



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16696-TDI/1640

ANÁLISE DA REDUÇÃO DA QUEIMA NA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL

Maikon Roberth de Novaes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, e Cláudia Maria de
Almeida, aprovada em 15 de março de 2010.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.25.12.38>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16696-TDI/1640

ANÁLISE DA REDUÇÃO DA QUEIMA NA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL

Maikon Roberth de Novaes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, e Cláudia Maria de
Almeida, aprovada em 15 de março de 2010.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.25.12.38>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Novaes, Maikon Roberth de.

N857an Análise da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelagem dinâmica espacial / Maikon Roberth de Novaes. – São José dos Campos : INPE, 2010.
153 p. ; (INPE-16696-TDI/1640)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, e Cláudia Maria de Almeida.

1. Protocolo agro-ambiental. 2. Análise espacial. 3. Sensoriamento remoto. 4. Cana-de-açúcar. I. Título.

CDU 528.8:519.23(815.6)

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. Camilo Daleles Rennó



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff



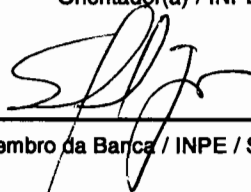
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Claudia Maria de Almeida



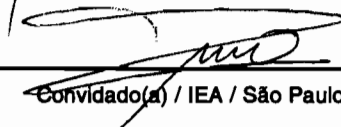
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Eduardo Celso Gerbi de Camargo



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Francisco Alberto Pino



Convidado(a) / IEA / São Paulo - SP

Aluno (a): Maikon Roberth de Novaes

São José dos Campos, 15 de março de 2010

As coisas não querem mais ser vistas por pessoas razoáveis:

Elas desejam ser olhadas de azul -

Que nem uma criança que você olha de ave.

(...)

***O rio que fazia uma volta atrás de nossa casa era a imagem de um vidro
mole que fazia uma volta atrás de casa.***

***Passou um homem depois e disse: Essa volta que o rio faz por trás de
sua casa se chama enseada.***

***Não era mais a imagem de uma cobra de vidro que fazia uma volta atrás
de casa.***

Era uma enseada.

Acho que o nome empobreceu a imagem.

(Manoel de Barros – Livro das Ignorâncias, 1993)

***À minha família, aos meus mestres
e todos aqueles que acompanharam
a minha trajetória até o momento.***

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela saúde, concentração e paz que obtive no decorrer do curso de mestrado para que eu tivesse meios de concluí-lo;

À minha família, que sempre acreditou e investiu, incondicionalmente, amor e expectativa em minha trajetória educacional;

À minha companheira, Patrícia, que acompanhou todo o processo e que me proporcionou força em horas difíceis do curso;

Aos meus excelentes orientadores, Dr^o Bernardo Rudorff e Dr^a Cláudia Almeida, pela dedicação e estímulo. Sem eles, nada disso seria realizado.

À toda equipe do IBGE, instituição a qual pertenço, por todo entendimento e apoio nesta última etapa do curso de mestrado.

Aos meus amigos que fiz em São José dos Campos, Izabel, Lino, Fernando, Nara, Haron e Maristela, pelo carinho e pelas lúcidas ideias trocadas dentro e fora dos bares e cafés;

Ao CNPq, pelo investimento financeiro durante o primeiro ano de curso;

E, finalmente, à minha cidade, o Rio de Janeiro, aonde me recolhi durante o segundo ano do curso. Mais precisamente, neste bairro maravilhoso, Santa Teresa, que me proporcionou paz, concentração e inspiração. Dentre as idas e vindas do bonde, eis, concreta, esta pesquisa.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e álcool no mundo. Estimado em quase 8 milhões de ha de área cultivada de cana, o estado de São Paulo é responsável por cerca de 60% desta extensão distribuída de maneira heterogênea pelo seu território. Desde 2006, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em conjunto com a Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo (SMA-SP), vem monitorando, por meio de imagens de sensoriamento remoto o tipo de colheita, com e sem a prática da queima, em toda área canavieira do estado. Em junho de 2007, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) e a SMA-SP assinaram um protocolo agro-ambiental para antecipar a extinção da queima da palha para 2014, em áreas com declividade inferior a 12%. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise sobre a aderência dos municípios a este protocolo frente à dinâmica da prática da queima, utilizando técnicas de análise espacial e modelagem dinâmica espacial. Adotou-se um modelo estacionário de mudança de uso e cobertura da terra baseado em autômatos celulares e aplicado aos mapas construídos referentes aos anos de 2006 e 2008. Para isso, foram selecionadas quatro regiões de estudo segundo o índice de Moran e sua importância no atual cenário de expansão da cana. Buscou-se identificar a ocorrência de agrupamentos de áreas onde ocorre o uso do fogo, assim como o entendimento de seus condicionantes com base na proximidade aos aglomerados urbanos, rios, usinas, dentre outras variáveis. Para as regiões selecionadas, foram calculadas matrizes de transição estacionárias e pesos de evidência de acordo com cada transição ocorrida neste período. Foram simulados cenários futuros de acordo com a probabilidade de ocorrência calculada pelo modelo. Um segundo modelo, prescritivo, foi elaborado por indicação de especialistas. Os resultados apontaram que há áreas de *clusters* onde a aderência ao protocolo é maior, como no entorno de Barretos e Ribeirão Preto, enquanto em outras áreas a prática da queima ainda prevalece, como nas proximidades de Ourinhos e Jaú. No entanto, as análises feitas mostraram que há forte inclinação à aderência em todas as regiões de estudo. Segundo as previsões simuladas pelo modelo estacionário, a aderência destas regiões chegaria a cerca de 60% enquanto para o modelo prescritivo este percentual ficaria entre 80 e 92%.

ANALYSIS OF THE DECREASE SUGARCANE HARVEST BURNING WITH SPATIAL DINAMIC MODELLING

ABSTRACT

Brazil is the world biggest producer of sugar and ethanol derived from sugarcane. The estimated sugarcane cultivated area lies around 8 million hectares, 60% of which are found within São Paulo state, unevenly scattered throughout its territory. Since 2006, the National Institute for Space Research (INPE), in association with the São Paulo State Secretary for Environment (SMA-SP), has been monitoring the pre-harvest burning of sugarcane by means of remotely sensed images. In June 2007, the Sugarcane Industry Association (UNICA) and SMA-SP signed an Agri-Environment protocol, designed to anticipate the end of straw burning in areas with slope under 12% until 2014. The objective of this study is to perform an analysis of São Paulo municipalities' compliance with the protocol, considering the dynamics of burning practices, using spatial analysis techniques and spatial dynamic modeling. A cellular automata land use and land cover (LULC) model was adopted and applied to 2006 and 2008 real landscape maps. Four study areas were selected according to Moran's index in face of their importance regarding the current trends of sugarcane expansion and harvesting. This work attempted to identify clusters of areas in which burning was commonly practiced as well as to understand their constraints concerning proximity to urban areas, rivers, processing plants, and other factors. For the selected regions, stationary transition matrices and weights of evidence were calculated in accordance with each observed transition in the study period. Future scenarios were simulated according to the transition probabilities calculated by the stationary model. A second model, prescriptive, was drafted based on expert counselling. The results showed that there are clusters where the compliance with the Protocol is higher, close to Barretos and Ribeirão Preto municipalities, while near Ourinhos and Jaú, the practice of burning is still regularly kept. However, the analysis showed that there is a strong tendency to reduce the pre-harvest burning in all study areas. According to the forecasts generated by the stationary model, the compliance of these regions would reach about 60%, while in the prescriptive model, this percentage would remain in considerably higher levels, around 80 and 92%.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Indicador da quantidade de energia final disponibilizada pelo combustível por unidade de energia de origem fóssil consumida no seu ciclo de vida..... | 9 |
| Figura 2.2 – Metodologia de classificação das áreas de cana-de-açúcar utilizadas no projeto CANASAT..... | 14 |
| Figura 2.3 – Diagrama de Espalhamento de Moran..... | 18 |
| Figura 2.4 – Exemplo de aplicação de LISAMAP ilustrando agrupamentos por significância estatística..... | 20 |
| Figura 2.5 – Esquema ilustrativo de obtenção do mapa de probabilidades com base no cálculo dos pesos de evidência para determinada transição..... | 23 |
| Figura 2.6 - Exemplo de seqüência plotada An por $An \cdot e^{w^+}$ da variável “distância às estradas”..... | 27 |
| Figura 2.7 – Esquema ilustrativo do método de Hagen (<i>fuzziness of location</i>) utilizando decaimento exponencial..... | 29 |
| Figura 3.1 – Localização das áreas canavieiras no estado de São Paulo em 2008..... | 31 |
| Figura 3.2 – Localização das regiões de estudo no estado de São Paulo..... | 33 |
| Figura 3.3 – Fluxograma das etapas seguidas na metodologia da pesquisa..... | 42 |
| Figura 3.4 – Mapa de colheita da cana em três anos-safra: 2006, 2007 e 2008..... | 43 |
| Figura 3.5 - Procedimento de geração do índice de colheita para a grade de células com resolução de 2.000 x 2.000 m..... | 46 |
| Figura 3.6 - Localização das quatro regiões de estudo, conforme a representação dos quadrantes de Moran..... | 48 |
| Figura 3.7a – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 1..... | 50 |
| Figura 3.7b – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 2..... | 51 |
| Figura 3.7c – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 3..... | 52 |
| Figura 3.7d – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 4..... | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.8 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 1. a) inicial – 2006. b) final – 2008..... | 55 |
| Figura 3.9 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 2. a) inicial – 2006. b) final – 2008..... | 55 |
| Figura 3.10 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 3. a) inicial – 2006. b) final – 2008..... | 56 |
| Figura 3.11 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 4. a) inicial – 2006. b) final – 2008..... | 56 |
| Figura 3.12 – Mapa de subregiões: a) Região 1 – (19); b) Região 2 – (15); Região 3 – (10); Região 4 – (15)..... | 59 |
| Figura 3.13 – Captura de tela de definição dos parâmetros para o cálculo das faixas e dos pesos de evidência..... | 62 |
| Figura 3.14 – Captura de tela do esquema do modelo de simulação com parâmetros definidos para <i>expander</i> e <i>patcher</i> | 63 |
| Figura 3.15 – Exemplo de mapa feito por tabulação cruzada, mostrando a transição de classes entre 2006 e 2008..... | 64 |
| Figura 3.16a – Região 1: Simulação 20091028 e 20091130, com seus respectivos resultados de validação..... | 65 |
| Figura 3.16b – Região 1: Simulação 20091129 e 20091217, com seus respectivos resultados de validação..... | 66 |
| Figura 3.17a – Região 2: Simulação 20091126a e 20091126b, com seus respectivos resultados de validação..... | 66 |
| Figura 3.17b – Região 2: Simulação 20091206 e 20091219, com seus respectivos resultados de validação..... | 67 |
| Figura 3.18a – Região 3: Simulação 20091027 e 20091029, com seus respectivos resultados de validação..... | 67 |
| Figura 3.18b – Região 3: Simulação 20091206 e 20100117, com seus respectivos resultados de validação..... | 68 |
| Figura 3.19a – Região 4: Simulação 20091105 e 20091106, com seus respectivos resultados de validação..... | 68 |
| Figura 3.19b – Região 4: Simulação 20091208 e 20100117, com seus respectivos resultados de validação..... | 69 |
| Figura 4.1 – Índices de autocorrelação global para o índice de colheita das células de 2 x 2 km e mapa de <i>clusters</i> pela à análise do LISAMAP para os anos-safras 2006, 2007 e 2008..... | 71 |
| Figura 4.2 – Análise de evolução da colheita para células de 2 km..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.3 – Pesos de variáveis relativas à Região 1..... | 79 |
| Figura 4.4 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 1..... | 82 |
| Figura 4.5 - Pesos de variáveis relativas à Região 2..... | 83 |
| Figura 4.6 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 2..... | 87 |
| Figura 4.7 – Pesos de variáveis relativas à Região 3..... | 88 |
| Figura 4.8 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 3..... | 91 |
| Figura 4.9 – Pesos de variáveis relativas à Região 4..... | 92 |
| Figura 4.10 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 4.... | 95 |
| Figura 4.11 – Comparação entre diferenças responsáveis pelo baixo resultado do índice de similaridade <i>fuzzy</i> (Região 1)..... | 100 |
| Figura 4.12 – Cenários futuros para as classes de colheita da cana-de-açúcar, segundo o modelo estacionário..... | 101 |
| Figura 4.13 – Região 1: simulações de cenários futuros..... | 104 |
| Figura 4.14 – Região 2: simulações de cenários futuros..... | 105 |
| Figura 4.15 – Região 3: simulações de cenários futuros..... | 106 |
| Figura 4.16 – Região 4: simulações de cenários futuros..... | 108 |
| Figura 4.17 - Cenários futuros para as classes de colheita da cana-de-açúcar segundo o modelo prescritivo..... | 109 |
| Figura 4.18 – Comparação entre projeções futuras de aderência ao protocolo ambiental..... | 112 |
| Figura A.1 – Índices de autocorrelação global para o índice de colheita por município e mapa de <i>clusters</i> municipais pela análise do LISAMAP para os anos-safras 2006, 2007 e 2008..... | 126 |
| Figura A.2 – MAUP identificado na comparação do dado original e a análise de autocorrelação espacial local (LISA)..... | 127 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Base de dados utilizada nos projetos..... | 40 |
| Tabela 4.1 – Região 1: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais..... | 73 |
| Tabela 4.2 – Região 2: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais..... | 74 |
| Tabela 4.3 – Região 3: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais..... | 75 |
| Tabela 4.4 – Região 4: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais..... | 76 |
| Tabela 4.5 - Comparação entre os percentuais de transição dos modelos estacionário e prescritivo..... | 78 |
| Tabela 4.6 – Parâmetros de <i>expand</i> e <i>patcher</i> para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a Região 1..... | 97 |
| Tabela 4.7 – Parâmetros de <i>expand</i> e <i>patcher</i> para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a Região 2..... | 97 |
| Tabela 4.8 – Parâmetros de <i>expand</i> e <i>patcher</i> para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a Região 3..... | 98 |
| Tabela 4.9 – Parâmetros de <i>expand</i> e <i>patcher</i> para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a Região 4..... | 98 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| IBGE | - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| CONAB | - Companhia Nacional de Abastecimento |
| UNICA | - União da Indústria de Cana-de-Açúcar |
| SMASP | - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo |
| ORPLANA | - Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil |
| CEPEA | - Centro de Estudos Avançados de Economia Aplicada |
| CTC | - Centro de Tecnologia Canavieira |
| CANASAT | - Mapeamento da Cana Via Imagens de Satélites de Observação da Terra |
| MLME | - Modelo Linear de Mistura Espectral |
| STRS | - <i>Spectral-Temporal Response Surface</i> |
| LISA | - <i>Local Indicator of Spatial Association</i> |
| CA | - <i>Cellular Automata</i> |
| SIG | - Sistema de Informações Geográficas |
| JIU | - <i>Joint Information Uncertainty</i> |
| Cc | - Cana-Crua |
| Cq | - Cana-Queima |
| Cb | - Cana-Bisada |
| SEADE | - Sistema de Análise de Dados do Estado de São Paulo |
| DER | - Departamento de Estradas e Rodagens |
| MMA | - Ministério de Meio Ambiente |
| INPE | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| MAUP | - <i>Modified Area Unit Problem</i> |
| APP | - Área de Proteção Pemanente |
| ASCII | - <i>American Standard Code</i> |
| Km | - Quilômetros |
| SPRING | - Sistema de Processamento de Imagens Georeferenciadas |
| SAD69 | - <i>South American Datum of 1969</i> |
| WGS84 | - <i>World Geographic System of 1984</i> |
| UTM | - <i>Universal Transverse of Mercator</i> |
| SP | - São Paulo |
| S | - Sul |

- m - Metros
- EVq - Taxa de Evolução da Queima
- UC - Unidade de Conservação

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2.1. Objetivo geral..... | 4 |
| 1.2. Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.3. Organização da dissertação..... | 4 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 7 |
| 2.1. Considerações sobre o plantio da cana-de-açúcar no cenário agrícola brasileiro..... | 7 |
| 2.2. Colheita da cana-de-açúcar..... | 9 |
| 2.3. Legislação e Protocolo Ambiental no que se refere à extinção da prática da queima da palha da cana-de-açúcar..... | 10 |
| 2.4. Mapeamento da cana-de-açúcar e monitoramento da colheita..... | 12 |
| 2.5. Análise Espacial na identificação de agrupamentos e subsídios à compreensão de fenômenos geográficos | 16 |
| 2.6. Modelagem dinâmica espacial no entendimento de mudanças de cobertura e uso da terra e na projeção de cenários..... | 21 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 31 |
| 3.1 Área de estudo..... | 31 |
| a. Região 1..... | 34 |
| b. Região 2..... | 35 |
| c. Região 3..... | 36 |
| d. Região 4..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2. Material..... | 39 |
| 3.3. Métodos..... | 41 |
| 3.3.1. Construção de variáveis..... | 43 |
| 3.3.2. Identificação da área de estudo através de agregação de atributos por células vetoriais..... | 44 |
| 3.3.3. Construção de banco de dados..... | 48 |
| 3.3.4. Entrada de mapas e variáveis na plataforma de modelagem DINAMICA EGO..... | 57 |
| 3.3.5. Geração das matrizes de transição..... | 59 |
| 3.3.6. Calibração do modelo..... | 61 |
| 3.3.7. Validação do modelo..... | 65 |
| 3.3.8. Geração de cenários futuros estacionários e prescritivos..... | 69 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 71 |
| 4.1. Análise espacial do uso do fogo nas lavouras canavieiras..... | 71 |
| 4.2. Análise das mudanças nas práticas de colheita da cana-de-açúcar e na expansão da cultura canvieira através das matrizes de transição..... | 73 |
| 4.3. Análise dos pesos de evidência e mapas de probabilidades de transição..... | 78 |
| 4.3.1. Região 1..... | 79 |
| 4.3.2. Região 2..... | 83 |
| 4.3.3. Região 3..... | 88 |
| 4.3.4. Região 4..... | 92 |
| 4.4. Parâmetros finais para o modelo estacionário..... | 96 |

| | |
|---|------------|
| 4.5. Avaliação do modelo estacionário e do modelo prescritivo..... | 98 |
| 4.6. Indicativos de áreas aderentes ao protocolo ambiental..... | 112 |
| 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 115 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 117 |
| APÊNDICE - ANÁLISE ESPACIAL DA PRÁTICA DA QUEIMA POR LIMITES MUNICIPAIS..... | 125 |

1. INTRODUÇÃO

As recentes e sucessivas transformações de ordem material e social verificadas nos espaços agrícolas, na maioria dos países, nos obrigam a buscar novas interpretações que expliquem as atuais características do capitalismo no campo, ou seja, a instauração de uma nova racionalidade como forma de otimização dos lucros. Segundo Brunhes (1962), essa racionalidade traduz-se na produção agrícola por políticas que favoreceram superposições de tecnologias, derivadas sobretudo de pesquisas científicas e inovações na gestão e no controle da produção sob o comando de grandes empresas.

Aliada à essa intensa otimização da produção agrícola, cresce cada vez mais a demanda por energia menos poluente, fato associado aos limites das reservas de petróleo mundial, o que tem direcionado os esforços de políticas públicas no desenvolvimento de inovações tecnológicas que viabilizem novas fontes de energia renovável.

Interesses globais por produção e consumo de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, têm estimulado um mercado em ampla expansão, o qual tem no território brasileiro um retrato de condições propícias para o desenvolvimento de uma matriz energética sustentável e renovável a partir da biomassa vegetal (ZIUURBIER; VOOREN, 2008).

Enquanto a discussão em torno das mudanças climáticas, da segurança energética e da redução de emissão de gases de efeito estufa ganha cada vez mais espaço na sociedade internacional, os biocombustíveis reforçam atenção por diversos fatores, como um melhor equilíbrio entre gasto de combustíveis fósseis e emissão de gases de efeito estufa.

No contexto atual, o Brasil encontra-se como o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e álcool no mundo. A área de cana cultivada é

de quase 8 milhões de hectares e o estado de São Paulo é responsável por cerca de 60% de toda esta extensão (IBGE, 2008a), distribuída de maneira heterogênea pelo território estadual.

Diante do crescimento mundial por consumo de energia em detrimento das reduções de emissões de gases poluentes, o produto gerado a partir da matéria-prima da cana-de-açúcar – o álcool – vem sendo adotado como uma das alternativas menos poluidoras para combustíveis automobilísticos. O fenômeno *flex-fuel* tem repercutido no mercado globalizado de maneira significativa, favorecendo o mercado de exportações brasileiras deste produto. Desde 2003, as áreas de cultura de cana cresceram em torno de 3 milhões de hectares, com expectativa de expansão contínua nos próximos anos (NASSAR et al., 2008).

Os dados oficiais de área plantada e produção no Brasil são levantados através de métodos subjetivos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Por outro lado, o sensoriamento remoto orbital, aliado às técnicas de geoinformação, vem se mostrando como uma importante ferramenta que contribui para o levantamento destes dados de forma objetiva (JENSEN, 2006).

No que tange ao manejo da colheita de cana-de-açúcar, pode-se interpretá-lo em imagens de sensoriamento remoto em dois tipos: com ou sem a prática da queima da palha na pré-colheita. Sem o uso do fogo, a colheita é feita através de máquinas colheitadeiras. A colheita mecânica ainda é onerosa, mas vem sistematicamente substituindo a colheita manual que se dá através da prática da queima da palha antes da colheita dos colmos. Esta prática não só facilita, mas viabiliza a colheita manual, embora cause poluição, prejudicando o meio ambiente e a saúde da população residente no entorno. Todavia, apesar da extinção da prática da queima da palha estar prevista em legislação estadual, ela gera polêmicas em torno de questões ambientais, trabalhistas e

econômicas. Estima-se, por exemplo, que uma máquina substitua cerca de 80 trabalhadores no campo (FISCHER et al., 2008). Da área disponível para colheita, nem tudo é necessariamente colhido, podendo restar áreas não colhidas no final da safra por razões diversas, tais como: menor capacidade da indústria na utilização da matéria prima em relação à disponibilidade da mesma, condições climáticas desfavoráveis para colheita etc.

A Lei Estadual Nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, regulamenta o fim da prática da queima até 2021 para áreas com declividade menor ou igual a 12% (mecanizáveis) e maior do que 150 ha, e até 2031 para áreas com declividade acima de 12% (não mecanizáveis) e em áreas menores que 150 ha. Entretanto, em junho de 2007, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) e a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo assinaram um protocolo agro-ambiental, que antecipa os prazos para extinção da queima da palha da cana nos canaviais paulistas (SMASP, 2008). Os prazos estabelecidos foram: 2014 para áreas mecanizáveis, e 2017 para áreas não mecanizáveis, sendo que 85% das usinas do estado aderiram ao protocolo. No mesmo sentido, em março de 2008, a Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA) também aderiu ao protocolo. Como incentivo, o Governo do Estado concede um certificado de conformidade agro-ambiental aos fornecedores e usinas de cana, o que pode agregar valor ao produto comercializado.

Diante do atual cenário, existe o questionamento se a extinção da prática da queima na colheita da cana-de-açúcar será estabelecida nos prazos definidos. Pressupõe-se que em torno desta questão estejam presentes diversos condicionantes socioeconômicos, ambientais e de infra-estrutura ainda não bem equacionados. Uma hipótese levantada é a de que a prática ou não da queima possui um padrão espacial em algumas regiões, motivada por tais fatores. Outra é sobre a possibilidade de modelar a dinâmica das mudanças de

uso e cobertura do solo em função da aderência ao protocolo.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise acerca da aderência ao protocolo agro-ambiental de regiões selecionadas, diante das metas visadas pelo seu cumprimento, por meio de técnicas de análise espacial e modelagem dinâmica espacial.

1.2. Objetivos específicos

Visando compreender a dinâmica espaço-temporal do modo de colheita, este trabalho busca identificar como e onde estão agrupadas as áreas de colheita, tanto por prática de queima quanto pelo modo mecanizado sem uso do fogo. Em seguida, explorar possíveis forçantes que contribuam para esta dinâmica, utilizando técnicas de modelagem dinâmica espacial e áreas favoráveis para as mudanças de cobertura e uso do solo.

Conceber cenários exploratórios futuros a partir da evolução da transição dos modos de colheita observada entre os anos de 2006 e 2008 por meio de imagens de satélites de observação da Terra.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma: o capítulo seguinte abordará considerações sobre o plantio e a colheita da cana-de-açúcar, a legislação acerca da queima e as mudanças ocorridas com a elaboração do protocolo agro-ambiental; apresentação de metodologias para o mapeamento da cana e monitoramento da queima da palha durante a pré-colheita; e conceitos fundamentais sobre técnicas utilizadas neste trabalho contemplando análise espacial e modelagem dinâmica espacial.

No terceiro capítulo será exposto as áreas de estudo, o material utilizado e

metodologia adotada para elaboração do modelo. No capítulo quatro serão apresentados os resultados e discussões acerca dos agrupamentos identificados quanto a prática da colheita no estado de São Paulo, análise das mudanças ocorridas no período entre 2006 e 2008; análise dos pesos de evidências e áreas de maior probabilidade de ocorrer transições, assim como os modelos e resultados de validação obtidos; avaliação dos modelos utilizados e indicativos de áreas aderentes ao protocolo ambiental. As conclusões sobre as técnicas utilizadas e o modelo adotado, bem como as recomendações para trabalhos futuros encontram-se no último capítulo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordará temas sobre questões atuais referentes à cana-de-açúcar e seu modo de colheita e da utilização do sensoriamento remoto na classificação de lavouras de cana-de-açúcar. Em seguida, será abordado o uso de técnicas de análise espacial para detecção de aglomerados de áreas. Por último, serão abordadas técnicas de modelagem dinâmica espacial, as quais serão utilizadas para o entendimento do fenômeno e possível geração de cenários projetados, retratando as transições das formas de manejo da colheita da cana-de-açúcar.

2.1. Considerações sobre o plantio da cana-de-açúcar no cenário agrícola brasileiro.

A produção agrícola mundial, seguindo o processo de urbanização e industrialização, insere-se cada vez mais na lógica industrial de produção. Para manter os níveis de rendimento otimizados, essa atividade precisa elevar constantemente a sua produtividade e, para isso, adotar novas tecnologias de produção e organização.

De maneira geral, a modernização do campo, assim como seu reordenamento no espaço ocorre primeiramente com a mecanização da produção, observada pela utilização crescente de maquinário, como colheitadeiras e tratores. Em um segundo momento, a novidade decorrerá da utilização dos derivados da indústria química, como fertilizantes, agrotóxicos, inseticidas, fungicidas e corretivos para o solo, desenvolvendo-se juntamente às áreas da biotecnologia e da engenharia genética (RAMOS, 2004).

Outro fator importante para entender a dinâmica espacial das atividades agrícolas é a “creditização do território” relativa aos recursos destinados para a agricultura. Desde a década de 1930, com a criação da Carteira de Crédito Agrícola e Industrial (Craei) do Banco do Brasil, passando pela

institucionalização do crédito rural no país em 1965, percebem-se os estímulos por parte do governo à modernização agrícola, facilitando o acesso à aquisição de novos insumos técnicos e intelectuais.

Segundo Ramos (2004), tais incentivos corroboraram um aumento do consumo de agrotóxicos bem como a expansão das grandes empresas agropecuárias e concentração de renda e acesso a crédito por parte destas que, em sua maioria, concentravam-se no eixo Sul-Sudeste.

Uma preocupação que vem se refletindo no paradigma das matrizes energéticas é, de fato, o seu impacto (no uso, na produção e na queima), principalmente daquelas oriundas de combustíveis fósseis, ao meio ambiente. Devido à crescente demanda por combustíveis considerados “limpos”, políticas públicas vêm incentivando a viabilização de novas tecnologias que desenvolvam energia a partir de fontes renováveis, como a cana-de-açúcar, beterraba, milho e outros. Nestas fontes “limpas” de energia, o carbono emitido pela queima ou gasto dos biocombustíveis é reciclado através da sua fixação pela fotossíntese, durante o crescimento das novas plantas produtoras de biocombustíveis, o que atenua impactos sobre o aquecimento global (WWF, 2009).

O etanol derivado da cana-de-açúcar, quando comparado ao etanol de outras culturas, possui maior rendimento de energia e melhor equilíbrio de emissões de gases de efeito estufa (GOLDENBERG et al., 2008). Em grande parte, isso se explica porque a produção de etanol a partir do milho e de outras culturas depende de energia de combustíveis fósseis, enquanto a produção do etanol da cana-de-açúcar utiliza energia de seu próprio bagaço, gerando um excelente balanço energético. A Figura 2.1 ilustra um índice adimensional que mede um balanço energético de diversos biocombustíveis. Combustíveis totalmente não renováveis possuiriam um valor inferior a 1. Valores superiores a 1 indicam a renovabilidade do combustível, sendo esta tanto maior quanto

mais elevado for o valor do indicador

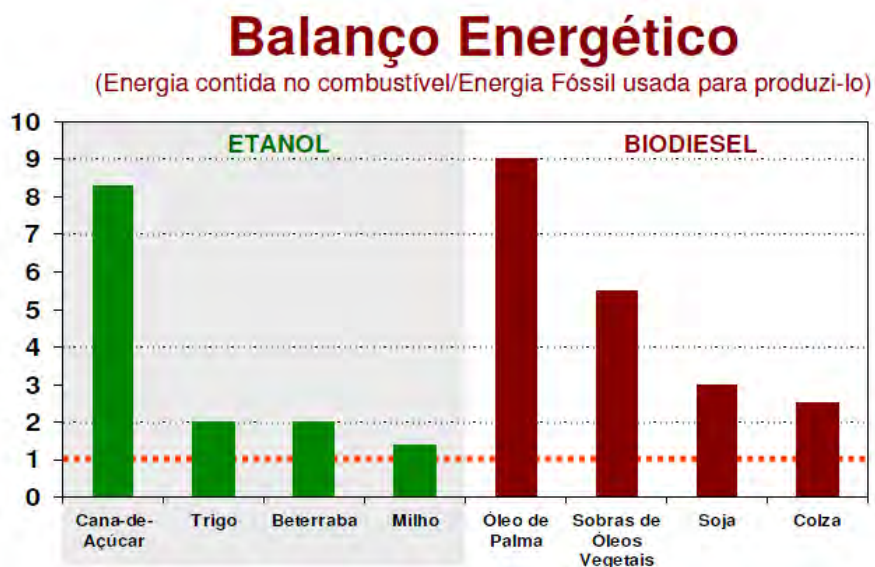


Figura 2.1 – Indicador da quantidade de energia final disponibilizada pelo combustível por unidade de energia de origem fóssil consumida no seu ciclo de vida.

Fonte: WWF (2009).

2.2. Colheita da cana-de-açúcar

A colheita manual da cana-de-açúcar requer a queima da palha para viabilizar o corte dos colmos. Atualmente, cerca de 10% da área de cana colhida no estado de São Paulo é realizada com máquinas mais simples que requerem a queima da palha na pré-colheita. Entretanto, cresce consideravelmente, a cada ano, a área de cana colhida com máquinas aprimoradas que não requerem a queima da palha para colheita dos colmos. Apesar de serem onerosas, requerendo um grande investimento, elas começam a ser economicamente mais vantajosas para os grandes empreendedores, do que a colheita manual.

A prática da queima da palha da cana adotada corriqueiramente no estado de São Paulo gera notáveis impactos ambientais, decorrentes da emissão de gases poluentes nocivos à qualidade de vida e à saúde da população que

reside nas áreas de cultivo de cana ou no seu entorno (ROSEIRO; TAKAYANAGUI, 2004; ROSEIRO, 2002). Pesquisas realizadas por Macedo (2005) e Miranda et al. (1994) mostram que áreas que não plantam nem queimam cana, mas se encontram nas mediações de áreas produtoras, sofrem os mesmos riscos de doenças respiratórias que as áreas produtoras em função do transporte de partículas poluentes pela atmosfera.

Por sua vez, prevendo a extinção da queima da palha, aumentam as polêmicas em torno de questões ambientais, trabalhistas e econômicas. Segundo Goldemberg et al. (2008), o percentual de cortadores de cana compõem cerca de 86% do total de mão-de-obra operária de campo e 46% daqueles que trabalham na indústria. Em São Paulo, segundo os mesmos autores, aqueles cortadores que trabalhavam em lavouras onde a prática da queima foi extinta obtiveram uma qualificação profissional para atuarem em outros setores do ramo. No entanto, estima-se, por exemplo, que uma máquina substitua cerca de 80 trabalhadores no campo (FISCHER et al., 2008).

2.3. Legislação e Protocolo Ambiental no que se refere à extinção da prática da queima da palha da cana-de-açúcar

A Lei Nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar como facilitador de seu corte. Desta forma, os produtores de cana-de-açúcar que utilizem como método de pré-colheita a queima da palha são obrigados a tomar as providências necessárias para reduzir esta prática, prevendo a sua total extinção até 2021 para áreas mecanizáveis, ou seja, lavouras com área acima de 150 ha e com declividade inferior ou igual a 12%, sendo que para áreas não mecanizáveis (declividade superior a 12%) e menores do que 150 ha, o limite é o ano de 2031.

A presente lei ainda proíbe a prática da queima a menos de: a) 1 (um)

quilômetro do perímetro da área urbana, definida por lei municipal, e das reservas e áreas tradicionalmente ocupadas por indígenas; b) 100 (cem) metros do limite das áreas de domínio de subestações de energia elétrica; c) 50 (cinquenta) metros contados ao redor do limite de estação ecológica, de reserva biológica, de parques e demais unidades de conservação estabelecidos em atos do poder federal, estadual ou municipal e de refúgio da vida silvestre, conforme as definições da Lei Federal Nº 9.985, de 18 de julho de 2000; d) 25 (vinte e cinco) metros ao redor do limite das áreas de domínio das estações de telecomunicações; e) 15 (quinze) metros ao longo dos limites das faixas de segurança das linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica e f) 15 (quinze) metros ao longo do limite das áreas de domínio de ferrovias e rodovias federais e estaduais.

Todavia, diante da relevante importância da atividade sucroalcooleira para a economia e geração de empregos, renda, divisas e tributos, aliadas às medidas de responsabilidade diante das mudanças climáticas globais, com o fim de evitar o agravamento das condições ambientais desfavoráveis à qualidade de vida, foi assinado um protocolo de cooperação entre o governo e o setor sucroalcooleiro visando consolidar o desenvolvimento sustentável da indústria da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Tal protocolo objetiva, entre outras diretrizes, antecipar os prazos para a extinção da queima da palha da cana-de-açúcar, estipulados em lei. Em contrapartida, aqueles produtores agrícolas e indústrias que atenderem ao protocolo de cooperação obtêm um Certificado de Conformidade Agro-ambiental, que confere a eles algumas vantagens que potencialmente importantes nos procedimentos de certificação de seus produtos para exportação.

2.4. Mapeamento da cana-de-açúcar e monitoramento da colheita

No Brasil, o levantamento oficial da área cultivada com cana-de-açúcar é realizado por meio de métodos subjetivos que levam em consideração uma série de fatores que direta e indiretamente contribuem na variação anual da área cultivada. O IBGE e a CONAB são os dois órgãos governamentais na esfera federal responsáveis pelas estatísticas oficiais de área, produtividade e produção das culturas agrícolas no Brasil. No estado de São Paulo, o órgão responsável pelo levantamento de informações agrícolas é o Instituto de Economia Agrícola da Secretaria da Agricultura e Abastecimento. As informações divulgadas por estes órgãos são de suma importância no planejamento agrícola, na composição de preços em escala nacional e mundial, no abastecimento interno, na decisão sobre importação e exportação, nas questões relacionadas aos subsídios e ao seguro e em diversas outras tomadas de decisão que direta ou indiretamente envolvem o setor agrícola.

O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), em parceria com a UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo), o CEPEA (Centro de Estudos Avançados de Economia Aplicada), o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira) e, recentemente, a Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo, vem realizando o projeto CANASAT para o levantamento das áreas de cana-de-açúcar através de métodos objetivos baseados em extração de informação de imagens de satélites de observação da Terra. Este projeto tem como base a metodologia desenvolvida por RUDORFF et al. (2005), implementada em 2003 para o estado de São Paulo e, a partir de 2005, para a região centro-sul, englobando os seguintes estados: São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Paraná, que são os principais estados responsáveis pela recente expansão da cultura da cana, além de serem aqueles que têm maior potencial para expansão do cultivo da cana.

O calendário agrícola da cana em São Paulo favorece o uso de imagens de sensoriamento remoto para a identificação tanto da área cultivada no início da safra quanto do modo de colheita. No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada em grandes áreas; trata-se de uma cultura semi-perene, cuja época de colheita na região centro-sul ocorre entre abril e novembro.

Segundo Sanches et al. (2005), o conhecimento prévio do calendário agrícola de uma cultura é de grande importância para a aquisição de imagens de satélites em época adequada a fim de que a cultura possa ser corretamente identificada na imagem em função do seu comportamento espectro-temporal.

A Figura 2.2 ilustra a metodologia de classificação para a obtenção deste primeiro mapa com a distribuição das áreas de cana (RUDORFF et al., 2005). Uma vez obtido, este mapa é atualizado a cada ano safra por meio de técnicas de interpretação visual na tela do computador, utilizando as facilidades de processamento de imagens e de técnicas de geoprocessamento disponíveis no aplicativo SPRING (CÂMARA et al., 1996). Esta atualização consiste em: 1) identificar as áreas em reforma com cana de ano e que, portanto, permanecem uma safra sem serem colhidas, de tal forma que devem ser subtraídas da área de cana disponível para colheita no ano safra em questão, e 2) identificar as novas áreas de cana que correspondem à expansão e que, portanto, devem ser acrescentadas ao mapa com a distribuição da cana disponível para colheita.

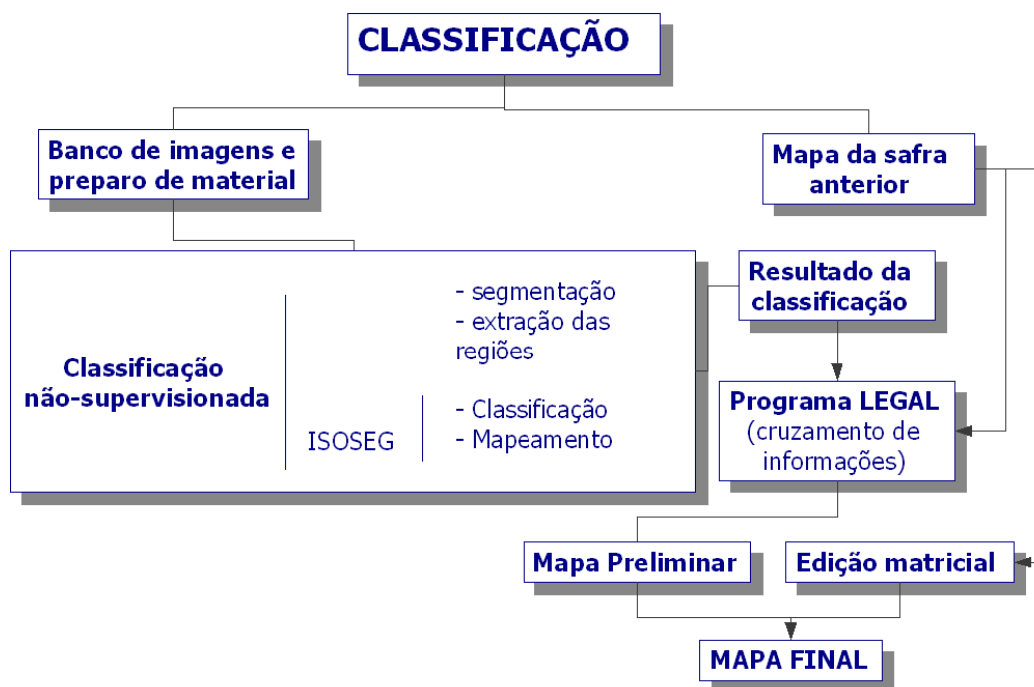


Figura 2.2 – Metodologia de classificação das áreas de cana-de-açúcar utilizadas no projeto CANASAT.

Fonte: Rudorff et al. (2005).

Uma vez obtido o mapa com a distribuição espacial das áreas de cana disponíveis para colheita, em um determinado ano safra, é possível realizar o monitoramento da colheita da cana, que ocorre entre os meses de abril e novembro na região centro-sul, por meio de imagens de sensoriamento remoto (AGUIAR, 2007). Interessante é notar que, após a colheita da cana, as lavouras colhidas com e sem a prática da queima apresentam uma resposta espectral bem distinta e são facilmente identificadas nas imagens de sensoriamento remoto, mesmo em imagens adquiridas algumas semanas após o evento da colheita (AGUIAR, 2007).

