

## Modelagem dinâmica espacial de ocupação em área litorânea.<sup>1</sup>

Daniel Cohenca\*

\* Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Departamento de Geociências - Centro de Filosofia e Ciências Humanas - CFH  
Campus universitário, SN, Trindade - CEP 88010-970 - Florianópolis - SC - Brasil  
dcohenca1@gmail.com

**Resumo:** A região costeira do estado de Santa Catarina, Brasil, vem experimentando rápidas mudanças de uso do solo com um acentuado processo de urbanização decorrente da comercialização de lotes litorâneos, construção de casas de veraneio e subdivisão de lotes rurais. Neste trabalho utilizou-se do método de modelagem dinâmica espacial para construção de cenários de tendências destas mudanças do uso do solo. O método é uma ferramenta de análise espacial, com importante aplicação na área de planejamento urbano. Assumiu-se que as variáveis explicativas responsáveis pelo padrão das mudanças no ocupação seriam: distância ao mar, distância às estradas principais, grau de implantação dos loteamentos, densidade populacional, densidade de domicílios, distância aos centros das cidades, distância ao núcleo das comunidades rurais e distância às manchas urbanas consolidadas. As variáveis resposta foram as classes de uso do solo: urbana, uso rural e natural, identificadas a partir de classificação supervisionada em imagens Landsat/TM e OLI dos anos de 2004 e 2014. Utilizou-se a regressão linear espacialmente ponderada para alimentar o módulo LuccME do modelo espacialmente explícito TerraME desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE - com calibração de cenários entre 2004 e 2014 e posteriormente a projeção de mudança do uso do solo, construindo cenários para até 50 anos.

**Palavras-chave:** Modelagem espacial, mudança de uso e cobertura da terra, processo de urbanização, ocupação litorânea

**Abstract.** The coastal region of the state of Santa Catarina, Brazil, is experiencing rapid land use changes with a strong process of urbanization due to sale of coastal lots, building of recreational second homes and subdivision of rural lots. In this work, we used the spatial dynamics modelling method for scenario building trends of these changes in land use. The method is a spatial analysis tool with important applications in urban planning area. It assumed that the explanatory variables of occupation are: distance to the sea, distance to major roads, degree of implementation of littoral housing developments, demographic density, density of houses, distance to city centres, distance to the core of rural communities and distance to consolidated urban spots. The response variables were the land use classes: urban, rural and natural, identified from the supervised classification on Landsat satellite images/ TM and OLI from the years 2004 and 2014. We used the spatially weighted linear regression to set LuccME module of the spatially explicit model TerraME developed at the National Institute for Space Research - INPE. It were constructed calibration scenarios between 2004 and 2014 and subsequently the land use cover change projection of scenarios for up to 50 years.

**Keywords:** Land use cover change, LUCC, spatial modelling, urbanization process, coastal occupation

### 1. Introdução

O litoral foi a primeira porção do Brasil ocupada pelos colonizadores, onde instalaram-se as primeiras vilas e cidades brasileiras. A intensidade, modelo e dinâmica espacial de ocupação dos diferentes trechos do litoral brasileiro dependeram de conjunturas naturais, geográficas, econômicas e de políticas públicas, que variaram no espaço e ao longo do tempo.

O litoral brasileiro sofre, na atualidade, um processo de acelerada ocupação com rápido adensamento populacional em localidades até então isoladas em termos de acesso

---

<sup>1</sup> Artigo elaborado com dados preliminares, objetivando exclusivamente o trabalho final da disciplina Análise Espacial (SER301/INPE). Os dados são partes da dissertação de mestrado do autor e deverão sofrer refinamentos.

e conectividade e ambientalmente preservadas (MMA, 2002; Asmus, 2004). Conseqüentemente, em termos de degradação ambiental, esse quadro é preocupante sendo inúmeros os ambientes litorâneos comprometidos pela poluição e exploração desordenada de seus recursos naturais. Os principais desafios, neste sentido, estão relacionados ao planejamento do uso do espaço costeiro e marinho, especialmente regulando e monitorando as atividades econômicas industriais, portuárias, de veraneio e turismo, de exploração de recursos naturais e de desenvolvimento urbano (Asmus, 2004).

Neste contexto, os municípios do litoral sul de Santa Catarina, originalmente recobertos por restingas formadas sobre campos eólicos de dunas móveis e fixas, banhados e lagoas costeiras são em grande parte considerados Área de Preservação Permanente pela legislação florestal que protege as restingas fixadoras de dunas e a vegetação as margens dos cursos d'água (Brasil, 2012). No entanto, o avanço da ocupação humana nestes municípios ao longo das últimas décadas tem gerado mudanças cada vez mais aceleradas sobre os ambientes naturais. Diversos fatores econômicos e sociais, resultantes tanto de ações governamentais quanto da iniciativa privada, tais como: plantio de pinus e eucalipto, turismo, expansão do mercado imobiliário, incentivos agrícolas direcionados e outros, vêm, historicamente, influenciando nestas taxas de ocupação.

A conformação do espaço geográfico é o resultado da organização da sociedade num processo híbrido, formado por ideias e ações, que ocorre num certo tempo (Santos, 2006). Portanto, espaço e tempo são elementos fundamentais para compreender a mudança dos fenômenos. Há várias aplicações e demandas de estudos que requisitam esses dois conceitos que, na realidade, estão integrados. No planejamento, espaço e tempo, visíveis a partir de suas escalas, são responsáveis pela compreensão da dinâmica socioespacial e ambiental (Beser de Deus, 2013).

Uma das formas de se trabalhar a interação desses fatores é através da modelagem dinâmica espacial. Através da análise das causas e conseqüências que implicam em mudanças no uso do solo é possível entender a dinâmica e prever cenários potenciais (Verburg et al., 2004). Devido à ampla disponibilização de dados de sensoriamento remoto e desenvolvimento e popularização de plataformas de geoprocessamento, esta área ganhou impulso nas últimas décadas e os modelos dinâmicos tornaram-se mais sofisticados com a implementação de abordagens utilizando autômatos celulares, lógica fuzzy e inteligência artificial, como redes neurais, sistemas multi-agentes e algoritmos genéticos (de Lima et al, 2013).

Os modelos espaciais vêm ganhando importância na geração de subsídios às políticas públicas de desenvolvimento urbano e rural tais como estratégias de conservação, prevenção de impactos ambientais, identificação de padrões espaciais de ocupação, medição de impactos, regulação de uso e zoneamento entre outras aplicações (Cho & Newman, 2005).

A partir da integração ponderada dos fatores que interferem na mudança do uso e cobertura do solo, constroem-se mapas de tendências de cenários com a probabilidade de cada região sofrer uma transição de uso no decorrer do tempo.

Neste contexto, através de uma abordagem integrada que combina sistema de informações geográficas e análise espacial em modelos espacialmente explícitos, este trabalho examina o padrão de ocupação espacial em uma área litorânea em rápido processo de mudança; analisa espacialmente quais fatores impulsionam os processos de mudança identificados com respeito à quantidade e tipo de mudança no uso e cobertura do solo e constrói mapas de projeção de cenários de transição em uma escala de 50 anos.

## 2. Área de Estudo

Como área de estudo foram selecionados dois municípios da zona costeira do sul do estado de Santa Catarina: Passo de Torres e Balneário Gaivota, uma área total de 25.030ha (Figura 1).

