENTAÇÃO
DE UM MODELO DA ESTABILIDADE DOS SOLOS**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre do Programa de Pós – Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho
Orientador - UFMS

Prof. Dr. Alfredo Marcelo Grigio
UERN

Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho
UFMS

Campo Grande - MS
2009

*A José (in memoriam)
e Fátima, meus pais
amados, meus
irmãos e sobrinhos
queridos
Dedico!*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pelas oportunidades.

Aos meus pais, José e Fátima, pela educação e pelo exemplo de vida.

A Tia Eliza e ao Tio Ricardo, pelo apoio de sempre.

Aos meus irmãos, Sirlene, Mauro e Cynira, que sempre, dispostos, me ajudaram.

A mulher de minha vida Soraia Cristina Tivioli, por tudo e por ser fundamental.

A meu orientador Antonio Conceição Paranhos Filho, o Toni, pelo norte e pelas oportunidades.

Agradeço aos colegas de Laboratório, principalmente a Roberto Macedo Gamarra, Liliane Corrêa, Hugo Teruya Junior, Diego Lima e Renata Porto.

Agradeço a Prefeitura Municipal de Costa Rica-MS, em especial ao Secretário de Turismo, Meio Ambiente, Esporte e Cultura Wilson Matheus (Prof. Wilson) pelo apoio as pesquisas.

Agradeço a Martha Gilka Gutierrez Carrijo do IMASUL-MS, regional de Costa Rica – MS pelo auxílio na etapa de controle de campo.

Agradeço a todos que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização desse trabalho. Peço desculpas por não tê-las registradas aqui, mas certamente estarão registradas nas minhas lembranças e sempre haverá oportunidades de agradecer de alguma forma.

Agradeço a FUNDECT/CAPES pela bolsa de apoio financeiro concedida através da chamada FUNDECT/CAPES N° 05/2006 – Mestrado.

Agradeço a FUNDECT/ CAPES pelo apoio financeiro concedido através Chamada FUNDECT/CAPES N° 03/2008 – PAPOS.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS.....	4
2.1	Objetivos específicos:	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	Os dados do Modelo Digital de Elevação Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	5
3.2	O método de Krige (krigagem) dos dados SRTM.....	6
3.3	O modelo Linear de Mistura Espectral	9
3.4	Aptidão dos Solos.....	11
3.5	A álgebra de Mapas para geração do modelo da estabilidade do solo.....	14
3.6	A vulnerabilidade Natural e Ambiental.	15
4.	METODOLOGIA	17
4.1	Área de Estudo	17
4.2	Processamento digital dos dados da área de estudo em ambiente SIG	18
4.2.1	Aquisição dos dados digitais e bases cartográficas necessárias.....	18
4.2.2	Tratamento do Modelo Digital de Elevação SRTM.....	18
4.2.2.1	A reamostragem dos dados SRTM.....	19
4.2.3	A geração da Carta de Declividade	21
4.2.3.1	Determinação das classes de declividade.....	23
4.2.4	A carta de Aptidão dos Solos	23
4.2.5	A aplicação do modelo linear de mistura espectral para a obtenção da imagem fração vegetação.....	25
4.2.5.1	A construção do arquivo de metadados.....	25
4.3	A aplicação do modelo linear de mistura espectral para a obtenção da imagem fração vegetação (SPUNMIX)	26
4.4	O modelo da estabilidade dos solos	28
4.5	Zoneamento da estabilidade ambiental	30
4.5.1	Estabilidade Ambiental	30
4.6	Controle de campo	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1	A reamostragem dos dados SRTM.....	32
5.2	Carta de Declividade	33
5.2.1	Determinação das classes de declividade.....	35
5.3	A aplicação do modelo linear de mistura espectral para a obtenção da imagem fração vegetação.....	37
5.4	Aptidão dos Solos.....	39
5.5	O modelo da Estabilidade dos Solos (MES)	41
5.6	Controle de Campo.....	46
5.6.1	Área de Interesse 1 (ponto 1):	47
5.6.2	Área de Interesse 2 (Pontos 2 a 9).....	49
5.6.3	Área de Interesse 3 (Pontos 10 a 12).....	54
5.6.4	Área de interesse 4 (Ponto 13)	57
5.7	A proposta de zoneamento da vulnerabilidade ambiental.....	59
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	61
7.	REFERÊNCIAS.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Passagens da nave na coleta dos dados SRTM.....	5
Figura 3.2 – Semivariogramas experimentais e modelos teóricos	8
Figura 3.3 – Instantaneous Field of View (IFOV) (Paranhos Filho, 2008).....	9
Figura 4.1 – Localização do Município de Costa Rica – MS, área de estudos.....	17
Figura 4.2 – Localização das amostras SRTM.....	20
Figura 4.3 – Arquivo ASCII com cabeçalho padrão.....	20
Figura 4.4 – Modelagem do semisemivariograma padronizado.....	21
Figura 4.5 – <i>Pixel</i> central “p”, para o qual será calculada a rampa.....	22
Figura 4.6 – Vetor normal, aos vetores V1 e V2.....	22
Figura 4.7 – Tabela de atributos de cada polígono de aptidão dos solos.....	24
Figura 4.8 – Parte do arquivo de metadados da imagem <i>Landsat 5 TM</i>	26
Figura 4.9 – Propriedades da banda, com metadados inseridos.....	26
Figura 4.10 – Analogia entre USLE e MES.....	29
Figura 4.11 – Ilustrativo da composição do MES.....	30
Figura 5.1 – Zoom de tela de 8x. do DEM SRTM reamostrado para 30 metros.....	33
Figura 5.2 – Zoom de tela de 4x da Carta de Declividade.....	34
Figura 5.3 – Perfil das Cartas de Declividade de 90 e 30 metros.....	34
Figura 5.4 – Histogramas das Cartas de Declividade.....	34
Figura 5.5 – Distribuição em percentual de área das classes adotadas.....	35
Figura 5.6 – Carta de Declividade.....	36
Figura 5.7 – Relatório do algoritmo SPUNMIX.....	37
Figura 5.8 – Distribuição percentual de área de cada classe de cobertura.....	37
Figura 5.9 – Carta de Cobertura da Imagem Fração Vegetação.....	38
Figura 5.10 – Distribuição percentual de área das classes de aptidão de solos.....	39
Figura 5.11 – Carta de Aptidão dos Solos (MS, 1990).....	40
Figura 5.12 – Cobertura percentual das classes de vulnerabilidade do MES.....	41
Figura 5.13 – Carta do Modelo da Estabilidade dos Solos.....	42
Figura 5.14 – Cobertura das classes de vulnerabilidade do MES-V.....	43
Figura 5.15 – Comparativo do MES e MES-V.....	44
Figura 5.16 – Carta do MES-V.....	45
Figura 5.17 – Localização das áreas de interesse.....	46
Figura 5.18 – Localização do ponto 1 - Imagem <i>Landsat 5 TM</i>	47
Figura 5.19 – Localização do ponto 1 - próximo ao PENT – MESS.....	48
Figura 5.20 – Mirante do PENT na borda da quebra de relevo.....	48
Figura 5.21 – Área de lavoura próxima ao PENT.....	48
Figura 5.22 – Área de corte abandonada próxima ao ponto 2.....	49
Figura 5.23 – Área vulnerável com solos quase expostos.....	49
Figura 5.24 – Área de vulnerabilidade alta com terraceamento.....	50
Figura 5.25 – Área muito vulnerável com declividade entre 12% e 45%.....	50
Figura 5.26 – Início do processo erosivo e pastagem.....	51
Figura 5.27 – Área com solo exposto e uma “ilha de cobertura”.....	51
Figura 5.28 – Fragmento de cerrado, identificável no MES.....	52
Figura 5.29 – Área com cobertura de cerrado e cerradão.....	52
Figura 5.30 – Área de interesse 2, Imagem <i>Landsat 5 TM</i>	53
Figura 5.31 – Área de interesse 2, MES.....	53
Figura 5.32 – Cultura de cana-de-açúcar.....	54
Figura 5.33 – Área de pastagem e mata ciliar ao fundo.....	55

Figura 5.34 – Área de interesse 3, Imagem <i>Landsat 5 TM</i>	56
Figura 5.35 – Área de interesse 3, MES.....	56
Figura 5.36 – Área de solo arenoso friável exposto no pé do morro.....	57
Figura 5.37 – Área de interesse 4, Imagem <i>Landsat 5 TM</i>	58
Figura 5.38 – Área de interesse 4, MES.....	58
Figura 5.39 – Proposta do Zoneamento para tomadas de decisão.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Classes de declividade adotadas.....	21
Tabela 4.2 – Pesos das classes de declividade e suas vulnerabilidades.....	21
Tabela 4.3 – Classes da Aptidão dos solos, pesos e vulnerabilidades.....	22
Tabela 4.4 – Classes de cobertura.....	26
Tabela 4.5 – Pesos das classes de cobertura e respectivas vulnerabilidades.....	26
Tabela 4.6 – Escala de Estabilidade (CREPANI <i>et. al.</i> , 2001).....	27
Tabela 5.1 – Classes de declividade preliminar.....	32

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- APP – Área de Preservação Permanente
- ASCII - *American Standard Code for Information Interchange*
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- DLR - *German Aerospace Center*
- DOS-US – Department of State
- EIA/RIMA – Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EUA – Estados Unidos da América
- USLE – *Universal Soil Loss Equation* - Equação Universal da Perdas de Solos
- FTP – *File Transfer Protocol*
- FWHM - *Full-Width at Half-Maximum*
- GLCF - *Global Land Cover Facility*
- IFOV – *Instantaneous Field of View*
- IFV – Imagem Fração Vegetação
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- JPL – *Jet Propulsion Laboratory*
- LAT - Latitude
- LONG - Longitude
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- MES – Modelo da Estabilidade dos Solos
- NASA-US – *National Aeronautics and Space Administration*
- NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*
- NIMA - *National Imagery and Mapping Agency*
- PCF – *Pair Comparison File*
- PENT – Parque Estadual das Nascentes do Taquari
- SIG - Sistema de Informação Geográfica
- SLP - *Slope*
- SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*
- TM – *Thematic Mapper*
- USGS – *United States Geological Survey*
- WGS84 - *World Geodetic System 1984*

RESUMO

HIGA, L. T. (2009). *Utilização de dados orbitais na implementação do modelo da estabilidade dos solos. Campo Grande, 2009. 69 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.*

Determinar as áreas mais suscetíveis a erosão, tendo como subsídio um modelo da estabilidade dos solos (MES) alternativo à *Universal Soil Loss Equation* (USLE), proporcionando o zoneamento ambiental da área de estudos, foi o objetivo deste trabalho. Para a implementação do modelo foram utilizados dados de aptidão dos solos, declividade e vegetação, estes dois últimos provenientes de dados de sensores remotos, o modelo SRTM e da imagem fração de vegetação do modelo linear de mistura espectral aplicado a imagem *Landsat 5 TM*. Para o cruzamento dos planos de informação foi utilizada a técnica de álgebra de mapas. O modelo, apesar de algumas restrições, mostrou-se coerente com os levantamentos de campo, apresentando áreas com vulnerabilidades baixa, média, alta e muito altas. No zoneamento se propôs a instalação de empreendimentos mais impactantes em áreas de vulnerabilidade média. E a prioridade de compensações ambientais em áreas de vulnerabilidade muito alta, em conjunto com os solos inaptos para o uso agrícola.

Palavras-chaves: MES, USLE, SRTM, modelo linear de mistura espectral, aptidão dos solos, zoneamento ambiental, álgebra de mapas.

ABSTRACT

HIGA, L. T. (2009). Use of orbital data on a soil stability model. *Campo Grande, 2009. 69 p. Master Dissertation –Federal University of Mato Grosso do Sul, Brazil (in Portuguese).*

To determinate erosion susceptible areas using an alternative Universal Soil Loss Equation (USLE) model, the soil stability model (SSM), providing an environmental zoning to the study area was the main objective of this paper. To build the model were used soil ability, slope and canopy coverage. The last two coming from remote sensing data, SRTM and fraction image generated by the mixing model from a *Landsat 5 TM* scene. The union of information layers was done by map overlaying process. Despite QSSM model bounds, presented very close to the reality seen on the fieldwork showing areas with low, mean, high and very high vulnerability. On the zoning was proposed the more environmental impact plants to be put on the mean vulnerability areas and on the very high vulnerability and unable agricultural soils to become focus of the environmental exchange areas.

Key-words: QSSM, USLE, SRTM, linear mixing model, soil agricultural ability, environmental zoning, overlaying maps.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas causados pela atividade agrícola é a erosão hídrica, que contribui amplamente para a degradação do solo, podendo ocasionar a perda de sua camada mais fértil (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990), transportando os sedimentos, que podem alcançar os cursos d'água, originando assoreamentos.

Em alguns casos o escoamento superficial pode transportar, juntamente com os sedimentos, poluentes agrícolas, dissolvidos ou sólidos, aos corpos d'água ocasionando a eutrofização ou até mesmo intoxicação da vida aquática (VON SPERLING, 1996), agravando o impacto ocasionado pela atividade agrícola sobre o meio ambiente.

Portanto a erosão, no Mato Grosso do Sul, torna-se um importante impacto ambiental potencial, visto a vocação agropecuária do Estado. Desta forma a estimativa das perdas de solos torna-se relevante no planejamento e no zoneamento da vulnerabilidade ambiental de seus municípios.

O modelo mais comumente utilizado é a Equação Universal da Perda de Solos (USLE ou *USLE – Universal Soil Loss Equation*), devido à simplicidade de aplicação. Apesar disso, seu caráter empírico implica em dificuldades de calibração no aspecto quantitativo, além de apresentar dificuldades de generalização de resultados (ADRIOLO *et al.*, 2008).

Também é sabido que as estimativas quantitativas fornecidas pela USLE são extremamente variáveis de bacia para bacia, o que dificulta aplicação metodológica semelhante para áreas com diferentes características, o que torna limitada sua aplicação universal (ALVES *et al.*, 2005).

Todavia o desenvolvimento de uma metodologia envolvendo dados oriundos do sensoriamento remoto poderia tornar universal a aplicação de um modelo qualitativo que seja alternativo a aplicação da USLE. Com base neste modelo é possível realizar o zoneamento da vulnerabilidade a erosão, que possibilita, de acordo com os níveis de vulnerabilidade, que se estabeleçam áreas possíveis para a implantação de empreendimentos com potencial impactante coerente com a vulnerabilidade da área pretendida, de modo a fornecer condições para que se mantenha, preserve ou cause mínimos impactos sobre o ambiente da área do empreendimento. O que poderá configurar uma importante ferramenta de apoio às tomadas de decisão, no âmbito da gestão ambiental, principalmente no que tange a contribuição ao planejamento da área de estudo. Ainda sobre o planejamento, GRIGIO (2003): “Os dados

geográficos devidamente padronizados, organizados, processados e analisados proporcionam uma base consistente para a tomada de decisões referente a atividades como a gestão e o ordenamento ambiental, o planejamento dos recursos da terra, rural e/ou urbano, como também para o monitoramento e conservação dos recursos renováveis e não-renováveis”.

A “Política Nacional do Meio Ambiente”, estabelecida pela lei nº 6.938 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981), lista dentre seus princípios a racionalização do uso do solo, subsolo, da água e do ar e o incentivo ao estudo e a pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos naturais. Deste modo, o sensoriamento remoto, pode ser visto como uma tecnologia que pode ser aplicada a atender, além de outros, tais princípios, pois provê dados fundamentais à alimentação de ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG’s).

Visto que as imagens de satélite oferecem possibilidades interessantes de gerarem informações qualitativas precisas para avaliação e evolução de diversas variações temáticas da superfície terrestre, que podem ser utilizados para vislumbrar a evolução do uso e ocupação da área em estudo, através das tendências e das relações entre os elementos da paisagem e conseqüentemente dos impactos causados no meio ambiente, possibilitando simulações, que podem auxiliar em ações de planejamento, além de possibilitar a detecção de mudanças geoambientais (GRIGIO, 2008).

A disponibilização de dados de sensores remotos aliados às evoluções computacionais tornou mais rápida e dinâmica a entrada de dados em ambiente SIG, assim como a geração de suas saídas (produtos). Desta maneira a utilização de SIG’s no planejamento e gestão ambiental, no contexto atual, aponta uma solução de rápida implementação e de grande utilidade.

Um modelo quantitativo alternativo a USLE foi desenvolvido por HAZARIKA e HONDA (1999), utilizando uma equação baseada principalmente na declividade e no NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) índice de vegetação por diferença normalizada em uma bacia monitorada. Além disso, GRIGIO (2008) utilizou um modelo dinâmico, no tempo, para predição de tendências da evolução da paisagem, mostrando a importância da ferramenta para transcender o período atual, possibilitando o planejamento e viabilizando as conseqüências dos fatores antrópicos.

Portanto este trabalho teve o intuito de desenvolver uma metodologia de estimativa qualitativamente semelhante àquela fornecida pela USLE. Para tanto se propõe a utilização de dados obtidos via sensoriamento remoto: o modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), a declividade derivada do SRTM e as imagens fração

determinadas através da aplicação de modelo de mistura espectral linear em conjunto com as classes de aptidão dos solos.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo é o desenvolvimento de uma metodologia, o Modelo da Estabilidade dos Solos (MES), com intuito de gerar as Cartas de Vulnerabilidade a perdas de solo para a análise da susceptibilidade a erosão com base nas imagens fração do modelo linear de mistura espectral, MDE SRTM e declividade, aliados a dados do substrato, visando uma proposta de zoneamento da vulnerabilidade ambiental para a área de estudo.

Para tanto, utilizando bases de dados orbitais gratuitas e disponíveis na Internet, tais como os do modelo digital de elevação SRTM e imagens do satélite *Landsat 5 TM*. Estes serão processados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Gerar um banco de dados SIG com vários níveis de informações para a área de estudo:
 - MDE SRTM com resolução espacial de 30 metros;
 - Carta de Aptidão dos Solos;
 - Carta de Declividade;
 - Imagens Fração (vegetação, solo e sombra/água);
 - Vetores oriundos das classes de declividade e das proporções utilizadas para o fatiamento das imagens fração;
- Fornecer informações a respeito das zonas mais ou menos ambientalmente vulneráveis, visando contribuir nas tomadas de decisão e nos planejamentos urbano e rural do Município de Costa Rica – MS.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 OS DADOS DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM)

O projeto da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi realizado através de uma ação conjunta da Agência Americana de Mapas e Imagens (NIMA-US), da Agência Espacial Americana (NASA-US), do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOS-US), das agências espaciais da Alemanha e da Itália, com o objetivo de produzir dados digitais de topografia para 80% da superfície terrestre emergida (toda área entre as latitudes 60° Norte e 56° Sul). Nessa área as passagens realizadas variaram de uma a quatro, de acordo com a figura 3.1.

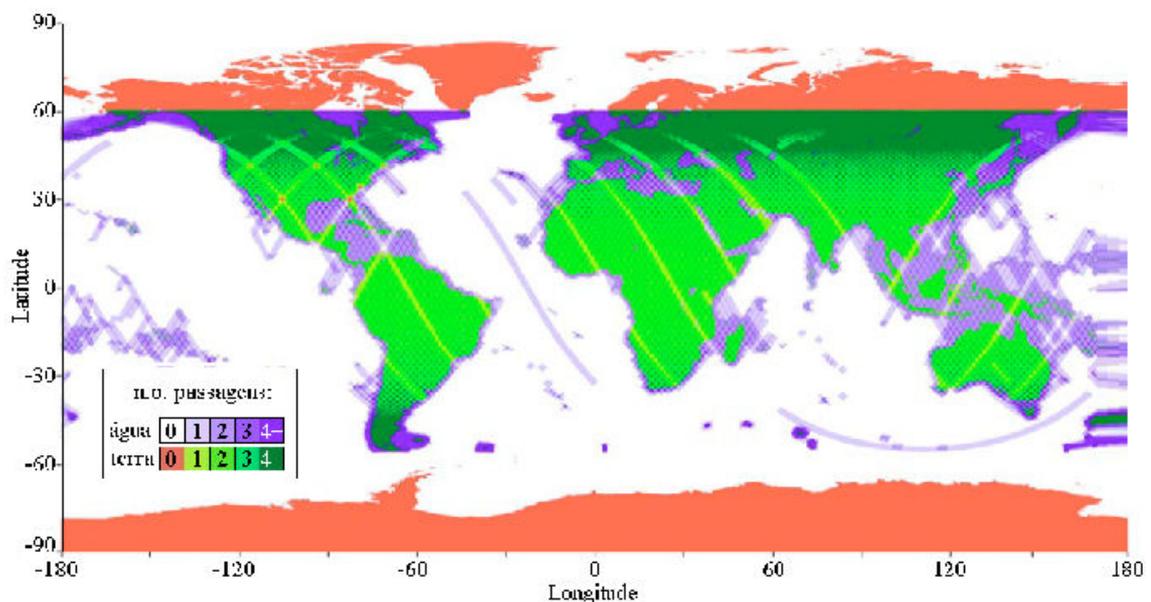


Figura 3.1 – Passagens da nave *Endeavour*, na coleta dos dados SRTM (VALERIANO, 2002).

O instrumento utilizado foi o radar de abertura sintética de bandas C e X (SIR-C/X-SAR), acoplado ao ônibus espacial *Endeavour*, esse foi munido de um mastro de aproximadamente sessenta metros, em cuja extremidade foram instaladas antenas para as bandas C e X, apresentando um arranjo projetado para coletar dados tridimensionais através da interferometria.

Os dados da banda C foram processados no *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da NASA, e são os dados que se encontram disponíveis na internet, já os da banda X foram

processados no Centro Aeroespacial da Alemanha (DLR), tem uma maior resolução, sem cobertura global.

Os dados disponibilizados para os EUA possuem uma resolução espacial de aproximadamente 30 metros ($0,000277^\circ$), enquanto os para o resto do mundo possuem 90 metros de resolução aproximada ($0,000833^\circ$). O *datum* e o elipsóide de referência são o WGS84, com dados altimétricos em valores inteiros. A acurácia vertical das elevações são de 16 metros, com 90% de confiança (USGS, 2003).

A NIMA disponibilizou para os dados de 90 metros produtos com dois níveis de correção, em seu FTP, denominadas “SRTM-1” e “SRTM-2”, a versão preliminar possui um nível de correção de picos e vórtices inferior à segunda, o que as diferencia.

Uma das peculiaridades indesejáveis do modelo é sua sensibilidade a quaisquer objetos presentes na superfície, ou seja, o imageamento realizado não traz apenas informações topográficas, de relevo, mas sim apresenta a superfície de modo geral, com interferência de vegetação, construções, além de outras modificações antrópicas.

O modelo vem sendo amplamente usado e avaliado por diversos pesquisadores. VALERIANO (2002) reamostrou os dados de noventa para trinta metros, utilizando a krigagem e observou significativa melhora na qualidade do modelo. TORRES (2008) utilizou os dados para gerar automaticamente os divisores de água da bacia do Rio Formoso, também com dados reamostrados para trinta metros, aplicando a krigagem. SANTOS *et al.* (2006) avaliaram a precisão vertical do modelo para a Amazônia, chegando a conclusão que o modelo pode ser aplicado àquela região com escala 1:100.000, em documentos classe “A” do padrão de exatidão cartográfica (Brasil, 1984 e 2005).

HIGA *et al.* (2006) avaliaram a acurácia vertical do modelo para o Estado de Mato Grosso do Sul com base na rede geodésica do Estado, concluindo que o modelo pode ser aplicado para escalas iguais e menores que 1:34.000 para a classe “A” do padrão de exatidão cartográfica (BRASIL, 1984 e 2005).

3.2 O MÉTODO DE KRIGE (KRIGAGEM) DOS DADOS SRTM

A interpolação consiste da inferência na modelagem de uma variável extrapolada com base em valores conhecidos da variável, as amostras.

A geoestatística, segundo DRUCK *et al.* (2002), é sustentada pela estacionariedade, que supõe comportamento homogêneo da autocorrelação espacial na área de estudo. Aplicada a dados ambientais (como processos geológicos), a hipótese da estacionariedade é amparada com uma frequência até certo ponto surpreendente.

Um dos estimadores utilizados para inferência da superfície foi criado pelo pesquisador Daniel G. Krige, denominado *krigagem* (método de Krige ou krigeagem) e foi utilizado para evitar a superestimação sistemática de jazidas minerais.

A técnica da *krigagem* para estimar uma superfície sobre a área de interesse é uma técnica estatística que minimiza a variância do erro para valores estimados. Utiliza estatística onde a precisão do valor estimado é melhor no local amostrado e fica menos confiável à medida que os pontos interpolados se distanciam. Também leva em consideração a distância, contudo incorpora a influência da tendência ou dependência espacial dos dados amostrados (MIRANDA, 2005). O valor de um ponto específico é calculado com base em pontos conhecidos e nos pesos atribuído a cada um deles (PCI, 2007).

Na *krigagem* os pesos atribuídos a cada valor experimental são determinados com base no semivariograma experimental padronizado. Além disso, fornece estimativas não tendenciosas pois procura zerar o erro residual médio e espera minimizar a variância dos erros (CAMARGO *et al.*, 1998).

A covariância entre dois pontos quaisquer é determinada pela análise de um semivariograma para distância entre os pontos (PCI, 2007). O semivariograma pode ser estimado pela equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Onde:

$\gamma(h)$ - é o semivariograma estimado;

$N(h)$ - é o número de pares de valores medidos, $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$, separados por um vetor distância h ;

$z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ - são valores da i -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e x_i+h ($i = 1, \dots, n$), separados pelo vetor h .

A dependência que existe entre dois pontos é representado pelo semivariograma, a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores das amostras que estão separados pela distância “ x ” (MIRANDA, 2005).

Os parâmetros do semivariograma são (CAMARGO, 1998) :

- Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.
- Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var} [Z(x) - Z(x+h)]$) torna-se aproximadamente constante.
- Efeito Pepita (C_0): idealmente, $\gamma(0)=0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para zero, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa a componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma causa específica (variabilidade ao acaso). Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição, sendo impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

O semivariograma experimental deve ser ajustado a um modelo teórico a que melhor se ajuste. Os modelos teóricos aplicados conforme a metodologia de TORRES (2008) são o esférico, exponencial e gaussiano, figura 3.2.