Atualmente, a identificação das áreas colhidas com e sem queima da palha é realizada em imagens adquiridas continuamente ao longo da safra, de abril a novembro, utilizando técnicas de interpretação visual na tela do computador.

Alternativamente, estão sendo realizados estudos para automatizar este processo de identificação automática por meio do uso do Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME – desenvolvido por Shimabukuro e Smith (1991) e do método de classificação por superfícies de resposta espectro-temporal (STRS, do inglês: *Spectral-Temporal Response Surface*), desenvolvido por Vieira (2000) e adaptado por Mello (2009) para a cultura da cana.

No modelo linear de mistura espectral, o objetivo é quantificar as proporções de componentes puros (vegetação, solo, sombra) em cada elemento de *pixel*. Esses componentes são chamados de *endmembers* (TOMPKINS et al., 1997). Mais detalhes sobre a metodologia para a cultura de cana-de-açúcar podem ser vistos em Aguiar (2007).

Já o modelo STRS considera que a cultura possui mais de uma curva espectral, dependendo da fase de desenvolvimento fenológico. Segundo Mello (2009), cada elemento da imagem terá uma representação modelada em três dimensões, onde o eixo *x* representa a variação temporal, o eixo *y* a variação espectral e o eixo *z*, a reflectância. E, portanto, neste sistema, são interpoladas as superfícies que descrevem a dinâmica espectro-temporal dos alvos.

Enfim, considerando as técnicas atuais, o mapeamento da prática da colheita com e sem queima vem sendo realizado anualmente no estado de São Paulo desde a safra 2006/07 no contexto do projeto CANASAT. Entretanto, os dados resultantes deste mapeamento ainda não foram devidamente explorados para permitir uma análise sobre a tendência das mudanças locais e regionais da prática da colheita com e sem queima da palha da cana. Realizando tais análises, pode-se verificar onde ocorre a real aderência do setor sucroalcooleiro ao protocolo que visa reduzir e até mesmo eliminar a queima da cana nos próximos anos em São Paulo.

2.5. Análise Espacial na identificação de agrupamentos e subsídios à compreensão de fenômenos geográficos

O mapeamento da colheita é representado por dados, devidamente classificados, do tipo matricial. Cada porção do terreno classificado possui informações como área, perímetro e sua respectiva classificação quanto ao modo de colheita. As classes são: cana-crua (colheita sem uso do fogo), cana-queima (com uso do fogo) ou cana bisada (não colhida). A transformação desta estrutura matricial ainda pode ser feita, opcionalmente, para o tipo vetorial. A partir de sua disposição espacial e de técnicas de geoprocessamento pode-se obter informações quantitativas e qualitativas que são organizadas dentro de um Sistema de Informação Geográfica.

Graças a tais sistemas, cada vez mais eficientes e com interfaces mais amigáveis, o estudo de padrões de ocorrência de fenômenos no espaço vem sendo bastante difundido para várias áreas como Agronomia, Geografia, Epidemiologia, dentre outros (CÂMARA et al., 2004a). Assim, a ênfase em análise espacial é permitir a identificação de propriedades e relacionamentos entre entidades incorporando a variável espaço.

No campo da geoinformação, a regionalização é entendida por um procedimento que constitui a função de agrupamentos de objetos-área em regiões homogêneas e contíguas no espaço (NEVES et al., 2002). A fim de alcançar tal objetivo, busca-se uma nova repartição do espaço de estudo em um número menor de objetos, resultando em novas áreas ou regiões com dimensões geográficas mais abrangentes e mais homogêneas. Pesquisas recentes evidenciaram um comportamento regionalizado das plantações e do manejo da colheita da cana-de-açúcar para dados agregados por municípios (AGUIAR et al., 2007a; NOVAES et al., 2009).

Em uma análise exploratória espacial, é fundamental verificar a caracterização

da dependência espacial, identificando como atributos de um fenômeno estudado estão correlacionados no espaço. Índices globais de autocorrelação espacial se mostram eficientes em áreas de estudos socioeconômicos e de exclusão social (SPOSATI, 1996), violência (CRUZ, 1996) e na agricultura (AGUIAR et al., 2007a). Estes índices identificam, em uma análise exploratória, a dependência espacial a partir da estimativa dos valores entre a respectiva vizinhança (CÂMARA et al., 2004b).

Um índice que expressa autocorrelação espacial considerando apenas o primeiro vizinho é o índice global de Moran o qual indica a existência ou não de áreas agrupadas (*clusters*), cujos atributos se apresentam de maneira semelhante no espaço. Para o cálculo deste índice, é indispensável a hipótese de que os dados sejam estacionários de primeira e segunda ordem (CÂMARA et al., 2004b). Uma das formas de avaliar se o dado é ou não estacionário, além de olhar atentamente o mapa em busca de padrões, é utilizar uma função de autocorrelação espacial considerando vizinhos de diversas ordens. O índice global de moran expressa a autocorrelação de atributos entre pares em função de suas respectivas distâncias. Quando o dado não é estacionário, a função decresce muito lentamente (SOUZA et al., 2007). O índice global de Moran I é expresso de acordo com a fórmula abaixo:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (2.1)$$

em que:

n corresponde ao número de áreas;

z_i é o valor do atributo considerado na área i ;

\bar{z} é o valor médio do atributo na região de estudo e

w_{ij} são os pesos atribuídos conforme a conexão entre as áreas i e j .

O índice de Moran testa a hipótese nula de independência espacial. Caso a hipótese se confirme, o valor deste índice tende a 0. Valores positivos (entre 0 a +1) indicam uma correlação direta e valores negativos (entre 0 a -1), correlação inversa; ambas, entretanto apontam para dependência espacial. Além de calcular o índice, é necessário estimar a sua significância. Segundo Câmara et al. (2004b), uma forma usual de realizar esse teste é supor a distribuição estatística como normal ou realizar um teste de pseudo-significância¹.

Uma maneira interessante de visualizar os dados de dependência espacial é através do Diagrama de Espalhamento de Moran (CÂMARA et al., 2004b). Este consiste em comparar, através de um gráfico bidimensional, os valores normalizados² (z) com a média dos seus vizinhos (wz). O gráfico pode ser interpretado dividindo-o em quatro quadrantes e o índice de Moran equivale ao coeficiente de regressão linear que indica a inclinação angular da reta de regressão (α) de wz em z . Neste gráfico bidimensional (Figura 2.3), pode-se visualizar a quantidade de entidades que se encontram diretamente e inversamente correlacionadas espacialmente com seus vizinhos.

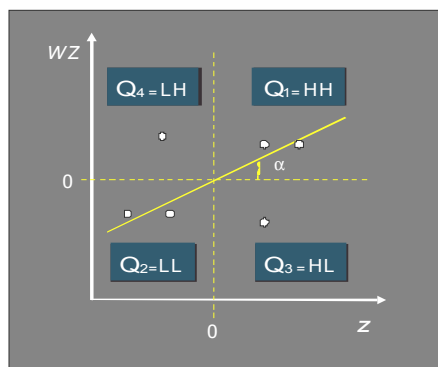


Figura 2.3 – Diagrama de Espalhamento de Moran.
Fonte: Souza et al. (2007).

-
- 1 Para mais detalhes sobre o teste de pseudo-significância, consultar Câmara et al. (2004b) e Bailey e Gatrell (1996).
 - 2 Por valores normalizados, entende-se aqueles valores associados ao atributo estudado, subtraídos de sua média e divididos pelo desvio padrão.

Segundo Câmara et al. (2004b), os quadrantes podem ser interpretados como:

- Q1 (altos valores normalizados correlacionados com alta média dos valores vizinhos – *High-High*) e Q2 (baixos valores normalizados correlacionados com baixa média dos valores vizinhos – *Low-Low*) indicam pontos de associação espacial positiva, no sentido que uma localização possui vizinhos com valores semelhantes.
- Q3 (altos valores normalizados com baixa média dos valores vizinhos – *High-Low*) e Q4 (baixos valores normalizados com alta média dos valores vizinhos – *Low-High*) indicam pontos de associação espacial negativa, no sentido que uma localização possui vizinhos com valores distintos. Estes, dependendo do fenômeno, podem indicar áreas suscetíveis à transição de valores baixos para altos, ou vice-versa.

Em casos em que o analista tem de analisar diversas áreas, é muito provável que esteja contido no conjunto de dados mais de um regime de associação espacial. Desta maneira, os indicadores de autocorrelação global, como o índice de Moran, irão examinar a região de estudo em sua totalidade, mas irão restringir análises em busca de padrões mais locais. Para superar isso, é necessário utilizar indicadores de associação espacial que possam ajustar-se às diferentes localizações de uma variável distribuída espacialmente. Segundo Anselin (1995), o LISA (Local Indicator of Spatial Association) pode evidenciar agrupamentos em que ocorram diferentes regimes espaciais, pois se obtém também um indicador correspondente à subárea composta pelos vizinhos, e é calculada, para cada área, sua significância estatística. O índice local de Moran pode ser expresso para cada área i a partir dos valores normalizados z_i do atributo, como:

$$I_i = \frac{z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n z_j^2} \quad (2.2)$$

em que:

n corresponde ao número de áreas;

z_i é o valor do atributo considerado na área i e

w_{ij} são os pesos atribuídos conforme a conexão entre as áreas i e j .

Anselin (1995) aponta dois objetivos deste indicador. Pode ser interpretado como indicativo de bolsões locais não-estacionários ou *hot spots*, bem como utilizado para identificar *outliers* que influenciam estatísticas de magnitude global. Da mesma forma que o índice Global de Moran, o LISA pode ser plotado em um diagrama de espalhamento e visualizado a partir de um mapa das áreas correspondentes aos quadrantes em que os dados estão posicionados, assim como sua significância estatística ($p=0,05$; $p=0,01$ ou $p=0,001$), como ilustra a Figura 2.4.

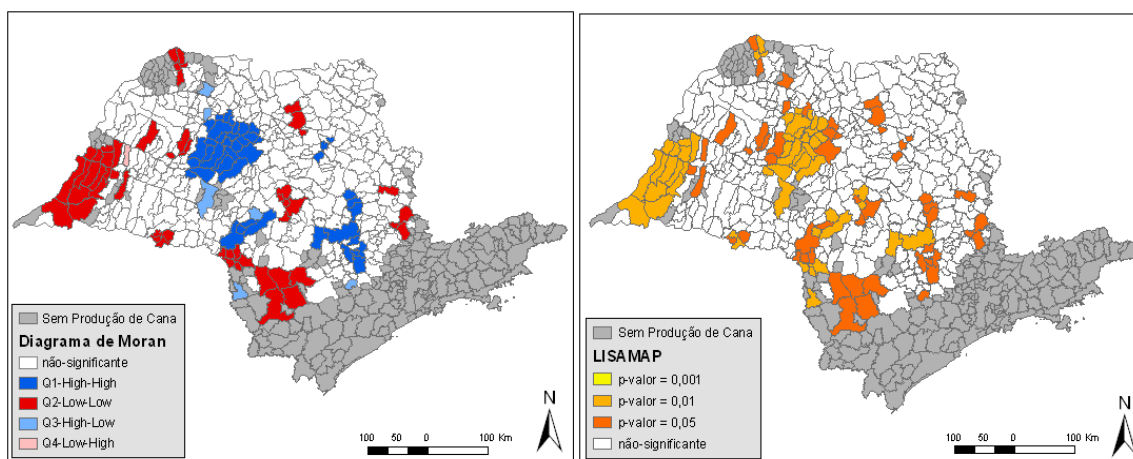


Figura 2.4 – Exemplo de aplicação de LISAMAP ilustrando agrupamentos por significância estatística.

2.6. Modelagem dinâmica espacial no entendimento de mudanças de cobertura e uso da terra e na projeção de cenários

Várias ferramentas em geotecnologia são utilizadas para mapear e modelar fenômenos espaciais. Entre estas, a simulação de sistemas auxilia o entendimento dos fatores que induzem o desenvolvimento do fenômeno, bem como permite representar cenários diversos de possibilidades futuras, segundo quadros socioeconômicos, políticos e ambientais diferentes (SOARES FILHO et al., 2001). Estas simulações são baseadas em modelos que, segundo Briassoulis (2000), podem se classificar, segundo aspectos metodológicos e funcionais, como modelos estatísticos ou econométricos; de interação espacial; de otimização; modelos integrados (incorporando modelos gravitacionais, de simulação e de entrada-saída); baseados em ciências naturais; baseados em SIG e modelos baseados na cadeia de Markov.

Segundo Openshaw (2000), as simulações ou modelos computacionais geram informações qualitativas e quantitativas de fenômenos complexos da natureza. Para Burrough (1998), estes modelos de dinâmica espacial definem-se como representações matemáticas de processos ou fenômenos do mundo real, nos quais o estado de uma dada localização no espaço se modifica em resposta às alterações nas suas variáveis explicativas. Para um melhor entendimento de fenômenos espaciais explicitamente dinâmicos, como expansão urbana e mudanças do uso e do solo, é necessário a condução de experimentações com o uso de modelos espaço-temporais. O objetivo destes modelos, segundo Câmara e Monteiro (2003), é a análise e simulação numérica de processos do mundo real, em que os estados do modelo se modificam ao longo do tempo em função de diversas condições de entrada.

Neste trabalho, o modelo adotado para a quantificação de mudanças de uso e cobertura da terra é baseado na cadeia de Markov. Este modelo descreve certo tipo de processo, que se move em uma sequência de passos e através de um

conjunto de estados³. A vantagem no uso da cadeia de Markov reside na possibilidade de seus parâmetros serem facilmente estimados estatisticamente, a partir de uma amostra de transições ocorridas durante algum intervalo de tempo. Devido à sua simplicidade, é requerida apenas a definição de um número finito de estados e o conhecimento das probabilidades de transição. Todavia, supõe-se que a probabilidade de um conjunto particular de saídas depende unicamente da distribuição atual entre os estados e das probabilidades de transição, além de considerar que a matriz de transição relativa ao fenômeno estudado é estacionária, o que nem sempre ocorre nos processos ambientais dinâmicos.

O modelo desta pesquisa também se baseia no conceito de autômatos celulares (*cellular automata* - CA). Segundo Wolfram (1983), os autômatos celulares são idealizações matemáticas dos sistemas físicos, no qual o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Apesar dos modelos iniciais serem pensados em função do entendimento da dinâmica urbana, recentemente ocorreram sucessivos melhoramentos, os quais passaram incorporar dimensões ambientais, socioeconômicas e políticas (ALMEIDA et al., 2007b). Os modelos baseados em CA tornaram-se populares e apresentam simplicidade operacional, apesar de incorporar uma complexidade suficiente para simular mudanças inesperadas no uso da terra. Além disso, são extremamente flexíveis por se articularem com dados matriciais, amplamente utilizados nos SIG.

Os CA consistem em uma grade regular uniforme, com uma variável discreta em cada localidade (atributo ou estado da célula), que evolui em passos de tempo discretos. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as outras células de vizinhança estritamente locais, onde as transições ocorrem única e simplesmente em função do que

3 Para mais detalhes sobre o modelo da Cadeia de Markov, consultar Baker (1989) e Almeida (2004).

acontece na vizinhança imediata de uma dada célula.

No processo de modelagem, as variáveis explicativas irão determinar as relações de influência com a variável dependente, e assim se definem as células com maior ou menor probabilidade de transição de cobertura da terra. Para isso, é necessária uma calibração dos dados através de métodos estatísticos, entre os quais, pode-se exemplificar o de pesos de evidência ou *weights of evidence* (BONHAM-CARTER, 1994; SOARES FILHO et al., 2008). Este método baseia-se no teorema bayesiano da probabilidade condicional, no qual se pode calcular o efeito de cada variável espacial em determinada transição, também chamada de evento, independente de uma solução combinada (GODOY; SOARES FILHO, 2007). Através da combinação das variáveis pelo somatório de seus pesos de evidência, podem-se obter mapas de probabilidade de mudança (Figura 2.5) os quais indicam as áreas mais favoráveis para determinada transição.

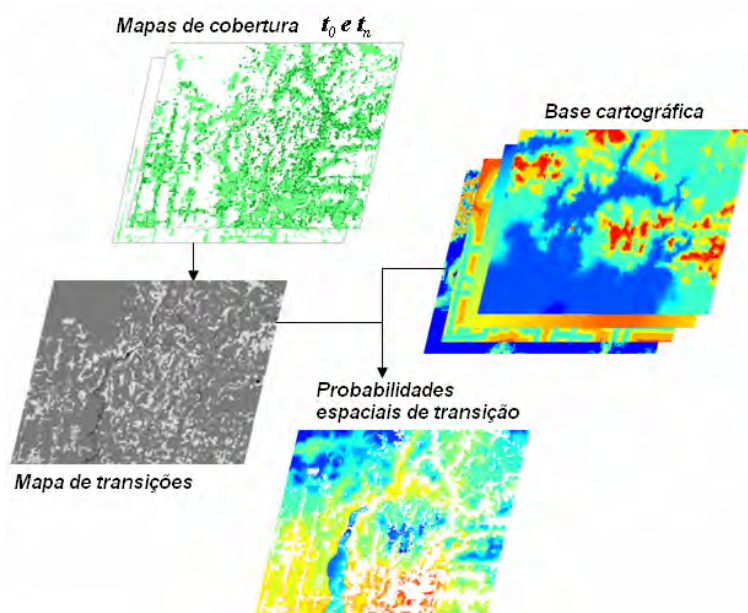


Figura 2.5 – Esquema ilustrativo de obtenção do mapa de probabilidades com base no cálculo dos pesos de evidência para determinada transição.
Fonte: Soares Filho et al. (2008)

A escolha das variáveis que irão compor o modelo pressupõe que elas não sejam correlacionadas entre si. Testes com a finalidade de avaliar se as variáveis explicativas estão associadas ou possuem dependência espacial são citados por Bonham-Carter (1994), como o Índice de Cramer (V) e *Joint Information Uncertainty* (JIU) ou “Índice de Incerteza de Informação Conjunta”. Enquanto o primeiro opera com valores reais, o segundo opera com valores percentuais de áreas de sobreposição entre diferentes categorias como, por exemplo, faixas de distâncias de dois mapas de variáveis explicativas.

Segundo Almeida et al. (2007a), o *Joint Information Uncertainty*, por trabalhar com valores relativos de áreas de sobreposição, tende a ser mais robusto que o Índice de Cramer, evitando a tendenciosidade representada por valores absolutos de áreas. Segundo Godoy e Soares Filho (2007), variáveis correlacionadas podem ser eliminadas ou combinadas em uma terceira, que integrará o modelo definitivo.

As probabilidades globais de transição referem-se à quantia total de mudanças para o tipo de transição considerada no período de simulação. Este tipo de probabilidade global de transição é calculado através de tabulação cruzada, que produz como saída uma matriz de transição entre os mapas de uso ou cobertura inicial e final (XIMENES et al., 2008).

Outro tipo de cálculo é o de probabilidade local de transição, em que são calculadas as probabilidades de transição de cada célula considerando particularidades naturais e antrópicas do sítio físico. Para esse fim, é utilizada uma equação que converte a fórmula de logit⁴ para uma fórmula de probabilidade condicional comum. conforme a seguinte equação:

4 O logit corresponde ao logaritmo natural da chance ou odds, que consiste na razão entre a probabilidade de transição da cobertura ou uso ocorrer e a probabilidade complementar de não ocorrer.

$$P(T_i^\alpha / V_i^1, \dots, V_i^{m_\alpha}) = O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} W_{i,v}^+} / 1 + \sum_{\eta} O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} W_{i,v}^+} \quad (2.3)$$

$$W_{i,v}^+ = \log_e \frac{P\{V_i/T\}}{P\{V_i/\bar{T}\}} \quad (2.4)$$

em que:

P corresponde à probabilidade de transição T de cobertura e uso da terra; i corresponde a uma notação de posicionamento das células da área de estudo, definido em termos de coordenadas x,y ; α representa um tipo de transição de cobertura ou uso da terra, p.ex., de uma classe c para uma classe k , em um total de η transições; V_i^1 corresponde à primeira variável observada na célula i , utilizada para explicar a transição α ; $V_i^{m_\alpha}$ corresponde à m -ésima variável observada na célula i , utilizada para explicar a transição α ; $O(T_i^\alpha)$ representa o *odds* da transição T^α na i -ésima célula, expresso pela razão entre a probabilidade de ocorrência de T_i^α e a probabilidade complementar, isto é, $P(T_i^\alpha) / P(\bar{T}_i^\alpha)$; e $W_{i,v}^+$ corresponde ao peso positivo de evidência para a i -ésima célula referente à v -ésima variável.

Os resultados dos pesos de evidência são utilizados para parametrizar o modelo de simulação, relativo à dinâmica espacial do fenômeno estudado. O método implementado por Soares Filho et al. (2008) calcula faixas ou intervalos de acordo com a estrutura dos dados que se apresentam sob a forma de grades contínuas, visto que o método de pesos de evidência opera apenas com variáveis categóricas. Para o fatiamento dessas grades, plota-se em um gráfico o número total de células (An) por incremento no eixo x . O incremento

(Dx) é um valor arbitrário, definido pelo usuário, para a criação de faixas relativamente constantes de valores no eixo x . É um artifício para se organizar o gráfico. Normalmente, adota-se a própria resolução espacial no caso de grades de distância, e valores quaisquer para as outras grades, fornecidos na mesma unidade da correspondente variável contínua, desde que façam sentido do ponto de vista do fenômeno representado. Por exemplo, em uma grade de altimetria, o incremento pode ser 5 metros para uma região mais plana, e 10 metros para uma região de relevo mais acidentado; em uma grade de declividade, o incremento pode variar de 1° a 6° , e assim por diante.

Neste gráfico, construído para cada uma das variáveis contínuas, cada n define um limiar que divide o mapa em duas classes (Nx) e (Nx'), em que Nx representa um *buffer*, por exemplo 0 a 30m, e Nx' , o resto do mapa (p. ex. > 30m); An equivale ao número de células de um *buffer* (Nx), e dn , o número de células da ocorrência da transição ou evento (D) dentro deste *buffer*. As quantidades An e dn são obtidas através de uma seqüência ordenada de *buffers* $N(x_{\text{mínimo}} + nDx)$. Em seguida, são calculados os pesos positivos de evidência (w^+) para cada *buffer* com base na Equação 2.4 (SOARES FILHO et al., 2008). No eixo y do gráfico, plota-se, para cada número cumulativo de células (An) por incremento, um Yn que corresponde a um produto entre An e e^{w^+} .

Na Figura 2.6, é apresentado um gráfico exemplificando uma seqüência plotada de An por $An \cdot e^{w^+}$. São gerados gráficos determinados por pontos de quebra com base em três parâmetros: 1) intervalo mínimo de distância no eixo x ($mindx$), dado em número de células; 2) intervalo máximo de distância no eixo x ($maxdx$), dado igualmente em número de células, e 3) ângulo de tolerância (ft), fornecido em graus. Para cada Dx (a distância entre dois pontos no eixo x),

5 e^{w^+} equivale a e (número de Euler = 2,718281) multiplicado pelo valor do peso positivo de evidência.

entre $mindx$ e $maxdx$, um novo ponto de quebra será colocado cada vez que $Dx \geq maxdx$, ou sempre que um ângulo entre a reta v e v' (dois vetores que ligam o ponto atual ao último ponto, e o último ponto a seu antecedente, respectivamente) ultrapassam o ângulo tolerância ft . Portanto, ao se aumentar ft , diminui-se o número de intervalos ou faixas. Esses intervalos são finalmente definidos ao se unir os pontos de quebra com linhas retas.

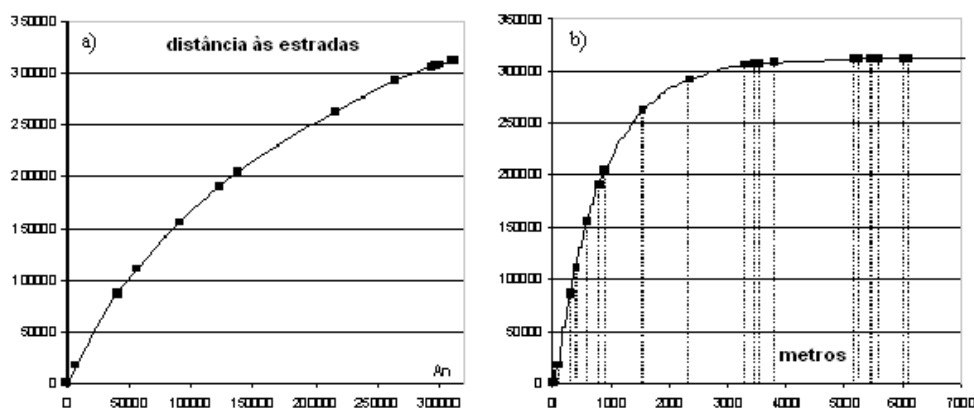


Figura 2.6. Exemplo de seqüência plotada An por $An \cdot e^{w^+}$ da variável “distância às estradas”.

Fonte: Soares Filho et al. (2008).

Apesar de An praticamente não apresentar erros, dn está sujeito a uma quantidade considerável de incertezas, porque é considerada como a realização de uma variável aleatória. Uma vez que pequenos valores de An podem gerar valores com ruído para w^+ , Goodacre et al. (1993) *apud* Soares Filho et al. (2008) sugerem que, ao invés de utilizar a Equação 2.4, pode-se estimar w^+ para cada faixa de pesos através da expressão a seguir:

$$W^+ = \ln \left(\frac{y_{n=k} - y_{n=k-1}}{A_{n=k} - A_{n=k-1}} \right) \quad (2.5)$$

em que:

$$y_n = An. e^{v^+};$$

k = pontos de quebra definidos para os n incrementos (Dx).

As transições das células podem ocorrer de várias formas dentro de um modelo. Duas funções responsáveis pela alocação de mudanças de cobertura e uso da terra foram implementadas por Soares Filho et al. (2002) na plataforma de modelagem: *expander* e *patcher*. Segundo o autor, a função *expander* responde pela expansão de manchas previamente existentes de certa classe de cobertura ou uso da terra, enquanto a função *patcher* destina-se a gerar novas manchas, através de um mecanismo de constituição de sementes. Em outras palavras, a função *expander* executa transições de um estado j somente nas vizinhanças adjacentes de células com o estado j . Já a função *patcher* realiza transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças imediatas de células com estado diferente de j (ALMEIDA; GLERIANI, 2007).

Para a avaliação de um modelo, é necessária a comparação do mapa final simulado com um mapa referência, através de técnicas que irão quantificar o grau de semelhança entre ambos. Uma forma de aplicação é através de medidas de similaridade *fuzzy* em um contexto de vizinhança local. Entre diversos métodos que visam avaliar a similaridade de padrões espaciais, pode-se citar o método de Hagen (2003), que se baseia no conceito de *fuzziness of location* (Figura 2.7), o qual se encontra implementado na plataforma de modelagem utilizada neste trabalho, intitulada DINAMICA EGO (SOARES FILHO et al., 2008), desenvolvida pela equipe do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG).

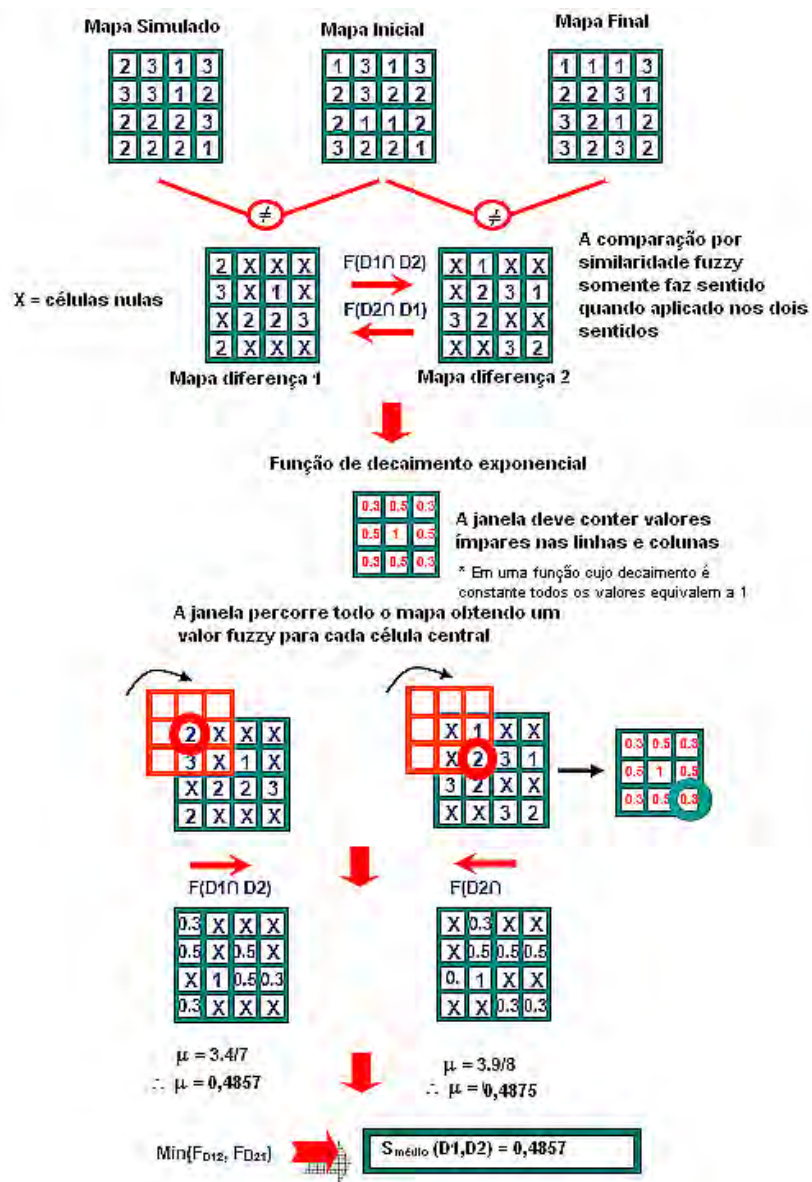


Figura 2.7 – Esquema ilustrativo do método de Hagen (*fuzziness of location*) utilizando decaimento exponencial.
Fonte: Soares Filho et al. (2008).

Neste método, a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança, em janelas de tamanhos variados de 1x1 até 13x13 pixels. O vetor de vizinhança “*fuzzy neighborhood*” representa a dubiedade de localização. Através deste método, um vetor exato é associado a cada célula no mapa e possui tantos elementos

quantos forem as classes de cobertura da terra dos mapas, assumindo 1 para a categoria = i , e 0 para categorias diferentes de i , no caso de decaimento constante. Todavia, pode-se utilizar o método com decaimento exponencial, no qual categorias = i que estejam em posições distantes do centro da janela, porém dentro dela, recebem valores correspondentes a $2^{-d/2}$. A distância d é dada em unidade de célula, isto é, de centróide a centróide, $d = 1$, e, na diagonal, $d = \sqrt{2}$. O vetor *fuzzy neighborhood* para cada célula é expresso por:

$$V_{nbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood 1} \\ \mu_{nbhood 2} \\ \vdots \\ \mu_{nbhood C} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mu_{nbhood} = \left| \mu_{crisp(i,1)} * m_1, \mu_{crisp(i,2)} * m_2, \dots, \mu_{crisp(i,n)} * m_n \right| \quad (2.7)$$

em que:

$\mu_{nbhood i}$ representa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de N células (normalmente $N=n^2$);

$\mu_{crisp ij}$ é a pertinência da categoria i para a célula vizinha j , assumindo-se no vetor *crisp* 1 para i , e 0 para categorias diferentes de i ($i \in C$);

m_j é a pertinência baseada em distância da célula vizinha j , em que m refere-se a uma função de decaimento da distância, que pode ser constante ou exponencial.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo compreende, inicialmente, toda a extensão territorial do estado de São Paulo, uma vez que o protocolo ambiental em prol da extinção da prática da queima na colheita da cana-de-açúcar, principal justificativa do presente trabalho, é válido para este estado. São Paulo localiza-se, aproximadamente, entre os paralelos 19° 05' e 25° 00' sul e os meridianos 44° 00' e 53° 05' oeste e está inserido na região sudeste do Brasil, com uma área total de 248.209 km², contendo 645 municípios e um total de população estimado, em 2007, em torno de 39.827.570 de pessoas, ou seja, concentra mais de 20% de toda a população do país (IBGE, 2009b). Além de ser o estado responsável por grande parte do PIB brasileiro, este concentra, atualmente, cerca de 60% do total de área cultivada de cana-de-açúcar no país (Figura 3.1) e que representa cerca de 19% do território do estado.

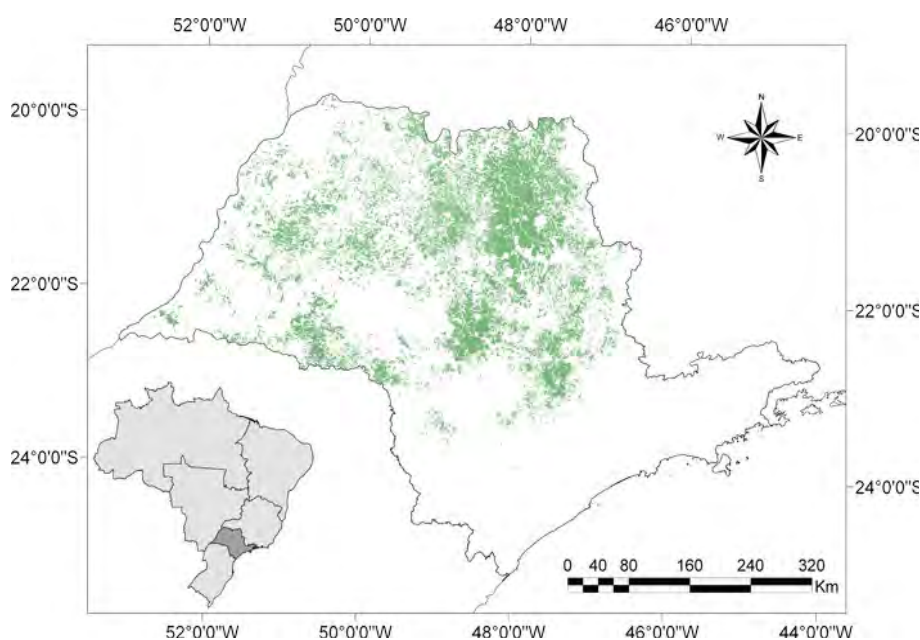


Figura 3.1 – Localização das áreas canavieiras no estado de São Paulo em 2008.
Fonte: CANASAT (2009).

Em razão das análises pretendidas para este trabalho não serem factíveis de serem executadas para todo o estado em tempo hábil, devido à grande extensão do território paulista, foram escolhidas quatro regiões de estudo cujo manejo da colheita da cana fosse diferente entre si nos últimos três anos. As regiões de estudo são apresentadas na Figura 3.2 e o procedimento para a escolha destas regiões encontra-se na Seção 3.3.

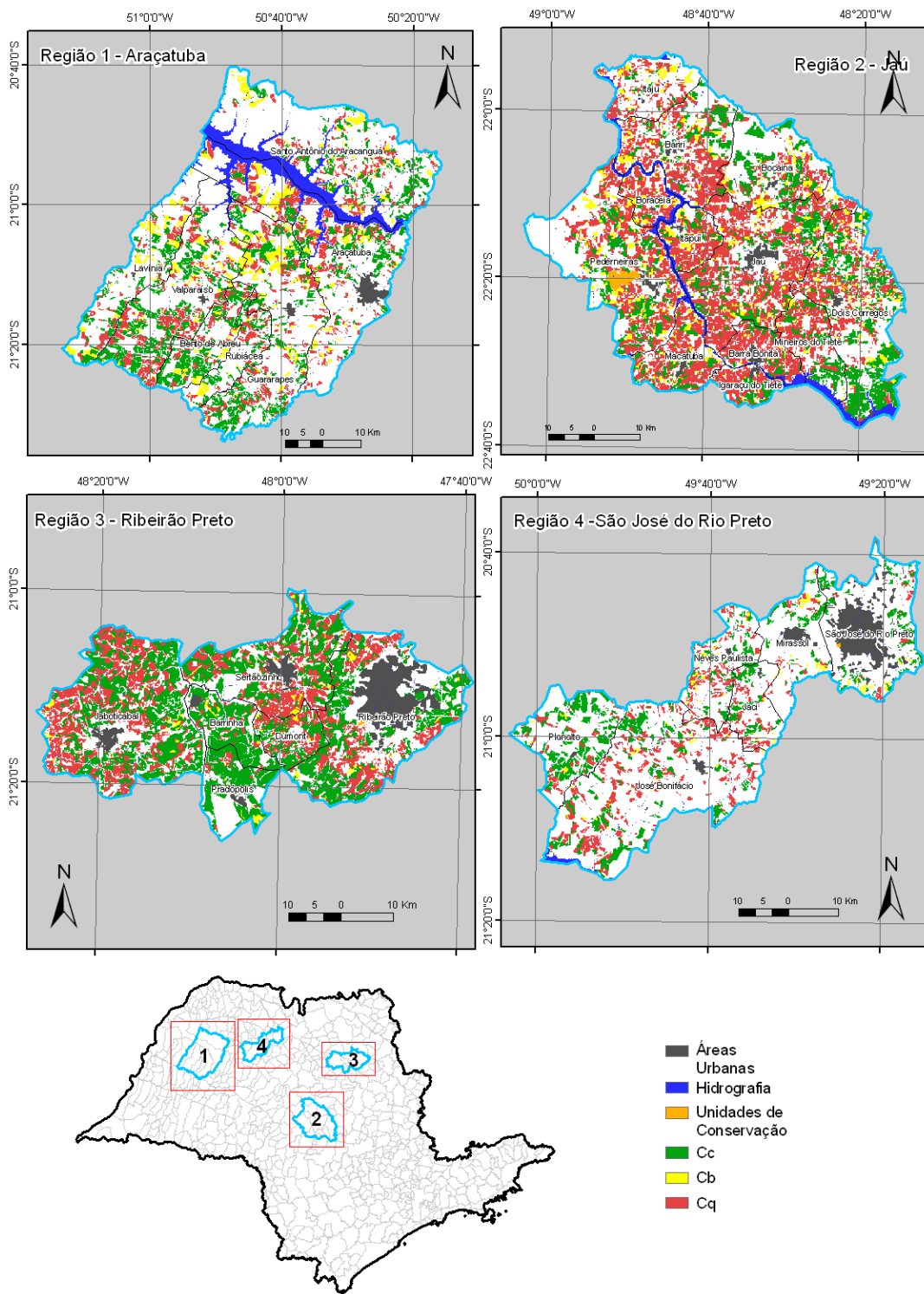


Figura 3.2 – Localização das regiões de estudo no estado de São Paulo.

a. Região 1

A região 1 está localizada entre os paralelos 21° 33' 54,33" e 20° 40' 11,73" sul e os meridianos 51° 13' 32,65" e 50° 15' 34,15" oeste e comporta os municípios de Araçatuba, Bento de Abreu, Guararapes, Lavínia, Rubiácea, Santo Antônio do Aracanguá e Valparaíso. A área de estudo em questão coincide com a microrregião do IBGE de Araçatuba e compreende grande parte da região administrativa (RA) de Araçatuba, a qual possui destaque na multimodalidade de transporte de diversas mercadorias. Propiciada pela boa estrutura rodoviária, hidroviária e ferroviária, estas características deram à região uma posição estratégica de comércio tornando-a importante rota de fluxo à região Centro-Oeste do país.

Devido à inauguração da linha ferroviária, desde 1908, passou a incorporar um fluxo de imigrantes para o trabalho nas lavouras de café. Após este período, a região presenciou um aumento nas atividades ligadas à pecuária, especialmente a de corte, liderando este setor e formando um importante pólo produtor de calçados e artefatos de couro. Já nos anos 1970, o cultivo da cana-de-açúcar se expandiu, e ali várias usinas e destilarias se instalaram em diversos municípios da região com o estímulo do programa Pró-Álcool (F. SEADE, 2009). Atualmente, a região acompanha a retomada das políticas em prol dos biocombustíveis e conta com diversas usinas e outros futuros projetos em implantação.

A região conta com uma taxa de crescimento populacional anual baixa, e apesar da grande extensão territorial sua população é esparsa, chegando a aproximados 38,9 habitantes por km², bastante inferior ao do estado, com 165,8 hab./km² (IBGE, 2009a). Em contrapartida, trata-se de uma região em grande ascensão, com destaque para a agroindústria predominante e da forte presença dos segmentos de produtos alimentícios e álcool combustível. Além disso, ainda possui uma base educacional, que contribui para o

desenvolvimento deste setor através da presença de entidades de educação profissional, com cursos técnicos ligados ao setor de bioenergia (F. SEADE, 2009).

Segundo a Secretaria de Planejamento do estado de São Paulo (F. SEADE, 2009), o crescimento acentuado das lavouras canavieiras vem se promovendo desde 2001, contando com diversos fatores. Dentre estes, destacam-se: a baixa declividade na região, permitindo a mecanização; o preço da terra mais barato em relação a áreas mais tradicionais deste tipo de cultivo, além da boa infraestrutura logística que dispõe esta região, facilitando o escoamento da produção com diversas possibilidades de transporte intermodal.