Além das áreas nativas com restingas, banhados, lagoas, praias e dunas, a área é caracterizada por uma grande complexidade no uso da terra, possuindo variada agricultura familiar, monocultura de espécies madeireiras, fazendas de arroz e fazendas de gado, pastagens em áreas nativas e áreas urbanas em vários estágios do processo de urbanização.

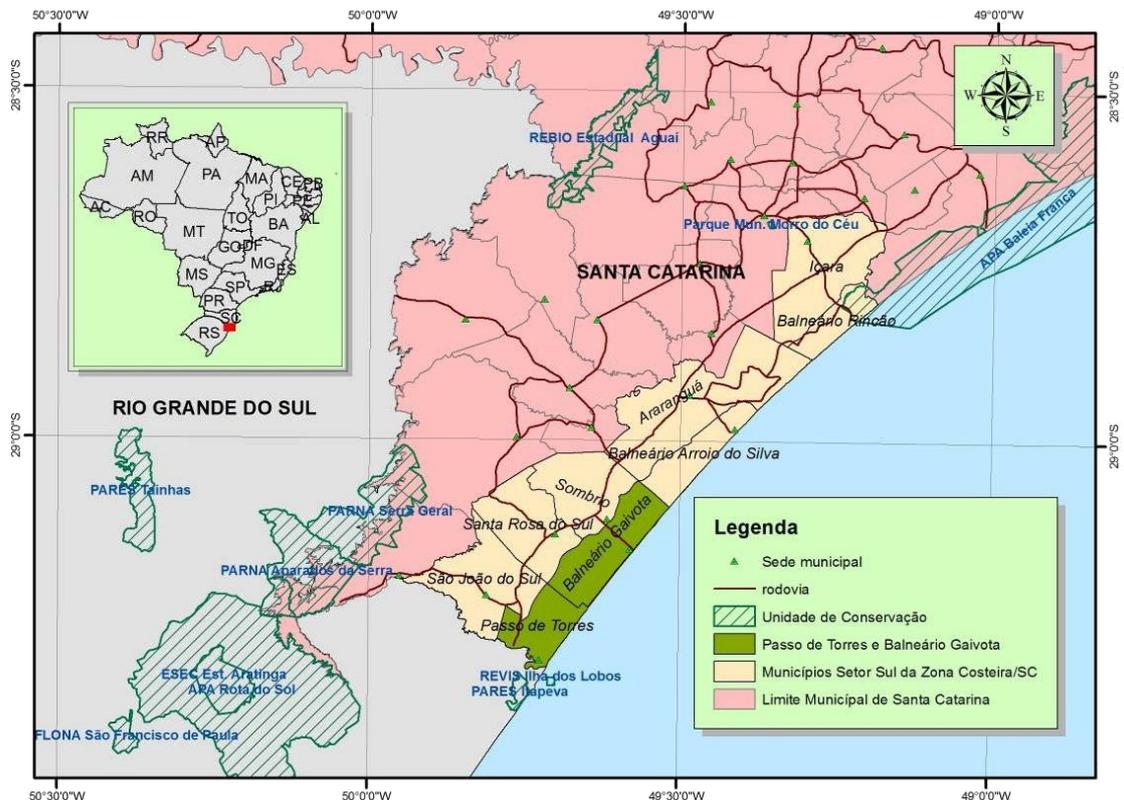


Figura 1. Municípios de Balneário Gaivota e Passo de Torres, estado de Santa Catarina, Brasil.

A principal atividade econômica de ambos municípios é o turismo, que, nas últimas duas décadas, impulsionou o crescimento urbano, principalmente pelo aumento de casas de veraneio.

Toda a extensão da faixa litorânea dos dois municípios (de 1 a 2 quilômetros da linha de costa) foram definidas pelo poder público como zonas urbanas (cerca de 17,4% do total da área de estudo). Ao longo dos 33 quilômetros lineares de costa, principalmente entre as décadas de 70 e 80, foram registrados em cartório 59.529 lotes de 280 a 360 m<sup>2</sup>.

Segundo levantamento efetuado junto as prefeituras municipais em 2014 existem 2.585ha loteados nesta faixa litorânea, todos sem licenciamento ambiental já que até 1981 este processo não era condicional. Em loteamentos mais recentes registrados na década de 1980, irregularmente também não foram exigidos o processo de licenciamento ambiental. Observa-se em todos a inexistência da previsão de praças e áreas verdes e a inobservância das lagoas e das dunas como áreas de preservação permanentes não loteáveis.

Apesar dos loteamentos registrados, grande parte deles não foi implantado e os lotes não estão ocupados nem demarcados. Muitos loteamentos não possuem sequer arruamento, Muitos estão situados sobre banhados, dunas e lagoas (Figura 2).



Figura 2. Mapa do loteamento Village Dunas 2 registrado em cartório em 24/07/1980 com 2.000 lotes de 288m<sup>2</sup> cada, que até 2014 não havia sido implantado, sobre imagem Rapid Eye de 10/12/2012 (Fonte: Pref. Mun. Balneário Gaivota/SC).

Dados do censo mostram um aumento de 50% no número de habitantes entre 2000 e 2010 e aumento de 73% do número de domicílios particulares no mesmo período (Tabela 1) (IBGE, 2000; IBGE, 2010).

Tabela 1. Dados demográficos dos municípios de Balneário Gaivota e Passo de Torres.

	<b>Passo de Torres</b>	<b>Balneário Gaivota</b>	<b>TOTAL</b>
População em 2000	4.400 hab.	5.450 hab.	9.850 hab.
População em 2010	6.627 hab.	8.234 hab.	14.861 hab.
Domicílios em 2000	1278 domicílios	1634 domicílios	2.912 domicílios
Domicílios em 2010	2.145 domicílios	2.893 domicílios	5.038 domicílios

(Fonte: IBGE, 2000 e IBGE, 2010).

Nos trabalhos de campo foi possível observar que na área rural existem três tipos básicos de estrutura das propriedades, uma de grandes fazendas de pinus e gado onde quatro propriedades englobam 35,9% da área de estudo, outra de áreas de rizicultura que englobam 7,7% da área total e pequenas propriedades rurais de produção agropecuária diversificada e que englobam 29,8% da área (Figura 3).