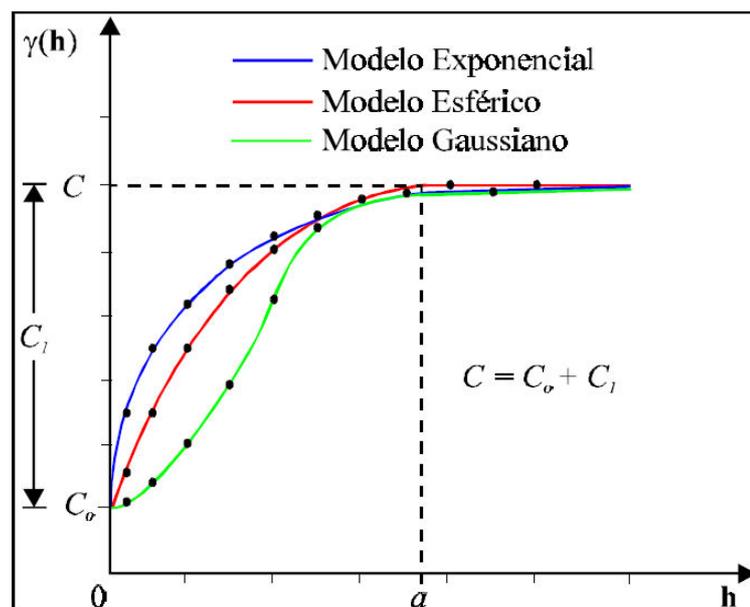


Figura 3.2 - Representação gráfica de semivariogramas experimentais e modelos teóricos (TORRES, 2008)

A escolha do semivariograma depende da forma da curva. Os modelos esférico e exponencial são lineares na origem. O semivariograma exponencial alcança o patamar assintoticamente, ou seja, ele se aproxima do patamar sem nunca tocá-lo. O semivariograma gaussiano é parabólico e alcança o patamar assintoticamente (PCI, 2007).

3.3 O MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL

É possível observar que mesmo em imagens de resolução espacial de 30 metros, arruamentos de menos de 10 metros podem se tornar visíveis, isto se deve ao *Instantaneous Field of View* (IFOV) - campo de visada instantânea, que corresponde a área sobre o terreno que é “vista” pelo sistema sensor a uma dada altitude num dado instante de tempo (MOREIRA, 2001). Um exemplo da influência do IFOV é dado por PARANHOS FILHO *et al.* (2008): Uma casa quadrada, de 20 metros, em uma imagem de igual resolução espacial, conforme a figura 3.3:

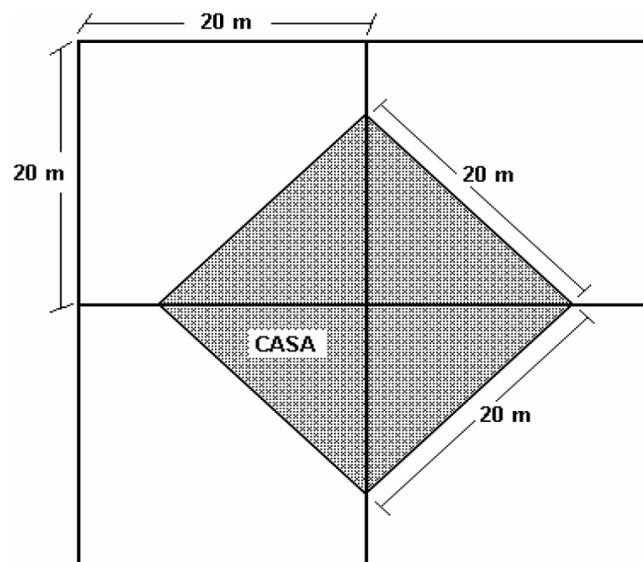


Figura 3.3 – Exemplo da influência do *Instantaneous Field of View* (IFOV) (Paranhos Filho *et al.*, 2008)

A casa pode “dominar” os *pixels* caso haja uma grande diferença de resposta espectral entre os tipos de superfície, tornando-se visível na imagem. Tal fenômeno é decorrente do IFOV. Uma alternativa para se separar as porções de materiais presentes em cada *pixel* dentro do IFOV, é a utilização de modelos de mistura espectral.

O modelo linear de mistura espectral, foi desenvolvido por SHIMABUKURO & SMITH (1991), utiliza o método dos mínimos quadrados para gerar imagens fração de

vegetação, solo exposto e sombra. Partindo do princípio de que a soma das radiâncias de todos os materiais dentro do IFOV podem ser separados e as somas das imagens fração com o erro residual resultam em um valor unitário

O modelo adota uma relação linear para representar a mistura espectral dentro de um *pixel*. Permite avaliar quantitativamente a cobertura de interesse dando “exemplos” de *pixels* puros (*endmembers*), ou seja, *pixels* que contenham quase que exclusivamente a resposta espectral que se deseja separar nas imagens fração, estes geralmente são cobertura vegetal, solo exposto e sombra.

O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot x_j) + e_i$$

Onde:

r_i = refletância média espectral para a i -ésima banda espectral de um *pixel* contendo um ou mais componentes;

a_{ij} – refletância espectral do j -ésima componente no *pixel* para a i -ésima banda;

x_j – proporção do valor da j -ésima componente em um *pixel*;

e_i – erro para a i -ésima banda espectral;

$j = 1, 2, \dots, n$ (número de componentes adotados no problema; e

$i = 1, 2, \dots, m$ (número de bandas do sistema do sensor)

Dois restrições são assumidas no modelo: a soma das proporções é igual a um e as proporções não são negativas, visto que o número de componentes (n) é menor que o número de bandas (m).

O modelo descrito por SHIMABUKURO & SMITH (1991) vem sendo aplicado para obtenção de produtos derivados das imagens fração para aplicações como:

- Identificação de desflorestamento (FREITAS *et al.*, 2007) e (MELLO *et al.*, 2004);
- Avaliação da aplicação para áreas urbanas (NUNES & SOUZA JUNIOR, 2007);
- Avaliação do alcance econômico (logística) da atividade madeireira, através da identificação de estradas nas imagens fração (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2001);
- Mapeamento de áreas de soja e milho (MOREIRA *et al.*, 1998);
- Mapeamento do Uso do solo (YI *et al.*, 1998);

- Comparação entre o índice de vegetação e o modelo linear de mistura espectral (SHIMABUKURO *et. al.*, 1998), além de outras pesquisas que utilizam a metodologia.

3.4 APTIDÃO DOS SOLOS

A aptidão é um processo essencialmente interpretativo e consiste, fundamentalmente, na avaliação das condições agrícolas das terras, sintetizadas em cinco qualidades básicas, visando à identificação do uso mais intensivo possível sob diferentes níveis de manejo.

Assim, a aptidão dos solos tem como objetivo mostrar as alternativas de uso de uma determinada área em função da possibilidade de melhoramento das cinco qualidades básicas (fertilidade natural, excesso de água, deficiência de água, susceptibilidade à erosão e impedimentos à mecanização) e da limitação persistente ainda que da utilização de práticas agrícolas intrínseco aos níveis de manejo (EMBRAPA, 2000).

A finalidade é o uso sustentável das terras para os diferentes tipos de uso, procurando manter a relação custo/benefício favorável ao ambiente e a função sócio econômica (RAMALHO FILHO *et al.*, 1983).

Tem o intuito de nortear o planejamento agrícola, uma vez que fornece a gama de usos considerando as bases da sustentabilidade (EMBRAPA, 2000). Tem, assim, por objetivo básico servir de consulta a órgãos públicos relacionados com planejamento e execução de políticas agropecuárias e de orientação geral as empresas estatais e privadas, além de fins didáticos (MS, 1990).

As definições metodológicas para a compreensão deste tópico foram obtidas conforme o Atlas Multirreferencial do Estado de Mato Grosso do Sul (MS, 1990):

- O Grupo é um artifício cartográfico que identifica no mapa o tipo de utilização mais intensivo ou mais indicado das terras, ou seja, sua melhor aptidão. Sua representação é feita com algarismos de 1 a 6, segundo as possibilidades de utilização das terras. Os Grupos 1, 2 e 3, são aptos para lavouras; e o Grupo 6 é o indicado para a preservação da flora e da fauna ou como área de recreação.
- Níveis de Manejo: visam diagnosticar o comportamento das terras em diferentes níveis tecnológicos. Sua indicação é feita através de letras, as quais podem aparecer na

simbologia da classificação, escrita de diferentes formas, segundo as classes de aptidão que apresentam as terras, em cada um dos níveis adotados.

- Nível de Manejo A - baseado em práticas agrícolas que refletem um baixo nível tecnológico. As práticas agrícolas dependem do trabalho braçal, podendo se utilizada alguma tração animal com implementos agrícolas simples.
- Nível de Manejo B - baseado em práticas agrícolas que refletem um médio nível tecnológico. Caracteriza-se pela modesta aplicação de capital e de resultados de pesquisa para manejo, melhoramento e conservação das condições das terras e das lavouras. As práticas estão condicionadas principalmente á tração animal.
- Nível de Manejo C - baseado em práticas agrícolas que refletem um alto nível tecnológico. Caracteriza-se pela aplicação intensa de capital e de resultados de pesquisas para manejo, melhoramento e conservação das condições das terras e das lavouras. A motomecanização esta presente nas diversas fases da operação agrícola.

As Classes de Aptidão presentes na área de estudos:

- **Subgrupo 1 AB(c)** –Aptidão Boa nos níveis de manejo A, B e Restrita no C – compreendem áreas com relevo ondulado. A pouca profundidade efetiva dos solos, a forma de relevo, favorável aos processos erosivos e a presença comum de afloramentos rochosos são fatores mais limitantes á utilização agrícola no sistema de manejo C. As terras classificadas no Grupo 1 e Subgrupo descritos, originadas principalmente de basalto e calcário, são consideradas as melhores dentre as existentes no Estado e devem ser destinadas, prioritariamente, ao uso com agricultura.
- **Subgrupo 2 (a)bc-** Aptidão Regular nos níveis de manejo B e C e restrita no nível A – compreendem áreas constituídas de solos álicos ou distróficos, bem drenados e acentuadamente drenados, textura argilosa ou muito argilosa, com relevo plano e suave ondulado, menos freqüentemente suave ondulado a ondulado. Possuem baixa reserva de nutrientes disponíveis ás plantas e livres de sais tóxicos. As boas propriedades físicas e morfológicas dos solos permitem uma percolação rápida da água, sem que haja prejuízo na aeração, durante qualquer época do ano. Os riscos de erosão, quando existentes, podem ser controlados com práticas conservacionistas simples. As condições de relevo, profundidade, morfologia, ausência de pedregosidade e rochosidade e boa drenagem do solo, favorecem as práticas agrícolas e o uso intensivo da mecanização. Dessa maneira, o fator de maior limitação ao pleno uso agrícola é a baixa fertilidade natural, com maior influência no sistema de manejo A, caracterizado por empregar métodos tradicionais de

cultivo e sem disponibilidade de capital para aquisição dos fertilizantes necessários para a correção dos solos. As terras classificadas no Grupo 2, enquadradas nos Subgrupo descritos, estão numa condição intermediária, considerando o uso mais indicado – lavoura – pois apresentam dentre outras características, predomínio de valores médios e baixos de fertilidade natural.

- **Subgrupo 3 (abc)** - Aptidão Restrita nos níveis de manejo A, B e C – compreendem áreas constituídas pelos solos álicos ou distróficos, bem drenados, textura média em subsuperfície e, muitas vezes, textura arenosa na parte superficial, com relevo plano e suave ondulado, menos freqüentemente suave ondulado a ondulado. Possuem baixa reserva de nutrientes disponíveis às plantas e livre de sais tóxicos. Os riscos de erosão, quando existentes, podem ser controlados com práticas conservacionistas simples. As condições de relevo, profundidade, morfologia, ausência de pedregosidade, rochosidade e boa drenagem do solo, favorecem as práticas agrícola. A baixa disponibilidade de nutrientes nos solos é a maior limitação à utilização agrícola.
- **Grupo 6** – sem aptidão para o uso agrícola – compreende áreas constituídas de solos rasos, álicos, distróficos ou eutróficos, textura média ou argilosa. Com relevo forte ondulado, montanhoso ou escarpado. São áreas cujos solos apresentam limitações fortes quando a susceptibilidade à erosão e impedimentos ao uso de implementos agrícolas. São desaconselháveis ao uso agropecuário, devendo ser utilizadas como reserva ecologia, de proteção à flora e à fauna, ou para outros fins.
- Unidades de Mapeamento **TM1** – compreendem áreas constituídas de solos álicos, fortemente drenados, textura média, com relevo plano e suave ondulado, menos freqüentemente suave ondulado a ondulado, originados e arenitos. Possuem baixas a muito baixa reserva de nutrientes disponíveis às plantas de sais tóxicos. Os riscos de erosão, quando existentes, podem ser controlados com práticas conservacionistas simples. As condições de relevo, profundidade, morfologia, ausência de pedregosidade e rochosidade e boa drenagem do solo, favorecem as práticas agrícola. A baixa capacidade de retenção da água associada à baixa a muito baixa disponibilidade de nutrientes nos solos, são as maiores limitações à utilização agrícola. A granulometria com teores baixos e médios de argila aliado às propriedades morfológicas dos solos, permite uma percolação rápida a muito rápida da água, aumentando o período de deficiência hídrica, com prejuízo no desenvolvimento normal das plantas cultivadas. Os riscos de deficiência hídrica atingem uma proporção tal, que se torna temeroso a afirmativa de ser uma terra destinada à agricultura.

- Unidades de Mapeamento **TM2** – compreendem áreas de solos álicos ou distróficos, excessivamente drenado, textura arenosa, com relevo plano, suave ondulado ou suave ondulado a ondulado, originados de arenitos. Possui muito baixa reserva de nutrientes disponíveis às plantas. Os riscos de erosão, quando existentes, podem ser controlados com práticas conservacionistas simples. A muito baixa fertilidade natural associada à deficiência hídrica, soa as maiores limitações à utilização agrícola. A granulometria dos solos com teores de areia superiores a 85% não tem capacidade para reter os elementos nutritivos adicionados, além de permitir uma percolação muito rápida da água, condicionando um período de deficiência hídrica muito prolongada, com prejuízo no desenvolvimento normal das plantas cultivadas. A muito baixa fertilidade natural e os riscos de deficiência hídrica impedem a afirmação de ser uma terra destinada à pastagem plantada.

3.5 A ÁLGEBRA DE MAPAS PARA GERAÇÃO DO MODELO DA ESTABILIDADE DO SOLO

O termo “Álgebra de Mapas” é utilizado na literatura de geoprocessamento e sensoriamento remoto para denotar o conjunto de operadores que manipulam campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno) (BARBOSA, 1997). Estes procedimentos marcaram uma mudança importante na utilização de mapas, saindo de uma ênfase na descrição física do espaço para uma prescrição espacial, apropriada para o gerenciamento de ações (BERRY, 1991).

Neste contexto a álgebra de mapas pode ser importante na geração de cartas de vulnerabilidade conforme, CARRIJO (2005): “Vários pesquisadores têm utilizado a álgebra de mapas a partir de cruzamento de atributos bióticos e abióticos, atribuindo valores compensatórios para identificação de locais vulneráveis. A partir de simulações são produzidas “cartas de vulnerabilidade” com e sem ação antrópica e com diversas terminologias. Porém, o estudo da vulnerabilidade ainda não dispõe de uma sistemática consagrada, ou de modelos prontos, aplicáveis a diferentes situações”.

Para indicar o conjunto de procedimentos de análise espacial em geoprocessamento que produz novos dados, a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas, foi conceituado como álgebra de mapas por TOMLIN (1990). Concebe a análise espacial

como um conjunto de operações matemáticas sobre mapas, em analogia aos ambientes de álgebra e estatística tradicional. Os mapas são tratados como variáveis individuais e as funções definidas sobre estas variáveis são aplicadas de forma homogênea a todos os pontos do mapa. A álgebra de mapas compõe uma linguagem especializada para realizar operações que tem tanto um sentido matemático quanto cartográfico e espacial (BARBOSA, 1997).

As técnicas cartográficas *overlay mapping*, ou superposição de mapas, consistem em um conjunto de procedimentos para a confecção de uma série de cartas temáticas, uma para cada compartimento ambiental, que são utilizadas nos zoneamentos e gerenciamentos ambientais através da localização e avaliação da extensão de impactos, na determinação de aptidão e uso de solo, na detecção ou determinação de áreas de relevante interesse ecológico, cultural, arqueológico, sócio-econômico (CUNHA & GUERRA, 2000).

3.6 A VULNERABILIDADE NATURAL E AMBIENTAL.

A definição de vulnerabilidade possui ramificações ligadas às diversas aplicações e aspectos relacionados às áreas do conhecimento que as utilizam. Desta forma a vulnerabilidade pode ser entendida de formas distintas e complementares. As ciências sociais percebem a vulnerabilidade no âmbito da fragilidade social inerente as condições de vida de uma determinada população, sendo que aproxima-se mais da definição de risco, já outros pesquisadores, dentre os quais os geógrafos, tem utilizado o conceito de risco, sobretudo dos *hazards*, como sendo aqueles que não possuem origem puramente natural (MANDAROLA JR & HOOGAN, 2004). Tal linha teórica originada de estudos sobre desastres naturais e avaliação de risco, sob esta ótica a vulnerabilidade pode ser percebida como a relação entre o risco inerente a um determinado local (*hazard of place*), características e níveis de exposição da população que habita o local (CUTTER, 1994).

Segundo CUTTER (2003) a vulnerabilidade possui diferentes interpretações e significados dependendo do contexto a qual é aplicada, podendo ser caracterizada de diversas formas, desde a simplicidade abrangente de MITCHELL (1989): Potencial de perdas, até definições mais específicas como: Um conjunto de condições e processos resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, que aumentam a susceptibilidade de uma comunidade aos impactos do *hazard* (risco) UN (2002).

TAGLIANI (2003) considera vulnerabilidade ambiental como a susceptibilidade de um determinado impacto ambiental potencial, oriundo de atividade antrópica, avaliada segundo:

- Fragilidade estrutural intrínseca – condicionada por características inerentes ao substrato físico e que descrevem seus materiais, formas e processos, sintetizando suas relações. Os fatores de fragilidade estrutural analisados foram a declividade e a capacidade de uso dos solos.
- Sensibilidade – condicionada pela proximidade de ecossistemas sensíveis, os quais sustentam e mantêm inúmeras funções ambientais. Os fatores analisados foram a proximidade de recursos hídricos e a proximidade de comunidades vegetais sob proteção legal.
- Grau de maturidade dos ecossistemas – condicionada pelo tempo de evolução, uma das características que determinam a fragilidade relativa dos ecossistemas frente a perturbações antrópicas.

Os conceitos de vulnerabilidades natural e ambiental adotadas neste trabalho serão àquelas definidas e diferenciadas por GRIGIO (2003):

- A vulnerabilidade natural é intrínseca a região, sendo que apenas atributos como unidades geomorfológicas, geológicas, associações de solos, por exemplo, considerando o conceito de estabilidade, são utilizados no processamento da álgebra de mapas.
- A vulnerabilidade ambiental, além de considerar as características da região, apresenta informações inerentes a ação antrópica.

O modelo da estabilidade dos solos considera dois atributos da região e um atributo antrópico, configurando uma aplicação específica, portanto, de vulnerabilidade ambiental.

4. METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o Município de Costa Rica-MS, com aproximadamente 18.277 habitantes, uma área de 5.723 km² e uma economia baseada na agropecuária (IBGE, 2007).

O município fica a Oeste do Estado de Goiás e ao Sul do Estado de Mato Grosso. Mais precisamente nas coordenadas geográficas: 8°33'55''S e 53°07'50''W (Figura 4.1).

O clima é classificado como tropical úmido e quente (Aw segundo classificação de Köppen), com uma estação seca de maio a setembro. A temperatura média anual é 24,8°C, variando mensalmente entre 13,4°C (julho) e 31,4°C (novembro). A precipitação pluvial anual é de 1.929 mm, e 88% deste total ocorrem na estação chuvosa (BAYER et. al., 2004)

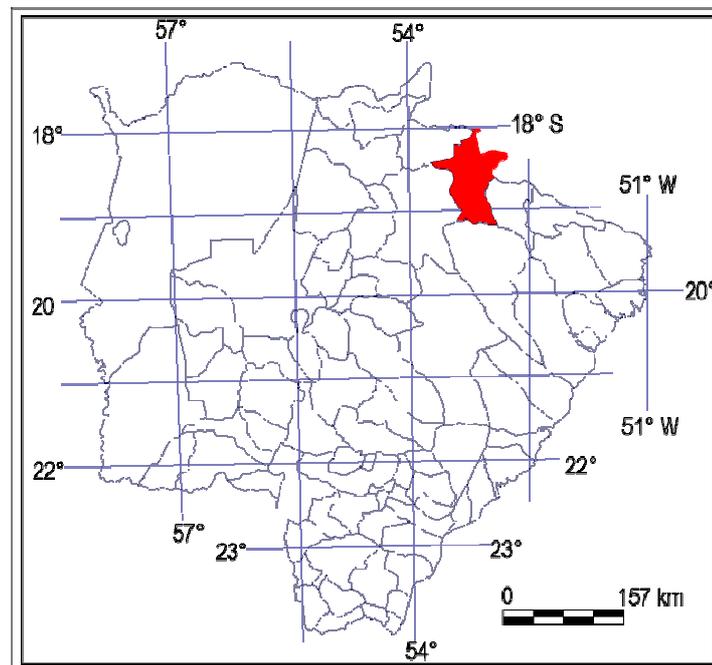


Figura 4.1 – Localização do Município de Costa Rica – MS, área de estudo.

4.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DOS DADOS DA ÁREA DE ESTUDO EM AMBIENTE SIG

4.2.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS DIGITAIS E BASES CARTOGRÁFICAS NECESSÁRIAS

Os dados digitais obtidos são as imagens de satélite e o modelo digital de elevação SRTM, os quais foram obtidos através do sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do sítio do JPL da NASA, respectivamente. Foram utilizadas as cenas *Landsat 5 TM* de 20 de julho de 2008, órbita ponto 224/073 e as “cenas” S19W053 a S19W055 e S20W053 a S20W054 do modelo SRTM (versão 2).

As bases cartográficas da carta de aptidão dos solos foram obtidas do Atlas Multirreferencial do Estado de Mato Grosso do Sul (MS, 1990).

No levantamento de campo foram obtidos ainda dados via GPS: trilhas e pontos de controle.

Toda a base de dados foi georreferenciada no *datum* Córrego Alegre, fuso 22 (54°W – 48°W) e hemisfério Sul.

4.2.2 TRATAMENTO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM

O modelo digital de elevação SRTM possui um potencial de melhoramento da resolução espacial, já validado por VALERIANO (2004). Assim sendo, realizar o procedimento de interpolação torna ainda mais valiosa a informação altimétrica do modelo SRTM.

A interpolação foi realizada utilizando a metodologia também descrita por VALERIANO (2002) e aplicada por TORRES (2008) no Estado de Mato Grosso do Sul. A metodologia consiste na reamostragem da resolução espacial de 90 metros para 30 metros, utilizando a *krigagem* como interpolador.

Esta reamostragem consistiu na modelagem de semivariogramas, utilizando três modelos experimentais disponíveis para aplicação no pacote Geomatica (PCI, 2007). Os modelos esférico, exponencial e gaussiano foram ajustados experimentalmente no *software* VarioWin (PANNATIER, 1996), com base nos melhores ajustes, o modelo correspondente a moda foi utilizado, e os parâmetros de *krigagem*: efeito pepita (*nugget effect*), patamar (*sill*) e alcance (*range*) do melhor modelo foram obtidos através da aplicação da média simples, daqueles semivariogramas que melhor se ajustaram.

Com os dados SRTM reamostrados para 30 metros foi possível gerar a Carta de Declividade, utilizando o algoritmo SLP no pacote Geomatica (PCI, 2007).

4.2.2.1 A REAMOSTRAGEM DOS DADOS SRTM

Os dados SRTM originais foram obtidos a partir do servidor FTP do JPL da NASA e foram reamostrados através da *krigagem*, utilizando a metodologia de VALERIANO (2004) aplicada por TORRES (2008). Através da seleção de amostras sistemáticas e aleatórias, definidas numa grade regular de 10 km na malha UTM, as amostras de 30x30 *pixels*, foram obtidas no canto superior esquerdo de cada célula dessa grade, conforme apresentado na figura 4.2. O tamanho das amostras foi limitado pelo VarioWin que processa até 1.000 informações a cada vez, portanto $30 \times 30 \text{ pixels} = 900 \text{ pixels}$.

De posse das amostras, os valores de coordenadas e de altimetria foram extraídos para um arquivo ASCII, no módulo OrthoEngine (PCI, 2007). Nelas foram adicionadas linhas de cabeçalho padrão, indicando na primeira linha o título do trabalho, na segunda o número de colunas e nas subseqüentes os nomes das colunas, figura 4.3, para que fossem transformadas em arquivos com extensão “.dat”, compatível com o módulo Prevar2D do pacote VarioWin (PANNATIER, 1996). Gerando um arquivo “.pcf” – *pair comparison file*, que será utilizado no módulo VARIO2D (PANNATIER, 1996) para calcular o semivariograma, gerando um arquivo com extensão “.var”. No módulo MODEL (PANNATIER, 1996) os arquivos “.var” são lidos e a modelagem ocorre de acordo com os modelos experimentais, figura 4.4.

