Número: 141/2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

SAMUEL FERNANDO ADAMI

AUTÔMATOS CELULARES E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DE ARAÇATUBA - SP.

TESE DE DOUTORADO APRESENTADA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNICAMP PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NA ÁREA DE ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL.

PROF. DR. ARCHIMEDES PEREZ FILHO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO, E ORIENTADA PELO PROF.DR.

_____

CAMPINAS, 2011

© by Samuel Fernando Adami, 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
CÁSSIA RAQUEL DA SILVA – CRB8/5752 – BIBLIOTECA "CONRADO PASCHOALE" DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
UNICAMP

As15a

Adami, Samuel Fernando, 1978-
Autômatos celulares e sistemas de informações geográficas aplicadas à modelagem da dinâmica espacial da cana-de-açucar na região de Araçatuba (SP) / Samuel Fernando Adami-- Campinas,SP.: [s.n.], 2011.

Orientador: Archimedes Perez Filho.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Análise espacial. 2. Geoprocessamento. 3. Processo decisório por critério múltiplo. 4. Geografia rural. I. Perez Filho, Archimedes, 1947- II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III.Título.

<u>Informações para a Biblioteca Digital</u>

Título em ingles: Modeling sugar cane spatial dynamics with cellular automata and geographic information systems in Araçatuba region (SP).
Palavras-chaves em ingles:
Spatial analysis
Geoprocessing
Decision-making by multiple criteria
Agricultural geography
Área de concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Territorial
Titulação: Doutor em Ciências
Banca examinadora:
Archimedes Perez Filho (Orientador)
Lindon Fonseca Matias
Rúbia Gomes Morato
Reinaldo Paul Pérez Machado
Data da defesa: 11-08-2011
Programa de Pós-graduação em Geografia

RR

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ÁREA DE ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

AUTOR: Samuel Fernando Adami

"Autômatos celulares e sistemas de informações geográficas aplicadas à modelagem da dinâmica espacial da cana-de-açúcar na região de Araçatuba-SP".

ORIENTADOR: Prof. Dr. Archimedes Perez Filho

Aprovada em: 11 / 08 / 2011

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Archimedes Perez Filho _____ Presidente

Prof. Dr. Lindon Fonseca Matias _____

Prof. Dr. Ricardo Abid Castillo _____

Profa. Dra. Rúbia Gomes Morato _____

Prof. Dr. Reinaldo Paul Perez Machado _____

Campinas, 11 de agosto de 201

Aos meus pais, Neodécimo Adami e Maria Sclifó Adami.

Por darem a vara e ensinarem-me a pescar.

Nas próximas páginas está o meu maior peixe até agora.

Agradecimentos

Certo grego chamado Aristóteles escreveu para seu filho Nicômaco que a coragem é a primeira das virtudes humanas, pois ela garante todas as outras. Modesta e completamente concordo com o famoso filósofo das antigas. Assim, ao Prof. Dr. Archimedes Perez Filho admiro e agradeço pela coragem de orientar esta pesquisa sobre um tema mais ou menos distante de suas linhas tradicionais de escrutínio e pelo desprendimento ao permitir o máximo de liberdade no fazer científico.

Pelas sugestões no exame de qualificação, por suas aulas e pelo exemplo de objetividade, o Prof. Dr. Lindon Fonseca Matias merece mais do que qualquer palavra que poderia implicar em agradecimentos.

Como um farol em meio às vagas de uma tempestade, o Prof. Dr. Ricardo Abid Castillo, sempre estava pronto para conversas e discussões. São raras as vezes em que um homem reúne em si mesmo a competência, a humildade e o bom humor para auxiliar outras pessoas com pontos de vista diversos dos seus. Ricardo é uma dessas raridades.

Essa pesquisa é fruto direto das aulas do Prof. Dr. Marcos César Ferreira. Não consigo expressar agradecimentos suficientes pela sua atuação.

Ao Dr. Jener Fernando Leite de Moraes, do Instituto Agronômico, agradeço pelas ideias no exame de qualificação e pelos auxílios no laboratório de geoprocessamento do IAC.

Minhas amigas de IAC, Tânia Maria Nicoletti e Elisabete Monteiro, do laboratório de geoprocessamento, e Célia Regina Terra, da pós-graduação, pelo apoio fornecido durante todo o trajeto merecem mais do que essas mal traçadas linhas em agradecimento. Em especial, à Tânia, por ajudar na entrada dos dados e, ao mesmo tempo, suportar minhas neuroses de geógrafo nesse processo.

A orquestra afinadíssima da pós-graduação do Instituto de Geociências da Unicamp, sob a batuta da maestrina Valdirene Pinotti, é insuperável, muita gente boa trabalhou e trabalha para manter o show sempre em cartaz. Maria Gorete S. S. Bernardelli e Edinalva Schutz são exemplos dessa prata da casa. Agradeço-vos por tudo.

Grande auxílio foi prestado pela União dos Produtos de Bioenergia (Udop) ao possibilitar o contato com as usinas da área de estudos.

Vários especialistas dedicaram seu tempo para responder aos nossos questionamentos. Ricardo Castillo, Márcio Chiba, Glauco Rolim, Jener Fernando Leite de Moraes, João Marques, Francisco Ladeira, Lindon Fonseca Matias, Ludmila Bardin, José Stafuzza, Fernando Tangerino Hernandez, Isabella Clerici De Maria, Laerte Forti Junior, Sérgio Torquato. Vocês são elementos fundamentais do que está descrito nas próximas páginas e espero que o resultado tenha se aproximado da qualidade de suas contribuições.

A política de distribuição gratuita de dados e o fácil acesso permitido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) deveriam ser um padrão de comportamento dentre órgãos públicos na área da pesquisa científica.

Meus mais caros amigos também merecem todo crédito pelo entusiasmo e pela paciência comigo ao longo desses anos. Com o futuro Dr. Alceu Linares Jr. entabulamos muitas discussões. Uma amiga de competência indiscutível é a Profa. Dra. Rúbia Gomes Morato, juntamente com meu amigo Prof. Dr. Fernando Shinji Kawakubo que domina imagens, *pixels*, bandas e assinaturas espectrais como poucos; nos rápidos encontros com eles no departamento de Geografia/USP sempre foram momentos de grande prazer.

Sou e serei eternamente discípulo da Profa. Dra. Lylian Coltrinari, que mesmo lá da terra da garoa envia benéficos raios de luz aqui para o interior de São Paulo.

Amigo forte e constante tem sido o jornalista, engenheiro, baterista e futuro Dr. Gustavo Longhi de Carvalho. Nos muitos momentos em que tinha vontade ir para Pasárgada e nunca mais voltar para o país da cocanha, lá estava meu grande amigo pronto para dar uma força e levantar o moral geral.

Por suportar os últimos anos de músicas mal tocadas e ensaios cancelados, meus camaradas da banda Fator Comum mereceriam um troféu. Aplausos para Zé Renato, Douglas, Daniel, Fábio Pacanaro, Fábio Cristófaro, Toninho e Gustavo.

Copiando David Harvey nos agradecimentos dos livros *Explanation in geography* e *Social justice and the city*, reconheço débitos com Deep Purple, Creedence, Eric Clapton, Wynton & Ellis Marsalis, Stevie Ray Vaughan, Yes, Queen, Pink Floyd, Phil Collins, Madeleine Peyroux, Led Zeppelin, Kenny Wayne Shepherd, Guns ‘n’ Roses, Genesis, Gary Moore, Blackmore's Night, Black Sabbath, The Beatles e AC/DC pela trilha sonora para essa pesquisa.