A mudança do uso do solo vem marcando intensamente esta região. A tradicional atividade pecuária vem cedendo lugar à cultura da cana-de-açúcar. Segundo dados do CANASAT (2009), esta região teve suas áreas de lavouras canavieiras expandidas de aproximadamente 119.000 para cerca de 173.000 ha somente entre 2006 e 2008, ou seja, um crescimento de mais de 45% em um período de dois anos.

b. Região 2

A região 2 está localizada entre os paralelos 22° 56' 11,00" e 21° 34' 27,00" sul e os meridianos 49° 20' 30,00" e 47° 57' 20,00" oeste e comporta os municípios de Bariri, Barra Bonita, Bocaina, Boracéia, Dois Córregos, Igarapé do Tietê, Itaju, Itapuá, Jaú, Macatuba, Mineiros do Tietê e Pederneiras. Esta área de estudo situa-se na porção leste da Região Administrativa de Bauru e possui uma condição privilegiada para o comércio, como infraestrutura de comunicações e transporte, dispondo de acesso facilitado ao Porto de Santos, à capital e às demais regiões do estado.

No início do século XX, a expansão do café e a chegada da estrada de ferro marcaram fortemente esta região, atraindo investimentos devido à sua posição

estratégica como escoadouro da produção para a capital e o Porto de Santos. Assim, novas aglomerações urbanas surgiram com a implantação da Estrada de Ferro Sorocabana e Estrada de Ferro Noroeste do Brasil em 1905 e 1906, respectivamente. Por tratar-se de entroncamento ferroviário e base logística para a penetração do sertão, a região em torno de Bauru e Jaú estabeleceu-se como centro regional e pólo de atração de imigrantes motivados pela expansão das atividades agrícolas (F. SEADE, 2009).

No que tange à caracterização ambiental da região, pode-se destacar o uso intensivo do solo, apresentando um grau de erosão entre médio e alto. A bacia do rio Jaú apresenta um crescente processo de degradação ambiental devido à expansão da cana-de-açúcar na área rural e atividades humanas em centros urbanos (F. SEADE, 2009).

A especialização regional das atividades nesta região é baseada na indústria de calçados, que se concentra especialmente no município de Jaú e entorno, devido ao pólo de sapatos femininos neste município, além da produção de combustível, que aglutina usinas de álcool. Jaú, em 2006, foi o 5º maior produtor de cana-de-açúcar do estado; contudo, o manejo da colheita costuma ser realizado com o uso do fogo e, neste ano, foi queimada cerca de 90% da área (CANASAT, 2009)

c. Região 3

A região 3 está localizada entre os paralelos 21º 45' 54,60" e 20º 37' 49,19" sul e os meridianos 48º 45' 53,02" e 47º 18' 48,32" oeste e abrange os municípios de Barrinha, Dumont, Jaboticabal, Pradópolis, Ribeirão Preto e Sertãozinho. Esta região, situa-se na porção centro-oeste da Região Administrativa de Ribeirão Preto, a qual é servida por uma extensa rede viária multimodal, composta por rodovias, estradas, ferrovia e aeroporto. Conta com fácil acesso a diferentes regiões do estado, como Campinas e São Paulo, além da

articulação provida pela Via Anhanguera em direção ao estado de Minas Gerais e pela SP-333 com acesso ao norte do Paraná.

Tal como as duas regiões citadas anteriormente, ela também teve êxito devido ao desenvolvimento da cultura cafeeira no começo do século XX, com o apogeu por volta de 1920 após a chegada maciça de imigrantes italianos. Este ciclo propagou o surgimento de vários aglomerados urbanos, indústria, comércio atacadista e serviços de apoio à produção, enfim, promoveu um desenvolvimento na dinâmica urbano-industrial desta região. No entanto, o setor sofreu retração na década seguinte, devido à crise da bolsa, com saldo negativo para a economia local. Com a decadência do café, foram introduzidas novas culturas e novas indústrias na região (F. SEADE, 2009).

Na década de 1970, com o programa Pró-Álcool, a expansão da cana-de-açúcar e a proliferação de usinas de açúcar e álcool, além da ampliação da rede viária regional, trouxeram crescimento econômico. Tal prosperidade implicou, também, na especialização do setor terciário, que atualmente atende a um mercado diferenciado, especialmente no que tange à saúde e educação. A implantação das usinas e expansão da cana nesta década incentivou o crescimento populacional, incrementando melhorias na malha viária já existente, consolidando um sistema logístico de qualidade nesta região (F. SEADE, 2009).

Segundo a Secretaria de Planejamento do estado de São Paulo (2009), a configuração do espaço agrário nesta região é diversificada e moderna. A produção agropecuária responde por menos de 10% do PIB regional, porém, mais de 70% do valor agregado são relativos à produção da cana-de-açúcar, cujo setor tem conquistado ganhos significativos de produtividade, inclusive, devido à mecanização da colheita. O município de Jaboticabal possui a segunda maior área cultivada de cana-de-açúcar (CANASAT, 2009), com cerca de 20.000 mil ha colhidos de modo mecanizado, sendo o terceiro município

com maior área colhida desta forma em 2006.

A modernização da agroindústria do açúcar e do álcool promoveu investimentos em pesquisa e desenvolvimento, propiciando uma diversificação de suas atividades. Dentre elas, pode-se destacar a produção de insumos a partir da cana, como plásticos e enzimas, bem como a geração de energia oriunda do aproveitamento do bagaço da cana (F. SEADE, 2009).

d. Região 4

A região 4 está localizada entre os paralelos 21° 35' 54,00" e 20° 19' 1,00" sul e os meridianos 50° 21' 8,00" e 20° 19' 1,00" oeste e abrange os municípios de Jaci, José Bonifácio, Mirassol, Neves Paulista, Planalto e São José do Rio Preto. Esta área de estudo insere-se na Região Administrativa de São José do Rio Preto, a qual se caracteriza por uma estrutura de logística de transporte multimodal composta por rodovias que ligam a região ao centro-oeste, sul de Minas Gerais, norte do Paraná, ao município de São Paulo e ao Porto de Santos. Esta região apresenta relevo uniforme, com predomínio de amplitude topográfica em torno de 500 m, distribuindo-se a topografia do terreno em 78% ondulada, 19% plana e 3% montanhosa. Os solos desta região são suscetíveis à erosão (F. SEADE, 2009).

Esta região destacou-se em meados de 1930 por sua grande atividade agropecuária, respondendo por cerca de 14% da produção agrícola e 20% dos bovinos do estado (F. SEADE, 2009). Esta região também sofreu com a crise do café e da bolsa de 1929, abrindo espaço para a expansão da indústria e de alguns produtos agrícolas, como algodão e açúcar.

Beneficiada com o programa Pró-Álcool, esta região desempenhou papel estratégico com a ampliação de culturas exportáveis mais dinâmicas, como a cana-de-açúcar para produção de álcool, além da laranja, café e produtos da pecuária (F. SEADE, 2009). Recentemente, parte das áreas de pastagens tem

cedido lugar às lavouras canavieiras em razão do aumento da demanda por etanol. Além do aumento da área plantada, houve também aumento na produtividade com a modernização das práticas agrícolas e um consequente crescimento da produção de açúcar, álcool e derivados. De acordo com dados da União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA, 2009), depois de Ribeirão Preto e Araçatuba, a Região Administrativa de São José do Rio Preto, na qual está contida a região de estudo 4, é a região que tem apresentado maior crescimento nesse setor nos últimos anos.

3.2. Material

O banco de dados espacial foi construído na plataforma SPRING 4.3.3, contendo quatro diferentes projetos, correspondendo às quatro regiões de estudo. Os dados originais utilizados nesta pesquisa são oriundos de classificação supervisionada e não-supervisionada e trabalhos de campo, fruto do monitoramento realizado pelo projeto CANASAT adquiridos em três anos-safra 2006, 2007 e 2008. Os projetos foram criados utilizando sistema de projeção UTM Fuso 22s – datum WGS84, devido à facilidade de manipulação dos dados, cálculo de área e inserção dos mapas de cobertura e uso na plataforma de modelagem. O dado classificado é do tipo matricial, com resolução de 30 m, e possui as classes de cana-crua (sem o uso do fogo); cana-queima (com o uso do fogo), além da cana-bisada (cana não-colhida até o final da época de colheita). Além desse conjunto principal de dados, foram, também utilizadas bases vetoriais para compor o grupo de classes e variáveis de entrada no modelo. Todos os dados utilizados estão apresentados na Tabela 3.1, com seus respectivos sistemas de projeção, datum e fonte de origem.

Tabela 3.1 - Base de dados utilizada nos projetos

| Base de Dados | Sistema de Datum Projeção | | Fonte | Representação |
|--|------------------------------|-------|-----------------------|---------------|
| Vias (contendo, entre outras, ferrovias, rodovias pavimentadas e não-pavimentadas) | LatLong | SAD69 | DER (2001) | Vetorial |
| Malha municipal do Brasil 2007 - 1:250.000 | Policônica | SAD69 | IBGE (2008b) | Vetorial |
| Hidrografia | Policônica | SAD69 | DER (2001) | Vetorial |
| Usinas | Policônica | SAD69 | UNICA (2009) | Vetorial |
| Unidades de Conservação estaduais | UTM - 23s | SAD69 | MMA (2009) | Vetorial |
| Grades de declividade | UTM - 22s | WGS84 | Valeriano. (2004) | Matricial |
| Áreas urbanas em São Paulo | Policônica | SAD69 | Pereira et al. (2006) | Vetorial |
| Mapa classificado da colheita (SP) - 2006 | Policônica | SAD69 | Aguiar et al. (2007b) | Matricial |
| Mapa classificado da colheita (SP) - 2007 | Policônica | SAD69 | Aguiar et al. (2009a) | Matricial |
| Mapa classificado da colheita (SP) - 2008 | Policônica | SAD69 | Aguiar et al. (2009b) | Matricial |

As áreas de estudo desta pesquisa foram obtidas por meio de análise espacial utilizando três plataformas de SIG: TerraView 3.3.0 (VINHAS, L. et al., 2006) para o tratamento das células criadas com 2.000 m de resolução; o GeoDA 0.9.5i (ANSELIN, 2005) para realizar a análise espacial de áreas; e o ArcMap 9.2 (MITCHEL, A., 2001) para manipulação e impressão dos dados mapeados. Já para o processo de modelagem dinâmica, foi envolvido um maior número de plataformas. Devido à necessidade de conversão dos mapas de cobertura e uso da terra e de variáveis, e em função da compatibilidade entre estas plataformas, foi necessário utilizar, em sequência: o SPRING 4.3.3 (CÂMARA et al., 1996) para construção dos mapas de cobertura e das variáveis de entrada no modelo; do IDRISI 3.2 (EASTMAN JR. et al., 1997) e do ERMapper

7.1 (ERDAS, 2008) como plataformas de conversão dos dados e do DINAMICA EGO (SOARES FILHO et al., 2008). Durante o processo de modelagem, foram utilizadas diferentes versões beta desta última plataforma, como 1.3.6, 1.3.7 e 1.3.8, além da mais recente versão estável lançada, 1.4.0. Para a visualização e exportação dos resultados mapeados nesta fase, também foi utilizado o ArcMap 9.2.

3.3. Métodos

Nesta seção será exposta a metodologia (Figura 3.3) empregada na identificação das regiões de estudo, que consiste em uma análise exploratória feita por meio de técnicas de análise espacial de padrões de áreas. Para processar as variáveis de entrada do modelo, bem como a elaboração dos mapas de uso e cobertura inicial e final da colheita da cana, foi necessário construir um banco de dados espacial. Os demais processos relacionados à modelagem espacial dinâmica e métodos de análise de transição de classes também serão descritos nesta seção.

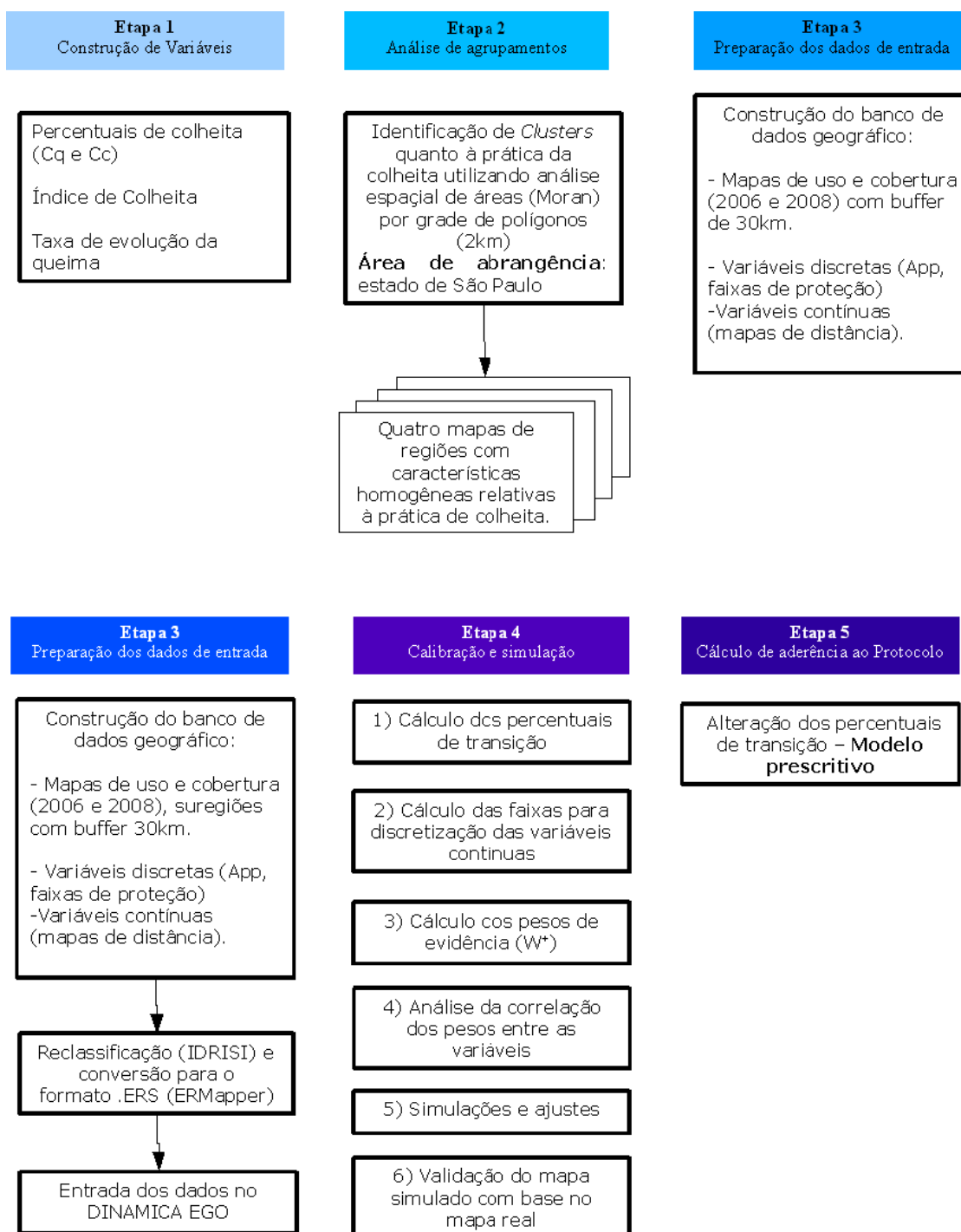


Figura 3.3 – Fluxograma das etapas seguidas na metodologia da pesquisa.

Os mapas temáticos da colheita da cana-de-açúcar utilizados neste trabalho provêm do projeto CANASAT, que vem realizando o monitoramento da colheita desde 2006 por meio de classificações supervisionada e não-supervisionada, seguidas de uma cuidadosa interpretação visual auxiliada por trabalho de campo. Os mapas são do tipo matricial, com resolução de 30 m, possuindo as seguintes classes: cana-crua (Cc; colhida sem o uso do fogo); cana-queima (Cq; colhida com o uso do fogo); e cana-bisada (Cb; cana disponível para colheita mas não-colhida até o final da safra), como é ilustrado na Figura 3.4.

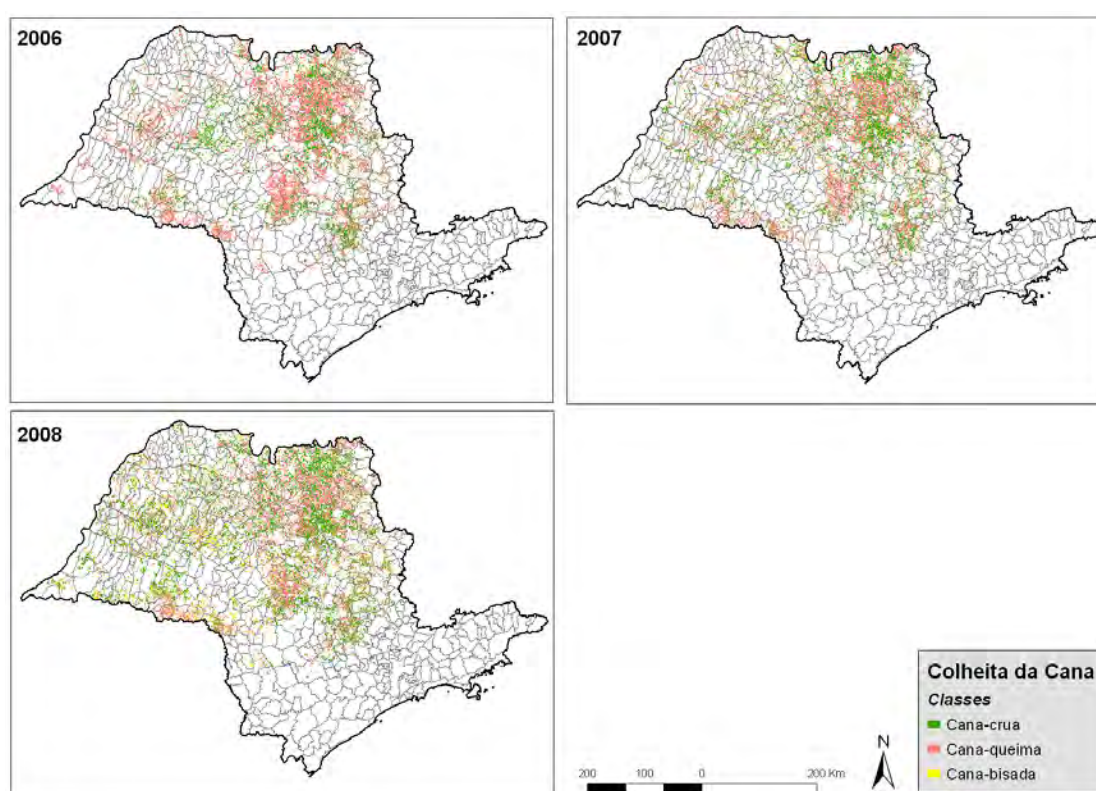


Figura 3.4 – Mapa de colheita da cana em três anos-safra: 2006, 2007 e 2008.
Fonte: CANASAT (2009)

3.3.1. Construção de variáveis

A hipótese inicial consiste na existência de regiões onde o tipo de colheita é similar. Para tal, é necessário realizar uma análise exploratória que identifique possíveis regiões homogêneas quanto ao tipo de colheita da cana. Os atributos

de área provém dos dados originais do mapeamento de cana colhida em resolução de 30 m no formato matricial para todo o estado de São Paulo, obedecendo suas respectivas classes.

Na tentativa inicial de perceber um comportamento espacial regionalizado, foram construídas algumas variáveis com base nos valores de cana-queima e cana-crua colhida:

a) cana-queima colhida no município (Cq) e % de cana-queima colhida em relação à área total colhida no município (PER_Cq);

b) cana-crua colhida no município (Cc) e % de cana-crua colhida em relação à área total colhida no município (PER_Cc);

c) índice de colheita (IC) indica a proporção do tipo de colheita para cada município, em que valores positivos e negativos indicam maior proporção de Cc e Cq , respectivamente;

$$IC = \frac{(\% Cc - \% Cq)}{100} \quad (3.1)$$

d) evolução da queima (EVq) indica a taxa de evolução da prática da queima no município em que valores negativos mostram uma diminuição na prática da colheita com queima;

$$EVq = \frac{(Cq_{Ano2} - Cq_{Ano1}) * 100}{Cq_{Ano1}} \quad (3.2)$$

3.3.2. Identificação da área de estudo através de agregação de atributos por células vetoriais

Em experimento inicial, as variáveis construídas foram calculadas para os dados de área agregados ao limite municipal. Todavia, percebeu-se problemas quanto a diferença de escala dos dados bem como a flutuação aleatória dos dados. O procedimento e resultados da análise espacial realizada a partir de

dados agregados por municípios consta em apêndice.

Com a finalidade de garantir um resultado mais próximo da escala do dado original foi gerada uma grade de células (polígonos) vetoriais com resolução de 2.000 x 2.000 m, abrangendo todo o limite do estado de São Paulo. Em seguida, com o auxílio da plataforma TerraView 3.3.0, por meio da operação geográfica “Atribuir dado por localização”, foi possível agregar atributos de área das respectivas classes de colheita (Cc ou Cq) através da interseção de cada área classificada pelas células geradas. Feito esta atribuição para as células, foi calculado o índice de colheita (IC) para cada célula da grade, obtendo, desta forma, uma espécie de “proporção de queima” para cada espaço de 400 ha. A transformação é, ilustrada na Figura 3.5.

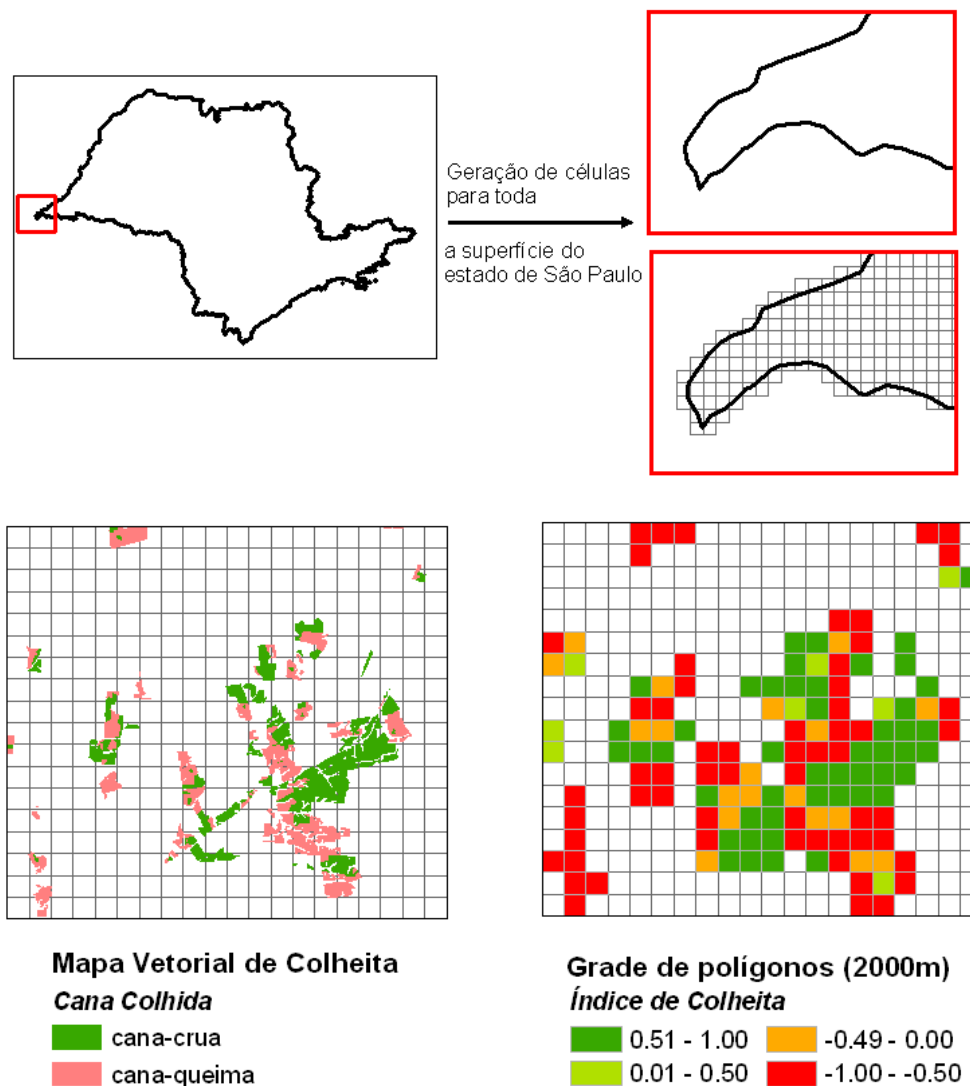


Figura 3.5. Procedimento de geração do índice de colheita para a grade de células com resolução de 2.000 x 2.000 m.

Após o cálculo do índice de colheita para todas as células foi extraída a matriz de proximidade espacial e foram realizados os testes globais de Moran, assim como um mapa representativo dos quatro quadrantes de Moran a um nível de confiança de 95% (LISAMAP). Outros índices, como a evolução e ritmo da queima, foram calculados para este conjunto de células com o intuito de auxiliar na definição das regiões similares.

As regiões de estudo foram selecionadas, de modo a corresponderem ao mesmo padrão de agrupamento espacial obtido pela representação dos quatro quadrantes de Moran. Foram adotados os limites político-administrativos dos municípios para a composição destas regiões. Todavia, não foram detectados *clusters* significativos nos quadrantes 3 e 4 denominados High-Low e Low-High, respectivamente. Como alternativa, foram incorporadas duas importantes regiões que tiveram recente expansão das lavouras de cana no entorno dos municípios de Araçatuba e São José do Rio Preto. Estas regiões possuem uma característica espacial de transição frente ao crescimento das áreas de cana. Entretanto, no período observado entre 2006 e 2008, enquanto a primeira região teve um comportamento mais aderente ao protocolo ambiental, a segunda utilizou mais a prática do fogo em suas lavouras em 2008.

Desta forma, foram selecionadas as seguintes regiões apresentadas na Figura 3.6:

- Região 1 (transição aderente): Araçatuba, Bento de Abreu, Guararapes, Lavínia, Rubiácea, Santo Antônio do Aracanguá e Valparaíso;
- Região 2 (Low-Low): Bariri, Barra Bonita, Bocaina, Boracéia, Dois Córregos, Igarapé do Tietê, Itaju, Itapuí, Jaú, Macatuba, Mineiros do Tietê e Pederneiras;
- Região 3 (High-High): Barrinha, Dumont, Jaboticabal, Pradópolis, Ribeirão Preto e Sertãozinho;
- Região 4 (transição conservadora): Jaci, José Bonifácio, Mirassol, Neves Paulista, Planalto e São José do Rio Preto.

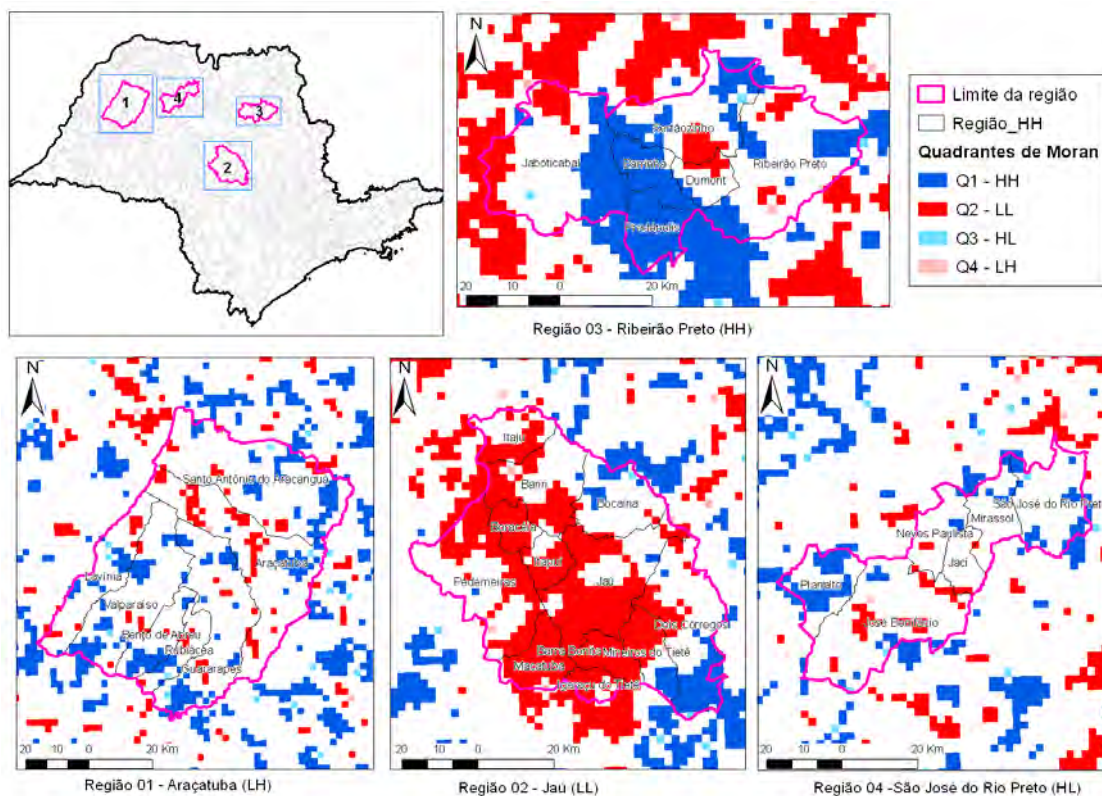


Figura 3.6. Localização das quatro regiões de estudo, conforme a representação dos quadrantes de Moran.

3.3.3. Construção de banco de dados

O banco de dados geográfico foi montado na plataforma SPRING 4.3.3, contendo quatro projetos relativos a cada uma das quatro regiões de estudo. Às regiões de estudo, foram acrescentados *buffers* de 30 km, para reduzir o efeito de borda nas variáveis de distância e no cálculo de distância dinâmica às classes de uso e cobertura do solo – etapa de modelagem que será descrita na Seção 3.3.6.

Um conjunto de variáveis de distância foi selecionado para analisar dinâmica das mudanças ocorridas no período observado. Assim, foram construídos mapas de distâncias às bases vetoriais de: a) hidrografia; b) estradas; c) unidades de conservação; d) usinas; e e) áreas urbanizadas. Com base na Lei

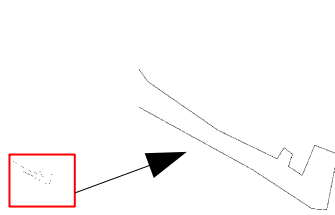
Nº 11.241, que prevê a proibição da queima da palha da cana em certas faixas de distâncias, foram calculados *buffers* fatiados relativos a estas determinações. O resultado deste procedimento são mapas de variáveis discretas: a) áreas de preservação permanente (APP) ao longo de cursos d'água; b) 50 m às unidades de conservação; c) 1 km aos aglomerados urbanos; d) 15 m às principais vias; e) áreas com declividade superior a 12%.

Ao todo foram criados 11 mapas de variáveis de mesmo tamanho (linha; coluna), exportados como grades regulares numéricas (formato ASCII), sendo cinco planos de informação do tipo grade numérica, relativos às distâncias contínuas e seis planos de informação do tipo grade temática, relativos às distâncias discretas para as quatro regiões de estudo, conforme ilustrado na Figura 3.7 (a, b, c, d).

I) APP de rios



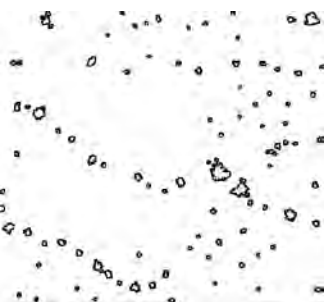
II) 50 m da UC



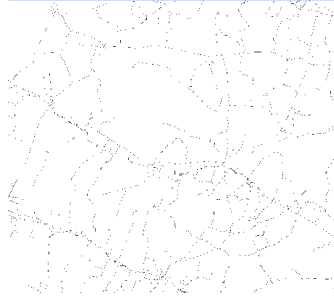
III) declividade > 12%



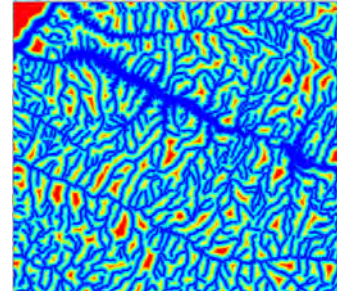
IV) 1 km das áreas urbanas



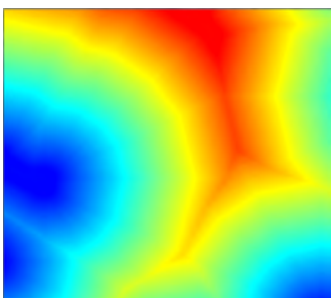
V) 15 m das principais estradas



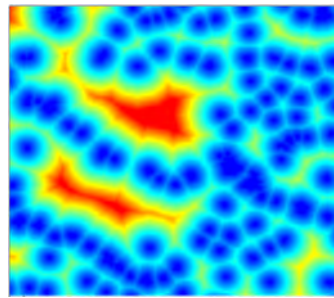
VI) distância a hidrografia



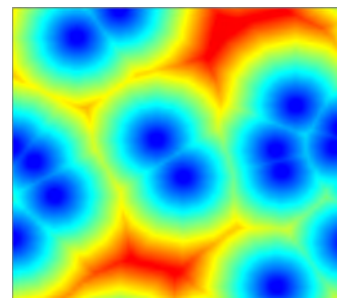
VII) distância a UC



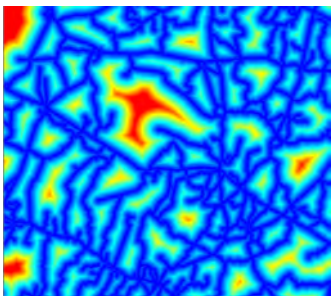
VIII) distância a áreas urbanizadas



IX) distância a usinas urbanizadas



X) distâncias a estradas



XI) declividade

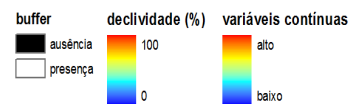
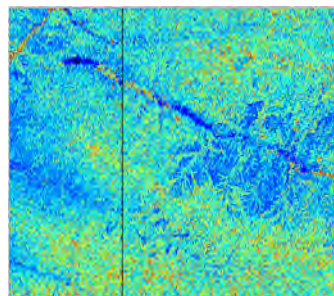
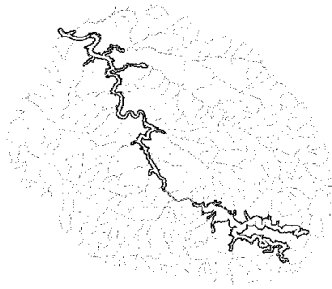
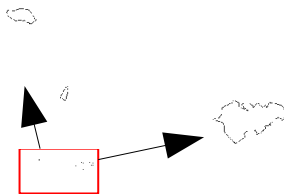


Figura 3.7a – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 1.

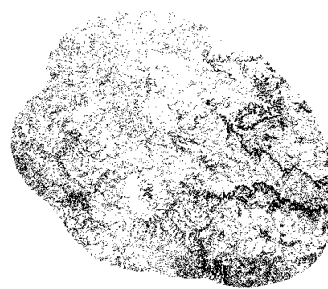
I) APP de rios



II) 50 m da UC



III) declividade > 12%



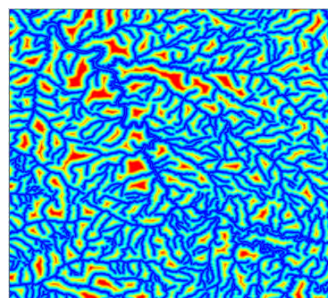
IV) 1 km das áreas urbanas



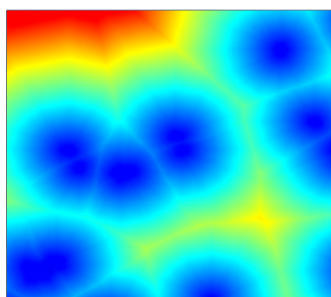
V) 15 m das principais estradas



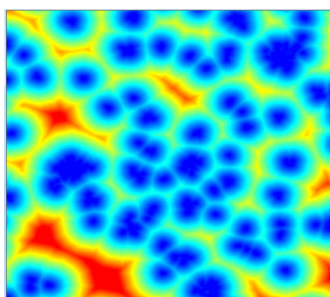
VI) distância a hidrografia



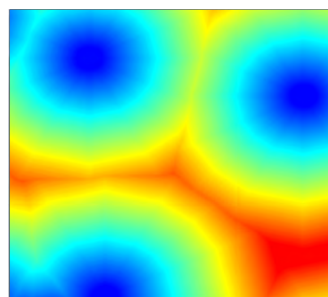
VII) distância a UC



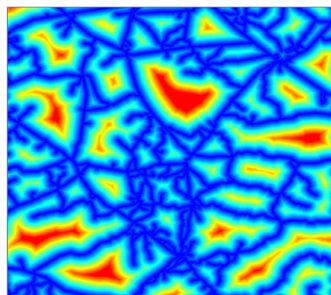
VIII) distância a áreas urbanizadas



IX) distância a usinas



X) distâncias a estradas



XI) declividade

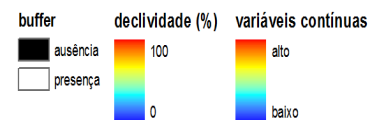
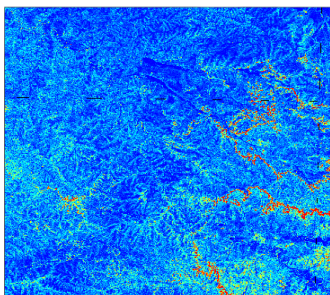
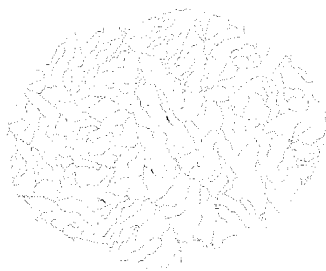
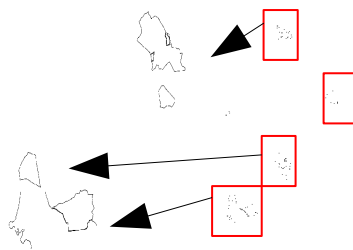


Figura 3.7b – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 2.

I) APP de rios



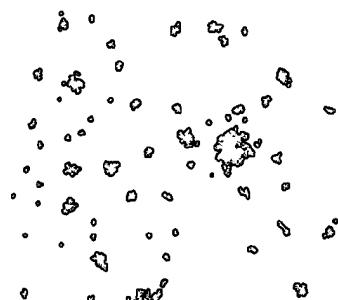
II) 50 m a UC



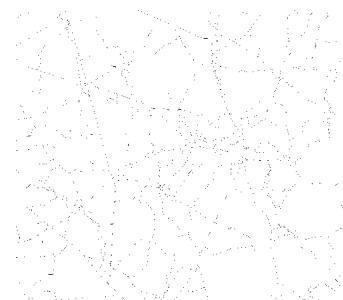
III) declividade > 12%



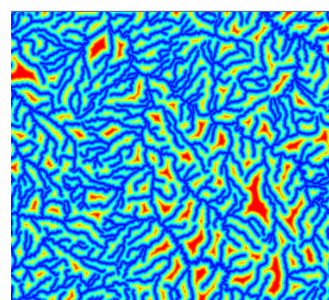
IV) 1 km das áreas urbanas



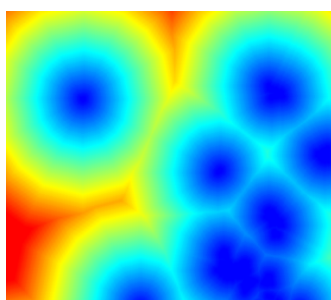
V) 15 m das principais estradas



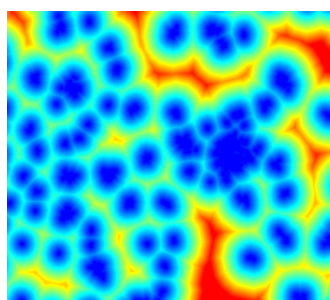
VI) distância a hidrografia



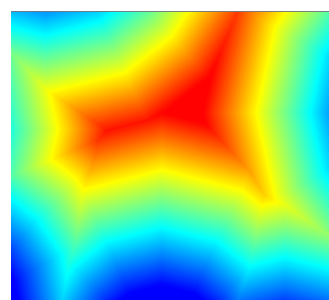
VII) distância a UC



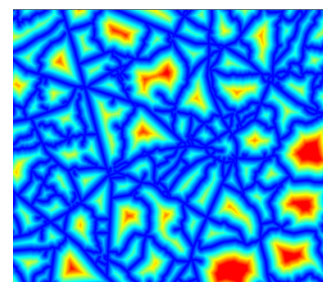
VIII) distância a áreas urbanizadas



IX) distância a usinas



X) distâncias a estradas



XI) declividade

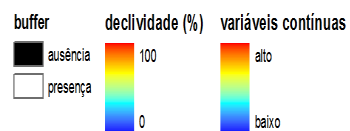
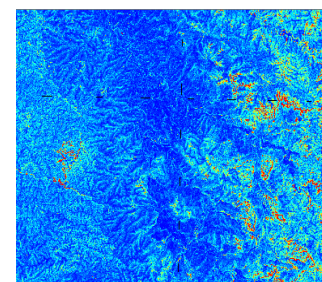
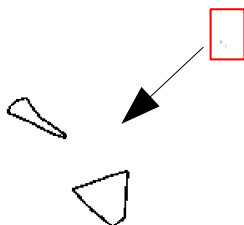


Figura 3.7c – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 3.