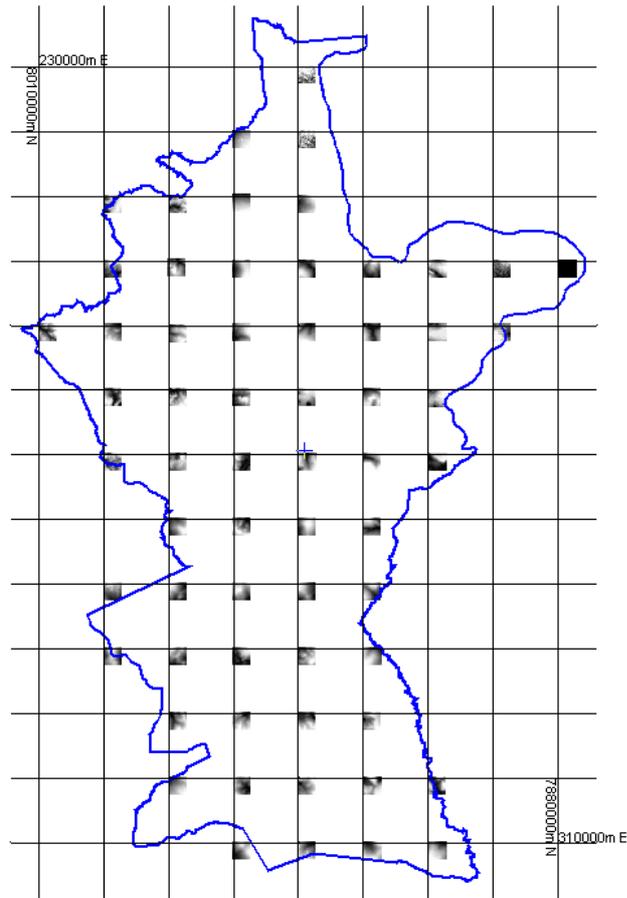


Figura 4.2 – Localização das amostras sistematicas aleatórias do SRTM de 90 metros, cada amostra contém 30x30 pixels

```

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
Kriggagem SRTM Costa Rica - MS
3
E-w
N-S
SRTM
270006.029915 7999999.479534 883.000000
270096.029816 7999999.479534 882.000000
270186.029718 7999999.479534 882.000000
270276.029620 7999999.479534 883.000000
270366.029522 7999999.479534 881.000000
270456.029424 7999999.479534 883.000000
270546.029326 7999999.479534 883.000000
270636.029228 7999999.479534 884.000000
270726.029130 7999999.479534 883.000000
270816.029032 7999999.479534 884.000000
270906.028934 7999999.479534 883.000000
270996.028835 7999999.479534 880.000000
271086.028737 7999999.479534 881.000000
271176.028639 7999999.479534 882.000000
271266.028541 7999999.479534 882.000000
271356.028443 7999999.479534 883.000000

```

Figura 4.3 – Arquivo ASCII com cabeçalho padrão

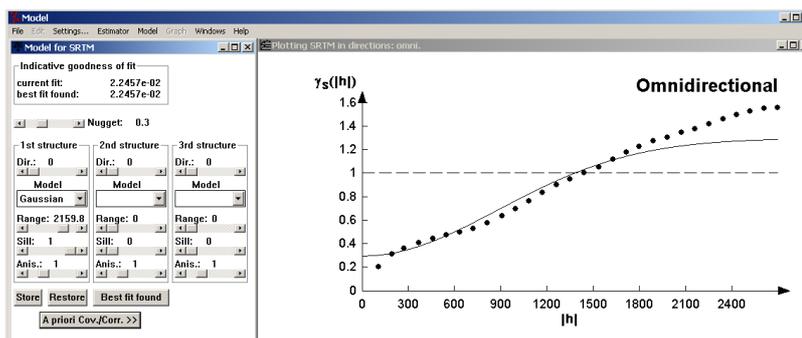


Figura 4.4 – Modelagem do semivariograma padronizado

A seleção do semivariograma foi a partir do modelo correspondente a moda do conjunto de amostras e dentre os modelos esférico, gaussiano e exponencial. A partir da seleção do modelo, a próxima etapa foi selecionar as amostras que apresentaram melhor ajuste e calcular a média dos parâmetros efeito pepita, patamar e alcance. Os semivariogramas modelados estão no APENDICES A e B. A determinação dos modelos experimentais utilizados para o cálculo dos parâmetros médios foi com base naqueles que apresentaram os melhores ajustes, com valores maiores ou iguais a 99% .

O modelo experimental correspondente a moda foi o gaussiano, com os seguintes parâmetros:

- Efeito pepita: 0,061986
- Patamar: 1,000000
- Alcance: 1004,52

4.2.3 A GERAÇÃO DA CARTA DE DECLIVIDADE

A Carta de Declividade foi elaborada através da entrada dos dados do modelo digital de elevação SRTM no pacote Geomatica (PCI, 2007) no qual utilizou-se o algoritmo SLP.

O algoritmo SLP é detalhado no arquivo de ajuda do Geomatica (PCI, 2007) da seguinte maneira: ele calcula a rampa da superfície para cada *pixel* de um “canal” (*layer*) de elevação armazenada na base de dados do arquivo para calcular os ângulos correspondentes de rampa. A rampa é calculada como a do plano formado pelo vetor que conecta os vizinhos a esquerda e a direita e o vetor que conecta os vizinhos acima e abaixo do *pixel*, através do vetor normal calculado. Sendo que os valores de rampa sempre irão atingir valores entre 0 e

90 graus. Os parâmetros de entrada pelo usuário são: PXSZ (*pixel size*, tamanho do *pixel*) nesse caso igual a 30 metros e ELSZ (*elevation size*, escala da elevação) nesse caso igual a 1 metro.

Para cada *pixel* $p = (px, py, pz)$ são definidos px, py como a localização do *pixel* (linha e coluna) e o pz como o valor de elevação.

Os vizinhos imediatos de p são a, b, c, d (figura 4.5)

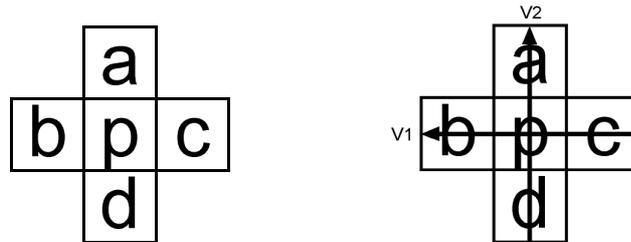


Figura 4.5 – *Pixel* central “ p ”, para o qual será calculada a rampa e s vetores $V1$ e $V2$, formados com os *pixels* vizinhos.

Onde:

$a = (px, py-1, az)$, $b = (px-1, py, bz)$, etc...

De posse dos vetores $V1$ e $V2$ é calculado o vetor normal ao plano formado por ambos os vetores, através da aplicação do produto vetorial (figura 4.6):

$N = V1 \times V2 = (-dy*dzx, -dx*dzy, dx*dy) = (nx, ny, nz)$.

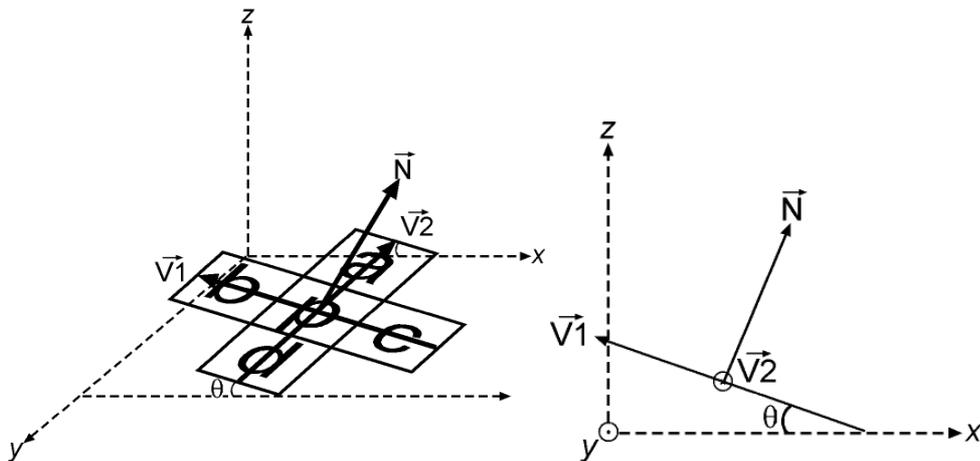


Figura 4.6 – Vetor normal, aos vetores $V1$ e $V2$, que está inclinado em relação ao plano xy representação tridimensional e representação bidimensional.

O seno do ângulo entre o vetor normal e o plano horizontal “ xy ” é calculado como:

$$\text{Sen } \theta = \frac{nz}{\sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2}}$$

Da trigonometria:

rampa plana = (90 – rampa da normal)

Assim o ângulo de rampa para o *pixel* pode ser calculado como:

$$\text{Rampa (slope)} = \arccos\left(\frac{nz}{\sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2}}\right)$$

Desta forma o algoritmo gera a Carta de Declividade, calculando para todos os *pixels* a rampa predominante.

4.2.3.1 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE DECLIVIDADE

As classes finais de declividade foram adaptadas de CREPANI *et al.* (2001):

Tabela 4.1 – Classes de declividade adotadas

Classe	Declividade %	Classificação
1	0 – 6	Suave
2	6 – 12	Suave – mecanizável
3	12 – 45	Mecanizável – limite APP
4	>45	APP

O estabelecimento dos pesos também foi adaptado de CREPANI *et al.* (2001), tabela 4.2, os valores de referência dos pesos foram aplicados e testados, até que se percebesse um melhor ajuste, tendo como referência as informações do levantamento de campo, possibilitando assim a estimativa dos pesos.

Tabela 4.2 – Pesos das classes de declividade e suas vulnerabilidades

Classe	Peso	Vulnerabilidade (MES)	Grau de Vulnerabilidade (CREPANI, 2001)
1	1,0	Baixa	Estável
2	1,5	Média	Moderadamente estável
3	2,5	Alta	Moderadamente vulnerável
4	3,0	Muito Alta	Vulnerável

4.2.4 A CARTA DE APTIDÃO DOS SOLOS

A Carta de Aptidão dos Solos da área de estudo encontrava-se disponível no acervo do Laboratório de Geoprocessamento para Aplicações Ambientais da UFMS. Todavia sua

digitalização será brevemente descrita. A primeira etapa foi a digitalização da carta na escala 1:1.000.000, do Atlas Multireferencial de Mato Grosso do Sul (MS, 1990), posteriormente procedeu-se sua correção geométrica, para corrigir as prováveis distorções oriundas do processo de digitalização, ou até mesmo da dilatação/contração do papel.

A partir da imagem corrigida geometricamente, efetuou-se a vetorialização dos contatos da aptidão dos solos, gerando-se os polígonos, cada qual com o atributo “classe_APT”, conforme apresentado na figura 4.7.

ShapeID	Area (sq km)	Perimeter (m)	Classe_APT
0	159.89091	184153.96	2(a)bc
1	718.87961	330123.29	2(a)bc
2	202.88578	196273.28	6
3	167.46776	344452.69	6
4	3.1406372	7368.7447	6
5	121.85503	134169.29	6
6	1.5392167	7783.0185	6
7	0.73071097	4485.3898	6
8	0.001177623	231.08778	6
9	0.085745289	1691.6529	6
10	7.4146444	19349.653	6

Figura 4.7 – Tabela de atributos de cada polígono com a classe de aptidão dos solos.

As classes de aptidão dos solos tiveram como referência geral a classificação de CREPANI *et al.* (2001), todavia os critérios de aptidão agrícola dos solos possuem outro enfoque, mas também trazem informações sobre a estrutura dos mesmos. Desta forma foram definidas as seguintes classes de acordo com os solos presentes na área de estudos, tabela 4.3, para isto foram feitas tentativas de proporções dos pesos, até que se tivesse o melhor ajuste, de acordo com a realidade de campo, o que caracteriza a mudança de amplitude dos pesos das classes em relação àquelas de declividade, que eram de 0,5.

Tabela 4.3 – Classes da Aptidão dos solos, pesos e vulnerabilidades

Classe	Aptidão dos solos	Peso	Vulnerabilidade (MES)	Grau de Vulnerabilidade CREPANI et. Al. (2001)
1	1 AB(c)-	1.0	Baixa	Estável
2	2 (a)bc	1.5	Baixa	Moderadamente estável
3	3 (abc)	2.5	Alta	Moderadamente vulnerável
4	6	2.8	Muito Alta	Vulnerável
5	TM1	2.9	Muito Alta	Vulnerável
6	TM2	3.0	Muito Alta	Vulnerável

4.2.5 A APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL PARA A OBTENÇÃO DA IMAGEM FRAÇÃO VEGETAÇÃO

Para aplicação do modelo linear de mistura espectral foi obtida das bases do INPE uma imagem *Landsat 5 TM* do dia de 20 de julho de 2008, órbita ponto 224/073 (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>). A mesma foi georreferenciada com base em uma imagem *Landsat 5 TM* ortocorrigida obtida do *Global Land Cover Facility* (GLCF), utilizando o método apresentado por TORRES *et al.* (2008).

A partir da obtenção da imagem foi necessário a implementação de um arquivo de metadados, contendo informações sobre o perfil de resposta espectral das bandas do sensor, requisito restritivo para que o algoritmo SPUNMIX do pacote Geomatica (PCI, 2003) seja executado.

4.2.5.1 A CONSTRUÇÃO DO ARQUIVO DE METADADOS

O arquivo de metadados requerido para ser inserido no arquivo da imagem *Landsat 5 TM* era do tipo “.xml”, tais arquivos são comuns na programação web, não sendo exatamente aplicativos, mas sim, um conjunto de instruções a serem seguidas para que um aplicativo seja executado.

Os arquivos “.xml” possuem um modelo estrutural das instruções, mostrando a ordem e hierarquia de como devem ser montados, tais arquivos são os “.xsd” (*xml schema data*). A partir do arquivo “PCImageMetadata.xsd”, disponível no diretório %root\PCI\etc, local de instalação do pacote geomatica, é possível se criar o arquivo de metadados requerido. Os dados essenciais a serem inseridos no arquivo são referentes aos comprimentos de onda de cada banda do sensor, dadas em nanômetros, conforme apresentado na figura 4.8. São inseridos o centro do comprimento de onda (*centre*) e o intervalo do comprimento de onda (*full-width at half-maximum* – FWHM) para cada banda.

```

<Band>
  <StorageChannel>1</StorageChannel>
  <ID>1</ID>
  <Quality>plot</Quality>
  <ResponseProfile>
    <Type>gaussian</Type>
    <Centre>485</Centre>
    <FWHM>70</FWHM>
  </ResponseProfile>
</Band>
<Band>
  <StorageChannel>2</StorageChannel>
  <ID>2</ID>
  <Quality>plot</Quality>
  <ResponseProfile>
    <Type>gaussian</Type>
    <Centre>560</Centre>
    <FWHM>40</FWHM>
  </ResponseProfile>
</Band>
<Band>
  <StorageChannel>3</StorageChannel>
  <ID>3</ID>
  <Quality>plot</Quality>

```

Figura 4.8 – Parte do arquivo de metadados inserido na imagem *Landsat 5 TM*

A partir da montagem do arquivo de metadados, utilizando o algoritmo METAIN do geomatica, é possível inserir os dados no arquivo da imagem *Landsat 5 TM*, conforme apresentado na figura 4.9 o metadado da banda 1 do sensor TM.

	Name	Value
1	LAYER_CRC	0x47bd
2	ID	1
3	Quality	plot
4	ResponseProfile_Type	gaussian
5	ResponseProfile_Centre	485.000
6	ResponseProfile_FWHM	70.000

Figura 4.9 – Propriedades da banda 1, com metadados inseridos

4.3 A APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL PARA A OBTENÇÃO DA IMAGEM FRAÇÃO VEGETAÇÃO (SPUNMIX)

Para que seja aplicado o algoritmo do modelo linear de mistura espectral SPUNMIX é necessária a construção de uma biblioteca espectral contendo amostras dos *endmembers* que se deseja separar. Para isto se utiliza a ferramenta *spectra extraction* no módulo *focus* do pacote Geomatica (PCI, 2007), tal ferramenta permite a seleção de *pixels* puros para a criação da biblioteca espectral, selecionando visualmente as amostras de cada componente, o que pode apresentar-se subjetivo de acordo com a experiência do intérprete. Neste caso foram selecionadas amostras de vegetação, solo exposto e sombra/água.

A imagem fração vegetação é constituída de *digital numbers* que variam de 0 a 1, sendo as frações de cobertura vegetal presentes na imagem, análoga a uma escala percentual.

A partir da imagem fração vegetação procedeu-se a determinação das classes que seriam utilizadas. Para isto foi utilizado como referência as classes de RIBEIRO & WALTER (1998), conforme descritas por GAMARRA (2008) da seguinte forma:

- Mata Ciliar: As árvores variam em altura de 20 a 25 metros em média. Ao longo do ano as árvores fornecem uma cobertura arbórea variável de 50 a 90%. Na estação chuvosa a cobertura chega a 90%, dificilmente ultrapassando este valor, ao passo que na estação seca pode até mesmo ser inferior a 50% em alguns trechos
- Mata Seca: A altura média do estrato arbóreo varia entre 15 e 25 metros. Na época chuvosa as copas tocam-se fornecendo uma cobertura de dossel entre 70 a 95%. Na época seca a cobertura pode ser inferior a 50%.
- Cerradão: Dossel predominantemente contínuo e cobertura arbórea que pode oscilar de 50 a 90%. A altura média do estrato arbóreo varia de 8 a 15 metros, proporcionando condições de luminosidade que favorecem à formação de estratos arbustivo e herbáceo diferenciados.
- Cerrado típico: Subtipo de vegetação predominantemente arbóreo-arbustivo, com cobertura arbórea de 20% a 50% e altura média de três a seis metros
- Cerrado denso: O Cerrado Denso é um subtipo de vegetação predominantemente arbóreo, com cobertura de 50% a 70% e altura média de cinco a oito metros. Os estratos arbustivo e herbáceo são mais ralos, provavelmente devido ao sombreamento resultante da maior densidade de árvores.
- Campo limpo verde baixo (pasto): Tanto o Campo Limpo como o Campo Sujo apresentam variações dependentes de particularidades ambientais, determinadas pela umidade do solo e topografia. Na presença de um lençol freático profundo ocorre o

Campo Limpo Seco, mas se o lençol freático é alto, há o Campo Limpo Úmido, cada qual com sua flora específica.

A opção da referência se justifica por apresentar percentuais de cobertura vegetal de cada uma das classes, o que implica na relação direta com a imagem fração vegetação, ou seja, os percentuais desta e os de cobertura de cada fitofisionomia podem ser adotados para a criação das classes de vulnerabilidade de forma direta. Para o MES utilizou-se a seguinte classificação:

Tabela 4.4 – Classes de cobertura

Classe	Percentual de cobertura
1	0 – 20%
2	20% – 50%
3	>50%

A seleção de tais classes de vulnerabilidade para este fator se justificam pelo fato da fitofisionomia que apresenta menor percentual de cobertura ser o cerrado com vinte por cento, ou seja, adotou-se o cerrado como o limiar da estabilidade dada pela proteção da cobertura vegetal ao solo, reduzindo a energia cinética proveniente das gotas de chuva. Formações com percentual de cobertura acima de cinquenta por cento apresentam árvores que variam de 5 a 25 metros, fazendo com que o efeito *splash* da energia cinética seja quase que completamente absorvido.

O estabelecimento dos pesos se deu da seguinte forma:

Tabela 4.5 – Pesos das classes de cobertura e respectivas vulnerabilidades

Classe	Peso	Vulnerabilidade (MES)	Grau de Vulnerabilidade CREPANI et. Al. (2001)
1	3,0	Muito Alta	Vulneravel
2	2,0	Média	Medianamente vulnerável / estável
3	1,0	Baixa	Estável

4.4 O MODELO DA ESTABILIDADE DOS SOLOS

Nos casos em que se deseja avaliar o zoneamento ambiental de um município, ou microregião é necessária uma estimativa qualitativa para que sirva de sustentação ao zoneamento no intuito de localizar as áreas mais coerentes aos empreendimentos que se deseja implantar, neste contexto surge à proposta do Modelo da Estabilidade dos Solos

(MES), partindo da sobreposição dos planos de informações de aptidão de solos, declividade e cobertura vegetal (imagem fração vegetação).

O modelo da estabilidade dos solos é uma proposta metodológica para outra forma de avaliação das áreas mais vulneráveis/estáveis à ação erosiva, alternativa a USLE, quando não imprescindível a quantificação estimada da carga de sedimentos. Esta utilizará analogamente a USLE os seguintes parâmetros:

- Aptidão dos solos (AS) em alternativa ao fator K (erodibilidade dos solos);
- A declividade (SLP) em alternativa ao fator topográfico LS (rampa e declividade)
- Imagem fração de percentual de cobertura vegetal (IFV) em alternativa aos fatores C (uso e manejo do solo) e P (práticas conservacionistas).
- Considerando o tamanho da área de estudo, o fator R (erosividade da chuva) foi considerado homogêneo para toda a área de estudo.

Desta forma, analogamente a USLE (WISCHMEIER & SMITH, 1978), ter-se-á:

(figura 4.10):

$$\begin{array}{l} \text{USLE} \\ \text{MES} \end{array} = f \left(\begin{array}{l} \text{K}, \\ \text{AS}, \end{array} \begin{array}{l} \text{L}, \text{S}, \\ \text{SLP}, \end{array} \begin{array}{l} \text{C}, \text{P}, \\ \text{IFV} \end{array}, \text{R} \right)$$

Figura 4.10 – Analogia entre USLE e MES

Todavia a aplicação não se dá de forma direta, sendo que a estabilidade dos solos é função das variáveis espaciais determinadas e modeladas individualmente. A aplicação utilizará pesos para cada um dos fatores (AS, SLP e IFV) e através da álgebra de cartas se definirá qualitativamente um indicador da vulnerabilidade a perda de solos. Este é escalonado, de acordo com a vulnerabilidade, da seguinte forma: baixa, média, alta e muito alta. Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Classes de vulnerabilidade do MES

Vulnerabilidade	Média dos Pesos (MES)
Baixa	1,0 – 1,5
Média	1,5 – 2,0
Alta	2,0 – 2,5
Muito Alta	2,5 – 3,0

Atribuídos os pesos a cada um dos níveis de informação: aptidão dos solos, vegetação da imagem fração e declividade, para gerar o modelo, procede-se com a álgebra de mapas

(*overlay*) dos planos de informação (PI), unindo os polígonos de cada um. Para este modelo foi atribuído peso unitário para cada PI, sendo o modelo calculado como (figura 4.11):

$$\text{MES} = (1 \times \text{APT.DOS SOLOS} + 1 \times \text{DECLIVIDADE} + 1 \times \text{VEGETAÇÃO-IFV})/3$$

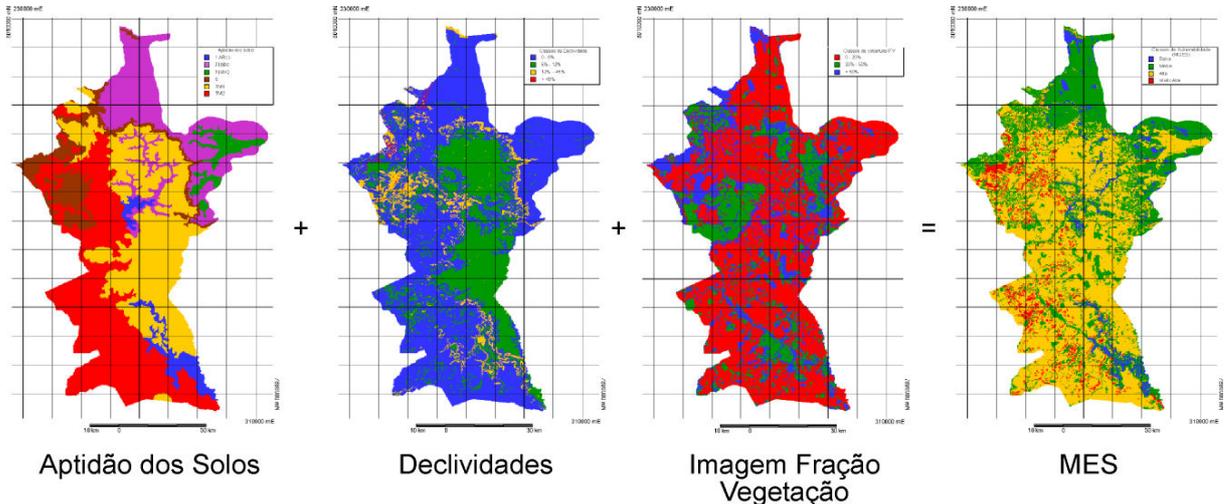


Figura 4.11 Ilustrativo da composição do MES – na realidade, com pesos iguais no modelo, foi utilizada a média entre os valores de aptidão dos solos, declividade e imagem fração vegetação.

4.5 ZONEAMENTO DA ESTABILIDADE AMBIENTAL

O zoneamento é o produto final que irá classificar as áreas de acordo com sua estabilidade, após a validação do modelo em campo. O zoneamento terá caráter de simples inteligibilidade, sendo claro e objetivo, utilizando uma escala de cores ordinária e de fácil associação, fazendo que o zoneamento se torne uma ferramenta importante e principalmente prática para a tomada de decisão.

4.5.1 ESTABILIDADE AMBIENTAL

A escala de vulnerabilidade a partir de sua caracterização morfodinâmica, adotada foi adaptada dos princípios da Ecodinâmica de TRICART (1977) que estabelece as categorias morfodinâmicas :

- Meios estáveis:
 - cobertura vegetal densa (cobertura vegetal >50%);

- solo com boa aptidão; e
- declividade de até 6%, que representam o limite inferior dos pesos de declividade
- Meios intergrades:
 - balanço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas. Considerados como sendo aqueles de vulnerabilidade intermediária, ou seja, os que não estão nos extremos.
- Meios vulneráveis:
 - Cobertura vegetal esparsa, menor que 20%
 - relevo com declividade acima de 45% ;
 - presença de solos rasos;

O conceito de estabilidade adotado, portanto, reflete a escala qualitativa de vulnerabilidade à perda de solo e é baseado nos princípios da Ecodinâmica de TRICART (1977), ou seja, são atribuídos valores, de forma relativa e empírica, segundo a avaliação do estágio de evolução morfodinâmica resultado dos processos de morfogênese (processos erosivos modificadores das formas de relevo) e/ou pedogênese (processos formadores de solo). Consiste na avaliação da susceptibilidade da unidade de paisagem a ser degradada, sofrendo modificações de suas características.

A escala de vulnerabilidade adotada foi a de CREPANI et. al.(2001):

Tabela 4.6 – Escala de Estabilidade (CREPANI et. al., 2001)

Categoria morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	Peso
Estável	Prevalece a Pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio Pedogênese/Morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a Morfogênese	3,0

4.6 CONTROLE DE CAMPO

Os trabalhos de campo serviram para que se pudesse ter uma estimativa da validade do modelo de acordo com a realidade. Como já citado, uma das importantes conclusões resultantes desta etapa, foi a percepção da necessidade de maior detalhamento das classes de declividade.

Anteriormente ao controle de campo foi elaborado um modelo preliminar e a partir deste foram selecionadas áreas de interesse e as mesmas foram visitadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que a economia do Estado de Mato Grosso do Sul tem como eixo principal a atividade agropecuária e que possui cerca de 56% de pastagens em diferentes estágios de degradação (EMBRAPA, 2006), a aplicação das técnicas de geoprocessamento no intuito de mapear as áreas degradadas ou em processo de degradação ou ambientalmente vulneráveis, pode ser muito útil na gestão e no planejamento dos rumos das atividades agropecuárias e industriais no Estado, em especial no Município de Costa Rica – MS, área de estudo.

5.1 A REAMOSTRAGEM DOS DADOS SRTM

A interpolação mostrou-se muito coerente e dependendo do zoom de tela aplicado na visualização é possível perceber a melhora na suavidade dada pelo aumento da resolução espacial. Todavia, com a aplicação de zoom de tela de maior detalhamento, foi possível observar que o processo de interpolação criou artefatos regulares com formatos aproximados de quadrados, para remover tais ruídos foi aplicado um filtro gaussiano, ferramenta do próprio pacote Geomatica (PCI, 2007).

A figura 5.1 apresenta à esquerda o MDE de resolução espacial de 30x30 bruto, produto da *krigagem*, e à direita o MDE após a aplicação de um filtro gaussiano.

