



**FAUSTO WEIMAR ACERBI JÚNIOR**

**ANÁLISE DA ESTRUTURA ESPACIAL DA  
COBERTURA DO SOLO**

**LAVRAS – MG**

**2015**

**FAUSTO WEIMAR ACERBI JÚNIOR**

**ANÁLISE DA ESTRUTURA ESPACIAL DA COBERTURA DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. José Roberto Soares Scolforo

Coorientador

Dr. José Márcio de Mello

**LAVRAS – MG**

**2015**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Acerbi Júnior, Fausto Weimar.

Análise da estrutura espacial da cobertura do solo / Fausto  
Weimar Acerbi Júnior. – Lavras : UFLA, 2015.

120 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2015.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Geoestatística. 3. Regressão  
logística. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

## **FAUSTO WEIMAR ACERBI JÚNIOR**

### **ANÁLISE DA ESTRUTURA ESPACIAL DA COBERTURA DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de julho de 2015.

Dr. José Márcio de Mello UFLA

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dra. Adriana Leandra de Assis Instituto de Ciências Agrárias (ICA) -  
UFMG - Campus Regional de Montes Claros

Dr. Luciano Teixeira de Oliveira UFLA

Dr. José Roberto Soares Scolforo  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2015**

Dedico

Eduarda Martiniano de Oliveira Silveira

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial ao professor José Roberto Scolforo pela confiança e amizade. Professor, você é o amigo certo nas horas certas e incertas. Obrigado pela oportunidade de tê-lo como amigo e mestre.

Agradeço ao professor José Márcio de Mello pela amizade e pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida profissional. José, sua lealdade, dedicação e companheirismo são qualidades que admiro muito e tornam o ambiente de trabalho extremamente agradável. Obrigado.

Agradeço a todos os outros professores do Departamento de Ciências Florestais e dos demais departamentos desta Universidade que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao CNPq pela oportunidade de realizar e concluir essa Tese. Em especial ao seu antigo Diretor de Ciências Agrárias, Biológicas e da Saúde, Dr. Paulo Sergio Lacerda Beirão, pelo exemplo de profissionalismo e pela confiança em mim depositada.

Agradeço a todos os meus orientados que contribuíram com esse trabalho, em especial a Aliny A. Reis, Júlia Fonseca e Inácio T. Bueno. Não há satisfação profissional maior para um orientador do que tê-los como orientados.

Agradeço à Eduarda Martiniano de Oliveira Silveira por todo apoio em todos os momentos da realização deste trabalho. Duda, você foi a alma e o coração dessa Tese e a você dedico esse trabalho.

## RESUMO GERAL

A superfície terrestre está em constante transformação quando se trata do uso e cobertura do solo. As mudanças no uso e cobertura do solo, quer sejam elas naturais ou induzidas pela ação do homem, afetam a distribuição espacial e a disponibilidade dos recursos naturais. O impacto destas mudanças nos ecossistemas depende da localização, extensão e das taxas de conversão do uso do solo no tempo. A dificuldade reside no fato de que estas mudanças são, normalmente, determinadas por uma complexa rede de fatores biofísicos e socioeconômicos que interagem no tempo e no espaço, em diversos contextos históricos e geográficos. Este estudo utilizou imagens de sensoriamento remoto e técnicas geoestatísticas na caracterização da estrutura espacial inicial da paisagem e das mudanças ocorridas nestas estruturas ao longo dos anos causadas pelas alterações no uso e cobertura do solo, para, a partir disto, utilizar a regressão logística na estimativa das áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo. A Tese foi dividida em três Artigos. No Artigo 1 (*Change detection in Brazilian Savanas using semivariograms derived from NDVI images*) aborda-se a detecção das mudanças no uso e cobertura do solo em áreas de Cerrado utilizando semivariogramas derivados de imagens NDVI. No Artigo 2 (Análise das mudanças na estrutura da paisagem através de semivariogramas derivados de imagens NDVI), foi analisada a influência da estrutura inicial da paisagem no comportamento dos parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças, para então, utilizando técnicas de regressão logística, determinar as áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo. No Artigo 3 (Relação entre as métricas da ecologia da paisagem, os parâmetros dos semivariogramas e mudanças na cobertura do solo), analisou-se a relação entre as métricas da ecologia da paisagem e os parâmetros dos semivariogramas, derivados de imagens NDVI, em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo, com o objetivo de identificar quais métricas da ecologia da paisagem podem auxiliar no entendimento do comportamento dos parâmetros dos semivariogramas frente às mudanças no uso e cobertura do solo.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Detecção de mudanças. Semivariogramas. Regressão logística.

## GENERAL ABSTRACT

The Earth's surface is constantly changing when it comes to land use and land cover. Changes in the use and cover of land, whether natural or induced by man, affect the spatial distribution and availability of natural resources. The impact of these changes on ecosystems depends on the location, extent and the conversion rates of land use. The difficulty lies in the fact that land use and land cover changes are usually determined by a complex network of biophysical and socio-economic factors, which interact in time and space as well as in different historical and geographical contexts. In this study, we used remote sensing images and geostatistic techniques to characterize the initial spatial structure of the landscape, as well as the changes occurred in these structures over the years. Later, logistic regression was used to estimate the areas with the highest probability of changes. This thesis was divided into three articles. Article 1 (Change detection in Brazilian Savannah using semivariograms derived from NDVI images), deals with the detection of changes in the land use and land cover of Cerrado areas using semivariograms derived from NDVI images. In Article 2 (Analysis of changes in landscape structure by means of semivariograms derived from NDVI images), we analyzed the influence of the initial structure of the landscape over the behavior of semivariogram parameters in changed areas. Subsequently, we used logistic regression techniques to determine the areas with the highest probability of changes in land use and land cover. In Article 3 (Relation between landscape ecology metrics, semivariogram parameters and changes in land cover), we analyzed the relation between landscape ecology metrics and semivariogram parameters derived from NDVI images in areas changed by land use and cover, in order to identify which landscape ecology metrics can aid in understanding the behavior of the semivariogram parameters on these areas.

Keywords: Remote sensing. Change detection. Semivariograms. Logistic regression.



## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Figure 1. Study area. Landsat TM images from May 2010, June 2010 and July 2011 were, first, geometrically corrected into Universal Transverse Mercator (UTM) projection and, second, atmospherically corrected by means of the Dark Object Subtraction (DOS) procedure (Chavez, 1996) to generate the NDVI values (Figure 2). .....24
- Figure 2. NDVI images from 2010/05 (T0); 2010/06 (T1); 2011/07 (T2), respectively. ....25
- Figure 3. Box plot (a), histogram (b) and trend analysis (c) for T0, T1 and T2.....27
- Figure 4. (a) Spherical model T0; (b) Spherical model T1; (c) Spherical model T2; (d) Exponential model T0; (e) Exponential model T1; (f) Exponential model T2; (g) Gaussian model T0; (h) Gaussian model T1; (i) Gaussian model T2.....28
- Figure 5. Scaled semivariograms for all fitted models.....31

#### ARTIGO 2

- Figura 1 Localização da área de estudo e estrutura de amostragem .....43
- Figura 2 Semivariograma escalonado 2010-2011; Imagem NDVI de 2010; Imagem NDVI de 2011.....57
- Figura 3 Semivariogramas para os anos de 2010 e 2011; Semivariograma Escalonado 2010-2011; Imagens NDVI de 2010 e 2011; Polígonos de Mudanças (Vermelho: Desmatamentos; Verde: Regeneração) .....58

Figura 4	Semivariogramas para os anos 2010 e 2011; Semivariograma Escalonado 2010-2011; Imagens NDVI 2010 e 2011; Polígonos de Mudanças (Vermelho: Desmatamentos; Verde: Regeneração) .....	59
Figura 5	Semivariogramas para os anos 2010 e 2011; Semivariograma Escalonado 2010-2011; Imagens NDVI 2010 e 2011; Polígonos de Mudanças (Verde: Regeneração).....	60
Figura 6	(a) Imagens NDVI 2010; (b) Imagens NDVI 2011 dos blocos 4, 2, 9 e 12, respectivamente.....	64
Figura 7	(a) Imagens NDVI de 2010; (b) Imagens NDVI de 2011 dos blocos 1, 3, 6 e 11, respectivamente.....	65

### **ARTIGO 3**

Figura 1	Localização da área de estudo e estrutura de amostragem .....	78
Figura 2	Bloco sem mudanças no uso e cobertura do solo.....	95
Figura 3	Bloco com aumento nos valores dos parâmetros <i>Sill</i> e <i>Range</i> .....	96
Figura 4	Bloco com aumento no valor do parâmetro <i>Sill</i> e diminuição ou não alteração no valor do parâmetro <i>Range</i> .....	97
Figura 5	Bloco com diminuição no valor do parâmetro <i>Sill</i> e diminuição ou aumento no valor do parâmetro <i>Range</i> .....	98

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

Table 1. Semivariogram parameters.....	29
Table 2. Cross validation statistics for selecting the semivariogram models..	30

#### ARTIGO 2

Tabela 1 Medidas de posição e dispersão dos valores de NDVI.....	52
Tabela 2 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os anos 2010 e 2011 .....	55
Tabela 3 Padrões de comportamento dos parâmetros <i>Sill</i> e <i>Range</i> para os anos de 2010 e 2011 .....	56
Tabela 4 Estimativa dos parâmetros do modelo logístico utilizado na predição das probabilidades de mudanças do uso e cobertura do solo .....	62
Tabela 5 Blocos de validação com seus valores de <i>Range</i> , <i>Sill</i> e <i>Nugget</i> no ano de 2010 e suas respectivas probabilidades de ocorrência de mudança do uso e cobertura do solo .....	63

#### ARTIGO 3

Tabela 1 Métricas da ecologia de paisagem selecionados para análise da área de estudo .....	85
Tabela 2 Variáveis e abreviaturas nas fórmulas das métricas utilizadas .....	87
Tabela 3 Medidas de posição e dispersão dos valores de NDVI .....	88
Tabela 4 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os anos 2010 e 2011 .....	91

Tabela 5	Padrões de comportamento dos parâmetros <i>Sill</i> e <i>Range</i> para os anos de 2010 e 2011 .....	92
Tabela 6	Matriz de confusão, erros de omissão e inclusão e suas respectivas acurácias .....	94

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> ..... 13
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> ..... 15
	<b>REFERÊNCIAS</b> ..... 17
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> ..... 19	
	<b>ARTIGO 1</b> <i>Change detection in Brazilian Savannas using semivariograms derived from NDVI images</i> ..... 19
	<b>ARTIGO 2</b> <i>Análise das mudanças na estrutura da paisagem através de semivariogramas derivados de imagens NDVI</i> ..... 35
	<b>ARTIGO 3</b> <i>Relação entre as métricas da ecologia da paisagem, os parâmetros dos semivariogramas e mudanças na cobertura do solo</i> ..... 73
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS</b> ..... 105

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

Os ecossistemas florestais brasileiros apresentam grande diversidade e complexidade em decorrência das dimensões continentais apresentadas pelo país. O Cerrado é um dos biomas mais alterados pelo processo de ocupação antrópica no Brasil e possui elevada importância em termos ambientais globais no que diz respeito aos recursos hídricos, à absorção e estocagem de carbono e à biodiversidade, sendo considerado como um dos hotspots mundiais devido a sua altíssima prioridade para a conservação da biodiversidade e por apresentar mais de 75% de sua vegetação original alterada (HERRY-SILVA, 2005; MYERS et al., 2000).

A fragmentação e o desmatamento têm sido os principais agentes de devastação do Cerrado, e dada a diversidade ecológica e riqueza desse bioma, seu desmatamento tem atraído a atenção da comunidade científica nas últimas décadas (FERREIRA et al., 2009; KLINK; MACHADO, 2005; ROCHA et al., 2011). O desmatamento do Cerrado possui diversas causas, porém a expansão das fronteiras agrícolas e a criação de fazendas agropecuárias podem ser consideradas os principais agentes de devastação desse ecossistema.

O monitoramento das modificações no uso e ocupação do solo no Cerrado, acompanhado de avaliações técnicas que subsidiem a correta interpretação dos padrões de ocupação torna-se fundamental para o correto planejamento do uso sustentável dos recursos naturais desse bioma (FERREIRA et al., 2009; NARDINI, 2009). A utilização de imagens de sensoriamento remoto aliada a técnicas geoestatísticas tem conseguido maior eficiência na análise e monitoramento da cobertura terrestre (ACERBI JÚNIOR et al., 2015), possibilitando a compreensão do comportamento dos ecossistemas naturais em

diferentes escalas, e fornecendo suporte à tomada de decisões mais confiáveis e eficientes.

Segundo Van Der Meer (2012) a junção entre sensoriamento remoto e geoestatística vem se desenvolvendo desde o final da década de 1980 de diferentes maneiras. Alguns trabalhos combinaram modelos espaciais com dados de sensoriamento remoto para melhorar as estimativas geoestatísticas utilizando índices espectrais como variáveis secundárias (GALEANA-PIZAÑA et al., 2014; VIANA et al., 2012). Portanto, estudos que exploram a análise da distribuição espacial dos objetos da superfície terrestre, detectados pelas imagens de sensoriamento remoto, juntamente com as técnicas geoestatísticas, surgem como uma alternativa promissora para ampliar o entendimento do impacto das mudanças no uso e cobertura do solo na estrutura da paisagem.

Diante do exposto, nesse estudo busca-se avaliar a eficiência dos parâmetros dos semivariogramas, construídos a partir de imagens NDVI, para analisar as mudanças ocorridas no uso e cobertura do solo. Além disso, esse estudo busca estabelecer correlações entre os valores dos parâmetros dos semivariogramas e a estrutura espaço-temporal da cobertura do solo para, a partir dessa análise, estimar a probabilidade de ocorrência destas mudanças.

Assim, a presente tese foi dividida em duas partes. Na primeira parte, apresenta-se uma introdução geral sobre os principais temas que se referem ao estudo. Na segunda parte, Artigo 1 (Change detection in Brazilian Savanas using semivariograms derived from NDVI images) aborda-se a detecção de mudanças na vegetação do Cerrado utilizando semivariogramas derivados de imagens NDVI. O estudo foi motivado por duas perguntas científicas: É possível detectar desmatamentos da vegetação do Cerrado analisando os parâmetros dos semivariogramas construídos a partir de imagens NDVI? Se sim, qual parâmetro dos semivariogramas é mais apropriado para detectar mudanças na cobertura do solo?

No Artigo 2 (Análise das mudanças na estrutura da paisagem através de semivariogramas derivados de imagens NDVI), foi analisada a influência da estrutura inicial da paisagem no comportamento dos parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças. Investigou-se também a probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo baseado na análise dos parâmetros dos semivariogramas em duas diferentes datas. Para isso, foi testada a hipótese de ocorrência de uma relação entre as mudanças ocorridas no período analisado com o comportamento espaço-temporal dos parâmetros dos semivariogramas.

No Artigo 3 (Relação entre as métricas da ecologia da paisagem, os parâmetros dos semivariogramas e mudanças na cobertura do solo), analisou-se a relação entre as métricas da ecologia da paisagem e os parâmetros dos semivariogramas, derivados de imagens NDVI, em áreas com mudanças no uso e cobertura do solo, com o objetivo de identificar quais métricas da ecologia da paisagem podem auxiliar no entendimento do comportamento dos parâmetros dos semivariogramas frente às mudanças no uso e cobertura do solo.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral deste estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia para detectar as mudanças na cobertura do solo, bem como as áreas com maior probabilidade de ocorrência dessas mudanças, utilizando os parâmetros dos semivariogramas derivados de imagens NDVI.

Os objetivos específicos foram:

- a) analisar o potencial dos semivariogramas construídos a partir de imagens NDVI para detectar as mudanças na cobertura do solo;



- b) identificar qual parâmetro dos semivariogramas é mais apropriado para detectar as mudanças na cobertura do solo;
- c) avaliar qual o melhor modelo para construir os semivariogramas;
- d) analisar os parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo e estabelecer padrões de comportamento baseados na estrutura espacial inicial da paisagem;
- e) identificar qual parâmetro do semivariograma apresenta maior contribuição para detecção de áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças na cobertura do solo;
- f) ajustar um modelo de regressão logística para detectar as áreas com maior probabilidade de mudanças na cobertura do solo;
- g) identificar quais métricas da ecologia da paisagem podem auxiliar no entendimento do comportamento dos parâmetros dos semivariogramas frente às mudanças no uso e cobertura do solo.

## REFERÊNCIAS

ACERBI JÚNIOR, F. W. et al. Change detection in Brazilian savannas using semivariograms derived from NDVI images. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 2, p. 103-109, mar./abr. 2015.

FERREIRA, L. G. et al. Dinâmica agrícola e desmatamentos em áreas de cerrado: uma análise a partir de dados censitários e imagens de resolução moderada. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 2, p. 117-127, ago. 2009.

GALEANA-PIZAÑA, J. M. et al. Modeling the spatial distribution of above-ground carbon in Mexican coniferous forests using remote sensing and a geostatistical approach. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 30, p. 179-189, 2014.

HERRY-SILVA, G. G. A importância das unidades de conservação na preservação da diversidade biológica. **Revista Logos**, Mossoró, n. 12, p. 127-151, 2005.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 333, p. 853-858, Nov. 2000.

NARDINI, R. C. **Determinação do conflito de uso e ocupação do solo em áreas de preservação permanente da microbacia do ribeirão água-fria, Bofete (SP), visando a conservação dos recursos hídricos**. 2009. 146 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

ROCHA, G. F. et al. Detecção de desmatamentos no bioma cerrado entre 2002 e 2009: padrões, tendências e impactos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 3, p. 341-349, 2011.

VAN DER MEER, F. Remote-sensing image analysis and geostatistics. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 33, n. 18, p. 5644-5676, Sept. 2012.

VIANA, H. et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using Forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. **Ecological Modelling**, London, v. 226, p. 22-35, 2012.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS**

**ARTIGO 1 *Change detection in Brazilian Savannas using semivariograms derived from NDVI images***

DETECÇÃO DE MUDANÇAS NO CERRADO BRASILEIRO  
UTILIZANDO SEMIVARIOGRAMAS DERIVADOS DE  
IMAGENS NDVI

*Fausto Weimar Acerbi Júnior, Eduarda Martiniano de Oliveira Silveira, José Márcio de Mello, Carlos Rogério de Mello, José Roberto S. Scolforo*

**Normas da Revista Ciência e Agrotecnologia**  
**(Artigo científico publicado na revista Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 39, n. 2, p. 103-109, março/abril, 2015.)**

**ABSTRACT**

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is often used to extract information from vegetated areas since it is directly related to vegetation parameters such as percent of ground cover, photosynthetic activity of the plant and leaf area index. The aim of this paper was to analyze the potencial of semivariograms generated from NDVI values to detect changes in vegetated areas, analyzing their behavior (shape) and derived metrics (range, sill and nugget). Semivariograms were generated from NDVI values derived from Landsat TM images of May 2010, June 2010 and July 2011. The study area is located in the northern state of Minas Gerais, Brazil, and is covered by Brazilian savannas vegetation, totalizing 1,596 ha. Semivariograms were generated after the exploratory data analysis. Models were fitted, validated and their metrics analyzed. The results showed a very clear trend where the shape of semivariograms, sill and range were different when deforestation occurred and were similar when the area had not been changed. The model that generated best fit was the Gaussian, however, the three models tested showed behavior that makes it possible to detect changes in vegetation. It suggests that further researches should explore the degree to which the semivariogram can be used to quantify this spatial variability as well as to analyze the influence of sazonalidade for changing detection in vegetated areas.

**Index terms:** Deforestation, Geostatistics, Remote sensing.

**RESUMO**

O Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é frequentemente usado para extrair informações de áreas vegetadas, uma vez que está diretamente relacionado com parâmetros da vegetação, como o percentual de cobertura do solo, a atividade fotossintética da planta e o índice de área foliar. O objetivo

deste trabalho foi analisar o potencial dos semivariogramas gerados a partir do índice de vegetação NDVI para a detecção de desmatamentos, analisando seu comportamento (forma) e métricas derivadas (alcance, contribuição e efeito pepita). Semivariogramas foram gerados a partir do índice de vegetação NDVI, derivados de imagens Landsat TM de maio de 2010, junho de 2010 e julho de 2011. A área de estudo é uma região de Cerrado, no norte do estado de Minas Gerais, Brasil, totalizando 1.596 ha. Foram gerados semivariogramas após a análise exploratória dos dados. Modelos foram ajustados, validados e suas métricas analisadas. Observou-se que a forma dos semivariogramas, alcance e contribuição foram diferentes quando houve desmatamentos na área e similares quando a área não foi alterada. O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o gaussiano, porém os três modelos testados mostraram comportamentos similares quanto à eficiência na detecção dos desmatamentos. Os resultados sugerem que estudos futuros explorem o grau de intervenção que os semivariogramas temporais consigam detectar, bem como a influência que a sazonalidade de algumas fisionomias pode ter nas análises.

**Termos para indexação:** Desmatamento; Geoestatística; Sensoriamento remoto.

## INTRODUCTION

The Earth's surface and remotely sensed imagery contain spatial information that, if quantified can be used to optimize procedures in remote sensing, including image classification (Curran, 1988) and vegetation monitoring (Constantini et al., 2012). According to Mello et al. (2005), the semivariograms are the best method to characterize the structure of spatial continuity.

The semivariogram is the geostatistical method to find the presence of correlation between the samples. The semivariance is derived by calculating one-half the average squared difference in data values for every pair of data locations separated by the same distance. Then, low values indicate less variability or greatest similarity (Mello et al., 2005).

This function can be estimated using remotely sensed data or ground data and represented as a plot that gives a picture of the spatial dependence of each point on its neighbor. The semivariogram is calculated from raster images using digital numbers or spectral indices as data values. Information at pixel level is usually not independent of their neighbors, but rather spatially correlated with them. Thus, the correlation may be quantified and used for mapping purposes or identify different spatial patterns in the space (Zawadzki et al., 2005).