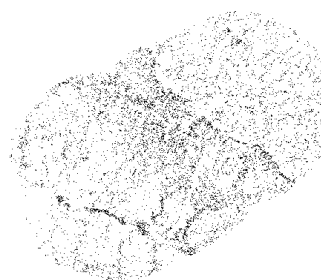
I) APP de rios



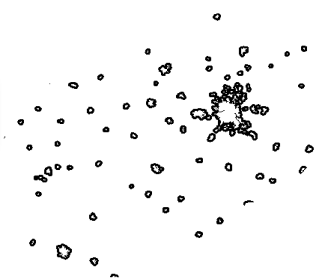
II) 50 m a UC



III) declividade > 12%



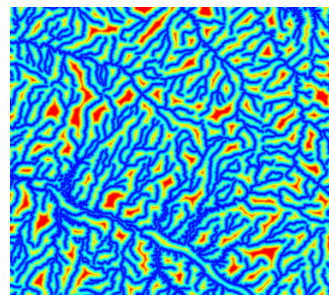
IV) 1 km das áreas urbanas



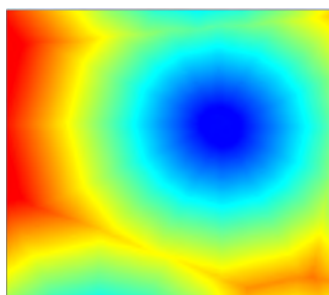
V) 15m das principais estradas



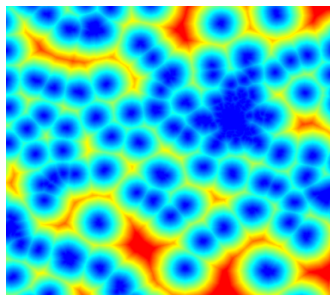
VI) distância a hidrografia



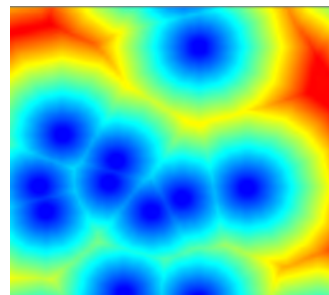
VII) distância a UC



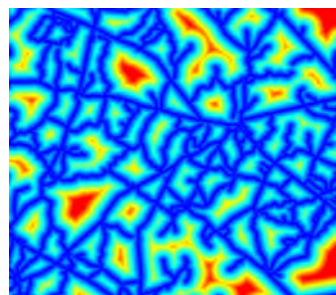
VIII) distância a áreas urbanizadas



IX) distância a usinas urbanizadas



X) distâncias a estradas



XI) declividade

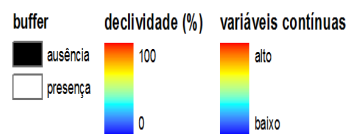
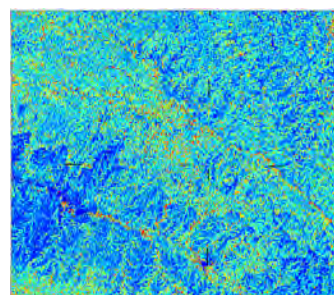


Figura 3.7d – Cubo de variáveis discretas e contínuas da Região 4.

Mapas de uso e cobertura inicial e final foram confeccionados para os anos 2006 e 2008, respectivamente. As classes de cana no início (2006) e no final (2008) foram: Cc (cana-crua); Cq (cana-queima); Cb (cana bisada); e não-cana. As classes que não sofreram alteração entre o período inicial e final foram: áreas urbanizadas, hidrografia e unidades de conservação. Estas classes foram inseridas nos mapas por exercerem restrição real à expansão e mudança de colheita das lavouras de cana. As áreas urbanizadas foram consideradas estáveis para efeito de simplificação do modelo e por não serem foco de análise desta pesquisa.

As bases originais destas classes foram recortadas ao limite da área de estudo com o *buffer* de 30 km. Foi criado um *box* de forma retangular e de mesma extensão para cada projeto. Também foi criada uma classe “fundo”, para que as mudanças relativas às transições das classes de cana não ultrapassassem o limite dos 30 km. Foi realizado um mosaico e a devida classificação para cada plano de informação recortado aos mapas iniciais e finais.

Os mapas de uso e cobertura inicial e final são apresentados nas Figuras 3.8, 3.9, 3.10, e 3.11.

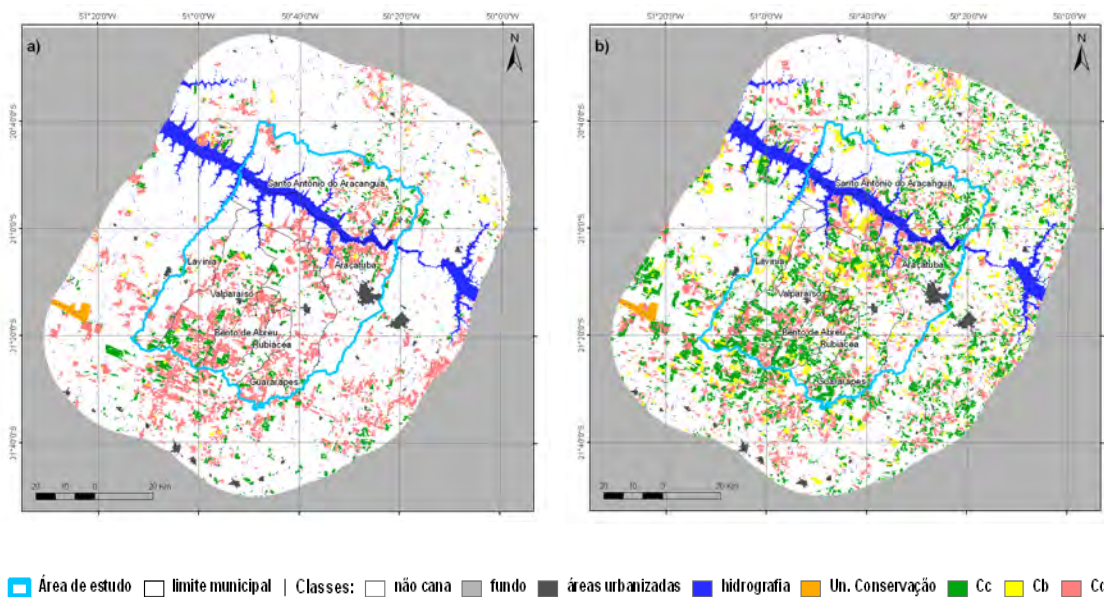


Figura 3.8 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 1. a) inicial – 2006. b) final – 2008.

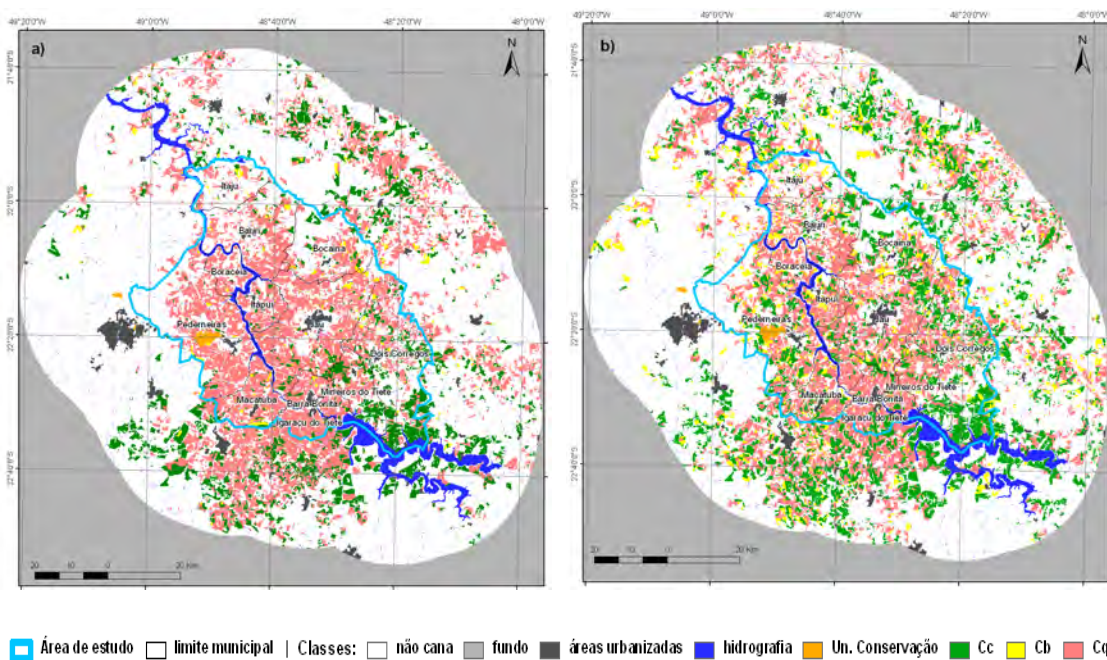
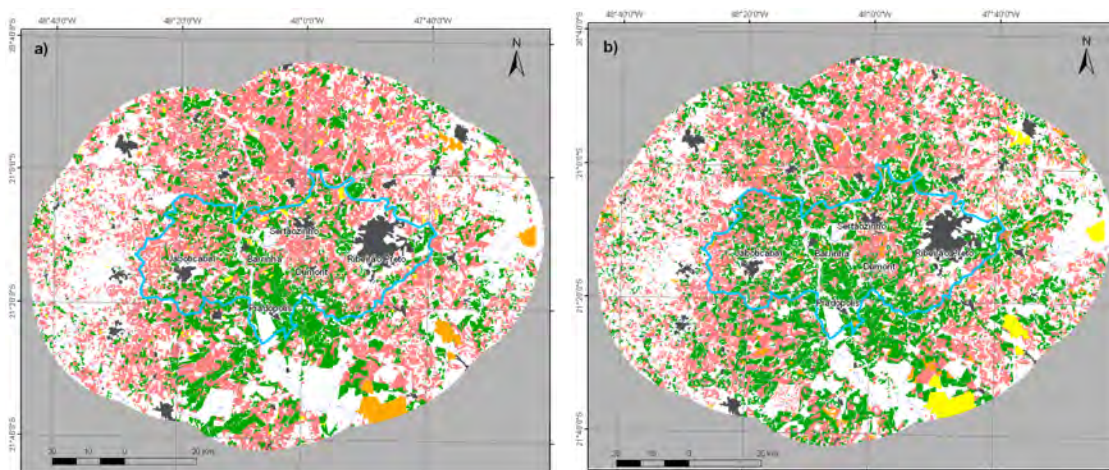
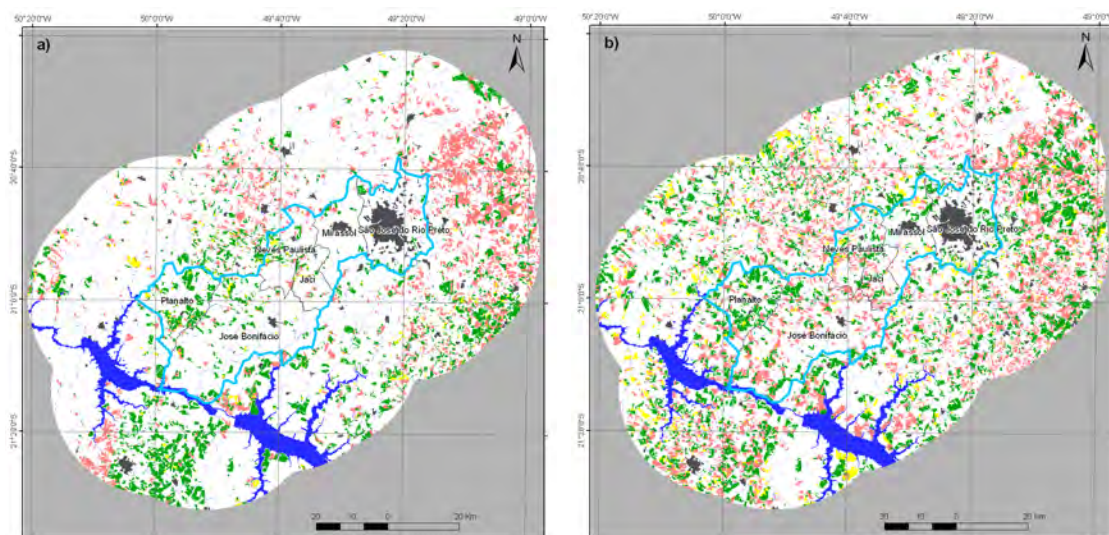


Figura 3.9 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 2. a) inicial – 2006. b) final – 2008.



■ Área de estudo limite municipal | Classes: não cana fundo áreas urbanizadas ■ hidrografia Un. Conservação Cc Cb Cq

Figura 3.10 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 3. a) inicial – 2006. b) final – 2008.



■ Área de estudo limite municipal | Classes: não cana fundo áreas urbanizadas ■ hidrografia Un. Conservação Cc Cb Cq

Figura 3.11 – Mapas de uso e cobertura do solo para a Região 4. a) inicial – 2006. b) final – 2008.

O formato de saída dos mapas de uso e cobertura foi GeoTIFF, e o conjunto de variáveis, em ASCII. Entretanto, para a entrada destes dados na plataforma de modelagem DINAMICA EGO, é necessário uma quantidade de procedimentos

de conversão entre formatos e estrutura de classes. Primeiramente, foi feita uma reclassificação das variáveis de distâncias discretas e mapas de uso e cobertura para reordenar as classes, suprimindo-se o valor zero e posteriormente exportando-se os mapas no formato .RST. Em seguida, os mapas de cobertura e uso do solo foram convertidos para a extensão .ERS seguindo o formato “unsign 8 bit integer” com valor nulo = 0. Os mapas de distâncias discretas e contínuas foram compostos em um cubo de variáveis estáticas e exportados sob mesma extensão (.ERS) seguindo o formato “Signed32BitInteger”, com valor nulo = -2147483648. O procedimento de reclassificação foi feito com o auxílio da plataforma IDRISI 3.2 enquanto a saída dos dados para o formato .ERS foi obtida por meio do programa ERMapper 7.1. Os dois formatos de saída das plataformas utilizadas até o momento são de fácil interoperabilidade.

3.3.4. Entrada de mapas e variáveis na plataforma de modelagem DINAMICA EGO

Os dados de entrada necessários para efetuar a calibração do modelo são um mapa de uso e cobertura inicial e final correspondente aos anos de 2006 e 2008, respectivamente, além de um cubo de variáveis estáticas discretas e contínuas. O modelo utilizado é um modelo probabilístico de análise da dinâmica de mudança do uso e cobertura da terra, concebido por Soares Filho et al. (2002), o qual é composto por seis etapas, a saber: a) cálculo de percentual das mudanças de classes através de matrizes de transição; b) cálculo das faixas para discretização das variáveis contínuas; c) cálculo dos pesos de evidência (W^+); d) análise da correlação dos pesos entre as variáveis de entrada para todas as transições; e) simulação e ajustes; f) validação do mapa final simulado com base no mapa histórico. Todas estas etapas foram realizadas na plataforma DINAMICA EGO 1.4.0.

Tratando-se de um conjunto de dados robusto de nível de processamento

demorado, optou-se por um modelo que preservaria a resolução espacial dos dados originais realizando o processamento em tempo exequível. Trata-se do modelo regionalizado (REGIONALIZE), desenvolvido por Soares Filho et al. (2008), o qual compartimenta uma área de estudo inicial em um número fixo de subregiões, definidas pelo usuário. Assim, são realizados todos os procedimentos citados acima, considerando o comportamento particular de cada subregião. As matrizes de transição e pesos de evidência são calculados para cada subregião separadamente, além do cálculo das transições no mapa simulado final ser feito da mesma forma e, em seguida, realizado um mosaico. Desta forma, computadores comuns de uso pessoal⁶ comportariam esta sequência de cálculos. As subregiões foram divididas levando em consideração o tamanho de linhas e colunas de cada região de estudo, e o procedimento foi realizado dentro do banco SPRING procedendo às mesmas conversões descritas anteriormente através das plataformas IDRISI e ERMapper. Na Figura 3.12, são apresentados os mapas das áreas de estudo subdivididas.

6 O computador utilizado possui as seguintes configurações: 2 Gb de memória RAM e processador AMD Turion 64 com 2 processadores de 2.2 Ghz.

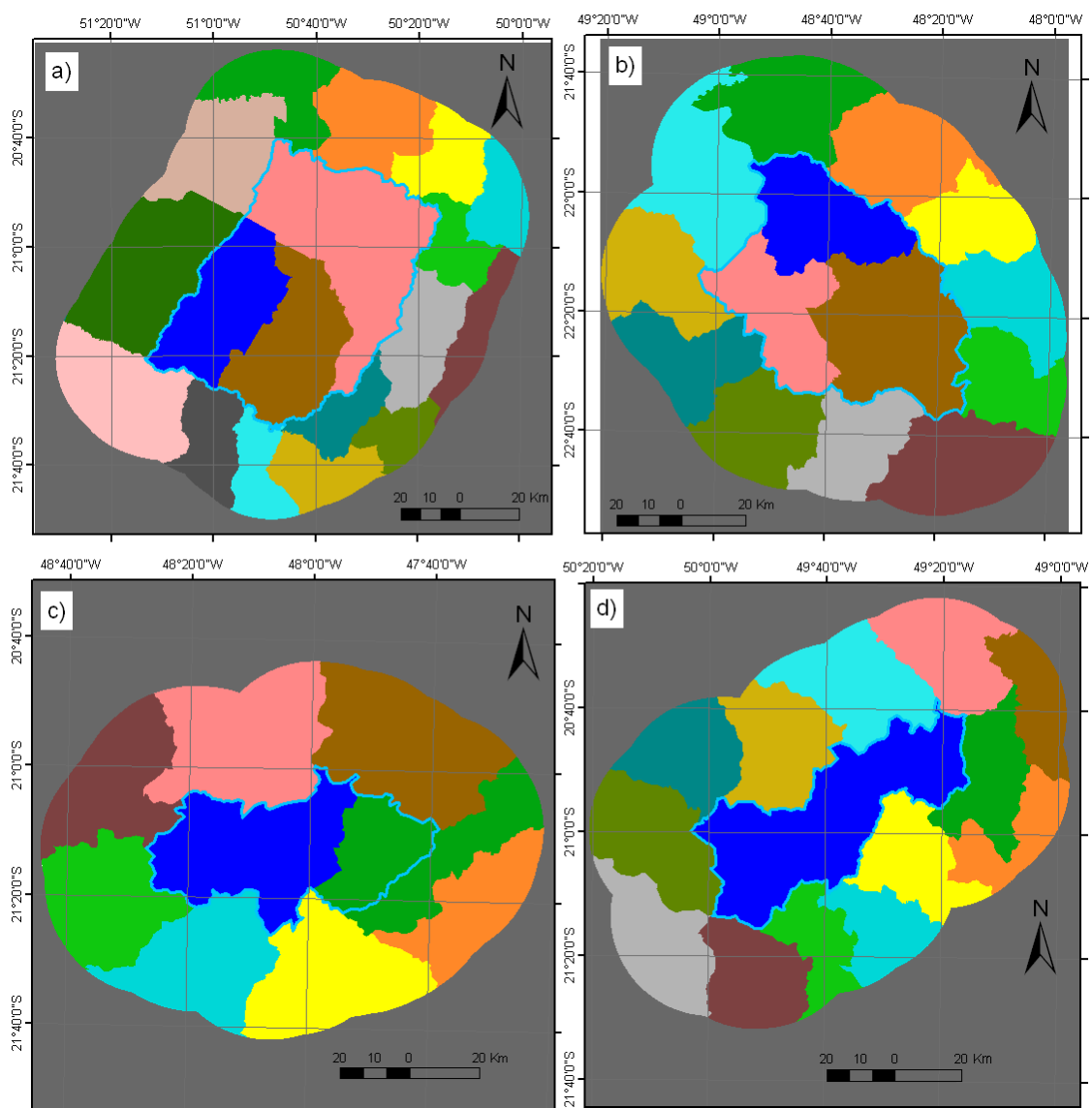


Figura 3.12 – Mapa de subregiões: a) Região 1 – (19); b) Região 2 – (15); Região 3 – (10); Região 4 – (15).

3.3.5. Geração das matrizes de transição

Adotando este modelo regionalizado, o primeiro passo foi calcular os percentuais de mudança globais entre as classes em um único passo de dois anos (2006-2008). Devido à fragmentação das áreas de estudo em subregiões, muitas matrizes de transição geradas para essas subregiões não mais

puderam ser decompostas em matrizes anuais, visto que não mais se caracterizavam como ergódicas⁷. O número de matrizes por região de estudo equivale ao número de subregiões definidas. Esta etapa consistiu em gerar matrizes de transição para avaliar a mudança no período observado na região de estudo, levando em consideração o *buffer* de 30 km para a futura calibração do modelo.

Paralelamente, com o objetivo de avaliar a aderência ao protocolo ambiental, foi realizado uma tabulação cruzada na plataforma IDRISI entre os mapas de cobertura e uso inicial e final somente para a região de estudo, sem a extensão de 30 km, e calculada a área para cada transição em função do número de células resultantes desta operação.

O modelo estacionário supõe que as taxas de transição são constantes no tempo. Todavia, especialistas na questão consideram que a dinâmica da colheita em São Paulo tende a se adaptar, em diferentes proporções, ao que rege o protocolo agro-ambiental, isto é, à diminuição efetiva da queima da palha da cana na pré-colheita. Portanto, foi elaborado um segundo modelo, de caráter prescritivo, com o ajuste das matrizes de transição de acordo com este indicativo.

Assim, foram calculadas novas matrizes a partir de indicações de especialistas e realizadas novas projeções futuras, consistindo em cenários prescritivos para todas as regiões de estudo. Para as regiões 1 e 2, o percentual de cana-bisada foi reduzido drasticamente, e a quantidade de áreas realocada proporcionalmente aos percentuais de áreas de cana-crua e cana-queima em 2008. Uma média esperada de áreas de cana bisada para todas as regiões é

7 Uma matriz é dita ergódica, quando apresenta um número finito de estados, sua dinâmica é aperiódica e não contém estados absorventes (que se transformam em outros estados). A ergodicidade é uma condição imprescindível para que uma matriz de transição de um único passo possa ser decomposta em uma matriz de múltiplos passos. Para mais informações sobre a decomposição de matrizes de transição, consultar Bell e Hinojosa (1977).

de cerca de 2.500 ha, contrário ao efeito anômalo de 2008 de cerca de 30.000 ha. Em seguida, os percentuais de áreas colhidas com o uso do fogo foram reduzidos de acordo com a tendência indicada por especialistas e alocados à classe cana-crua em todas as regiões de estudo. Composto as matrizes de transição do modelo prescritivo, pode-se calcular a quantidade de áreas para todas as classes, gerando cenários prescritivos futuros.

Ambos os modelos adotaram uma matriz de taxas de transição com um único passo de dois anos (2006-2008) para o mesmo recorte das áreas de estudo selecionadas neste trabalho. Os resultados comparativos entre o modelo estacionário e o prescritivo são apresentados na Seção 4.5.

3.3.6. Calibração do modelo

A calibração do modelo envolve primeiramente o cálculo das faixas e dos pesos de evidência para, em seguida, gerar as simulações com base em parâmetros necessários ao modelo e que envolvem o conhecimento do analista. Esta fase é importante para que o modelo reflita o máximo possível uma aproximação da realidade, com base nos mapas de cobertura e uso inicial e final.

As variáveis que terão seus pesos calculados devem ser mencionadas no modelo. As variáveis discretas ou categóricas, como as faixas de distância preventivas de vias, unidades de conservação, APP de rios, áreas urbanas e áreas não mecanizáveis (declividade >12%), não necessitam de parâmetros para este cálculo. Logo, as variáveis contínuas requerem os parâmetros (Figura 3.13) citados na Seção 2.6, que foram assim definidos: 1) intervalo mínimo de distância no eixo x, $mindx = 1 \text{ pixel}$; 2) intervalo máximo de distância no eixo x, $maxdx = 100.000 \text{ pixels}$; e 3) ângulo de tolerância $ft = 5^\circ$; com incremento = **30 m**, que é a resolução espacial do mapa. No caso da variável declividade, considerando que a unidade desta é em percentagem, o

seu incremento foi definido em 1%.

Foram definidos, também, o cálculo dos pesos para distâncias às classes de cana (Cc, Cq e Cb). A distância às classes é considerada uma distância dinâmica porque ao passo que as suas células mudam ao longo da simulação, o modelo se encarrega de atualizar as novas faixas e pesos para a ocorrência de cada transição. Por exemplo, a transição de áreas de não-cana para cana-crua pode ter maior probabilidade de ocorrer em áreas próximas da classe de cana-bisada. O processo de cálculo das faixas e pesos foi feito em um único modelo, e as saídas são arquivos em formato .DCF (texto), indicando as faixas mais favoráveis às respectivas transições.

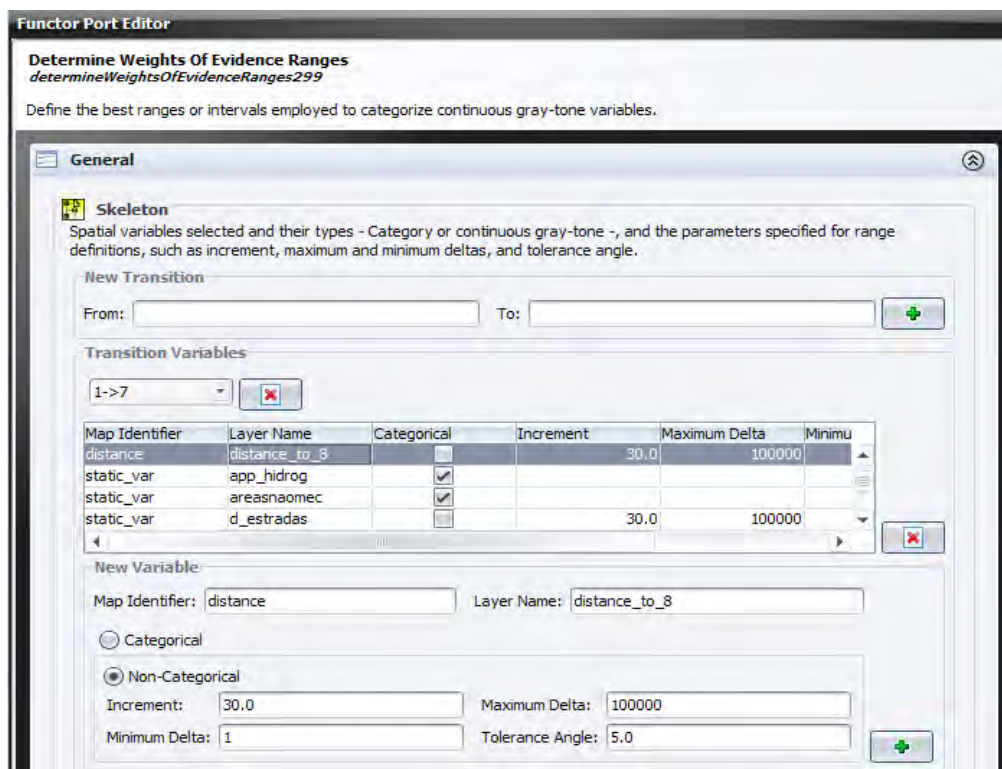


Figura 3.13 – Captura de tela de definição dos parâmetros para o cálculo das faixas e dos pesos de evidência.

As variáveis, com seus pesos calculados, submeteram-se ao teste de associação espacial por meio do *Joint Information Uncertainty (JIU)*,

implementado na plataforma DINAMICA EGO com a finalidade de verificar a dependência espacial entre todas as possíveis combinações pareadas de variáveis destinadas a explicar uma mesma transição (BONHAM-CARTER, 1994). Segundo Bonham-Carter (1994), valores para este índice acima de 0,50 indicam correlação significativa sendo que uma das variáveis deve ser retirada ou então, ambas as variáveis devem ser combinadas em único plano de informação, a fim de se evitar redundância no modelo. Em nenhuma das regiões de estudo, as variáveis mostraram-se associadas espacialmente.

As matrizes de transição e os pesos de evidências calculados foram inseridos juntamente com o mapa de cobertura e uso inicial (2006), o cubo de variáveis estáticas e o mapa de subregiões no modelo para simular a situação de cada região de estudo em 2008. Dois algoritmos na plataforma DINAMICA EGO são responsáveis pelas transições de células de um estado a outro: a função *expander* e *patcher* (Seção 2.6).

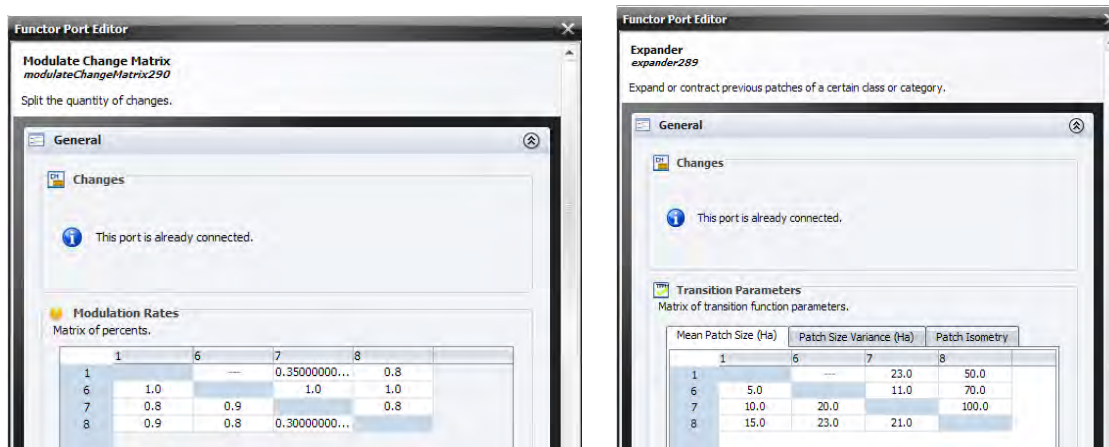


Figura 3.14 – Captura de tela do esquema do modelo de simulação com parâmetros definidos para *expander* e *patcher*.

No modelo que é apresentado na Figura 3.14, foram definidos os percentuais da quantia total de células que irão sofrer mudança por função *expander* e, automaticamente, o sistema estabelece que o restante é definido por *patcher*. Este percentual foi empiricamente testado e, após seguidos testes, foi adotada

uma configuração diferente para cada região de estudo.

É necessário, então, definir a média, variância e isometria⁸ para cada transição de classes. Para obter estes parâmetros, foi feito um cruzamento dos mapas de cobertura e uso inicial e final por tabulação cruzada (Figura 3.15), obtendo classes que representam as respectivas transições ocorridas em cada região. Em seguida, foram extraídos os tamanhos da área de cada polígono no ambiente SPRING e exportados para uma planilha no qual foram calculadas a média e variância para cada transição de áreas acima de 1 ha. Utilizando esse resultado como ponto de partida, foi feito ajustes empiricamente através de comparação visual entre os mapas observado e simulado.

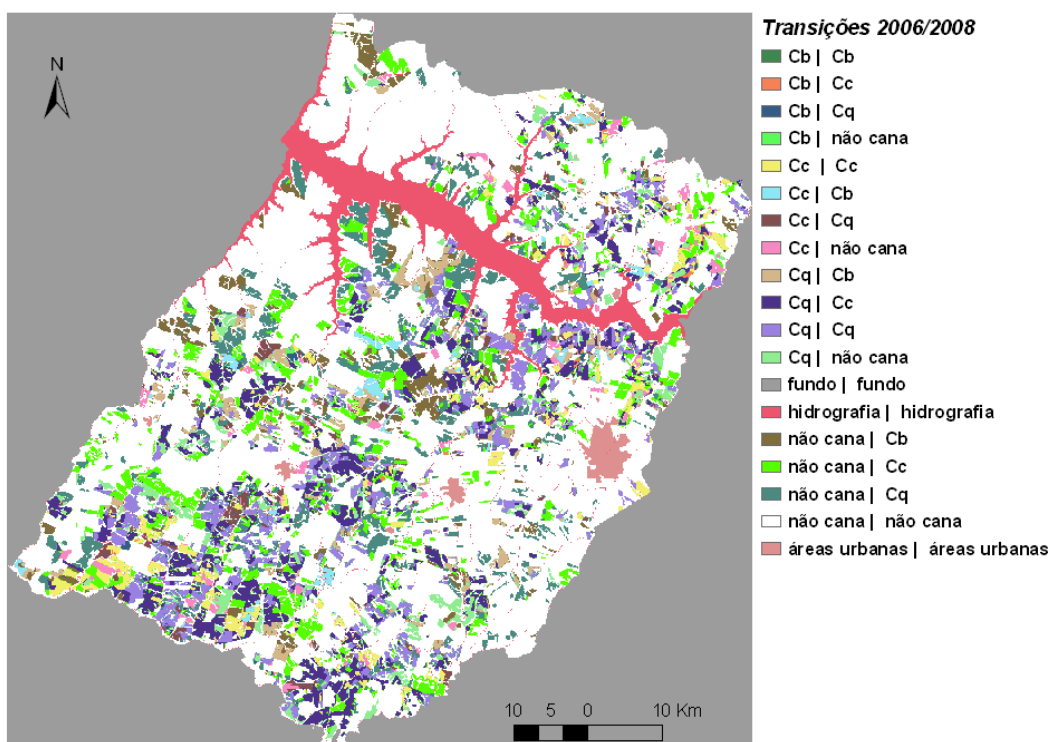


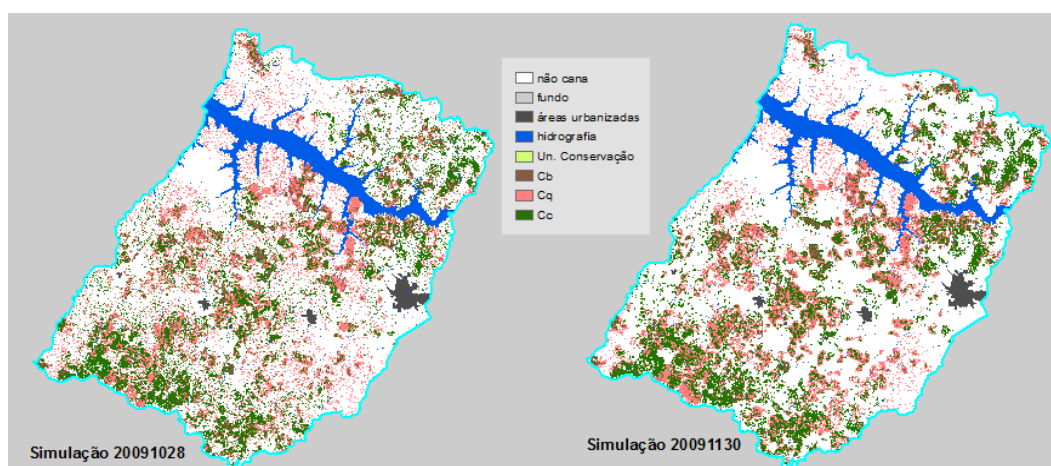
Figura 3.15 – Exemplo de mapa feito por tabulação cruzada, mostrando a transição de classes entre 2006 e 2008.

8 A isometria é definida por um coeficiente, situado no intervalo de 0 a 2, pelo qual se multiplicam as probabilidades de transição das células na janela de vizinhança das funções *expand* e *patch*, antes de se proceder à transição de estado da célula central da janela. Valores mais próximos de 0 produzem manchas mais fragmentadas ou dendríticas, enquanto que valores mais próximos de 2 geram manchas mais compactas.

Os dados gerados nesta etapa consistem em um mapa de cobertura e uso final simulado a partir dos parâmetros descritos acima e em um conjunto de mapas indicando a probabilidade para cada transição, calculada com base nos pesos de evidência.

3.3.7. Validação do modelo

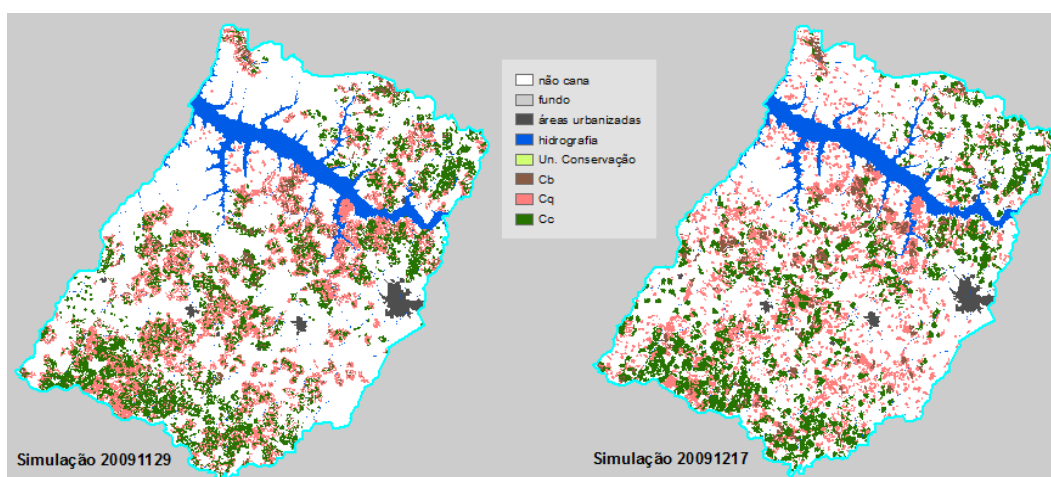
O método de validação das simulações geradas foi o de Hagen (2003), conhecido como *fuzziness of location* (ver Seção 2.6) em janelas 3 x 3 até 11 x 11 pixels. Foram selecionadas quatro simulações para o ano de 2008 (Figuras 3.16 a 3.19) de cada região para uma comparação prévia, antes de se selecionar o resultado a ser utilizado para gerar as análises e os cenários futuros. As simulações foram nomeadas segundo a data em que foram geradas, obedecendo a sequência ano – mês – dia.



| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091028) | | |
|--|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,366 | 0,328 |
| 5 x 5 | 0,399 | 0,345 |
| 7 x 7 | 0,418 | 0,355 |
| 9 x 9 | 0,430 | 0,362 |
| 11 x 11 | 0,437 | 0,366 |

| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091130) | | |
|--|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,354 | 0,332 |
| 5 x 5 | 0,379 | 0,351 |
| 7 x 7 | 0,394 | 0,363 |
| 9 x 9 | 0,403 | 0,370 |
| 11 x 11 | 0,409 | 0,375 |

Figura 3.16a – Região 1: Simulação 20091028 e 20091130, com seus respectivos resultados de validação.



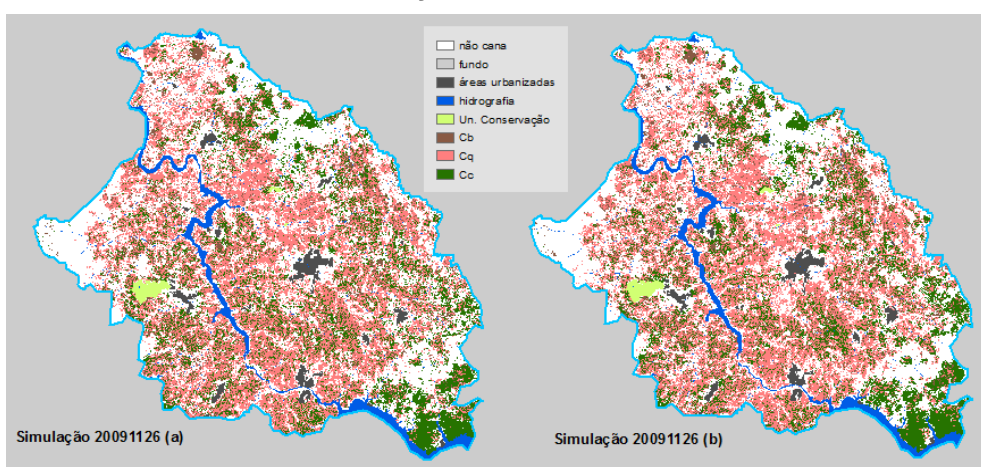
VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091129)

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,332 | 0,326 |
| 5 x 5 | 0,348 | 0,344 |
| 7 x 7 | 0,358 | 0,356 |
| 9 x 9 | 0,364 | 0,363 |
| 11 x 11 | 0,368 | 0,368 |

VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091217)

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,334 | 0,329 |
| 5 x 5 | 0,347 | 0,345 |
| 7 x 7 | 0,356 | 0,354 |
| 9 x 9 | 0,361 | 0,360 |
| 11 x 11 | 0,364 | 0,364 |

Figura 3.16b – Região 1: Simulação 20091129 e 20091217, com seus respectivos resultados de validação.