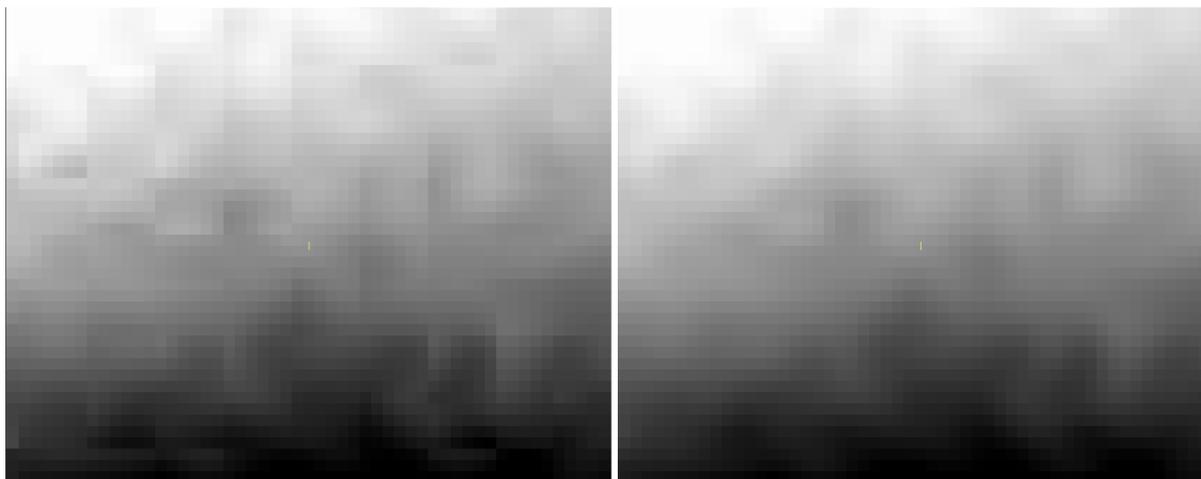


Figura 5.1 – Zoom de tela de 8x. do DEM SRTM reamostrado para 30 metros

5.2 CARTA DE DECLIVIDADE

As Cartas de Declividade foram geradas a partir do SRTM de noventa e trinta metros. Comparando as declividade das cartas foi possível perceber que o DEM de trinta metros de resolução espacial gerou uma carta de declividade mais “suave”, figuras 5.2 e 5.3, aumentando a discretização dos valores, pois foram gerados valores de declividade com precisão de duas casas após a virgula e valores inteiros para o DEM de noventa metros.

O perfil mostra a suavização dos dados figura 5.3. Os histogramas de frequência mostram a distribuição estatística das cartas, ou seja, a estatística de todos os *digital numbers* da carta, figura 5.4. É possível observar que houve aumento de todos os parâmetros: média, do desvio padrão, mediana e do valor máximo de declividade, devido a “divisão” da declividade, que apesar de ser suavizada, apresenta valores maiores de declividade, ocasionados pelo aumento de *pixels*.

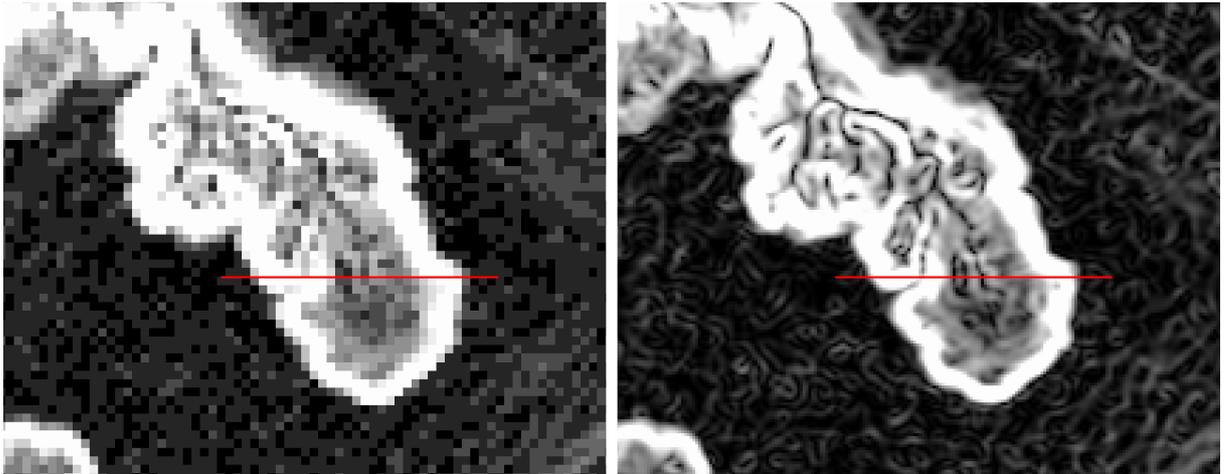


Figura 5.2 – zoom de tela de 4x da Carta de Declividade, a esquerda a de 90 metros e a direita a de 30 metros de resolução espacial. Ambas com o corte que gerou o perfil em magenta.

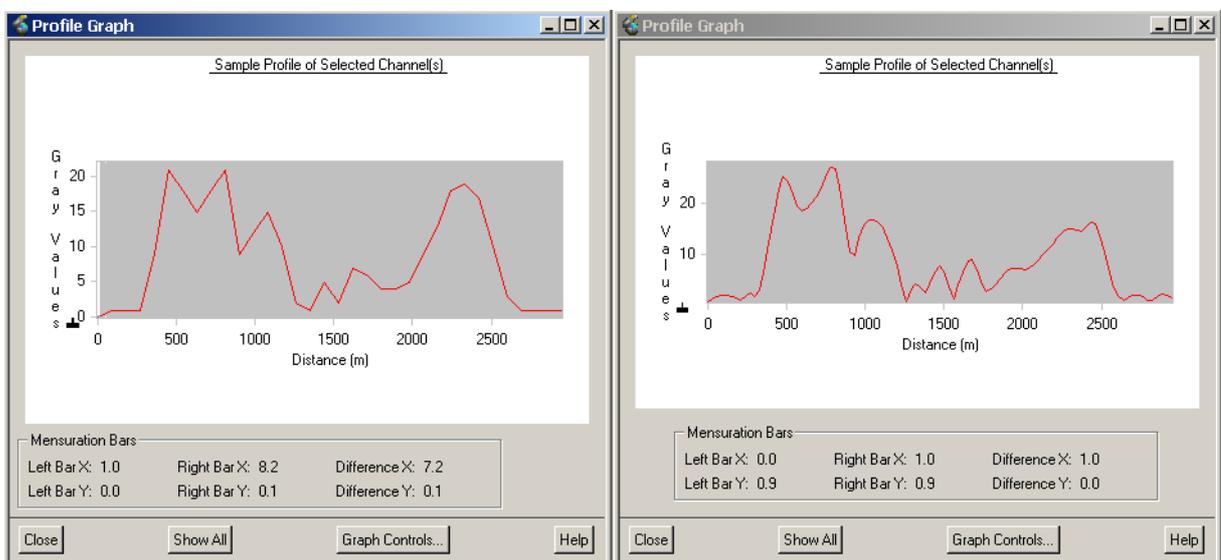


Figura 5.3 – Perfil de declividades, a esquerda a Carta de Declividades de 90 metros e a direita 30 metros de resolução.

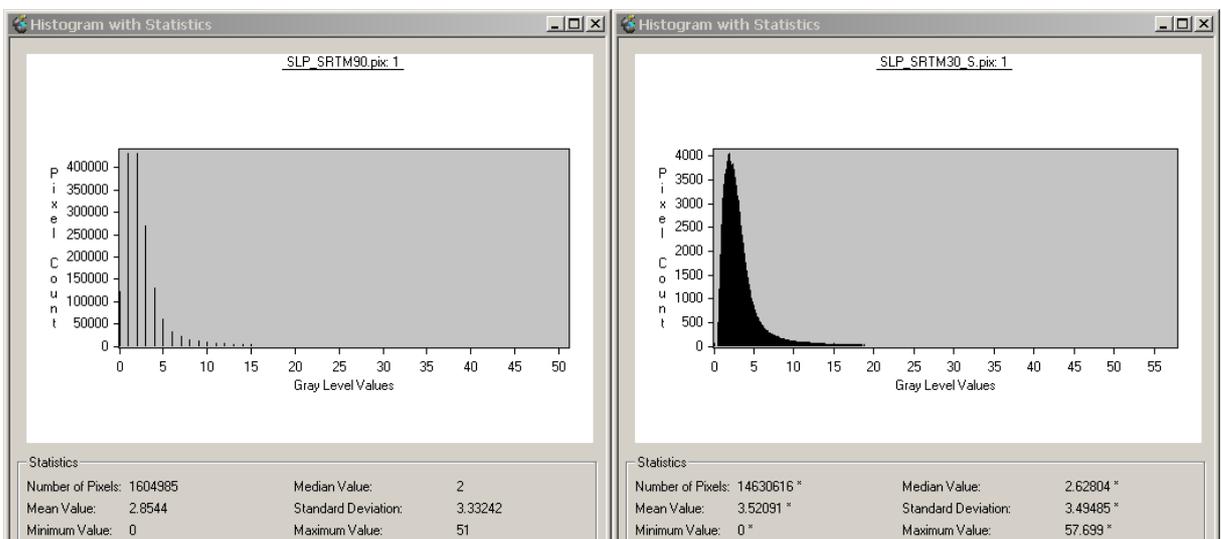


Figura 5.4 – Histogramas das Cartas de Declividade. A esquerda 90 metros e a direita 30 metros de resolução. O asterisco representa a estatística estimada, causada pelo grande volume de dados (PCI, 2007)

5.2.1 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE DECLIVIDADE

Preliminarmente foram adotados os critérios de divisão da seguinte forma:

Tabela 5.1 – Classes de declividade preliminar

Classe	Declividade %
1	0 – 12
2	12 – 45
3	>45

Os limites das classes foram estimados com base na declividade limite de manejo mecanizável do solo, de 12 a 45%, e abaixo do limite determinado pelo “Código Florestal” como sendo área de preservação permanente (APP), (BRASIL, 1965).

Todavia no controle de campo pode-se notar a influência de uma classe intermediária na classe 1. O indicador desta classe foi da predominância dos outros fatores do MES, aptidão do solo e imagem fração vegetação, sendo que todos os fatores possuíam o mesmo peso, pois a influência do relevo era pouca ou nenhuma nas áreas observadas. Conhecida a ausência de uma classe, a mesma foi inserida, gerando a nova classificação. Tabela 4.2

A figura 5.5, mostra o percentual de área de cada classe, a “classe 2”, criada para o modelo final, cobre 28,39% da área, apresentando-se assim como a segunda em percentual de área, imprescindível na aplicação do modelo.

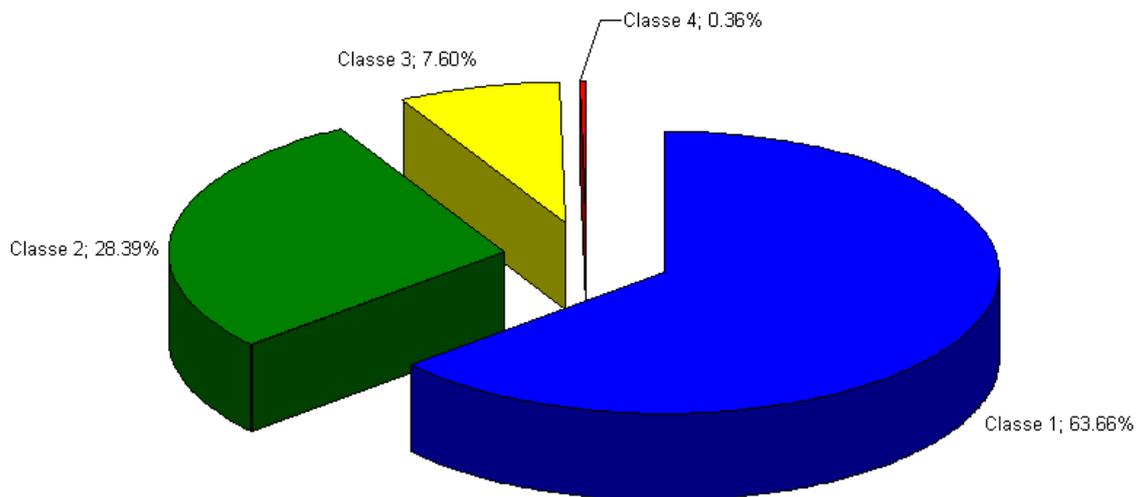


Figura 5.5 – Distribuição em percentual de área das classes adotadas.

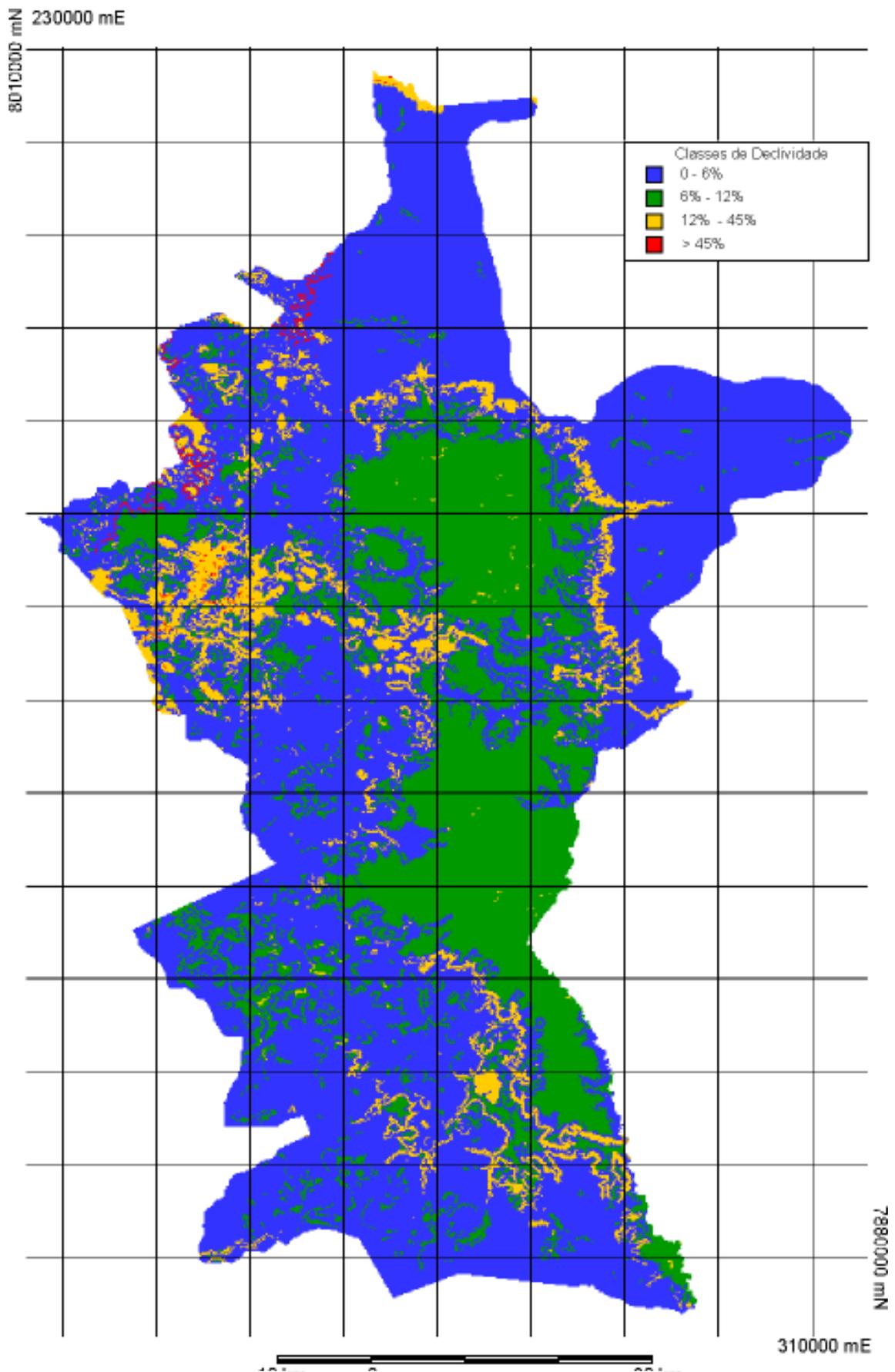


Figura 5.6 – Carta de Declividade

5.3 A APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL PARA A OBTENÇÃO DA IMAGEM FRAÇÃO VEGETAÇÃO

Os resultados obtidos para a cena *Landsat 5 TM*, utilizando todas as bandas para a criação das imagens fração são apresentados na figura 5.7.

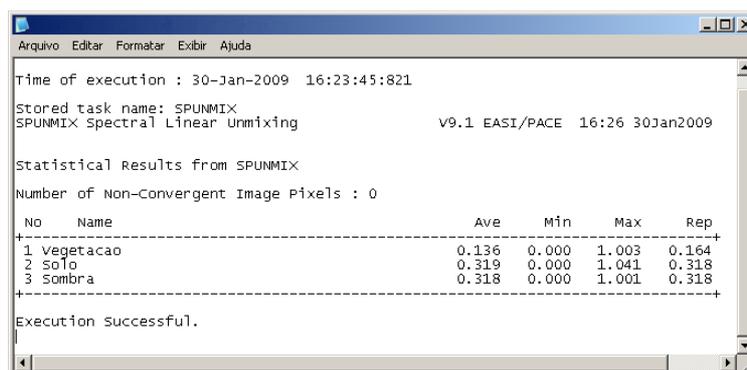


Figura 5.7 – Relatório do algoritmo SPUNMIX.

Tais informações apresentam as frações de cada componente puro, sendo que apenas aproximadamente 16,40 % dos *pixels* da cena é coberta inteiramente por vegetação, ou seja, são representados por *endmembers* vegetação.

Observado o percentual de área ocupada por cada uma das classes de cobertura determinadas, figura 5.8, é possível se observar a grande predominância de áreas de pastagens. A quantificação destas áreas mostra uma situação alarmante, já que mais de sessenta por cento da área de estudo encontra-se com densidade de vegetação abaixo de vinte por cento. Considerando ainda que a maior parte das áreas da classe 3 são de APP's de hidrografia, a vegetação correspondente a reserva legal, contida na classe 2, ainda assim não é respeitada, visto que algumas áreas de cultivo foram discriminadas como sendo da classe 2, devido a sua resposta espectral na data do imageamento. Cabe ressaltar que estas não foram excluídas da classe, pois, uma área cultivada também absorve parte da energia cinética das chuvas.

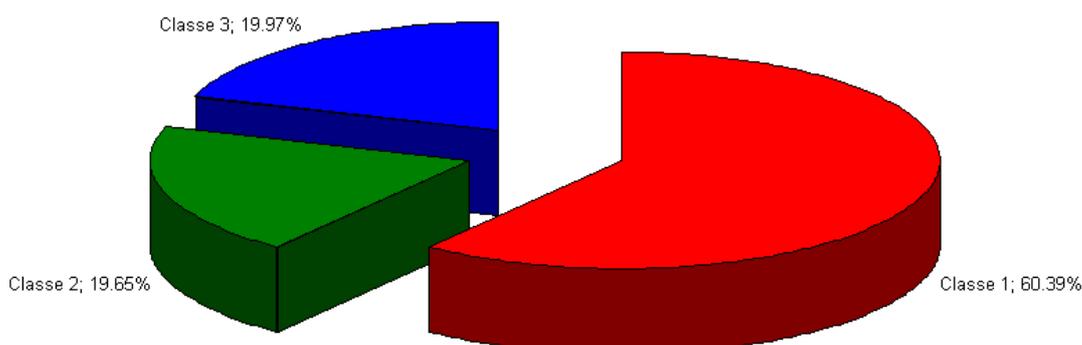


Figura 5.8 – Distribuição percentual de área de cada classe de cobertura.

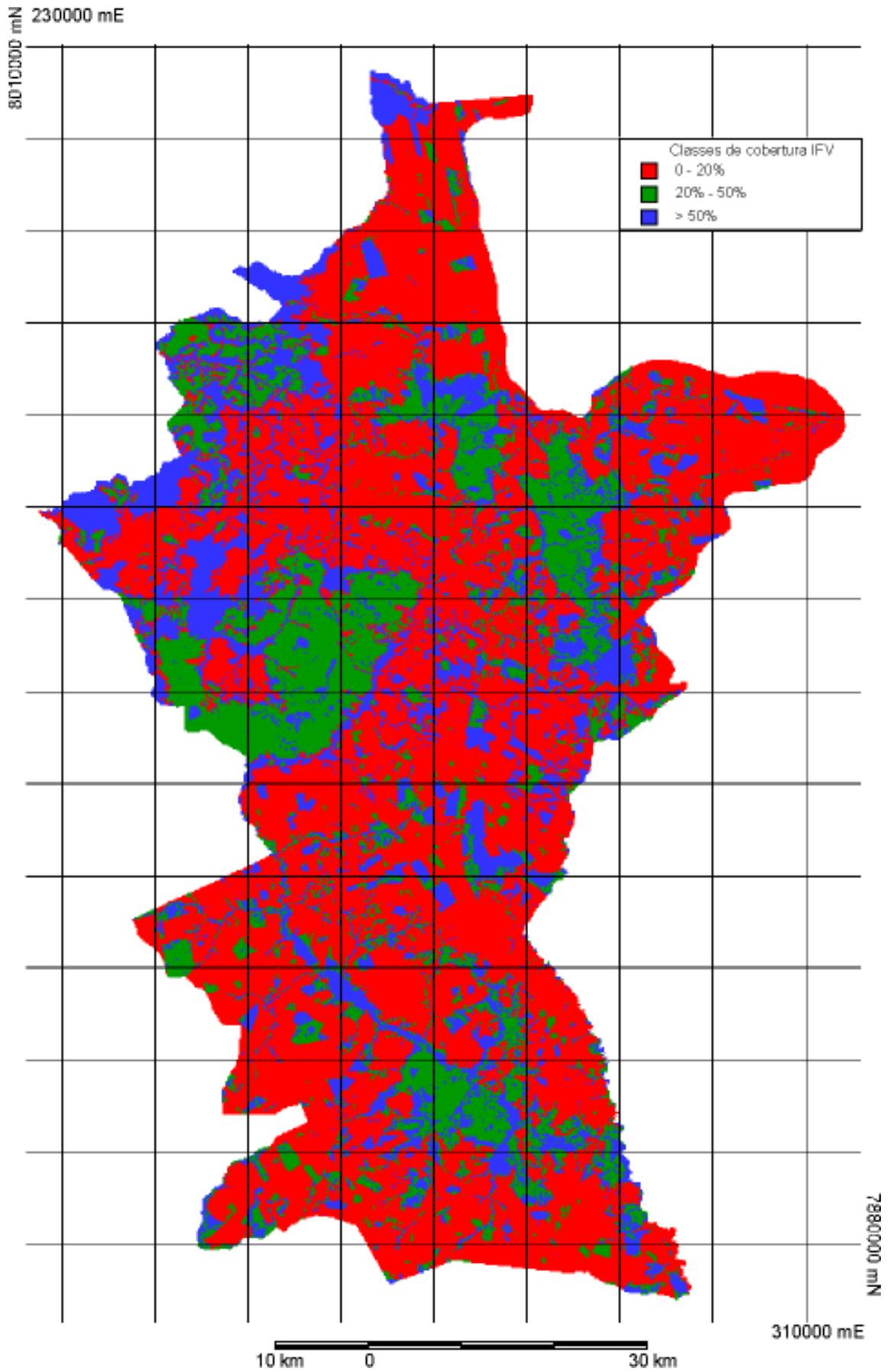


Figura 5.9 – Carta de Cobertura da Imagem Fração Vegetação.

5.4 APTIDÃO DOS SOLOS

Os percentuais de ocupação em área dos tipos de aptidão dos solos são apresentados na figura 5.10. É possível perceber que os solos de vocação restrita, vulnerabilidade alta, para a escala utilizada, ocupam cerca de 77,14% da área de estudo, sendo de suma importância o planejamento da ocupação dos solos. As classes de aptidão boa e regular somam os outros 22,86%. Entretanto o que se observa na imagem *Landsat 5 TM* é a grande concentração de áreas cultivadas.