According to Zawadzki et al. (2005), the semivariance functions are usually characterized by three parameters: Sill, Range and Nugget. The sill is the plateau that the semivariogram reaches; beyond the plateau, spatial dependence does not exist anymore. It is the sum of total variation explained by the spatial structure and nugget effect. The range (range of influence or correlation) is the distance at which the semivariogram reaches the sill, or at which two data points are uncorrelated. The nugget is the vertical discontinuity at the origin. It is a combination of sampling error and short-scale variation that occurs at a scale smaller than the closest sample spacing. Moreover, there is also the contribution that is the difference between the sill and the nugget, which is known as structural variance of the data set.

The obtained experimental semivariogram is used to fit an appropriate theoretical mathematical model, such as the spherical, exponential, among others (McBratney & Webster, 1986).

Curran (1988), described six semivariogram forms of man modified surfaces. The classic one, periodic, aspatial, periodic-classic, unbounded and multifrequency. The first three are the basic forms whereas the last three are permutations of the basic forms. Lévesque & King (1999), analysed semivariogram forms, derived from high resolution imagery, to successfully discriminate structurally damaged forest from healthy forest.

Since we know the behavior of the reflected energy from the plants across the electromagnetic spectrum, we can derive the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values by focusing on the satellite bands that are most sensitive to vegetation information. The NDVI is a numerical indicator that uses the visible and near-infrared bands of the electromagnetic spectrum to analyze remote sensing measurements of the vegetation in order to assess whether the target being observed contains live green vegetation or not (Rouse et al., 1974). It is often directly related to other ground parameters such as percent of ground cover, photosynthetic activity of the plant, surface water, leaf area index and the amount of biomass.

Constantini et al. (2012), integrated remote sensing change detection techniques and spatial analyses of NDVI values to detect forest disturbances in forested areas of two volcanic lake watersheds in Italy. The authors investigated the existence of a relationship between vegetation spatial heterogeneity and the occurrence of disturbance events.

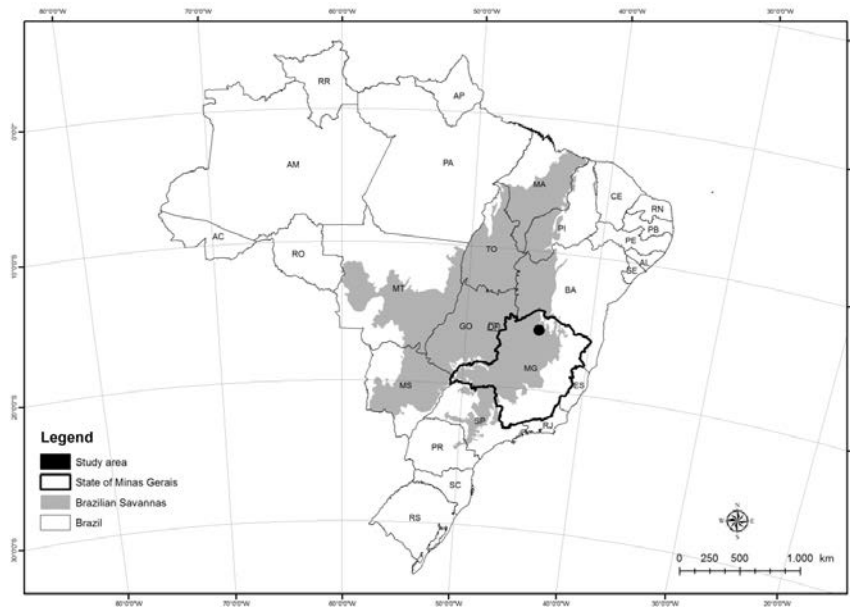
The hypothesis of this study were: (1) Is it possible to detect deforestation analyzing the semivariogram metrics? (2) Which metric derived from the semivariogram is better to detect changes in landscape? (3) Which is the best model to construct the semivariograms?

Then, the aim of this paper was to analyze the potential of semivariograms generated from the NDVI values, derived from Landsat TM images, to detect changes in an area covered by Brazilian savannas vegetation.

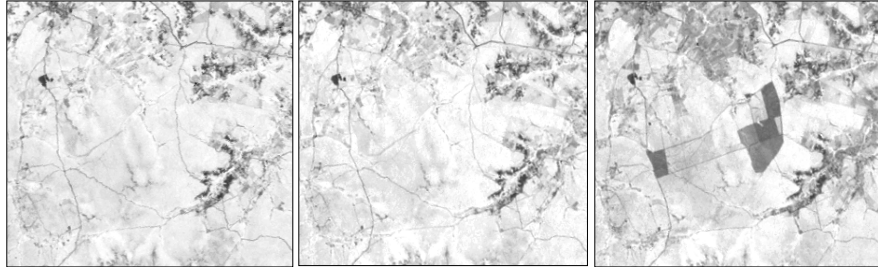


## MATERIAL AND METHODS

The study area is located in the northern state of Minas Gerais, Brazil and is covered by Brazilian savannas vegetation, totalizing 1,596 ha (Figure 1).



**Figure 1. Study area.** Landsat TM images from May 2010, June 2010 and July 2011 were, first, geometrically corrected into Universal Transverse Mercator (UTM) projection and, second, atmospherically corrected by means of the Dark Object Subtraction (DOS) procedure (Chavez, 1996) to generate the NDVI values (Figure 2).



**Figure 2.** NDVI images from 2010/05 (T0); 2010/06 (T1); 2011/07 (T2), respectively.

A set of ten transects with 100 pixels long, totalizing 1,000 pixels, were systematically extracted from each NDVI image in order to do the exploratory analysis (box plot, histogram and trends). The first stage had the purpose of observing the general behavior of the data (shape, distribution, central tendency). This type of analysis, does not consider the structure of spatial dependence, but it is important for allowing the identification of outliers that exert some kind of influence in the geostatistical analyzes.

Semivariograms were constructed and three different models (exponential, spherical and gaussian) were fitted with ordinary least squares (OLS) to analyze the behavior and shape, and the values of sill, nugget and range. Scaled semivariograms were also built for all fitted models in each year of analysis. This semivariogram is useful for viewing the spatial dependence structure among images from different dates.

According to Bussab & Moretin (2002), OLS is one of the most widely used statistics estimators. It is based on the principle of least squares, introduced by Gauss in 1809. The method obtains the values of the parameters of a model that minimizes the sum of the square of the difference between observed and estimated.

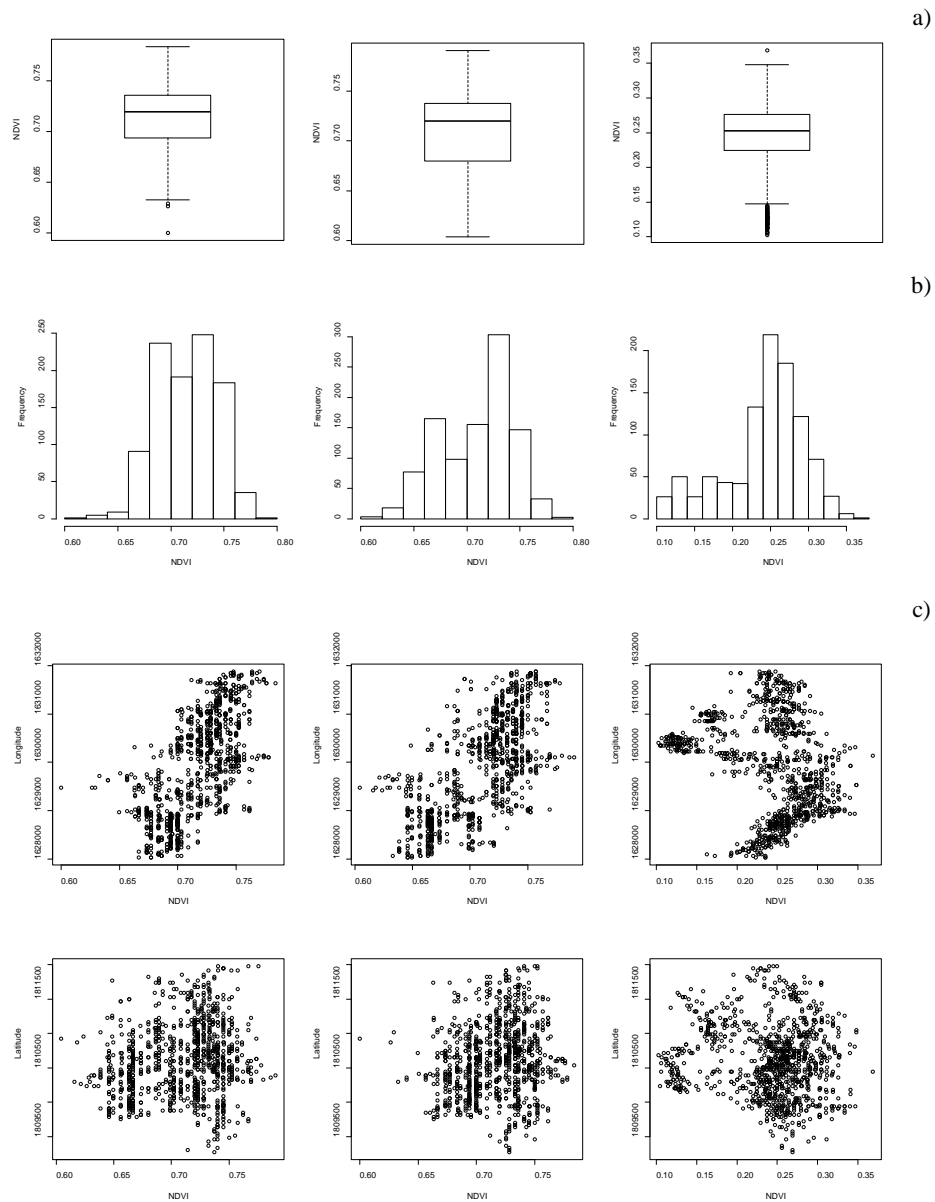
The fitted models were validated by cross validation, analyzing the reduced average error (RE) and the standard deviation of the reduced errors

(SRE). According to Cressie (1993), for the best model the reduced average error should be approximately 0 and the standard deviation of the reduced errors should be approximately 1.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

According to the boxplot, the NDVI values ranged from 0.6 and 0.8 for T0 and T1; and from 0.10 to 0.35 for T2 (Figure 3a). In this first exploratory analysis was possible to detect outliers values in T0 and T2, however, the values were not removed since they were not extreme and therefore did not affect the analysis.

Looking at the histogram (Figure 3b) it showed that the NDVI distribution did not deviate too severely from normality. Graphically, the distribution of the NDVI values in function of latitude and longitude (Figure 3c), showed what could be trends, however they did not affect the analysis.



**Figure 3.** Box plot (a), histogram (b) and trend analysis (c) for T0, T1 and T2.

The Spherical, Exponential and Gaussian models for T0, T1 and T2 are presented in Figure 4. For the three models the semivariograms shapes were

different for pre (T0 and T1) and post (T2) deforestation, but similar if the area has not changed (T0 and T1).

Figure 4 shows that the semivariograms range and sill changed after deforestation (T2), suggesting that semivariograms can be used as a tool to detect land cover change.

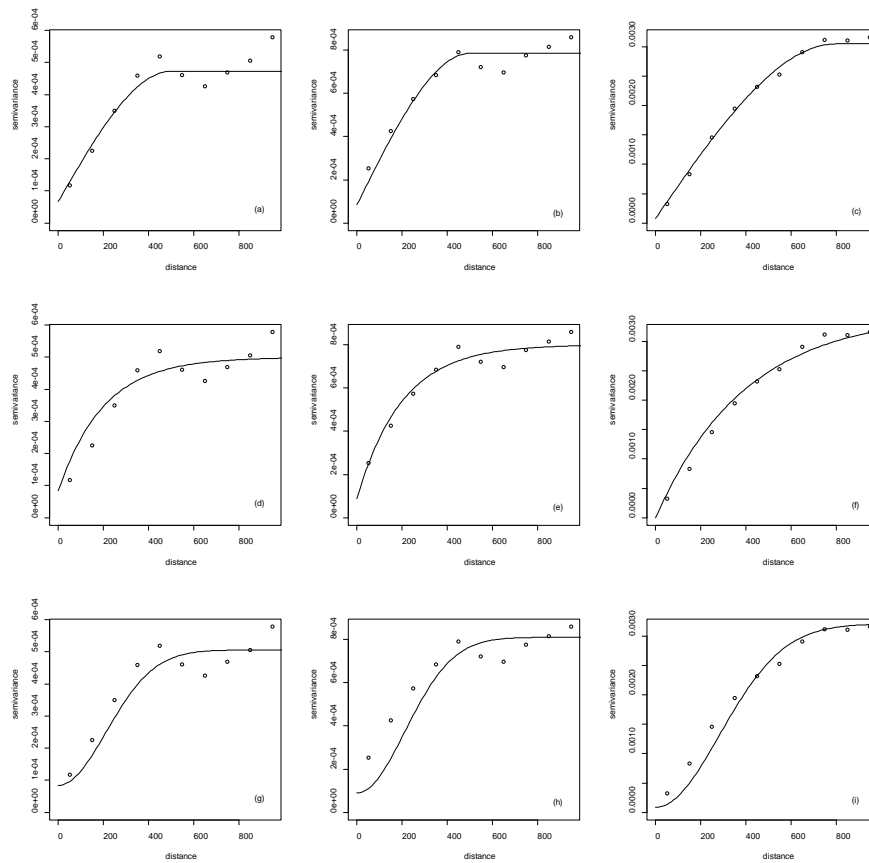


Figure 4. (a) Spherical model T0; (b) Spherical model T1; (c) Spherical model T2; (d) Exponential model T0; (e) Exponential model T1; (f) Exponential model T2; (g) Gaussian model T0; (h) Gaussian model T1; (i) Gaussian model T2.

In fact, analyzing the sill in Table 1, if the area had changed (T2) the semivariances values were higher than the values of T0 and T1. When the area had not been changed, the sill was similar, as was the case of T0 and T1.

According to Sertel et al. (2007), the semivariogram range can be used to quantify coarse spatial variability since it increases as a result of changes in the landscape use. Table 1 shows that the range increased after deforestation probably due to the mix of low NDVI values from bare soils (deforested areas) and high NDVI values from forested areas. For the Exponential model the difference was even greater than the Spherical and Gaussian models.

The nugget provides information about fine scale spatial variation, which means the variation within, rather than between, pixels (Sertel et al., 2007). All models presented very small values (Table 1), which indicate that the spatial resolution of 30 m was suitable to control the random variation in the data.

**Table 1.** Semivariogram parameters.

	<b>Nugget</b>	<b>Sill</b>	<b>Range</b>
Spherical model			
T0	0.0001	0.0004	500.00
T1	0.0001	0.0007	500.00
T2	0.0001	0.0030	800.00
Exponential model			
T0	0.0001	0.0004	599.14
T1	0.0001	0.0007	599.14
T2	0.0000	0.0050	2395.56
Gaussian model			
T0	0.0001	0.0004	519.24
T1	0.0001	0.0007	519.24
T2	0.0001	0.0030	692.32

According to the cross validation statistics in Table 2, the three models were very similar, with the Gaussian model presenting a slightly better performance since the reduced average errors (RE) are closest to 0 for T0, T1 and T2. In terms of the standard deviation of the reduced errors (SRE), the Gaussian model presented the value closest to 1 for T0, but for T1 and T2 was the Spherical model which presented the closest values to 1.

**Table 2.** Cross validation statistics for selecting the semivariogram models.

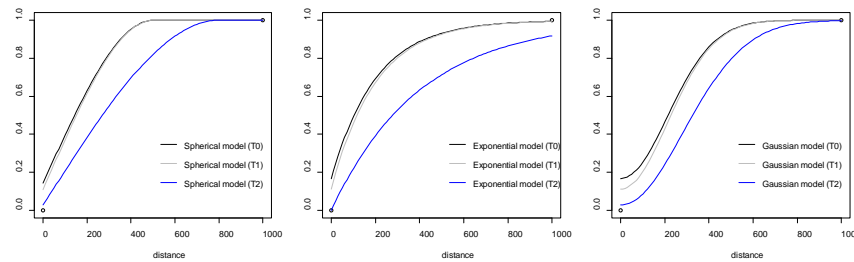
	<b>T0</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	
RE	-0.00093	-0.00227	-0.00294	Spherical models
SRE	0.82866	1.05756	0.75076	
RE	-0.00088	-0.00201	-0.00389	Exponential models
SRE	0.69489	0.91804	0.73369	
RE	-0.00047	-0.00183	-0.00087	Gaussian models
SRE	1.11629	1.55133	1.77370	

Most of the semivariograms in the geostatistical literature are bounded by a sill. In urban and agricultural landscapes semivariograms are often of man modified surfaces with a repetitive spatial pattern, and as a result this classic semivariogram is relatively unusual (Curran, 1988). In this case, the study area was covered by savanna vegetation, and the classic semivariograms occurred.

Bounded semivariograms occur wherever the variance of all observations remains constant throughout the sampled domain. Unbounded semivariograms are manifested when the variance of all observations within a domain is not constant (Nielsen & Wendroth, 2003).

The scaled semivariogram is useful for comparing the structure of spatial dependence. In the present study was specifically used to check if the spatial structure has changed after deforestation. Analyzing the scaled

semivariograms (Figure 5) that were built for all fitted models was possible to see the differences in the structure of spatial dependence after deforestation.



**Figure 5.** Scaled semivariograms for all fitted models.

Constantini et al. (2012), obtained similar results after analyzing the relationship between the extent of temporal change and spatial heterogeneity of mixed forested areas in the watershed of two Italian volcanic lakes. Their results demonstrated a positive linear relationship between the total number of changed pixels in the sampling areas during the three investigated periods and the semivariogram range detected on the respective starting NDVI images.

Sertel et al. (2007), analyzed the use of semivariograms to identify earthquake damage in an urban area in Turkey, and concluded that the semivariogram shape was different for pre and post-earthquake if the area was severely damaged, but similar if the area was not severely damaged. The areas of severe damage had even larger increases in range and sill whereas the areas of minor earthquake damage had similar ranges and sill before and after the earthquake.



## CONCLUSION

This study had demonstrated the usefulness of semivariogram shape and metrics, generated from NDVI values, derived from Landsat TM images, to detect deforestation in an area covered by savanna vegetation. In deforested areas, the landscape change has caused spatial variations that were quantified by the semivariogram metrics of range, sill and shape.

The range and sill were the two most important and complementary metrics. Both metrics increased their values after deforestation (T2) and remain similar if the land cover had not been changed (T0 and T1).

The model that best fitted the data was the Gaussian one, however, the three models were very similar, which made possible to detect changes in savanna vegetation using any one of them.

It is suggested that further researches should explore the degree to which the semivariogram can be used to quantify this spatial variability as well as to analyze the influence of sazonality for changing detection in vegetated areas.

## REFERENCES

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Saraiva, 2002. 526p.

CHAVEZ, P.S. Image-based atmospheric corrections – revised and improved. **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v.62, p.1025-1036. 1996.

CONSTANTINI, M.L.; ZACCARELLI, N.; MANDRONE, S.; ROSSI, D.; CALIZZA, E.; ROSSI, L. NDVI spatial pattern and the potential fragility of

mixed forested areas in volcanic lake watersheds. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.285, p.133-141, 2012.

CRESSIE, N.A.C. **Statistics for Spatial Data, Revised Edition**. John Wiley & Sons, New York, 928p. 1993.

CURRAN, P.J. The semivariogram in remote sensing: An introduction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.24, n.3, p.493-507, 1988.

LÉVESQUE, J.; KING, D.J. Airborne digital camera image semivariance for evaluation of forest structural damage at an acid mine site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.68, n.2, p.112-124, 1999.

MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, New Jersey, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **CERNE**, Lavras, v.11, n.2, p.113-126, 2005.

NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2003. 398p.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W., HARLAN, J.C. Monitoring the vernal advancements and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, **Greenbelt**, MD., p. 1-371, 1974.

SERTEL, E., KAYA, S. AND CURRAN, P.J. Use of semivariograms to identify earthquake damage in an urban area. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v.45, n.6, p.1590-94. 2007.

ZAWADZKI, J.; CIESZEWSKI, C.J.; ZASADA, M.; LOWE, R.C. Applying geostatistics for investigations of forest ecosystems using remote sensing imagery. **Silva Fennica**, v.39, n.4, p. 599-617. 2005.

**ARTIGO 2 Análise das mudanças na estrutura da paisagem através de semivariogramas derivados de imagens NDVI**

**FAUSTO WEIMAR ACERBI JÚNIOR<sup>1</sup>**

**Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003) e adaptado para a versão final da UFLA.**

---

<sup>1</sup> Mestrado em Engenharia Florestal – Professor Associado I da Universidade Federal de Lavras.

## RESUMO

Como as mudanças no uso e cobertura do solo são, normalmente, determinadas por uma complexa rede de fatores biofísicos e socioeconômicos que interagem no tempo e no espaço, em diversos contextos históricos e geográficos, é de extrema importância para qualquer programa de manejo e conservação da biodiversidade não só a detecção destas mudanças, mas também a identificação das áreas com maior probabilidade de ocorrência delas. Assim, os objetivos deste estudo foram: (1) analisar os parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo e estabelecer padrões de comportamento baseados na estrutura espacial inicial da paisagem; (2) identificar qual parâmetro dos semivariogramas (*Sill*, *Range* ou *Nugget*), derivado de imagens NDVI, apresenta maior contribuição para estimativa da probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo; (3) ajustar um modelo de regressão logística para estimativa da probabilidade de mudanças no uso e cobertura do solo no período analisado. A partir das imagens Landsat 5 TM dos anos de 2010 e 2011, foram gerados os valores de NDVI para 40 blocos de 10 km<sup>2</sup> distribuídos aleatoriamente na sub-bacia hidrográfica Rio Pandeiros. Em seguida, foi gerada a imagem NDVI diferença entre os anos de 2010 e 2011 para a obtenção do número de pixels de mudanças. Para a detecção das áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças foi ajustado um modelo de regressão logística tendo como variáveis independentes os parâmetros iniciais dos semivariogramas, ou seja, os parâmetros Range, Sill e Nugget estimados para o ano de 2010. Para a análise e validação do modelo foi utilizado o teste de Hosmer-Lemeshow e uma amostra contendo 12 blocos de 10 km<sup>2</sup> independentes que não entraram no ajuste do modelo. Os resultados revelaram que para uma análise e principalmente para um melhor entendimento do comportamento dos parâmetros dos semivariograma em função das mudanças no uso e cobertura do solo, não se deve observar somente as mudanças nos valores dos parâmetros dos semivariogramas, mas também a composição da estrutura inicial da paisagem. O modelo logístico ajustado utilizando os valores iniciais dos parâmetros dos semivariogramas como variáveis independentes foi eficiente na detecção de áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo e o parâmetro Sill

foi o que apresentou maior contribuição para estimativa da probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo.