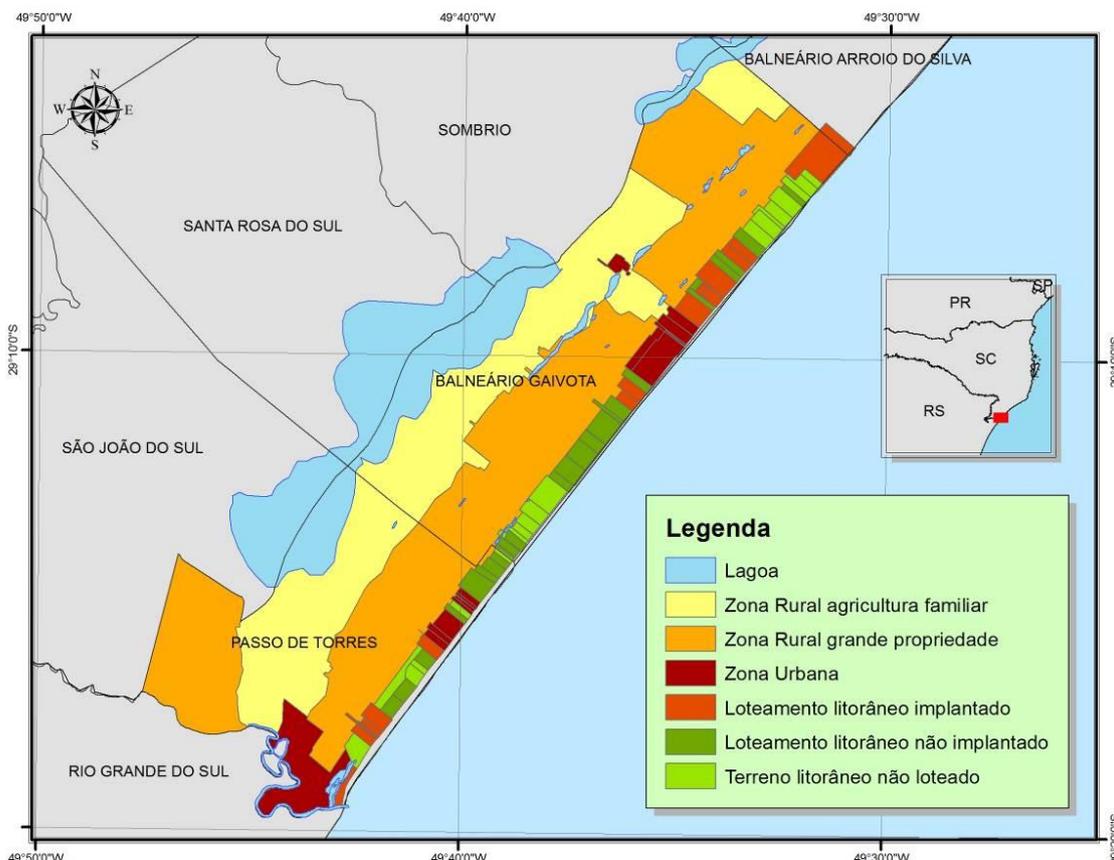


Figura 3. Mapa dos tipos de estrutura fundiária na área de estudo.

As duas primeiras têm estrutura fundiária muito estável possuindo mesmos proprietários e limites há décadas. Na área das pequenas propriedades rurais observa-se adensamento de casas nas propriedades e muita subdivisão dos lotes, ocasionadas por partilhas de herança e por vendas de parcelas das propriedades, muitas delas menores que o módulo rural da região.

### 3. Metodologia

A escolha do método de modelagem espacialmente explícita por autômato celular em dados contínuos de uso da terra utiliza-se da regressão linear multivariada para inferência das transições no uso do solo. Exige que os dados discretos de uso do solo sejam traduzidos em percentual de cada classe de uso por célula e para isso a escolha do tamanho das células de 25 hectares foi considerado compatível com a escala dos dados cartográficos, mas sem uma exagerada resolução que acarretaria nas porcentagens das classes tenderem aos extremos em cada célula. A escala deve permitir a observação diferenciada do potencial de mudança em cada espaço celular.

A escala temporal escolhida para a modelagem foi decenal, entre os anos 2004 e 2014 na fase de calibração e entre 2014 e 2064 na construção de cenários. Escala que conceitualmente refletiria o tempo da manifestação dos processos motivadores de quantidade de mudança do uso do solo. Os macro fatores levantados que primordialmente determinam a demanda das áreas urbanas foram: licenciamento de loteamentos litorâneos, volume de venda de lotes, melhoria econômica da população das cidades maiores do entorno, respeito ou desrespeito com a legislação ambiental pelas prefeituras

municipais. Na área rural considerou-se os fatores de fiscalização ambiental, crescimento populacional e incentivos agrícolas direcionados.

A construção do modelo ocorreu conforme as seguintes etapas:

Para escolha das variáveis explicativas do modelo foi imprescindível compreender o histórico de ocupação trabalho de campo e revisão bibliográfica. As variáveis explicativas foram assim definidas a partir de duas incursões a campo entre junho e setembro de 2014 quando, com base em entrevistas qualitativas semiestruturadas com informantes chave foram identificados os principais vetores responsáveis pela mudança no uso da terra (Tabela 2).

Tabela 2. Variáveis explicativas.

Sigla	Variável	Unidade
dist_mar	Distância ao mar. Medida a partir da linha da costa	metros
dist_estr	Distância às estradas principais. Variável diferente para os anos 2004 e 2014	metros
gr_impl	Grau de implantação dos loteamentos. Cada loteamento litorâneo recebeu um valor, variando de acordo com a presença de licença do loteamento, implantação de arruamento, serviços de luz e coleta de resíduos e volume de ocupação de lotes,	Valor atribuído de 0 a 4
hab_km2	Densidade populacional. Dados dos setores censitários do ano de 2000 e de 2010. Atribuídos aos anos de 2004 e 2014, respectivamente.	hab/km <sup>2</sup>
dom_km2	Densidade de domicílios. Dados dos setores censitários do ano de 2000 e de 2010, atribuídos aos anos de 2004 e 2014, respectivamente.	dom/km <sup>2</sup>
dist_sede	Distância aos centros das cidades de Torres, Passo de Torres, Bella Torres, Balneário Gaivota e Sombrio	metros
dist_cdd	Distância ao núcleo de 15 comunidades rurais.	metros
dist_urb	Distância às manchas urbanas consolidadas. Variável diferente para os anos 2004 e 2014	metros

As variáveis respostas foram definidas como as classes de uso do solo, transformadas em variáveis contínuas por cálculo da proporção de cada classe em cada célula amostral. Os dados de uso do solo foram obtidos pela classificação de imagens orientada a objeto e pós-classificação visual das imagens de órbita 220 ponto 080 dos sensores TM/LandSat 5 e OLI/LandSat 8 de 14/08/2004 e 30/01/2014 respectivamente. Inicialmente a tipologia de classificação incluiu 11 classes que foram posteriormente agrupadas em quatro classes: Urbana (apenas contendo a classe urbana); Uso Rural (agrupando agricultura familiar, rizicultura, pecuária e plantio de espécies madeiras exóticas); Natural (agrupando dunas, restinga herbácea, restinga de banhados e restinga arbórea) e Água (agrupando-se rios/lagoas e mar). Definiu-se a matriz de transições entre as classes a serem admitidas pela modelagem dinâmica assumindo-se que:

- Classe Água é estática ao longo do tempo, sem possível transição.
- Classe Natural pode transicionar para as classes Urbana ou Uso Rural.
- Classe Uso Rural (R) pode transicionar apenas para Urbana.
- Classe Urbana nunca perde sua condição de Urbana, somente amplia-se sobre as classes Natural e de Uso Rural.

A construção das feições geográficas de cada uma das variáveis explicativas foi feita com base em imagens SPOT para o ano de 2005 com resolução espacial de 2,5m, cedidas pelo CODESC e imagens RapidEye de 10/12/2012 com resolução espacial de 5,0m, cedidas pelo MMA.

Para construção da base de dados, as variáveis foram integradas em um plano celular de 500m X 500m no programa *TerraView*. Às variáveis de distância foi aplicado também o logaritmo base 10, para comparação de ajuste do modelo das regressões (Cho e Newman, 2005).