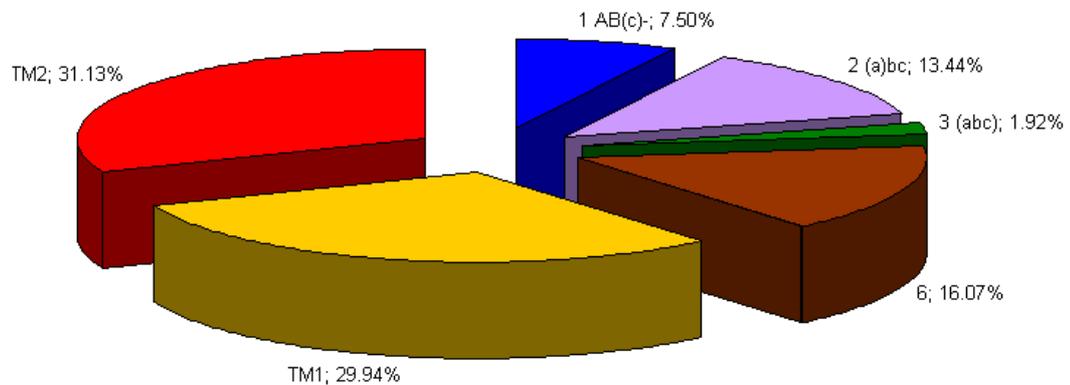


Figura 5.10 – Distribuição percentual de área das classes de aptidão de solos

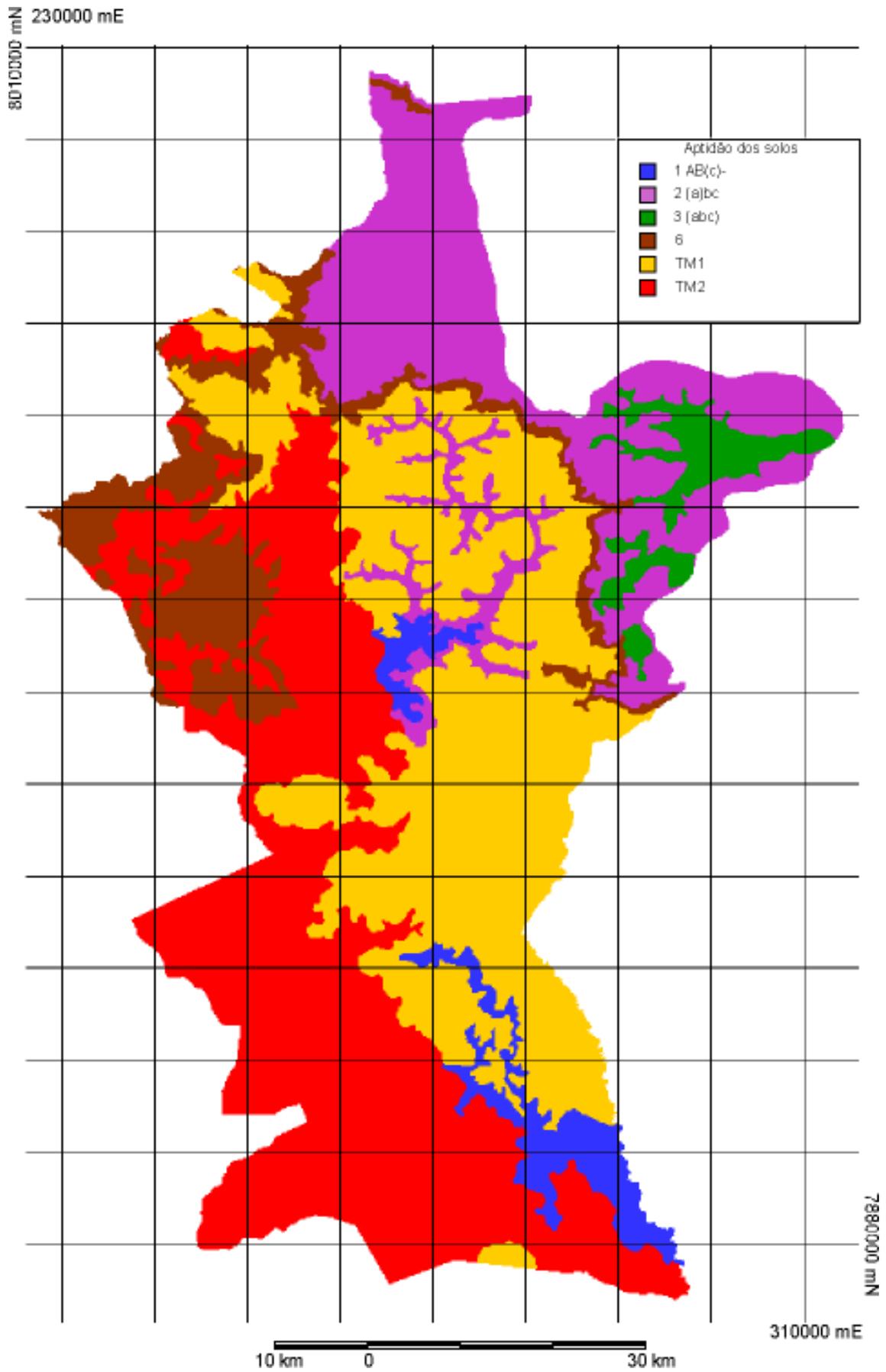


Figura 5.11 – Carta de Aptidão dos Solos (MS, 1990)

5.5 O MODELO DA ESTABILIDADE DOS SOLOS (MES)

Os resultados são apresentados na figura 5.12 e 5.13. O que é possível se observar é a predominância das classes intermediárias, em área, predominando áreas de vulnerabilidade média a alta. As classes extremas, de vulnerabilidade baixa e muito alta são representadas por áreas inferiores a 10% do total da área.

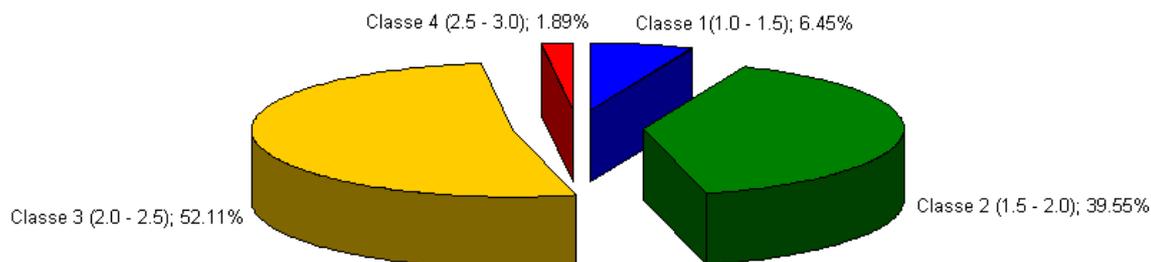


Figura 5.12 – Cobertura percentual em área em relação às classes de vulnerabilidade do MES

A classe 1, de vulnerabilidade baixa, ainda ocupa maior área que as muito vulneráveis, sendo que é fácil se observar a influência da vegetação ciliar na melhora da qualidade desta classe, visto que parte das áreas delineiam os corpos d'água.

As áreas de vulnerabilidade média correspondem a áreas com solos menos vulneráveis de acordo com os pesos estabelecidos, aliados a vegetação que impõe boa proteção do solo, consistindo em áreas que apresentam boas aptidões às lavouras.

A classe de vulnerabilidade alta apresenta áreas com solos mais vulneráveis, sendo que em muitas áreas o que eleva o status da classe para vulnerabilidade alta é a declividade. A falta de vegetação mais densa, forma “ilhas” de classes de vulnerabilidade média, mostrando a importância da manutenção da vegetação, nestes casos.

As áreas muito vulneráveis correspondem a menos de 2% do total da área de estudo, apesar da ausência de vegetação e solos muito vulneráveis, em muitos casos, o fator declividade foi determinante para a esta classe de vulnerabilidade.

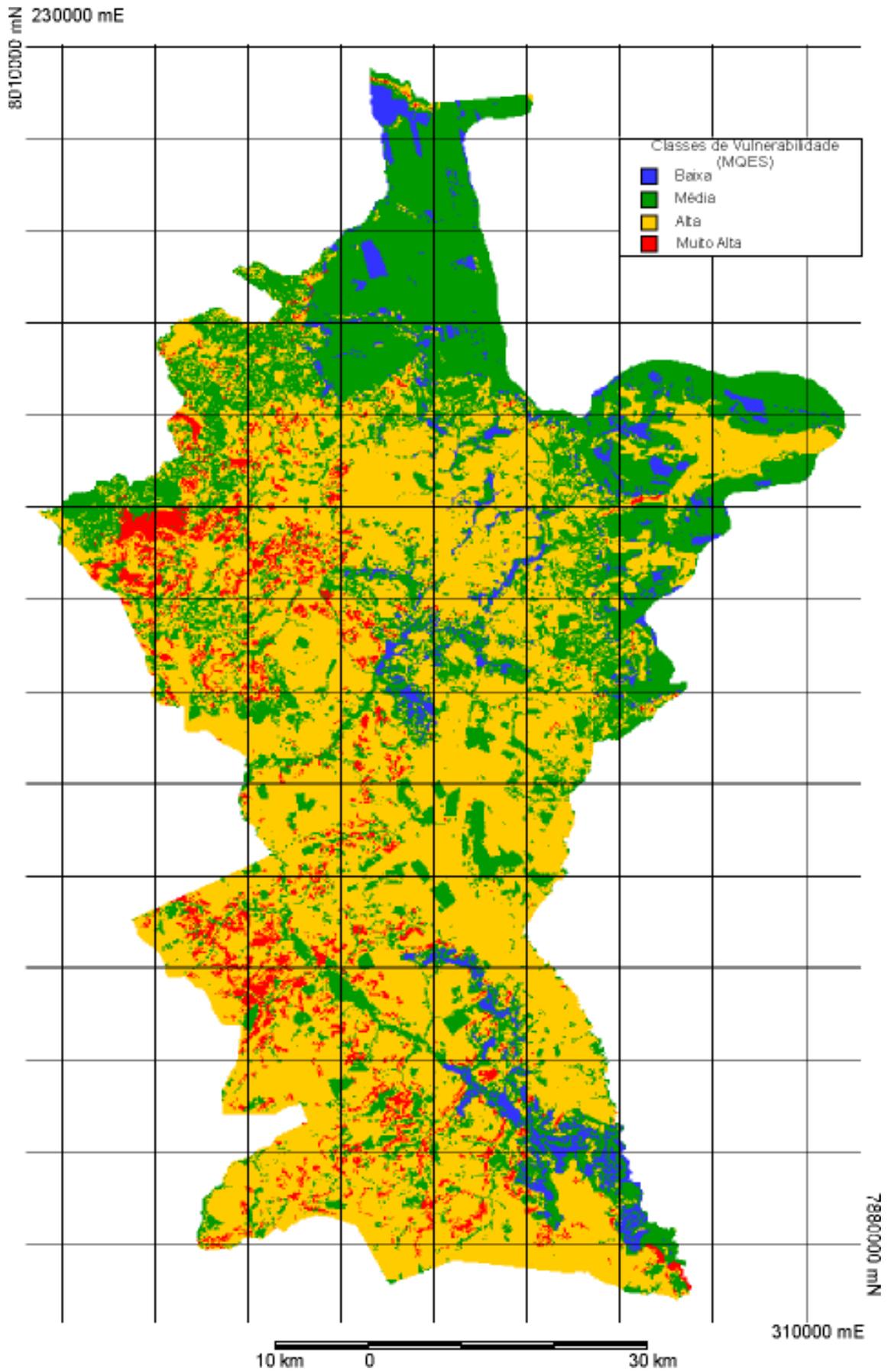


Figura 5.13 – Carta do Modelo da Estabilidade dos Solos

Simulando uma situação extrema, do único fator que pode sofrer ação antrópica quase que imediata, a vegetação. Caso fosse toda elevada ao status de vulnerabilidade muito alta, ou seja, se todas as áreas apresentassem cobertura vegetal menor que 20%, com peso 3, ou ainda, se toda a vegetação fosse retirada, gerando o MES-V, modelo da estabilidade dos solos sem vegetação quais os impactos percebidos?. É o que se observa nas figuras 5.14, 5.15 e 5.16.

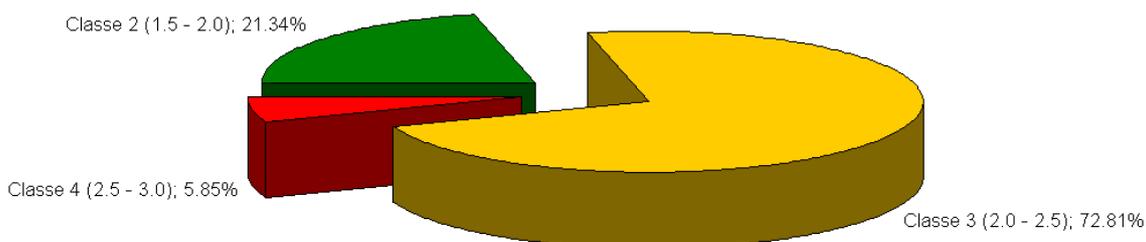


Figura 5.14 – cobertura percentual em área em relação às classes de vulnerabilidade do MES-V, simulando a pior situação da classe de vegetação para toda a área de estudo.

O primeiro impacto é a extinção das áreas de vulnerabilidade baixa, mostrando quão relevante é o fator.

A reordenação da quantificação das áreas mostra um aumento de quase 21% nas áreas de vulnerabilidade alta e a classe 2 sofreu uma redução de quase 20%, ou seja, o status mudou devido a piora da qualidade do fator vegetação. Contudo é importante observar que as áreas críticas (vulnerabilidade muito alta) continuam com menos de 6% do total da área de estudo, indicando que parte destas áreas já encontram-se com níveis de densidade de cobertura baixos.

A partir da comparação visual entre o MES e o MES-V, é possível se perceber:

- Algumas áreas ao leste, fortemente influenciadas pela declividade, passam da vulnerabilidade média a vulnerabilidade muito alta, mostrando que a proteção do solo se dá pela densidade de cobertura vegetal daquela área;
- Grande fração das áreas que passaram para vulnerabilidade alta, são originárias da classe de vulnerabilidade média;
- As áreas com solos estáveis ao norte e ao leste da área de estudo não sofreram tanta influência da vegetação, indicando que o fator solo é capaz de manter a estabilidade mesmo com baixos percentuais de cobertura;

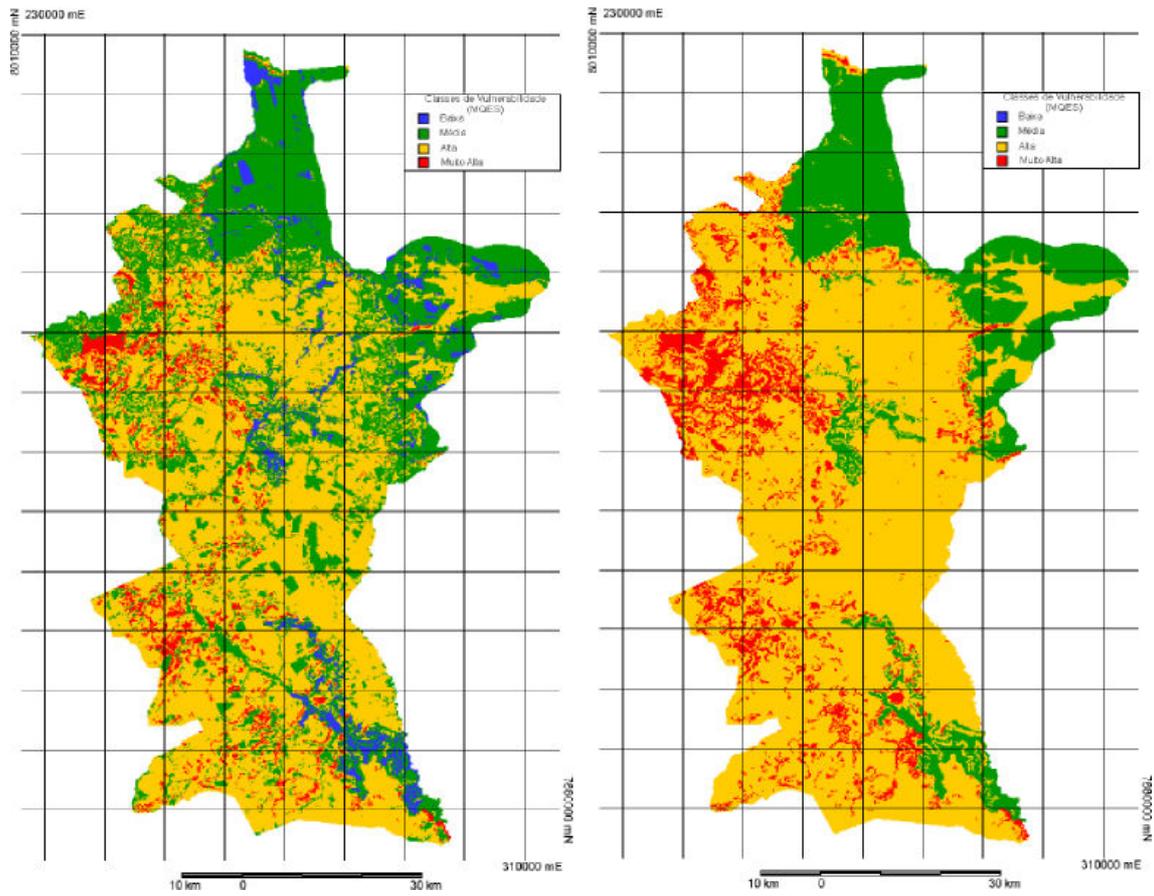


Figura 5.15 – Comparativo do MES, a esquerda, apresentando a vegetação no estado atual e a direita uma simulação da vulnerabilidade caso toda a área de estudo tivesse como cobertura áreas com densidade de vegetação menor que 20% (MES-V)

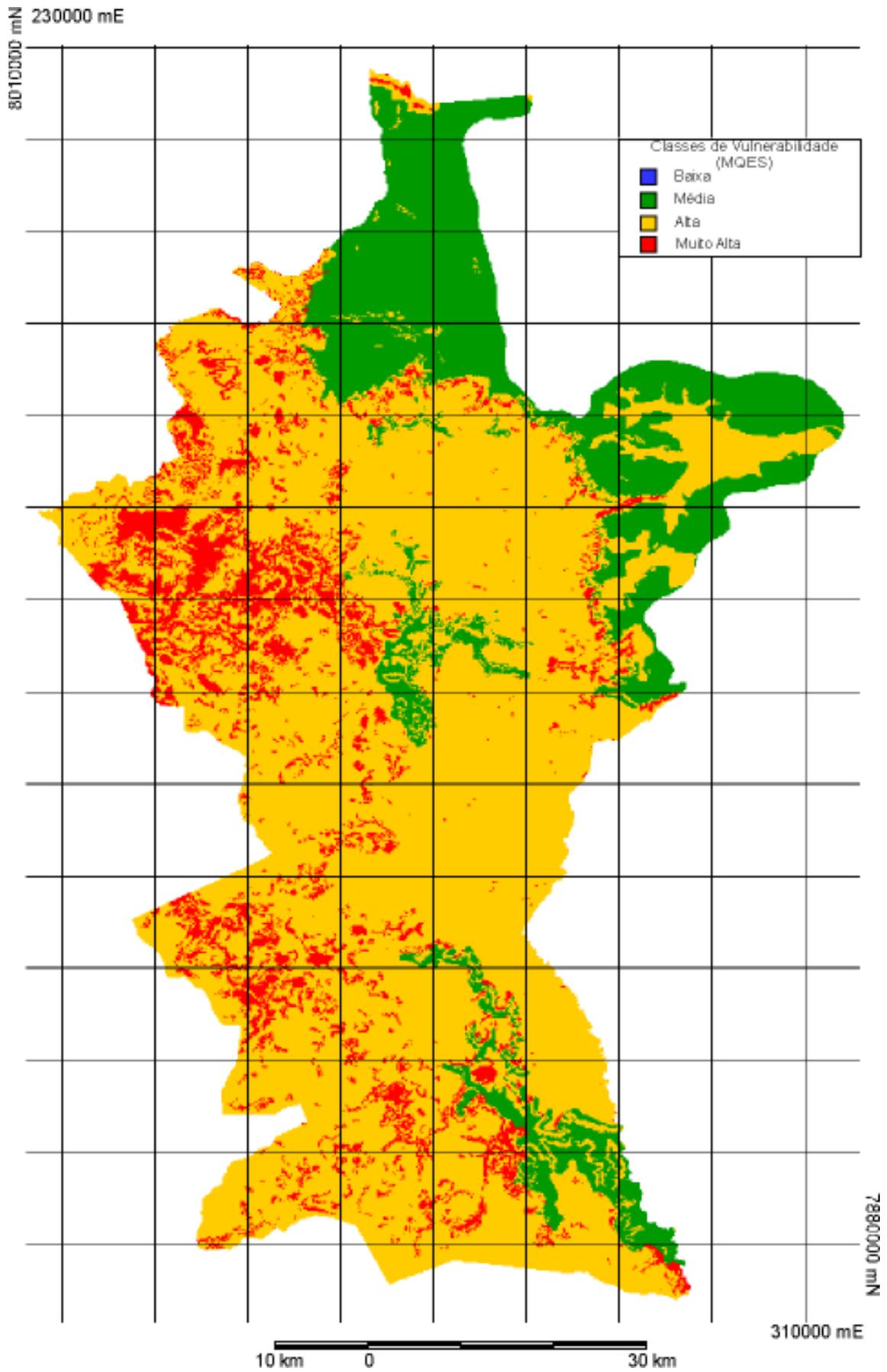
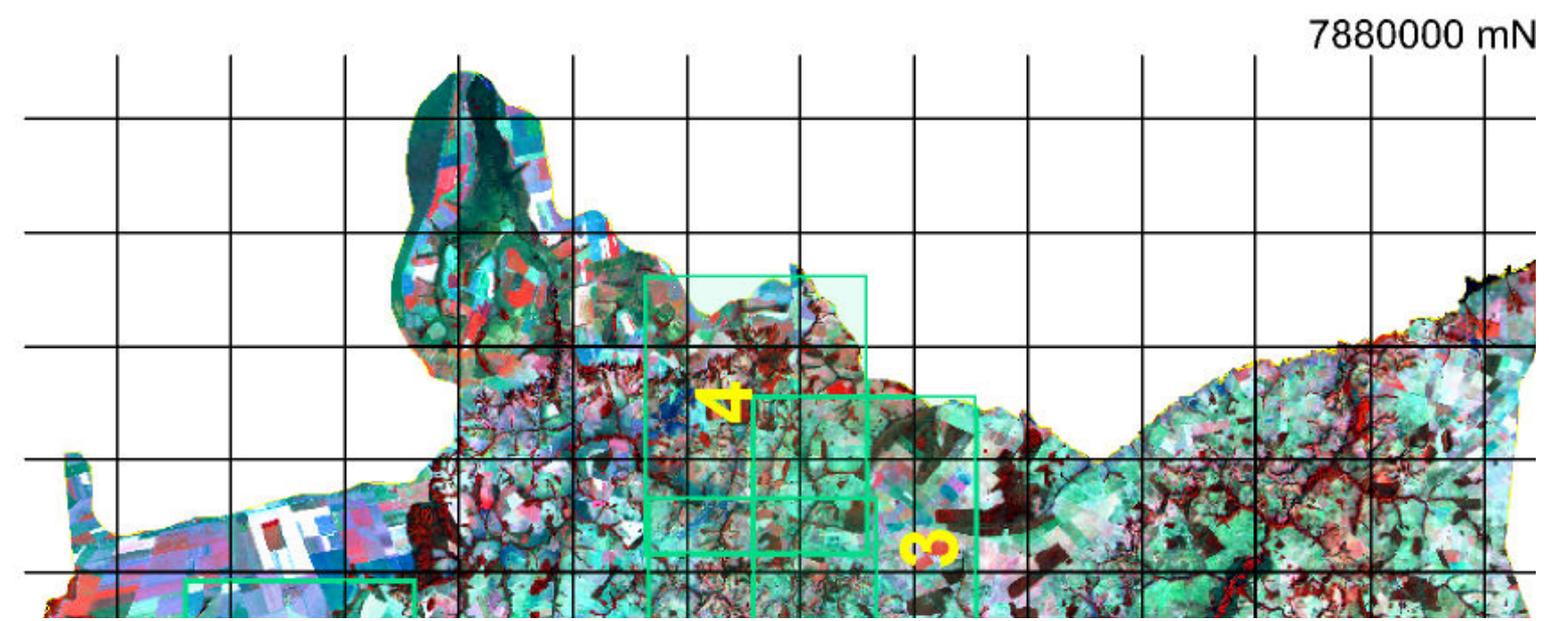
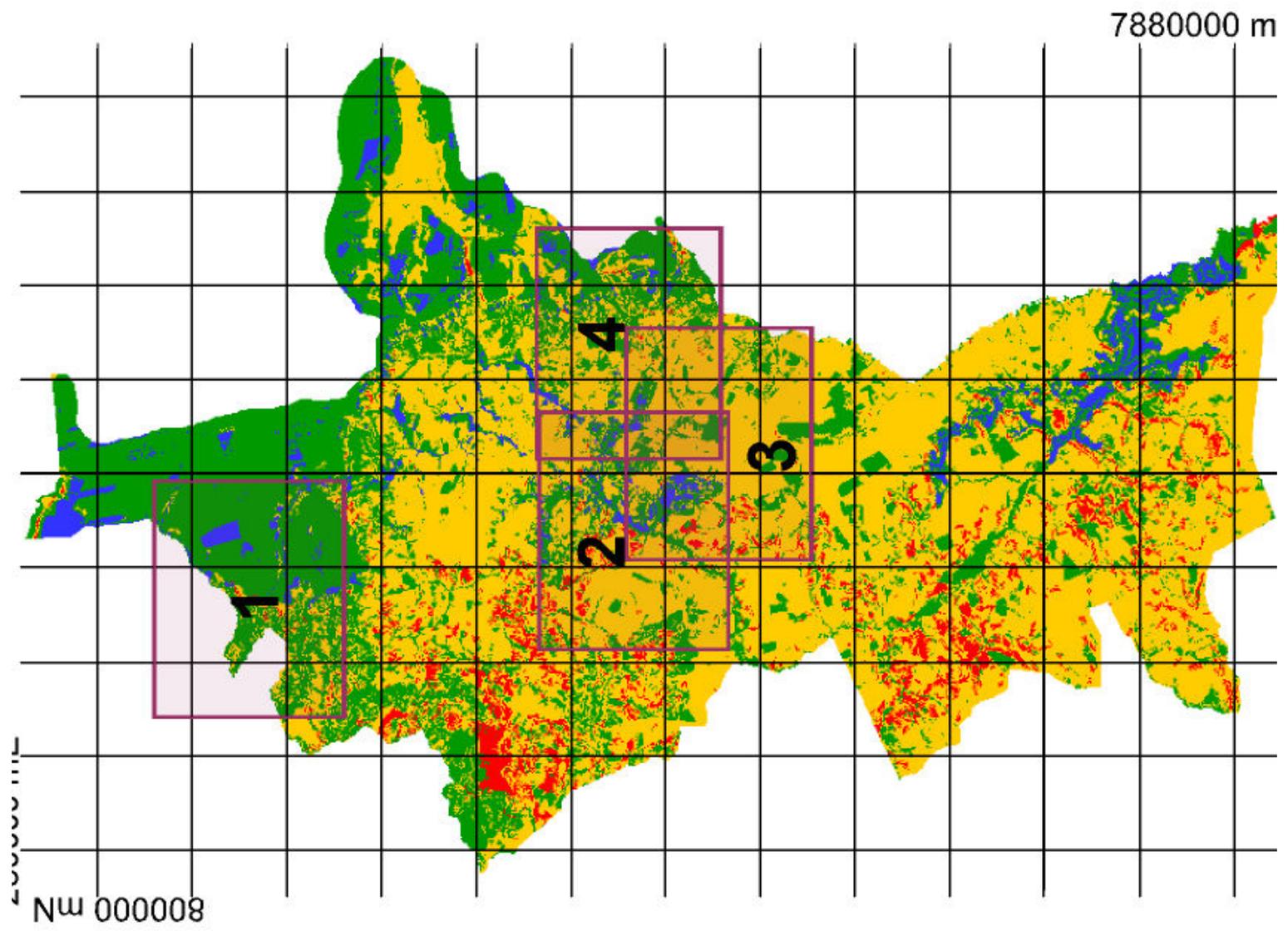


Figura 5.16 – Carta do MES-V, simulação da vulnerabilidade com cobertura de vegetação < 20%.



5.6.1 ÁREA DE INTERESSE 1 (PONTO 1):

Localizada ao norte da área de estudo (figuras 5.18 e 5.19), à oeste encontra-se o Mirante do Parque Estadual das Nascentes do Taquari (figura 5.20). No local percebe-se a quebra de relevo e conseqüente aumento da declividade, elevando o status da área de vulnerável para muito vulnerável, na borda da quebra de relevo. Portanto é importante que haja uma faixa (*buffer*) de vegetação naquela área no intuito de preservá-la. Entretanto não foi observado em campo.

Apesar de apresentar uma extensa área de cultivo, o solo com baixa vulnerabilidade e a baixa declividade média, fez com que a área se apresenta-se com vulnerabilidade média (figura 5.21).