"Sou um técnico, mas tenho técnica só dentro da técnica.
Fora disso sou doido, com todo o direito a sê-lo.
Com todo o direito a sê-lo, ouviram?"
Lisbon Revisited (1923) – Álvaro de Campos

Sumário

1 Introdução 1

2 Hipótese 5

3 Objetivos 7

4 Justificativa e contextualização 9

5. Revisão da literatura 13

5.1 Modelos de usos agrícolas das terras 13

5.2 Sistemas de informações geográficas e autômatos celulares 19

5.3 Análises multicritérios e sistemas de informações geográficas 28

5.4 Períodos na agroindústria canavieira do ponto de vista ambiental 34

6. Material e métodos 41

6.1 Localização e caracterização da área de estudos 41

6.2. Procedimentos metodológicos 54

6.2.1 Banco de dados geoespaciais 56

6.2.2 Análise multicriterial 61

6.2.3 Modelagem com autômatos celulares 83

6.2.4 Procedimentos para avaliação dos resultados 90

7. Resultados e discussão 103

7.1 Mapas de usos das terras levantados por interpretação visual de imagens 103

7.2 Modelos autômatos celulares e métodos multicriteriais 113

7.3 Aplicações da capacidade de uso das terras padronizada e probabilidades markovianas 126

7.4 Comparações entre os resultados dos diferentes métodos 133

8 Conclusões 137

9 Referências bibliográficas 139

10 Apêndice 147

Lista de Figuras

Figura 5.1 – Cinco tipos de modelos celulares. 21

Figura 5.2 – Principal área de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo no século XVIII e XIX, limites aproximados. 35

Figura 6.1 – Localização e municípios da área de estudos. 43

Figura 6.2 – Geomorfologia da EDR de Araçatuba. 44

Figura 6.3 – Solos da EDR de Araçatuba. 46

Figura 6.4 – Totais anuais médios de precipitação na EDR de Araçatuba. 48

Figura 6.5 – Temperatura média anual na EDR de Araçatuba. 49

Figura 5.6 – Produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo por município, em toneladas. 50

Figura 6.7 – Área ocupada pelos principais usos agrícolas na EDR de Araçatuba, percentual da área cultivada. 51

Figura 6.8 – Área ocupada pela cultura canavieira nos municípios da EDR de Araçatuba. 53

Figura 6.9 – Fluxograma de procedimentos para a efetivação da proposta metodológica. 55

Figura 6.10 – Articulação das folhas topográficas 1:50.000 que compõem a base de dados. 57

Figura 6.11 – Exemplos das resoluções das imagens. 59

Figura 6.12 – Estratégias de normalização dos critérios. 65

Figura 6.13 – Carta de declividades da EDR de Araçatuba. 69

Figura 6.14 – Critérios de proximidade. 70

Figura 6.15 – Proximidade de formações arbóreas. 71

Figura 6.16 – Proximidade. 72

Figura 6.17 – Áreas de preservação permanente. 74

Figura 6.18 – Zoneamento agroambiental da cultura canavieira. 75

Figura 6.19 – Critérios socioeconômicos. 77

Figura 6.20 – Critérios socioeconômicos. 79

Figura 6.21 – Índice de desenvolvimento humano. 81
Figura 6.22 – Caixa de diálogo do módulo CA-MARKOV para geração dos usos das terras simulados a partir da aplicação dos resultados da programação por compromisso. 85
Figura 6.23 – Planos de informação com preferências para a implantação da cana-de-açúcar. 87
Figura 6.24 – Imagens de probabilidades dos demais usos das terras 88
Figura 6.25 – Probabilidades das classes de uso água (A) e áreas urbanizadas (B). 89
Figura 6.26 – Capacidade de usos das terras. 93
Figura 6.27 – Probabilidades associadas à ocupação com cana-de-açúcar derivadas do levantamento de capacidade de usos das terras. 95
Figura 6.28 – Fluxograma de procedimentos do modelo embasado na capacidade de usos das terras. 96
Figura 6.29 – Fluxograma de procedimentos do modelo condicionado pela aplicação de cadeias de Markov. 98
Figura 6.30 – Probabilidades markovianas de transição para a cana-de-açúcar na EDR de Araçatuba. 99
Figura 7.1 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2001, em hectares. 104
Figura 7.2 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2001 por interpretação visual. 106
Figura 7.3 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares. 108
Figura 7.4 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008 por interpretação visual. 110
Figura 7.5 – Mapa de diferenças entre 2001 e 2008 para a cana-de-açúcar 112
Figura 7.6 – Distribuição dos pesos normalizados dos critérios de avaliação. 116
Figura 7.7 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC com regras derivadas pelo método programação por compromisso. 116

Figura 7.8 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC com regras derivadas pelo método programação por compromisso. 118
Figura 7.9 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado à programação por compromisso para a cana-de-açúcar. 120
Figura 7.10 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC com regras derivadas pelo método teoria dos jogos cooperativos. 121
Figura 7.11 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC com regras derivadas pelo método teoria dos jogos cooperativos. 123
Figura 7.12 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado à teoria dos jogos cooperativos para a cana-de-açúcar. 125
Figura 7.13 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC apoiado pela capacidade de usos das terras. 127
Figura 7.14 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC apoiado pelas cadeias de Markov. 128
Figura 7.15 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC apoiado pela capacidade de usos das terras. 129
Figura 7.16 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC apoiado pelas cadeias de Markov. 130
Figura 7.17 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado à capacidade de usos das terras para a cana-de-açúcar. 131
Figura 7.18 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado às cadeias de Markov para a cana-de-açúcar. 132

Lista de Tabelas

Tabela 6.1 – Legenda dos mapas de usos das terras. 60
Tabela 6.2 – Critérios de decisão. 63
Tabela 6.3 – Classes de solos, ambientes de produção e valores normalizados. 66
Tabela 6.4 – Classes de usos das terras e valores normalizados. 68
Tabela 6.5 – Classes do zoneamento agroambiental e valores normalizados. 75
Tabela 6.6 – Custo da terra, custo e porcentagem de mão-de-obra treinada e disponibilidade e IDH. 76
Tabela 6.7 – Classes de capacidade de uso das terras e valores normalizados. 92
Tabela 7.1 – Alterações nos usos das terras na EDR de Araçatuba entre 2001 e 2008, número de pixels. 109
Tabela 7.2 – Alterações nos usos das terras na EDR de Araçatuba entre 2001 e 2008, em hectares. 111
Tabela 7.3 – Pesos atribuídos e valores de média e média expurgada. 114
Tabela 7.4 – Participação por categoria de informante. 115
Tabela 7.5 – Matriz de erro entre o mapa de uso das terras de 2008 e a programação por compromisso associada ao modelo AC. 119
Tabela 7.6 – Matriz de erro entre o mapa de uso das terras de 2008 e a teoria dos jogos cooperativos associada ao modelo AC. 124
Tabela 7.7 – Matriz de erro entre mapa de uso das terras de 2008 e resultado do modelo AC apoiado pela capacidade de usos das terras. 126
Tabela 7.8 – Matriz de erro entre mapa de uso das terras de 2008 e resultado do modelo AC apoiado pelas cadeias de Markov. 127
Tabela 7.9 – Número de polígonos. 133
Tabela 7.10 – Perímetro médio em metros. 134
Tabela 7.11 – Área média em hectares. 135
Tabela 7.12 – Síntese da avaliação da acurácia dos resultados. 136

Lista de Siglas

AC – Autômatos Celulares.

AMD – Análise Multicriterial de Decisões.

APP – Áreas de Preservação Permanente

CCD – *Couple Charged Device*

Conab – Companhia Nacional Abastecimento.

EDR – Escritório de Desenvolvimento Regional.

ETM^+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus*

HRC – *High Resolution Camera*

IAA – Instituto do Açúcar e do Álcool.

IAC – Instituto Agronômico.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

PI – Plano de Informações.

SIG – Sistemas de Informações Geográficas.

UDOP – União dos Produtos de Bioenergia.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ÁREA ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

Autômatos celulares e sistemas de informações geográficas aplicados à modelagem da dinâmica espacial da cana-de-açúcar na região de Araçatuba (SP).