### Análise dos dados

Os dados foram analisados utilizando os programas RStudio™ e GeoDa™:

a) Análise da matriz de correlação para identificar eventual multicolinearidade entre variáveis independentes. Nos casos de correlação maior que 0.80 as variáveis foram separadas nas análises de regressão pois variáveis altamente correlacionadas provêm informações com insuficiente separabilidade, aumentando o erro padrão dos coeficientes  $\beta$  e conseqüentemente diminuindo a significância estatística destes coeficientes (Kutner et al., 2005; Anselin, 2005). Outra análise aplicada para verificação de multicolinearidade foi a "*multicollinearity condition number*" (Anselin, 2005).

b) Análise exploratória dos dados (Anselin, 2005).

c) Construção do modelo de regressão linear multivariada onde para cada classe de uso do solo foram utilizadas diferentes variáveis explicativas e selecionadas aquelas a serem utilizadas na modelagem espacial (Aguiar et al., 2007).

d) Análise de resíduos para checar a adequabilidade dos dados às premissas do modelo de regressão linear incluindo:

e) A análise dos resíduos da regressão linear multivariada objetiva averiguar se as premissas do modelo de regressão linear estão contempladas (Kutner et al., 2005 Anselin, 2005). Em particular testou-se:

- normalidade da distribuição dos resíduos da regressão. Visualmente, com a elaboração de histogramas da distribuição destes resíduos e pelo teste de Jaques-Bera;
- constância da variância dos resíduos, medida através do teste de Breusch-Pagan para heteroscedasticidade;
- dependência espacial, medida através do índice de Moran global que avalia o nível de autocorrelação espacial o que contraria a premissa de independência entre as amostras (Fotheringham et al., 2002). A fórmula para cálculo do índice de Moran foi

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left( \sum_i \sum_j W_{ij} \right) \sum_i (X_i - \bar{X})^2}$$

onde: N é o número de células,  $X_i$  é o percentual da classe de uso do solo na célula  $i$ ,  $\bar{X}$  é a média do percentual da classe de uso do solo, e  $W_{ij}$  é a distância inversa entre células vizinhas. O valor de I situa-se entre -1 e 1, quanto mais próximo dos extremos, maior a autocorrelação espacial (Druck et al., 2004).

A partir da constatação da dependência espacial, ou seja, que as observações não são independentes, utilizou-se dos testes multiplicadores de Lagrange para medir se os modelos de regressão espaciais Spatial Lag ou Spatial Error proporcionariam melhor ajuste do que o método dos mínimos quadrados utilizado na regressão linear. O modelos de regressão espaciais assumem que existe a dependência espacial e incluem o termo  $\rho WY$  na fórmula da regressão linear comum:

Fórmula da regressão linear:  $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i$ ,

Fórmula da regressão espacial:  $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i + \rho WY$ ,

onde:  $Y_i$  é a variável resposta na  $i$ -ésima observação,  $\beta_0$  é o intercepto,  $\beta_1$  é o coeficiente angular,  $X_i$  é a variável preditora e  $\epsilon_i$  o erro aleatório de cada observação.  $\rho$  é

o coeficiente espacial autoregressivo - medida de correlação espacial e  $W$  é a matriz de proximidade espacial.

f) Constatado que as regressões espaciais trariam melhor ajuste à regressão multivariada foi aplicado o modelo de regressão Spatial Lag com uma matriz de proximidade espacial tipo "Queen" considerando 8 vizinhos de cada célula. Seguiram-se comparações entre os resultados obtidos no método dos mínimos quadrados e Spatial Lag utilizando-se dos indicadores log likelihood, Akaike info criterion e Schwarz criterion, e finalmente refeita a análise da heteroscedasticidade e normalidade dos resíduos (Anselin, 2005).

#### Aplicação do Modelo LuccME

O LuccME é uma ferramenta de código aberto para a construção de modelos de mudança de uso e cobertura da terra desenvolvido pelo INPE como uma extensão do ambiente de modelagem *TerraME*, desenvolvido sobre a plataforma *TerraLib* (TerraME, 2014).

Para utilização do modelo espacialmente explícito no LuccME deve-se definir os parâmetros de demanda, potencial e alocação. Para definição da demanda (quantidade de mudança que ocorre em determinado tempo) foi calculada a diferença constatada na classificação das imagens de calibração e estimado o valor para a construção dos cenários futuros. Para o potencial (probabilidade de ocorrerem as mudanças a partir das variáveis preditoras) utilizou-se dos coeficientes da regressão multivariada espacialmente ponderadas (Spatial Lag) e o módulo *SpatialLagRegression* do LuccME. Para a alocação (definição da localização espacial da ocorrência das mudanças) utilizou-se do módulo *AllocationClueLike* do LuccME, próprio para dados contínuos da variável resposta.

A calibração do modelo do LuccME é feita para que as mudanças conhecidas em um tempo sejam reproduzidas com o maior acerto possível pelo modelo. Para captar as mudanças no uso do solo entre 2004 e 2014 o modelo foi ajustando, a cada rodada, os parâmetros de alocação máximo de mudança que uma célula pode sofrer a cada ano (*MaxChange*), o limiar a partir do qual as mudanças passam a ser mais acentuadas (*changeLimiarValue*) e o máximo de mudanças possíveis por ano (*maxChangeAboveLimiar*). Os demais parâmetros *Elasticity*, *Static*, *minValue*, *maxValue* e *minChange* foram mantidos fixos.

A análise dos resultados dos ajustes do modelo foi feita por comparação visual, tendo como base o ano de 2014. Adicionalmente, foi empregada uma rotina automatizada de aferição de acertos a qual compara a proporção de mudanças estimadas e aferidas em janelas quadradas de quantidade progressiva de células.

#### Construção de Cenários

Na construção de cenários foram utilizados os dados de potencial e alocação definidos na calibração, sendo atualizadas as feições iniciais de 2014 para a classificação do uso do solo, para as áreas urbanizadas, e para as distâncias às estradas. O cálculo previsto para a demanda das mudanças futuras buscou seguir a tendência verificada na fase de calibração.

Assim foram estimadas as mudanças para cada classe de uso do solo, projetadas para um horizonte temporal de 50 anos com intervalos de 10 anos.

## **4. Resultados e discussão:**

#### Análise das variáveis

A matriz de correlação entre as variáveis independentes identificou que apenas as variáveis de densidade de habitantes e densidade de domicílios obtiveram correlação

maior que 0.80, considerados impeditivos para estarem presentes no mesmo modelo de regressão.

Testes com a aplicação do modelo de regressão multivariada extraiu as variáveis explicativas que obtiveram maiores valores de  $R^2$  ajustado com significância estatística maior que 95% para cada uma das classes de uso do solo (Tabela 3). A multicolinearidade entre as variáveis escolhidas, medidas através do "*multicollinearity condition number*", obtiveram valores menores que 30 para as classes Natural e Rural, e ligeiramente maior que 30 para a classe urbana (Tabela 3). Anselin, 2005 cita que, tipicamente, um indicador maior que 30 sugere problemas de multicolinearidade, mas que em regressões lineares de superfícies geográficas isso é muito comum, uma vez que as variáveis explicativas são simplesmente poderes e produtos cruzados entre si. Assim considerou-se que o problema da multicolinearidade não influenciaria impeditivamente nos resultados da regressão.

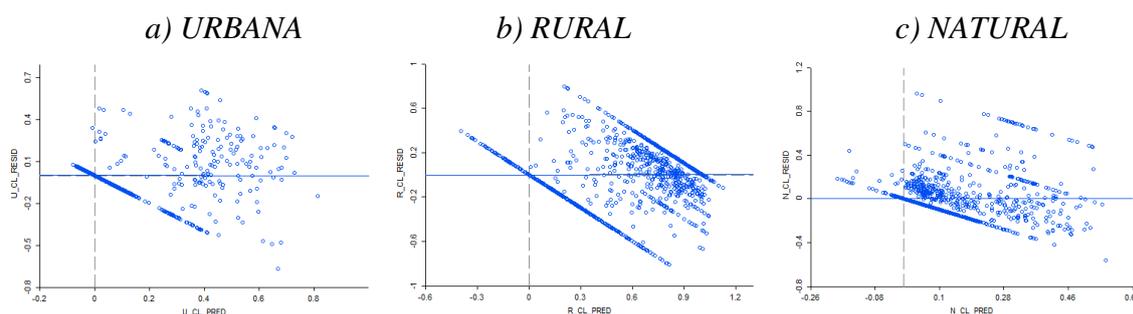
Tabela 3. Variáveis que melhor ajustaram o modelo de regressão multivariada para cada classe de uso do solo.