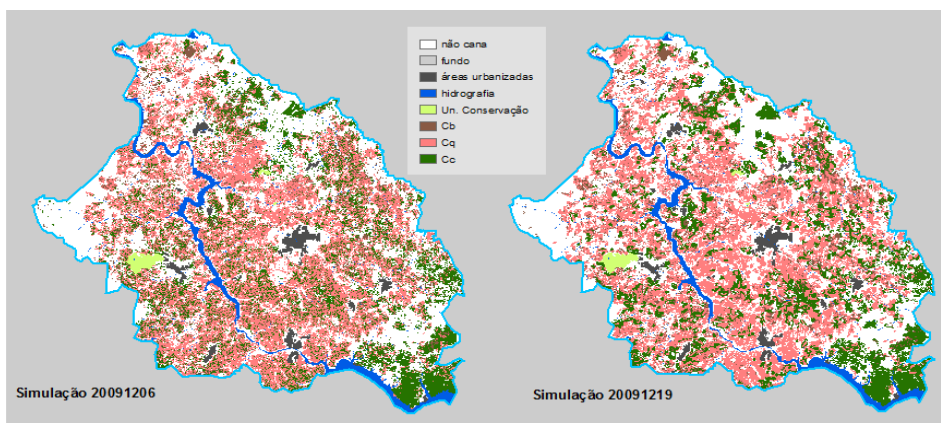
VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091126a)

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,382 | 0,335 |
| 5 x 5 | 0,419 | 0,357 |
| 7 x 7 | 0,439 | 0,370 |
| 9 x 9 | 0,451 | 0,379 |
| 11 x 11 | 0,458 | 0,384 |

VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091126b)

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,379 | 0,337 |
| 5 x 5 | 0,414 | 0,359 |
| 7 x 7 | 0,434 | 0,373 |
| 9 x 9 | 0,445 | 0,381 |
| 11 x 11 | 0,451 | 0,387 |

Figura 3.17a – Região 2: Simulação 20091126a e 20091126b, com seus respectivos resultados de validação.



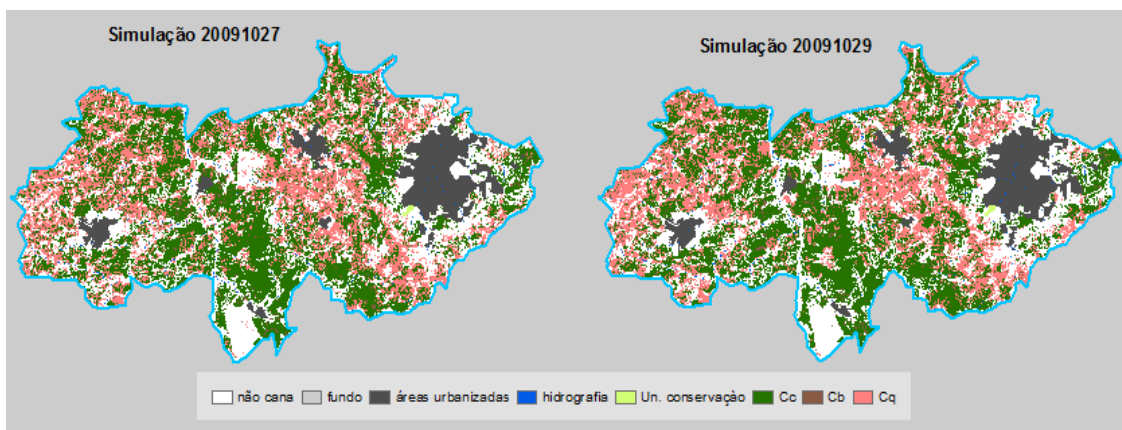
VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091206)

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,388 | 0,348 |
| 5 x 5 | 0,423 | 0,371 |
| 7 x 7 | 0,441 | 0,386 |
| 9 x 9 | 0,452 | 0,395 |
| 11 x 11 | 0,459 | 0,401 |

VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL (20091219)

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,351 | 0,343 |
| 5 x 5 | 0,372 | 0,363 |
| 7 x 7 | 0,384 | 0,376 |
| 9 x 9 | 0,392 | 0,385 |
| 11 x 11 | 0,396 | 0,390 |

Figura 3.17b – Região 2: Simulação 20091206 e 20091219, com seus respectivos resultados de validação.



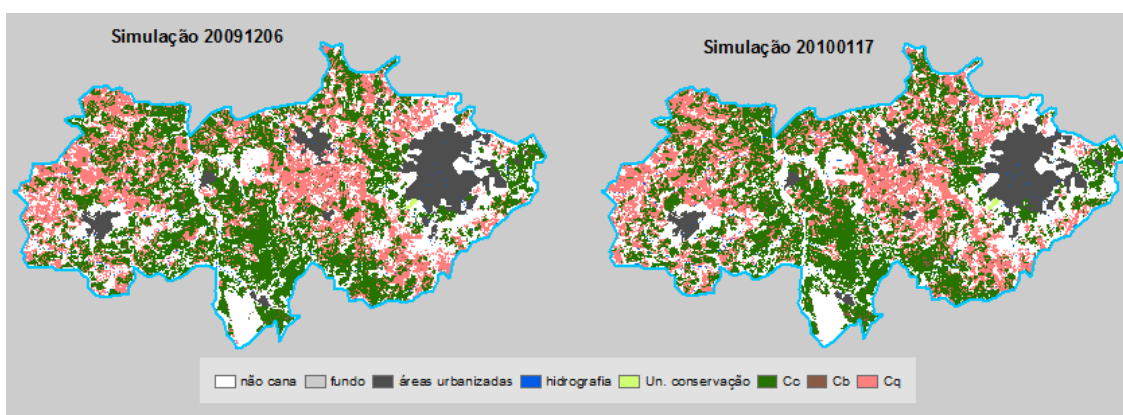
VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,393 | 0,363 |
| 5 x 5 | 0,429 | 0,388 |
| 7 x 7 | 0,449 | 0,404 |
| 9 x 9 | 0,460 | 0,414 |
| 11 x 11 | 0,467 | 0,421 |

VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL

| Janela | Max | Min |
|---------|-------|-------|
| 3 x 3 | 0,392 | 0,371 |
| 5 x 5 | 0,425 | 0,398 |
| 7 x 7 | 0,444 | 0,414 |
| 9 x 9 | 0,455 | 0,424 |
| 11 x 11 | 0,462 | 0,431 |

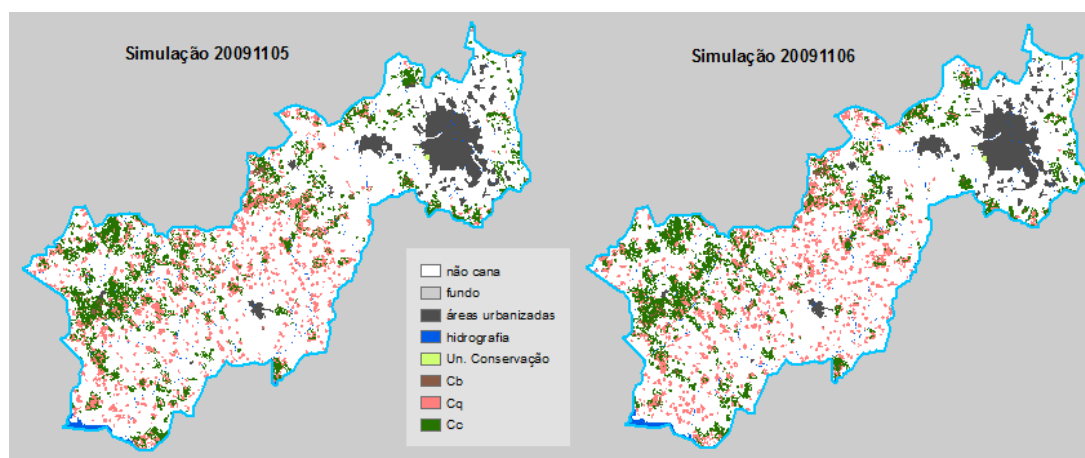
Figura 3.18a – Região 3: Simulação 20091027 e 20091029, com seus respectivos resultados de validação.



| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,382 | 0,373 |
| 5 x 5 | 0,408 | 0,399 |
| 7 x 7 | 0,423 | 0,415 |
| 9 x 9 | 0,432 | 0,425 |
| 11 x 11 | 0,438 | 0,431 |

| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,379 | 0,375 |
| 5 x 5 | 0,403 | 0,401 |
| 7 x 7 | 0,417 | 0,417 |
| 9 x 9 | 0,427 | 0,426 |
| 11 x 11 | 0,433 | 0,432 |

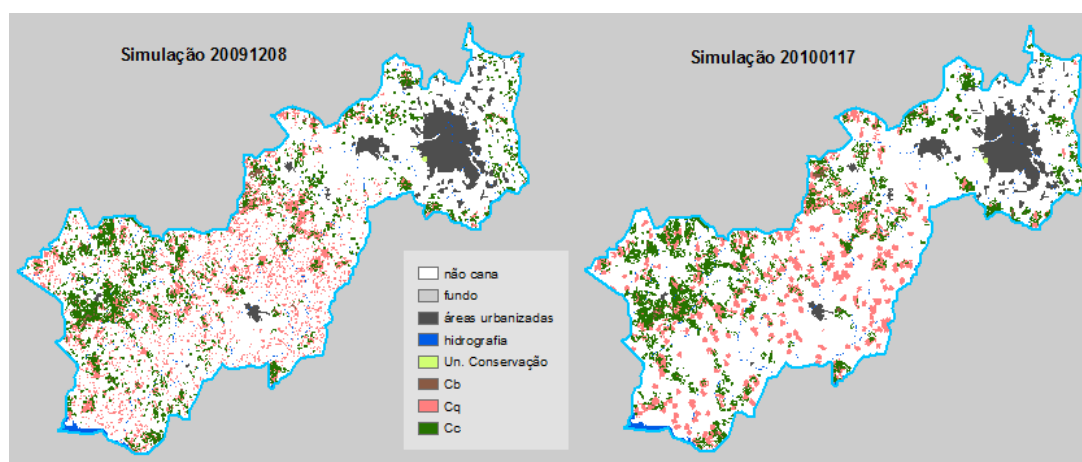
Figura 3.18b – Região 3: Simulação 20091206 e 20100117, com seus respectivos resultados de validação.



| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,346 | 0,333 |
| 5 x 5 | 0,368 | 0,354 |
| 7 x 7 | 0,381 | 0,367 |
| 9 x 9 | 0,390 | 0,375 |
| 11 x 11 | 0,395 | 0,380 |

| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,345 | 0,334 |
| 5 x 5 | 0,367 | 0,355 |
| 7 x 7 | 0,380 | 0,367 |
| 9 x 9 | 0,388 | 0,375 |
| 11 x 11 | 0,393 | 0,380 |

Figura 3.19a – Região 4: Simulação 20091105 e 20091106, com seus respectivos resultados de validação.



| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,355 | 0,327 |
| 5 x 5 | 0,384 | 0,348 |
| 7 x 7 | 0,402 | 0,361 |
| 9 x 9 | 0,413 | 0,369 |
| 11 x 11 | 0,419 | 0,374 |

| VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Janela | Max | Min |
| 3 x 3 | 0,338 | 0,332 |
| 5 x 5 | 0,357 | 0,353 |
| 7 x 7 | 0,369 | 0,366 |
| 9 x 9 | 0,376 | 0,374 |
| 11 x 11 | 0,380 | 0,379 |

Figura 3.19b – Região 4: Simulação 20091208 e 20100117, com seus respectivos resultados de validação.

3.3.8. Geração de cenários futuros estacionários e prescritivos

Os mapas simulados de 2008 foram analisados comparativamente, levando em consideração o índice de similaridade com decaimento exponencial. Além disso, foi feita uma acurada comparação visual, visando um cenário que melhor representasse o mapa de cobertura e uso final no que diz respeito tanto ao padrão de distribuição das classes quanto à forma e à localização das manchas geradas.

Como um dos objetivos do trabalho é analisar a aderência das regiões de estudo ao protocolo agro-ambiental, foi feita uma tabulação cruzada entre os respectivos mapas de uso e cobertura inicial (2006) e final (2008). Ao mesmo tempo foram calculadas matrizes de percentuais de transição entre classes, e cada classe foi multiplicada por seu respectivo percentual de mudança entre 2006 e 2008 a fim de se obter a quantidade de área de cada classe em 2010.

O mesmo foi feito obedecendo a matriz estacionária (2006-2008) para os anos de 2012 e 2014.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise espacial do uso do fogo nas lavouras canaveieiras

Os índices de autocorrelação global de Moran para os anos de 2006, 2007 e 2008 de 0,689; 0,634 e 0,617, respectivamente.

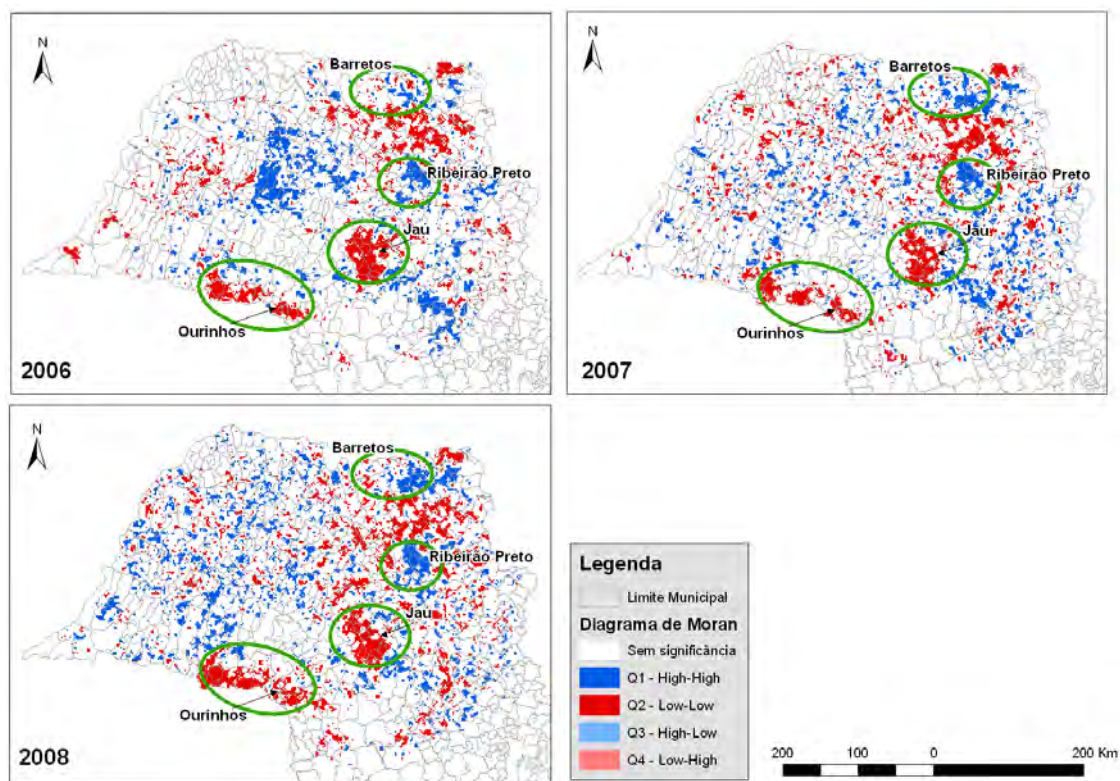


Figura 4.1 – Índices de autocorrelação global para o índice de colheita das células de 2 x 2 km e mapa de *clusters* pela à análise do LISAMAP para os anos-safras 2006, 2007 e 2008.

Percebe-se, através dos índices e do próprio mapa, que a concentração espacial das áreas de colheita com e sem queima vem diminuindo no estado de São Paulo. Provavelmente, isto se deve por conta das recentes mudanças e investimentos na mecanização em áreas de expansão. De acordo com a Figura 4.1, duas regiões apresentam um quadro conservador perante a mecanização até o ano de 2008: a de Ourinhos e entorno, cuja localização se dá na divisa do estado do Paraná e a região no entorno do município de Jaú, tradicional no

cultivo de cana. Áreas de expansão em direção ao oeste paulista, como a região de Ribeirão Preto e entorno, se mostram aderentes ao processo de mecanização até este período. Regiões tradicionais neste cultivo que têm forte aderência à extinção da queima são Barretos e Ribeirão Preto, assim como suas proximidades.

O índice que estima a evolução da dinâmica da queima da palha da cana de açúcar serviu para auxiliar na avaliação das regiões de estudo, conforme citado na Seção 3.3.1. Na Figura 4.2, é ilustrado o resultado deste índice para a representação de células de 2 km. Não foram consideradas para este cálculo aquelas áreas que não possuíam área de queima em 2006, devido ao fato de o denominador ser igual a 0, estes representando apenas 8% do total de células. Segundo este resultado, há evidências de que as regiões de estudo 1, 2 e 3, em proporções distintas, estão se prontificando a diminuir a prática da queima, pois apresentam taxas positivas de decréscimo do uso do fogo. Importante enfatizar que este quadro vai de encontro com as tendências apontadas por especialistas.

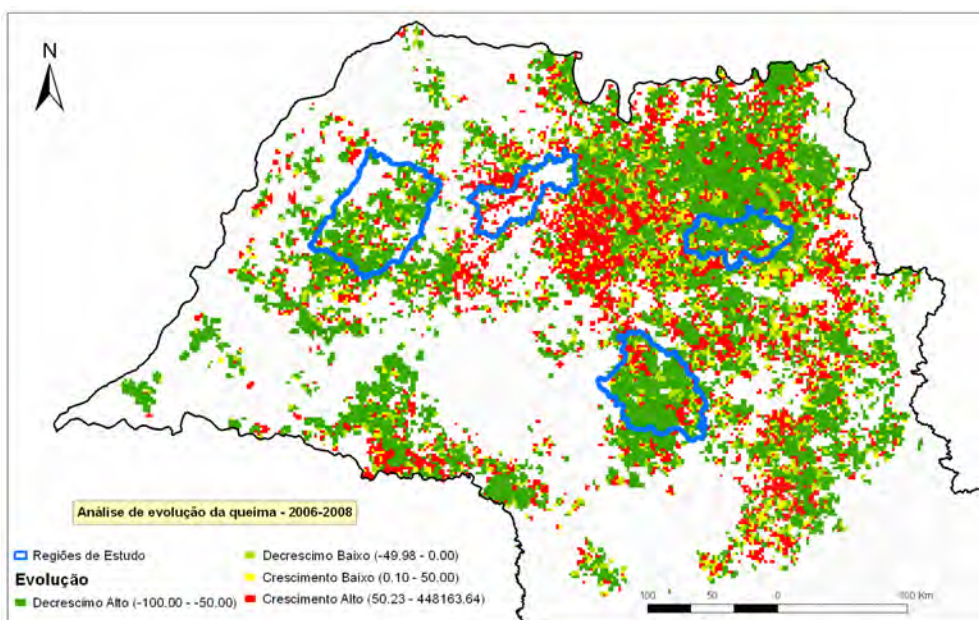


Figura 4.2 – Análise de evolução da colheita para células de 2 km.

4.2. Análise das mudanças nas práticas de colheita da cana-de-açúcar e na expansão da cultura canavieira através das matrizes de transição

O resultado do cálculo dos percentuais de transição de cada classe pode refletir explicações sobre a dinâmica do modo de colheita em cada região. Nesta seção serão destacadas as principais transições no período observado para as quatro regiões.

Para a região 1 (Tabela 4.1) verificam-se valores altos de área de cana bisada em 2008, fruto de um desequilíbrio entre a maior disponibilidade de matéria prima e a menor capacidade de produção de álcool e açúcar prevista pelas unidades de produção.

Tabela 4.1 – Região 1: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais.

| 2006/2008 | Não-cana | áreas urbanas | hidrografia | UC | Cb | Cq | Cc | Total |
|----------------------|--------------|---------------|-------------|----|--------------|--------------|--------------|--------|
| Não-cana | 299996 | 0 | 0 | 0 | 14101 | 29346 | 33502 | 376945 |
| áreas urbanas | 0 | 4915 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4915 |
| hidrografia | 0 | 0 | 35276 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35276 |
| UC | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cb | 339 | 0 | 0 | 0 | 320 | 696 | 662 | 2017 |
| Cq | 16480 | 0 | 0 | 0 | 11068 | 27524 | 34129 | 89201 |
| Cc | 6177 | 0 | 0 | 0 | 3899 | 5216 | 12534 | 27827 |
| Total | 322992 | 4915 | 35276 | 0 | 29387 | 62782 | 80828 | 536181 |

| 2006/2008 | Não-cana | áreas urbanas | hidrografia | UC | Cb | Cq | Cc | Total |
|----------------------|---------------|---------------|-------------|----|--------|---------------|---------------|-------|
| Não-cana | 79,59% | - | - | - | 3,74% | 7,79% | 8,89% | 100% |
| áreas urbanas | - | 100% | - | - | - | - | - | 100% |
| hidrografia | - | - | 100% | - | - | - | - | 100% |
| UC | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cb | 16,82% | - | - | - | 15,86% | 34,50% | 32,82% | 100% |
| Cq | 18,47% | - | - | - | 12,41% | 30,86% | 38,26% | 100% |
| Cc | 22,20% | - | - | - | 14,01% | 18,75% | 45,04% | 100% |

Novas áreas, em 2008, aderiram de modo similar entre a prática da colheita sem fogo e o uso do fogo, sendo ligeiramente maior no primeiro caso. Entretanto, a permanência da classe não-cana (0,796) indica que esta região de estudo ainda conta com áreas disponíveis para a expansão da cana. As áreas colhidas com uso do fogo em 2006 sofreram mudança para colheita sem queima (38,26%), supostamente por uma forte introdução de maquinário. Por

outro lado, verifica-se um percentual de uso conservador de cerca de 30% das áreas onde foi utilizada a queima na colheita. Um percentual de quase 20% da área de cana queima convertendo-se em áreas de não-cana pode ser explicado ora pela reforma das lavouras, ora pela mudança de uso, em quantidade bem menor, para um outro tipo de cultura.

Tanto nesta quanto nas outras regiões vê-se um percentual de cana-crua mudando para classe cana-queima. Cabe deixar claro que não há um retrocesso ou abandono das máquinas colheitadeiras de um ano para o outro. Como a lei ainda permite praticar a queima, qualquer produtor, ainda que um ano não utilizara a queima, em um ano seguinte pode praticá-la por motivos diversos.

A região de estudo 2, relativa ao município de Jaú e entorno, caracteriza-se por ser mais tradicional no cultivo da cana-de-açúcar, porém, com métodos de colheita mais conservadores. Analisando a Tabela 4.2, percebe-se que do total de área colhida com queima em 2006, 54,35% permanece com o mesmo tipo de colheita.

Tabela 4.2 – Região 2: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais.

| 2006/2008 | Não-cana | áreas urbanas | hidrografia | UC | Cb | Cq | Cc | Total |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Não-cana | 133458 | 0 | 0 | 0 | 5377 | 30212 | 12327 | 181375 |
| áreas urbanas | 0 | 7185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7185 |
| hidrografia | 0 | 0 | 15872 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15872 |
| UC | 0 | 0 | 0 | 2158 | 0 | 0 | 0 | 2158 |
| Cb | 644 | 0 | 0 | 0 | 1017 | 2711 | 1721 | 6093 |
| Cq | 25397 | 0 | 0 | 0 | 14207 | 88044 | 34354 | 162002 |
| Cc | 4575 | 0 | 0 | 0 | 1609 | 8915 | 13828 | 28926 |
| Total | 164074 | 7185 | 15872 | 2158 | 22210 | 129882 | 62230 | 403610 |

| 2006/2008 | Não-cana | áreas urbanas | hidrografia | UC | Cb | Cq | Cc | Total |
|---------------|---------------|---------------|-------------|------|--------|---------------|---------------|-------|
| Não-cana | 73,58% | - | - | - | 2,96% | 16,66% | 6,80% | 100% |
| áreas urbanas | - | 100% | - | - | - | - | - | 100% |
| hidrografia | - | - | 100% | - | - | - | - | 100% |
| UC | - | - | - | 100% | - | - | - | 100% |
| Cb | 10,56% | - | - | - | 16,69% | 44,50% | 28,24% | 100% |
| Cq | 15,68% | - | - | - | 8,77% | 54,35% | 21,21% | 100% |
| Cc | 15,82% | - | - | - | 5,56% | 30,82% | 47,80% | 100% |

Por outro lado, vê-se uma postura convergindo com a proposta do protocolo ambiental refletida pela mudança em 21% das áreas de queima para áreas sem queima. Todavia, as áreas de cana crua ainda representam 29% da área total de cana na região em 2008. Das novas áreas de cana, ainda há certa resistência frente à mecanização, pois em 63% destas áreas foi utilizada a queima enquanto apenas 26% das áreas novas aderiram ao protocolo.

Um fenômeno observado nesta área de estudo é o percentual bastante elevado de cana não colhida. Ao todo, foram 22.210 ha de cana bisada. Este total reflete a mesma condição citada para a região 1. Outro ponto a ser observado é o percentual de quase 16% (25.397 ha) de área de cana queima em 2006, que passou a não constar em 2008. Existe a possibilidade, como na região 1, que estejam em reforma ou que parte delas passem a ser outras culturas.

A região 3, destacada por possuir agrupamentos cujos índices de colheita são em sua maioria altos (HH), possui uma extensa área, a qual vem incorporando novas tecnologias de mecanização, vindo de encontro com as diretrizes do protocolo ambiental (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Região 3: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais.

| 2006/2008 | Não-cana | áreas urbanas | hidrografia | UC | Cb | Cq | Cc | Total |
|---------------|--------------|---------------|-------------|----------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| Não-cana | 46527 | 0 | 0 | 0 | 544 | 8953 | 12474 | 68497 |
| áreas urbanas | 0 | 17900 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17900 |
| hidrografia | 0 | 0 | 1570 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1570 |
| UC | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cb | 444 | 0 | 0 | 0 | 14 | 721 | 1490 | 2669 |
| Cq | 8964 | 0 | 0 | 0 | 1510 | 34649 | 23892 | 69016 |
| Cc | 10305 | 0 | 0 | 0 | 1235 | 8398 | 39302 | 59240 |
| Total | 66240 | 17900 | 1570 | 0 | 3302 | 52721 | 77159 | 218892 |

| 2006/2008 | Não-cana | áreas urbanas | hidrografia | UC | Cb | Cq | Cc | Total |
|---------------|---------------|---------------|-------------|----|-------|---------------|---------------|-------|
| Não-cana | 67,93% | - | - | - | 0,79% | 13,07% | 18,21% | 100% |
| áreas urbanas | - | 100% | - | - | - | - | - | 100% |
| hidrografia | - | - | 100% | - | - | - | - | 100% |
| UC | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cb | 16,64% | - | - | - | 0,51% | 27,03% | 55,82% | 100% |
| Cq | 12,99% | - | - | - | 2,19% | 50,21% | 34,62% | 100% |
| Cc | 17,40% | - | - | - | 2,08% | 14,18% | 66,34% | 100% |

Mesmo em número bem menor, destaca-se aqui um percentual de áreas (50,21%) que mantiveram o uso da queima no período observado. Por outro lado, mais de 1/3 (34,62%) da área queimada em 2006 foi colhida sem o uso do fogo em 2008.

Percebe-se que nesta região de estudo há uma quantidade de áreas onde a mecanização encontra-se bastante consolidada, pois 66,34% das áreas de cana crua permaneceram no mesmo estado em 2008. 14,18% de lavouras que colhiam sem queima, usaram o recurso do fogo em 2008, e 17,40% delas estavam em reforma. No primeiro caso, não significa necessariamente que o produtor tenha deixado de utilizar a colheita mecânica. Na verdade, como a prática da queima ainda é permitida, alguns produtores queimam a palha da cana para tornar a colheita mais ágil.

A região de estudo 4 (Tabela 4.4), cujos principais municípios são José Bonifácio e São José do Rio Preto, possui características peculiares dentre as áreas em análise.

Tabela 4.4 – Região 4: Matriz de transição com valores em ha e, abaixo, em percentuais.

| <i>2006/2008</i> | <i>Não-cana</i> | <i>áreas urbanas</i> | <i>hidrografia</i> | <i>UC</i> | <i>Cb</i> | <i>Cq</i> | <i>Cc</i> | <i>Total</i> |
|----------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| <i>Não-cana</i> | 145765 | 0 | 0 | 0 | 1650 | 15011 | 14839 | 177265 |
| <i>áreas urbanas</i> | 0 | 13324 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13324 |
| <i>hidrografia</i> | 0 | 0 | 2819 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2819 |
| <i>UC</i> | 0 | 0 | 0 | 77 | 0 | 0 | 0 | 77 |
| <i>Cb</i> | 244 | 0 | 0 | 0 | 287 | 442 | 1183 | 2157 |
| <i>Cq</i> | 1106 | 0 | 0 | 0 | 206 | 1953 | 2984 | 6249 |
| <i>Cc</i> | 4667 | 0 | 0 | 0 | 632 | 4159 | 7444 | 16901 |
| Total | 151782 | 13324 | 2819 | 77 | 2776 | 21565 | 26450 | 218792 |

| <i>2006/2008</i> | <i>Não-cana</i> | <i>áreas urbanas</i> | <i>hidrografia</i> | <i>UC</i> | <i>Cb</i> | <i>Cq</i> | <i>Cc</i> | <i>Total</i> |
|----------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------|-----------|--------------|---------------|--------------|
| <i>Não-cana</i> | 82,23% | - | - | - | 0,93% | 8,47% | 8,37% | 100% |
| <i>áreas urbanas</i> | - | 100% | - | - | - | - | - | 100% |
| <i>hidrografia</i> | - | - | 100% | - | - | - | - | 100% |
| <i>UC</i> | - | - | - | 100% | - | - | - | 100% |
| <i>Cb</i> | 11,33% | - | - | - | 13,31% | 20,51% | 54,85% | 100% |
| <i>Cq</i> | 17,69% | - | - | - | 3,30% | 31,25% | 47,75% | 100% |
| <i>Cc</i> | 27,61% | - | - | - | 3,74% | 24,61% | 44,04% | 100% |

Esta região foi a única que não mostrou uma taxa de aderência à mecanização destacada. Os percentuais de áreas de cana-de-açúcar já existentes apontam uma tendência à mudança para colheita sem o uso do fogo. Todavia, em 15.011 ha de novas áreas, em 2008, foram detectados uso do fogo, isto é, um percentual de 8,47 contra 8,37% daquelas que não realizaram queima na colheita.

Esta região vem surtindo uma intensa expansão das lavouras canavieiras devido a um grande contingente de áreas ainda disponíveis (145.765 ha) que permaneceram na mesma situação (82,23%) no período entre 2006 e 2008. Apesar de uma área cujo comportamento ainda não se pode definir segundo o período observado, o total de áreas colhidas sem uso do fogo (26.450 ha) já é maior que aquele que o praticam (21.565 ha).

Segundo o modelo, indicado por especialistas na área, os percentuais foram modificados para que a quantidade de áreas de cana-crua, cana-queima e cana bisada alcance os valores esperados, constituindo um cenário prescritivo, alternativo ao modelo estacionário. Para as regiões 1 e 2, o percentual de bisada foi reduzido drasticamente e a quantidade de áreas foi realocada proporcionalmente aos percentuais de áreas de cana-crua e cana-queima em 2008. Uma média esperada de áreas de cana bisada para todas as regiões é de cerca de 2.500 ha, contrário ao efeito anômalo de 2008 de cerca de 30.000 ha. Em seguida, os percentuais de áreas colhidas com o uso do fogo foram reduzidos de acordo com a tendência indicada por especialistas e alocados à classe cana-crua em todas as regiões de estudo. A Tabela 4.5 apresenta uma comparação entre os percentuais de transição modificados para compor a matriz do modelo prescritivo.

Tabela 4.5 – Comparação entre os percentuais de transição dos modelos estacionário e prescritivo.

| Transição | | Região 01 | | Região 02 | | Região 03 | | Região 04 | |
|-----------|----------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 2006 | 2008 | Modelo estacionário | Modelo Prescritivo | Modelo estacionário | Modelo Prescritivo | Modelo estacionário | Modelo Prescritivo | Modelo estacionário | Modelo Prescritivo |
| Não-cana | Cb | 0,037 | 0,001 | 0,030 | 0,001 | * | * | * | * |
| Não-cana | Cq | 0,078 | 0,003 | 0,167 | 0,100 | 0,131 | 0,070 | 0,085 | 0,030 |
| Não-cana | Ce | 0,089 | 0,200 | 0,068 | 0,163 | 0,182 | 0,243 | 0,084 | 0,138 |
| Cb | Cb | 0,159 | 0,020 | 0,167 | 0,020 | 0,005 | 0,005 | 0,133 | 0,010 |
| Cb | Cq | 0,345 | 0,150 | 0,445 | 0,140 | 0,270 | 0,270 | 0,205 | 0,050 |
| Cb | Ce | 0,328 | 0,662 | 0,282 | 0,734 | 0,558 | 0,558 | 0,548 | 0,827 |
| Cq | Cb | 0,124 | 0,010 | 0,088 | 0,010 | 0,022 | 0,022 | 0,033 | 0,033 |
| Cq | Cq | 0,309 | 0,100 | 0,543 | 0,230 | 0,502 | 0,250 | 0,313 | 0,060 |
| Cq | Ce | 0,383 | 0,705 | 0,212 | 0,603 | 0,346 | 0,598 | 0,478 | 0,730 |
| Cc | Cb | 0,140 | 0,010 | 0,056 | 0,010 | 0,021 | 0,021 | 0,037 | 0,010 |
| Cc | Cq | 0,187 | 0,080 | 0,308 | 0,080 | 0,142 | 0,080 | 0,246 | 0,030 |
| Cc | Ce | 0,450 | 0,688 | 0,478 | 0,752 | 0,663 | 0,725 | 0,440 | 0,745 |
| Cc | Não-cana | * | * | * | * | * | * | 0,276 | 0,215 |

* transição não alterada.

4.3. Análise dos pesos de evidência e mapas de probabilidades de transição

Parte do resultado gerado pela calibração do modelo consiste em importantes dados que indicam a influência exercida pela proximidade às variáveis de entrada na ocorrência das transições. A análise dos pesos de evidência facilita a discussão deste ponto, bem como as áreas potenciais de mudança de estado em cada transição podem ser verificadas por meio dos mapas de probabilidades de transição. Nesta seção, serão abordados os principais resultados encontrados a partir destes dois tipos de dados gerados.

4.3.1. Região 1

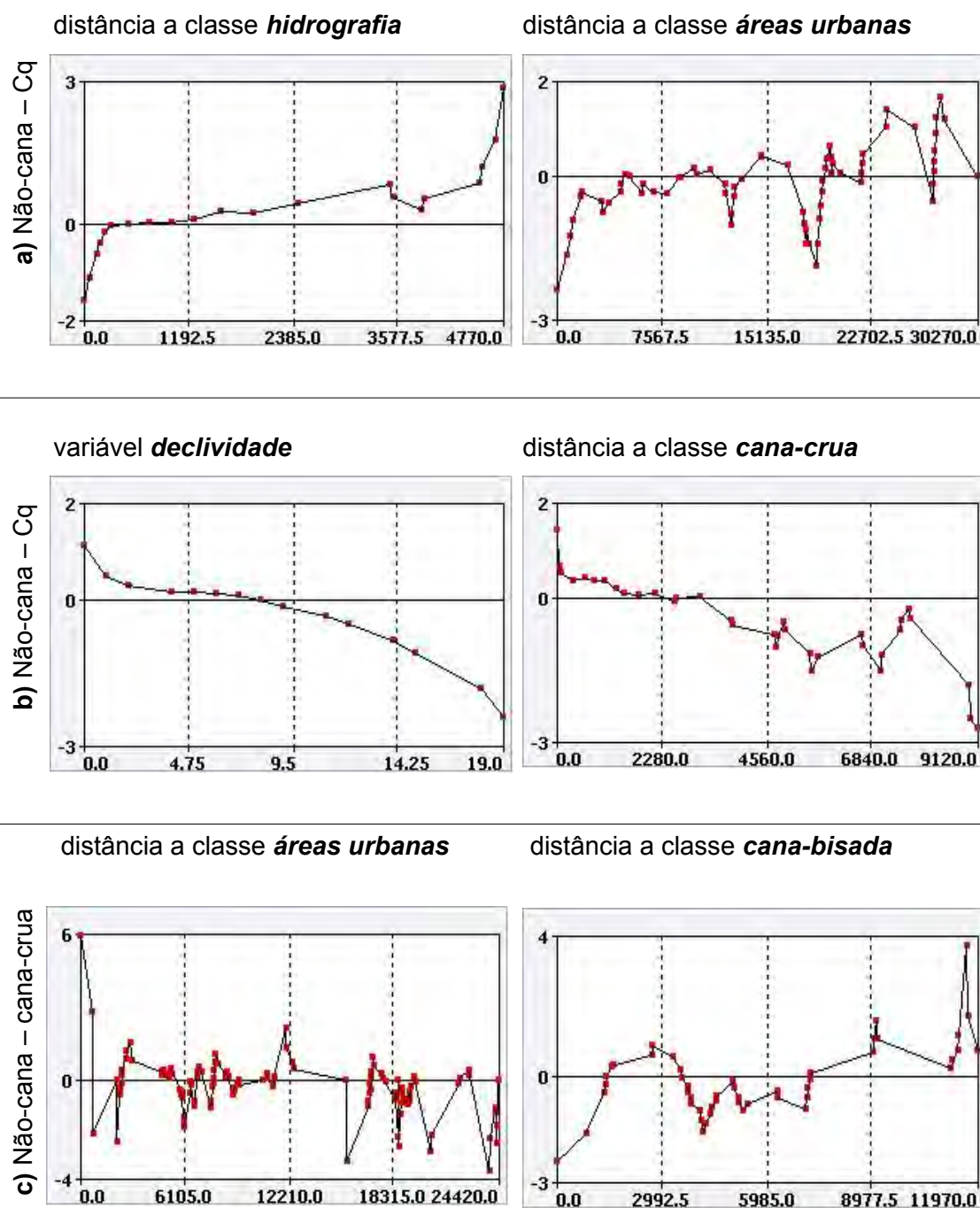


Figura 4.3 – Pesos de Variáveis relativas à Região 1. Transições: a) não-cana – cana-queima; b) não-cana – cana-crua; c) cana-queima – cana-bisada; d) cana-queima – cana-crua; e) cana-crua – cana-queima.

(continua)

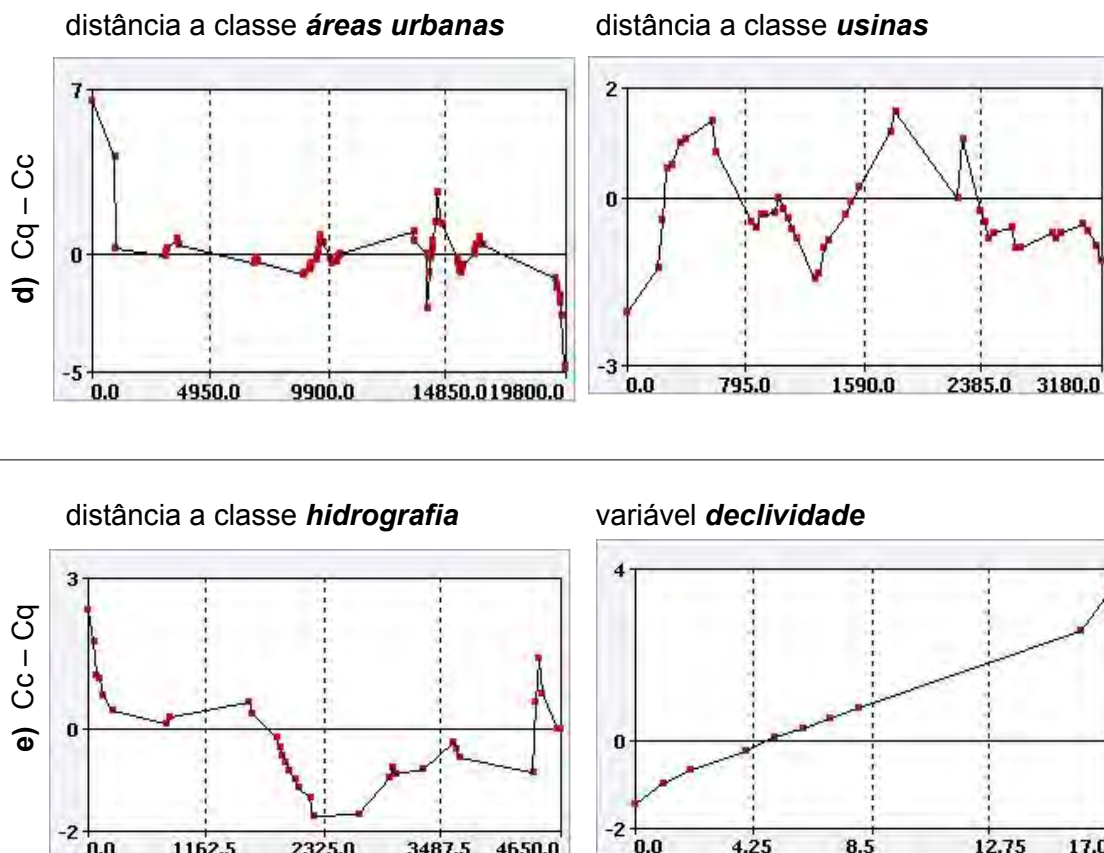


Figura 4.3 – Conclusão.