RESUMO

Tese de Doutorado

Samuel Fernando Adami

O recente momento de expansão da agroindústria sucroalcooleira tem resultado na grande ampliação das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no estado de São Paulo, substituindo outras culturas e penetrando em regiões que não eram tradicionalmente ligadas à produção canavieira. A abordagem proposta buscou integrar modelos autômatos celulares, sistemas de informações geográficas e métodos de avaliação multicriterial para simular a dinâmica espacial da cana-de-açúcar no território do escritório de desenvolvimento regional de Araçatuba no período entre 2001 e 2008. Esse lapso temporal foi considerado adequado após um estudo da periodização da agroindústria canavieira a partir do enfoque ambiental. Foram levantadas as preferências de especialistas e gestores de usinas, e essas informações tratadas por meio da aplicação dos métodos multicriteriais programação por compromisso e teoria dos jogos cooperativos para determinação das áreas mais importantes para a expansão da cana-de-açúcar. A partir dessa avaliação, um modelo autômato celular foi empregado para simular o crescimento da cultura canavieira na área de estudos. Os resultados foram comparados àqueles obtidos pela aplicação de métodos tradicionais, como cadeias de Markov, e classificações técnicas, exemplificada pela capacidade de usos das terras; todos os processos embasaram a aplicação de modelos autômatos celulares. Os resultados demonstraram que os métodos propostos, ao incorporar as preferências dos atores e dos especialistas, apresentaram desempenho superior na simulação da dinâmica espacial da cultura canavieira, pois foram obtidos valores mais elevados nos índices Kappa, acurácia total, e Lee-Salleem e menores erros de omissão e comissão para a cultura canavieira, além de aproximações maiores em parâmetros simples de análise da paisagem, quando comparados aos métodos tradicionais. Os procedimentos metodológicos propostos permitem simular a expansão da cana-de-açúcar e dimensionar seus efeitos sobre os usos das terras em nível regional e, assim, subsidiar os debates sobre o modelo de desenvolvimento do campo brasileiro.

Palavras-chave: Análise espacial, análise multicriterial, geografia agrícola.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ÁREA ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

Modeling sugar cane spatial dynamics with cellular automata and geographic information systems in Araçatuba region (SP).

ABSTRACT

Doctorate Thesis

Samuel Fernando Adami

The recent period of sugar cane industry growth has resulted in a major expansion in the cultivated areas with sugar cane at São Paulo, Brazil, replacing other agricultural land uses and moving into regions traditionally characterized by another rural production kind. The suggested approach sought to integrate cellular automata models, geographic information systems and multicriterial evaluation methods for simulating the spatial dynamics of sugar cane plots at the territory of regional development office of Araçatuba between 2001 and 2008. This time lapse was considered appropriate after a study of the periodization of the sugar industry from the environmental approach. The preferences of experts and mill managers were collected and this information was analyzed by applying the method of compromise programming and cooperative game theory to determine the most important areas for growth of sugar cane. Based on this assessment a cellular automaton model has been used to simulate the growth of sugar cane cultivation in the study area. The results were compared with those obtained by applying traditional methods such as Markov chains, and expert's classification, exemplified by the capacity of land uses, both associated with cellular automata models. The results showed that the methods proposed by incorporating the preferences of social actors and experts, were superior in the simulation of spatial dynamics of the sugar cane crop. Higher values were achieved for the Kappa index, overall accuracy, and Lee-Salle index, whereas minor omission errors and commission errors for the sugar cane land use were obtained. The results of proposed methods were closer to the real values at simple parameters of landscape analysis compared to traditional methods. The methodological procedures proposed allow to simulate the expansion of sugar cane and its effects on the land uses at the regional level and thus subsidize the debates about the development model of the brazilian countryside.

Keywords: Spatial analysis, multicriterial analysis, agricultural geography.

1 Introdução

O desenvolvimento da geografia como disciplina passou por diversas fases e a emergência de uma nova abordagem muitas vezes implicava relegar a corrente anterior ao esquecimento. Abler et al. (1995) descrevem essa característica para a geografia praticada nos Estados Unidos. Nos anos 1920, com a renúncia as ideias sobre o papel determinista imputado ao meio ambiente sobre a sociedade, foram abandonadas juntamente a procura de teorias e as abordagens quantitativas. Na década de 1950, o estabelecimento da geografia quantitativa resultou paralelamente no gradual descrédito da geografia cultural e regional. Aspectos desse tipo de dinâmica podem, em menor grau, ser identificados no desenvolvimento do pensamento geográfico brasileiro, por exemplo, na relação entre as escolas tradicionais e a geografia pragmática e desta última frente à introdução da teoria social crítica nos estudos geográficos.

Desde a popularização dos computadores pessoais no início da década de 1990 e do desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para usos nesses equipamentos, uma renovada atenção tem sido direcionada para a releitura de temas e procedimentos tradicionalmente ligados à geografia pragmática. Essa linha no pensamento geográfico se caracterizava, por um lado, pelo amplo desenvolvimento de métodos quantitativos e, por outro, pelo uso de modelos construídos sobre fundamentos da Teoria Geral dos Sistemas (MORAES, 1995, p. 100).

O aprimoramento de abordagens que sofriam com uma grande quantidade de cálculos em escassos recursos computacionais permitiu a popularização das técnicas desenvolvidas pela geografia pragmática. Nesse cenário, o uso de modelos e das técnicas de modelagem, de tratamentos estatísticos e de dados de sensoriamento remoto destaca-se como oportunidade para a análise e compreensão da realidade geográfica. Entretanto, resta aprofundar a busca da integração desses processos ao fazer geográfico consciente de seu papel social.

Um dos desafios no desenvolvimento da análise espacial em geografia é o desenvolvimento de modelos dinâmicos integrados em sistemas de informações geográficas. Conforme Haggett & Chorley (1967, p. 22) um modelo é "... uma estruturação simplificada da realidade que apresenta feições ou relações supostamente relevantes numa forma generalizada". Contudo, Batty (2000, p. 51) esclarece que a maioria dos modelos espaciais não lida com os

processos dinâmicos em si mesmos, mas, ainda segundo o mesmo autor, em vez disso, os modelos mensuram, analisam e simulam relações e associações de variáveis em seções discretas ao longo de um lapso temporal.

A utilização de autômatos celulares (AC) em processos de modelagem dinâmica não se trata de evento recente, mesmo sua aplicação a estudos geográficos data da década de 1970, implicitamente em Tobler (1970) e como abordagem explicitamente proposta em Tobler (1979). Conforme Pinto et al. (2005), a representação de fenômenos geográficos com dimensões temporais na forma de modelos espaciais dinâmicos é uma área emergente na pesquisa em geoinformação.

O desenvolvimento de modelos de usos rurais das terras é tradicional na geografia e Harvey (1966) revisa as várias abordagens desse tema. Essa temática é frequentemente tratada sob o foco da geografia econômica, com no trabalho de J. H. Von Thünen, datado de 1842, que segundo Dicken & Lloyd (1990) foi pioneiro no estudo da distribuição espacial dos tipos de usos agrícolas das terras. Vários estudos posteriores seguiram essa matriz analítica, por exemplo, com Dunn Jr. (1954) estendeu analiticamente e flexibilizou algumas das premissas do modelo de Von Thünen. Em outra proposta Found (1974) buscou integrar a abordagem comportamental dos tomadores de decisão em um modelo normativo. Entretanto, o resultado dessas abordagens era a determinação da área destinada para as culturas em uma região de acordo com os princípios de custo-benefício aos produtores e não a dinâmica e os usos específicos em um conjunto de localizações no espaço.

No atual cenário brasileiro, o estudo das alterações nos usos das terras no meio rural tem ganhado nova dimensão, devido ao debate internacional sobre os impactos ambientais causados pela expansão da lavoura canavieira. Nass et al. (2007) coloca que a área plantada com cana-de-açúcar no Brasil está aumentando, pois em 2005 foram colhidas 430 milhões de toneladas e, para 2010, o autor estimava que essa cifra superasse 570 milhões de toneladas e cerca de 90 novas usinas seriam instaladas nesse período. A Companhia Nacional Abastecimento registrou valor acima de 660 milhões de toneladas de cana-de-açúcar colhidas em 2010 (CONAB, 2010).