Classe de uso do solo		
URBANO	RURAL	NATURAL
gr_impl	gr_impl	gr_impl
dist_mar	log_d_mar	dist_mar
log_d_sede	dist_sede	dist_sede
log_d_urb04	dist_cdd	dist_cdd
dist_estr04	dist_estr04	dist_estr04
hab_km2	log_d_urb04	dist_urb04
		dom_km2
$R^2$ ajustado: 0.66	$R^2$ ajustado: 0.62	$R^2$ ajustado: 0.31
MCN: 52.07	MCN: 19.41	MCN: 13.34

MCN: multicollinearity condition number

### Análise dos resíduos

A análise gráfica indicou heteroscedasticidade dos resíduos (Figura 4), o que pode ser confirmado pelo teste estatístico de Breusch-Pagan, onde, com significância, os valores acima de 1.96 para todas as classes evidenciaram elevada heteroscedasticidade.



Teste de Breusch-Pagan		
U	R	N
1581.3	46.7	323.8

Figura 4. Dispersão dos resíduos da regressão multivariada utilizando o método dos mínimos quadrados, plotados sobre o valor estimado ( $\hat{Y}$ ) e teste de Breusch-Pagan. a) Classe Urbana; b) Classe Rural; c) Classe Natural

A análise gráfica de normalidade dos resíduos evidenciou que os resíduos não apresentaram distribuição normal em nenhuma das classes (Figura 5), o que foi confirmado também pelo teste de Jaques-Bera.

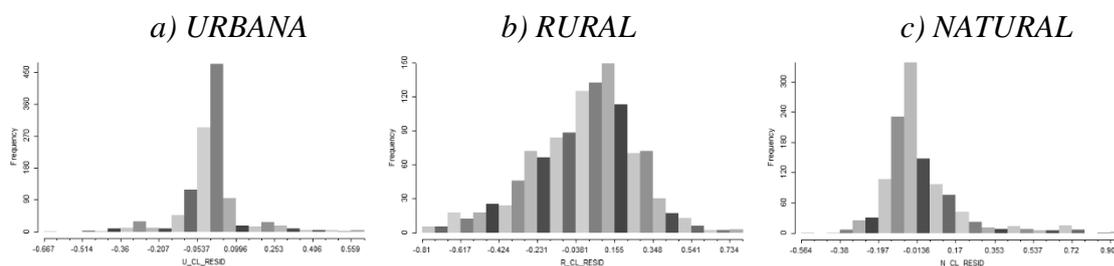


Figura 5. Histograma dos resíduos da regressão multivariada utilizando o método dos mínimos quadrados. a) Classe Urbana; b) Classe Rural; c) Classe Natural

O cálculo do índice de Moran global gerou os seguintes valores: Urbana  $I=0.3365$ ; Rural  $I=0.5672$  e Natural  $I=0.4395$ , permitindo inferir uma dependência espacial moderada para as classes urbana e natural e mais alta para a classe rural. A partir desta constatação, foram utilizados os testes multiplicadores de Lagrange para definir qual modelo de regressão espacial possuiria melhor ajuste em relação ao método dos mínimos quadrados utilizado na regressão linear (Tabela 4) (Anselin, 2005). Os resultados indicaram que ambos modelos de regressão espacial seriam adequados para melhorar o ajuste. O teste Multiplicador de Lagrange (LM) robusto mostrou que o modelo Spatial Error seria melhor para as classes Natural e Urbana enquanto o modelo Spatial Lag melhor para a classe Rural.

Tabela 4. Resultados do teste Multiplicador de Lagrange para cada uma das classes de uso do solo.

	TEST	VALUE	PROB
URBANA	Lagrange Multiplier (lag)	391.04	0
	Lagrange Multiplier (error)	499.06	0
	Robust LM (lag)	18.70	0.00002
	Robust LM (error)	126.72	0
RURAL	Lagrange Multiplier (lag)	1501.56	0
	Lagrange Multiplier (error)	1417.52	0
	Robust LM (lag)	147.96	0
	Robust LM (error)	63.91	0
NATURAL	Lagrange Multiplier (lag)	832.72	0
	Lagrange Multiplier (error)	851.10	0
	Robust LM (lag)	14.07	0.00018
	Robust LM (error)	32.44	0

Considerando que no LuccME está implementado módulo específico para uso da regressão Spatial Lag foi aplicada esta ferramenta a todas as classes e comparados os indicadores log likelihood, Akaike info criterion - AIC e Schwarz criterion entre os resultados obtidos no método dos mínimos quadrados e Spatial Lag (Tabela 5). Os

indicadores confirmaram que o método Spatial Lag possuiu melhor ajuste para todas as classes de uso do solo

Tabela 5. Comparativo dos indicadores das Regressões por Mínimos Quadrados e Spatial Lag. (Para o indicador log likelihood quanto maior o valor, mais explicativo é o modelo. Para os indicadores AIC e Schwarz criterion quanto menor o valor absoluto mais explicativo é o modelo.)

Classe	Regressão por Mínimos Quadrados	Regressão com Spatial LAG	
URBANA	Log likelihood :	814.13	
	Akaike info criterion :	-1614.27	
	Schwarz criterion :	-1578.65	
RURAL	Log likelihood :	-80.14	
	Akaike info criterion :	174.28	
	Schwarz criterion :	209.90	
NATURAL	Log likelihood :	338.73	
	Akaike info criterion :	-661.47	
	Schwarz criterion :	-620.77	
		Log likelihood :	981.73
		Akaike info criterion :	-1947.46
		Schwarz criterion :	-1906.76
		Log likelihood :	521.44
		Akaike info criterion :	-1026.88
		Schwarz criterion :	-986.18
		Log likelihood :	635.66
		Akaike info criterion :	-1253.32
		Schwarz criterion :	-1207.53

Reanalizada a heteroscedasticidade dos resíduos após aplicação da regressão Spatial Lag através do gráfico de dispersão e teste de Breusch-Pagan (Figura 6) e comparando-se com a dispersão da Figura 4 evidencia-se que a heteroscedasticidade diminuiu bastante, porém continua alta (sugerindo que novos testes com outras variáveis independentes, ou retirando algumas, deveriam ser realizados).