Através da análise dos gráficos presentes na Figura 4.3, pode-se observar que a proximidade em relação a cada uma destas variáveis evidencia uma maior ou menor probabilidade de ocorrerem as transições selecionadas. Para a mudança de áreas onde não ocorrem cultivos de cana em 2006 para áreas onde foi utilizada a queima na colheita da cana em 2008 (a), destaca-se a maior probabilidade deste acontecimento em áreas distantes de rios e longe dos aglomerados urbanos, respeitando, assim, a legislação ambiental e suas atribuições sobre a prática do uso do fogo. Por outro lado, há indícios de que as novas áreas onde não se pratica o uso do fogo (b) tenham ocorrido em função da baixa declividade e próximas a áreas já consolidadas onde a cana já era colhida crua.

Outra transição destacada é quanto às áreas de cana queima para áreas de cana bisada (c). A proximidade aos centros urbanos favoreceu esta ocorrência, além da influência provocada pela distância das áreas que, anteriormente, não foram colhidas. Essa observação aponta para um fenômeno que ocorreu na região de maneira não concentrada.

Através dos gráficos acima, nota-se que as maiores probabilidades de as áreas colhidas com o uso do fogo se tornarem áreas colhidas sem o uso do fogo (d) ocorreram, principalmente, próximas aos aglomerados urbanos, porém oscilaram no que diz respeito às distâncias de usinas. Provavelmente, neste segundo caso, porque boa parte as áreas de lavouras próximas às usinas já se encontravam consolidadas em termos de colheita mecanizada. A transição contrária (e) ocorre em proximidade aos rios e em áreas cuja declividade é mais acentuada. No caso da queima próxima aos rios, as APP são colocadas em risco.

De acordo com os percentuais de transição mais significativos nesta região de estudo, foram selecionados quatro mapas de probabilidade (Figura 4.4), os quais indicam, em vermelho, as áreas de maior potencial para ocorrer determinada transição e, em azul, aquelas menos favoráveis, de acordo com os pesos das variáveis comentadas acima.

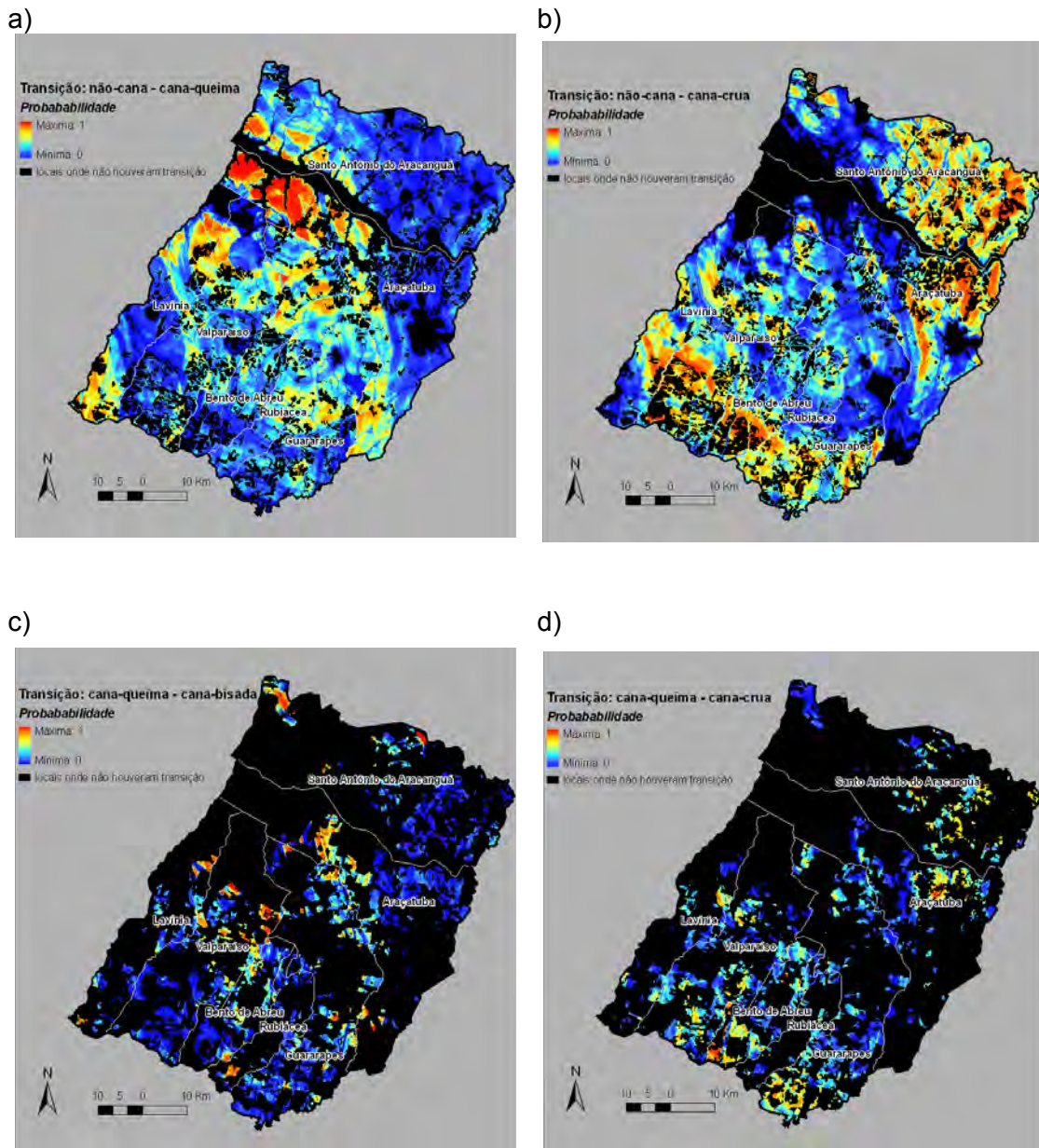


Figura 4.4 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 1.

Em uma leitura dos mapas acima, pode-se observar que as áreas próximas aos rios foram potenciais para a prática da queima no último ano analisado (a), assim como novas áreas em 2008 já dotadas de colheita mecanizada (b) tiveram atração à proximidade das lavouras onde não se utilizam a queima,

como a porção sul dos municípios de Valparaíso, Bento de Abreu além de grande parte de Santo Antônio do Aracanguá. As áreas de cana bisada que, em 2006, foram colhidas com queima (c) possuem maior probabilidade de ocorrer no principal município da região, Araçatuba. Observa-se, também, uma maior probabilidade de aderência (d) ao protocolo por parte das lavouras localizadas ao sul dos municípios de Bento de Abreu e Guararapes, além da área central de Araçatuba que, em 2006, utilizaram o fogo na colheita.

4.3.2. Região 2

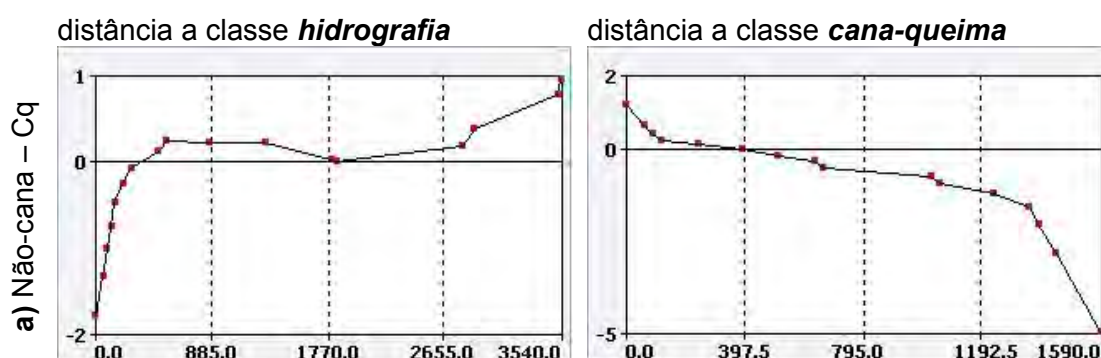


Figura 4.5 - Pesos de variáveis relativas à Região 2. Transições: a) não-cana – cana-queima; b) não-cana – cana-crua; c) cana-queima – cana-bisada e d) cana-queima – cana-crua.

(continua)

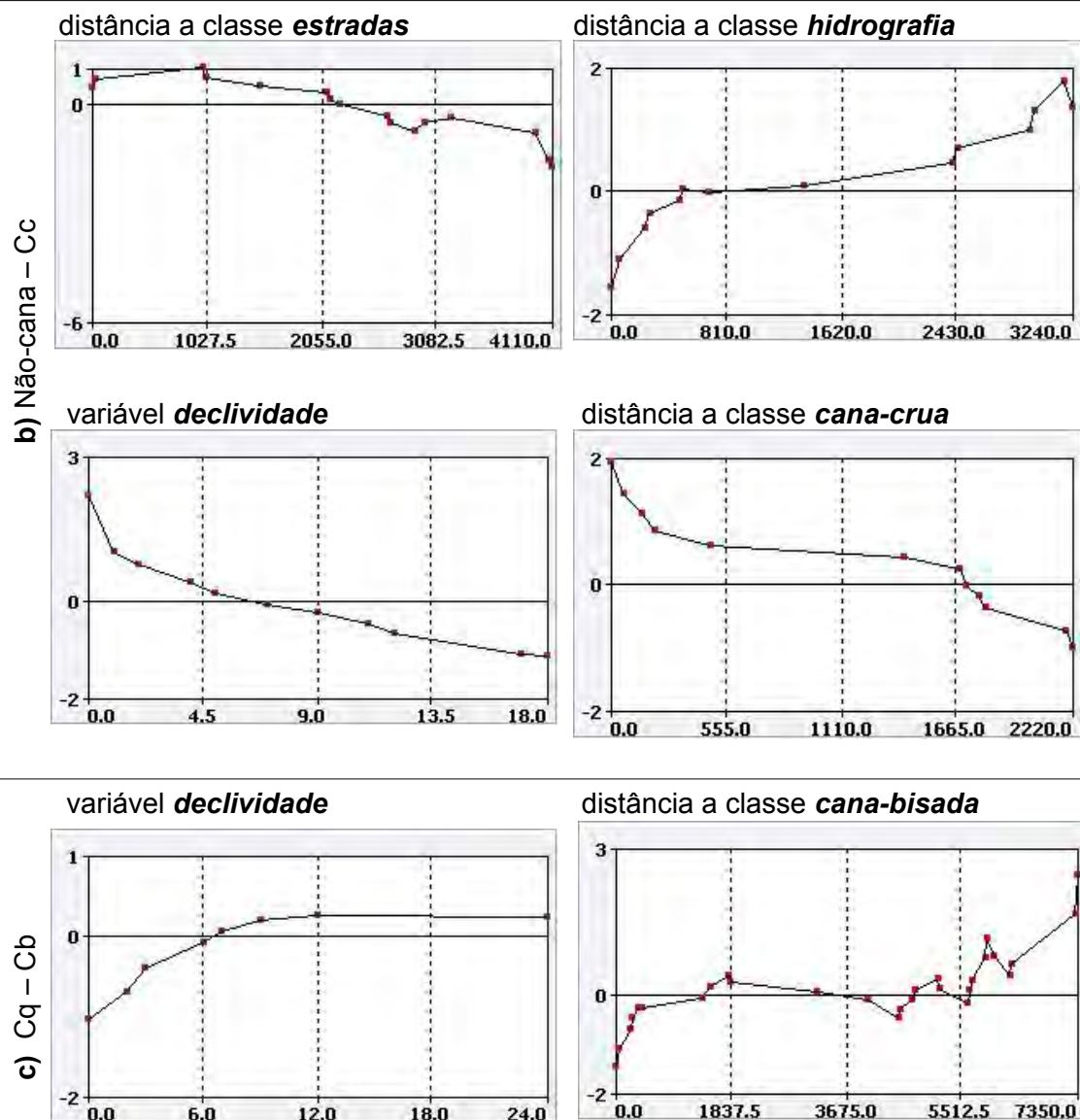


Figura 4.5 – Continuação.
(continua)

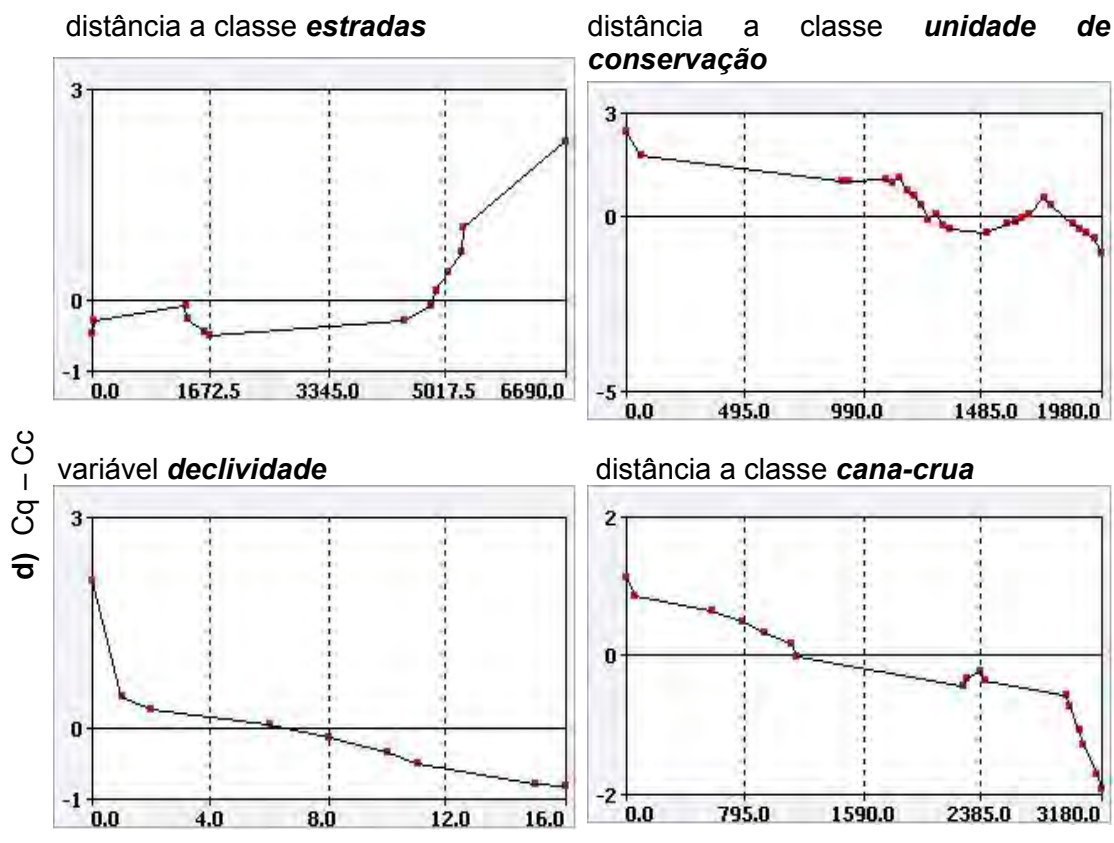


Figura 4.5 – Conclusão.

Segundo a Figura 4.5 nota-se que a mudança de novas áreas de plantação de cana em 2008 onde utilizaram a prática da queima (a) foi condicionada pela distância aos rios e pela proximidade a áreas onde já se praticavam a colheita com o uso do fogo. Já aquelas novas áreas que incorporaram técnicas de colheita mecanizadas (b) foram influenciadas pela baixa declividade e pela proximidade a áreas de mesmo tipo de manejo. A proximidade às principais vias de circulação também contribuíram para esta transição, além das áreas mais distantes do leito dos rios, que foram mais favoráveis para o surgimento de novas lavouras, cuja colheita procedeu de acordo com o estabelecido protocolo.

Nesta região 2, assim como na primeira, ocorreu em grande número de áreas a não colheita da cana. Analisando os percentuais de matrizes, esta quantidade

de lavouras não colhidas derivou-se de áreas cuja prática, em 2006, era de colheita com o uso do fogo (c). Na Figura 4.5c, nota-se que lavouras em maiores declividades são mais propensas a este tipo de mudança. A proximidade às áreas de classe de cana-bisada, em 2006, não são condicionantes, porém ajudam a explicar que a cana não colhida está distribuída esparsamente nesta região de estudo.

Uma mudança esperada com o protocolo ambiental é a extinção da prática da queima em função da adoção de máquinas na colheita da cana (d). Quatro variáveis se mostraram condicionantes para tal transição. As áreas próximas a lavouras já mecanizadas e a Unidades de Conservação tiveram maior peso, portanto, são mais favoráveis. A proximidade às estradas não exerce papel de atração, visto que esta região se encontra consolidada e as mudanças ao longo das principais vias já ocorreram em tempo pretérito. E como esperado, nas áreas cuja declividade permite a mecanização, há uma maior chance para este tipo de transição.

Quatro mapas de probabilidade de transição foram selecionados para analisar onde se encontram as maiores probabilidades de ocorrência de transições (Figura 4.6). O gradiente de cores indica, em vermelho, as áreas de maior potencial para ocorrer determinada transição e, em azul, aquelas menos favoráveis, de acordo com os pesos das variáveis comentadas acima.

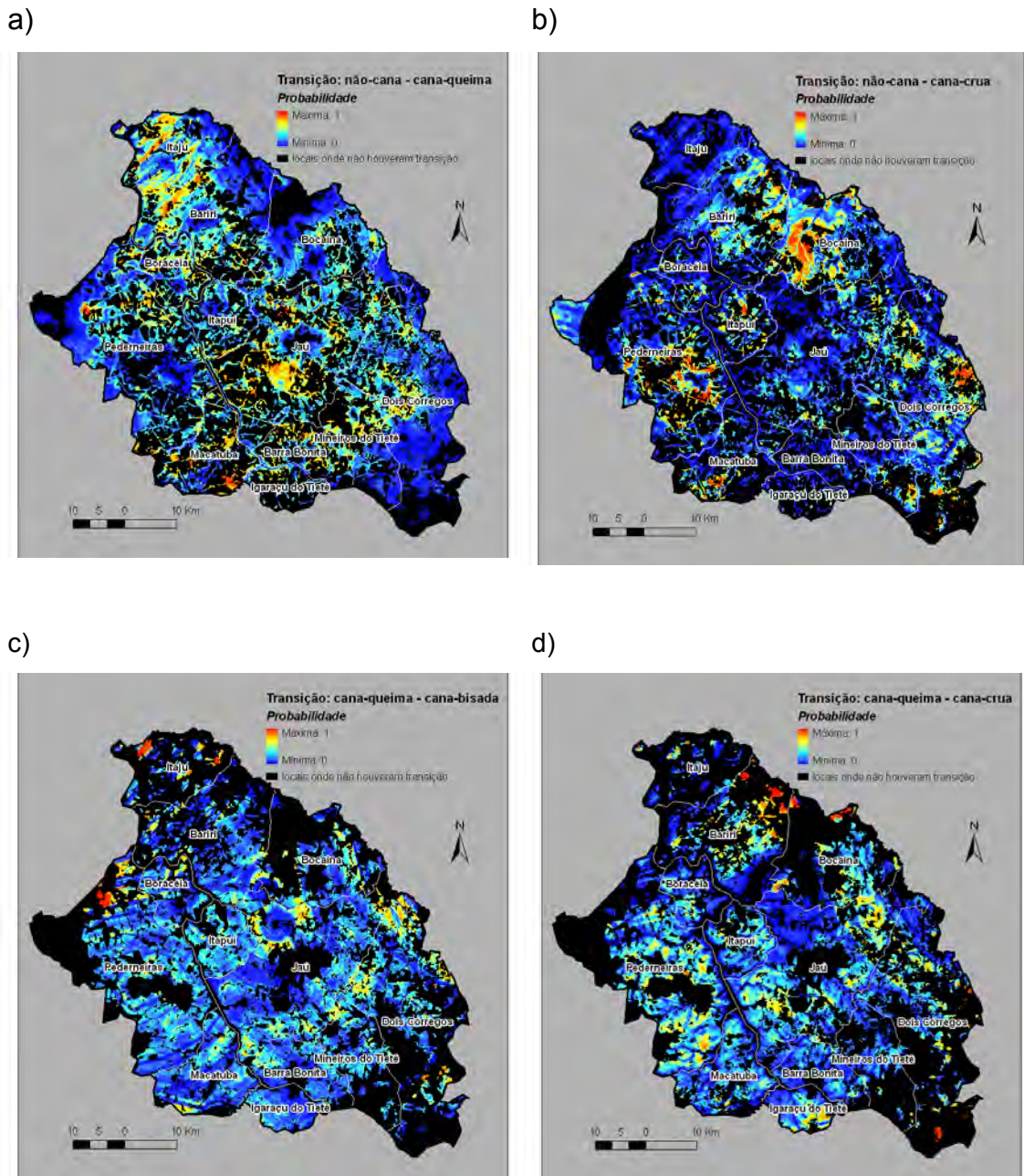


Figura 4.6 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 2.

Nota-se que os municípios de Itaju, Dois Córregos e a parte central de Jaú possuem maior probabilidade de ocorrer ainda novas lavouras que utilizem a queima como prática na colheita da cana (a). Por outro lado, nos municípios de

Bocaina e Pederneiras existe alta probabilidade de surgir novas lavouras em acordo com o protocolo ambiental, isto é, sem queima (b). Áreas de cana bisada oriundas de áreas onde se praticavam a queima são mais prováveis no norte de Itaju e Pederneiras, assim como no norte do município de Jaú.

As áreas no entorno da região, como o norte dos municípios de Itaju, de Pederneiras e Jaú, as áreas de cana bisada ocorrem com maior probabilidade onde se praticava queima na colheita (c), em 2006. Quanto à transição ilustrada na Figura 4.6d, as áreas mais potenciais localizam-se no norte dos municípios de Bariri e Bocaina, próximos às lavouras já mecanizadas.

4.3.3. Região 3

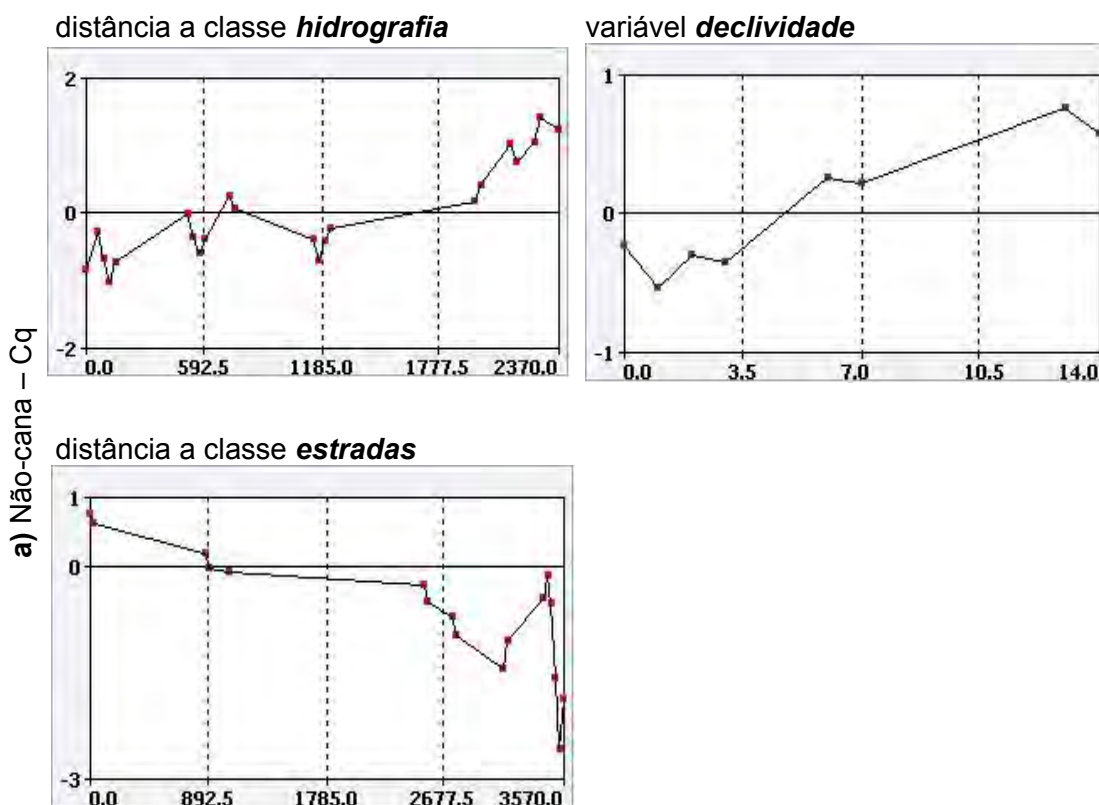


Figura 4.7 – Pesos de variáveis relativas à Região 3. Transições: a) não-cana – cana-queima; b) não-cana – cana-crua; c) cana-crua – cana-queima e d) cana-queima – cana-crua.

(continua)

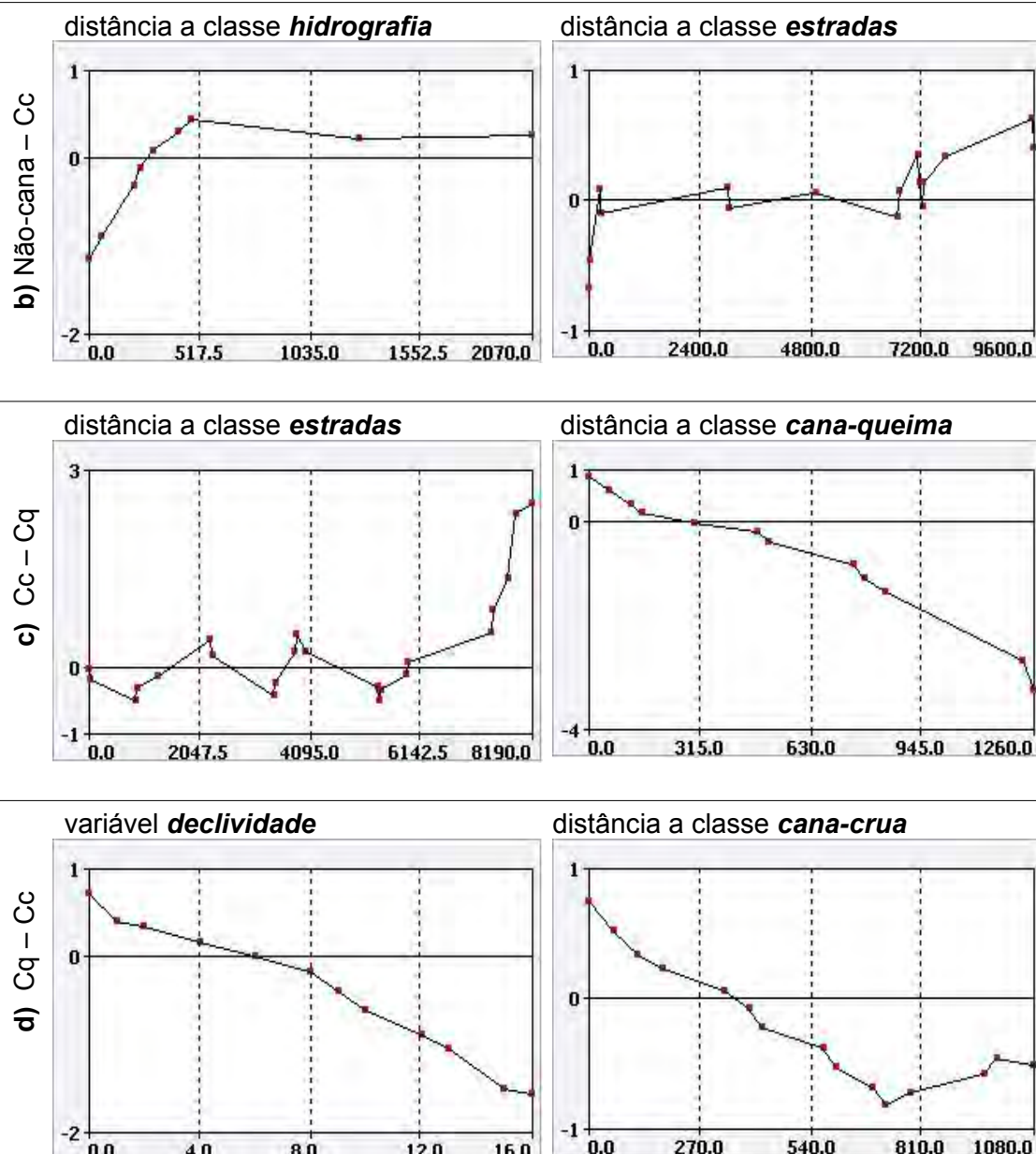


Figura 4.7 – Conclusão.

A região que abrange os municípios de Ribeirão Preto e entorno possuem características que os inserem como mais direcionados ao cumprimento do protocolo ambiental. Para tanto, observam-se algumas variáveis que contribuíram para as transições relativas aos gráficos da Figura 4.7. Uma maior distância aos rios aliada à localização das áreas com maior declividade e,

ainda, a proximidade a estradas são fatores que potencializam a ocorrência do surgimento de novas áreas de cana com o uso da queima na colheita (a). O contrário, ou seja, a ampliação de áreas já realizando a colheita de modo mecanizado (b), oscila em função da distância às estradas e aos da distância aos rios da região.

Apesar de haver áreas que, em 2006, possuíam um modo de colheita mecanizado, por diversos motivos, as mesmas passaram a utilizar a queima (c) em 2008. A ocorrência desta mudança foi evidenciada em lavouras distantes das principais estradas e próximas às áreas que, no período inicial, utilizavam-se do fogo como prática de colheita. Este último fator pode ter, inclusive, influenciado a prática da queima aos produtores vizinhos. Por último, vê-se que áreas com menor declividade e próximas àquelas que já estão consolidadas na colheita mecanizada favorecem a transição de antigas áreas, cuja prática era de queima (d).

Através dos mapas de probabilidades ilustrados na Figura 4.8, destacam-se as seguintes transições: a) não-cana para cana-queima; b) não-cana para cana-crua; c) cana-queima para cana-crua e d) cana-crua para cana-queima. Na primeira transição (a), percebe-se que a probabilidade maior de ocorrência situa-se nos municípios de Ribeirão Preto e Jaboticabal, próximo às áreas onde já se praticam a queima na colheita. A transição à colheita mecanizada (b) encontra áreas mais favoráveis na parte leste de Ribeirão Preto e a leste e sul de Jaboticabal, coincidentemente, onde já existem lavouras predominantemente mecanizadas.

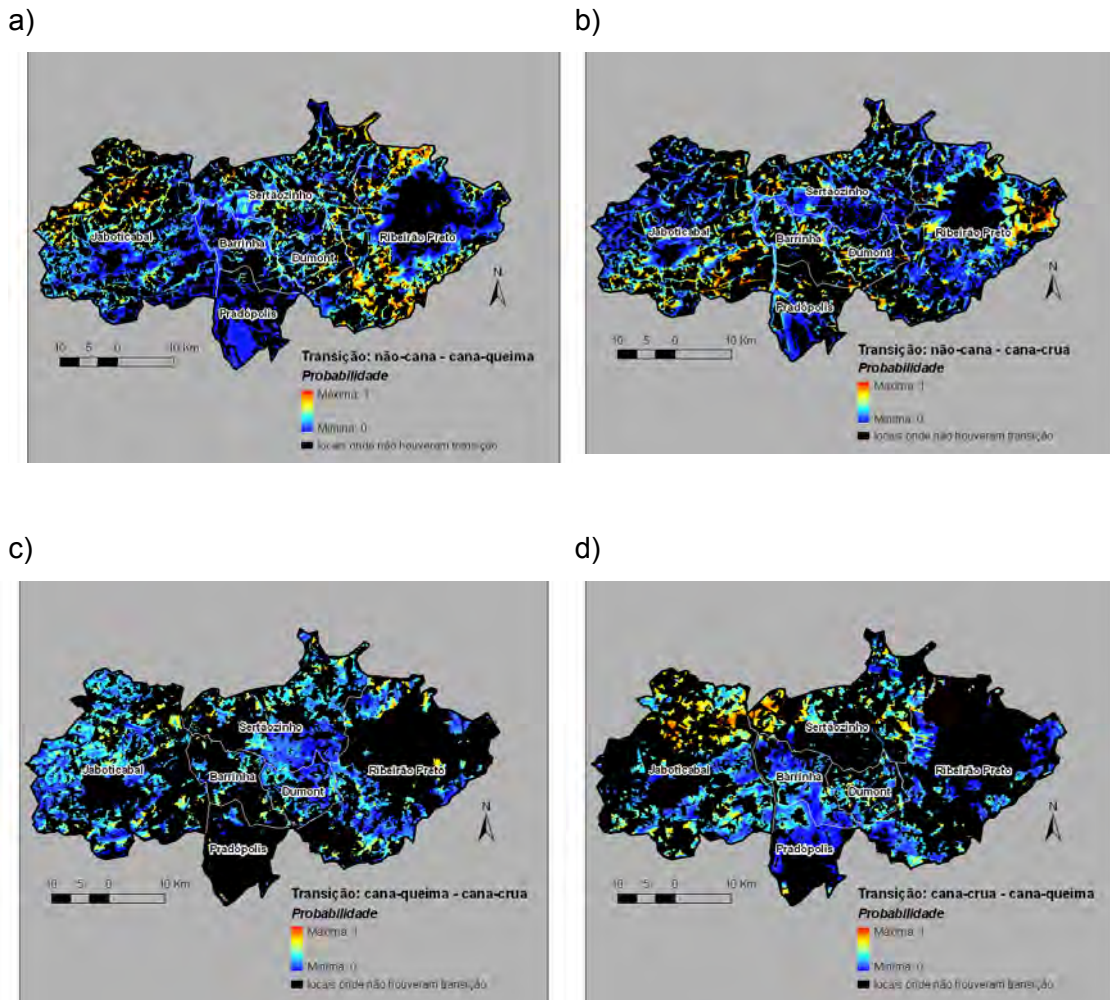


Figura 4.8 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 3.

Devido à Região 3 ser uma área bastante consolidada em termos de colheita mecanizada, as áreas relativas à transição ilustrada na Figura 4.8c possuem probabilidades altas em pequenas porções de maneira esparsa em meio aos municípios da região de estudo. O contrário, a possibilidade de áreas já mecanizadas utilizarem a queima na colheita encontra maior probabilidade ao norte do município de Jaboticabal e oeste de Sertãozinho.

4.3.4. Região 4

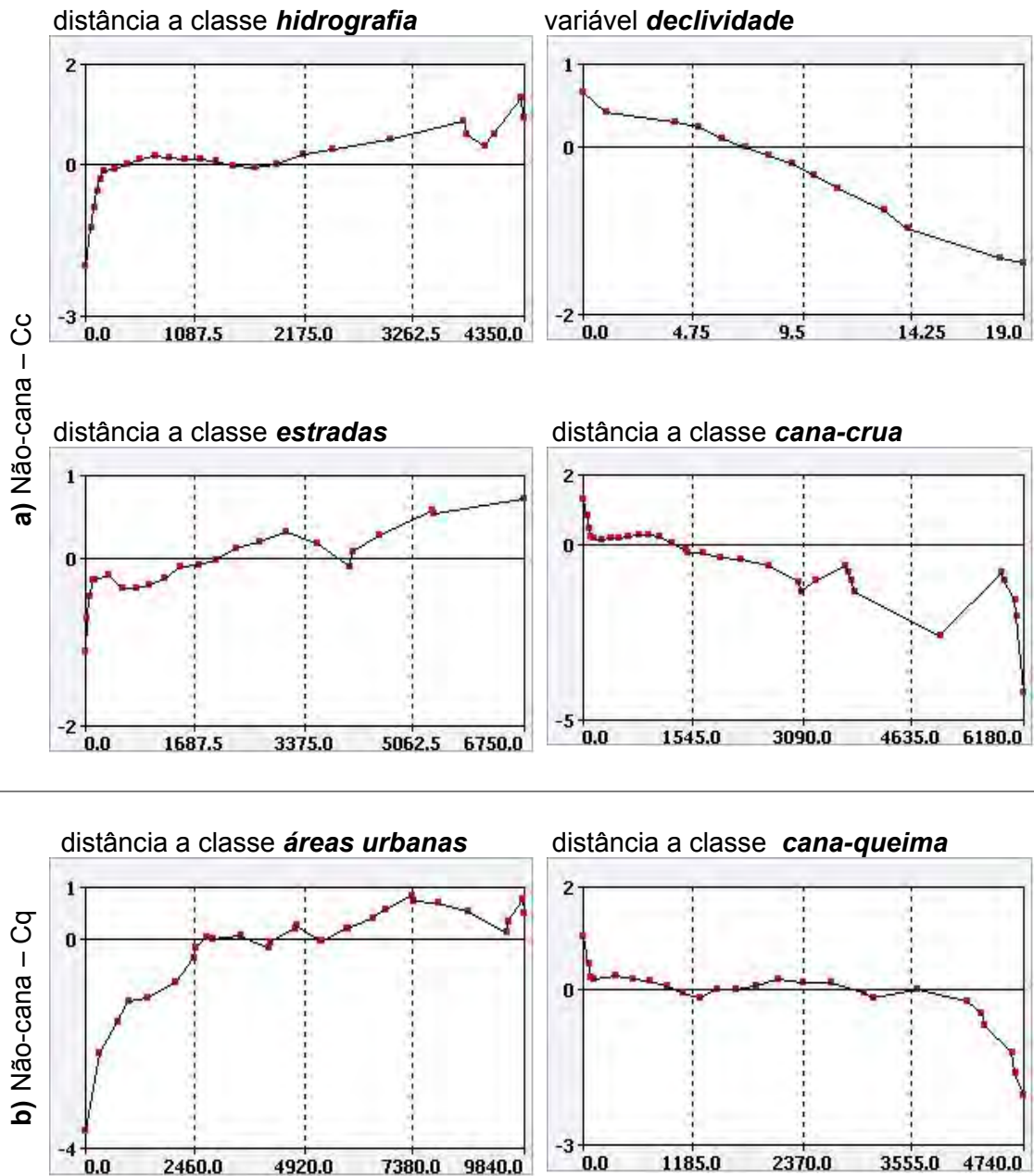


Figura 4.9 – Pesos de variáveis relativas à Região 4. Transições: a) não-cana – cana-crua; b) não-cana – cana-queima; c) cana-crua – cana-queima e d) cana-queima – cana-crua.