A integração entre SIG e AC permite a modelagem da dinâmica espacial dos usos rurais, como a expansão de determinadas culturas ou diminuição das áreas de outros usos das terras. Esses resultados poderiam ser integrados às previsões de crescimento ou diminuição das safras

agrícolas contribuindo para os estudos de usos agrícolas das terras e para o planejamento das ações dos vários atores envolvidos na gestão territorial.

A hipótese estabelecida para esta pesquisa está descrita no segundo capítulo. No terceiro são apresentados os objetivos da pesquisa e no quarto capítulo estão a importância e propósitos do tema. O quinto capítulo é dedicado a revisão da literatura que trata dos principais tópicos ligados à pesquisa, tais como modelos de usos rurais das terras, a integração entre modelos de autômatos celulares e sistemas de informações geográficas e desses com métodos multicriteriais, e por fim, é apresentada uma proposta de periodização ambiental da indústria canavieira no Brasil.

Os procedimentos metodológicos empregados no estudo e a forma de análise dos resultados obtidos compõem a temática do sexto capítulo. Na sétima parte são apresentados os mapas e estatísticas derivadas do método proposto e discute-se sua importância frente aos resultados da aplicação de abordagens consideradas habituais ou padronizadas. As principais conclusões do trabalho são apresentadas no capítulo oitavo e as referências bibliográficas empregadas no texto são listadas no nono capítulo.

2 Hipótese

A dinâmica espacial dos usos das terras está entremeada em uma totalidade que envolve o meio físico, as demandas econômicas e os efeitos sociais. O mosaico de usos das terras é, ao mesmo tempo, resultado e condicionante das formas de utilização do território. Os usos agrícolas das terras destacam-se devido a sua amplidão espacial e, no caso brasileiro, sua importância econômica.

Em face das relações múltiplas entre fatores físicos e socioeconômicos e assumindo como objeto de modelagem espacial a dinâmica de uma cultura agrícola (a cana-de-açúcar) instituiu-se como hipótese para esta pesquisa que a incorporação dos conhecimentos de especialistas e gestores de usinas ligados à cadeia canavieira em modelos autômatos celulares resulta em melhores predições do comportamento espacial da cultura quando comparado com a extrapolação estatística ou embasada somente em diretivas técnicas.

3 Objetivos

Essa pesquisa tem por objetivo tratar de dois problemas científicos, diferentes e, não obstante, interligados. O primeiro liga-se com a busca de progressos na modelagem da dinâmica dos usos das terras em SIG, e, associado a este, encontra-se a questão do avanço da cultura canavieira sobre outros usos agrícolas no recente panorama da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar. Dessa maneira, são estabelecidos três objetivos:

- Investigar a integração entre Autômatos Celulares e Sistemas de Informações Geográficas para modelagem de usos agrícolas das terras;

- Examinar o grau de avanço que pode resultar da incorporação dos conhecimentos de técnicos e dos responsáveis por empreendimentos agroindustriais nos modelos de dinâmica de usos das terras;

- Modelar o comportamento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar na área do Escritório de Desenvolvimento Regional (EDR) de Araçatuba.

4 Justificativa e contextualização

A integração de modelos AC e SIG ocorre tanto por meio de ligações estreitas, nas quais o módulo de autômatos está inserido nos sistemas de informações geográficas, quanto por transferências de arquivos entre os diferentes programas, em que o modelo autômato celular e o SIG operam separadamente para a preparação, o processamento e a visualização de dados; de maneira pouco integrada.

No âmbito das pesquisas em geoprocessamento, crescente literatura tem tratado da modelagem dos usos das terras com AC, em especial nas questões de expansão urbana (AL-AHMADI et al., 2009; VAN VLIET et al., 2009; HE et al., 2006; WU & WEBSTER, 1998) e dinâmica urbana (LIU, 2009; KOCABAS & DRAGICEVIC, 2007; BATTY et al., 1999). Em relação ao mundo rural, os trabalhos que se utilizam AC muitas vezes não apresentam um componente espacial explícito, como Balmann (1997). Essas linhas de pesquisa indicam a possibilidade de aplicar modelos AC para a modelagem de usos rurais em SIG e obter resultados como a simulação da distribuição espacial de determinadas culturas agrícolas.

A recente expansão das áreas cultivadas com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) no Brasil é um dos reflexos da retomada da utilização de biocombustíveis em automóveis. No quadro atual, a perspectiva de abastecimento dos mercados norte-americano, chinês e japonês com etanol produzido a partir da sacarose da cana-de-açúcar tem suscitado debates sobre os impactos ambientais dessa cultura e, em especial, os impactos indiretos, tais como as alterações nos usos das terras decorrentes do crescimento da área plantada com cana-de-açúcar, têm fornecido argumentos no debate entre defensores e críticos da indústria sucroenergética.

Para cada bilhão de galões de aumento na demanda de etanol, Keeney & Hertel (2009) destacam que a maior porcentagem das mudanças na área ocupada por florestas ocorreria nos Estados Unidos e, em segundo lugar, no Brasil. Em relação às pastagens, fora dos Estados Unidos, Brasil e Canadá passariam pelas maiores alterações nos usos das terras. Além disso, para o Brasil, Keeney & Hertel (2009, p. 906) identificam, como impacto direto do aumento da demanda norte-americana por etanol, o crescimento da área plantada com cana-de-açúcar e a diminuição da exportação de grãos.

Os debates em relação ao etanol produzido a partir do milho nos Estados Unidos têm reforçado que os balanços energético, econômico e ambiental são negativos, tal como Pimentel (2003, p. 129) destaca: "claramente, sem subsídios governamentais anuais acima de 1,4 bilhão (dólares americanos), a produção norte-americana de etanol seria reduzida ou cessaria". Esse cenário tem reforçado a ação lobista das associações de produtores de açúcar e etanol visando abrir o mercado norte-americano ao álcool brasileiro.

A argumentação em favor do etanol nacional defende que as alterações nos usos das terras causadas pela cana-de-açúcar no Brasil seguem o quadro geral da substituição de pastagens pela cultura canavieira. Críticos afirmam que esse processo levaria ao deslocamento das áreas de pastagens na direção da Amazônia e do Cerrado, causando desflorestamento e ampliação dos pastos nesses biomas (SAWYER, 2008). Alguns autores (FARREL et al., 2006, p. 507) indicam que perdas de solos por erosão e a conversão de florestas para agricultura mantém-se como alguns dos assuntos-chave com variáveis não quantificadas adequadamente.

O papel do etanol, como combustível ambientalmente correto, é claramente dependente da dinâmica dos usos das terras, pois, como Searchinger et al. (2008, p. 1240) expõem, o etanol brasileiro implica em reduções de 86% na emissão de gases causadores do efeito estufa, e em quatro anos seu uso compensaria as emissões de carbono decorrentes da substituição de pastos por cana, entretanto quando se considera o deslocamento das áreas de pastagens para o ambiente amazônico e a substituição de florestas por pastos para alimentar o gado, a compensação das emissões de carbono liberado nesse processo poderia demandar quarenta e cinco anos.

Conforme Lapola et al. (2010, p. 3388) muitos desses estudos não têm uma base espacial explícita e nem consideram a competição entre a produção de biocombustíveis e o cultivo de alimentos. Em relação ao Sudeste do Brasil, o autor esclarece que nos últimos cinco anos a expansão da cana-de-açúcar ocorreu sobre pastagens (LAPOLA et al., 2010, p. 3388), mas adverte que a proximidade das áreas de cultivo canavieiro com remanescentes de Floresta Tropical Atlântica pode representar riscos sobre a biodiversidade e conectividade dessa formação altamente ameaçada (LAPOLA et al., 2010, p. 3390).

O objeto desta pesquisa justifica-se do ponto de vista metodológico pela aplicação integrada de modelos AC, análises multicriteriais e SIG em estudos de usos das terras rurais e pela demanda de modelos com componentes espaciais explícitos e voltados para escalas maiores

que busquem determinar e quantificar a intensidade e a direção da expansão da lavoura canavieira.