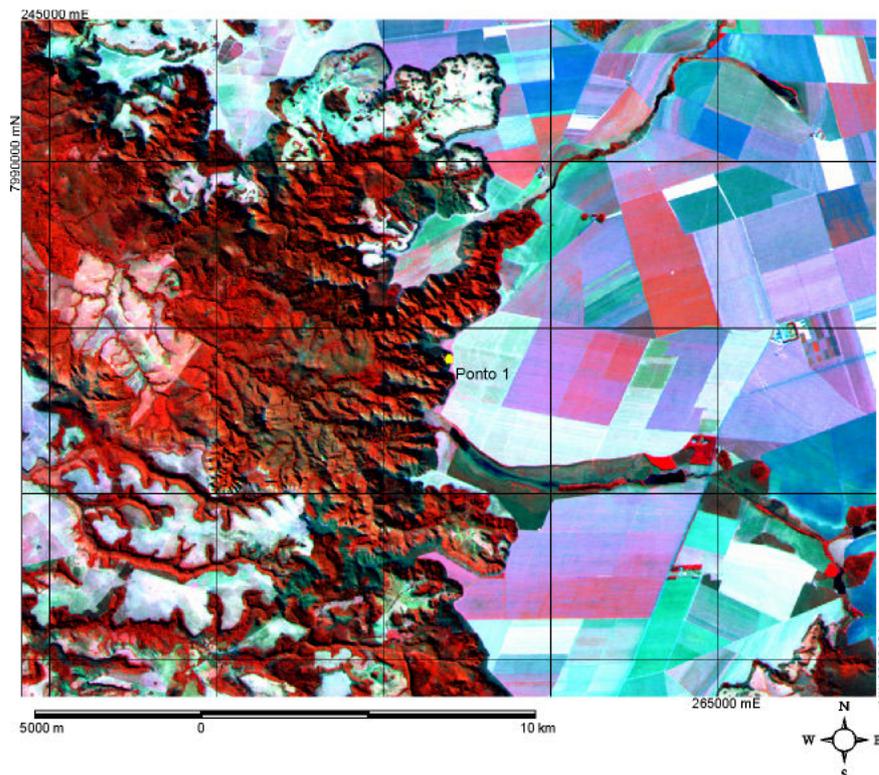


Figura 5.18 – localização do ponto 1, próximo ao Parque Estadual das Nascentes do Taquari (PENT) – Imagem Landsat 5 TM, de 20/07/08, composição RGB453. Área que apresenta áreas de cultivo com vulnerabilidade média a leste e o quebras de relevo com vulnerabilidade alta a oeste.

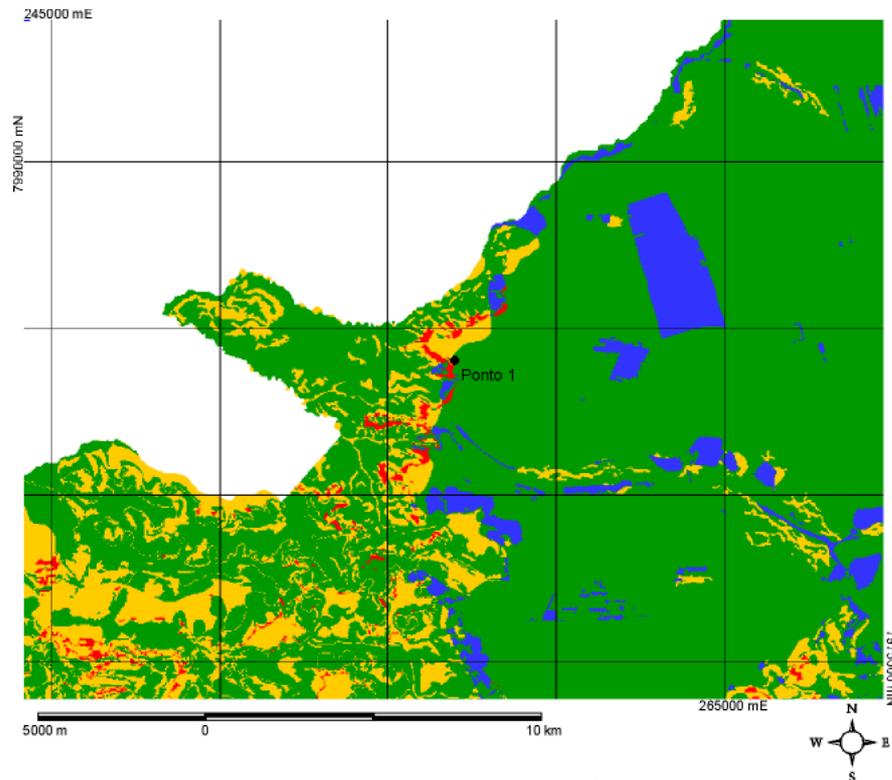


Figura 5.19 - localização do ponto 1, próximo ao PENT – MES. Área que apresenta áreas de cultivo com vulnerabilidade média a leste e o quebras de relevo com vulnerabilidade alta a oeste.



Figura 5.20 – Mirante do PENT na borda da quebra de relevo.



Figura 5.21 – área de lavoura próximo ao PENT, solo com baixa vulnerabilidade, garantindo a manutenção de qualidade média no MES.

5.6.2 ÁREA DE INTERESSE 2 (PONTOS 2 A 9)

Ponto 2: Área de empréstimo para aterro abandonada em uma área de vulnerabilidade alta, a leste do ponto 2, figura 5.22, área propensa ao surgimento de erosão laminar, devido a baixa estabilidade apresentada.



Figura 5.22 – área de corte abandonada próxima ao ponto 2.

Ponto 3: Apresenta uma típica área de vulnerabilidade alta, solos quase expostos, pastagem e declividade entre 6 e 12%, como apresentado nas figura 5.23.



Figura 5.23 – Área vulnerável com solos quase expostos.

Ponto 4: área de vulnerabilidade muito alta, todavia foi possível observar a adoção de práticas de terraceamento para minimização dos impactos, a oeste do ponto, em uma área de vulnerabilidade alta. Figura 5.24



Figura 5.24 – área de vulnerabilidade alta com terraceamento

Ponto 5: Uma área de vulnerabilidade alta, com áreas de vulnerabilidade muito alta a oeste. Solo com muito vulnerável, declividade entre 12% e 45%, cobertura vegetal menor que 20%. Configura-se quase como uma APP de declividade. Figura 5.25



Figura 5.25 – área muito vulnerável com declividade entre 12% e 45%

Ponto 6: Apresenta-se como sendo de vulnerabilidade alta, no local constatou-se o início de processos de erosão linear em sulcos (foto a esquerda) e animais pastando (a direita). Figura 5.26.



Figura 5.26 – Início do processo erosivo, a esquerda, e visualização do solo da pastagem a direita

Ponto 7: Área de vulnerabilidade muito alta a leste, com solos exposto, declividade entre 12% e 45%, solo muito vulnerável. Apresentando uma “ilha” de vulnerabilidade alta, no polígono interno, devido a vegetação de classe 2. Figura 5.27.



Figura 5.27- Área com solo exposto e uma “ilha de cobertura”

Ponto 8: A oeste do ponto 8, esta localizado um fragmento de cerrado, identificável no MES, este eleva o status da área de vulnerabilidade alta para média, mostrando a influência e importância da vegetação no modelo. Figura 5.28.



Figura 5.28 – fragmento de cerrado, identificável no MES

Ponto 9: à sudoeste do ponto 9, é possível visualizar uma área de vulnerabilidade média, com declividade entre 0 e 6%, cobertura vegetal intermediária, maior que 20% e menor que 50%, e solo muito vulnerável. Do ponto 9 foi possível visualizar a transição entre cerrado e cerradão, (observada também na imagem *Landsat 5 TM*), mostrando que a imagem fração apresenta-se coerente, considerando ambas as coberturas dentro da mesma classe da IFV, como foi determinado. Figura 5.29.



Figura 5.29 – Área com cobertura de cerrado e cerradão.

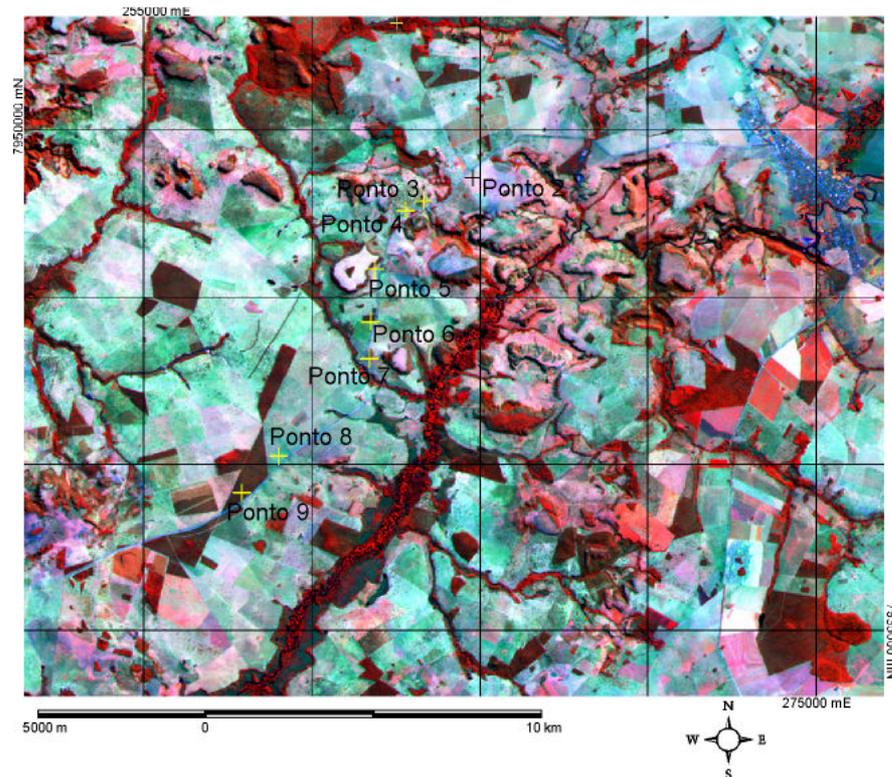


Figura 5.30 – Área de interesse 2, Imagem *Landsat 5 TM*, de 20/07/08, composição RGB453. Apresentando os pontos 2 a 9

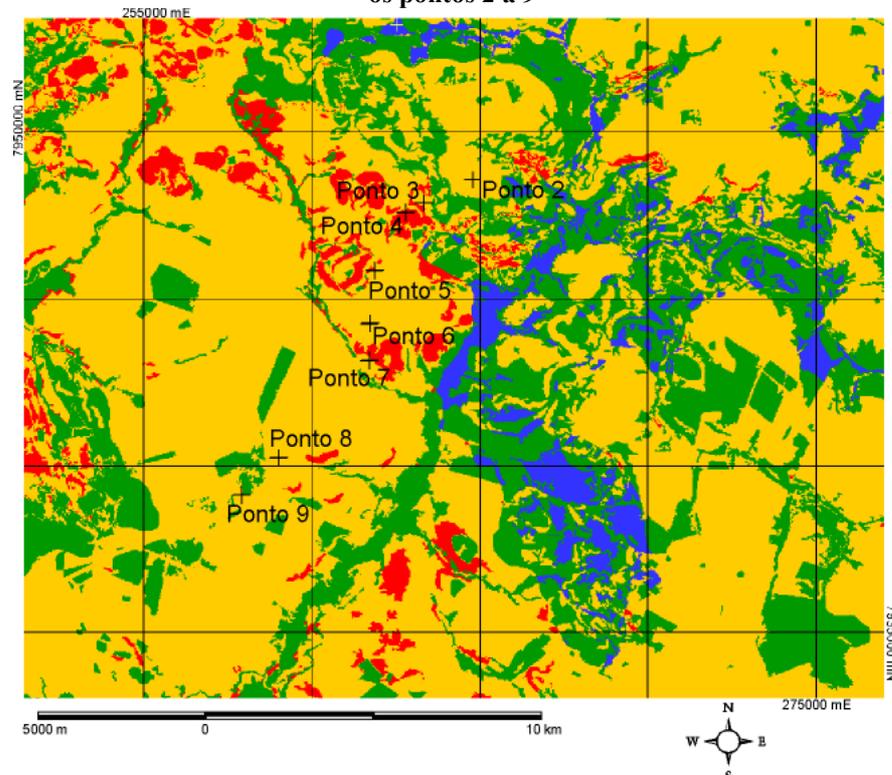


Figura 5.31 - Área de interesse 2, MES. Apresentando os pontos 2 a 9

5.6.3 ÁREA DE INTERESSE 3 (PONTOS 10 A 12)

Ponto 10: Uma área de plantação de cana de açúcar localizada à leste deste ponto (figura 5.32) e uma área de vegetação mais densa, à oeste, mostram uma das limitações do modelo, a imagem fração vegetação apresentou a separação de culturas juntamente com formações vegetais nativas ou de recuperação natural.



Figura 5.32 – cultura de cana-de-açúcar, apresentada com alta densidade de cobertura na imagem fração.

Ponto 11: Outra amostra da influência da vegetação na melhora qualitativa, mudando de status, vulnerável para vulnerabilidade baixa. Área de pastagem seguida de uma área de mata ciliar (figura 5.33).



Figura 5.33 – área de pastagem e mata ciliar ao fundo

Ponto 12: Grande dossel à sudeste do ponto 12, foi utilizado na calibração do modelo linear de mistura espectral, como amostra de *endmembers* de vegetação. Próximo ao dossel, uma outra limitação do modelo, a área de vulnerabilidade muito alta é oriunda de uma declividade alta causada pelo próprio dossel, pelo fato de possuir altura maior que o que se encontra em seu entorno. Tal limitação é proveniente do modelo SRTM, que não é capaz de penetrar em áreas de grande densidade de vegetação, imageando a superfície de modo geral (Valeriano, 2004).

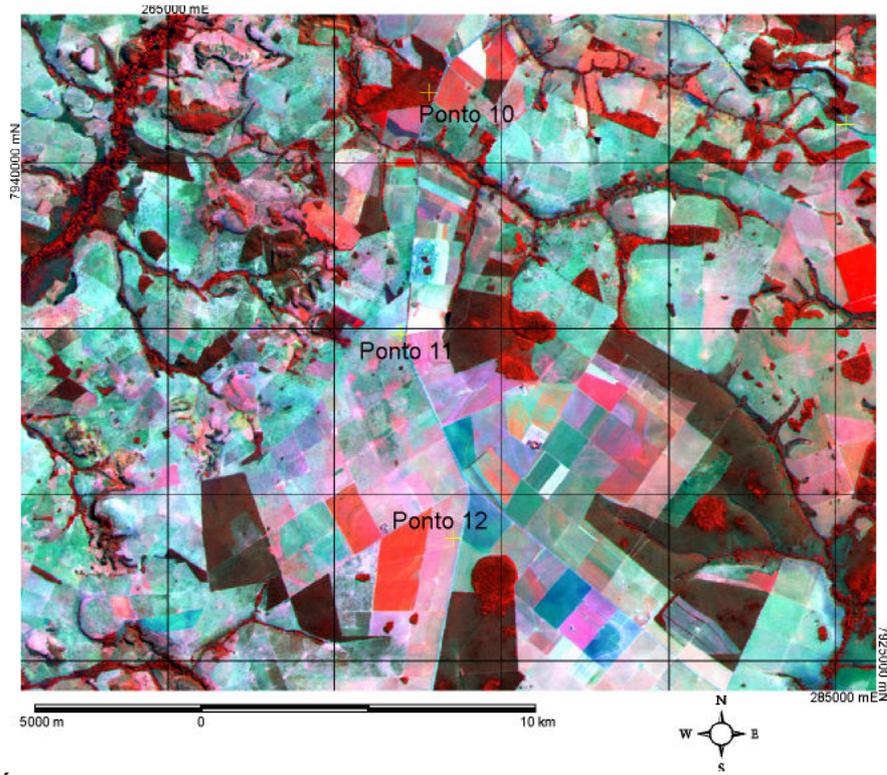


Figura 5.34 - Área de interesse 3, Imagem *Landsat 5 TM*, de 20/07/08, composição RGB453. Apresentando os pontos 10 a 12

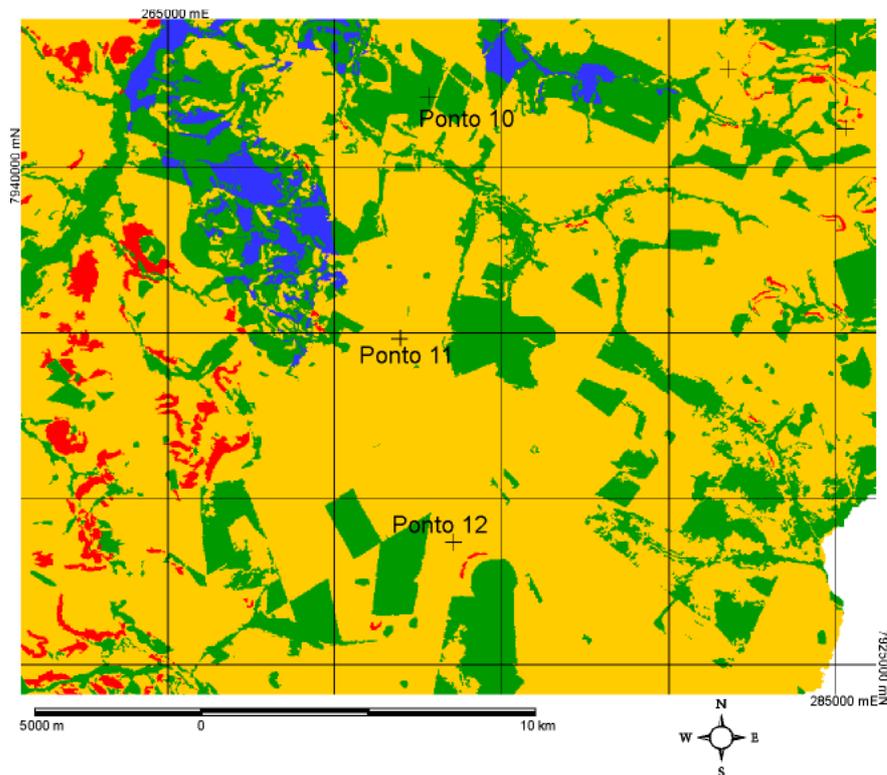


Figura 5.35 - Área de interesse 3, MES. Apresentando os pontos 10 a 12

5.6.4 ÁREA DE INTERESSE 4 (PONTO 13)

Ponto 13: à noroeste deste ponto é possível se visualizar o perímetro urbano aproximado de Costa Rica-MS, é possível observar que em quase sua totalidade o perímetro encontra-se em áreas de vulnerabilidade alta. Sendo que apenas o parque municipal Salto do Sucuriú e o as margens do próprio Rio Sucuriú encontram-se com vulnerabilidade média/baixa. À nordeste do ponto13 (figura 5.36) é possível se observar uma área de vulnerabilidade alta com pequenas áreas de classe muito alta, tal fato é decorrente da presença, no local, de um morro com áreas de solo exposto em sua base. Aumentando a classe de vulnerabilidade com os fatores declividade alta e ausência de vegetação, além da ares ser de solo muito vulnerável.



Figura 5.36 – Área de solo arenoso friável exposto no pé do morro, gerando áreas muito vulneráveis, provavelmente para a produção de sementes de pastagens.

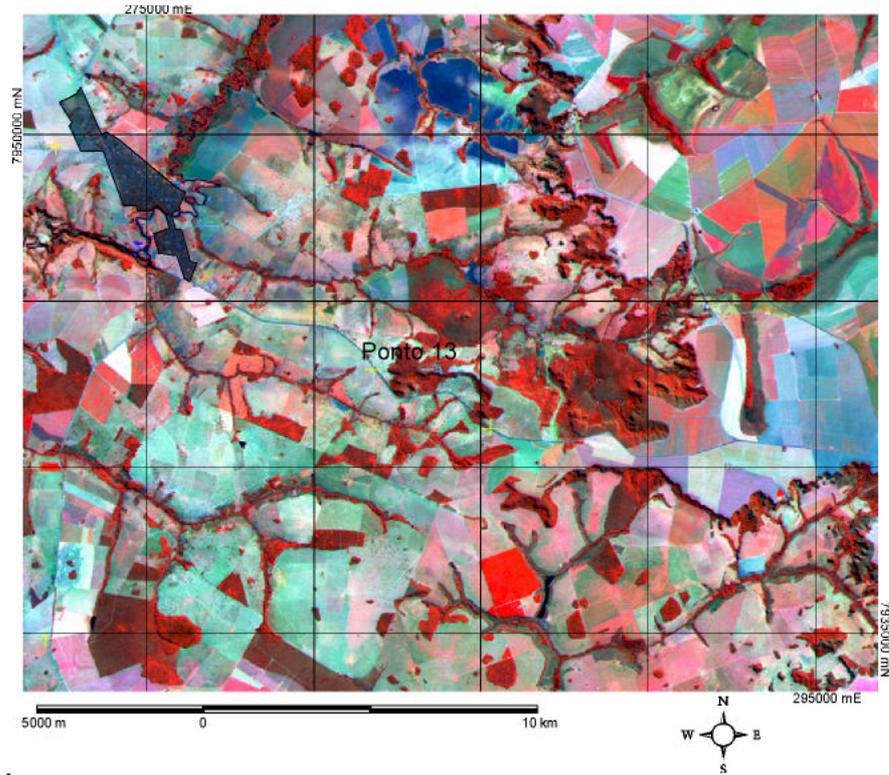


Figura 5.37 - Área de interesse 4, Imagem *Landsat 5 TM*, de 20/07/08, composição RGB453. Apresentando a localização aproximada do perímetro urbano (em preto) e o ponto 13

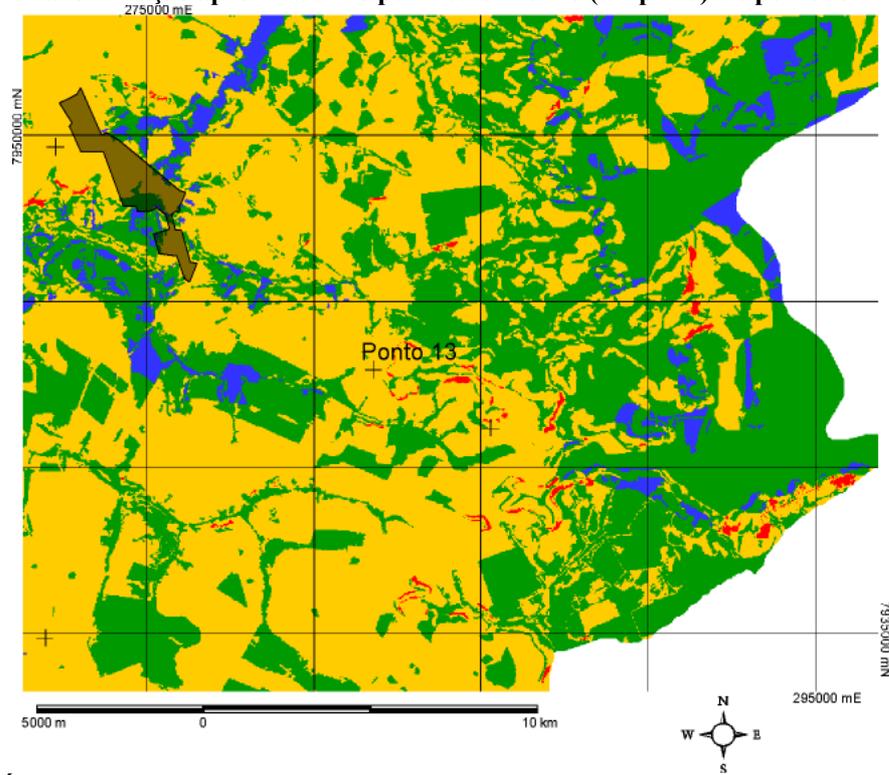


Figura 5.38 - Área de interesse 4, MES. Apresentando a localização aproximada do perímetro urbano (em preto) e o ponto 13

5.7 A PROPOSTA DE ZONEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL

A elaboração da proposta de zoneamento se deu com base no MES, acrescido das áreas de solo da classe 6, determinados como desaconselháveis ao uso agropecuário, devendo ser utilizadas como reserva ecológica, de proteção à flora e fauna (MS, 1990). Desta forma a proposta de zoneamento visa criar 4 zonas, ZN1, ZN2, ZN3 e ZNV, descritas a seguir.

ZN1 – Zonas com baixa vulnerabilidade, segundo o MES, estão presentes em áreas muito pequenas e em locais onde, predominantemente, a vegetação é ciliar. Portanto tais zonas, apesar de estáveis, não devem ser destinadas a nenhum uso, mas sim nortear a recomposição da vegetação para que haja melhora na estabilidade ambiental e para que sejam destinadas compensações ambientais, em seu entorno, interligando os fragmentos, considerando a teoria dos corredores de biodiversidade.

ZN2 – Zonas com vulnerabilidade média, segundo o MES. Destinadas a implantação de empreendimentos que exijam Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental – EIA/RIMA, determinados pela política nacional do meio ambiente e pelo resolução CONAMA 001 de 1986 (CONAMA, 1986). Estes são de alto impacto e exigem estudos mais detalhados, contemplando equipe multidisciplinar, visto a complexidade dos impactos causados pelos empreendimentos.

ZN3 – Zonas de Vulnerabilidade alta, segundo o MES. Áreas frágeis, mas que com destinação adequada, empreendimentos de impactos médios/baixos podem ser instalados, desde que os impactos possam ser mitigados, monitorados e relatados ao órgão controlador. Caso haja no estudo a aplicação de algum método de avaliação dos impactos ambientais, os dados devem ser cruzados, para que haja maior solidez na tomada de decisão por parte do órgão regulador.

ZNV – Zonas consideradas muito vulneráveis, segundo o MES, aliadas as áreas de solos do tipo 6, as Zonas Vulneráveis, destinar-se-ão apenas para a consolidação das áreas de preservação, sendo destino de compensações ambientais, visando assegurar a estabilidade de áreas extremamente frágeis e que, em alguns casos, estão sob uso agrícola conforme observado na imagem *Landsat 5 TM*.

A escala de cores indica analogamente ao sinal luminoso de trânsito, incluindo-se a cor azul, de modo que seja de fácil interpretação e de aplicação simples. Sendo que objetivou-se criar uma ferramenta de apoio a tomada de decisão que pudesse ser utilizada sem maiores fundamentações teóricas.