(continua)

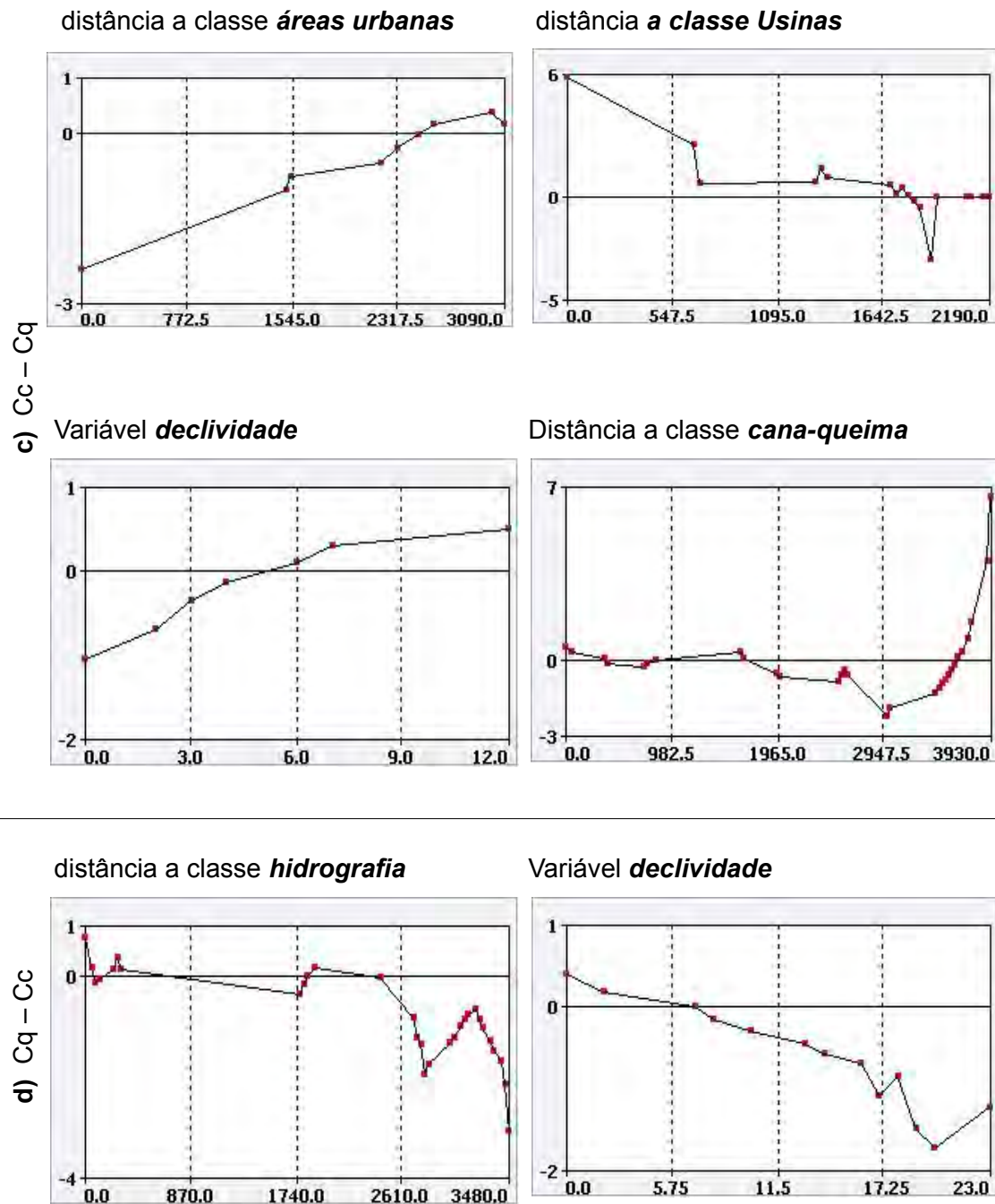


Figura 4.9 – Conclusão

A região de estudo 4 pode ser considerada como de recente expansão, e portanto, ainda em vias de consolidação na produção de cana-de-açúcar. Ainda há bastantes áreas destinadas a esse tipo de cultura, em vista do seu baixo preço em relação às áreas mais tradicionais. Com relação aos condicionantes às transições destacadas pela Figura 4.9, há evidências de que a distância às estradas e aos rios favorece o surgimento de novas áreas dotadas já de técnicas mecanizadas (a). Outros dois fatores que colaboram para tal mudança é a baixa declividade e a proximidade às áreas também mecanizadas. Por outro lado, novas áreas que, nesta região, iniciam suas atividades produtivas colhendo através da queima (b) localizam-se, principalmente, em áreas distantes dos centros urbanos (>2,5 km) e, preferencialmente, próximas às áreas de mesmo manejo.

Apesar de contar com técnicas mecanizadas, algumas áreas reincidiram na prática da queima da palha da cana em 2008 nesta região (c). Quatro fatores podem ser apontados como contribuintes para esta ocorrência. Áreas com mais de 6% de declividade, distantes de aglomerados urbanos e próximos a usinas tornam-se mais potenciais. Apesar disto, foi verificado que a proximidade a áreas que já utilizam a queima não exerce tamanha influência, dado que o evento ocorre de maneira esparsa na região. O contrário (d) ocorre, preferencialmente, em áreas próximas a rios e cuja declividade é menos acentuada.

Nos mapas ilustrados na Figura 4.10, algumas transições de uso e cobertura do solo foram destacadas. A transição de áreas não cultivadas para áreas em que fora iniciado o plantio utilizando a queima (a) possui maior probabilidade de ocorrer na parte central da região entre os municípios de José Bonifácio, Jaci e Neves Paulista, onde surgiram áreas de queima em 2008, além do sudoeste de José Bonifácio. As novas áreas de cana, já dotadas de uma estrutura mecanizada para a colheita (b) surgem com maior probabilidade em torno das

áreas urbanas de São José do Rio Preto e Mirassol, no limite entre os municípios de Jaci e Neves Paulista, além do município de Planalto possuir forte potencial para este tipo de transição.

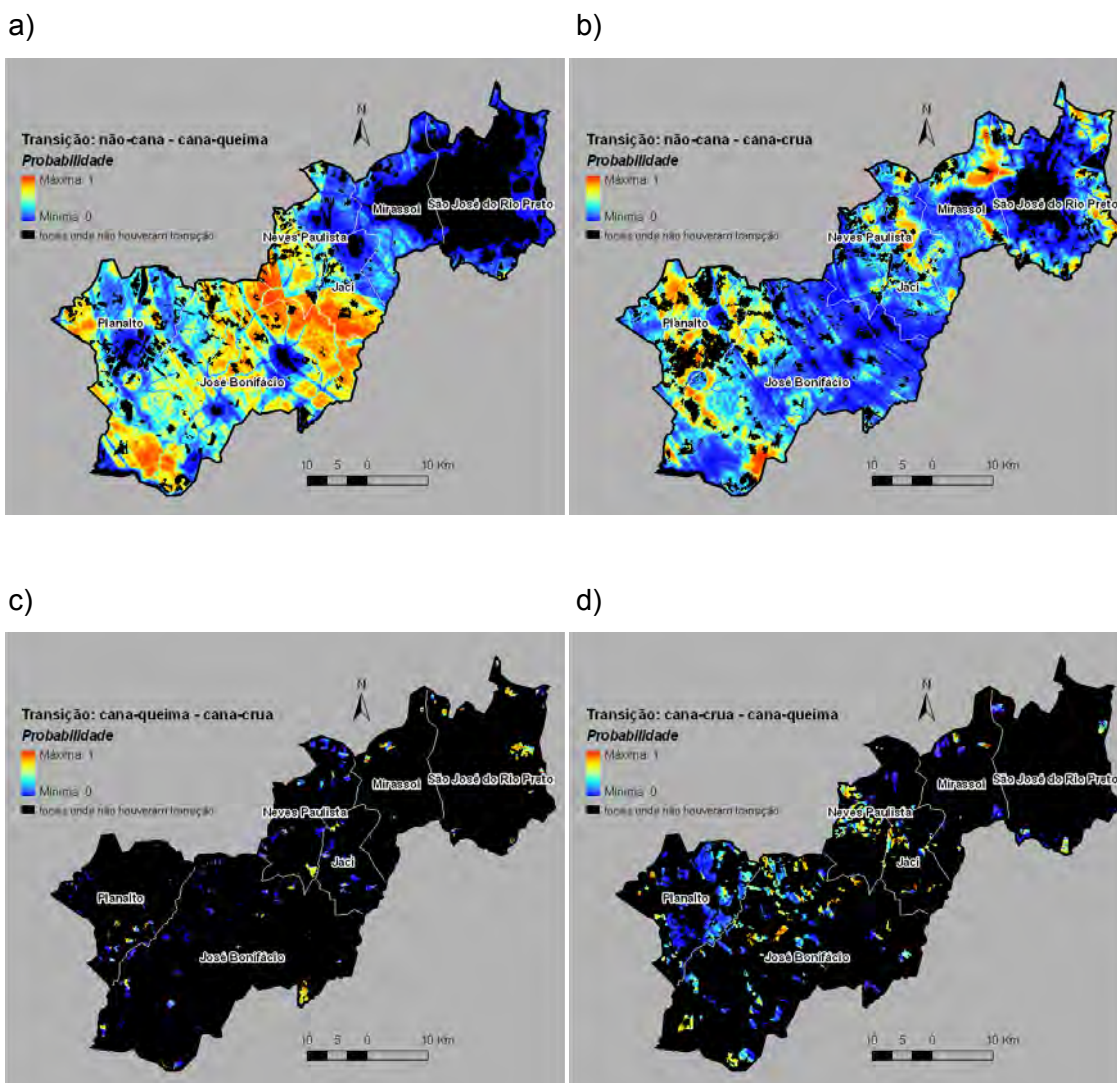


Figura 4.10 – Mapas de probabilidade de transição entre classes na Região 4.

A aderência à mecanização por parte de produtores que já realizam a queima (c) ocorre em menor proporção, destacando pequenas áreas em Mirassol e São José do Rio Preto. Por outro lado, a utilização da queima por produtores que já utilizam máquinas (d) tem maior probabilidade de ocorrer em pequenas

áreas distribuídas entre os municípios de Neves Paulista, Jaci e José Bonifácio.

De maneira geral, as variáveis contínuas selecionadas puderam estimar a influência provocada pela proximidade ou distância às classes, como rios, estradas e áreas urbanas, na mudança do manejo da colheita da cana. As distâncias dinâmicas às classes de cana-crua e cana-queima evidenciaram que muitos dos processos ocorrem por influência das áreas consolidadas, ora por prática de queima, ora pela prática da não-queima. Já as variáveis categóricas, como presença de APP de rios, faixas de 50 m das Unidade de Conservação, 15 m das estradas, 1 km dos centros urbanos e áreas com declividade superior a 12%, contribuíram pouco para explicar as transições observadas.

Por outro lado, aspectos econômicos que dizem respeito à dinâmica de mercado não foram incluídos nesta etapa da modelagem. Demanda nacional e internacional pelos produtos da cana-de-açúcar, painel de estabilidade política, preço e demanda por maquinário agrícola são variáveis que podem complementar o entendimento dos condicionantes à dinâmica espacial da prática da queima no espaço agrícola no estado de São Paulo. Recomenda-se a inclusão destas variáveis em etapas futuras deste trabalho.

4.4. Parâmetros finais para o modelo estacionário

Os modelos selecionados para gerar os cenários futuros e mapas de probabilidade foram: 20091217 (Região 1); 20091219 (Região 2); 20100117 (Região 3); e 20100117 (Região 4).

Foram utilizados os parâmetros listados nas Tabelas 4.6 a 4.9 para gerar cenários futuros simulados, segundo o modelo concebido e devidamente ajustado. Os valores de média e variância foram calculados por unidade de área em ha. Estes cenários foram gerados em três passos de dois anos correspondentes aos anos de 2010, 2012 e 2014 adotando como mapa de cobertura e uso da terra inicial o mapa de 2008. Este procedimento foi gerado

na plataforma DINAMICA EGO 1.4.0.

Tabela 4.6 – Parâmetros de *expand* e *patcher* para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a **Região 1**.

| Transição | % Exp | Expander | | | Patcher | | |
|---------------|-------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| | | Média | Variância | Isometria | Média | Variância | Isometria |
| não-cana - Cb | - | - | - | - | - | - | - |
| não-cana - Cq | 0,30 | 100 | 50 | 2,0 | 100 | 300 | 2,0 |
| não-cana - Cc | 0,30 | 100 | 50 | 2,0 | 300 | 300 | 2,0 |
| Cb-não-cana | 1,00 | 4 | 135 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cb - Cq | 0,35 | 17 | 300 | 2,0 | 50 | 300 | 2,0 |
| Cb - Cc | 1,00 | 100 | 50 | 2,0 | 50 | 300 | 2,0 |
| Cq - não-cana | 1,00 | 6 | 642 | 2,0 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cq - Cb | 0,35 | 100 | 100 | 1,5 | 150 | 50 | 1,5 |
| Cq - Cc | 0,90 | 100 | 50 | 2,0 | 300 | 50 | 2,0 |
| Cc - não-cana | 1,00 | 7 | 200 | 2,0 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cc - Cb | 0,40 | 100 | 100 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| Cc - Cq | 0,60 | 27 | 300 | 2,0 | 100 | 50 | 1,7 |

Tabela 4.7 – Parâmetros de *expand* e *patcher* para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a **Região 2**.

| Transição | % Exp | Expander | | | Patcher | | |
|---------------|-------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| | | Média | Variância | Isometria | Média | Variância | Isometria |
| não-cana - Cb | 0,70 | 12 | 300 | 1,5 | 12 | 876 | 1,5 |
| não-cana - Cq | 0,30 | 100 | 300 | 1,3 | 100 | 200 | 1,3 |
| não-cana - Cc | 1,00 | 80 | 300 | 1,3 | 100 | 200 | 1,3 |
| Cb-não-cana | 1,00 | 6 | 212 | 1,5 | 6 | 212 | 1,5 |
| Cb - Cq | 1,00 | 100 | 300 | 1,3 | 100 | 200 | 1,3 |
| Cb - Cc | 0,50 | 50 | 300 | 1,3 | 100 | 200 | 1,3 |
| Cq - não-cana | 0,80 | 9 | 754 | 1,5 | 9 | 754 | 1,5 |
| Cq - Cb | 0,90 | 17 | 300 | 1,5 | 17 | 1025 | 1,5 |
| Cq - Cc | 0,90 | 100 | 300 | 1,3 | 100 | 200 | 1,3 |
| Cc - não-cana | 0,90 | 12 | 836 | 1,5 | 12 | 836 | 1,5 |
| Cc - Cb | 0,80 | 21 | 300 | 1,5 | 21 | 1686 | 1,5 |
| Cc - Cq | 1,00 | 150 | 300 | 1,3 | 100 | 200 | 1,3 |

Tabela 4.8 – Parâmetros de *expander* e *patcher* para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a **Região 3**.

| Transição | % Exp | Expander | | | Patcher | | |
|---------------|-------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| | | Média | Variância | Isometria | Média | Variância | Isometria |
| não-cana - Cc | 0,70 | 300 | 744 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| não-cana - Cb | 0,80 | 4 | 88 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |
| não-cana - Cq | 0,80 | 6 | 344 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| Cc - não-cana | 1,00 | 8 | 877 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cc - Cb | 1,00 | 14 | 1234 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cc - Cq | 1,00 | 10 | 1612 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| Cb - não-cana | 0,80 | 5 | 379 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cb - Cc | 0,90 | 70 | 1411 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| Cb - Cq | 1,00 | 8 | 223 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| Cq - não-cana | 0,90 | 5 | 172 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |
| Cq - Cc | 0,80 | 50 | 300 | 1,5 | 100 | 50 | 1,5 |
| Cq - Cb | 1,00 | 10 | 532 | 1,5 | 10 | 50 | 1,5 |

Tabela 4.9 – Parâmetros de *expander* e *patcher* para o modelo de cenários futuros, segundo modelo estacionário para a **Região 4**.

| Transição | % Exp | Expander | | | Patcher | | |
|-----------------|-------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| | | Média | Variância | Isometria | Média | Variância | Isometria |
| n_cana - bisada | - | - | - | - | - | - | - |
| n_cana - queima | 0,35 | 23 | 1938 | 1,5 | 150 | 200 | 1,5 |
| n_cana - crua | 0,80 | 50 | 2996 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| bisada-n_cana | 1,00 | 5 | 196 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| bisada - queima | 1,00 | 11 | 255 | 1,5 | 100 | 300 | 1,5 |
| bisada - crua | 1,00 | 70 | 1265 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| queima - n_cana | 0,80 | 10 | 484 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| queima - bisada | 0,90 | 20 | 1083 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| queima - crua | 0,80 | 100 | 2640 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| crua - n_cana | 0,90 | 15 | 1541 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| crua - bisada | 0,80 | 23 | 1782 | 1,5 | 50 | 300 | 1,5 |
| crua - queima | 0,30 | 21 | 1117 | 1,5 | 200 | 300 | 1,5 |

4.5. Avaliação do modelo estacionário e do modelo prescritivo

O modelo estacionário é baseado na cadeia de Markov, que consiste em um modelo matemático destinado a descrever um dado fenômeno ou processo que se move em uma sequência de passos e através de um conjunto de estados finitos. Sendo assim, segundo o período observado e as variáveis disponíveis,

o modelo atendeu aos resultados esperados, por auxiliar na explicação de alguns condicionantes que influenciam a dinâmica da colheita no intervalo de tempo observado (2006 a 2008) e apontar áreas de maior probabilidade para a ocorrência de aderência à prática da não-queima ou permanência da prática da queima.

O método de validação com decaimento exponencial (*fuzziness of location*) utilizado neste trabalho não foi considerado para áreas agrícolas canavieiras, onde talhões cultivados se distribuem de maneira pouco coesa no espaço. Nas regiões 1 e 4, que possuem este tipo de distribuição, os índices mais altos (cerca de 0,43) foram obtidos quando se estabeleciam parâmetros altos de variância para as funções *expander* e *patcher*. O resultado simulado relativo ao ano de 2008 se mostrou muito discrepante com a realidade, quando comparado ao mapa de cobertura e uso da mesma época.

O algoritmo de validação implementado na plataforma DINAMICA EGO gera, além dos índices de similaridade, mapas de similaridade correspondentes ao tamanho da janela. O resultado destes mapas é um índice aproximado de “acerto” e de “erro” obtido por meio da diferença entre os mapas simulados e reais. Através de análise utilizando estes mapas, chegou-se à conclusão de que as áreas de maior ocorrência de “acerto” são áreas mais compactas de determinada classe. Portanto, para as regiões 1 e 4, que não seguem este padrão, o critério de definição do melhor modelo foi através de interpretação visual entre o mapa simulado e o de cobertura e uso de 2008. A Figura 4.11 ilustra um exemplo do que foi discutido para a região de estudo 1.

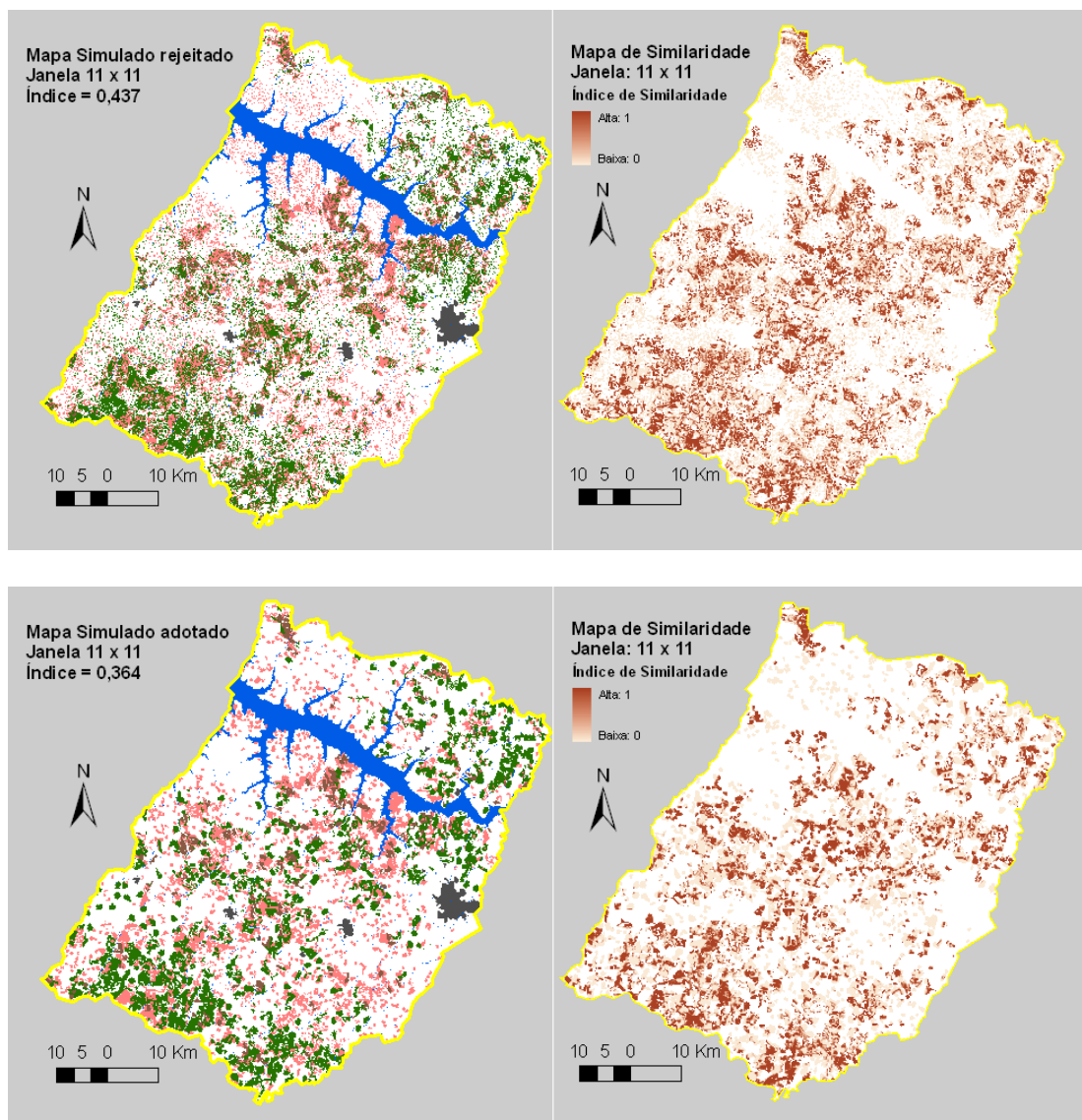


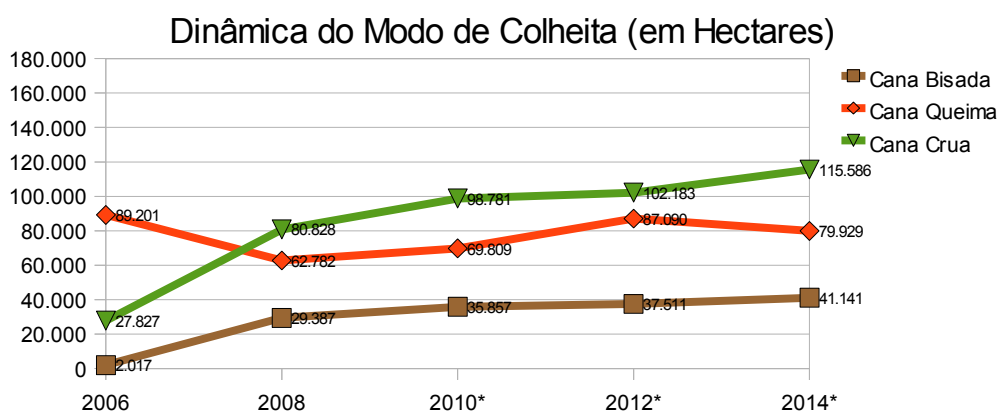
Figura 4.11 – Comparação entre diferenças responsáveis pelo baixo resultado do índice de similaridade *fuzzy* (Região 1).

Convém lembrar que o período disponível de dados observados é pequeno e ainda, foi marcado por intensas especulações e oscilações do etanol e do açúcar nos mercados nacional e internacional. Fato este que, direta e indiretamente, afetou a produção e toda a dinâmica da cana-de-açúcar no Brasil, assim como seu respectivo planejamento. Exemplo disto é o alto número de áreas de cana não colhida (bisada), observado em maior grau nas

áreas de estudo correspondentes ao entorno de Araçatuba e Jaú. Fenômenos como este, que ocorreram neste período de tempo, não tendem a ocorrer com frequência, pois acarreta grandes prejuízos.

O modelo estacionário, no entanto, não prevê acontecimentos aleatórios, pois trata os sucessivos passos de tempo sem considerar rupturas e oscilações bruscas nas tendências de mudanças observadas. Modelos que incorporem variações econômicas de mercado, através de equações matemáticas que alterem as respectivas matrizes de transição, poderiam contemplar outras propostas de cenários futuros. Assim, haveria a possibilidade de compor um quadro mais amplo e seguro, beneficiando os tomadores de decisão nas atividades de planejamento. A Figura 4.12 ilustra os gráficos gerados que prevêem a situação da colheita para os anos 2010, 2012 e 2014, segundo o modelo estacionário.

a) Região 1

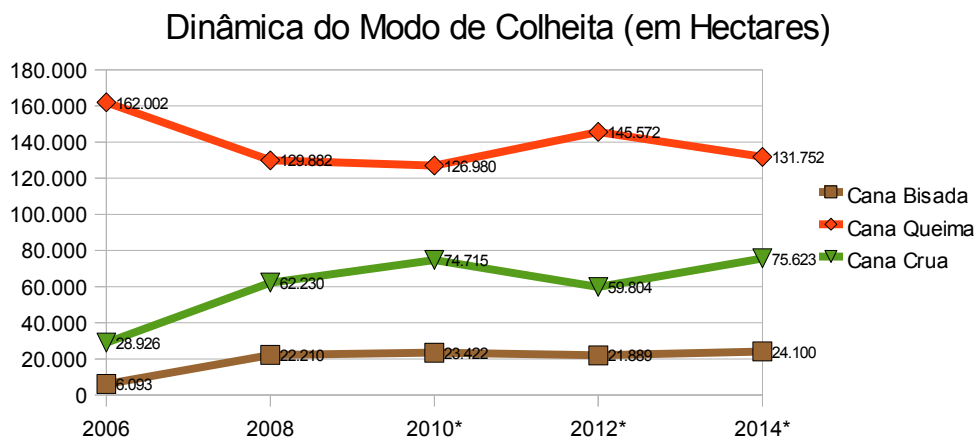


* ano simulado

Figura 4.12 – Cenários futuros para as classes de colheita da cana-de-açúcar, segundo o modelo estacionário.

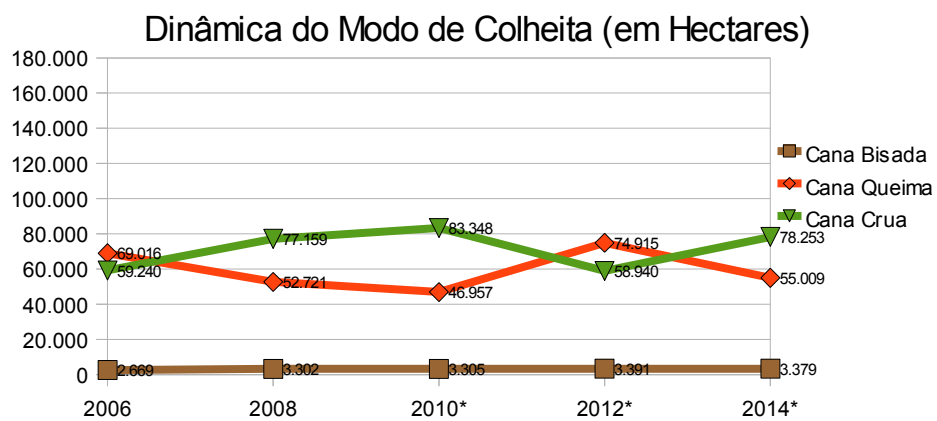
(continua)

b) Região 2



* ano simulado

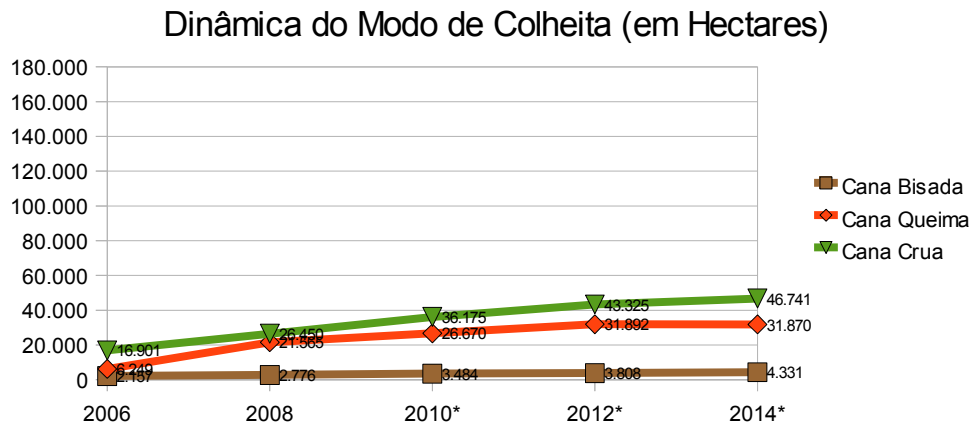
c) Região 3



* ano simulado

Figura 4.12 – Continuação
(continua)

d) **Região 4**



* ano simulado

Figura 4.12 – Conclusão.

De acordo com a previsão para o ano de 2014, ilustrada nos gráficos acima, a prática da queima sofrerá um decréscimo nos anos seguintes, exceto na região 4, onde se localiza o município de São José do Rio Preto. Porém, em todas as regiões é previsto o aumento da colheita mecanizada em relação ao ano de 2006. As taxas mais significativas deste crescimento, segundo o modelo, são para a região 1, onde se localiza o município de Araçatuba.

A partir das matrizes de transição do modelo estacionário foram simulados na plataforma DINAMICA EGO cenários espacializados com as mesmas classes do mapa de uso e cobertura de 2008, utilizando os pesos de evidência calculados para cada variável. As Figuras 4.13 a 4.16 ilustram o resultado da simulação, segundo parâmetros selecionados descritos na Seção 4.4, considerando o mapa de uso e cobertura de 2008 como entrada para o modelo.

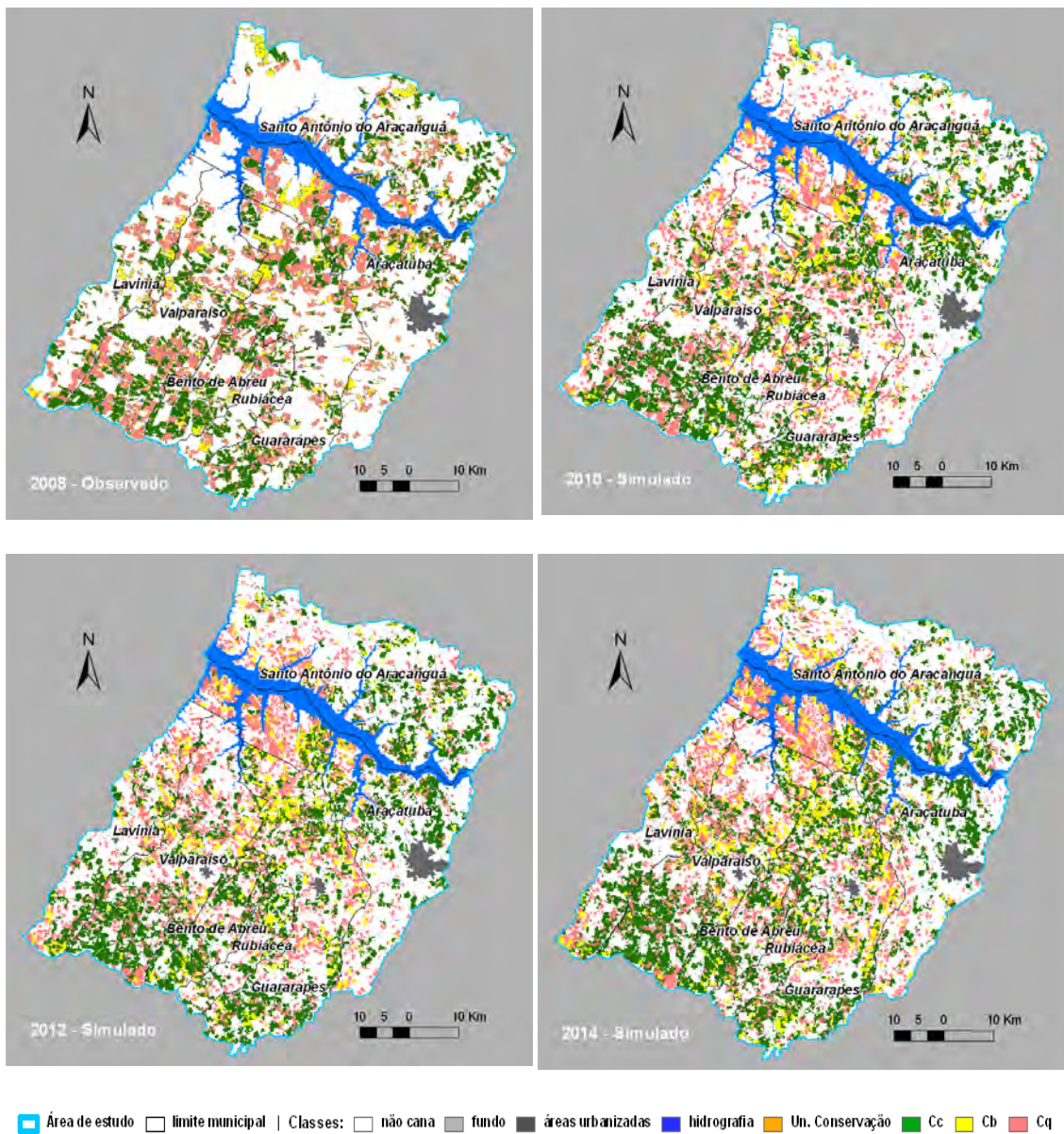


Figura 4.13 – Região 1: simulações de cenários futuros.

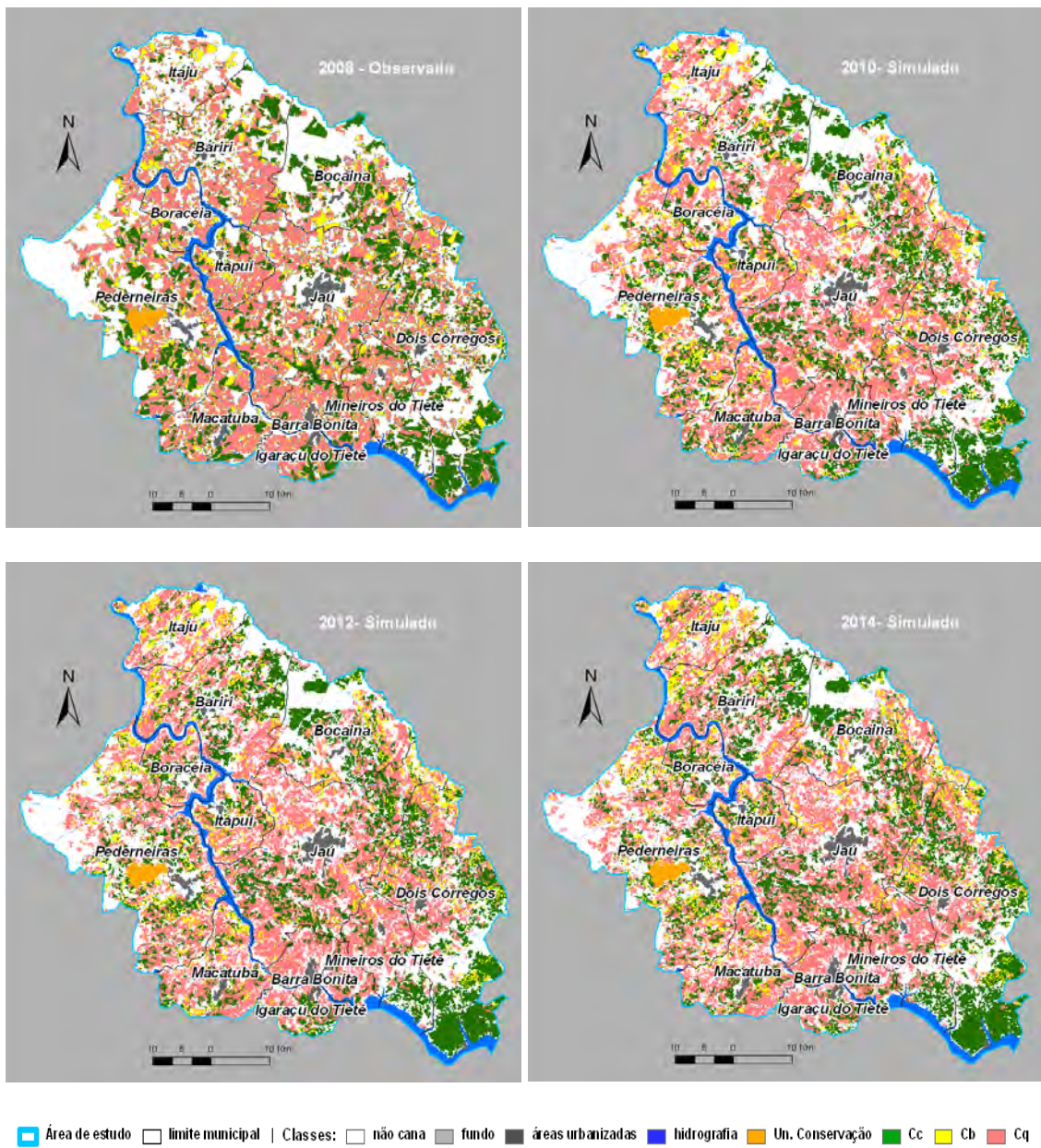


Figura 4.14 – Região 2: simulações de cenários futuros.