Os diversos tipos de usos das terras são considerados uma parte central do funcionamento do sistema terra e refletem as interações humanas com o meio natural em escalas desde a local até a global (ASPINALL, 2008, p. 3.). Desse modo, pesquisas sobre a dinâmica dos usos das terras e dos resultados de suas alterações poderiam ser uma fonte de integração entre os estudos do meio físico e da sociedade, tema que tem papel constante na reflexão geográfica desde sua institucionalização como disciplina acadêmica.

5. Revisão da literatura

5.1 Modelos de usos agrícolas das terras

O primeiro estudo sobre os usos agrícolas das terras foi desenvolvido por Von Thünen em 1826, sendo revisado e publicado em 1842 (HALL, 1966). Foi grande a influência desse primeiro modelo no pensamento geográfico, tanto do ponto de vista metodológico quanto da temática dos usos das terras.

Thünen propunha um modelo no qual as culturas agrícolas estariam organizadas em anéis concêntricos em relação a uma única cidade que seria o mercado consumidor de toda a produção agrícola e a fonte de insumos para as áreas rurais. Isto a partir de um conjunto de premissas, por exemplo: as terras apresentariam qualidade semelhante em relação à fertilidade e outros atributos que interferem nas atividades e na produção agrícola, a existência de apenas um único mercado consumidor, e os sistemas de produção seriam os mesmos em todas as áreas agrícolas. Tornando fixas essas variáveis e com distribuição isotrópica, Thünen pôde identificar e dimensionar aquele que seria o principal elemento da determinação dos usos das terras, a distância do mercado consumidor.

Com o aumento da distância em relação à cidade crescem os custos de transporte da produção agrícola até o mercado e quando esse custo torna-se maior que o valor obtido com a venda da produção, determinada cultura tornar-se-ia não atrativa ao produtor. Desse modo, seriam estabelecidos anéis que seriam dominados pelas culturas que apresentariam maior excedente em relação aos custos de produção e de transporte. Posteriormente, poderiam ser flexibilizadas as diversas premissas permitindo identificar seus resultados na organização espacial da produção agrícola, considerando, por exemplo, terras de diferentes qualidades, consorciação de diversas culturas e outros mercados. Abler et al. (1972) apresentam exemplos da aplicação desse modelo para o estado da Pensilvânia e para as Ilhas Fiji.

Dunn Jr. (1954) estende a proposta de Thünen modificando e ajustando as premissas, mas os resultados obtidos são semelhantes, pois considerando as diferenças de produtividade entre os diversos tipos de solos, “todas as culturas iriam render mais em terras mais produtivas, mas, para um determinado grau de produtividade, a cultura que iria render mais seria aquela com

o maior retorno marginal estabelecido pela influência econômica da distância", (DUNN JR., 1954, p. 67). Entretanto, mesmo com os refinamentos em relação as ideias de Thünen, a proposta de Dunn Jr. (1954) não resulta em um modelo espacialmente explícito para a previsão da localização das diferentes culturas no espaço, como o autor esclarece: "... não se pode inserir dados em uma máquina e obter uma folha com respostas que definem a distribuição geográfica ótima da produção agrícola", (DUNN JR., 1954, p. 93).

Buscando desenvolver uma explicação da estrutura espacial da agricultura, Garrison & Marble (1957), seguindo em linhas gerais as propostas de Von Thünen, estabelecem um teorema básico, segundo o qual: "para toda localização espacial existe um nível ótimo no conjunto de intensidade de uso das terras, tipos de usos das terras, e grupos de mercados, a seleção do nível pelo empreendedor agrícola resulta em padrões espacialmente ordenados de usos das terras" (GARRISON & MARBLE, 1957, p. 137). Ao produtor resta decidir: (a) qual cultura, ou combinação de culturas, que devem ser plantadas, (b) qual a intensidade do sistema de produção, ou seja, o nível de capital e de trabalho a ser investido, (c) para qual mercado, ou mercados, vender a produção (GARRISON & MARBLE, 1957, p. 137). Os autores estabelecem as mesmas premissas clássicas como a existência de competição perfeita entre os diversos produtores, que estes possuem conhecimento perfeito das variáveis físicas e econômicas envolvidas no processo de produção e comercialização, e que, por fim, com clara influência de Von Thünen, o espaço é uniforme e apenas um único mercado seria o destino da produção. Essas últimas premissas são flexibilizadas no desenvolvimento do modelo.

Mesmo reconhecendo que a importância da maximização dos benefícios é provavelmente mais relacionada à satisfação pessoal que ao lucro monetário (GARRISON & MARBLE, 1957, p. 144), a proposta segue a linha clássica da explicação dos usos das terras na agricultura, construída sobre a premissa de maior lucro financeiro. O espaço e os processos espaciais não são tratados em diversas escalas, e, mesmo os resultados explícitos que podem ser identificados e codificados em bases de dados geoespaciais, não seriam influenciados por decisões que podem ser tomadas em escalas diversas daquelas do local ou do regional.

Harvey (1966) apresenta uma análise dos tipos de modelos que são aplicados em estudos de usos agrícolas das terras. Inicialmente, o autor identifica um conjunto de variáveis que devem ser especificadas para o estabelecimento de um modelo que busque determinar quais usos das

terras seriam implantados por um produtor. As variáveis de entrada, ou seja, externas à fazenda, incluem a demanda pelos diferentes produtos agrícolas e os custos de transporte até o mercado em um período de tempo determinado, e os custos dos diferentes fatores de produção (terra, insumos e trabalho); variáveis de estado representam as características internas da fazenda, por exemplo, a quantidade de capital disponível, a produtividade das várias culturas sob diferentes intensidades e a quantidade de terra disponível; o resultado seria a decisão sobre o sistema de produção escolhido, ou variável de saída do modelo (HARVEY, 1966, p. 362). São identificados diversos tipos de modelos, e os principais são classificados como modelos econômicos da distribuição espacial da agricultura e incluem a proposta de Von Thünen, modelos de equilíbrio regional da localização agrícola, modelos de entrada-saída, modelos de equilíbrio espacial, modelos econômicos dinâmicos e modelos de tomada de decisão. Nestes últimos, os diversos usos são resultado de um grande número de decisões individuais e, de maneira diversa dos outros modelos matemáticos que pressupõem que os agentes têm conhecimento perfeito sobre as variáveis, as decisões são tomadas em condições de risco e incerteza (HARVEY, 1966, p. 369).

De maneira semelhante, os modelos comportamentais consideram que "os padrões de usos das terras são, acima de tudo, o produto final (ou a expressão geográfica) de grande número de decisões individuais, tomadas em momentos diferentes e por razões frequentemente muito diferentes" (HARVEY, 1966, p. 370). Esses modelos não são embasados nas premissas do *homo economicus*, pois consideram que os produtores não visam apenas a minimizar os custos ou maximizar o lucro, mas que os motivos que levam a uma determinada decisão acumulam vários elementos além dos motivos econômicos, como prazer e conforto dos atores sociais, entre outros fatores. Harvey (1966, p. 372) classifica o modelo clássico de difusão da informação de Hägerstrand nessa categoria.

Henshall (1967, p. 426) estabelece que, dentro da estrutura da teoria geral dos sistemas, o tratamento das atividades agrícolas considera um conjunto de objetos (fazendas), com atributos (características) funcionalmente relacionados por meio de movimentos de circulação (capital, trabalho, etc.), e as entradas no sistema são respostas às necessidades sociais ou biológicas do sistema. São classificados cinco grandes tipos de modelos de atividades agrícolas, a saber: (a) modelos experimentais, (b) modelos conceituais, (c) modelos taxonômicos, (d) modelos de

localização da atividade agrícola, e (e) modelos de potenciais das terras. Em relação à presente discussão, os modelos de localização são considerados relevantes.

O modelo de Von Thünen é o primeiro descrito e criticado pela sua desconsideração do tamanho do mercado central e por desconsiderar elementos não ligados aos temas econômicos. Henshall (1967, p. 445) Destaca os modelos de equilíbrio espacial, pois seriam "os mais 'operacionais' e, por meio de métodos de programação linear, os mais populares para examinar o equilíbrio espacial dos padrões de produção agrícola".