Palavras-chave: Geoestatística. Detecção de mudanças. Modelo logístico.

## 1 INTRODUÇÃO

A superfície terrestre está em constante transformação quando se trata do uso e cobertura do solo. Mudanças de uso e cobertura do solo referem-se tanto à conversão entre classes de cobertura do solo, como por exemplo, os processos de desertificação e de desmatamentos, quanto a alterações nessas classes, como a degradação da cobertura vegetal.

As mudanças no uso e cobertura do solo, quer sejam elas naturais ou induzidas pela ação do homem, afetam a distribuição espacial, temporal e a disponibilidade dos recursos naturais (MANCINO et al., 2014). O impacto destas mudanças nos ecossistemas depende da localização, extensão e das taxas de conversão do uso do solo no tempo (BIGGS et al., 2008; VRIES et al., 2015).

Como as mudanças no uso e cobertura do solo são, normalmente, determinadas por uma complexa rede de fatores biofísicos e socioeconômicos que interagem no tempo e no espaço, em diversos contextos históricos e geográficos (AGUIAR, 2006), é de extrema importância para qualquer programa de manejo e conservação da biodiversidade não só a detecção destas mudanças, mas também a identificação das áreas com maior probabilidade de ocorrência delas.

Contudo, devido à complexidade dos fatores que determinam as mudanças de uso e cobertura do solo, torna-se difícil localizar as áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças, sendo a análise de registros históricos das perturbações ocorridas numa determinada área uma fonte de dados importante para a estimativa da probabilidade de ocorrência de novas mudanças (NILSSON; GRELSSON, 1995).

Assim, devido as suas características espaciais, espectrais e temporais o uso de imagens de satélite tem se tornado cada vez mais indispensável no mapeamento e monitoramento de mudanças na estrutura da paisagem. Dentre as diversas técnicas para a detecção das mudanças de uso e cobertura do solo, a técnica da imagem NDVI diferença é uma das mais apropriadas, uma vez que permite a detecção de mudanças sutis no número, estrutura e condições da vegetação (VOROVENCII, 2000).

A geoestatística é uma técnica de análise espacial tipicamente aplicada a variáveis regionalizadas, que são variáveis distribuídas no espaço e com valores espacialmente dependentes (MELLO et al., 2009; VAN DER MEER, 2012). Os valores de NDVI de uma imagem de sensoriamento remoto podem ser tratados como variáveis regionalizadas, uma vez que as informações contidas num pixel de uma área vegetada são altamente correlacionadas com as informações contidas nos pixels vizinhos.

Portanto, técnicas geoestatísticas, aplicadas às imagens NDVI, podem ser utilizadas na análise e no monitoramento de mudanças na estrutura espacial da vegetação. De fato, para autores como Constantini et al. (2012) e Garrigues et al. (2006), os valores das imagens NDVI são as variáveis mais robustas utilizadas para descrever a heterogeneidade espacial e temporal da paisagem.

Segundo Mendes e Vega (2011), modelos geográficos que analisam as dinâmicas de uso e cobertura do solo podem ser entendidos como um conjunto de técnicas utilizadas para descrever processos locais das mudanças em condições quantitativas e para testar o entendimento destes processos. No geral, estes modelos podem ser



classificados em modelos de previsão do padrão geográfico das mudanças e modelos de previsão das taxas de mudanças.

Assim, este estudo visa aplicar técnicas geoestatísticas na caracterização da estrutura espacial da paisagem captadas pelas imagens de sensoriamento remoto e das mudanças ocorridas nestas estruturas ao longo dos anos, causadas pelas alterações no uso e cobertura do solo. A partir disto, baseado nos parâmetros dos semivariogramas da estrutura inicial da paisagem e utilizando técnicas de regressão logística, foram estimadas as áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo.

Para isso a hipótese a ser testada é que a estrutura espacial inicial da paisagem tem influência no comportamento dos parâmetros dos semivariogramas após a ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo.

Portanto, este estudo foi motivado por duas perguntas científicas:

1. A estrutura espacial inicial da paisagem afeta o comportamento dos parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo?
2. Se sim, é possível criar um indicador para estimar áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo baseado nos parâmetros iniciais dos semivariogramas?

Na busca de respostas a essas perguntas, os objetivos deste estudo foram:

1. Analisar os parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo e estabelecer padrões de comportamento baseados na estrutura espacial inicial da paisagem;
2. Identificar qual parâmetro dos semivariogramas apresenta maior contribuição para a detecção das áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo;
3. Ajustar um modelo de regressão logística para detectar as áreas com maior probabilidade de mudanças no uso e cobertura do solo no período analisado

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudo**

A área de estudo compreende a Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Rio Pandeiros (UPGRH-SF9), localizada no Alto-Médio São Francisco, entre os paralelos 14°00' e 16°30' de latitude sul e os meridianos 43°00' e 46°00' de longitude oeste (Figura 1).

A UPGRH-SF9 abrange um total de 24 municípios com uma área de drenagem de 31.258 km<sup>2</sup>. O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) desses municípios varia de 0,58 a 0,70, sendo considerada uma das regiões mais pobres do estado de Minas Gerais (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS, 2008; SOUZA et al., 2008).

Sua riqueza hídrica se constitui pela formação de um grande número de veredas, muitas delas representando fontes de importantes cursos d'água, como os rios Acari, Pardo, Pandeiros, Itacarambi, Cochá, Carinhanha, e outros menores (SOUZA et al., 2008).

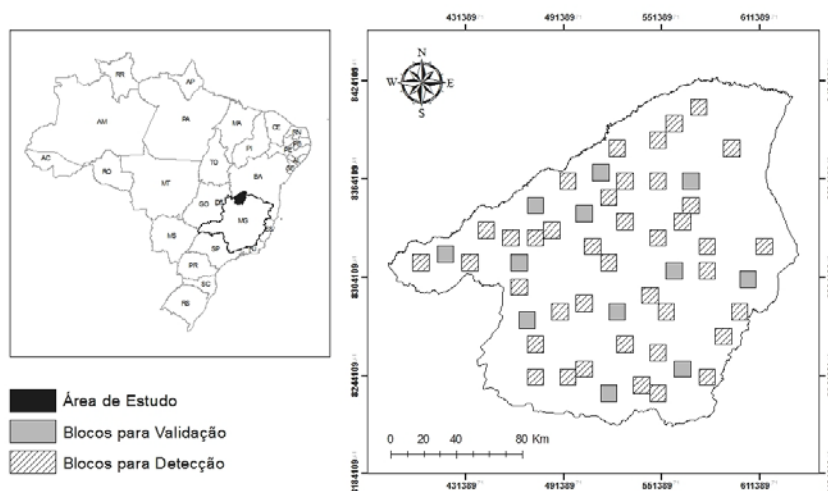


Figura 1 Localização da área de estudo e estrutura de amostragem

Os solos são formados predominantemente por Latossolos, com presença significativa de Areias Quartzosas e solos Álicos e Distróficos. Em menores proporções, ocorrem solos Litólicos e Cambissolos, além de Podzólicos Eutróficos, Solos Aluviais Eutróficos, Gley Húmico e Gley Pouco Húmico, ambos Álicos, Planossolos Eutróficos e Álicos e Solos Hidromórficos Indiscriminados (MINAS GERAIS, 2002).

A vegetação nativa predominante é o Cerrado com ocorrência das fisionomias cerrado *sensu strictu*, campo, campo cerrado, floresta decidual, floresta semi-decidual e veredas (CARVALHO; SCOLFORO, 2008). Além disso, apresenta importantes áreas de tensão ecológica entre o Cerrado e a Caatinga (MENINO et al., 2012).

O clima de acordo com a classificação de Köppen é Aw, ou seja, clima tropical úmido (megatérmico) de savana, com inverno seco e verão chuvoso, onde a temperatura média do mês mais frio é superior a 18° C e

a precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm (MINAS GERAIS, 2002; SOUZA et al., 2008). O relevo é caracterizado como predominantemente plano apresentando a ocorrência de chapadões, com altitudes variando de 500 a 700 metros (BETHONICO, 2009).

Como forma de proteger e conservar as riquezas naturais e a biodiversidade da região foram criadas ao longo dos anos várias Unidades de Conservação (UC) na área de estudo, como os Parques Federais Cavernas do Peruaçu e Grande Sertão Veredas; os Parques Estaduais Veredas do Peruaçu e Serra das Araras e as Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pandeiros, do Sabonetal, Cavernas do Peruaçu e a Área Indígena Xacriabá (INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS, 2006; SOUZA et al., 2008).

Do ponto de vista histórico as mudanças no uso e cobertura do solo na região iniciaram-se no século XVII com a exploração do rio São Francisco e de seus afluentes à procura de riquezas minerais e mão-de-obra escrava, de origem indígena, estabelecendo assim pontos de apoio, comércios e vilarejos (BETHONICO, 2009).

Em meados do século XVIII, a substituição da vegetação nativa para a formação dos grandes currais de criação de gado foi a principal atividade antrópica na região que se intensificou e se diversificou nas décadas de 1960, 1970 e 1980 com a abertura do interior do País para a construção de Brasília, nova capital federal, construção de estradas ampliando a malha viária, políticas públicas de incentivo à abertura de novas fronteiras agrícolas, o avanço das tecnologias para irrigação e desmatamentos em grande escala (pivô-central, tratores, correntões, etc.)

e a implantação de grandes projetos de eucalipto visando à produção de carvão vegetal (BETHONICO, 2009; SOUZA et al., 2008).

## **2.2 Imagens de satélite**

Para a realização deste estudo, foram utilizadas duas imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) presente nos satélites da série LANDSAT 5 referentes à área de estudo, nos anos de 2010 e 2011. As imagens LANDSAT 5, com resolução espacial de 30 m, foram adquiridas junto ao instituto do governo americano que dá suporte às pesquisas envolvendo levantamentos geológicos e observação da Terra, o *United States Geological Survey for Earth Observation and Science* (USGS\EROS).

As imagens foram adquiridas no nível de processamento CDR (*Landsat Surface Reflectance Climate Data Record*), ou seja, já com as devidas correções geométricas e valores de reflectância ao nível do solo. Vuolo, Mattiuzzi e Atzberger (2015) afirmam que as imagens Landsat CDR são apropriadas para o monitoramento da vegetação, uma vez que fornecem valores consistentes com os valores de reflectância dos objetos na superfície da Terra.

## **2.3 Análise da estrutura espacial**

Para a análise da estrutura espacial primeiramente foi calculado o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada ou NDVI (*The Normalized Difference Vegetation Index*) em cada imagem da área de estudo. Este índice é baseado em quocientes e utiliza as bandas espectrais

do vermelho e do infravermelho próximo para realçar a vegetação e, ao mesmo tempo, minimizar os efeitos de sombras causados pela topografia do terreno (BERRA et al., 2012; VOROVENCII, 2000).

A partir das imagens NDVI dos anos de 2010 e 2011, foram distribuídos aleatoriamente na área de estudo 40 blocos de 10 km<sup>2</sup> cada para ajuste dos semivariogramas. Adicionalmente, para validação do modelo logístico, foram ajustados os semivariogramas em outros 12 blocos de 10 km<sup>2</sup>, distribuídos de forma aleatória e independente na área de estudo (Figura 1).

Os semivariogramas são métodos geoestatísticos para analisar a presença de correlação entre as amostras. Neste estudo, os semivariogramas foram ajustados a partir dos valores das imagens NDVI em cada bloco e em cada ano de análise, uma vez que estas imagens refletem a distribuição espacial e a dinâmica da cobertura vegetal na área de estudo.

Assim, os valores de NDVI  $z$  de  $x$  pixels foram extraídos em cada bloco e em cada ano. A relação entre um par de pixels pode ser calculada pela função variograma, denominada de  $2\gamma(h)$ , correspondente à esperança matemática do quadrado da diferença entre pares de pontos separados por uma distância  $h$ .

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}$$

Em que  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x$ ,  $Z(x+h)$  é o valor no ponto  $x+h$ .

A função variograma depende da localização  $x$  e da distância entre as amostras  $h$ . Para que o variograma seja em função apenas da distância entre as unidades amostradas, é necessário adotar a hipótese intrínseca (estacionariedade), que pressupõe que a variância das diferenças entre dois pontos amostrais depende apenas da distância  $h$ .

Metade da função variograma é a função semivariograma, que representa uma função de semivariâncias em relação às respectivas distâncias. O estimador da semivariância  $\hat{\gamma}(h)$  é igual à média aritmética das diferenças entre pares de valores experimentais ao quadrado, em todos os pontos separados pela distância  $h$ .

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

Em que  $\hat{\gamma}(h)$  é o estimador da semivariância para cada distância  $h$ ,  $N(h)$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ,  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x$  e  $Z(x+h)$  é o valor no ponto  $x+h$ .

A função semivariograma permite gerar o gráfico da semivariância em função da distância  $h$ , denominado de semivariograma experimental, o qual permite interpretar a continuidade espacial da variável regionalizada.

As funções de semivariância são caracterizadas por três parâmetros: Sill, Range e Nugget (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000; YAMAMOTO, LANDIM, 2013). O Sill (patamar) é o



platô alcançado pelos valores de semivariância e indica a quantidade de variação explicada pela estrutura espacial dos dados; o Range (alcance) é a distância em que o semivariograma atinge o Sill, indicando até qual distância os pontos são correlacionados. O Nugget (efeito pepita) é a combinação de erros de amostragem e variações em pequenas escalas que ocorrem nas escalas menores que a menor distância entre os pontos amostrados.

Desta forma, antes dos ajustes dos semivariogramas propriamente ditos foi realizada a análise exploratória dos dados com o intuito de entender o comportamento geral dos mesmos, ou seja, estudar a tendência, a forma e a distribuição dos valores de NDVI em cada bloco e em cada ano de análise. Foram determinadas as medidas de posição (média, valores mínimos e máximos), medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) e de avaliação da normalidade por meio do histograma de frequência, além da verificação de dados discrepantes utilizando-se os gráficos box-plot.

Após a análise exploratória, foram gerados os semivariogramas derivados dos valores de NDVI para cada bloco e data analisada. A partir destes, para cada bloco e período analisado o modelo exponencial foi ajustado. Os ajustes foram realizados através do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, utilizando o programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001).

## **2.4 Detecção de mudanças**

Para detecção das mudanças no uso e cobertura do solo, foi calculada a imagem NDVI diferença, através da subtração dos valores de NDVI de cada pixel da imagem de 2011 pelos valores de NDVI dos mesmos na imagem de 2010. A imagem NDVI diferença destaca os pixels que sofreram mudanças no período analisado, onde valores negativos indicam supressão da vegetação enquanto valores positivos indicam regeneração da vegetação.

Segundo Constantini et al. (2012), as imagens NDVI diferença são muito eficientes para detectar mudanças na cobertura vegetal quer sejam elas desmatamentos ou reflorestamentos. Contudo, como os valores de mudança do NDVI no tempo são uma variável contínua, para a obtenção de um mapa binário, ou seja, pixels de mudanças e pixels de não mudança, foi necessária a definição de um limiar de mudança fixado em 10%, sendo 5% em cada extremidade da curva de distribuição de frequência dos valores da imagem NDVI diferença, conforme sugerido por Constantini et al. (2012) e Zurlini et al. (2006).

## **2.5 Regressão logística**

Baseado na hipótese de que a estrutura espacial inicial da paisagem tem influência na probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e na cobertura do solo (AGUIAR, 2006; CONSTANTINI et al., 2012) e nos resultados preliminares deste estudo que mostram que os parâmetros dos semivariogramas, derivados das imagens NDVI, são

eficientes para descrever a estrutura espacial da vegetação, buscou-se criar um indicador para detectar áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo.

Para isso, foi utilizado um modelo de regressão logística que, segundo Venticinque et al. (2007), é apropriado para analisar a relação de uma variável resposta, normalmente binária e codificada em 0 (ausência) ou 1 (presença), e uma ou mais variáveis independentes.

$$P(Y = 1|\varphi, \sigma^2, \tau^2) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1\varphi + \beta_2\sigma^2 + \beta_3\tau^2)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1\varphi + \beta_2\sigma^2 + \beta_3\tau^2)}$$

Devido à natureza categórica e binária da variável dependente, seguindo a codificação  $Y = 1$  representada pela ocorrência de mudança no uso e cobertura do solo e  $Y = 0$  não ocorrência de mudança no uso e cobertura do solo, foi ajustado um modelo de regressão logística tendo como variáveis independentes os parâmetros iniciais dos semivariogramas, ou seja, os parâmetros *Range*, *Sill* e *Nugget* estimados para o ano de 2010.

Para avaliar a qualidade do ajuste do modelo logístico selecionado foi utilizado o teste de probabilidade de significância de Hosmer-Lemeshow. O teste associa os dados às suas probabilidades estimadas, da mais baixa à mais alta, e então calcula um qui-quadrado para determinar se as frequências estimadas estão próximas às frequências observadas (HOSMER; LEMESHOW, 2004; VENTICINQUE et al., 2007). Para a validação do modelo logístico ajustado foram estimadas as probabilidades de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo em uma amostra

composta de 12 blocos de 10 km<sup>2</sup>, distribuídos aleatoriamente na área de estudo e que não entraram no ajuste do modelo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise exploratória dos dados

De acordo com os gráficos box-plot, os valores médios de NDVI variaram entre 0,46 a 0,70 para os blocos de 2010 e de 0,43 a 0,71 para os blocos de 2011 (Tabela 1).

Analisando os histogramas dos valores de NDVI em cada bloco e ano, a distribuição de frequência dos dados não desviou da normalidade. Observou-se que a distribuição dos valores de NDVI nas latitudes e longitudes mostraram que os dados não possuem tendência, ou seja, a dependência espacial é explicada apenas pela distância entre as amostras.

Tabela 1 Medidas de posição e dispersão dos valores de NDVI

BLOCOS	2010				2011			
	MÉDIA	MIN	MAX	CV %	MÉDIA	MIN	MAX	CV %
1	0,58	0,18	0,82	18,21	0,52	0,20	0,77	19,03
2	0,56	-0,32	0,82	23,40	0,58	-0,17	0,92	22,23
3	0,58	0,24	0,85	13,12	0,58	0,24	0,82	14,07
4	0,60	-0,48	0,87	21,47	0,56	-0,43	0,85	24,07
5	0,57	0,03	0,86	24,47	0,53	0,09	0,81	24,26
6	0,55	-0,04	0,83	19,36	0,56	-0,10	0,82	20,38
7	0,55	-0,05	0,84	17,55	0,58	0,01	0,84	20,54
8	0,54	0,25	0,85	21,14	0,56	0,23	0,87	24,16
9	0,46	0,10	0,85	36,47	0,43	0,14	0,85	38,61
10	0,61	0,26	0,87	12,73	0,58	0,22	0,83	14,74
11	0,46	0,07	0,87	35,44	0,49	0,10	0,62	32,76
12	0,49	0,09	0,80	31,75	0,50	0,13	0,86	28,92
13	0,59	0,18	0,86	17,58	0,59	0,26	0,88	15,87

“Tabela 1, conclusão”

BLOCOS	2010				2011			
	MÉDIA	MIN	MAX	CV %	MÉDIA	MIN	MAX	CV %
14	0,65	0,20	0,91	13,77	0,63	0,19	0,90	15,73
15	0,67	0,15	0,89	13,96	0,66	0,13	0,92	16,20
16	0,57	0,16	0,82	15,37	0,67	0,26	0,89	7,77
17	0,57	0,16	0,82	15,37	0,55	0,21	0,81	16,36
18	0,49	0,17	0,88	19,51	0,55	0,11	0,86	22,93
19	0,54	0,07	0,83	19,01	0,55	0,07	0,84	19,55
20	0,47	0,00	0,90	20,19	0,49	-0,27	0,78	21,99
21	0,47	0,12	0,81	21,78	0,49	0,10	0,80	21,20
22	0,56	0,23	0,82	14,79	0,54	0,24	0,78	13,77
23	0,60	0,12	0,84	15,76	0,57	0,16	0,82	16,76
24	0,52	0,20	0,81	15,83	0,51	0,20	0,80	16,46
25	0,54	0,09	0,73	11,35	0,53	0,25	0,78	11,84
26	0,52	0,15	0,84	23,78	0,51	0,15	0,83	22,91
27	0,49	0,18	0,82	18,17	0,47	0,20	0,81	19,11
28	0,59	0,36	0,76	8,94	0,58	0,36	0,78	8,45
29	0,60	-0,13	0,85	17,47	0,58	-0,04	0,83	17,36
30	0,57	-0,14	0,84	11,01	0,56	0,28	0,84	10,52
31	0,61	0,25	0,83	11,50	0,59	0,29	0,82	11,31
32	0,70	0,26	0,87	14,00	0,71	0,26	0,85	12,47
33	0,67	0,41	0,85	5,46	0,65	0,32	0,84	5,67
34	0,51	0,22	0,86	17,29	0,50	0,23	0,86	17,10
35	0,57	0,26	0,84	16,94	0,54	0,23	0,81	17,43
36	0,67	0,22	0,83	6,69	0,65	0,24	0,81	6,44
37	0,64	0,18	0,91	9,78	0,64	0,19	0,84	9,32
38	0,57	0,30	0,81	12,26	0,55	0,26	0,81	12,32
39	0,67	0,46	0,80	5,00	0,64	0,48	0,79	5,02
40	0,59	0,22	0,80	8,43	0,59	0,25	0,80	8,70

### 3.2 Análise da estrutura espacial

A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos semivariogramas ajustados para os 40 blocos nos anos de 2010 e 2011. Observa-se uma grande variabilidade nos valores dos parâmetros ajustados para cada bloco e ano, indicando a alta heterogeneidade espacial e temporal da área de estudo composta por fragmentos de vegetação nativa, áreas agrícolas com rotações periódicas de culturas, reflorestamentos, áreas de pastagens com e sem manejo e áreas de solo exposto.