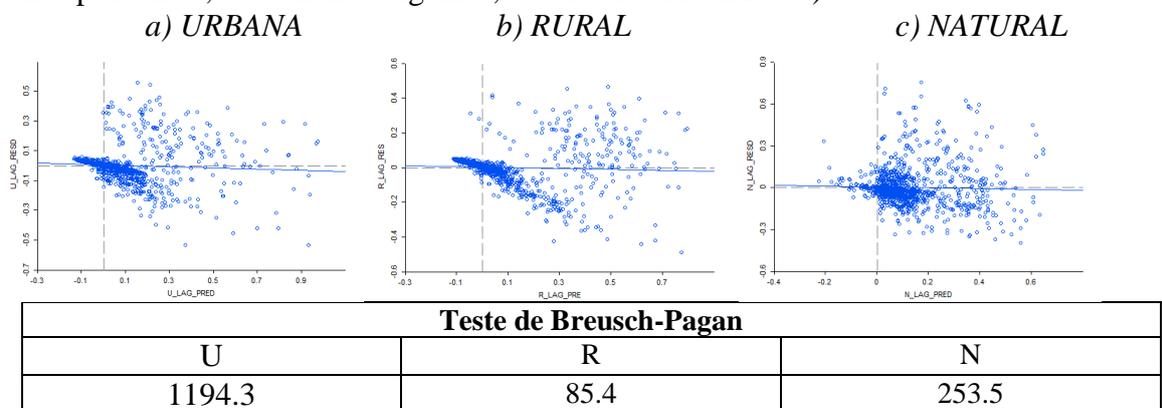


Figura 6. Dispersão dos resíduos da regressão multivariada utilizando o método Spatial Lag regression, plotados sobre o valor estimado ( $\hat{Y}_{lag}$ ) e teste de Breusch-Pagan. a) Classe Urbana; b) Classe Rural; c) Classe Natural.

Reanalizada também a normalidade dos resíduos através do histograma de distribuição (Figura 7) e comparado ao histograma gerado no método dos mínimos quadrados (Figura 5) observamos que o problema da normalidade reduziu significativamente, mas persiste. No entanto, este não é considerado um sério problema nas análises de regressão pois o método de regressão linear é considerado suficientemente robusto e absorve bem a ausência de perfeita normalidade quando a amostra é suficientemente grande (Anselin, 2005).

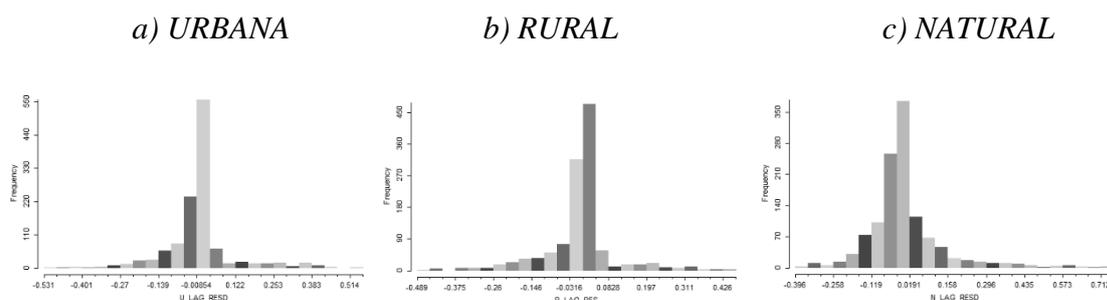


Figura 7. Histograma dos resíduos da regressão multivariada após utilização do método Spatial Lag. a) Classe Urbana; b) Classe Rural; c) Classe Natural.

#### Aplicação do modelo LuccME para calibração

Na calibração foram utilizados os dados de 2004, os resultados da regressão multivariada e parâmetros variáveis do LuccME (Tabela 6) para estimar as mudanças para 2014. Os mapas gerados mostraram as mudanças previstas pelo modelo para cada classe de uso do solo, permitindo uma comparação visual.

Tabela 6. Parâmetros de calibração do LuccME que geraram os melhores resultados.

PARÂMETRO	URBANA	RURAL	NATURAL
static	-1	0	-1
minValue	0.0	0.0	0.0
maxValue	1.0	1.0	1.0
minChange	0.0	0.0	0.0
maxChange	0.4	0.02	0.02
changeLimiarValue	0.8	0.1	0.1
maxChangeAboveLimiar	0.2	0.03	0.03

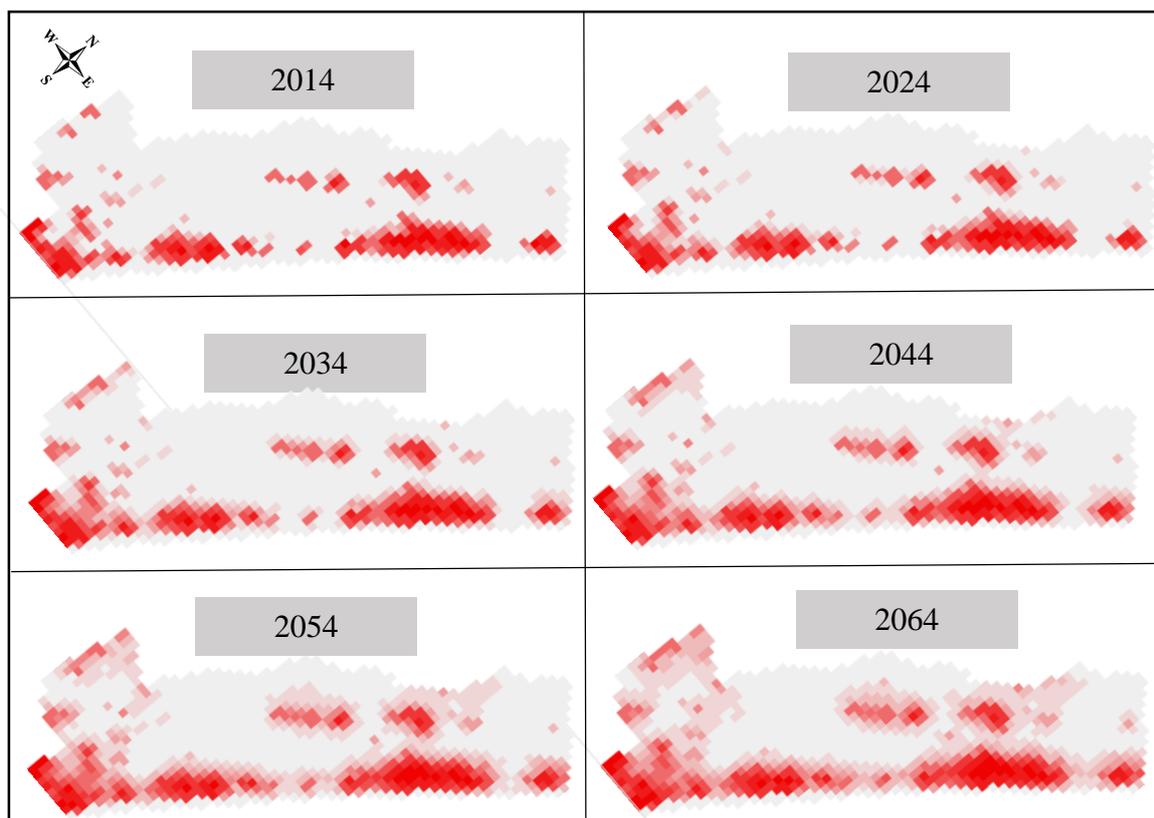
A aferição automatizada por rotina mediu que com quadros de 7 por 7 células, temos 85% de acertos na classe urbana, 86% na classe rural e 100% na classe natural, resultado considerado satisfatório.

#### Construção de Cenários

A partir dos resultados obtidos, uma nova tabela de demanda seguindo as atuais tendências de mudanças foi construída e assim estimadas as mudanças na escala temporal de 50 anos para cada classe de uso do solo (figuras 8, 9 e 10).