Modelos de tomada de decisão, que buscam flexibilizar as premissas de conhecimento perfeito e de comportamento econômico completamente racional por parte dos atores sociais, são tratados em duas categorias: modelos de difusão, tal como o proposto por Hägerstrand, e os modelos que aplicam a teoria dos jogos. A vantagem dessas abordagens seria evidente "se reconhecemos que os padrões de atividade agrícola são uma resultante de decisões humanas tomadas por vários fazendeiros individuais, então poderia ser observado que uma compreensão dos processos de tomada de decisão é basilar para a melhoria de nossos modelos" (HENSHALL, 1967, p. 449).

Distância. É o tema central do trabalho de Chisholm (1968, p. 12). Considerado o maior especialista da língua inglesa nos trabalhos de Von Thünen, conforme Hall (1966), Chisholm dedica um capítulo inteiro à análise do modelo thünesiano. O princípio da busca pelo melhor rendimento – maximização dos ganhos – seria a base sobre a qual um amplo conjunto de decisões individuais determinaria os tipos de usos das terras, entretanto o autor coloca algumas restrições a esse conceito, pois muitas vezes o objetivo dos produtores é a sobrevivência e a manutenção de determinado padrão de vida (CHISHOLM, 1968, p. 41).

A descrição do caso do cultivo de uvas verdes para congelamento descrito por Chisholm (1968, p. 86) apresenta paralelo com a indústria canavieira, pois qualquer aumento na área cultivada resulta em uma diminuição do grau de localização, mas toda a área de produção está estreitamente ligada ao seu "mercado", ou seja, ao ponto de processamento. A cana-de-açúcar apresenta comportamento semelhante, pois a distância entre os locais de plantio e a usina influencia na qualidade da matéria-prima – após o corte da gramínea, o teor de sacarose reduz-se com o tempo – e no custo com o transporte de insumos e recursos até a lavoura e na colheita desde o campo até a usina para o processamento.

O papel do transporte na determinação das atividades agrícolas é considerado tão importante por Chisholm (1968) que são propostos princípios para a localização das vias de circulação em uma região agrícola. Mesmo assim, é considerado que a elaboração do sistema de comunicação é mais um resultado da atração das áreas urbanas e industriais do que das necessidades rurais (CHISHOLM, 1968, p. 141).

Dentre as mudanças técnicas ressaltadas pelo autor, as melhorias nos sistemas de circulação apresentam importância especial. Transportes melhores tenderiam a relativizar o papel da distância na determinação dos usos das terras, e mesmo a realçar fatores como clima, solos e topografia como elementos nos processos de decisão (CHISHOLM, 1968, p. 167).

Spencer & Stewart (1973) buscam determinar um conjunto de critérios para classificar os diversos tipos de sistemas agrícolas. A identificação e classificação dos componentes espaciais das atividades agrícolas é um objetivo básico da análise geográfica da agricultura (SPENCER & STEWART, 1973, p. 530). Em relação às propostas ligadas aos modelos que dependem do *homo economicus*, os autores questionam o grau de proximidade com a realidade que pode ser atingida em estudos que "consideram homens desprovidos de espírito que mecanicamente desencadeiam processos de produção" (SPENCER & STEWART, 1973, p. 530). Essa premissa em relação ao comportamento humano está subjacente à proposta de Von Thünen e seguidores.

Os autores argumentam que a análise geográfica da agricultura poderia ser indevidamente reducionista para enquadrar-se nas necessidades da teoria econômica moderna, como se o único objetivo de toda a produção primária fosse sempre maximizar as recompensas materiais e seus únicos determinantes fossem as forças de mercado (SPENCER & STEWART, 1973, p. 531) e estabelecem que a iniciativa humana é a força motora intrínseca no desenvolvimento dos sistemas agrícolas.

Ainda dentro do quadro teórico tradicional, Found (1974) estuda os determinantes econômicos que direcionam as decisões sobre os usos das terras no meio rural e para isso parte do princípio da competição perfeita entre atores que buscam maximizar suas recompensas econômicas. Entre as questões fundamentais estão a determinação dos níveis ideais de intensidade de usos das terras, a melhor combinação de usos das terras e de níveis de investimento e do papel da distância na organização do espaço rural. Para solucionar essas

questões são empregados métodos matemáticos como a programação linear, não-linear e recursiva.

Por outro lado, Found apresenta alguns princípios ligados aos modelos comportamentais e à tomada de decisão sob incerteza, pois "um dos aspectos mais perenes da tomada de decisão em relação aos usos das terras é que muitos eventos não podem previstos com 100 por cento de acurácia" (FOUND, 1974, p. 106). Um dos argumentos da teoria clássica estabelece que não se busca explicar o que os proprietários das terras realmente fazem, mas a teoria é normativa e, assim, determina o que os agentes devem fazer para atingir os objetivos previamente delineados. Criticando essa idéia, Found (1974, p. 125) identifica uma contradição no argumento, pois a teoria clássica não seria nem mesmo uma boa teoria normativa, porque os usos das terras indicados são, muitas vezes, incompatíveis com o comportamento daqueles atores que devem implantá-los.

O comportamento dos produtores é variável e visa a objetivos múltiplos, entretanto, quanto maior a experiência de determinada pessoa, mais próxima estaria de uma análise objetiva (FOUND, 1974, p.128). A ideia de decisões tomadas em relação à coletividade e de outros campos de força além do proprietário rural, tais como associações ou planos governamentais, é introduzido no modelo comportamental elaborado por Found (1974, p. 135).

As propostas de explicação e predição dos usos agrícolas das terras têm como elemento essencial um conjunto de muitos produtores que decide livremente qual deve ser a cultura, ou associação de culturas, a ser plantada em sua terra. Entretanto, é questionável até que ponto em uma região agrícola moderna, com elevadas taxas de inversão de capital e com estreito leque de opções de culturas ou atividades economicamente rentáveis, os fazendeiros individuais apresentam realmente tão ampla gama de escolhas, além de algumas opções já pré-determinadas pelas estruturas de circulação, armazenamento, assistência técnica e financiamento.

Outro elemento de interesse é o nível de espacialização dos vários modelos. As propostas acima, muitas se aproximando da Geografia Econômica, não buscam uma expressão cartográfica. Seus resultados seriam expressões em proporções de usos das terras em determinada unidade de área, mas dificilmente podem ser traduzidos na forma de coordenadas em um sistema de referência ou numa grade espacializada onde cada cultura ocuparia determinado ponto do

espaço. Esse tipo de resultado deve ser buscado por outros caminhos que demandam a integração dos modelos em SIG.

5.2 Sistemas de informações geográficas e autômatos celulares

Entre os elementos essenciais de um sistema de AC está a vizinhança. Os estados das células ao redor da célula-foco são fundamentais para projetar sua característica após determinado lapso temporal. Mesmo sendo um elemento clássico dos estudos de difusão espacial, a vizinhança recebe destaque no trabalho de Tobler (1970), implícita na "primeira lei da Geografia: tudo está relacionado a tudo mais, mas coisas próximas estão mais relacionadas do que coisas distantes". Não se busca aqui discutir essa proposição, ademais fonte de vários debates no campo da Geografia (por exemplo, SUI, 2004; BARNES, 2004; MILLER, 2004; SMITH, 2004; TOBLER, 2004), mas, apenas indicar uma primeira aproximação ao conceito de AC que seria, de maneira indireta, tratado pelo mesmo autor anos mais tarde.

Uma das primeiras contribuições na direção da modelagem de usos das terras aplicável em ambientes digitais foi proposta por Tobler (1979) que apresentou uma metodologia que seguiu na direção da aplicação de AC em estudos geográficos.