Os parâmetros *Sill* e *Range* foram os que mais expressaram a heterogeneidade espacial da área de estudo, com valores mínimos e máximos de *Sill* entre 0,0006 - 0,0316 em 2010 e 0,0006 - 0,0353 em 2011; e valores mínimos e máximos de *Range* entre 175 - 2.649 m em 2010 e 200 - 3.530,8 m em 2011. Segundo Garrigues et al. (2006), a alta variabilidade do parâmetro *Sill* derivado de imagens NDVI de diferentes paisagens é principalmente explicada pelo tipo de uso e cobertura do solo, com áreas agrícolas apresentando valores maiores e com maior variação entre valores mínimos e máximos do que áreas cobertas por vegetação nativa ou florestas plantadas.

Considerando as mudanças temporais na estrutura da paisagem, observa-se que os parâmetros *Sill* e *Range* tiveram seus valores influenciados pelas mudanças de uso e cobertura do solo enquanto que as alterações nos valores do parâmetro *Nugget* não foram relacionadas a essas mudanças.

Tabela 2 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os anos 2010 e 2011

BLOCOS	2010			2011		
	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>
1	288,61	0,0081	0,0023	408,07	0,0068	0,0023
2	624,75	0,0125	0,0042	369,29	0,0128	0,0031
3	300,00	0,0043	0,0011	300,00	0,0066	0,0000
4	312,76	0,0141	0,0022	428,47	0,0158	0,0018
5	466,43	0,0124	0,0044	411,17	0,0124	0,0035
6	192,24	0,0071	0,0020	188,31	0,0097	0,0019
7	509,91	0,0067	0,0026	415,13	0,0126	0,0022
8	282,03	0,0092	0,0020	349,72	0,0147	0,0026
9	2649,00	0,0316	0,0046	3530,78	0,0353	0,0420
10	871,88	0,0049	0,0020	899,38	0,0069	0,0018
11	426,56	0,0230	0,0048	349,11	0,0220	0,0042
12	1300,00	0,0265	0,0009	923,26	0,0225	0,0000
13	877,88	0,0099	0,0018	646,59	0,0065	0,0016
14	1079,99	0,0071	0,0018	772,77	0,0100	0,0015
15	912,40	0,0090	0,0003	798,86	0,0122	0,0000
16	1073,79	0,0062	0,0019	1300,00	0,0031	0,0004
17	754,46	0,0057	0,0016	574,85	0,0080	0,0007
18	224,58	0,0074	0,0005	428,18	0,0127	0,0015
19	368,14	0,0070	0,0019	335,56	0,0085	0,0018
20	299,51	0,0073	0,0016	417,65	0,0085	0,0025
21	300,00	0,0066	0,0037	300,00	0,0068	0,0037
22	300,00	0,0060	0,0015	1501,33	0,0039	0,0018
23	200,00	0,0051	0,0019	200,00	0,0054	0,0015
24	400,00	0,0040	0,0029	400,00	0,0043	0,0024
25	190,00	0,0019	0,0009	200,00	0,0020	0,0008
26	344,04	0,0108	0,0043	308,43	0,0100	0,0037
27	200,00	0,0036	0,0018	200,00	0,0037	0,0016
28	900,00	0,0060	0,0007	900,00	0,0013	0,0007
29	254,78	0,0070	0,0023	261,11	0,0067	0,0021
30	293,44	0,0022	0,0011	232,81	0,0021	0,0008
31	499,81	0,0027	0,0016	449,91	0,0026	0,0013



“Tabela 2, conclusão”

BLOCOS	2010			2011		
	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>
32	175,00	0,0031	0,0011	300,00	0,0030	0,0016
33	400,00	0,0007	0,0004	500,00	0,0007	0,0004
34	474,61	0,0067	0,0012	559,10	0,0062	0,0013
35	1021,23	0,0065	0,0021	925,95	0,0061	0,0021
36	300,00	0,0040	0,0005	300,00	0,0011	0,0005
37	300,00	0,0023	0,0008	275,00	0,0023	0,0005
38	750,00	0,0038	0,0009	700,00	0,0035	0,0009
39	400,00	0,0006	0,0004	400,00	0,0006	0,0003
40	400,00	0,0014	0,0008	700,00	0,0014	0,0009

Analisando os padrões de comportamento dos parâmetros *Sill* e *Range* para os 40 blocos nos anos de 2010 e 2011, juntamente com o número de pixels de mudança do uso e cobertura do solo detectados nas imagens NDVI diferença, foi possível observar seis principais padrões de comportamento temporal apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Padrões de comportamento dos parâmetros *Sill* e *Range* para os anos de 2010 e 2011

Padrões no	<i>Sill</i>	<i>Rang</i>	2010 - 2011
1	=	=	Os valores dos dois parâmetros não se alteraram
2	>	>	Aumento dos dois parâmetros
3	>	<	Aumento do <i>Sill</i> e diminuição do <i>Range</i>
4	<	>	Diminuição do <i>Sill</i> e aumento do <i>Range</i>
5	>	=	Aumento do <i>Sill</i> sem alteração no valor do <i>Range</i>
6	<	<	Diminuição dos dois parâmetros

Para os blocos em que não houve alteração nos valores dos parâmetros *Sill* e *Range* no tempo, observou-se que não ocorreram

mudanças no uso e cobertura do solo. A Figura 2 ilustra esta situação, onde tanto o ajuste dos semivariogramas quanto as imagens NDVI para os anos de 2010 e 2011 não apresentaram mudanças.

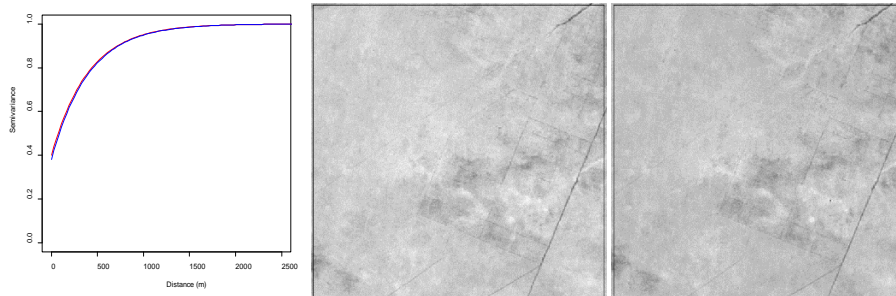


Figura 2 Semivariograma escalonado 2010-2011; Imagem NDVI de 2010; Imagem NDVI de 2011

Para os blocos onde a variação do *Sill* foi positiva, ou seja, os valores deste parâmetro aumentaram no tempo, observou-se que as principais mudanças ocorridas na área estão relacionadas aos desmatamentos e não às áreas em regeneração. Uma análise detalhada revelou ainda que quanto mais homogênea, em termos de cobertura vegetal for a área, maior será a proporção de aumento dos valores do parâmetro *Sill*, pois as áreas desmatadas farão com que os valores de NDVI que antes eram altos devido à presença da vegetação diminuam, tornando a área mais heterogênea. Estes resultados estão em acordo com os resultados obtidos por Acerbi Júnior et al. (2015), analisando o potencial dos semivariogramas na detecção de mudanças na vegetação do cerrado.

Para os blocos onde tanto os valores do parâmetro *Sill* quanto os valores do parâmetro *Range* aumentaram, a análise é similar, ou seja,

ocorreram mais desmatamentos do que áreas em regeneração. Contudo, os desmatamentos encontrados foram mais extensos (acima de 300 ha) causando uma variação total ainda maior nos valores de NDVI, levando também a uma alteração na estrutura de dependência espacial da área, como exemplificado na Figura 3. Isso ocorreu devido ao fato de que o parâmetro *Sill* captura informações sobre a variância total da imagem, enquanto o parâmetro *Range* fornece informações sobre a distância da correlação espacial entre pixels ou objetos na imagem (VAN DER MEER, 2012). Em um estudo realizado em florestas boreais por Hyppanen (1996), os valores de *Sill* foram correlacionados com espécies de árvores e classes de idade da floresta, enquanto os valores de *Range* foram um indicativo da fragmentação da paisagem.

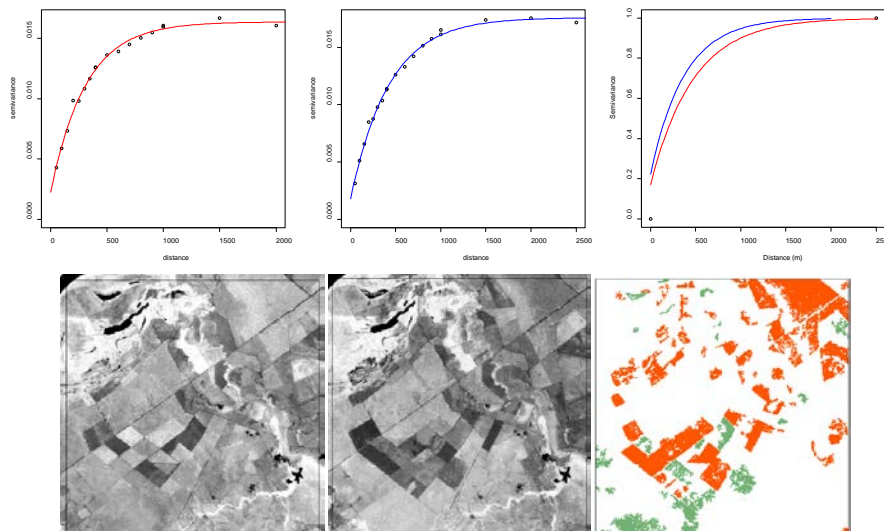


Figura 3 Semivariogramas para os anos de 2010 e 2011; Semivariograma Escalonado 2010-2011; Imagens NDVI de 2010 e 2011; Polígonos de Mudanças (Vermelho: Desmatamentos; Verde: Regeneração)

Para os blocos onde os valores do parâmetro *Sill* aumentaram e os valores do parâmetro *Range* permaneceram constantes ou diminuíram no tempo, foram encontradas apenas pequenas mudanças no uso e cobertura do solo, ou seja, houve variação total na área, porém estas não foram suficientes para afetar a estrutura de dependência espacial, como exemplificado na Figura 4.

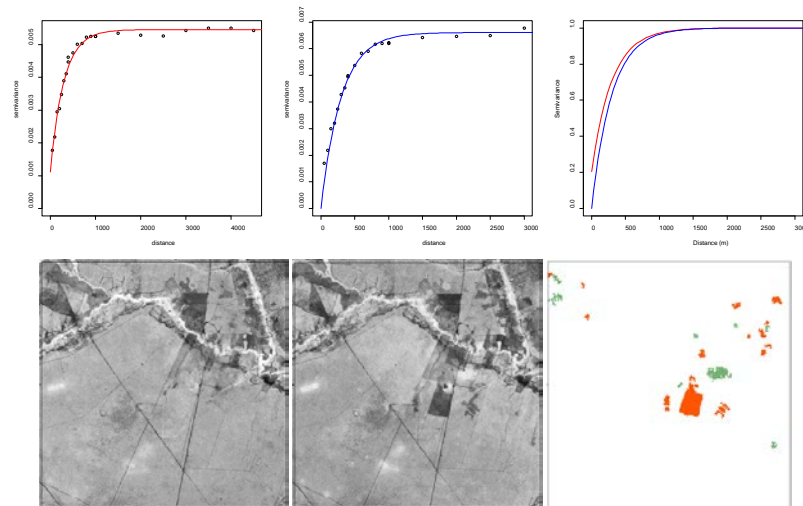


Figura 4 Semivariogramas para os anos 2010 e 2011; Semivariograma Escalonado 2010-2011; Imagens NDVI 2010 e 2011; Polígonos de Mudanças (Vermelho: Desmatamentos; Verde: Regeneração)

Para os blocos onde os valores do parâmetro *Sill* diminuíram no tempo, independente da variação positiva ou negativa do parâmetro *Range*, observou-se uma maior ocorrência de áreas em regeneração do que áreas desmatadas, sendo que os valores do parâmetro *Sill* foram proporcionalmente menores quanto mais homogênea for a área em termos

de cobertura vegetal inicial. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que as áreas em regeneração possuem valores de NDVI maiores quando comparadas às áreas desmatadas, tornando-os mais homogêneos em relação aos valores de NDVI de toda a área. A Figura 5 ilustra um exemplo típico de uma área regenerada em 2011, mas que apresentou desmatamentos em 2010.

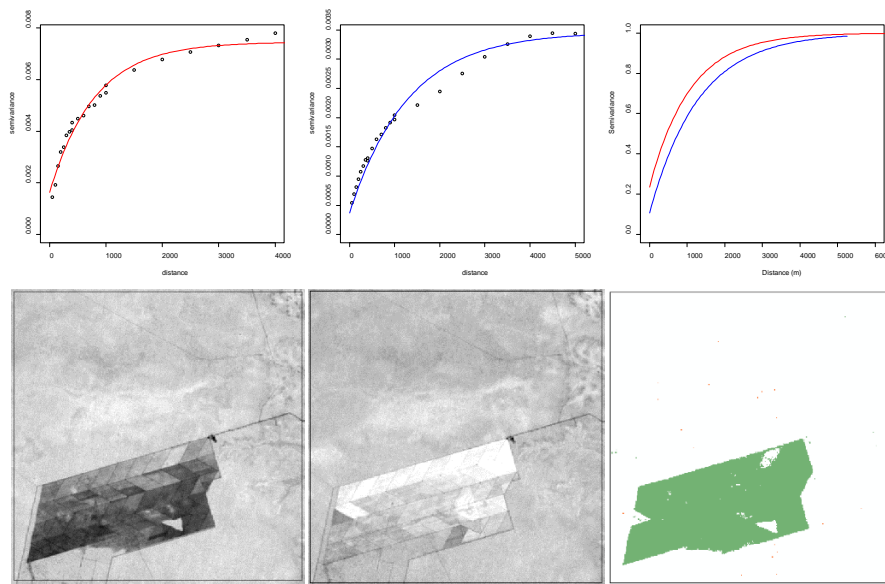


Figura 5 Semivariogramas para os anos 2010 e 2011; Semivariograma Escalonado 2010-2011; Imagens NDVI 2010 e 2011; Polígonos de Mudanças (Verde: Regeneração)

Os resultados comprovam a hipótese de que a estrutura inicial da paisagem tem influência no comportamento dos parâmetros dos semivariogramas derivados das imagens NDVI, uma vez que os valores dos parâmetros *Sill* e *Range* tiveram diferentes comportamentos quando ocorreram mudanças no uso e cobertura do solo e estes comportamentos

tiveram padrões similares de acordo com as características iniciais da estrutura da paisagem.

Estes resultados são extremamente importantes, pois revelam que para a análise e principalmente para o entendimento das mudanças ocorridas na estrutura da paisagem não se deve observar somente as mudanças nos valores dos parâmetros dos semivariogramas, mas também a composição da estrutura inicial da paisagem. Por outro lado, o conhecimento destas relações permite ao analista não só detectar as mudanças no uso e cobertura do solo baseadas na análise dos parâmetros dos semivariogramas, mas também inferir sobre o tipo de mudança, sejam elas causadas por pequenos e grandes desmatamentos ou por áreas em regeneração.

### 3.3 Regressão logística

A seleção do modelo logístico para a estimativa das probabilidades que evidenciam os blocos em que ocorreram mudanças no uso e cobertura do solo ( $Y=1$ ) foi dada por meio do teste de Hosmer-Lemeshow (HOSMER; LEMESHOW, 2004), cuja probabilidade de significância estimada foi de 0,851. Assim, comparando com o nível de significância fixado em 5%, o resultado não significativo sugere que o modelo logístico está adequado para estimar as probabilidades.

$$P(Y = 1|\varphi, \sigma^2, \tau^2) = \frac{\exp(-4,27510 + 0,0013684\varphi + 833,995\sigma^2 - 931,238\tau^2)}{1 + \exp(-4,27510 + 0,0013684\varphi + 833,995\sigma^2 - 931,238\tau^2)}$$

Sendo, a variável dependente  $P (Y=1)$  a probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo no intervalo 2010 – 2011 e os parâmetros *Range* ( $\phi$ ), *Sill* ( $\sigma^2$ ) e *Nugget* ( $\tau^2$ ) dos semivariogramas, derivados das imagens NDVI dos 40 blocos no ano de 2010, as variáveis independentes.

A importância de cada parâmetro na formação do modelo pode ser avaliada pela significância dos mesmos descrita na Tabela 4. Tendo por base o nível de significância fixado em 5%, os resultados evidenciam que o parâmetro *Sill* ( $\sigma^2$ ) apresentou maior contribuição na formação do modelo.

Tabela 4 Estimativa dos parâmetros do modelo logístico utilizado na predição das probabilidades de mudanças do uso e cobertura do solo

<b>Parâmetro</b>	<b>Estimativa</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Valor-p</b>
Intercepto	-4,27510	-1,63649	0,009
<i>Range</i> ( $\phi$ )	0,0013684	0,0015326	0,372
<i>Sill</i> ( $\sigma^2$ )	833,995	295,817	0,005
<i>Nugget</i> ( $\tau^2$ )	-931,238	685,190	0,174

A Tabela 5 apresenta os parâmetros iniciais dos semivariogramas e as probabilidades (P) de mudanças estimadas para os 12 blocos de 10km<sup>2</sup> utilizados para validação do modelo.

Tabela 5 Blocos de validação com seus valores de *Range*, *Sill* e *Nugget* no ano de 2010 e suas respectivas probabilidades de ocorrência de mudança do uso e cobertura do solo

<b>BLOCOS</b>	<b><i>Range</i></b>	<b><i>Sill</i></b>	<b><i>Nugget</i></b>	<b>P (%)</b>
1	549,53	0,0831	0,0000	100,00
2	539,86	0,0028	0,0018	5,79
3	264,61	0,0198	0,0000	100,00
4	225,00	0,0020	0,0009	4,31
5	700,00	0,0061	0,0007	77,44
6	190,91	0,0124	0,0000	99,83
7	359,52	0,0079	0,0038	33,75
8	832,85	0,0061	0,0026	41,76
9	433,87	0,0038	0,0024	6,44
10	400,00	0,0049	0,0008	42,06
11	635,71	0,0109	0,0000	99,70
12	600,00	0,0035	0,0015	13,78

A Figura 6 apresenta as imagens NDVI dos anos de 2010 e 2011 para os 4 blocos que apresentaram as menores probabilidades de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo, ou seja, os blocos 4, 2, 9 e 12.



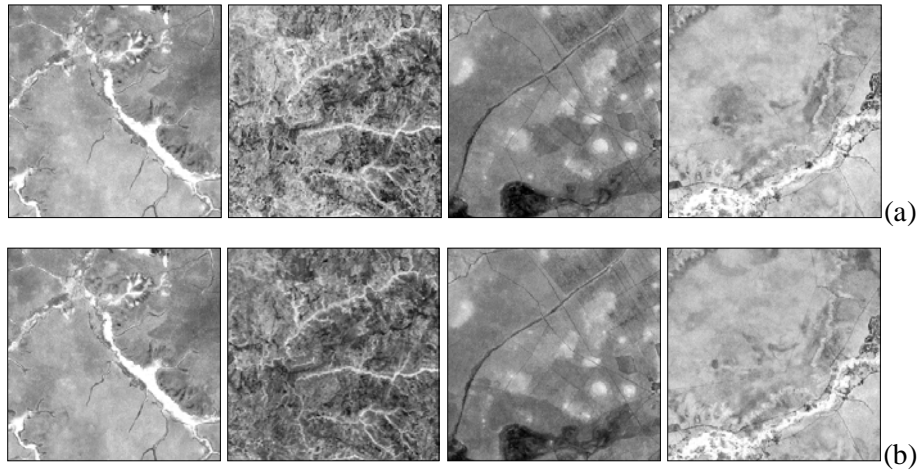


Figura 6 (a) Imagens NDVI 2010; (b) Imagens NDVI 2011 dos blocos 4, 2, 9 e 12, respectivamente

Através da análise visual da Figura 6, observa-se que os 4 blocos com baixa probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo não apresentaram mudanças expressivas na estrutura espacial da paisagem.

A Figura 7 apresenta as imagens NDVI dos anos de 2010 e 2011 para os 4 blocos que apresentaram as maiores probabilidades de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo, ou seja, os blocos 1, 3, 6 e 11.