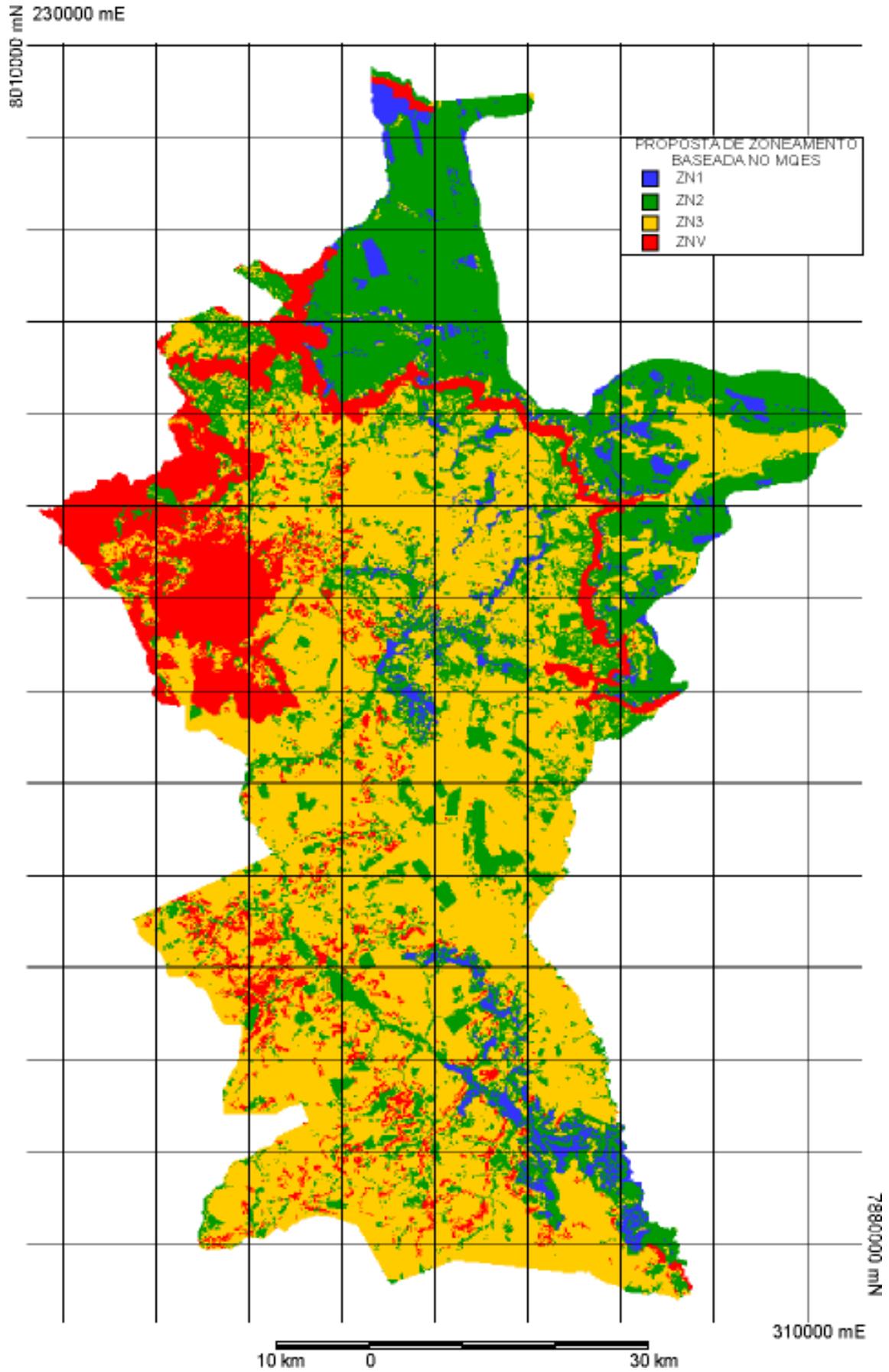


Figura 5.39 – Proposta do Zoneamento para tomadas de decisão.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A respeito do modelo da estabilidade a erosão foi possível concluir:

- Há coerência do modelo MES à realidade de campo, podendo ser utilizado e aplicado para outras áreas, visando maior lapidação para o mesmo.
- Apesar de coerente com a realidade, alguns elementos inerentes aos sensores apresentam-se como restrições de uso do modelo. O modelo SRTM apresenta o imageamento geral da superfície, não tendo penetração em determinadas coberturas vegetais. O modelo Linear de Mistura Espectral, na imagem fração de vegetação apresenta áreas de cultivo, de cana-de-açúcar, por exemplo, como áreas de cobertura vegetal acima de 50%, mascarando um pouco a realidade, visto que as culturas não possuem tanta capacidade de absorção da energia cinética da chuva.
- A base de aptidão dos solos utilizada não foi atualizada e apresentava-se em escala generalizada, 1: 250.000. Sendo que um maior detalhamento pode aumentar a precisão e acúrcia dos resultados na aplicação do modelo.
- O modelo desenvolvido permitiu a simulação, o que evidenciou a importância da cobertura florestal remanescente para a área de estudo, além de apresentar o potencial preditivo do modelo.

A Carta de Declividade mostrou-se muito coerente, excetuados os artefatos já explicitados e mostrou um grande potencial em sua reamostragem para trinta metros, alterando seu limite superior (mais detalhado).

A utilização dos dados disponíveis na Internet mostram-se muito vantajosa, apesar de exigirem pré-processamento, como a correção geométrica, para as imagens *Landsat 5* e a *krigagem* para o SRTM.

Para as classes de vegetação criadas, a partir das imagens fração vegetação do modelo linear de mistura espectral, foi possível observar que as classes de cobertura mostraram-se muito próximas a realidade, conforme apresentado na análise do ponto de controle 9. Apesar de algumas áreas de cultura apresentarem-se com cobertura de classe 3, conforme apresentado no ponto 10.

A área de estudo apresenta vulnerabilidade predominantemente alta e média, devido a ausência da cobertura vegetal, pois excetuadas as de APP, estas representarem menos que o

mínimo exigido na lei 4.771 de 1965 (BRASIL, 1965), de vinte por cento. Portanto é importante que sejam aplicadas medidas de expansão destas áreas, caso contrário, segundo o MES-V, na simulação apresentada, além do aumento da intensidade dos possíveis impactos ambientais, as áreas de vulnerabilidade baixa seriam extintas.

Modelos qualitativos alternativos à USLE, utilizando dados de sensoriamento remoto, podem configurar importantes ferramentas no zoneamento ambiental da vulnerabilidade. Tornando-se poderosas ferramentas de tomada de decisão. A simplicidade de implementação e a compatibilidade com os levantamentos de campo são as vantagens mais evidentes.

O zoneamento proposto deve ser utilizado tendo conhecimento das limitações do MES que o subsidiou, contudo todos os modelos são simplificações da realidade, carecendo de validações e parcimônia em sua utilização. Portanto deve se fazer uma consulta no banco de dados do modelo, e confrontar as informações a respeito da instalação de um empreendimento, considerando seu potencial impacto ambiental.

As áreas ZN1 e ZNV devem ser prioridade nas compensações ambientais destinadas a área de estudos, visto que a ZN1 é de suma importância na manutenção dos corpos hídricos e as ZNV são áreas de vulnerabilidade muito alta. A recuperação da cobertura vegetal em tais áreas poderiam elevar ou aumentar as áreas com vulnerabilidades baixa/média.

O Parque Estadual das Nascentes do Taquari, definido como Unidade de proteção integral pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), devido a sua importância, deveria possuir uma área de cobertura vegetal delineando as bordas de quebra de relevo, para que se evitasse praticas agrícolas naquelas áreas, as quais são muito vulneráveis.

7. REFERÊNCIAS

ADRIOLO, M. V.; SANTOS, I; GIBERTONI, R. C.; de CAMARGO, A. S. G. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. VI simpósio brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas. 21 A 25 DE ABRIL DE 2008. Belo Horizonte – MG. Resumos. Brasil: Comitê Brasileiro de barragens, 2008.

ALVES, A.;SOUZA, F. J.; MARQUES, M. **Avaliação do potencial à erosão dos solos: uma análise comparativa entre Lógica Fuzzy e o Método USLE**. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2011-2018.

BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. INPE. São José dos Campos. Agosto de 1997.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. **Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.39, n.7, p.677-683, jul. 2004

BERRY, J.K.; **Gis in Island Resource Planning: A case study in map analysis**. In: Maguire,D.; Goodchild, M.; Rhind, D. (eds) Geographical Information Systems: Principles and Applications. New York, John Wiley and Sons, 1991, p.285-295.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355p

BRASIL, Leis. lei nº 4.771 15 de setembro de 1965 – Institui o novo Código Florestal. DOU 16/09/1965.

BRASIL, Leis. lei nº 6.938 de agosto de 1981 – Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. DOU 02/09/1981.

BRASIL. Leis. **Decreto nº 5.334 de 6 de janeiro de 2005. Dá nova redação ao art. 21 e revoga o art. 22 do Decreto no 89.817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.** DOU 07/01/2005.

BRASIL. Leis.. **Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.** DOU 22/06/1984

CAMARGO, E. C. G. **Geoprocessamento para projetos ambientais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Capítulo 5 - Geoestatística: Fundamentos e Aplicações.** 2º edição revisada e ampliada. São José dos Campos - SP, 1998. Disponível em www.inpe.br, acesso em: 30/03/2007.

CARRIJO, M. G. G. **Análise da vulnerabilidade ambiental: o caso do Parque Estadual das Nascentes do Rio Taquari - MS.** Campo Grande. 2005. Dissertação (Mestre em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos). Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – DHT – CCET - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe os estudos de impacto ambiental e o relatório de impacto ambiental – EIA/RIMA.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html> . Acesso em: 06 de janeiro. 2009

CREPANI, E. M. MEDEIROS, J. S. de. HERNANDEZ FILHO, P. FLORENZANO, T. G. DUARTE, V. BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológicoeconômico e ao ordenamento territorial.** São José dos Campos - INPE, 2001 (INPE-8454-RPQ/72). 124 p.

CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T.; **Avaliação e perícia ambiental.** Rio de Janeiro, Bertrand. Brasil, 2000. 294p.

CUTTER, S.L. **Environmental risks and hazards.** London: Prentice- Hall, 1994. 413 p.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. **Social Vulnerability to Environmental**

Hazards. SOCIAL SCIENCE QUARTERLY, Volume 84, Number 2, June 2003. by the Southwestern Social Science Association

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIR, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos.** São José dos Campos. INPE. Julho de 2002 (2ª ed. Revista e Ampliada. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise>. Acesso em: 28/03/2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Amaury Carvalho Filho *et al.* **Aptidão agrícola das terras do Estado do Rio de Janeiro.** Brasília: CPRM, 2000

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Notícias** http://www.embrapa.br/noticias/banco_de_noticias/folder.2006/novembro/foldernoticia.2006-11-03.7853981089/noticia.2006-11-13.2724413039/mostra_noticia

FREITAS, R. M.; VITOR HAERTEL, V.; SHIMABUKURO, Y.E. **Análise multisensor e multiresolução de imagens CBERS-2 através do modelo linear de mistura espectral.** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 895-902.

GAMARRA, R. M. **Identificação de fitofisionomias e análise da fragmentação da vegetação na região do Parque Natural Municipal Salto do Sucuriú, utilizando imagem de alta resolução.** Campo grande. 2008. 73p. Dissertação (Mestre em Ecologia e Conservação). Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

GRIGIO, A. M. **Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guamaré (RN): simulação de risco às atividades da indústria petrolífera.** Natal – RN. 2003. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. UFRN. 2003. 230p.

GRIGIO, A. M. **Evolução da paisagem do baixo curso do Rio Piranhas-Assu (1988-2024): uso de autômatos celulares em modelo dinâmico espacial para simulação de cenários futuros**. Natal – RN, 2008. Tese (Doutor em Geodinâmica). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. UFRN. 205p.

HAZARIKA, M. K. & HONDA K. **Estimation of soil erosion using remote sensing and GIS, its valuation and economic implications on agricultural production**. International Soil Conservation Organization Meeting. May 24-29, 1999. Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 1999. p1090-1093

HIGA, L. T.; PARANHOS FILHO, A. C.; TORRES, T. G.; SALLES, A. T. **Avaliação da precisão vertical do modelo SRTM para a bacia do rio Paraguai, no Estado de Mato Grosso do Sul**. In: Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, 11-15 novembro 2006, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.834-840

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – **IBGE**. www.ibge.gov.br. Acesso em: 01/01/2007

MATO GROSSO DO SUL - SEPLANMS SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DE MATO GROSSO DO SUL. **Atlas multirreferencial do Estado de Mato Grosso do Sul**. Campo Grande, SEPLANMS, 1990. 28p

MELLO, E. M. K; MOREIRA, J. C.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y.E; DUARTE, V.; **O uso do SPRING no mapeamento do desflorestamento da AMAZÔNIA**. In: 10º Show Internacional de Geotecnologias, 2004, São Paulo. 2004. v. CD ROM.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 425p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos – SP. INPE. 2001. 241p.

MOREIRA, M. A.; L. C. A.; SHIMABUKURO, Y.E; DUARTE, V.; RUDORFF B. F. T.; YI, J. L. R.; SOUZA, I. M. **Modelo de mistura espectral para identificar e mapear áreas de**

soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 53-57.

NUNES, S. S.; SOUZA JUNIOR, C. **Avaliação de modelos de mistura de pixel para áreas urbanas.** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 6885-6892.

PANNATIER, Y. **VarioWin: software for spatial data analysis in 2D.** New York: Springer-Verlag, 1996.

PARANHOS FILHO, A. C.; TORRES, T. G.; LASTORIA, G. **Sensoriamento Remoto Ambiental Aplicado: Introdução as Geotecnologias.** Campo Grande – MS. Editora UFMS. 1º ed. 198 p. 2008.

PCI GEOMATICS Inc. **PCI Geomatica version 10.1.** PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario - Canadá. 2007. 1 CD-ROM.

RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, E.G.; BEEK, K.J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras.** 2.ed. rev. Rio de Janeiro: SUPLAN/EMBRAPA-SNLCS, 1983. 57p.

SANTOS, P. E. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. **Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia.** Revista Brasileira de Cartografia. P 101-107. Nº 58/01, Abril, 2006.

SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. **The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. 29, p. 16-20, 1991.

SHIMABUKURO, Y.E; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. **Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.33, Número Especial, p.1729-1737, out. 1998

SOUZA JR, C. M.; MONTEIRO, A. L.; SALOMÃO, R.; VALENTE, A. **Extração de informações de imagens Landsat para modelos de alcance econômico da atividade**

madeira. Anais X sbsr, foz do Iguaçu, 21 – 26 abril 2001. INPE, p.509-516, sessão técnica oral.

TAGLIANI, C. R. A. TÉCNICA PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DE AMBIENTES COSTEIROS UTILIZANDO UM SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 1657 – 1664.

TOMLIN, D. Geographic information systems and Cartographic Modeling. Prentice Hall, New York, 1990.

TORRES, T. G. Aplicação de geotecnologias na geração do divisor de bacias hidrográficas: uma ferramenta para a política de recursos hídricos Campo grande. 2008. 103p. Dissertação (Mestre em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos). Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – DHT – CCET - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

TORRES, T. G.; LIMA, D. L.; PARANHOS FILHO, A. C.; VASCONCELOS, B. R.; ANACHE, J. A. A.; ESPÍNDOLA, R. B. M.; MIRANDA, C. S.; FERNANDES, F. M. Comparação entre diferentes algoritmos e número de GCPs na correção geométrica de imagens TM/Landsat 5. (no prelo)

TRICART, J. Ecodinâmica, Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977, 91p. (Recursos Naturais e Meio Ambiente).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Shuttle Radar Topography Mission – mission summary. 2003. <http://srtm.usgs.gov/Mission/missionsummary.html> Acesso em: 30 de março de 2007.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756).

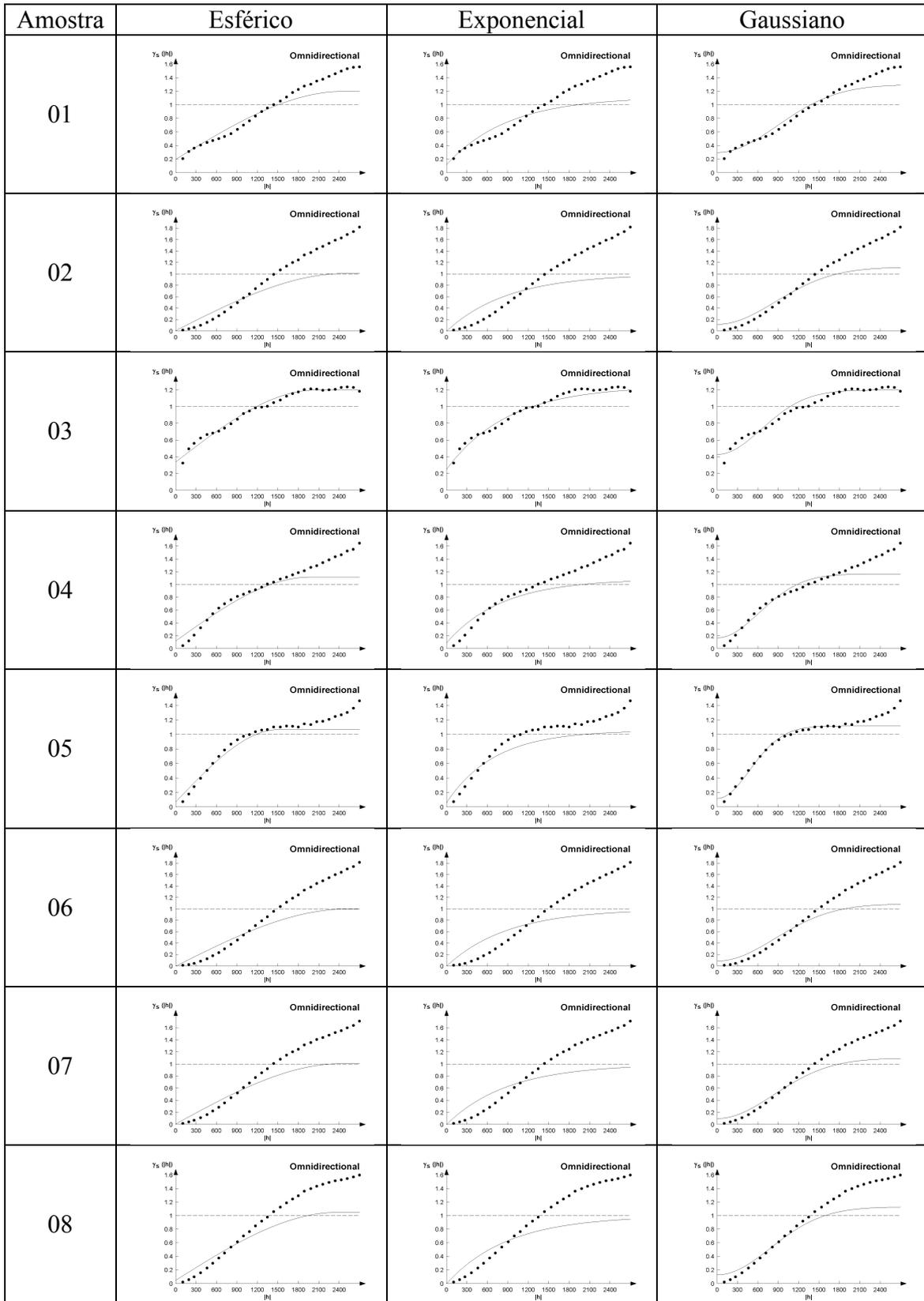
VALERIANO, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos - SP. 2002. INPE-9364-RPQ/736.

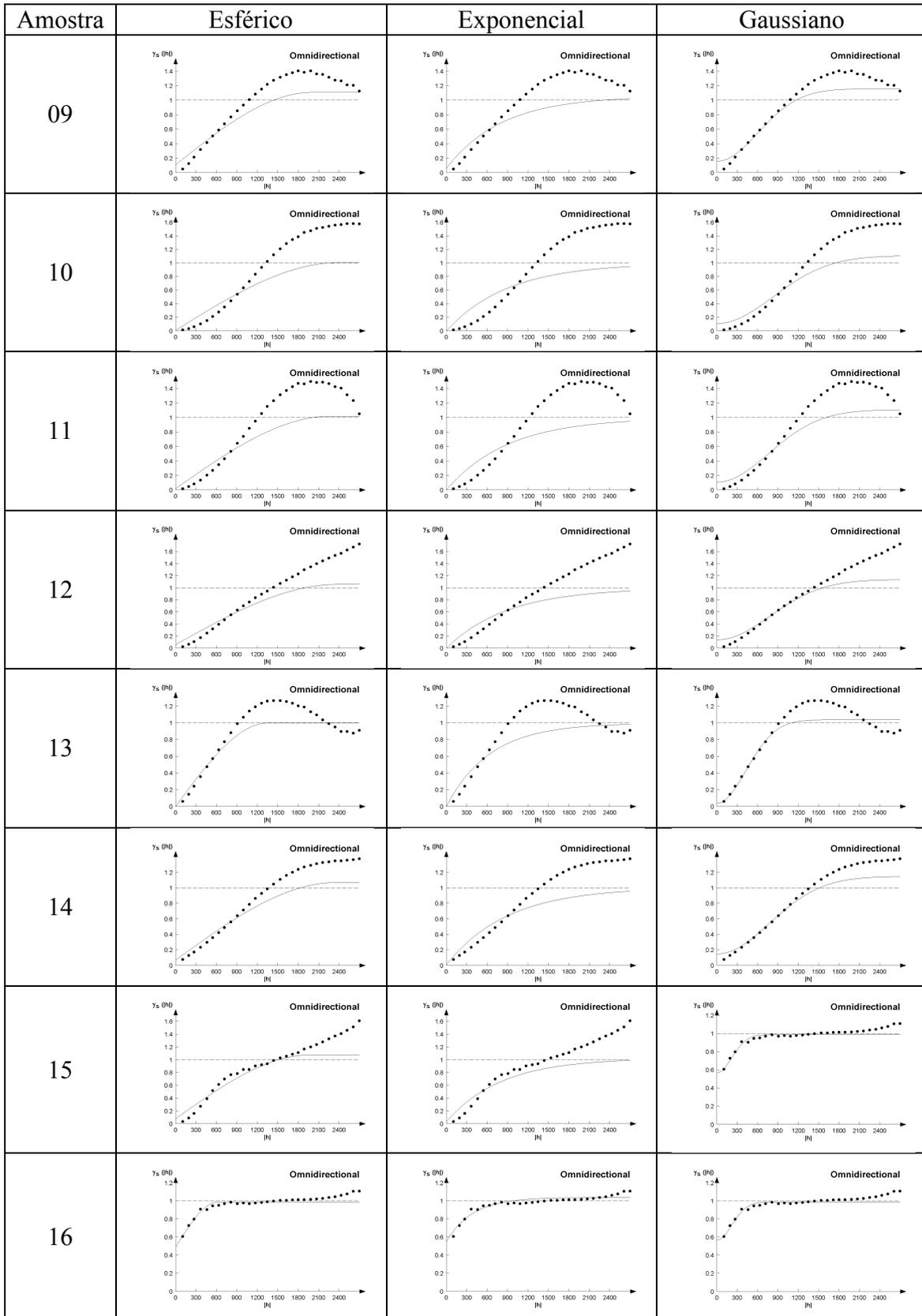
VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. v. 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 1996. 240 p.

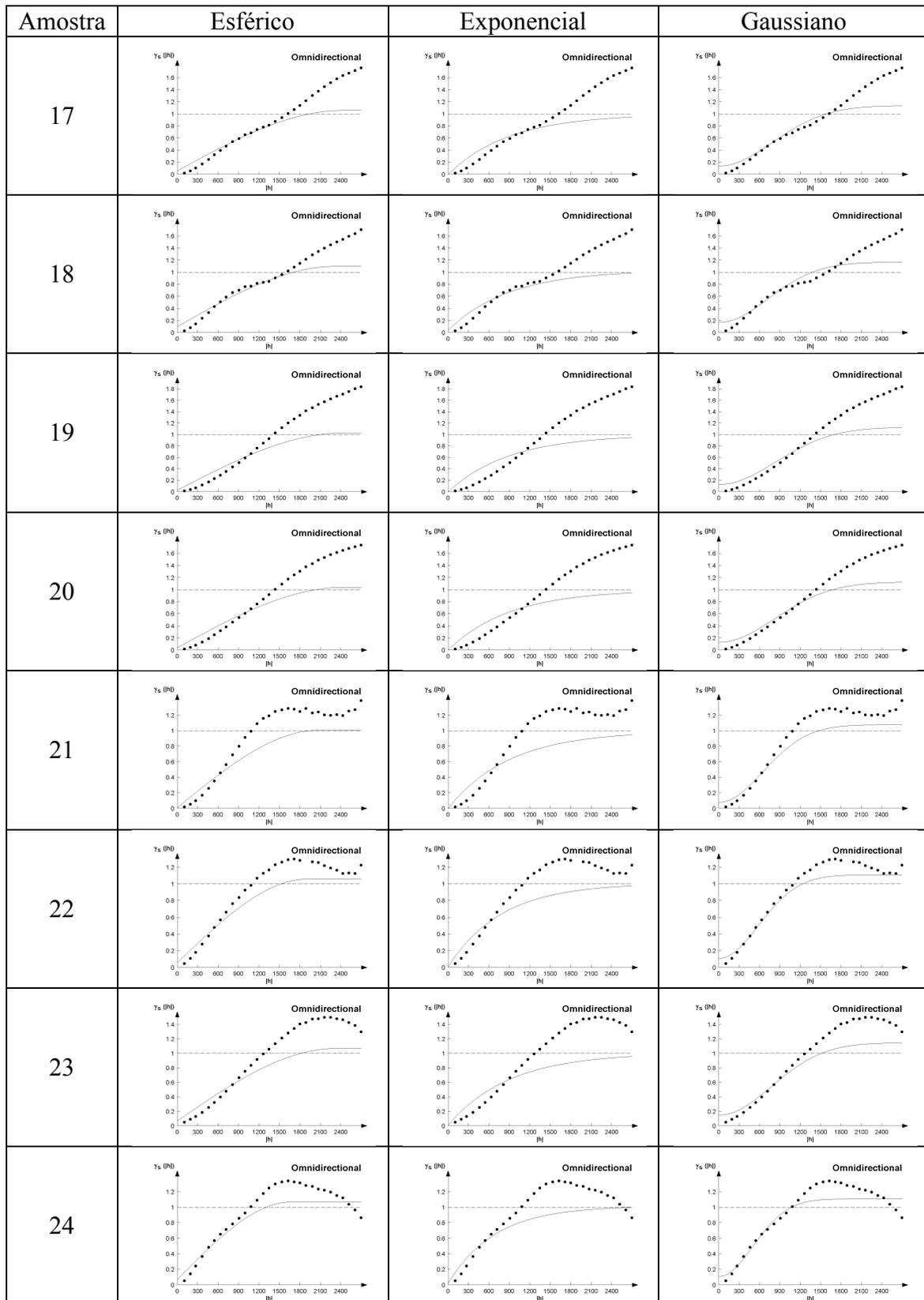
YI, J. L. R.; AULICINO, L. C. M., SHIMABUKURO, Y.E, RUDORFF, B. F.; DUARTE, V; MOREIRA, M. A; MARTINI, P. R.; SOUZA, I. M. **Segmentação de imagens-fração derivadas do sensor TM-Landsat para o mapeamento do uso do solo no município de Sapezal (MT)**. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 71-76.