Cinco modelos celulares são propostos para representar a mudança nos usos das terras na célula g^{t}_{ij} em algum lapso temporal, $g^{t+\Delta t}_{ij}$ (figura 5.1). O modelo independente (I) não estabelece relação entre a classe em g^{t}_{ij} e em $g^{t+\Delta t}_{ij}$, de maneira diversa os outros modelos estabelecem relações entre o uso atual em g^{t}_{ij} e o uso futuro $g^{t+\Delta t}_{ij}$, seja como dependência (modelo II) apenas da situação atual, ou como reflexo de vários momentos passados, além do presente, denominado de modelo histórico (III). Considerando outros elementos do espaço, pode ser construído um modelo multivariado (IV), no qual a categoria em $g^{t+\Delta t}_{ij}$ é dependente de um conjunto de variáveis (u^{t}_{ij}, v^{t}_{ij}, w^{t}_{ij}). O denominado modelo geográfico (V) leva em consideração, além da célula g^{t}_{ij}, os usos nas células vizinhas ($g^{t}_{i\pm p}$, $g^{t}_{j\pm q}$) para projetar o uso das terras na célula $g^{t+\Delta t}_{ij}$ (TOBLER, 1979, p. 379).

Tobler (1979) coloca que a combinação entre os diversos tipos de modelos poderia tornar os resultados mais próximos da realidade. Considerando o modelo geográfico, a vizinhança determina a influência sobre o resultado e as regras de transição entre estados

apresentam estacionariedade espacial, ou seja, que o conjunto de regras não se altera em uma vizinhança determinada e fixa, não variando em relação à sua posição no espaço.

Por outro lado, a denominação de geográfico apenas ao modelo V (figura 5.1) que incorpora somente a vizinhança da célula-foco mostra-se uma concepção simplista, pois a realidade geográfica, e os modelos que buscam representá-la, possivelmente incorporam todas as relações citadas por Tobler (1979).

Os AC seriam, segundo Deadman & Brown (1993, p. 148), uma alternativa aos modelos matemáticos que normalmente utilizam-se de equações diferenciais. As vantagens dos modelos AC estariam (a) na semelhança entre os processos físicos e os computacionais, (b) maior simplicidade em relação aos modelos matemáticos, (c) não haveria perda de precisão quando implementados em computadores, (d) são capazes de mimetizar as ações de quaisquer sistemas naturais, e (e) são sistemas irredutíveis; mas é a descrição de sistemas reais a partir do comportamento microscópico que seria a feição mais útil dos AC (DEADMAN & BROWN, 1993, p. 149). O modelo apresentado foi desenvolvido no SIG denominado p-MAP visando a identificar padrões de localização de residências rurais.

Deadman & Brown (1993, p. 159) consideram que os modelos AC são adequados para modelar políticas e comportamentos de seleção de locais e tencionam que a construção das regras seria um dos componentes mais importantes para o desempenho do modelo. Em relação à importância da abordagem com AC na modelagem, os autores consideram que "a habilidade de esses modelos fazerem a ligação entre comportamentos micro e macroscópicos, e a conexão direta entre procedimentos de simulação e as regras do sistema real dá a esses modelos uma validade estrutural que não pode ser igualada por outras técnicas" (DEADMAN & BROWN, 1993, p. 159).

Os benefícios da integração de modelos AC em SIG, conforme destacam Park & Wagner (1997), seriam avanços na capacidade de modelagem dinâmica, no desempenho de algumas operações de geoprocessamento e a disponibilidade de uma metodologia promissora para lidar com a dimensão temporal. Uma característica dos modelos AC é que comportamentos complexos que ocorrem ao longo de um espaço celular podem emergir da aplicação de regras simples e, assim, esses modelos permitem identificar, simular e observar o comportamento global

de sistemas dinâmicos, ou seja, sistemas não completamente entendidos, mas para os quais seus processos locais são bem conhecidos (PARK & WAGNER, 1997, p. 214).

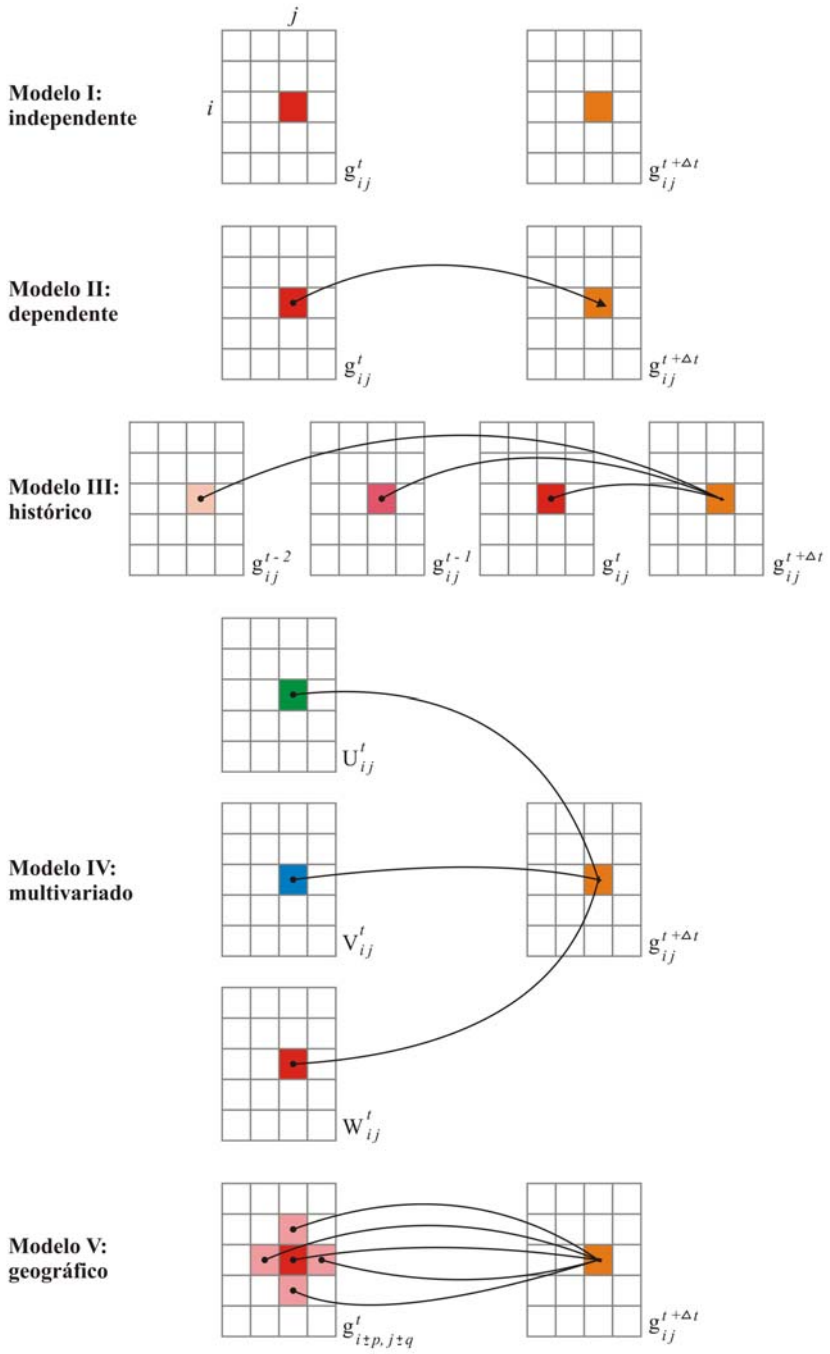

Figura 5.1 – Cinco tipos de modelos celulares, adaptado de Tobler (1979). Elaboração: S.F. Adami.

Para a implementação do modelo foi empregada uma estratégia de integração forte entre o SIG (Idrisi) e o modelo AC (Cellular / CAM-6), com uma interface integrada para o usuário, mas os programas originais são executados independentemente e há um módulo de troca de arquivos entre eles. A integração permite a criação de novas janelas para filtros espaciais e operações focais sobre séries temporais. São apresentados três exemplos com seus códigos-fonte na linguagem do modelo AC, tratando dos processos de difusão espacial de Hägerstrand, da dinâmica de incêndios florestais e da simulação da expansão urbana (PARK & WAGNER, 1997).