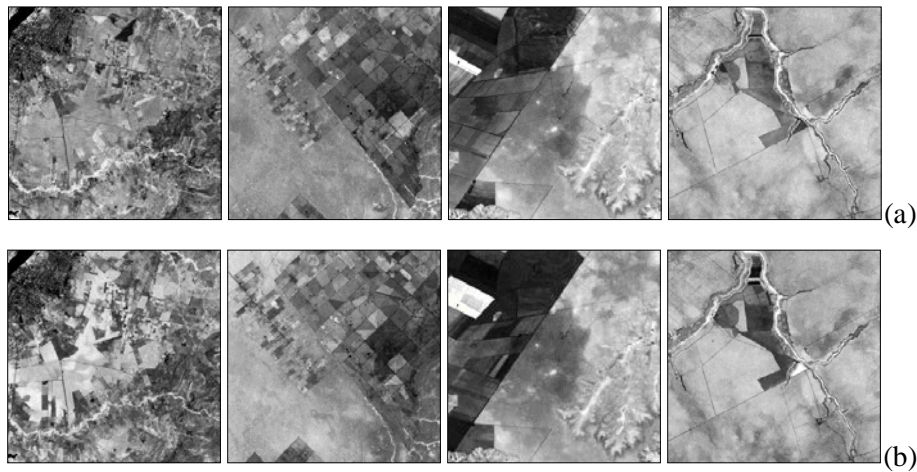


Figura 7 (a) Imagens NDVI de 2010; (b) Imagens NDVI de 2011 dos blocos 1, 3, 6 e 11, respectivamente

Através da análise visual da Figura 7, observa-se que os 4 blocos com alta probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo apresentaram mudanças expressivas na estrutura espacial da paisagem.

Portanto, estes resultados demonstram que é possível utilizar os parâmetros dos semivariogramas, derivados de imagens NDVI, como indicadores de áreas com maiores probabilidades de ocorrência de mudança no uso e cobertura do solo, sendo que dentre os parâmetros, o *Sill* foi o que apresentou maior contribuição nas estimativas das probabilidades de mudança do uso e cobertura do solo.

Constantini et al. (2012) analisaram a relação espacial e temporal entre áreas com ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo em duas regiões na Itália e concluíram que o parâmetro *Range*, derivado de imagens NDVI, apresentou maior correlação linear com o número de

pixels de mudanças e que, portanto, poderia ser utilizado como um indicador de áreas mais susceptíveis às mudanças no uso e cobertura do solo. Uma provável explicação para o parâmetro *Range* ter se sobressaído e não o parâmetro *Sill*, é que as duas regiões na Itália eram áreas de florestas relativamente conservadas e com baixa dinâmica com relação às mudanças do uso e cobertura do solo, situação praticamente oposta da área deste estudo.

## 4 CONCLUSÕES

A estrutura inicial da paisagem tem influência no comportamento dos valores dos parâmetros dos semivariogramas derivados das imagens NDVI e o conhecimento destas relações permite ao analista não só detectar as mudanças no uso e cobertura do solo, mas também inferir sobre o tipo de mudança, sejam elas causadas por pequenos e grandes desmatamentos ou por áreas em regeneração.

Os parâmetros dos semivariogramas, derivados de imagens NDVI, são excelentes indicadores de áreas com maiores probabilidades de ocorrência de mudança no uso e cobertura do solo. Dentre os parâmetros, o Sill foi o que apresentou maior contribuição na detecção das áreas com maiores probabilidades de mudança do uso e cobertura do solo.

O modelo logístico ajustado utilizando os valores dos parâmetros dos semivariogramas como variáveis independentes foi eficiente na detecção das áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo.

## **ANALYSIS OF STRUCTURAL CHANGES IN LANDSCAPE USING SEMIVARIOGRAMS DERIVED FROM NDVI IMAGES**

### **ABSTRACT**

Changes in land use and land cover are usually determined by a complex network of biophysical and socio-economic factors interacting in time and space, as well as in different historical and geographical contexts. Because of this, it is extremely important for any biodiversity conservation and management program to not only detect these changes, but also identify areas with the largest likelihood of their occurrence. Therefore, the objectives of this study were: (1) to analyze the semivariogram parameters derived from NDVI images, in order to establish a pattern for changed areas based on the initial landscape structure; (2) to identify which parameter (Sill, Range or Nugget) of the semivariograms, showed the greatest contribution in estimating the probability of land use and land cover changes; (3) to fit a logistic regression model to estimate the probability of land use and land cover changes in the analyzed period. From the Landsat 5 TM images obtained during 2010 and 2011, the NDVI values were calculated for 40 blocks of 10 km<sup>2</sup>, randomly distributed in the Rio Pandeiros subwatershed. Later, the NDVI difference image was generated, using the images obtained in 2010 and 2011, to obtain the number of changing pixels. A logistic regression model was fitted to estimate the probability of land use and land cover changes using the initial semivariogram parameters as independent variables, i.e. the Range, Sill and Nugget parameters estimated for 2010. For the analysis and model validation, we used the Hosmer-Lemeshow test and a holdout sample of 12 independent 10 km<sup>2</sup> blocks, which were not used for fitting the model. The results revealed that, for an analysis and, mainly, for a better understanding of the semivariogram parameter patterns, due to changes in land use and land cover, one should not only observe the change in parameter values, but also the composition of the landscape's initial structure. The logistic model adapted using the semivariogram parameter values as independent variables was effective in estimating the probability of land use and land cover changes. The Sill parameter showed the greatest contribution in estimating this probability.

Keywords: Geostatistics. Change detection. Logistic model.

## REFERÊNCIAS

ACERBI JÚNIOR, F. W. et al. Change detection in Brazilian savannas using semivariograms derived from NDVI images. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 2, p. 103-109, mar./abr. 2015.

AGUIAR, A. P. D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia**: explorando a heterogeneidade intrarregional. 2006. 208 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

BERRA, E. F. et al. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, out./dez. 2012.

BETHONICO, M. B. M. Rio Pandeiros: território e história de uma área de proteção ambiental no norte de Minas Gerais. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 3, n. 5, p. 23-38, 2009.

BIGGS, T. W. et al. The rate and extent of deforestation in watersheds of the southwestern Amazon basin. **Ecological Applications**, Tempe, v. 18, n. 1, p. 31-48, Jan. 2008.

CARVALHO, L. M. T.; SCOLFORO, J. R. S. **Inventário Florestal de Minas Gerais**: monitoramento da Flora Nativa 2005-2007. Lavras: Editora da UFLA, 2008. 318 p.

CONSTANTINI, M. L. et al. NDVI spatial pattern and the potential fragility of mixed forested areas in volcanic lake watersheds. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 285, p. 133-141, Dec. 2012.

CURRAN, P. J. The semivariogram in remote sensing: an introduction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 24, n. 3, p. 493-507, Apr. 1988.

GARRIGUES, S. et al. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 103, p. 81-96, 2006.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. **Applied logistic regression**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 392 p.

HYPPANEN, H. Spatial autocorrelation and optimal spatial resolution of optical remote sensing data in boreal Forest environment. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 17, n. 1, p. 3441-3452, Apr. 1996.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. **Áreas de proteção ambiental no estado de Minas Gerais: demarcação e estudos para o pré-zoneamento ecológico**. Belo Horizonte: APA Bacia do Rio Pandeiros, 2006. 271 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Portal Meio ambiente.mg**, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <[http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=154&Itemid=140](http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=154&Itemid=140)>. Acesso em: 13 mar. 2014.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 560 p.

MANCINO G. et al. Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural Forest expansion in Basilicata, southern Italy. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, Potenza, v. 7, p. 75-84, 2014.

MELLO, J. M. et al. Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 185-194, jan./fev. 2009.

MELLO, J. M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr./jun. 2005.

MENDES, C. A. B.; VEGA, F. A. C. Técnicas de regressão logística aplicada à análise ambiental. **Geografia**, Londrina, v. 20, n. 1, p. 5-30, jan./abr. 2011. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

MENINO, G. et al. Environmental heterogeneity and natural regeneration in riparian vegetation of the Brazilian semi-arid region. **Edinburgh Journal of Botany**, Cambridge, v. 69, n. 1, p. 29-51, Mar. 2012.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Plano diretor de recursos hídricos das bacias afluentes do Rio São Francisco em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. 1 CD ROM.

NILSSON, C.; GRELSSON, G. The fragility of ecosystems: a review. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 32, n. 4, p. 677-692, Nov. 1995.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: < <http://www.R-project.org>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SOUZA, A. M. S. et al. **Proposta de Instituição do Comitê da Bacia Hidrográfica Afluentes Mineiros do Médio São Francisco (UPGRH-SF9)**. 2008. 35 p. Diagnóstico sócio-econômico ambiental apresentado ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos, como pré-requisito de aprovação do comitê. Disponível em: <[http://200.198.22.171/down.asp?x\\_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x\\_nome=Item\\_4\\_Dossie\\_Afluentes\\_Mineiros\\_do\\_Medio\\_SF9.pdf](http://200.198.22.171/down.asp?x_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x_nome=Item_4_Dossie_Afluentes_Mineiros_do_Medio_SF9.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2014.

VAN DER MEER, F. Remote-sensing image analysis and geostatistics. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 33, n. 18, p. 5644-5676, Sept. 2012.

VENTICINQUE, E. M. et al. O uso de regressão logística para espacialização de probabilidades. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1-2, p. 25-37, 2007.



VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. p. 1-54.

VOROVENCII, I. Assessment of some remote sensing techniques used to detect land use/land cover changes in South-East Transilvania, Romania. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 186, n. 5, p. 2685-2699, May 2000.

VRIES, A. de et al. Effect of patellar strap and sports tape on pain in patellar tendinopathy: a randomized controlled trial. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, [s.n.], p. 01-08, Sept. 2015.

VUOLO, F.; MATTIUZZI, M.; ATZBERGER, C. Comparison of Landsat surface reflectance Climate Data Record (CDR) and manually atmospherically corrected data in a semi-arid European study area. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 42, p. 1-10, Oct. 2015.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZURLINI, G. et al. Disturbance patterns in a socio-ecological system at multiple scales. **Ecological Complexity**, Tempe, v. 3, n. 2, p. 119-128, June 2006.

**ARTIGO 3 Relação entre as métricas da ecologia da paisagem, os  
parâmetros dos semivariogramas e mudanças na cobertura do  
solo**

**FAUSTO WEIMAR ACERBI JÚNIOR<sup>1</sup>**

**Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003) e adaptado  
para a versão final da UFLA.**

---

<sup>1</sup> Mestrado em Engenharia Florestal – Professor Associado I da Universidade Federal de Lavras.

## RESUMO

Os objetivos deste estudo foram: (1) analisar os parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo e estabelecer padrões de comportamento baseado na estrutura espacial inicial da paisagem; (2) identificar quais métricas da ecologia da paisagem podem auxiliar no entendimento do comportamento dos parâmetros dos semivariogramas frente a mudanças no uso e cobertura do solo. A partir das imagens Landsat 5 TM dos anos de 2010 e 2011, foram gerados os valores de NDVI para 40 blocos de 10 km<sup>2</sup> distribuídos aleatoriamente na sub-bacia hidrográfica Rio Pandeiros. Em seguida, foi gerada a imagem NDVI diferença entre os anos de 2010 e 2011 para a obtenção do número de pixels de mudanças. Após esta etapa, foi realizada a classificação da cobertura do solo para determinar as classes que sofreram maior mudança. Para analisar o comportamento dos parâmetros dos semivariogramas frente às mudanças no uso e cobertura do solo foram calculadas as métricas da ecologia da paisagem. Através da análise do comportamento dos parâmetros dos semivariogramas em relação às mudanças no uso e cobertura do solo foi possível estabelecer 6 padrões de comportamento. Aprofundando esta análise em relação às métricas da ecologia da paisagem foi possível associar os padrões de comportamento e, conseqüentemente, de mudanças no uso e cobertura do solo à estrutura inicial da paisagem, potencializando o entendimento dos danos a estas estruturas causadas pelas mudanças no uso e cobertura do solo.

Palavras-chave: Geoestatística. Detecção de mudanças. Fragmentação.

## 1 INTRODUÇÃO

Para estudar a paisagem é fundamental o conhecimento de suas estruturas espaciais e mudanças destas ao longo do tempo (SELMAN; DOAR, 1992). Segundo Garrigues et al. (2006), a heterogeneidade espacial pode ser descrita através da variabilidade espacial das propriedades da superfície e de suas estruturas espaciais. Entende-se por estruturas espaciais os objetos ou fragmentos que se repetem em uma determinada área.

Metzger (2001) discute que o ponto central da ecologia da paisagem é a existência de uma dependência espacial entre as unidades da paisagem e suas vizinhanças, associando a análise espacial da geografia com os aspectos funcionais da ecologia. O autor trata a paisagem como um mosaico heterogêneo e conclui que os processos ecológicos são influenciados pelo padrão espacial das estruturas da paisagem.

A fragmentação é o processo de interrupção de uma área de vegetação natural contínua, que resulta em áreas menores isoladas umas das outras por ambientes diferentes do original. Essas áreas são formadas por barreiras antrópicas como estradas, cidades, culturas agrícolas e pastagens ou naturais como montanhas, lagos e rios (SAUNDERS; HOBBS; MARGULES, 1991).

As mudanças no uso e cobertura do solo são um dos principais fatores que resulta na formação de fragmentos isolados, cercados por habitats não florestados denominados matriz (PÉRICO et al., 2005). Os desmatamentos, por exemplo, mudam a configuração da paisagem e causam a longo prazo modificações em relação à diversidade e

composição da fauna e flora remanescentes, de forma a modificar as interações entre espécies, alterando os processos biológicos e as características do microclima e do solo (MORATO; CAMPOS, 2000).

Os parâmetros *Sill* e *Range* dos semivariogramas derivados de imagens NDVI não só são excelentes descritores da variabilidade da estrutura espacial da paisagem como também das mudanças nestas estruturas causadas por modificações do uso e cobertura do solo.

Outra técnica para a análise e quantificação da estrutura da paisagem e caracterização de sua complexidade são os índices ou métricas de ecologia da paisagem (FERREIRA et al., 2014). As métricas de ecologia da paisagem permitem descrever o nível de uniformidade ou fragmentação espacial de uma paisagem (PÉRICO; CEMIN, 2006), sendo essenciais para avaliação das mudanças no uso e cobertura do solo de uma paisagem.

Assim, o objetivo geral deste estudo foi analisar a relação entre as métricas da ecologia da paisagem e os parâmetros dos semivariogramas, derivados de imagens NDVI, em áreas de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo.

Para isso, os objetivos específicos foram:

1. Analisar os parâmetros dos semivariogramas em áreas que sofreram mudanças no uso e cobertura do solo e estabelecer padrões de comportamento baseado na estrutura espacial inicial da paisagem;
2. Identificar quais métricas da ecologia da paisagem podem auxiliar no entendimento do comportamento dos parâmetros dos semivariogramas frente a mudanças no uso e cobertura do solo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudo**

A área de estudo compreende a Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Rio Pandeiros (UPGRH-SF9), localizada no Alto-Médio São Francisco, entre os paralelos 14°00' e 16°30' de latitude sul e os meridianos 43°00' e 46°00' de longitude oeste (Figura 1).

A UPGRH-SF9 abrange um total de 24 municípios com uma área de drenagem de 31.258 km<sup>2</sup>. O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) desses municípios varia de 0,58 a 0,70, sendo considerada uma das regiões mais pobres do estado de Minas Gerais (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS, 2008; SOUZA et al., 2008).

Sua riqueza hídrica se constitui pela formação de um grande número de veredas, muitas delas representando fontes de importantes cursos d'água, como os rios Acari, Pardo, Pandeiros, Itacarambi, Cochá, Carinhanha, e outros menores (SOUZA et al., 2008).

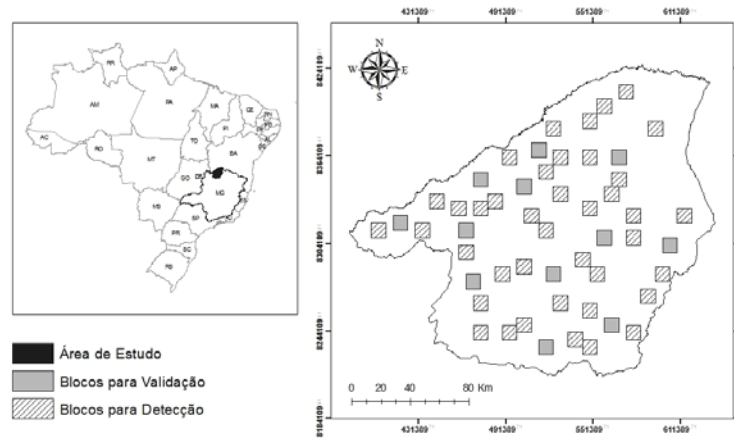


Figura 1 Localização da área de estudo e estrutura de amostragem

Os solos são formados predominantemente por Latossolos, com presença significativa de Areias Quartzosas e solos Álicos e Distróficos. Em menores proporções, ocorrem solos Litólicos e Cambissolos, além de Podzólicos Eutróficos, Solos Aluviais Eutróficos, Gley Húmico e Gley Pouco Húmico, ambos Álicos, Planossolos Eutróficos e Álicos e Solos Hidromórficos Indiscriminados (MINAS GERAIS, 2002).

A vegetação nativa predominante é o Cerrado com ocorrência das fisionomias cerrado *sensu strictu*, campo, campo cerrado, floresta decidual, floresta semi-decidual e veredas (CARVALHO; SCOLFORO, 2008). Além disso, apresenta importantes áreas de tensão ecológica entre o Cerrado e a Caatinga (MENINO et al., 2012).

O clima de acordo com a classificação de Köppen é Aw, ou seja, clima tropical úmido (megatérmico) de savana, com inverno seco e verão chuvoso, onde a temperatura média do mês mais frio é superior a 18° C e a precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm (MINAS GERAIS,

2002; SOUZA et al., 2008). O relevo é caracterizado como predominantemente plano apresentando a ocorrência de chapadões, com altitudes variando de 500 a 700 metros (BETHONICO, 2009).

Como forma de proteger e conservar as riquezas naturais e a biodiversidade da região foram criadas ao longo dos anos várias Unidades de Conservação (UC) na área de estudo, como os Parques Federais Cavernas do Peruaçu e Grande Sertão Veredas; os Parques Estaduais Veredas do Peruaçu e Serra das Araras e as Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pandeiros, do Sabonetal, Cavernas do Peruaçu e a Área Indígena Xacriabá (INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS, 2006; SOUZA et al., 2008).

Do ponto de vista histórico as mudanças no uso e cobertura do solo na região iniciaram-se no século XVII com a exploração do rio São Francisco e de seus afluentes à procura de riquezas minerais e mão-de-obra escrava, de origem indígena, estabelecendo assim pontos de apoio, comércios e vilarejos (BETHONICO, 2009).

Em meados do século XVIII, a substituição da vegetação nativa para a formação dos grandes currais de criação de gado foi a principal atividade antrópica na região que se intensificou e se diversificou nas décadas de 1960, 1970 e 1980 com a abertura do interior do País para a construção de Brasília, nova capital federal, construção de estradas ampliando a malha viária, políticas públicas de incentivo à abertura de novas fronteiras agrícolas, o avanço das tecnologias para irrigação e desmatamentos em grande escala (pivô-central, tratores, correntões, etc.) e a implantação de grandes projetos de eucalipto visando à produção de carvão vegetal (BETHONICO, 2009; SOUZA et al., 2008).



## 2.2 Imagens de satélite

Para a realização deste estudo, foram utilizadas duas imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) presente nos satélites da série LANDSAT 5 referentes à área de estudo, nos anos de 2010 e 2011. As imagens LANDSAT 5, com resolução espacial de 30 m, foram adquiridas junto ao instituto do governo americano que dá suporte às pesquisas envolvendo levantamentos geológicos e observação da Terra, o *United States Geological Survey for Earth Observation and Science* (USGS\EROS).

As imagens foram adquiridas no nível de processamento CDR (*Landsat Surface Reflectance Climate Data Record*), ou seja, já com as devidas correções geométricas e valores de reflectância ao nível do solo.

## 2.3 Análise da estrutura espacial

Para a análise da estrutura espacial primeiramente foi calculado o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada ou NDVI (*The Normalized Difference Vegetation Index*) em cada imagem da área de estudo. O NDVI é o índice espectral mais utilizado na literatura mundial em estudos da vegetação usando imagens de sensoriamento remoto pela sua simplicidade e pela sua forte correlação com variáveis de interesse como a biomassa, a fração fotossinteticamente ativa absorvida da radiação interceptada e os padrões fenológicos (CONSTANTINI et al., 2012; MANCINO et al., 2014).

A partir das imagens NDVI dos anos de 2010 e 2011, foram distribuídos aleatoriamente na área de estudo 40 blocos de 10 km<sup>2</sup> cada

para o ajuste dos semivariogramas. Os semivariogramas são métodos geoestatísticos para analisar a presença de correlação entre as amostras.

Neste estudo, os semivariogramas foram ajustados a partir dos valores das imagens NDVI de cada pixel dentro de cada bloco e em cada ano de análise, uma vez que estas imagens refletem a distribuição espacial e a dinâmica da cobertura vegetal na área de estudo.

As funções de semivariância são caracterizadas por três parâmetros: *Sill*, *Range* e *Nugget* (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000; YAMAMOTO, LANDIM, 2013). O *Sill* (patamar) indica a quantidade de variação explicada pela estrutura espacial dos dados; o *Range* (alcance) é a distância em que o semivariograma atinge o *Sill*. O *Nugget* (efeito pepita) é a combinação de erros de amostragem e variações em pequenas escalas que ocorrem nas escalas menores que a menor distância entre os pontos amostrados.

Primeiramente, foi realizada a análise exploratória dos dados com o intuito de entender o comportamento geral dos mesmos, ou seja, estudar a tendência, a forma e a distribuição dos valores de NDVI em cada bloco e em cada ano de análise. Foram determinadas as medidas de posição (média, valores mínimos e máximos), medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) e de avaliação da normalidade por meio do histograma de frequência, além da verificação de dados discrepantes utilizando-se os gráficos box-plot.

Após a análise exploratória, foram gerados os semivariogramas derivados dos valores de NDVI para cada bloco e data analisada. A partir destes, para cada bloco e período analisado o modelo exponencial foi ajustado. Os ajustes foram realizados através do Método dos Mínimos

Quadrados Ponderados, utilizando o programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001).