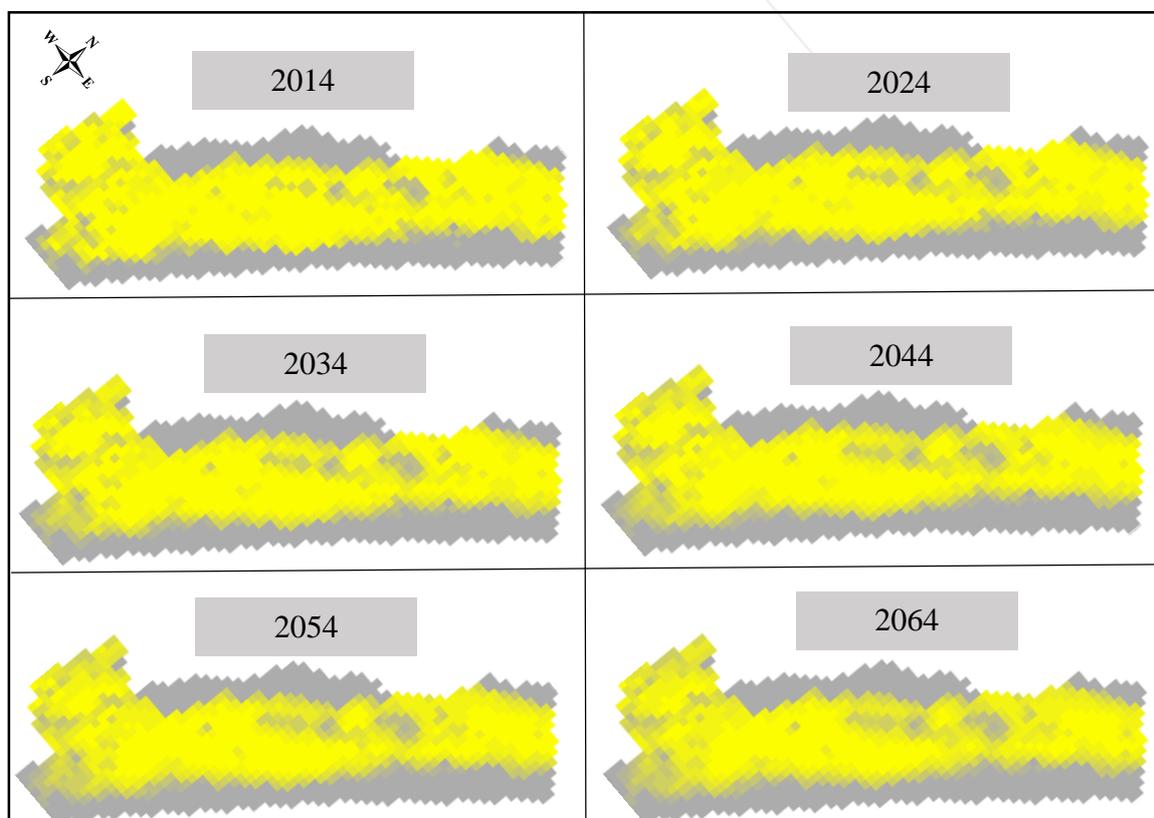
Há uma tendência em intensificação da ocupação nas áreas urbanas consolidadas e, ocorrendo sua saturação, o espalhamento desta urbanização sobre as áreas naturais e rurais. A intensificação é maior na faixa litorânea e o espalhamento mostra-se mais característico da urbanização interiorizada. Mostra ainda que em 40 anos quase toda a faixa litorânea terá alto grau de urbanização (Figura 8).

A tendência projetada mostra que inicialmente há manutenção dos espaços nas áreas rurais, mas a partir de 2044 haveria retração das porções próximas às áreas urbanas que perderiam espaço para esta outra classe de uso (Figura 9).



■ Variação percentual de ocupação urbana

Figura 8. Mapa de cenários por décadas para a classe urbana.



■ Variação percentual de classe rural

Figura 9. Mapa de cenários por décadas para a classe rural.

Com respeito às áreas naturais, os cenários gerados indicam sua diminuição drástica. Principalmente onde essa classe já é reduzida, as áreas naturais tendem a desaparecer por completo. Apenas nas poucas áreas onde há predominância da classe natural haverá sua manutenção em particular em algumas porções litorâneas (Figura 10).

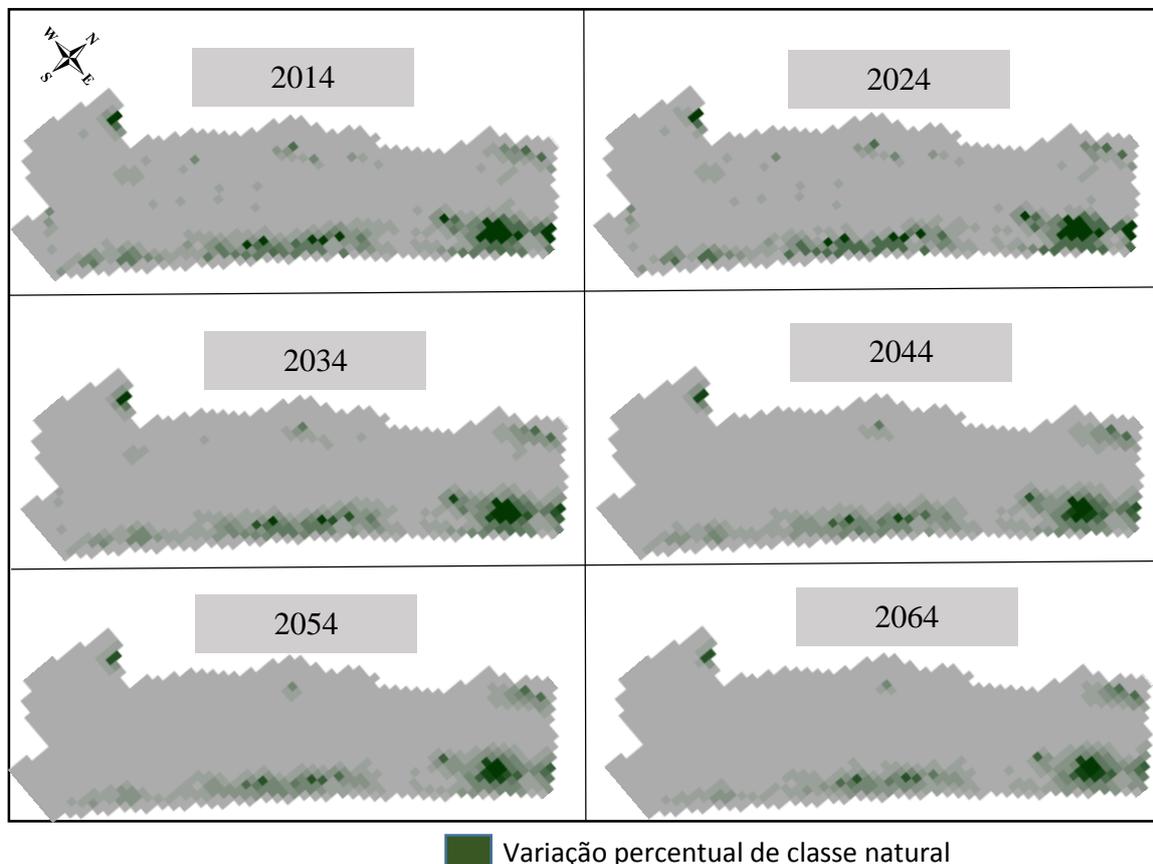


Figura 10. Mapa de cenários por décadas para a classe natural.

## 5. Conclusões:

Nos países em desenvolvimento, para evitar um colapso na disponibilidade dos recursos naturais e na manutenção de ecossistemas, urge a necessidade de um planejamento urbano e rural que vise a sustentabilidade. Para isso a aprofundada análise dos fatores regionais que impulsionam as mudanças no uso do solo necessitam ser estudados e parametrizados com viés de construção de políticas públicas coerentes e ambientalmente racionais.