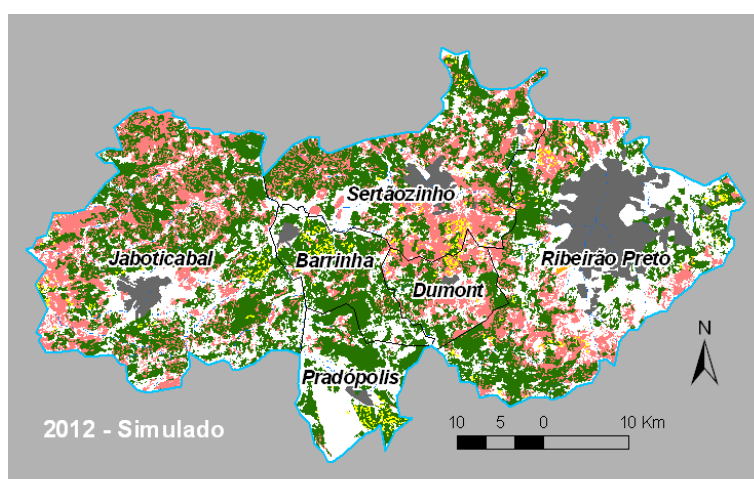
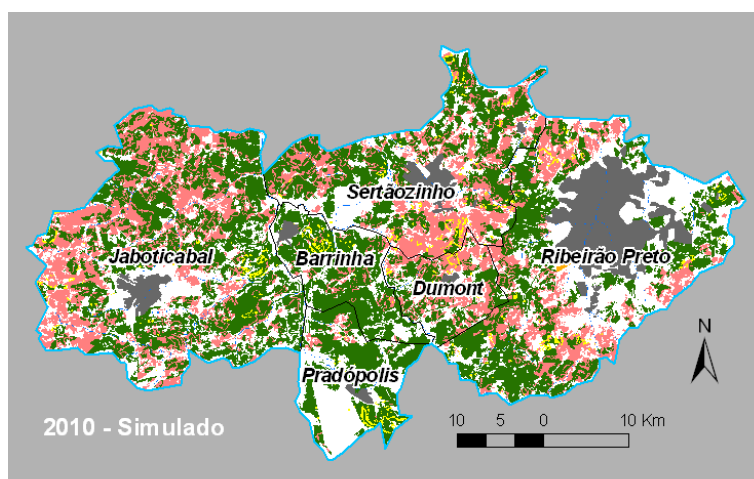
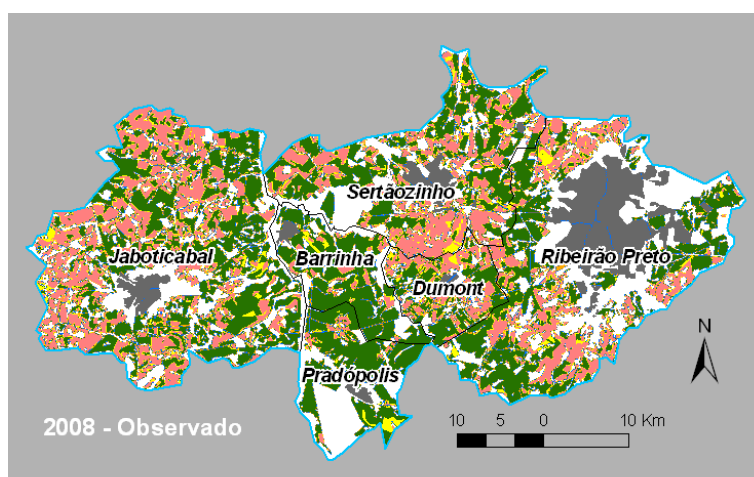
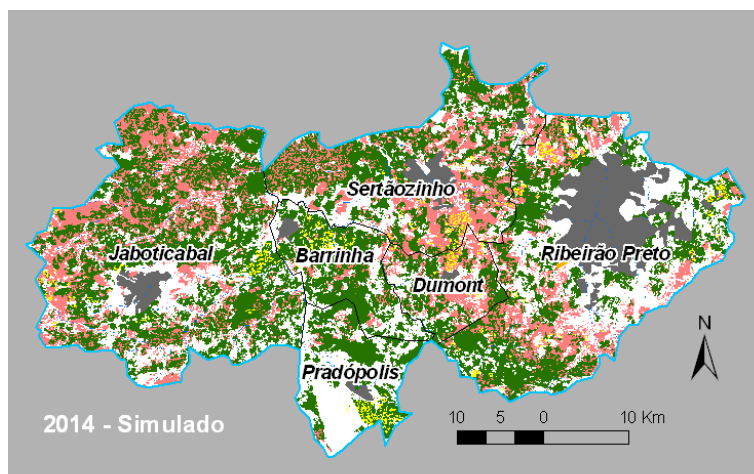


Figura 4.15 – Região 3: simulações de cenários futuros.
(continua)



 Área de estudo
 limite municipal |
 Classes:
 não cana
 fundo
 áreas urbanizadas
 hidrografia
 Un. Conservação
 Cc
 Cb
 Cq

Figura 4.15 – Conclusão

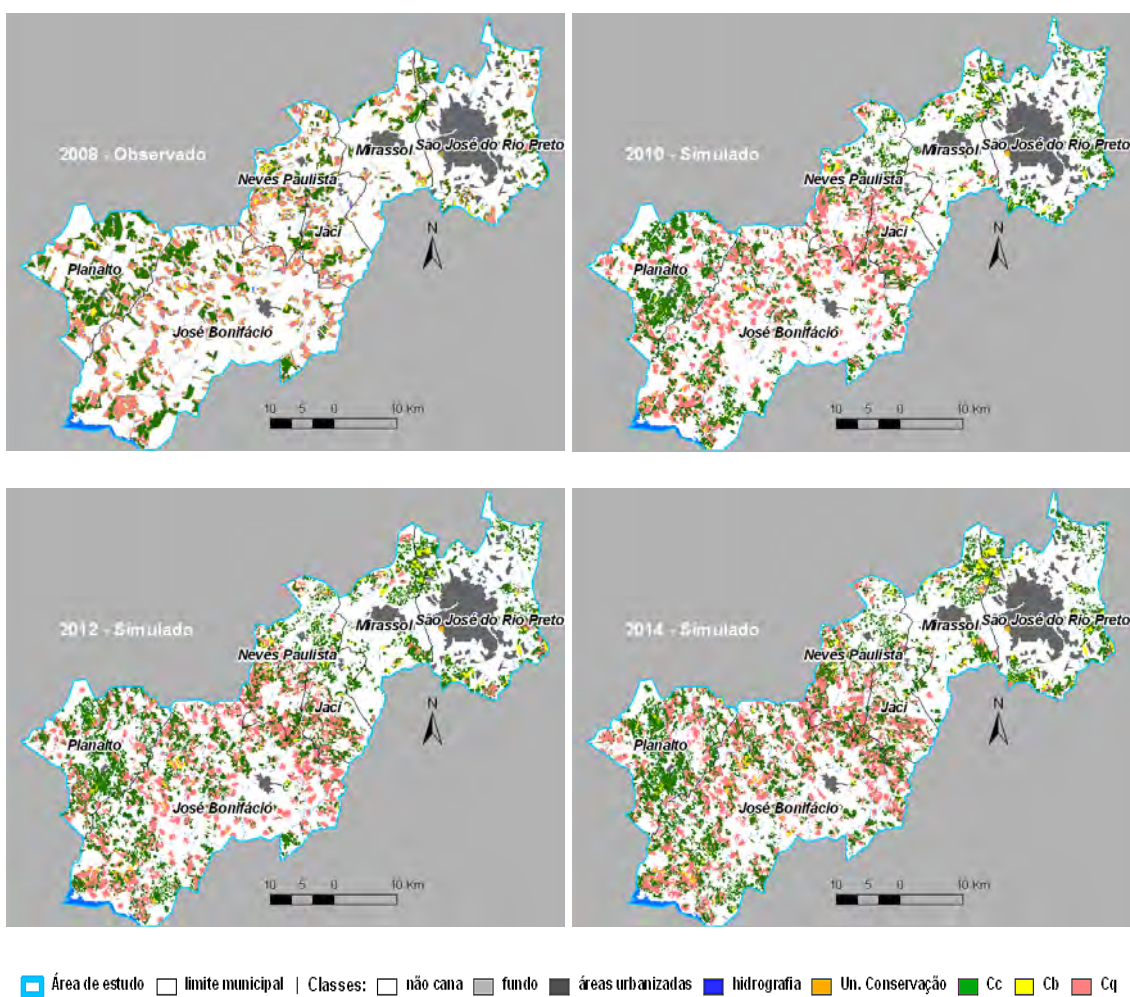


Figura 4.16 – Região 4: simulações de cenários futuros.

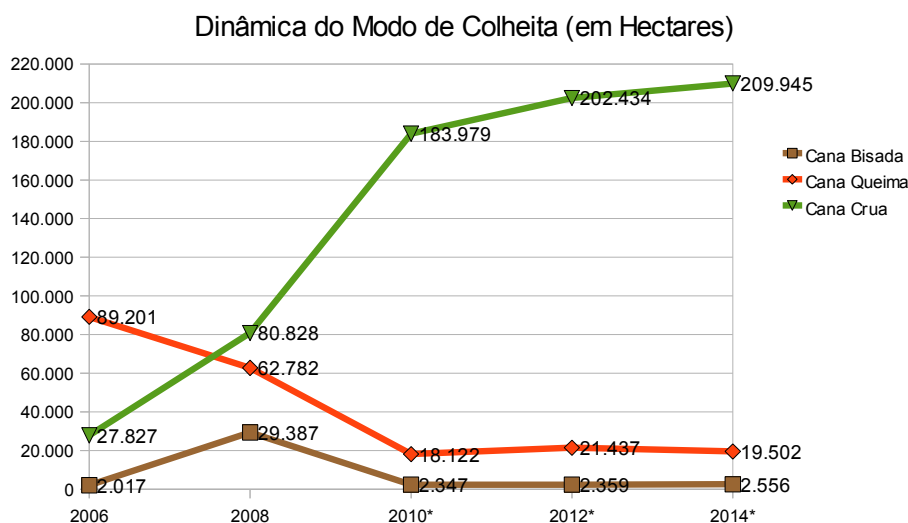
Denota-se, pelas simulações apresentadas nas Figura 4.13 a 4.16, a espacialização da dinâmica da colheita da cana-de-açúcar com base na quantidade de áreas previstas para os anos subsequentes. Certificou-se que as áreas indicadas pelos mapas de probabilidade como mais favoráveis para a transição de classes realmente ocorreram da maneira prevista.

Contudo, especialistas acreditam que estes cenários simulados a partir de um modelo estacionário não viriam a ocorrer de acordo com as perspectivas futuras e tendência geral à adesão ao protocolo por parte dos produtores de cana-de-açúcar. Para eles, o aumento da cana-bisada nas regiões 1 e 2, como

prevê este modelo, é um acontecimento irreal. Além disso, existe uma inclinação à mecanização para todos estes municípios por motivos, principalmente, econômicos. Neste primeiro modelo, foram concebidas variáveis físicas que, no caso, serviram para estimar o potencial de determinada mudança ocorrer no espaço.

A partir das matrizes de transição do modelo prescritivo, pode-se recalculer a quantidade de áreas para todas as classes, gerando cenários prescritivos futuros. Na Figura 4.17, são apresentados estes cenários até o ano limite previsto para a extinção da queima da colheita da cana-de-açúcar.

a) **Região 1**

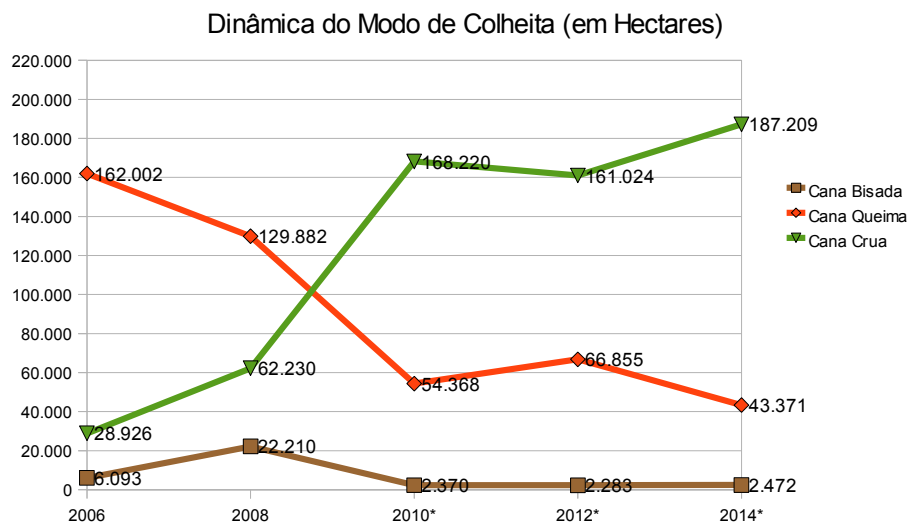


* ano simulado

Figura 4.17 - Cenários futuros para as classes de colheita da cana-de-açúcar segundo o modelo prescritivo.

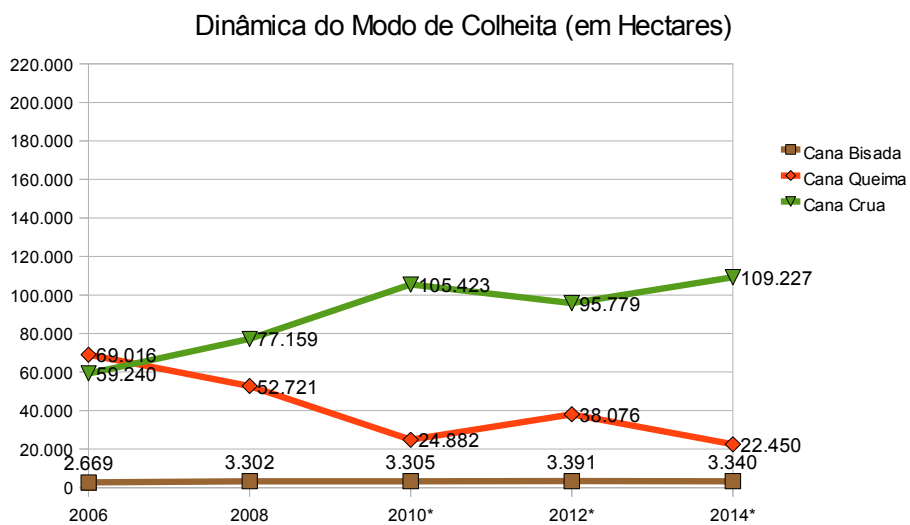
(continua)

b) Região 2



* ano simulado

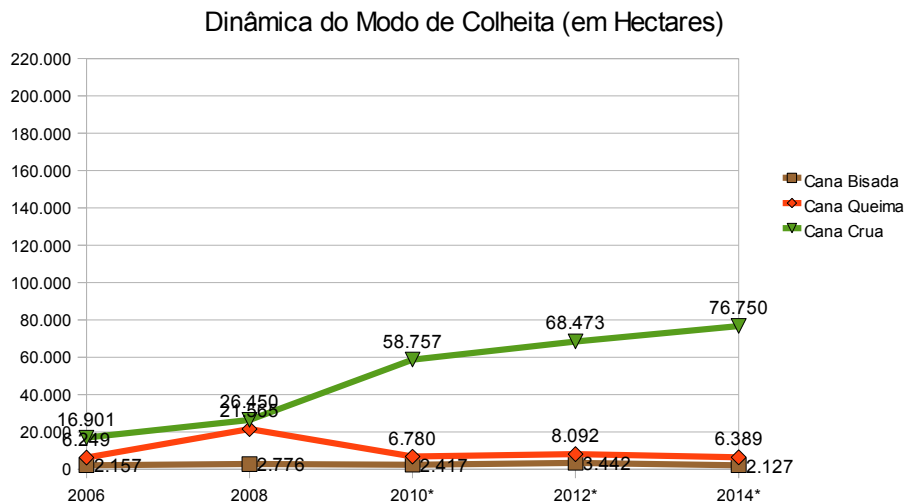
c) Região 3



* ano simulado

Figura 4.17 – Continuação.
(Continua)

d) **Região 4**



* ano simulado

Figura 4.17 – Conclusão.

Segundo este modelo, as taxas de crescimento da mecanização das lavouras canaveiras e de decréscimo do uso do fogo seriam muito maiores do que as estimadas pelo modelo estacionário, enquanto a ocorrência da cana bisada permaneceria como o esperado para os anos que seguem. Em razão do prazo desta pesquisa se findar, não foram aplicados estes percentuais alterados no modelo projetado para gerar simulações espaciais de cenários futuros.

Em todo caso, o intervalo temporal de dados históricos disponíveis, ainda que de grande valia, ainda é reduzido para construir, com maior propriedade, quaisquer cenários espaciais projetados futuros. O modelo estacionário, para este fim, se mostrou suscetível a interferências de eventos circunstanciais, como o aumento anômalo da cana bisada em 2008.

4.6. Indicativos de áreas aderentes ao protocolo ambiental

Apesar de ambos modelos apresentarem taxas distintas de decréscimo da prática da queima nas lavouras para as regiões de estudo, nenhuma delas em sua íntegra teve uma aderência de 100% em cenário projetado futuro para o ano de 2014. A aderência supõe que o percentual de cana-de-açúcar colhida é integralmente obtido sem o uso do fogo. A Figura 4.18 ilustra os gráficos comparativos, relativos à estimativa de aderência das quatro regiões de estudo segundo os dois modelos.

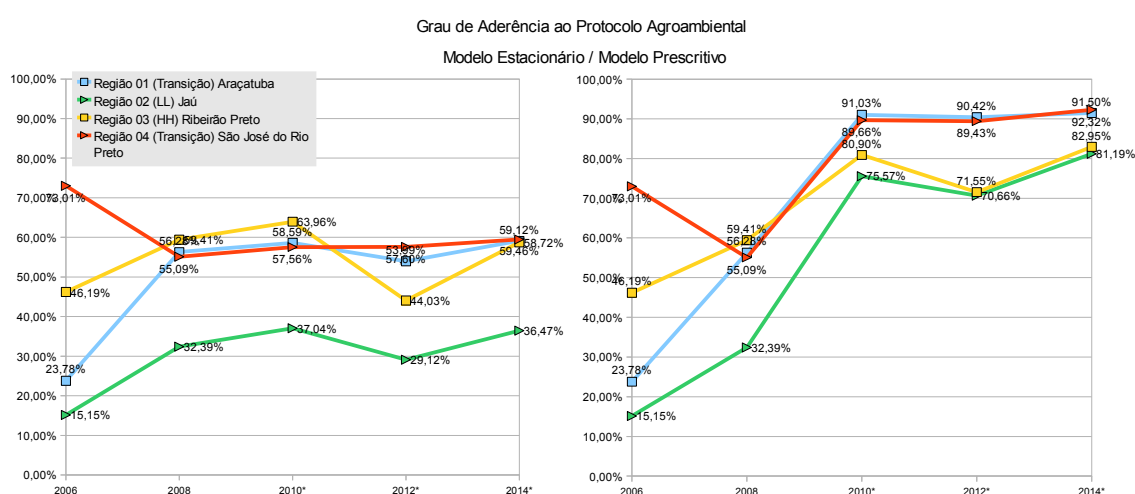


Figura 4.18 – Comparação entre projeções futuras de aderência ao protocolo ambiental.

Enquanto o modelo estacionário prevê que nenhuma região, como um todo, irá atingir acima de 60% de aderência, o modelo prescritivo indica que, salvo suas diferenças atuais, este percentual irá variar entre 81 a 93% de aderência. De qualquer maneira, se este indicador for tratado para cada município isoladamente, é provável que muitos consigam cumprir a meta estabelecida.

Enquanto o modelo estacionário aponta que três regiões de estudo (exceto a região 3) alcançam quase 60% de aderência, o modelo prescritivo indica uma maior aderência daquelas regiões que, recentemente, vêm crescendo na

produção da cana-de-açúcar. As regiões 1 e 4 vêm incorporando recentes transformações no uso e cobertura do solo por conta desta expansão canavieira. Trata-se de região em recente expansão, com diversos projetos de investimento no setor sucroenergético. De acordo com o modelo estacionário, os municípios de Bento de Abreu (Região 1) e São José do Rio Preto, Mirassol, Planalto (Região 4) atenderiam às expectativas do protocolo em 2014. Este quadro poderia se estender a outros municípios, como Araçatuba, Valparaíso e Guararapes (Região 1), além de José Bonifácio e Jaci (Região 4), se os percentuais de aderência, realmente, se concretizarem segundo o esperado por especialistas.

O município de Dois Córregos (Região 2) e os municípios de Barrinha, Pradópolis e Ribeirão Preto (Região 3) se consolidariam como áreas predominantemente mecanizadas segundo o que estima o modelo estacionário, podendo se estender a quase todos os municípios segundo o modelo prescritivo. De todo modo, estas regiões são mais tradicionais, e o cultivo da cana se encontra mais consolidado. É necessário uma atenção no intuito de monitorar o manejo da colheita da cana-de-açúcar nos municípios da região 3, como Jaú, Pederneiras e entorno.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho permitiu apreender de certa forma a complexidade manifestada no espaço agrícola do estado de São Paulo. No tocante à cultura da cana-de-açúcar, concebe-se um conjunto dinâmico de fatores que contribuem para o seu entendimento. Variáveis físicas e econômicas tornam-se necessárias para a elaboração de um modelo dotado de complexidade à altura da dinâmica que o modo de colheita da cana se apresenta.

O método de análise espacial permitiu identificar agrupamentos de áreas com diferentes tipos de colheita. Deste modo, pode-se acompanhar a espacialização das áreas de queima e não-queima da palha da cana em cada ano-safra, a fim de verificar como o fenômeno se desenvolve no espaço.

O modelo dinâmico, parametrizado pelo método bayesiano de pesos de evidência, se mostrou adequado para o entendimento das variáveis condicionantes e da probabilidade da ocorrência das transições relativas às áreas de cana-queima e de cana-crua. Das variáveis que contribuem para a dinâmica da colheita da cana destacam-se as variáveis contínuas, como declividade e distância aos rios, às estradas, às usinas e aos aglomerados urbanos. As demais variáveis pouco ou nada contribuíram para este entendimento.

Do ponto de vista das simulações de cenários futuros, o modelo estacionário (cadeia de Markov) não pode concluir apontamentos seguros sobre as áreas prováveis aderentes à extinção da queima até 2014, visto que a série temporal de observações disponível é reduzida. O modelo prescritivo, por sua vez, indica que ao final do prazo estipulado pelo protocolo ambiental, as regiões 2 e 3 não atenderiam completamente à extinção da queima na colheita da cana.

A concepção de cenários distintos, através dos dois modelos expostos, podem ser utilizados por tomadores de decisão para fornecerem indícios de tendência

do comportamento das regiões de estudo em questão. De todo modo, ambos os modelos são incapazes de prever, com alto nível de segurança, cenários de uma cultura dinâmica como a da cana-de-açúcar.

Em vista das limitações computacionais atuais, recomenda-se algumas alterações nos modelos realizados. Áreas de estudos menores ou dispensando a extensão de *buffer* são mais facilmente tratáveis nas diversas etapas da modelagem. Considerando esta recomendação, o modelo regionalizado pode ser dispensado, quando este for utilizado como alternativa para operacionalizar o processo de modelagem.

Para trabalhos futuros, recomenda-se utilizar as matrizes do modelo prescritivo e realizar as etapas de calibração, validação e simulação somente nas regiões de estudo (sem *buffer* de 30 km) em passo de um ano, a fim de possibilitar um acompanhamento anual, ajustando-se o modelo a cada passo de ano-safra. Uma comparação com o modelo estacionário, em seguida, possibilitaria maiores esclarecimentos no estudo desta dinâmica.

Por fim, recomenda-se incorporar variáveis econômicas, como painel de estabilidade política, preço do etanol, preço do açúcar, preço e demanda por maquinário agrícola etc, para a construção de diversos cenários que possibilitem indicações mais precisas quanto à aderência ao protocolo. Para esta realização, os dados do monitoramento da queima da cana durante a colheita são de suma importância para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor MODIS**. 2007. 103 p. (INPE-14803-TDI/1246). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.11.18.56>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F.; CARVALHO, M. A.; AULICINO, T. L. I. N.; BRANDÃO, D.; GOLTZ, E.; ADAMI, M.; SUGAWARA, L. M. **Mapeamento da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ano safra 2007/2008**. São José dos Campos: INPE, 2009a. 63 p. (INPE-15724-RPQ/821). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/05.18.13.12>>. Acesso em: dezembro de 2009.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 29, n. 3, p. 440-451, 2009b. doi: <10.1590/S0100-69162009000300011>.

AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; FEITOSA, F. F.; GONÇALVES, F. G.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Análise espacial da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: a influência da precipitação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2231-2238. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-14679-PRE/9653). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.15.48>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

AGUIAR, D. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; SANCHÉZ, G. A.; BARROS, M. A.; SUGAWARA, L. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MOREIRA, M. A. **Mapeamento da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: ano safra 2006/2007**. São José dos Campos: INPE, 2007b. 48 p. (INPE-14788-RPE/811). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.10.12.56>>. Acesso em: dezembro de 2009.

ALMEIDA, C. M.; GLERIANI, J. M. Redes Neurais e Autômatos Celulares como uma Plataforma para a Simulação de Mudanças do Uso do Solo Urbano. In: ALMEIDA, Cláudia Maria de; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira (Ed.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São José dos Campos, SP: Digital Press, 2007b. p. 300-323. ISBN 9788586238550. (INPE--/). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m12@80/2007/05.09.13.44>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

ALMEIDA, C. M. Modelos Celulares de Dinâmicas Espaço-Temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos. In: MEIRELLES, Margareth Simões Penello; CÂMARA, Gilberto; ALMEIDA, Claudia Maria de (Ed.). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. [s.n.] 2007a. p. . em; preparação. ISBN 8573833867. (INPE--/). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2006/01.11.16.06>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Perspectiva histórica de modelos de dinâmicas urbanas e regionais. In: ALMEIDA, Cláudia Maria de; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira (Ed.). **Geoinformação em Urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São José dos Campos, SP: Digital Press, 2007b. p. 249-281. ISBN 9788586238550. (INPE--/). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m12@80/2007/05.09.12.35>>. Acesso em: 23 abr. 2010

ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento**: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2003. 321 p. (INPE-10567-TDI/942/A). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.18.07.29>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association — LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, p .93–115, 1995.

ANSELIN, L. **Exploring spatial data with GeoDa™**: a workbook. University of Illinois. 2005.

BAILEY, C.; GATRELL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. Longman. 1996

BAKER, W. L. A review of models of landscape change. **Landscape Ecology**, v. 2, n. 2, p. 111-133, 1989.

BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Science**, v. 11, p. 13-17, 1977.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists**: modelling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994, 305 p.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change**: theoretical and modelin approaches. Lescos, Greece. Tese de Doutorado em Geografia – University of Aegean, 2000. Disponível em:

<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>. Acesso em 22 de janeiro de 2010.

BRUNHES, J. **Geografia humana**. Fundo de Cultura, Rio de Janeiro. 1962.

BURROUGH, P. A. Dynamic modelling and geocomputation. In: Longley, P. A.; Brooks, S. M.; McDonnell, R.; MacMillan, B. ed. **Geocomputation: a primer**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. Cap. 9, p. 165-192.

CÂMARA, G. et al. Análise Espacial e Geoprocessamento. In: Druck, S.; Carvalho, C; Câmara, G.; Monteiro, A.M.V. (Org.). **Análise de dados geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004a.

CÂMARA, G. et al. Análise Espacial de Áreas. In: Druck, S.; Carvalho, C; Câmara, G.; Monteiro, A.M.V. (Org.). **Análise de dados geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004b.

CÂMARA, G.; MONTEIRO. A. M. V. **Introdução à modelagem espacial**. São José dos Campos: INPE, 2003. Disponível em:
<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>. Acesso em 22/01/2010.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. **Computers and Graphics**, v. 15, n. 6. 1996, p. 13-22.

CANASAT, 2009. Disponível em: www.inpe.br/CANASAT (acesso em janeiro de 2009)

CRUZ, O. C. **Homicídios no Estado do Rio de Janeiro**: análise da distribuição espacial e sua evolução. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de saúde Pública-USP, São Paulo, 1996.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER). **Base de dados do DER**. São Paulo, 2001. 1 CD-ROM. (081-DER/INPE).

EASTMAN, JR.; EMANI, S.; HULINA S.; JIANG, H., JOHNSON, A.;d RAMACHANDRAN, M. **Application of Geographic Information Systems (GIS) technology in environmental risk assessment and management**. Worcester, Mass., Clark University, Idrisi Project, 1997.

ERDAS. **ER Mapper reference guide**. 2008. Disponível em:
<http://www.erdas.com/LinkClick.aspx?fileticket=ut%2fNzUVwhbY%3d&tabid=122&mid=489>. Acessado em novembro de 2009.

FISCHER, G.; TEIXEIRA, E.; HIZSNYK, E. T.; VELTHUIZEN, H. V. Land use dynamics and sugarcane production. In: Zuurbier, P.; Vooren, J. **Sugarcane Ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen Academic Publishers. Netherlands. 2008, 255 p.

FUNDAÇÃO SISTEMA DE ANÁLISE DE DADOS (SEADE). **Índice Paulista de Responsabilidade Social (IPRS)**. Disponível em: <http://www.seade.gov.br/produtos/iprs/ra.php>. Acesso em novembro de 2009.

GODOY, M. M. G; SOARES FILHO, B. S. Modelagem da dinâmica intra-urbana no bairro Savassi, em Belo Horizonte. In: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. (org.) **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo. Oficina de Textos. 2007, p. 286-304.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P., The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**. v. 36, n.6, jun. 2008. p. 2086-2097.

GOODACRE C. M., BONHAM-CARTER G. F., AGTERBERG, F. P., WRIGHT D. F. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, 217, 1993. p. 205-305.

HAGEN, A. Multi-method assessment of map similarity. In: 5th AGILE Conference on Geographic Information Science, Palma, Spain. **Anais...** Palma: Universitat de les Illes Balears, 2003. p. 171-182.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) - . **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2008a. Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br (acesso em novembro de 2008).

_____. **Censo demográfico e contagem da população**. 2009a. Disponível em www.sidra.ibge.gov.br (acesso em dezembro de 2009).

_____. **Estados@**. 2009b. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=sp>. Acesso em janeiro de 2009.

_____. **Malha municipal do Brasil: situação 2007**. Rio de Janeiro: IBGE. 2008b.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2 ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2006. 608 p.

LONGLEY, P.; BATTY, M. **Spatial analysis**: modelling in a GIS environment. New York: John Wiley & Sons, 1996.

MACEDO, I. C. **Sugarcane's energy**: twelve studies on Brazilian Sugarcane agribusiness and its sustainability. São Paulo: União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2005. 195 p.

MELLO, M. P. **Classificação espectro-temporal de imagens orbitais para o mapeamento da colheita da cana-de-açúcar com queima da palha**. Dissertação de Mestrado. INPE. São José dos Campos. 2009.

MITCHEL, A. **The ESRI guide to GIS analysis**, Volume 1: Spatial Measurements and Statistics and Zeroing In: Geographic Information Systems at Work in the Community. ESRI. 2001, 190 p. ISBN: 9781879102064

MIRANDA, E. E., DORADO, A. J., ASSUNÇÃO, J. V.. **Doenças respiratórias crônicas em quatro municípios paulistas** (Chronic respiratory disease in four São Paulo municipalities). São Paulo: USP/UNICAMP/Ecoforça, 1994.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **I3geo**. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em março de 2009.

NASSAR, A. M.; RUDORFF, B. F. T.; ANTONIAZZI, L. B.; AGUIAR, D. A.; BACCHI, M. R. P.; ADAMI, M. Prospect of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: Zuurbier, P.; Vooren, J. **Sugarcane ethanol**: contributions to climate change mitigation and the environment. Wageningen Academic Publishers. Netherlands. 2008, p 63-94.

NEVES, M.; CÂMARA, G.; ASSUNÇÃO, R.; FREITAS, C. C. Procedimentos Automáticos e Semi-automáticos de Regionalização por Árvore Geradora Mínima. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON GEOINFORMATICS, GEOINFO, 4., 2002, Caxambu. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2002.

NOVAES, M. R.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T. Análise Espacial de Indicadores Sócio-Econômicos na Compreensão do Manejo da Colheita da Cana-de-Açúcar. In: ENCUESTRO DE GEOGRAFOS DE AMERICA LATINA, 12., 2009, Montevideo. **Anales...** 2009. DVD. Disponível em: <http://www.egal2009.com/>. Acesso em: 30 abr. 2010.

OPENSHAW, S. GeoComputation. In: Openshaw, S.; Abraham, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 1, p. 1-31.

PEREIRA, M. N.; GONCALVES, C. D. A. B.; SOUZA, I. M. E.; GARCIA, S.; PORTELA, A. G.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G. Uso de Imagens de Satélite como Subsídio ao Estudo do Processo de Urbanização. **Revista de Estudos sobre Urbanização, Arquitetura e Preservação**. São Paulo, SP, v. 46, p. 6-33, 2006.

RAMOS, S. Sistemas técnicos agrícolas e meio técnico-científico-informacional no Brasil. In: SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. (Orgs.). **O Brasil: território e sociedade no início do século XXI**. 6a. ed. Rio de Janeiro: Record. 2004.

OSEIRO, M. N. V.; TAKAYANAGUI, A. M. M. Meio ambiente e poluição atmosférica: o caso da cana-de-açúcar. **Revista Saúde**, v. 30, n. 1-2, p. 76-83, 2004.

ROSEIRO, M. N.V. **Morbidade por problemas respiratórios em Ribeirão Preto – SP, de 1995 a 2001, segundo indicadores ambientais, sociais e econômicos**. Dissertação (Mestrado em Enfermagem). Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2002.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; XAVIER, A. C.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano safra 2003/2004. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, SP, v. 52, n. 1, p. 21-39, jan./jun. 2005.

SANCHES, I. D. A.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Agricultura em São Paulo**, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMASP). **Protocolo agro-ambiental**. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/cana/protocolo.pdf> . Acesso em dezembro de 2008.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16 – 20. Jan. 1991.

SOARES FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; Falieri, A.; COSTA, W. L. **DINAMICA EGO Tutorial**. Belo Horizonte. CSR-UFMG. 2008.

SOARES FILHO, B. S.; ASSUNÇÃO, R. M.; PANTUZZO, A. E. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **BioScience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.

SOARES FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 217-235, 2002.

SOUZA, S. M.; CARVALHO, M. S.; CRUZ, O. G.; RAGONI, V. Análise Espacial de Dados de Áreas. In: SANTOS, S. M.; SOUZA, W. V. **Introdução à estatística espacial para a saúde pública**. Ministério da Saúde, Fundação Oswaldo Cruz; organizadores. - Brasília : Ministério da Saúde, 2007. 120 p.

SPOSATI, A. **Mapa de exclusão/inclusão social de São Paulo**. São Paulo, EDUC, 1996.

TOMPKINS, S.; MUSTARD, J. F.; PIETERS, C. M.; FORSYTH, D. W. Optimization of endmembers for spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 472-489. Mar. 1997.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA), 2009. Disponível em: www.unica.com.br (acesso em abril, 2009).

VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, **Documentação e programas especiais** (INPE-10550-RPQ/756). 72p., 2004.

VIEIRA, C. A. O. **Accuracy of remotely sensing classification of agricultural crops: a comparative study**. Tese (Doutorado). University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2000, 323 p

VINHAS, L.; FERREIRA, K. R.; QUEIROZ, G. R.; MOTTA, M.; HARA, L.; GARRIDO, J. P.; BRUNO, R. L. S. **TerraView 3.1.4 Tutorial**. São José dos Campos: INPE, 2006, 103 p. (INPE). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.12.11.41>. Acesso em: 23 abr. 2010.

WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of Modern Physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.

WWF. **O impacto do mercado mundial de biocombustíveis na expansão da agricultura brasileira e suas consequências para as mudanças climáticas**. Programa de Agricultura e Meio Ambiente. Brasília. DF. 2009, 66 p. Disponível em http://assets.wwfbr.panda.org/downloads/relatorio_biocombustiveis_wwf_brasil_jul09.pdf. Acesso em setembro de 2009.

XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. A. Modelagem dinâmica do desmatamento na amazônia. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos. Curitiba. v. 14. n. 3. jul-set. 2008, p. 370-391.

ZIUURBIER P.; VOOREN, J. Introduction to sugarcane ethanol to climate change mitigation and the environment. In: _____. **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen, Netherlands : Academic Publishers. 2008, p 19-28.

APÊNDICE - ANÁLISE ESPACIAL DA PRÁTICA DA QUEIMA POR LIMITES MUNICIPAIS

A partir da hipótese que existem agrupamentos de áreas onde o tipo de colheita da cana ocorre de maneira similar, a identificação das regiões de estudo ocorreu através de análise exploratória preliminar, utilizando técnicas de análise espacial. Neste primeiro momento, buscou-se extrair informações sobre o manejo da colheita para todo o estado de São Paulo a partir de dados agregados por área. Esta área obedece aos limites políticos administrativos dos municípios, cuja origem do dado é do tipo polígono e, em função de tornar factível a conclusão do presente trabalho, em tempo hábil, buscou-se selecionar regiões de estudo para aplicar a metodologia.

Matrizes de proximidade espacial foram calculadas com base no índice de colheita (IC) de cada ano-safra e realizados os respectivos testes globais de Moran. Os quatro quadrantes de Moran foram representados a um nível de confiança de 95% (LISAMAP) em um mapa para cada ano-safra, com a finalidade de identificar a autocorrelação espacial local entre os municípios que possuem áreas colhidas de cana-de-açúcar. Os procedimentos de análise de autocorrelação espacial global e local de Moran foram realizados com o auxílio da plataforma GeoDa 0.9.5i. O resultado foi espacializado de acordo com os quadrantes de Moran (Seção 2.5).

Os índices globais de Moran de autocorrelação espacial do índice de colheita agregado por município para os anos-safras de 2006, 2007 e 2008 correspondem a 0,3782; 0,3571 e 0,4526, respectivamente. Índices positivos evidenciam uma autocorrelação espacial positiva, isto é, há presença de clusters espaciais, formando regiões homogêneas em termos de tipo de colheita no estado de São Paulo. Segundo os mapas ilustrados na Figura A.1, com o uso da técnica de LISAMAP, foi possível identificar anualmente áreas

que possuem semelhança na prática do uso do fogo na pré-colheita (em vermelho) e áreas que possuem uma maior aderência ao protocolo (em azul), que, por sua vez, não utilizam a prática da queima. Poucas áreas foram identificadas como áreas “em possível transição” (azul claro e rosa), não constituindo, *a priori*, quatro regiões de estudo como previa a metodologia inicial.

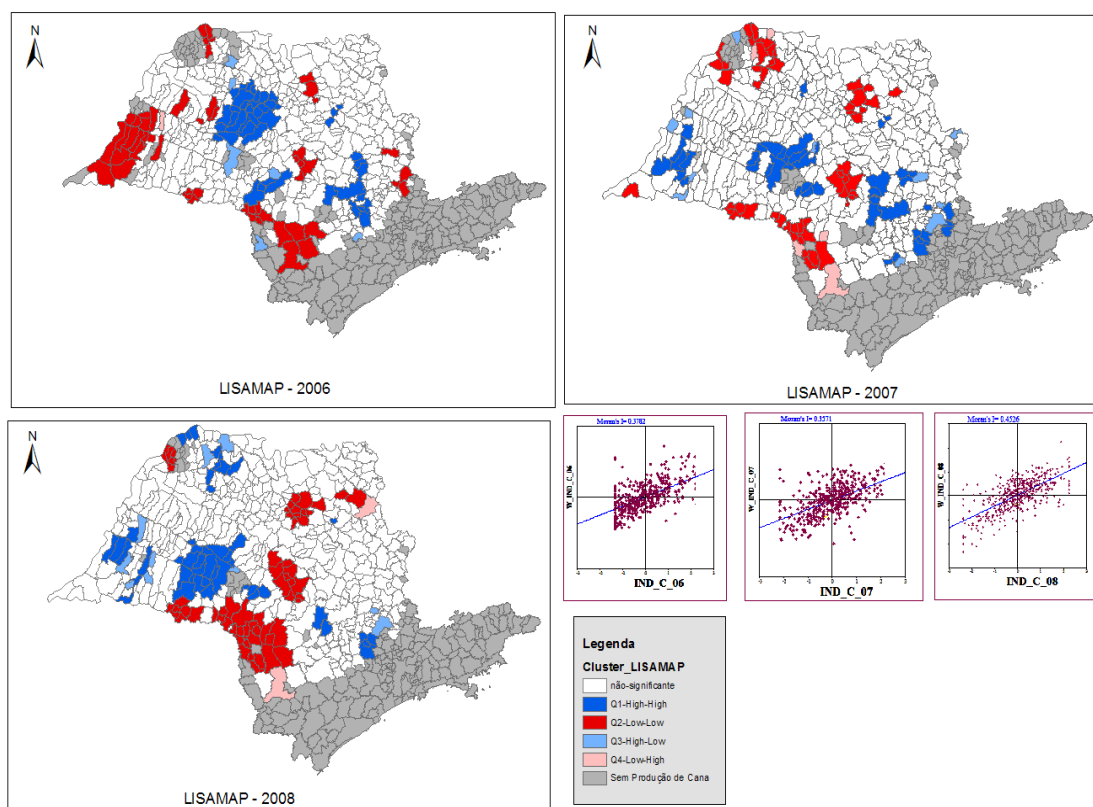


Figura A.1 – Índices de autocorrelação global para o índice de colheita por município e mapa de *clusters* municipais pela análise do LISAMAP para os anos-safras 2006, 2007 e 2008.

Entretanto, quando estes resultados são comparados aos dados originais com resolução espacial de 30 m, percebe-se uma flutuação aleatória nos municípios com baixa produção de cana-de-açúcar e naqueles situados na fronteira de expansão, como as áreas do norte e oeste paulista.

Verificou-se que o uso de dados agregados por áreas correspondentes aos limites municipais pode-se constituir em um engano conhecido como MAUP (*Modifiable Area Unit Problem*) (LONGLEY; BATTY, 1996). Este problema ocorre quando as análises sobre uma mesma população têm seus resultados alterados pela definição de suas fronteiras. Neste caso, os dados originais, com resolução de 30 m, não apresentaram uma correlação adequada com o resultado de sua respectiva agregação por áreas de limites político-administrativos (Figura A.2).

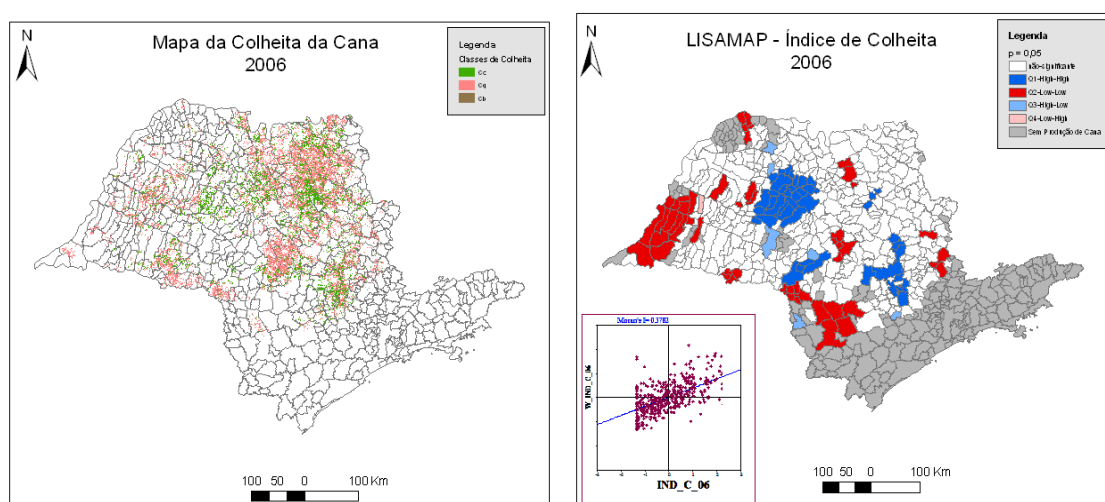


Figura A.2 – MAUP identificado na comparação do dado original e a análise de autocorrelação espacial local (LISA).

Assim, a representação por meio de células de resolução de 2 x 2 km, (detalhada na seção 3.3.2) foi uma solução mais adequada para contornar o problema de MAUP, quando a diferença dos limites vetoriais promoveu uma oscilação na análise de autocorrelação espacial.