#### **2.4 Detecção de mudanças**

Para detecção das mudanças no uso e cobertura do solo, foi calculada a imagem NDVI diferença, através da subtração dos valores de NDVI de cada pixel da imagem de 2011 pelos valores de NDVI dos mesmos na imagem de 2010. A imagem NDVI diferença destaca os pixels que sofreram mudanças no período analisado, onde valores negativos indicam supressão da vegetação enquanto valores positivos indicam regeneração da vegetação.

Como os valores de mudança do NDVI no tempo são uma variável contínua, para a obtenção de um mapa binário, ou seja, pixels de mudanças e pixels de não mudança, foi necessária a definição de um limiar de mudança fixado em 10%, sendo 5% em cada extremidade da curva de distribuição de frequência dos valores da imagem NDVI diferença, conforme sugerido por Constantini et al. (2012) e Zurlini et al. (2006).

#### **2.5 Classificação da cobertura do solo**

Para a obtenção das classes de cobertura do solo nos 40 blocos foi adotado o método de classificação orientada ao objeto, utilizando o software e Cognition Developer 8.0. Em uma classificação orientada ao

objeto, o primeiro processo é a segmentação da imagem que consiste em dividir a imagem em regiões homogêneas através dos atributos espectrais e espaciais.

O algoritmo usado neste processo foi o de segmentação em multirresoluções, que permite incorporar dimensões espaciais, por meio de medidas de escala e forma, no processo de segmentação, facilitando a delimitação de objetos reais presentes em paisagens complexas (BERTANI, 2011). Os critérios adotados para definir os objetos em função dos atributos espaciais e espectrais foram um parâmetro de escala igual a 50 e critérios de cor e forma iguais a 0,3 com pesos iguais para todas as bandas da imagem.

O segundo passo, é a classificação propriamente dita, que se inicia pela coleta de amostras de treinamento representativas de cada classe de cobertura do solo. Foram mapeadas 4 classes de cobertura do solo: Água, Vegetação Nativa, Agropecuária e Solo.

O algoritmo de classificação adotado foi baseado na Lógica Fuzzy. Segundo Bárdossy e Samaniego (2002), a Lógica Fuzzy é um método probabilístico que confere uma boa técnica de classificação por permitir que os objetos tenham pertinência em mais de uma classe, de acordo com as curvas da função, representando melhor a natureza dos dados.

Após a classificação, o pós-processamento, que confere a correção dos erros cometidos pelo algoritmo classificador, foi realizado para incrementar a acurácia final do mapa. Esta acurácia é gerada através de uma matriz de confusão e métricas de acurácia.

## **2.6 Métricas de Ecologia da Paisagem**

As métricas de ecologia da paisagem utilizadas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, e foram calculadas utilizando o software Fragstats 4.1 (MCGARIGAL; CUSHMAN; ENE, 2012). As análises foram limitadas às métricas de área, densidade, forma, proximidade e isolamento caracterizando assim a estrutura da paisagem.

Tabela 1 Métricas da ecologia de paisagem selecionadas para análise da área de estudo

<b>Tipo</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Sigla e intervalo (unidade)</b>	<b>Observação</b>
Área da classe (CA)	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left( \frac{1}{10000} \right)$	CA>0 (ha)	Medida de Composição da paisagem. Maiores valores de CA indicam domínio da matriz.
Porcentagem de paisagem de cada classe (PLAND)	$PLAND = P_i \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A}$	PLAND>0%	Quantifica a abundância proporcional de cada tipo de mancha na paisagem.
Número de manchas (NP)	$NP = n_j$	$NP \geq 1$ (adimensional)	Maior valor quantifica maior fragmentação da paisagem e menores valores, união ou extinção de fragmentos de mesma classe.
Densidade de manchas (PD)	$PD = \frac{n_i}{A} (10000)(100)$	PD>0 (nº por 100 ha)	É o número de fragmentos da classe em 100 hectares. A interpretação é a mesma descrita para NP.
Índice de maior mancha (LPI)	$LPI = \frac{\max_{j=1}^n (a_{ij})}{A(100)}$	$0 < LPI < 100$ (%)	Maior valor favorece dispersores, polinizadores e o abastecimento de fragmentos menores por dispersão de propágulos.
Área média dos fragmentos (AREA_MN)	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \left( \frac{1}{10000} \right)$	AREA_MN>0 (ha)	Indicativo do grau de fragmentação por função do número de fragmentos e da área total ocupada por determinada classe.

“Tabela 1, conclusão”

<b>Tipo</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Sigla e intervalo (unidade)</b>	<b>Observação</b>
Desvio padrão da área (AREA_SD)	$SD = \sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij} - \left(x = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n_1}\right)}$	AREA_SD>0 (ha)	Razão da variância absoluta do tamanho das manchas.
Índice de forma médio (SAPE_MN)	$SHAPE = \frac{P_{ij}}{\min p_{ij}};$ $MN = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n_i}$	SHAPE_MN≥1 (adimensional)	Valor menor indica fragmento de forma simples, o que é benéfico para a conservação.
Distância média do vizinho mais próximo (ENN_MN)	$ENN = h_{ij};$ $MN = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{n_i}$	ENN_MN≥0 (m)	Valor menor favorece para a aglutinação dos fragmentos.
Relação de circunferência (CIRCLE)	$SQUARE = 1 - \left[\frac{a_{ij}}{a_{ij}^s}\right]$	0<CIRCLE<1 (adimensional)	Valores próximos de 0 a mancha é circular perto de 1 é alongada.

Fonte: Adaptado de Souza (2011).

Tabela 2 Variáveis e abreviaturas nas fórmulas das métricas utilizadas

Variáveis	Definição
A	Área total da paisagem (ha).
$a_{ij}$	Área (ha) do fragmento ij, onde i refere-se ao tipo de fragmento (classe) e j ao número de fragmentos da paisagem.
$a_{ijs}$	Distância (m) entre dois fragmentos, com base na distância de borda a borda dos fragmentos, e calculado a partir do centro de um pixel ao centro de outro pixel.
$e_{ik}$	Extensão total da borda (m) na paisagem entre os tipos de fragmentos i e k.
$h_{ij}$	Distância (m) do fragmento ij ao fragmento mais próximo de mesmo tipo de habitat (classe), baseado na distância de borda a borda e computado de centro de célula (pixel) a centro de célula (pixel).
$h_{ijr}$	Distância entre as células (pixels) ijr (localizadas dentro do fragmento ij) e o centróide do fragmento ij, baseado na distância de centro de célula (pixel) a centro de célula (pixel).
$n_{ij}$	Número de fragmentos de um determinado tipo de habitat (classe) i na paisagem.
$P_i$	Proporção da paisagem ocupada por fragmentos de uma determinada classe (i).
$P_{ij}$	Perímetro do fragmento ij medido em número de superfícies de célula (pixel).
$x_{ij}$	Representa a métrica que será calculada na fórmula de média, área ponderada média, desvio padrão e coeficiente de variação.
Z	Número de células (pixels) no fragmento ij.

Fonte: McGarigal e Marks (1995).



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise exploratória dos dados

De acordo com os gráficos box-plot, os valores médios de NDVI variaram entre 0,46 a 0,70 para os blocos de 2010 e de 0,43 a 0,71 para os blocos de 2011 (Tabela 3).

Analisando os histogramas dos valores de NDVI em cada bloco e ano, a distribuição de frequência dos dados não desviou da normalidade. A distribuição dos valores de NDVI nas latitudes e longitudes mostrou que os dados não possuem tendência, ou seja, a dependência espacial é explicada apenas pela distância entre as amostras.

Tabela 3 Medidas de posição e dispersão dos valores de NDVI

BLOCOS	2010				2011			
	MÉDIA	MIN	MAX	CV %	MÉDIA	MIN	MAX	CV %
1	0,58	0,18	0,82	18,21	0,52	0,20	0,77	19,03
2	0,56	-0,32	0,82	23,40	0,58	-0,17	0,92	22,23
3	0,58	0,24	0,85	13,12	0,58	0,24	0,82	14,07
4	0,60	-0,48	0,87	21,47	0,56	-0,43	0,85	24,07
5	0,57	0,03	0,86	24,47	0,53	0,09	0,81	24,26
6	0,55	-0,04	0,83	19,36	0,56	-0,10	0,82	20,38
7	0,55	-0,05	0,84	17,55	0,58	0,01	0,84	20,54
8	0,54	0,25	0,85	21,14	0,56	0,23	0,87	24,16
9	0,46	0,10	0,85	36,47	0,43	0,14	0,85	38,61
10	0,61	0,26	0,87	12,73	0,58	0,22	0,83	14,74
11	0,46	0,07	0,87	35,44	0,49	0,10	0,62	32,76
12	0,49	0,09	0,80	31,75	0,50	0,13	0,86	28,92
13	0,59	0,18	0,86	17,58	0,59	0,26	0,88	15,87
14	0,65	0,20	0,91	13,77	0,63	0,19	0,90	15,73

“Tabela 3, continuação”

BLOCOS	2010				2011			
	MÉDIA	MIN	MAX	CV %	MÉDIA	MIN	MAX	CV %
15	0,67	0,15	0,89	13,96	0,66	0,13	0,92	16,20
16	0,57	0,16	0,82	15,37	0,67	0,26	0,89	7,77
17	0,57	0,16	0,82	15,37	0,55	0,21	0,81	16,36
18	0,49	0,17	0,88	19,51	0,55	0,11	0,86	22,93
19	0,54	0,07	0,83	19,01	0,55	0,07	0,84	19,55
20	0,47	0,00	0,90	20,19	0,49	-0,27	0,78	21,99
21	0,47	0,12	0,81	21,78	0,49	0,10	0,80	21,20
22	0,56	0,23	0,82	14,79	0,54	0,24	0,78	13,77
23	0,60	0,12	0,84	15,76	0,57	0,16	0,82	16,76
24	0,52	0,20	0,81	15,83	0,51	0,20	0,80	16,46
25	0,54	0,09	0,73	11,35	0,53	0,25	0,78	11,84
26	0,52	0,15	0,84	23,78	0,51	0,15	0,83	22,91
27	0,49	0,18	0,82	18,17	0,47	0,20	0,81	19,11
28	0,59	0,36	0,76	8,94	0,58	0,36	0,78	8,45
29	0,60	-0,13	0,85	17,47	0,58	-0,04	0,83	17,36
30	0,57	-0,14	0,84	11,01	0,56	0,28	0,84	10,52
31	0,61	0,25	0,83	11,50	0,59	0,29	0,82	11,31
32	0,70	0,26	0,87	14,00	0,71	0,26	0,85	12,47
33	0,67	0,41	0,85	5,46	0,65	0,32	0,84	5,67
34	0,51	0,22	0,86	17,29	0,50	0,23	0,86	17,10
35	0,57	0,26	0,84	16,94	0,54	0,23	0,81	17,43
36	0,67	0,22	0,83	6,69	0,65	0,24	0,81	6,44
37	0,64	0,18	0,91	9,78	0,64	0,19	0,84	9,32
38	0,57	0,30	0,81	12,26	0,55	0,26	0,81	12,32
39	0,67	0,46	0,80	5,00	0,64	0,48	0,79	5,02
40	0,59	0,22	0,80	8,43	0,59	0,25	0,80	8,70

### 3.2 Análise da estrutura espacial

A Tabela 4 apresenta os parâmetros dos semivariogramas ajustados para os 40 blocos nos anos de 2010 e 2011. Observa-se uma

grande variabilidade nos valores dos parâmetros ajustados para cada bloco e ano, indicando a alta heterogeneidade espacial e temporal da área de estudo composta por fragmentos de vegetação nativa, áreas agrícolas com rotações periódicas de culturas, reflorestamentos, áreas de pastagens com e sem manejo e áreas de solo exposto.

Os parâmetros *Sill* e *Range* foram os que mais expressaram a heterogeneidade espacial da área de estudo, com valores mínimos e máximos de *Sill* entre 0,0006 - 0,0316 em 2010 e 0,0006 - 0,0353 em 2011; e valores mínimos e máximos de *Range* entre 175 - 2.649 m em 2010 e 200 - 3.530,8 m em 2011. Segundo Garrigues et al. (2006), a alta variabilidade do parâmetro *Sill* derivado de imagens NDVI de diferentes paisagens é principalmente explicada pelo tipo de uso e cobertura do solo, com áreas agrícolas apresentando valores maiores e com maior variação entre valores mínimos e máximos do que áreas cobertas por vegetação nativa ou florestas plantadas.

Considerando as mudanças temporais na estrutura da paisagem, observa-se que os parâmetros *Sill* e *Range* tiveram seus valores influenciados pelas mudanças de uso e cobertura do solo enquanto que as alterações nos valores do parâmetro *Nugget* não foram relacionadas a essas mudanças.

Analisando os padrões de comportamento dos parâmetros *Sill* e *Range* para os 40 blocos nos anos de 2010 e 2011, juntamente com o número de pixels de mudança do uso e cobertura do solo detectados nas imagens NDVI diferença, foi possível observar seis principais padrões de comportamento temporal apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os anos 2010 e 2011

BLOCO	2010			2011		
	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>
1	288,61	0,0081	0,0023	408,07	0,0068	0,0023
2	624,75	0,0125	0,0042	369,29	0,0128	0,0031
3	300,00	0,0043	0,0011	300,00	0,0066	0,0000
4	312,76	0,0141	0,0022	428,47	0,0158	0,0018
5	466,43	0,0124	0,0044	411,17	0,0124	0,0035
6	192,24	0,0071	0,0020	188,31	0,0097	0,0019
7	509,91	0,0067	0,0026	415,13	0,0126	0,0022
8	282,03	0,0092	0,0020	349,72	0,0147	0,0026
9	2649,00	0,0316	0,0046	3530,78	0,0353	0,0420
10	871,88	0,0049	0,0020	899,38	0,0069	0,0018
11	426,56	0,0230	0,0048	349,11	0,0220	0,0042
12	1300,00	0,0265	0,0009	923,26	0,0225	0,0000
13	877,88	0,0099	0,0018	646,59	0,0065	0,0016
14	1079,99	0,0071	0,0018	772,77	0,0100	0,0015
15	912,40	0,0090	0,0003	798,86	0,0122	0,0000
16	1073,79	0,0062	0,0019	1300,00	0,0031	0,0004
17	754,46	0,0057	0,0016	574,85	0,0080	0,0007
18	224,58	0,0074	0,0005	428,18	0,0127	0,0015
19	368,14	0,0070	0,0019	335,56	0,0085	0,0018
20	299,51	0,0073	0,0016	417,65	0,0085	0,0025
21	300,00	0,0066	0,0037	300,00	0,0068	0,0037
22	300,00	0,0060	0,0015	1501,33	0,0039	0,0018
23	200,00	0,0051	0,0019	200,00	0,0054	0,0015
24	400,00	0,0040	0,0029	400,00	0,0043	0,0024
25	190,00	0,0019	0,0009	200,00	0,0020	0,0008
26	344,04	0,0108	0,0043	308,43	0,0100	0,0037
27	200,00	0,0036	0,0018	200,00	0,0037	0,0016
28	900,00	0,0060	0,0007	900,00	0,0013	0,0007
29	254,78	0,0070	0,0023	261,11	0,0067	0,0021
30	293,44	0,0022	0,0011	232,81	0,0021	0,0008
31	499,81	0,0027	0,0016	449,91	0,0026	0,0013

“Tabela 4, conclusão”

BLOCO	2010			2011		
	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>	<i>Range</i>	<i>Sill</i>	<i>Nugget</i>
32	175,00	0,0031	0,0011	300,00	0,0030	0,0016
33	400,00	0,0007	0,0004	500,00	0,0007	0,0004
34	474,61	0,0067	0,0012	559,10	0,0062	0,0013
35	1021,23	0,0065	0,0021	925,95	0,0061	0,0021
36	300,00	0,0040	0,0005	300,00	0,0011	0,0005
37	300,00	0,0023	0,0008	275,00	0,0023	0,0005
38	750,00	0,0038	0,0009	700,00	0,0035	0,0009
39	400,00	0,0006	0,0004	400,00	0,0006	0,0003
40	400,00	0,0014	0,0008	700,00	0,0014	0,0009

Tabela 5 Padrões de comportamento dos parâmetros *Sill* e *Range* para os anos de 2010 e 2011

Padrões no tempo	<i>Sill</i>	<i>Range</i>	2010 - 2011
1	=	=	Os valores dos dois parâmetros não se alteraram
2	>	>	Aumento dos dois parâmetros
3	>	<	Aumento do <i>Sill</i> e diminuição do <i>Range</i>
4	<	>	Diminuição do <i>Sill</i> e aumento do <i>Range</i>
5	>	=	Aumento do <i>Sill</i> sem alteração no valor do <i>Range</i>
6	<	<	Diminuição dos dois parâmetros

### 3.3 Classificação da cobertura do solo

A matriz de confusão, bem como os erros de omissão e inclusão, além da acurácia global e as acurácias do produtor e usuário para a classificação da imagem de 2010 são apresentadas na Tabela 6. Os resultados demonstram a boa concordância entre as classes de cobertura do solo mapeadas em cada bloco e a verdade de campo, credenciando seu uso em futuras análises.

Na imagem de 2011, além das 4 classes de cobertura do solo mapeadas (agropecuária, água, nativa e solo), foi acrescentada a classe mudança, composta pelos pixels de mudança do uso e cobertura do solo detectados utilizando a técnica da imagem NDVI diferença.

Tabela 6 Matriz de confusão, erros de omissão e inclusão e suas respectivas acurácias

<b>MATRIZ DE CONFUSÃO</b>							
<b>Classes</b>	<b>Agropecuária</b>	<b>Água</b>	<b>Nativa</b>	<b>Solo</b>	<b>Total</b>	<b>Ac. Usuário (%)</b>	<b>Erro de Inclusão (%)</b>
Agropecuária	42	2	1	5	50	84,0	16,0
Água	0	43	0	0	43	100,0	0,0
Nativa	3	4	46	3	56	82,1	17,9
Solo	5	1	3	42	51	82,4	17,6
Total	50	50	50	50	200		
Ac. Produtor (%)	84,0	86,0	92,0	84,0		Ac. Global = 86,5	
Erro de Omissão (%)	16,0	14,0	8,0	16,0			

### 3.4 Análise da relação entre as métricas da ecologia da paisagem e os parâmetros dos semivariogramas

Os resultados das métricas da paisagem para cada bloco e classe de cobertura do solo para os anos de 2010 e 2011 são apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente.

No entanto, para viabilizar e evitar redundâncias na análise destas métricas em relação aos padrões de comportamento dos parâmetros dos semivariogramas (Tabela 5), foi necessário agrupar os padrões 3 e 5; e os padrões 4 e 6, além de focar a discussão em 3 principais métricas da paisagem: Área da classe (CA), Porcentagem de paisagem de cada classe (PLAND), Número de manchas (NP).

Para a situação 1 em que não houve alteração nos valores dos parâmetros *Sill* e *Range* no tempo, observou-se que também não ocorreram mudanças nas métricas da paisagem, ou seja, os valores de CA, PLAND e NP permaneceram idênticos. A Figura 2 ilustra um bloco onde não ocorreram mudanças no uso e cobertura do solo.

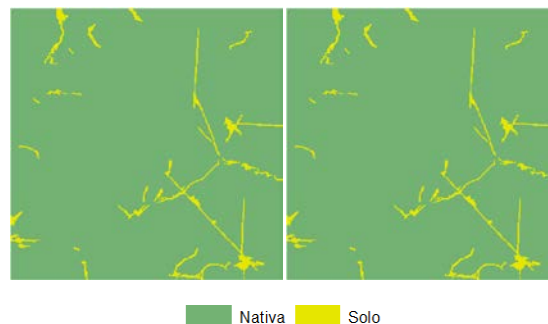


Figura 2 Bloco sem mudanças no uso e cobertura do solo



Para a situação 2 em que tanto os valores do parâmetro *Sill* quanto os valores do parâmetro *Range* aumentaram no tempo, observou-se que as classes nativa e agropecuária ocupavam cada uma, em 2010, praticamente 50% da área total de cada bloco (PLAND). Com as mudanças no uso e cobertura do solo, detectadas em 2011, percebe-se não só a diminuição nos valores percentuais de ocupação destas duas classes de cobertura do solo, mas o surgimento da classe mudança ocupando em média 15% da área total destes blocos elevando a uma fragmentação da paisagem expressa no número médio de fragmentos (NP) em cada bloco que passou de 40 fragmentos em 2010 para 412 fragmentos em 2011. A Figura 3 ilustra esta situação apresentando um bloco onde a estrutura espacial é alterada, ocorrendo fragmentação da paisagem com o surgimento da classe mudança.

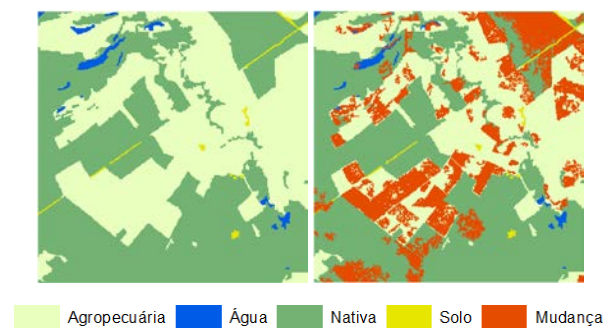


Figura 3 Bloco com aumento nos valores dos parâmetros *Sill* e *Range*

Para as situações 3 e 5 em que os valores do parâmetro *Sill* aumentaram e os valores do parâmetro *Range* não se alteraram ou diminuíram no tempo, observou-se que a classe nativa ocupava, em 2010, em torno de 70% da área total de cada bloco (PLAND). Como as

mudanças no uso e cobertura do solo nestes blocos, detectadas em 2011, ocuparam áreas menores que 5% da área total de cada bloco, percebe-se uma menor fragmentação da paisagem expressa no número médio de fragmentos (NP) em cada bloco que passou de 33 fragmentos em 2010 para 98 fragmentos em 2011. A Figura 4 ilustra esta situação apresentando um bloco onde a matriz é dominada pela vegetação nativa e ocorreram pequenas mudanças no uso e cobertura do solo.