O processo de modelagem exige uma boa dose de simplificação do mundo real. Traz toda a complexidade das decisões de transição do uso da terra, que dependem de fatores diversos, mas que em última instância depende da decisão de cada proprietário, para uma abordagem obrigatoriamente generalista onde apenas alguns fatores externos estariam influenciando majoritariamente nestas tomadas de decisão individuais (Pontius Jr. e Neeti, 2010).

Mesmo assim, a coerência que obtemos na calibração destes modelos mostra que o processo de modelagem permitiria a inferência também coerente se não dos cenários futuros mas ao menos das tendências deste futuro. E assim devem ser encarados os modelos.

Os resultados deste trabalho mostram que, seguindo a tendência atual, as restingas litorâneas de Santa Catarina estariam comprometidas, Em particular em função do fato de que a regulamentação do processo de urbanização nos pequenos municípios litorâneos catarinenses é ser influenciada pelo mercado imobiliário, e de que a legislação ambiental não é respeitada nos processos de autorização de construções nos lotes particulares registrados.

Neste sentido, os resultados indicam que nas áreas com menor tendência à ocupação, a criação de áreas protegidas pode ser uma estratégia para a conservação das restingas litorâneas remanescentes, em particular nas zonas formadas por dunas e lagoas costeiras (restrições legais à ocupação), mas considerada urbanas pelo poder público municipal. Apontam inclusive a localização destas áreas que, em função das diversas características mensuradas, possuiriam menor tendência à ocupação.

Na zona rural, onde existem poucas e esparsas áreas de vegetação nativa, a situação da redução desta classe tornou-se ainda mais complicada com a desoneração da reconstituição de reserva legal em pequenas propriedades a partir da promulgação do novo código florestal em 2012 (Brasil, 2012).

A possibilidade de manutenção e aumento de áreas nativas na zona rural seria a fiscalização efetiva de respeito às áreas de preservação permanente e exigindo inclusive seu reflorestamento, no entanto essa não foi a tendência verificada nas últimas décadas. Ao invés disso, o aumento da produção (resultante principalmente de incentivos agrícolas) e adensamento da ocupação na área rural (resultante principalmente das subdivisões de lotes), tomaram aos poucos as áreas de remanescentes florestais nativos.

A ampla gama de variáveis que devem ser trabalhadas na alimentação do modelo LuccME pode ser subsídio para a construção de diferentes cenários. Tradicionalmente três cenários são projetados numa modelagem espacial. O primeiro, é exatamente o buscado neste trabalho, onde se projetou a tendência atual de mudanças para o futuro. Um segundo considerado cenário conservador, onde se assumiria mais respeito a legislação florestal, incluindo-se ao modelo limitações de uso do solo às áreas de preservação permanentes, inclusive com prazos para sua recuperação conforme previsto no código florestal e supor a criação de duas unidades de conservação municipais, condição não improvável já que o tipo de turismo na região deveria se diversificar para garantir sustentabilidade sazonal da atividade. Um terceiro cenário seria baseado em modelo mais desenvolvimentista, aumentando-se a demanda por áreas urbanizadas, prevendo-se o licenciamento de outros loteamentos litorâneos, a aberturas de novas estradas de acesso e arruamento nos loteamentos, na zona rural a suposição da intensificação da ocupação, com a simulação de formação de novos núcleo urbanos nas comunidades interiorizadas.

Para buscar resultados mais precisos os próximos passos deste trabalho envolverão a inclusão de variável com o cálculo da quantidade de malha viária em cada célula, buscando aprimorar este importante vetor de transformação da ocupação. A transformação de algumas variáveis em variáveis dinâmicas (que podem mudar com o tempo), principalmente para parâmetros como distância às estradas e grau de implantação de loteamentos, traria aos cenários uma condição mais realista, já que as variáveis não permanecerão estáticas ao longo do tempo (o módulo LuccME prevê esta abordagem, sendo relativamente simples sua aplicação).

Finalmente a admissão de regiões distintas, separadas segundo sua estrutura fundiária, onde diferentes modelos de regressão serão aplicados. Tal abordagem traria mais precisão ao cálculo do potencial de mudança, pois se baseariam em demandas mais precisamente alocadas.

## Agradecimentos

Agradeço à Dra. Ana Paula Aguiar por pacientemente ensinar e corrigir nos detalhes da aplicação do LuccME; à Talita Assis, doutoranda do CCST/INPE, pelas consultorias e dicas de diretrizes; à Raquel Carvalho, doutoranda do CCST/INPE, por além de revisar o texto com dedicação, me incentivar nas horas mais difíceis e a Jussara Rafael Angelo, doutoranda do CCST/INPE, por me entregar a chave da análise estatística utilizada neste artigo.

## 6. Referências Bibliográficas

- AGUIAR, A. P. D., CÂMARA, G., & ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, v. 209, n. 2, p. 169-188, 2007.
- ANSELIN, L. **Exploring spatial data with GeoDa™: A workbook**. Urbana, IL: Center for Spatially Integrated Social Science, 2005. 244p.
- ASMUS, M. L.; KITZMANN, D. I. S.; LAYDNER, C. **Gestão costeira no Brasil. Estado atual e perspectivas**. Montevideo: Ecoplatea, 2004. 63p.
- BESER DE DEUS, L.A. **Espaço e tempo como subsídios à construção de cenários de uso e cobertura da terra para o planejamento ambiental na Amazônia: o caso da bacia do Rio Acre**. Rio de Janeiro, 2013. 400 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BRASIL. Lei n 12.651 de 25 de maio de 2012. Novo código florestal.
- CHO, S. H., & NEWMAN, D. H. Spatial analysis of rural land development. **Forest Policy and Economics**, v. 7, n. 5, p. 732-744, 2005.
- DE LIMA, T.C.; GUILLEN-LIMA, C.M.; OLIVEIRA, M.S.; SOARES-FILHO, B. DINAMICA EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazônia brasileira: análise comparativa. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVI., 2013, Foz do Iguaçu. Anais ....* São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6379-6386.
- DRUCK, S.; CARVALHO, S. C.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. M. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.
- FOTHERINGHAM, A. S., BRUNSDON, C., & CHARLTON, M. **Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2002. 269p.
- IBGE. **Censo Demográfico 2000: Características da população e dos domicílios: Resultados do universo**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/>> Acesso em: 12/11/2014.
- IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>> Acesso em: 12/11/2014.
- KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J. & LI, W. **Applied linear statistical models**. 5 ed. New York: McGraw-Hill Irwin, 2005. 1396p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Projeto Orla: Fundamentos para gestão integrada**. Brasília, 2002. 78p.

- PONTIUS JR, R. G., & NEETI, N. Uncertainty in the difference between maps of future land change scenarios. **Sustainability Science**, v. 5, n. 1, p. 39-50, 2010.
- SANTOS, M. **A natureza do espaço: Técnica e tempo, razão e emoção**. 4 ed. São Paulo: Edusp, 2006. 259 p.
- TERRAME. **LuccME**. Disponível em: <<http://www.terrame.org/doku.php?id=luccme>> Acesso em: 28/12/2014.
- VERBURG, P. H., SCHOT, P. P., DIJST, M. J., & VELDKAMP, A. Land use change modelling: current practice and research priorities. **GeoJournal**, v. 61, n. 4, p. 309-324, 2004.