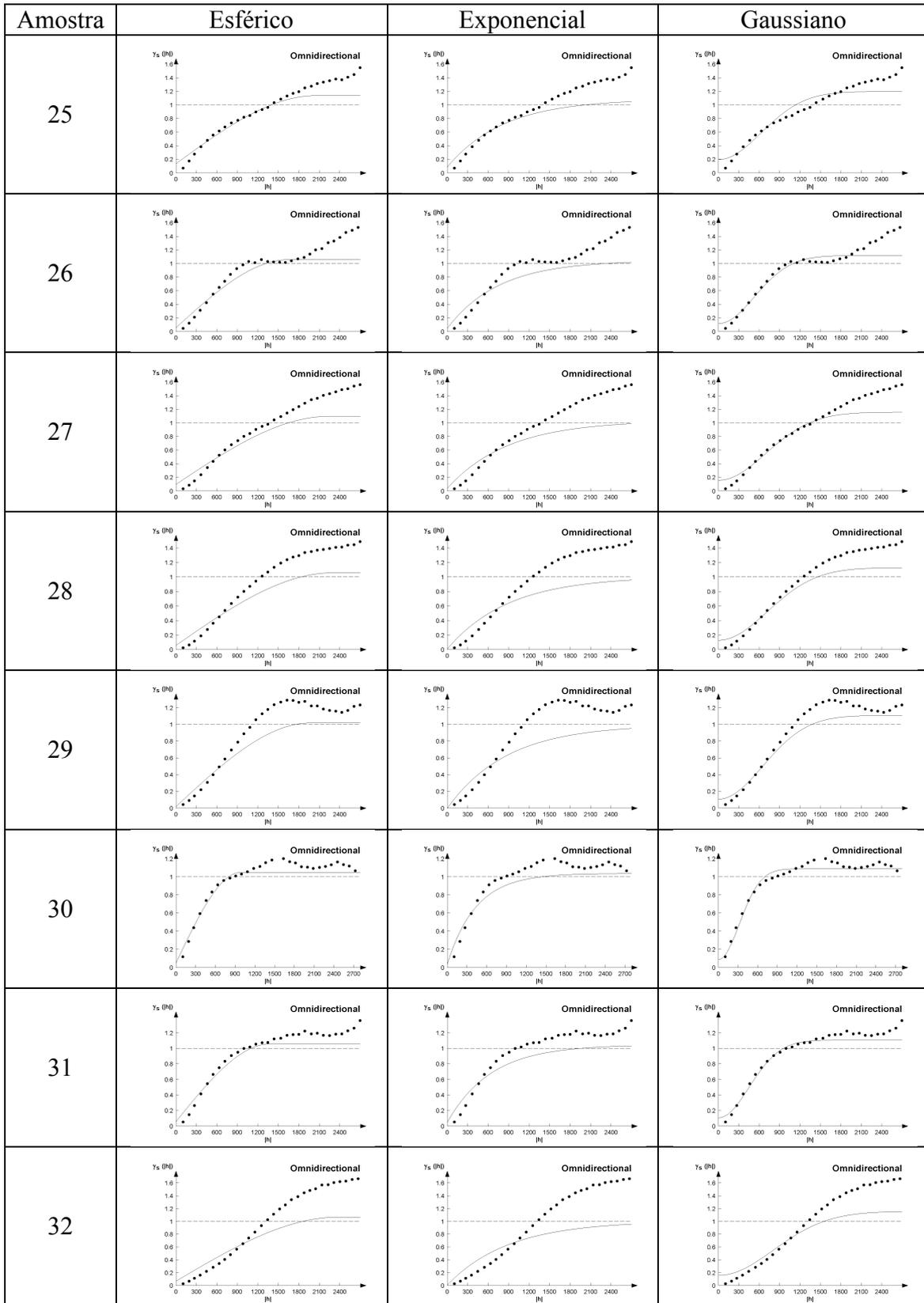
MANDAROLA JR, E.; HOOGAN, D. J. **VULNERABILIDADES E RISCOS: ENTRE GEOGRAFIA E DEMOGRAFIA**. XIV Encontro Nacional de Estudos Populacionais da ABEP, realizado em Caxambú/MG – Brasil, de 20-24 de Setembro de 2004.

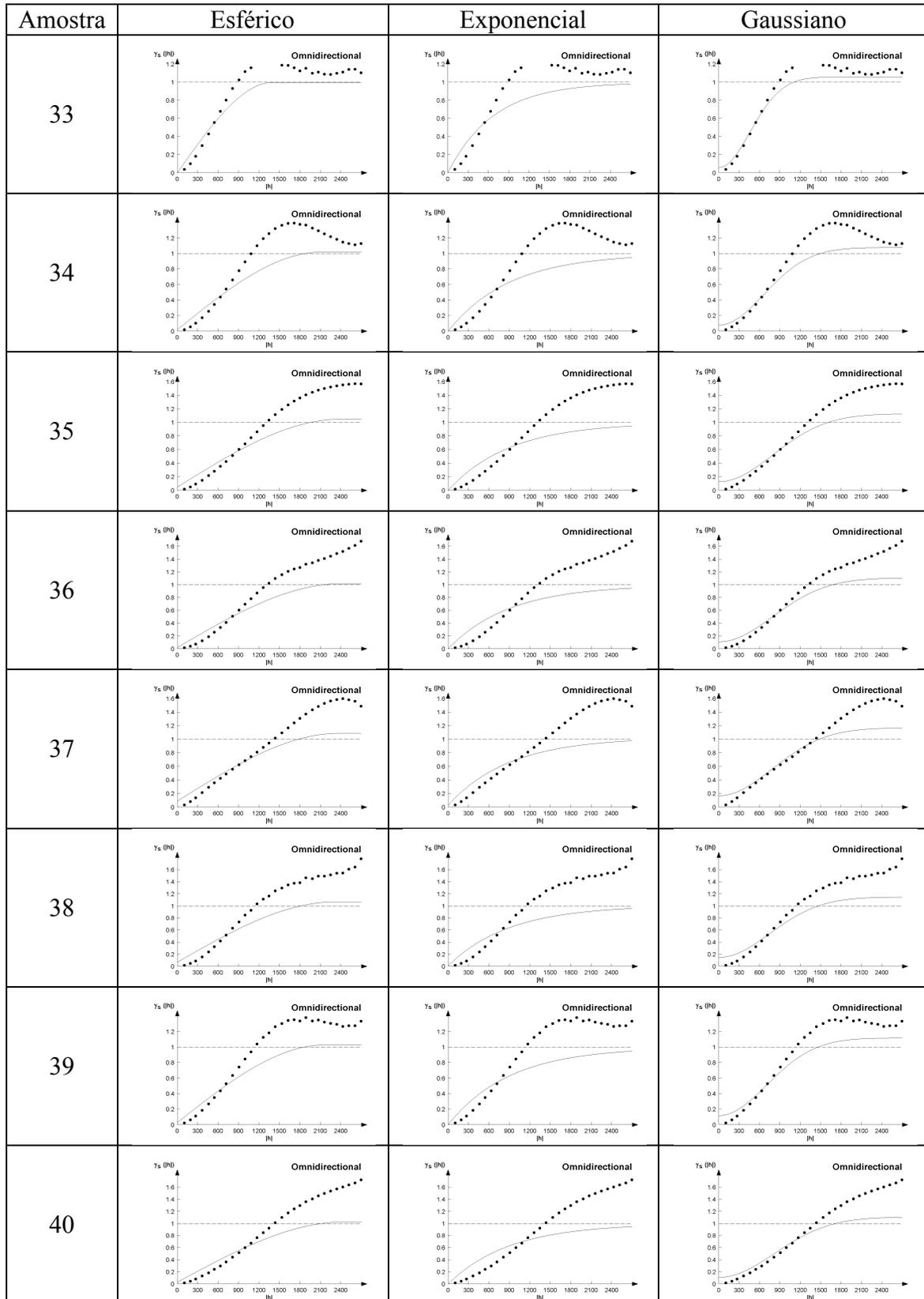
APENDICE A – SEMIVARIOGRAMAS MODELADOS

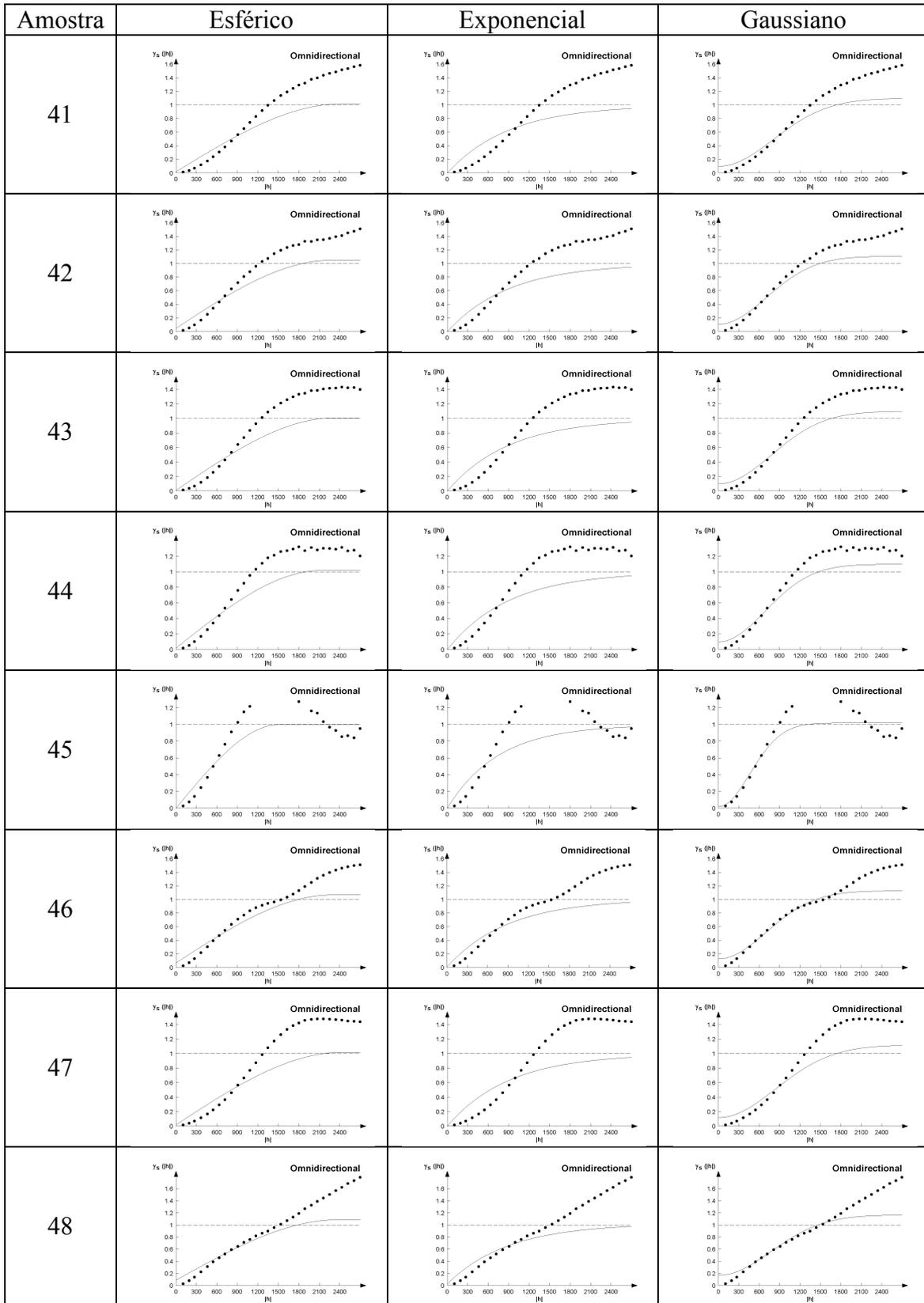


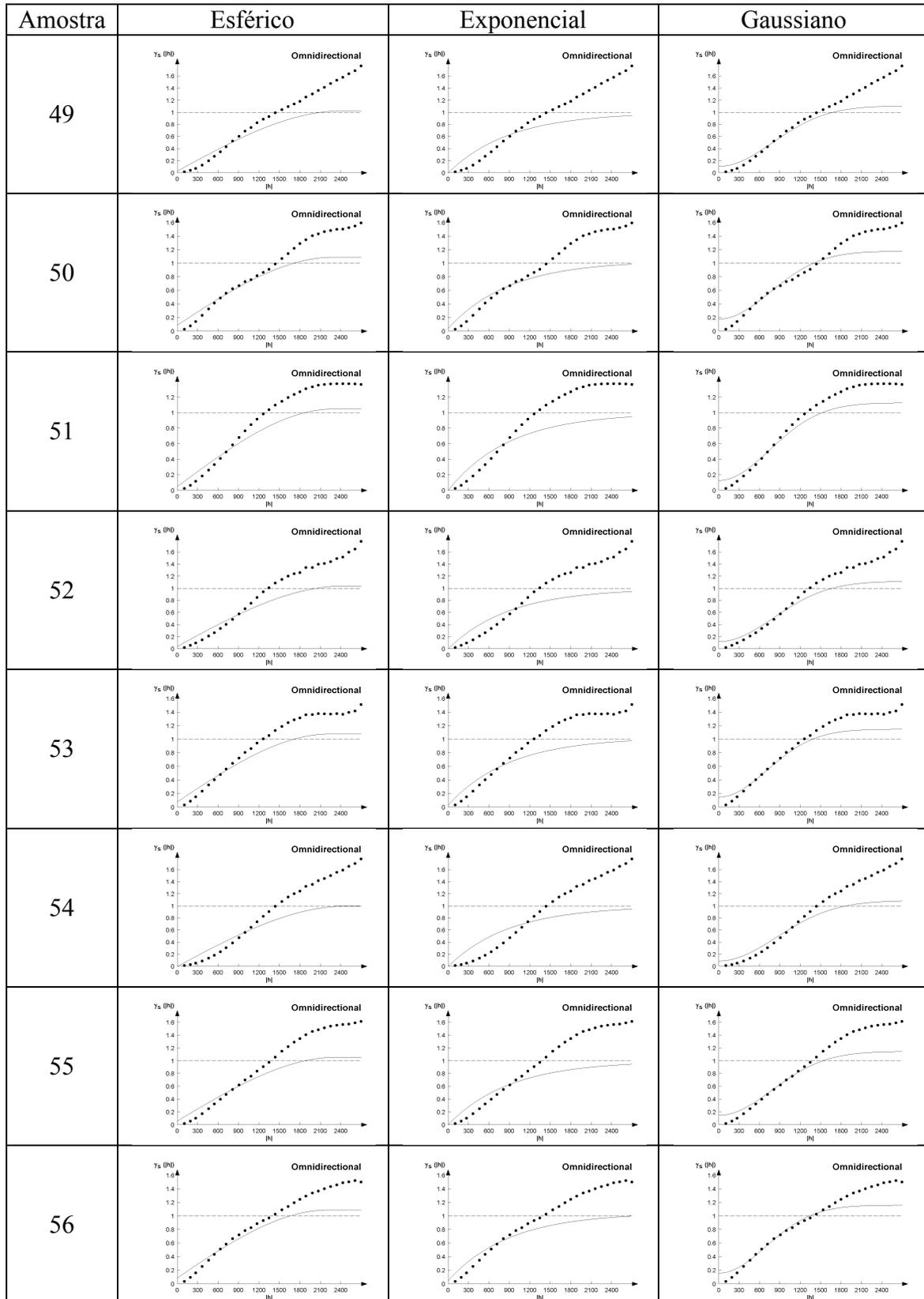


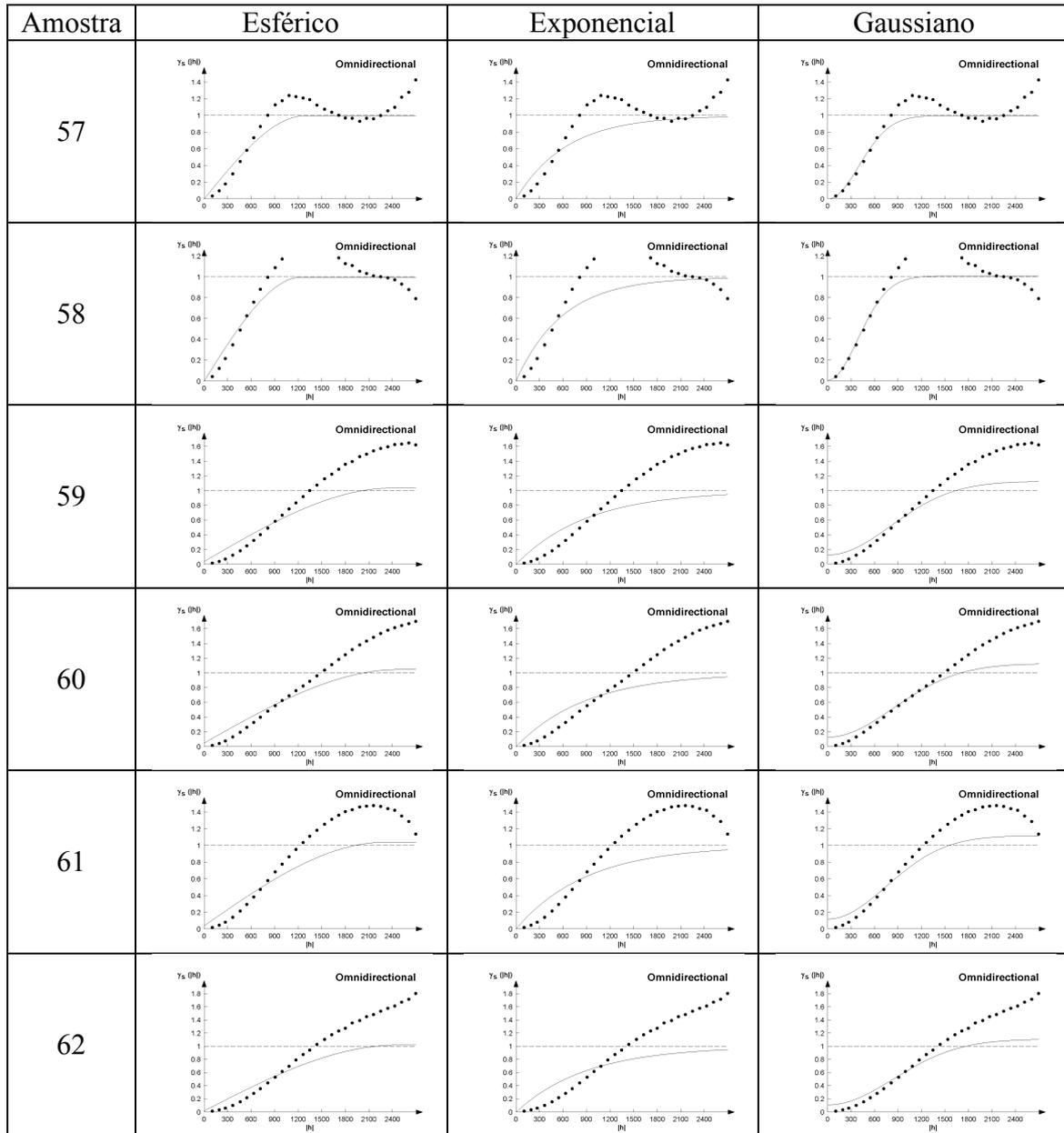












APENDICE B – PARÂMETROS DOS SEMIVARIOGRAMAS E AJUSTE.

Amostra	Esférico			Exponencial			Gaussiano					
	Nugget	Range	Sill	fit	Nugget	Range	Sill	fit	Nugget	Range	Sill	fit
	1	0.2	2513	1	0.041768	0.12	2700	1	0.10469	0.3	2159.8	1
2	0.01	2484	1	0.20897	0	2700	1	0.34898	0.12	2093.5	1	0.14841
3	0.339967	2051.9	0.86	0.006732	0.25	2700	1	0.006949	0.43	1592.9	0.77	0.013424
4	0.12	1966.8	1	0.053384	0.089966	2429.8	1	0.099631	0.169967	1516.1	1	0.03471
5	0.07	1511.9	1	0.026599	0.06	2114.2	1	0.0525	0.12	1179.7	1	0.011625
6	0	2510.9	1	0.22779	0	2700	1	0.38233	0.089966	2081	1	0.16271
7	0.01	2430	1	0.17135	0	2700	1	0.29983	0.1	2037.4	1	0.11619
8	0.05	2375.9	1	0.14501	0	2700	1	0.24894	0.13	1916.9	1	0.096837
9	0.11	1998	1	0.060606	0.06	2430	1	0.11629	0.16	1485	1	0.034444
10	0.01	2403	1	0.21651	0	2700	1	0.35502	0.11	2025	1	0.15236
11	0.02	2268	1	0.15726	0	2700	1	0.26652	0.11	1862.9	1	0.10574
12	0.06	2375.8	1	0.14177	0	2700	1	0.24085	0.14	1916.9	1	0.096229
13	0	1350	1	0.019248	0	1917	1	0.045912	0.039966	1052.9	1	0.009152
14	0.069966	2348.8	1	0.056346	0.01	2700	1	0.12663	0.15	1889.9	1	0.02884
15	0.0799	1970.9	1	0.065878	0.03	2402.9	1	0.11235	0.12	1403.9	1	0.039489
16	0.489967	621	0.49996	0.003932	0.5498	1133.9	0.48986	0.004163	0.57	539.82	0.41996	0.003568
17	0.059966	2429.9	1	0.14603	0	2700	1	0.2449	0.139967	1943.9	1	0.1023
18	0.0999	2321.8	1	0.10158	0.04	2700	1	0.17553	0.169967	1781.9	1	0.069375
19	0.03	2429.9	1	0.25539	0	2700	1	0.39709	0.13	2052	1	0.18776
20	0.039933	2429.9	1	0.20981	0	2700	1	0.33757	0.129933	2024.9	1	0.14983
21	0.01	2078.9	1	0.058708	0	2700	1	0.11891	0.079966	1592.9	1	0.027513
22	0.06	1917	1	0.036188	0.01	2349	1	0.078918	0.11	1430.9	1	0.014764
23	0.07	2322	1	0.1359	0.01	2700	1	0.23693	0.15	1890	1	0.088511
24	0.07	1674	1	0.030884	0.02	2052	1	0.061962	0.11	1242	1	0.017356
25	0.14	2052	1	0.041964	0.09	2484	1	0.083833	0.2	1539	1	0.028255
26	0.059933	1646.9	1	0.050614	0.049933	2267.8	1	0.083332	0.12	1295.9	1	0.027471
27	0.1	2240.8	1	0.093352	0.039966	2672.9	1	0.16671	0.16	1700.9	1	0.059792
28	0.06	2294.9	1	0.09843	0.01	2700	1	0.17964	0.13	1755	1	0.059974
29	0.02	1970.9	1	0.037065	0	2619	1	0.085274	0.11	1593	1	0.014544
30	0.05	980	1	0.010236	0.04	1316	1	0.029562	0.089966	783.9	1	0.004074
31	0.06	1376.9	1	0.030132	0.05	1916.9	1	0.059266	0.11	1106.9	1	0.010407

Amostra	Esférico			Exponencial			Gaussiano					
	Nugget	Range	Sill	fit	Nugget	Range	Sill	fit	Nugget	Range	Sill	fit
	33	0	1404	1	0.033555	0	2025	1	0.069932	0.06	1133.9	1
34	0.02	2105.9	1	0.068886	0	2700	1	0.13601	0.08	1619.9	1	0.036812
35	0.05	2394.7	1	0.17157	0	2700	1	0.28528	0.13	1943.9	1	0.11755
36	0.02	2402.9	1	0.14985	0	2700	1	0.26215	0.11	1943.9	1	0.099367
37	0.09	2375.9	1	0.14616	0.03	2700	1	0.24768	0.169967	1916.9	1	0.10083
38	0.069966	2321.8	1	0.17786	0.01	2700	1	0.28544	0.15	1835.9	1	0.12327
39	0.03	2160	1	0.078852	0	2700	1	0.15267	0.12	1727.9	1	0.044154
40	0.03	2456.9	1	0.19388	0	2700	1	0.3219	0.11	1997.9	1	0.13589
41	0.02	2430	1	0.15633	0	2700	1	0.27597	0.1	1971	1	0.10375
42	0.05	2267.9	1	0.099337	0	2700	1	0.18091	0.11	1728	1	0.060246
43	0.01	2321.9	1	0.13328	0	2700	1	0.24101	0.1	1889.9	1	0.084541
44	0.02	2132.9	1	0.076517	0	2700	1	0.14866	0.1	1673.9	1	0.041346
45	0	1512	1	0.051952	0	2241	1	0.091108	0.02	1133.9	1	0.022788
46	0.07	2294.9	1	0.079535	0.01	2700	1	0.14904	0.13	1727.9	1	0.049353
47	0.02	2430	1	0.17889	0	2700	1	0.30524	0.12	2052	1	0.12183
48	0.0899	2375.8	1	0.13093	0.03	2700	1	0.22034	0.17	1889.9	1	0.092329
49	0.03	2429.9	1	0.15193	0	2700	1	0.2603	0.11	1943.9	1	0.10342
50	0.09	2284.6	1	0.1149	0.39966	2699.9	1	0.2053	0.18	1835.9	1	0.077428
51	0.05	2294.9	1	0.086654	0	2700	1	0.16718	0.13	1835.9	1	0.050776
52	0.04	2429.9	1	0.14719	0	2700	1	0.025625	0.12	1970.9	1	0.098173
53	0.08	2240.9	1	0.081147	0.03	2700	1	0.15483	0.15	1727.9	1	0.048751
54	0	2484	1	0.20353	0	2700	1	0.35179	0.09	2078.8	1	0.14213
55	0.06	2348.9	1	0.16649	0	2700	1	0.27479	0.15	1916.9	1	0.11525
56	0.09	2214	1	0.087137	0.05	2700	1	0.15953	0.16	1701	1	0.055575
57	0	1296	1	0.051178	0	1917	1	0.090599	0	972	1	0.022107
58	0	1242	1	0.031419	0	1782	1	0.06926	0.01	945	1	0.009568
59	0.04	2402.9	1	0.20972	0	2700	1	0.33681	0.129967	1970.9	1	0.14864
60	0.05	2483.9	1	0.188052	0	2700	1	0.2995	0.13	2051.9	1	0.12562
61	0.04	2294.9	1	0.14464	0	2700	1	0.24727	0.12	1835.9	1	0.095306
62	0.02	2456.9	1	0.20545	0	2700	1	0.3409	0.11	2051.9	1	0.14477