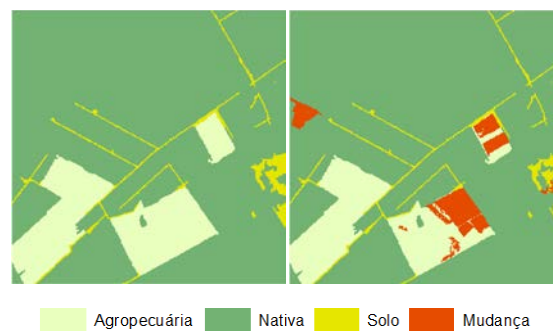


Figura 4 Bloco com aumento no valor do parâmetro *Sill* e diminuição ou não alteração no valor do parâmetro *Range*

Para as situações 4 e 6 em que os valores do parâmetro *Sill* diminuíram no tempo, independente da variação positiva ou negativa do parâmetro *Range*, observou-se que a classe nativa ocupava, em 2010, em torno de 86% da área total de cada bloco (PLAND). Como as mudanças no uso e cobertura do solo nestes blocos, detectadas em 2011, são principalmente causadas por plantios em áreas agrícolas (Figura 5) observa-se que apesar do surgimento da classe mudança ocupando em média 13% da área dos blocos, não houve mudança no percentual da área ocupada pela vegetação nativa que se manteve em torno de 86%.

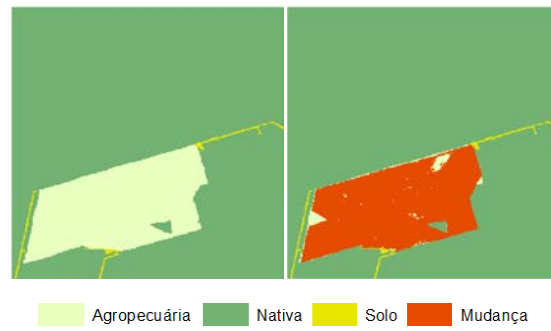


Figura 5 Bloco com diminuição no valor do parâmetro *Sill* e diminuição ou aumento no valor do parâmetro *Range*

## 4 CONCLUSÕES

Os parâmetros *Sill* e *Range* dos semivariogramas derivados das imagens NDVI são úteis não só para a caracterização das estruturas da paisagem quanto para a detecção e diagnóstico das mudanças nestas estruturas causadas por mudanças no uso e cobertura do solo.

As principais métricas da ecologia da paisagem com relação à análise do comportamento dos parâmetros do semivariograma são a Área da classe (CA), a Porcentagem de paisagem de cada classe (PLAND) e o Número de manchas (NP).

As métricas da ecologia da paisagem, já consagradas na literatura mundial para a análise de mudanças na estrutura espacial, quando interpretadas em conjunto com os parâmetros dos semivariogramas, potencializam o poder de análise, ampliando o entendimento dos danos a estas estruturas causadas pelas mudanças no uso e cobertura do solo.

**RELATION BETWEEN LANDSCAPE ECOLOGY METRICS,  
SEMIVARIOGRAM PARAMETERS AND LAND COVER  
CHANGES**

**ABSTRACT**

The objectives of this study were: (1) to analyze the semivariogram parameters, derived from NDVI images, in order to establish a pattern for changed areas based on the initial landscape structure; (2) to identify which landscape ecology metrics are better suited to help understanding the semivariogram parameter patterns in changed areas. Using the Landsat 5 TM images obtained during 2010 and 2011, the NDVI values were calculated for 40 blocks of 10 km<sup>2</sup>, randomly distributed in the Rio Pandeiros subwatershed. Later, the NDVI difference image was generated, using those obtained in 2010 and 2011, to obtain the number of changing pixels. Finally, a land cover object oriented classification was done to identify in which classes occurred more pixel changes. To establish the semivariogram parameter patterns for changed areas, we calculated the landscape ecology metrics for each block. The results showed six well-established patterns of the semivariogram parameters for changed areas, based on the initial landscape structure.

Keywords: Geostatistics. Change detection. Fragmentation.

## REFERÊNCIAS

BÁRDOSSY, A.; SAMANIEGO, L. Fuzzy rule-based classification of remotely sensed imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Washington, v. 40, n. 2, p. 362-374, Feb. 2002.

BERTANI, T. C. **Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento de paleomorfologias no interflúvio Madeira-Purus, Sudoeste da Amazônia Brasileira**. 2011. 129 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

BETHONICO, M. B. M. Rio Pandeiros: território e história de uma área de proteção ambiental no norte de Minas Gerais. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 3, n. 5, p. 23-38, 2009.

CARVALHO, L. M. T.; SCOLFORO, J. R. S. **Inventário Florestal de Minas Gerais: monitoramento da Flora Nativa 2005-2007**. Lavras: Editora da UFLA, 2008. 318 p.

CONSTANTINI, M. L. et al. NDVI spatial pattern and the potential fragility of mixed forested areas in volcanic lake watersheds. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 285, p. 133-141, Dec. 2012.

FERREIRA, J. F. et al. Análise do grau de fragmentação da vegetação do cerrado em uma região inserida na bacia do Rio Grande. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 12., 2014, Poços de Caldas. **Anais... Poços de Caldas**: Fapemig, 2014.

GARRIGUES, S. et al. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 103, p. 81-96, 2006.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. **Áreas de proteção ambiental no estado de Minas Gerais: demarcação e estudos para o pré-zoneamento ecológico**. Belo Horizonte: APA Bacia do Rio Pandeiros, 2006. 271 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Portal Meioambiente.mg**, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <[http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=154&Itemid=140](http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=154&Itemid=140)>. Acesso em: 13 mar. 2014.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 560 p.

MANCINO G. et al. Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural Forest expansion in Basilicata, southern Italy. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, Potenza, v. 7, p. 75-84, 2014.

MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S.; ENE, E. **FRAGSTATS v4**: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. Amherst: University of Massachusetts, 2012.

MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **Fragstats**: spatial pattern analysis program for quantify in glandscape structure. Portland: Department of Agriculture, 1995. 122 p.

MELLO, J. M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr./jun. 2005.

MENINO, G. et al. Environmental heterogeneity and natural regeneration in riparian vegetation of the Brazillan semi-arid region. **Edinburgh Journal of Botany**, Cambridge, v. 69, n. 1, p. 29-51, Mar. 2012.

METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, Campinas, v. 1, n. 1-2, p. 1-9, 2001.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano diretor de recursos hídricos das bacias afluentes do Rio São Francisco em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. 1 CD ROM.

MORATO, E. F.; CAMPOS, L. A. O. Efeitos da fragmentação florestal sobre vespas e abelhas solitárias em uma área da Amazônia Central.

**Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v. 17, n. 2, p. 429-444, 2000.

PÉRICO, E. et al. Efeitos da fragmentação de habitats sobre comunidades animais: utilização de sistemas de informação geográfica e de métricas de paisagens para a seleção de áreas adequadas a testes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia.

**Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2113-2120.

PÉRICO, E.; CEMIN, G. Caracterização da paisagem do município de Arvorezinha, RS, com ênfase na dinâmica dos fragmentos florestais, por meio de sistemas de informações geográficas (SIGs). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 9-21, abr. 2006.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: < <http://www.R-project.org>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SAUNDERS, D. A.; HOBBS, R. J.; MARGULES, C. R. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. **Conservation Biology**, Boston, v. 5, n. 1, p. 18-32, Mar. 1991.

SELMAN, P.; DOAR, N. An investigation os the potential for landscape ecology to act as basis for rural land use plans. **Journal of Environmental Management**, London, v. 35, n. 4, p. 281-299, Aug. 1992.



SOUZA, A. M. S. et al. **Proposta de Instituição do Comitê da Bacia Hidrográfica Afluentes Mineiros do Médio São Francisco (UPGRH-SF9)**. 2008. 35 p. Diagnóstico sócio-econômico ambiental apresentado ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos, como pré-requisito de aprovação do comitê. Disponível em: <[http://200.198.22.171/down.asp?x\\_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x\\_nome=Item\\_4\\_Dossie\\_Afluentes\\_Mineiros\\_do\\_Medio\\_SF9.pdf](http://200.198.22.171/down.asp?x_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x_nome=Item_4_Dossie_Afluentes_Mineiros_do_Medio_SF9.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2014.

SOUZA, C. G. **Caracterização ambiental e análise da estrutura da paisagem da área de proteção ambiental de coqueiral, Minas Gerais**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. p. 1-54.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZURLINI, G. et al. Disturbance patterns in a socio-ecological system at multiple scales. **Ecological Complexity**, Tempe, v. 3, n. 2, p. 119-128, June 2006.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS

- a) Os parâmetros dos semivariogramas gerados a partir de imagens NDVI se mostraram eficientes para a detecção de mudanças no uso e cobertura do solo em áreas de cerrado; Em áreas desmatadas, as mudanças no uso e cobertura do solo causam variações que podem ser quantificadas, normalmente, pelo aumento nos valores dos parâmetros *Sill* e *Range*, enquanto os mesmos se mantêm similares em áreas onde não ocorreram mudanças. Para o ajuste dos semivariogramas, os modelos exponenciais, esféricos e gaussianos apresentaram resultados similares;
- b) A estrutura espacial inicial da paisagem tem influência no comportamento dos parâmetros dos semivariogramas e o conhecimento destas relações permite inferir sobre o tipo de mudança ocorrido;
- c) O parâmetro *Sill* foi o que apresentou maior contribuição na detecção das áreas com maior probabilidade de mudanças no uso e cobertura do solo. O modelo logístico ajustado foi eficiente na detecção das áreas com maior probabilidade de ocorrência de mudanças no uso e cobertura do solo;
- d) As métricas da ecologia da paisagem quando interpretadas em conjunto com os parâmetros do semivariogramas potencializam o poder de análise, ampliando o entendimento dos processos de fragmentação causados pelas mudanças no uso e cobertura do solo.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A - Métricas da ecologia da paisagem para as classes de cobertura do solo em 2010

ANALISE SEM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
1	Agropecuaria	2662,56	26,68	54,00	0,54	6,81	49,31	118,11	1,91	0,62	162,89
1	Nativa	6779,07	67,93	12,00	0,12	55,55	564,92	1521,58	2,69	0,64	97,76
1	Solo	538,38	5,39	44,00	0,44	0,88	12,24	15,55	1,87	0,64	300,13
2	Agropecuaria	2073,87	20,78	32,00	0,32	4,89	64,81	121,56	2,18	0,65	186,92
2	Agua	74,34	0,74	5,00	0,05	0,34	14,87	11,48	3,25	0,84	1199,01
2	Nativa	6297,66	63,10	33,00	0,33	58,13	190,84	991,92	2,11	0,62	90,52
2	Solo	1534,14	15,37	60,00	0,60	6,46	25,57	86,87	1,85	0,63	222,46
3	Agropecuaria	1503,90	15,07	24,00	0,24	3,40	62,66	96,93	2,25	0,67	100,68
3	Nativa	8199,27	82,16	8,00	0,08	80,08	1024,91	2633,70	2,19	0,61	118,73
3	Solo	276,84	2,77	19,00	0,19	0,64	14,57	17,64	2,65	0,77	314,65
4	Agropecuaria	4450,77	44,60	13,00	0,13	38,82	342,37	1023,50	2,03	0,67	433,97
4	Agua	117,45	1,18	14,00	0,14	0,43	8,39	10,59	1,57	0,70	517,47
4	Nativa	5347,89	53,59	16,00	0,16	45,18	334,24	1082,07	2,05	0,71	168,74
4	Solo	63,90	0,64	10,00	0,10	0,24	6,39	6,45	2,25	0,70	817,06
5	Agropecuaria	1243,17	12,46	22,00	0,22	5,39	56,51	115,69	2,28	0,69	329,50
5	Agua	1,80	0,02	1,00	0,01	0,02	1,80	0,00	1,67	0,70	N/A
5	Nativa	6514,47	65,28	22,00	0,22	47,24	296,11	1008,64	2,29	0,61	122,03

ANALISE SEM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
5	Solo	2220,57	22,25	77,00	0,77	3,43	28,84	68,97	1,84	0,62	168,82
6	Agropecuaria	3542,13	35,49	38,00	0,38	11,94	93,21	239,07	2,41	0,69	93,71
6	Agua	52,38	0,52	5,00	0,05	0,18	10,48	6,70	2,91	0,86	1106,74
6	Nativa	5957,19	59,69	42,00	0,42	39,23	141,84	605,90	2,17	0,68	113,69
6	Solo	428,31	4,29	59,00	0,59	0,81	7,26	11,68	1,80	0,67	246,63
7	Agropecuaria	3060,81	30,67	44,00	0,44	12,45	69,56	201,43	2,07	0,67	191,77
7	Agua	16,02	0,16	1,00	0,01	0,16	16,02	0,00	1,41	0,59	N/A
7	Nativa	6849,99	68,64	13,00	0,13	50,68	526,92	1331,30	2,44	0,59	83,91
7	Solo	53,19	0,53	5,00	0,05	0,38	10,64	14,07	2,29	0,73	396,60
8	Agropecuaria	4999,14	50,09	14,00	0,14	48,65	357,08	1247,56	2,00	0,57	143,69
8	Nativa	4980,87	49,91	22,00	0,22	35,68	226,40	739,25	2,31	0,66	154,17
9	Agropecuaria	4180,14	41,89	3,00	0,03	36,70	1393,38	1605,76	3,26	0,75	207,70
9	Nativa	5776,47	57,88	17,00	0,17	46,58	339,79	1097,95	1,67	0,63	212,26
9	Solo	23,40	0,23	7,00	0,07	0,07	3,34	2,76	1,41	0,57	743,58
10	Agropecuaria	1170,27	11,73	16,00	0,16	5,21	73,14	127,91	1,86	0,63	171,17
10	Nativa	8493,75	85,11	4,00	0,04	84,94	2123,44	3668,39	3,01	0,74	63,54
10	Solo	315,99	3,17	21,00	0,21	0,84	15,05	18,71	3,04	0,84	436,00
11	Agropecuaria	7409,52	74,24	11,00	0,11	72,54	673,59	2076,40	2,24	0,64	196,03
11	Agua	92,16	0,92	2,00	0,02	0,51	46,08	5,22	6,92	0,98	534,13
11	Nativa	2289,96	22,95	47,00	0,47	5,23	48,72	91,56	1,89	0,64	194,82
11	Solo	188,37	1,89	10,00	0,10	0,61	18,84	15,95	3,43	0,84	631,39

ANALISE SEM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
12	Agropecuaria	3384,00	33,91	2,00	0,02	33,89	1692,00	1690,29	2,79	0,70	127,28
12	Nativa	6445,44	64,58	12,00	0,12	39,02	537,12	1061,58	1,76	0,55	204,49
12	Solo	150,57	1,51	7,00	0,07	0,73	21,51	22,79	3,84	0,81	565,48
13	Agropecuaria	814,86	8,16	24,00	0,24	5,99	33,95	118,07	1,82	0,71	216,74
13	Agua	2,16	0,02	1,00	0,01	0,02	2,16	0,00	1,40	0,71	N/A
13	Nativa	9156,33	91,75	3,00	0,03	91,67	3052,11	4311,24	1,77	0,43	70,00
13	Solo	6,66	0,07	6,00	0,06	0,03	1,11	0,80	1,08	0,44	1662,44
14	Agropecuaria	2995,65	30,02	23,00	0,23	23,18	130,25	467,31	2,00	0,65	248,96
14	Nativa	6851,43	68,65	12,00	0,12	67,18	570,95	1849,43	1,92	0,63	99,06
14	Solo	132,93	1,33	9,00	0,09	0,49	14,77	13,58	2,95	0,73	679,90
15	Agropecuaria	1550,88	15,54	3,00	0,03	7,40	516,96	266,96	1,65	0,52	946,04
15	Nativa	8099,55	81,16	9,00	0,09	68,83	899,95	2117,71	1,71	0,56	147,90
15	Solo	329,58	3,30	11,00	0,11	1,08	29,96	34,57	4,46	0,82	523,87
16	Agropecuaria	1779,75	17,83	1,00	0,01	17,83	1779,75	0,00	1,55	0,62	N/A
16	Nativa	8139,69	81,56	2,00	0,02	81,35	4069,85	4049,15	1,87	0,56	161,55
16	Solo	60,57	0,61	4,00	0,04	0,21	15,14	6,05	3,88	0,93	1128,64
17	Agropecuaria	514,35	5,15	3,00	0,03	3,42	171,45	122,32	1,39	0,53	479,63
17	Nativa	9241,65	92,60	3,00	0,03	92,56	3080,55	4353,76	1,90	0,53	62,36
17	Solo	224,01	2,24	27,00	0,27	0,34	8,30	8,08	2,10	0,72	224,82
18	Agropecuaria	3627,36	36,35	20,00	0,20	15,91	181,37	423,55	2,34	0,67	242,27
18	Agua	11,61	0,12	2,00	0,02	0,06	5,81	0,23	1,51	0,54	1794,24

ANALISE SEM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
18	Nativa	6295,05	63,08	12,00	0,12	51,20	524,59	1389,53	2,63	0,66	108,41
18	Solo	45,99	0,46	3,00	0,03	0,24	15,33	9,77	3,89	0,84	110,71
19	Agropecuaria	3275,10	32,82	35,00	0,35	15,99	93,57	291,63	1,95	0,67	137,80
19	Nativa	6645,96	66,59	11,00	0,11	65,13	604,18	1864,45	2,36	0,66	111,78
19	Solo	28,98	0,29	7,00	0,07	0,06	4,14	1,76	2,29	0,86	1771,58
20	Agropecuaria	4195,08	42,03	14,00	0,14	21,40	299,65	592,35	2,37	0,69	184,49
20	Agua	117,18	1,17	3,00	0,03	0,90	39,06	35,94	4,13	0,79	1983,40
20	Nativa	5623,56	56,35	24,00	0,24	31,10	234,32	666,35	2,12	0,69	124,52
20	Solo	14,22	0,14	1,00	0,01	0,14	14,22	0,00	1,65	0,75	N/A
21	Nativa	7019,10	70,33	10,00	0,10	67,08	701,91	1999,13	3,04	0,62	85,17
21	Solo	2960,91	29,67	144,00	1,44	4,09	20,56	55,66	1,68	0,61	124,18
22	Agua	4,23	0,04	1,00	0,01	0,04	4,23	0,00	1,29	0,47	N/A
22	Nativa	9574,11	95,93	3,00	0,03	69,38	3191,37	2848,47	2,39	0,60	60,00
22	Solo	401,67	4,02	25,00	0,25	1,09	16,07	23,63	2,89	0,82	416,07
23	Agropecuaria	1731,78	17,35	50,00	0,50	4,12	34,64	83,40	2,15	0,63	141,72
23	Agua	4,77	0,05	3,00	0,03	0,03	1,59	0,79	1,29	0,64	4143,49
23	Nativa	7583,67	75,99	7,00	0,07	74,27	1083,38	2583,92	3,42	0,67	62,02
23	Solo	659,79	6,61	39,00	0,39	2,17	16,92	39,02	2,15	0,67	392,85
24	Agropecuaria	14,49	0,15	1,00	0,01	0,15	14,49	0,00	1,73	0,72	N/A
24	Nativa	9578,88	95,98	1,00	0,01	95,98	9578,88	0,00	4,07	0,39	N/A
24	Solo	386,64	3,87	57,00	0,57	0,65	6,78	11,28	1,95	0,74	311,08

ANALISE SEM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
25	Agua	3,96	0,04	2,00	0,02	0,03	1,98	1,17	1,29	0,61	174,93
25	Nativa	9656,82	96,76	7,00	0,07	96,42	1379,55	3365,30	1,53	0,56	73,41
25	Solo	319,23	3,20	25,00	0,25	0,55	12,77	15,79	2,16	0,75	410,75
26	Agropecuaria	705,42	7,07	25,00	0,25	4,38	28,22	85,05	1,82	0,60	426,85
26	Agua	14,85	0,15	4,00	0,04	0,07	3,71	2,63	1,15	0,46	2189,04
26	Nativa	6524,01	65,37	20,00	0,20	62,58	326,20	1358,22	2,16	0,64	102,33
26	Solo	2735,73	27,41	67,00	0,67	7,65	40,83	106,25	2,07	0,65	132,69
27	Nativa	9319,14	93,38	3,00	0,03	93,08	3106,38	4372,15	2,27	0,55	68,28
27	Solo	660,87	6,62	49,00	0,49	2,85	13,49	39,95	2,09	0,73	237,16
28	Agropecuaria	804,24	8,06	1,00	0,01	8,06	804,24	0,00	2,42	0,44	N/A
28	Nativa	9128,97	91,47	1,00	0,01	91,47	9128,97	0,00	2,00	0,42	N/A
28	Solo	46,80	0,47	4,00	0,04	0,21	11,70	5,69	3,18	0,79	3694,99
29	Agropecuaria	5,58	0,06	1,00	0,01	0,06	5,58	0,00	2,88	0,86	N/A
29	Agua	16,92	0,17	1,00	0,01	0,17	16,92	0,00	4,18	0,96	N/A
29	Nativa	9853,20	98,73	2,00	0,02	98,64	4926,60	4917,78	1,82	0,52	84,85
29	Solo	104,31	1,05	49,00	0,49	0,11	2,13	2,48	1,35	0,60	504,08
30	Nativa	9936,00	99,56	1,00	0,01	99,56	9936,00	0,00	1,42	0,37	N/A
30	Solo	44,01	0,44	6,00	0,06	0,15	7,34	4,54	2,48	0,85	368,33
31	Nativa	9649,44	96,69	2,00	0,02	96,68	4824,72	4823,91	2,61	0,52	67,08
31	Solo	330,57	3,31	27,00	0,27	0,86	12,24	17,15	2,67	0,85	353,02
32	Agropecuaria	120,69	1,21	2,00	0,02	0,68	60,35	7,79	2,29	0,74	8900,90

ANALISE SEM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
32	Nativa	9755,64	97,75	2,00	0,02	97,71	4877,82	4873,86	1,53	0,37	180,00
32	Solo	103,68	1,04	9,00	0,09	0,48	11,52	13,37	2,25	0,73	1242,91
33	Agropecuaria	0,72	0,01	1,00	0,01	0,01	0,72	0,00	1,17	0,65	N/A
33	Nativa	9784,17	98,04	1,00	0,01	98,04	9784,17	0,00	2,60	0,38	N/A
33	Solo	195,12	1,96	6,00	0,06	0,75	32,52	27,71	4,46	0,92	328,22
34	Agropecuaria	283,41	2,84	22,00	0,22	0,47	12,88	12,07	2,22	0,73	120,35
34	Nativa	9609,66	96,29	3,00	0,03	96,26	3203,22	4527,87	1,85	0,60	90,00
34	Solo	56,97	0,57	13,00	0,13	0,24	4,38	6,06	1,39	0,56	960,35
35	Agropecuaria	35,19	0,35	6,00	0,06	0,12	5,87	4,54	1,50	0,63	305,74
35	Agua	4,50	0,05	1,00	0,01	0,05	4,50	0,00	1,33	0,75	N/A
35	Nativa	9782,46	98,02	1,00	0,01	98,02	9782,46	0,00	2,32	0,37	N/A
35	Solo	127,89	1,28	11,00	0,11	0,36	11,63	12,33	2,49	0,64	913,20
36	Nativa	9750,24	97,70	3,00	0,03	87,70	3250,08	3895,68	1,89	0,60	60,00
36	Solo	199,80	2,00	4,00	0,04	1,24	49,95	44,65	5,85	0,92	923,92
37	Agropecuaria	262,53	2,63	8,00	0,08	0,80	32,82	30,06	2,34	0,69	164,52
37	Agua	23,67	0,24	1,00	0,01	0,24	23,67	0,00	1,33	0,53	N/A
37	Nativa	9464,67	94,84	6,00	0,06	90,20	1577,45	3322,47	1,59	0,56	60,00
37	Solo	229,14	2,30	9,00	0,09	0,86	25,46	25,68	3,26	0,82	1103,68
38	Nativa	9905,94	99,26	1,00	0,01	99,26	9905,94	0,00	1,44	0,37	N/A
38	Solo	74,07	0,74	6,00	0,06	0,30	12,35	8,83	2,34	0,80	1982,28
39	Nativa	9950,04	99,70	1,00	0,01	99,70	9950,04	0,00	1,00	0,36	N/A



---

**ANALISE SEM MUDANÇA**

---

<b>BLOCO</b>	<b>CLASSE</b>	<b>CA</b>	<b>PLAND</b>	<b>NP</b>	<b>PD</b>	<b>LPI</b>	<b>AREA_MN</b>	<b>AREA_SD</b>	<b>SHAPE_MN</b>	<b>CIRCLE_MN</b>	<b>ENN_MN</b>
40	Nativa	9883,53	99,03	1,00	0,01	99,03	9883,53	0,00	1,70	0,37	N/A
40	Solo	96,48	0,97	13,00	0,13	0,53	7,42	13,37	1,83	0,76	557,29

**ANEXO B - Métricas da ecologia da paisagem para as classes de cobertura do solo em 2011**

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
1	Agropecuaria	1903,41	19,07	253,00	2,54	4,10	7,52	32,12	1,43	0,42	97,44
1	Nativa	6018,75	60,31	241,00	2,41	50,31	24,97	323,55	1,31	0,35	76,58
1	Solo	520,83	5,22	46,00	0,46	0,84	11,32	14,95	1,84	0,61	286,83
1	Mudança	1537,02	15,40	56,00	0,56	5,39	27,45	73,87	2,50	0,63	196,67
2	Agropecuaria	1772,64	17,76	111,00	1,11	3,80	15,97	51,98	1,60	0,45	78,85
2	Agua	74,34	0,74	5,00	0,05	0,34	14,87	11,48	3,25	0,84	1199,01
2	Nativa	5584,41	55,96	163,00	1,63	41,49	34,26	327,96	1,47	0,45	78,63
2	Solo	1457,46	14,60	95,00	0,95	5,95	15,34	64,60	1,63	0,50	158,94
2	Mudança	1091,16	10,93	70,00	0,70	2,47	15,59	34,46	2,31	0,65	229,95
3	Agropecuaria	1445,85	14,49	41,00	0,41	3,19	35,26	75,53	1,86	0,55	85,66
3	Nativa	8033,49	80,50	33,00	0,33	78,22	243,44	1337,10	1,39	0,33	81,33
3	Solo	273,87	2,74	21,00	0,21	0,62	13,04	16,91	2,50	0,72	289,31
3	Mudança	226,80	2,27	26,00	0,26	0,86	8,72	16,51	1,83	0,56	352,66
4	Agropecuaria	3145,59	31,52	292,00	2,93	20,01	10,77	119,18	1,29	0,34	90,58
4	Agua	85,32	0,85	38,00	0,38	0,33	2,25	5,70	1,30	0,42	182,17
4	Nativa	4584,78	45,94	236,00	2,36	24,37	19,43	189,67	1,25	0,31	83,33
4	Solo	59,94	0,60	16,00	0,16	0,19	3,75	4,69	1,87	0,66	369,37
4	Mudança	2104,38	21,09	68,00	0,68	3,60	30,95	67,68	2,66	0,65	189,96
5	Agropecuaria	1131,93	11,34	56,00	0,56	4,77	20,21	69,12	1,69	0,50	161,87
5	Agua	1,80	0,02	1,00	0,01	0,02	1,80	0,00	1,67	0,70	N/A

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
5	Nativa	6040,98	60,53	120,00	1,20	42,49	50,34	395,07	1,45	0,42	78,31
5	Solo	2198,97	22,03	89,00	0,89	3,31	24,71	63,83	1,76	0,59	142,32
5	Mudança	606,33	6,08	40,00	0,40	3,65	15,16	56,59	2,06	0,66	406,23
6	Agropecuaria	3394,53	34,01	67,00	0,67	9,20	50,66	152,56	1,98	0,54	83,35
6	Agua	52,38	0,52	5,00	0,05	0,18	10,48	6,70	2,91	0,86	1106,74
6	Nativa	5703,21	57,15	104,00	1,04	37,39	54,84	371,16	1,66	0,50	87,74
6	Solo	424,89	4,26	59,00	0,59	0,81	7,20	11,69	1,81	0,67	250,19
6	Mudança	405,00	4,06	55,00	0,55	0,72	7,36	10,96	1,88	0,61	334,95
7	Agropecuaria	2623,59	26,29	135,00	1,35	9,24	19,43	93,43	1,50	0,42	115,09
7	Agua	16,02	0,16	1,00	0,01	0,16	16,02	0,00	1,41	0,59	N/A
7	Nativa	5522,94	55,34	292,00	2,93	40,41	18,91	236,94	1,30	0,31	81,22
7	Solo	36,00	0,36	20,00	0,20	0,11	1,80	2,92	1,48	0,60	109,72
7	Mudança	1781,46	17,85	64,00	0,64	9,81	27,84	123,89	2,21	0,62	273,16
8	Agropecuaria	4476,87	44,86	102,00	1,02	38,27	43,89	376,83	1,38	0,41	79,34
8	Nativa	4231,53	42,40	193,00	1,93	32,95	21,93	236,42	1,36	0,36	86,37
8	Mudança	1271,61	12,74	92,00	0,92	4,84	13,82	50,50	2,07	0,63	213,76
9	Agropecuaria	3200,67	32,07	113,00	1,13	20,95	28,32	201,98	1,39	0,33	75,18
9	Nativa	5355,54	53,66	54,00	0,54	44,05	99,18	599,19	1,25	0,34	139,45
9	Solo	23,31	0,23	7,00	0,07	0,07	3,33	2,75	1,41	0,57	743,58
9	Mudança	1400,49	14,03	55,00	0,55	4,09	25,46	59,56	2,30	0,68	204,24
10	Agropecuaria	1041,57	10,44	62,00	0,62	4,46	16,80	61,60	1,44	0,41	84,88

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
10	Nativa	8300,70	83,17	65,00	0,65	82,88	127,70	1017,98	1,25	0,31	65,45
10	Solo	315,90	3,17	21,00	0,21	0,84	15,04	18,71	3,04	0,84	436,00
10	Mudança	321,84	3,22	22,00	0,22	1,06	14,63	24,48	2,27	0,61	508,78
11	Agropecuaria	5230,44	52,41	182,00	1,82	42,82	28,74	318,05	1,38	0,37	88,80
11	Agua	82,26	0,82	16,00	0,16	0,33	5,14	10,28	2,27	0,63	67,76
11	Nativa	1913,58	19,17	186,00	1,86	4,55	10,29	41,89	1,50	0,44	95,73
11	Solo	168,84	1,69	17,00	0,17	0,55	9,93	13,90	2,43	0,67	374,46
11	Mudança	2584,89	25,90	176,00	1,76	6,57	14,69	58,50	1,98	0,62	130,67
12	Agropecuaria	1987,47	19,91	182,00	1,82	12,46	10,92	98,63	1,34	0,38	80,23
12	Nativa	6155,64	61,68	13,00	0,13	36,31	473,51	962,02	1,68	0,48	203,17
12	Solo	130,32	1,31	25,00	0,25	0,64	5,21	13,69	1,91	0,44	139,81
12	Mudança	1706,58	17,10	8,00	0,08	13,68	213,32	436,33	3,06	0,64	90,24
13	Agropecuaria	306,18	3,07	75,00	0,75	0,72	4,08	10,56	1,44	0,48	140,08
13	Agua	2,16	0,02	1,00	0,01	0,02	2,16	0,00	1,40	0,71	N/A
13	Nativa	9150,30	91,69	3,00	0,03	91,61	3050,10	4308,40	1,78	0,43	70,00
13	Solo	6,66	0,07	6,00	0,06	0,03	1,11	0,80	1,08	0,44	1662,44
13	Mudança	514,71	5,16	2,00	0,02	5,13	257,36	254,30	1,56	0,69	1154,12
14	Agropecuaria	2675,88	26,81	75,00	0,75	19,99	35,68	229,20	1,42	0,40	133,41
14	Nativa	6209,10	62,22	56,00	0,56	60,36	110,88	797,33	1,41	0,38	81,08
14	Solo	130,59	1,31	10,00	0,10	0,49	13,06	13,53	2,78	0,72	557,38
14	Mudança	964,44	9,66	32,00	0,32	3,33	30,14	67,10	2,05	0,63	428,99

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
15	Agropecuaria	1256,40	12,59	27,00	0,27	7,40	46,53	159,94	1,47	0,35	113,65
15	Nativa	8028,09	80,44	11,00	0,11	67,87	729,83	1918,26	1,75	0,59	144,35
15	Solo	322,56	3,23	13,00	0,13	1,07	24,81	32,32	3,98	0,79	440,29
15	Mudança	372,96	3,74	9,00	0,09	1,96	41,44	58,19	2,15	0,62	780,93
16	Agropecuaria	83,97	0,84	80,00	0,80	0,23	1,05	3,72	1,22	0,39	126,89
16	Nativa	8124,30	81,41	2,00	0,02	81,22	4062,15	4044,06	1,88	0,57	201,25
16	Solo	59,76	0,60	5,00	0,05	0,20	11,95	7,73	3,39	0,91	488,87
16	Mudança	1711,98	17,15	1,00	0,01	17,15	1711,98	0,00	2,32	0,63	N/A
17	Agropecuaria	466,29	4,67	18,00	0,18	2,98	25,91	71,11	1,24	0,33	89,50
17	Nativa	8984,61	90,03	6,00	0,06	89,98	1497,44	3346,35	1,55	0,51	77,36
17	Solo	224,01	2,24	27,00	0,27	0,34	8,30	8,08	2,10	0,72	224,82
17	Mudança	305,10	3,06	9,00	0,09	2,32	33,90	70,82	2,06	0,66	1242,22
18	Agropecuaria	2935,17	29,41	128,00	1,28	13,03	22,93	142,62	1,37	0,38	109,18
18	Agua	11,61	0,12	2,00	0,02	0,06	5,81	0,23	1,51	0,54	1794,24
18	Nativa	4178,88	41,87	500,00	5,01	19,24	8,36	92,30	1,24	0,30	79,51
18	Solo	35,01	0,35	11,00	0,11	0,19	3,18	5,69	1,98	0,59	90,07
18	Mudança	2819,34	28,25	71,00	0,71	11,19	39,71	156,82	2,37	0,63	229,69
19	Agropecuaria	3055,77	30,70	78,00	0,78	14,67	39,18	184,86	1,60	0,50	93,88
19	Nativa	6193,89	62,23	83,00	0,83	60,29	74,63	654,53	1,36	0,32	75,44
19	Solo	28,98	0,29	7,00	0,07	0,06	4,14	1,76	2,29	0,86	1771,58
19	Mudança	674,73	6,78	67,00	0,67	0,82	10,07	14,49	2,16	0,64	307,50

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
20	Agropecuaria	3356,91	33,74	147,00	1,48	13,10	22,84	130,73	1,38	0,31	90,58
20	Agua	109,71	1,10	11,00	0,11	0,63	9,97	17,83	2,14	0,52	473,72
20	Nativa	5063,40	50,89	148,00	1,49	22,51	34,21	220,83	1,35	0,35	80,59
20	Solo	14,22	0,14	1,00	0,01	0,14	14,22	0,00	1,65	0,75	N/A
20	Mudança	1406,25	14,13	74,00	0,74	2,33	19,00	35,18	2,24	0,62	158,09
21	Nativa	6962,85	69,77	17,00	0,17	66,50	409,58	1558,06	2,26	0,46	78,94
21	Solo	2891,25	28,97	166,00	1,66	3,82	17,42	50,47	1,62	0,57	116,24
21	Mudança	125,91	1,26	27,00	0,27	0,27	4,66	5,22	1,72	0,60	613,68
22	Agua	4,23	0,04	1,00	0,01	0,04	4,23	0,00	1,29	0,47	N/A
22	Nativa	9546,84	95,66	5,00	0,05	69,38	1909,37	2702,72	1,90	0,36	60,00
22	Solo	401,67	4,02	25,00	0,25	1,09	16,07	23,63	2,89	0,82	416,07
22	Mudança	27,27	0,27	2,00	0,02	0,24	13,64	10,22	2,31	0,62	189,74
23	Agropecuaria	1699,74	17,03	57,00	0,57	4,07	29,82	77,43	2,05	0,61	131,08
23	Agua	4,77	0,05	3,00	0,03	0,03	1,59	0,79	1,29	0,64	4143,49
23	Nativa	7512,84	75,28	23,00	0,23	68,43	326,65	1390,41	1,97	0,40	74,67
23	Solo	655,47	6,57	41,00	0,41	2,11	15,99	37,56	2,11	0,66	379,27
23	Mudança	107,19	1,07	20,00	0,20	0,18	5,36	4,13	1,87	0,64	482,42
24	Agropecuaria	14,49	0,15	1,00	0,01	0,15	14,49	0,00	1,73	0,72	N/A
24	Nativa	9555,39	95,75	3,00	0,03	95,74	3185,13	4503,94	2,09	0,30	68,28
24	Solo	386,46	3,87	57,00	0,57	0,65	6,78	11,28	1,95	0,74	311,08
24	Mudança	23,67	0,24	6,00	0,06	0,07	3,95	2,14	1,77	0,58	1242,45

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
25	Agua	3,96	0,04	2,00	0,02	0,03	1,98	1,17	1,29	0,61	174,93
25	Nativa	9646,65	96,66	10,00	0,10	96,31	964,67	2882,51	1,38	0,49	70,10
25	Solo	317,70	3,18	25,00	0,25	0,55	12,71	15,67	2,16	0,76	410,75
25	Mudança	11,70	0,12	4,00	0,04	0,03	2,93	0,41	2,05	0,64	838,70
26	Agropecuaria	688,41	6,90	29,00	0,29	4,33	23,74	78,65	1,75	0,59	359,94
26	Agua	14,85	0,15	4,00	0,04	0,07	3,71	2,63	1,15	0,46	2189,04
26	Nativa	6483,69	64,97	32,00	0,32	61,91	202,62	1073,46	1,76	0,50	93,48
26	Solo	2677,32	26,83	88,00	0,88	7,46	30,42	91,39	1,88	0,57	114,50
26	Mudança	115,74	1,16	21,00	0,21	0,15	5,51	3,58	1,84	0,63	400,55
27	Nativa	9266,13	92,85	15,00	0,15	92,52	617,74	2302,75	1,38	0,41	64,73
27	Solo	660,51	6,62	49,00	0,49	2,85	13,48	39,94	2,09	0,73	237,16
27	Mudança	53,37	0,53	9,00	0,09	0,13	5,93	3,61	2,30	0,62	1152,35
28	Agropecuaria	804,24	8,06	1,00	0,01	8,06	804,24	0,00	2,42	0,44	N/A
28	Nativa	9121,95	91,40	1,00	0,01	91,40	9121,95	0,00	2,04	0,42	N/A
28	Solo	46,80	0,47	4,00	0,04	0,21	11,70	5,69	3,18	0,79	3694,99
28	Mudança	7,02	0,07	2,00	0,02	0,04	3,51	0,36	1,30	0,51	11141,15
29	Agropecuaria	5,58	0,06	1,00	0,01	0,06	5,58	0,00	2,88	0,86	N/A
29	Agua	16,92	0,17	1,00	0,01	0,17	16,92	0,00	4,18	0,96	N/A
29	Nativa	9853,20	98,73	2,00	0,02	98,64	4926,60	4917,78	1,82	0,52	84,85
29	Solo	104,31	1,05	49,00	0,49	0,11	2,13	2,48	1,35	0,60	504,08
30	Nativa	9936,00	99,56	1,00	0,01	99,56	9936,00	0,00	1,42	0,37	N/A

ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
30	Solo	44,01	0,44	6,00	0,06	0,15	7,34	4,54	2,48	0,85	368,33
31	Nativa	9649,44	96,69	2,00	0,02	96,68	4824,72	4823,91	2,61	0,52	67,08
31	Solo	330,57	3,31	27,00	0,27	0,86	12,24	17,15	2,67	0,85	353,02
32	Agropecuaria	117,45	1,18	2,00	0,02	0,65	58,73	6,44	2,45	0,74	8900,90
32	Nativa	9530,10	95,49	30,00	0,30	95,38	317,67	1708,60	1,18	0,28	69,29
32	Solo	102,51	1,03	10,00	0,10	0,48	10,25	13,13	2,11	0,65	767,34
32	Mudança	229,95	2,30	29,00	0,29	0,52	7,93	10,44	2,32	0,64	438,75
33	Agropecuaria	0,72	0,01	1,00	0,01	0,01	0,72	0,00	1,17	0,65	N/A
33	Nativa	9784,17	98,04	1,00	0,01	98,04	9784,17	0,00	2,60	0,38	N/A
33	Solo	195,12	1,96	6,00	0,06	0,75	32,52	27,71	4,46	0,92	328,22
34	Agropecuaria	279,54	2,81	25,00	0,25	0,47	11,18	11,86	2,11	0,70	115,44
34	Nativa	9571,95	96,20	14,00	0,14	96,15	683,71	2463,86	1,23	0,25	75,23
34	Solo	54,63	0,55	14,00	0,14	0,24	3,90	5,91	1,39	0,53	903,07
34	Mudança	43,92	0,44	10,00	0,10	0,09	4,39	1,95	1,84	0,66	1192,14
35	Agropecuaria	35,19	0,35	6,00	0,06	0,12	5,87	4,54	1,50	0,63	305,74
35	Agua	4,50	0,05	1,00	0,01	0,05	4,50	0,00	1,33	0,75	N/A
35	Nativa	9729,09	97,78	7,00	0,07	97,77	1389,87	3404,07	1,30	0,14	61,01
35	Solo	127,89	1,29	11,00	0,11	0,36	11,63	12,33	2,49	0,64	913,20
35	Mudança	53,37	0,54	11,00	0,11	0,10	4,85	2,40	2,43	0,64	180,24
36	Nativa	9750,24	97,99	3,00	0,03	87,96	3250,08	3895,68	1,89	0,60	60,00
36	Solo	197,55	1,99	7,00	0,07	1,24	28,22	41,64	3,79	0,69	516,31



ANALISE COM MUDANÇA											
BLOCO	CLASSE	CA	PLAND	NP	PD	LPI	AREA_MN	AREA_SD	SHAPE_MN	CIRCLE_MN	ENN_MN
36	Mudança	2,25	0,02	1,00	0,01	0,02	2,25	0,00	1,60	0,70	N/A
37	Agropecuaria	259,38	2,60	8,00	0,08	0,77	32,42	29,62	2,38	0,70	164,85
37	Agua	23,67	0,24	1,00	0,01	0,24	23,67	0,00	1,33	0,53	N/A
37	Nativa	9442,80	94,62	9,00	0,09	89,97	1049,20	2805,58	1,46	0,52	60,00
37	Solo	229,14	2,30	9,00	0,09	0,86	25,46	25,68	3,26	0,82	1103,68
37	Mudança	25,02	0,25	4,00	0,04	0,09	6,26	1,79	1,90	0,62	2067,37
38	Nativa	9905,94	99,26	1,00	0,01	99,26	9905,94	0,00	1,44	0,37	N/A
38	Solo	74,07	0,74	6,00	0,06	0,30	12,35	8,83	2,34	0,80	1982,28
39	Nativa	9950,04	100,00	1,00	0,01	100,00	9950,04	0,00	1,00	0,36	N/A
40	Nativa	9865,80	98,86	4,00	0,04	98,85	2466,45	4271,76	1,30	0,39	60,00
40	Solo	96,48	0,97	13,00	0,13	0,53	7,42	13,37	1,83	0,76	557,29
40	Mudança	17,73	0,18	5,00	0,05	0,06	3,55	1,39	1,78	0,65	1394,97