Wu & Webster (1998) propõem um modelo integrado entre AC, SIG e técnicas de avaliação multicriterial para a simulação da expansão urbana da cidade de Guangzhou, no sul da China. A utilização da análise multicriterial contrasta com as abordagens dedutivas que buscam simular a dinâmica espacial a partir de pressupostos comportamentais ou com modelos embasados em metáforas físicas. Entretanto, os autores destacam que a abordagem multicriterial pode tornar mais difícil a identificação das relações entre as regras de transição e seus efeitos nos resultados da modelagem (WU & WEBSTER, 1998, p. 104). Para a definição das regras os autores empregam um processo analítico-hierárquico que conduz comparações entre pares de variáveis para identificar as preferências dos tomadores de decisão (WU & WEBSTER, 1998, p. 109).

A implementação do modelo ocorreu por meio da estratégia de integração forte, com o AC e as ferramentas de análise multicriterial, programadas em C, em módulos separados do SIG (Arc/Info) e com módulos de troca de arquivos. O SIG é tratado como um repositório dos dados que podem ser pré-processados com as ferramentas de análise espacial e exportados para tratamento nos módulos individuais de análise multicritério e AC (WU & WEBSTER, 1998, p. 110).

Os autores esclarecem que “deve ser notado que modelos AC não são adequados para a predição dos usos das terras para locais individuais. Eles assumem que a cidade é, pelo menos em parte, um sistema auto-organizado, nesse caso o uso de locais específicos é imprevisível: eles projetam a forma do sistema total sob regras de transição estocásticas locais”. Desse modo, para

compararmos diferentes padrões de usos das terras, devem ser comparadas as assinaturas espaciais dos usos das terras, em vez de sua localização específica (WU & WEBSTER, 1998, p. 122). A forma de comparação dos resultados da modelagem com dados de controle deve, então, desconsiderar técnicas de análise ponto a ponto como a matriz de erro e índice Kappa, e buscar formas de determinar as assinaturas dos tipos de usos. Os autores propõem comparar faixas de distância a partir do ponto central da área e o número de *pixels* para cada classe de uso (WU & WEBSTER, 1998, p. 123).

A aplicação de autômatos celulares em temas da geografia urbana é a tendência maior nesse contexto de modelagem e Batty et al. (1999) apresentam uma proposta focada na dinâmica urbana. Considerando a modelagem com AC, os autores destacam que, em sistemas espaciais, os objetos são normalmente definidos como células que podem assumir vários estados e que sofrem influência das células em sua vizinhança imediata. A dinâmica da mudança é concebida como sendo uma função dos estados daquelas células que compõem seus vizinhos mais próximos (BATTY et al., 1999, p. 206).

Em relação à ligação entre o sistema AC e o SIG, Batty et al. (1999, p. 206), ponderam ser possível a produção de módulos especiais que poderiam apresentar uma interface com o SIG. As estratégias denominadas de ligações fracas, desenvolvidas pela troca de arquivos entre o AC e o SIG que funcionariam como sistemas separados, seriam soluções pragmáticas para interligar sistemas com propósitos diferentes. Outra estratégia, com ligações consideradas mais fortes, seria semelhante às extensões do SIG ArcView, mas o programa desenvolvido apresentaria inevitavelmente as mesmas características estruturais do SIG (BATTY et al., 1999, p. 206). Essa última alternativa tornaria o desenvolvimento de modelos analíticos com estruturas de dados muito diferente do SIG difícil, senão impossível. No modelo proposto os autores desenvolveram um programa independente com algumas funcionalidades para análise espacial semelhante aos SIG convencionais (BATTY et al., 1999, p. 207).

As atividades urbanas são enfocadas como pertencentes a um ciclo vital de três fases: iniciantes, maduras e declinantes. Um conjunto de equações descreve a probabilidade das atividades de uma célula estarem em uma dessas fases (BATTY et al., 1999, p. 209). São estabelecidos quatro princípios gerais do modelo, (a) distância, (b) direção, (c) densidade – competição entre os usos, e, (d) transições – probabilidade de um determinado uso dar lugar a

outro (BATTY et al., 1999, p. 210). As probabilidades de transição entre os usos são estabelecidas previamente e implementadas em uma matriz de transição, e para cada tipo de uso são determinados parâmetros como decréscimo com a distância, direção do desenvolvimento, tamanho da vizinhança, densidade mínima de ruas, densidades máximas de residências, de indústrias, de comércio, e os tempos de duração de cada fase do ciclo (BATTY et al., 1999, p. 223)

Em relação ao tamanho, os autores esclarecem que vizinhanças menores resultam em padrões de desenvolvimento mais compactos enquanto grandes vizinhanças resultam de formas urbanas dispersas (BATTY et al., 1999, p. 222). O modelo foi empregado apenas em simulações teóricas, nenhum caso real foi descrito.

O'sullivan & Torrens (2000, p. 2) resumem que "o formalismo dos AC propõe uma estrutura regular de células idênticas, cada uma das quais pode estar em um dos muitos estados discretos em lapsos temporais discretos durante sua evolução. As dinâmicas do sistema são determinadas pelas regras de transição que identificam os estados atuais da vizinhança da célula no tempo t, resultando no estado da célula no tempo t + 1".

Em relação à natureza das regras de transição os autores esclarecem que, diferentemente de uma cultura de células observadas em microscópio, os usos das terras não sofrem mutações de um estado para outro. Realçam, assim, o papel humano na forma dos diversos agentes sociais que competem pelo espaço e buscam moldá-lo às suas necessidades e expectativas. As mudanças de estados – usos das terras – são resultado da combinação das atividades dos diversos agentes e as regras devem ser entendidas como incorporando, de alguma maneira, as atividades humanas que direcionam as mudanças nos usos das terras (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000, p. 2).

Os modelos AC permitem a consideração das interações entre os níveis local e global, em especial os condicionamentos globais sobre as decisões locais. Essas intervenções globais podem ser incorporadas aos modelos como restrições externas ou pela aplicação desigual das regras de transição (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000, p. 3).

Em relação ao tamanho da vizinhança os autores esclarecem que a estrutura tradicional dos AC não considera a "ação à distância", levando em conta apenas a vizinhança imediata. O simples aumento do tamanho da vizinhança não seria uma solução para essa questão, pois as

vizinhanças das células apresentariam estacionariedade espacial (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000, p. 5).

Batty et al. (1999) buscam solucionar essa limitação criando, além da vizinhança da célula-foco, uma "zona" que seria maior mas seus seriam efeitos menores. Além disso, o tamanho das vizinhanças e das zonas é diferente de acordo com o tipo de uso das terras.

Para Dragicevic (2004, p. 203) os processos espaciais são sistemas dinâmicos auto-organizados, nos quais as estruturas e as ligações são altamente organizadas e complexas. A complexidade origina-se de interações repetidas e cumulativas relativamente simples entre as entidades espaciais que compõem o sistema. Modelos como autômatos celulares e baseados em agentes (agent-based) seriam as melhores alternativas para incorporar a complexidade na busca por uma teoria.

Os modelos AC são inerentemente dinâmicos e em aplicações geográficas podem representar de maneira integrada as dimensões temporais e espaciais. Utilizando-se de mecanismos simples, esses modelos seriam capazes de gerar padrões de complexidade ilimitada que seriam adequados à modelagem de processos geográficos (DRAGICEVIC, 2004, p. 203).

As aplicações de modelos AC com SIG são caracterizadas por grades de células bidimensionais homogêneas com quatro características: (a) estado das células, (b) tipo e tamanho de vizinhança, (c) um conjunto de regras de transição, e, (d) lapsos temporais crescentes e cumulativos (DRAGICEVIC, 2004, p. 204). A autora propõe a abordagem de conjuntos *fuzzy* para cada uma dessas características como forma de melhorar o desempenho dos modelos.

Apresentando uma forma de integração de modelos AC com cadeias de Markov e métodos multicriteriais para tomada de decisão, Myint & Wang (2006, p. 390) consideram que as mudanças nos usos das terras podem ser divididas em duas categorias, denominadas (a) conversão e (b) modificação. Na primeira as alterações são grandes de forma que os novos usos não podem ser ordenados na mesma classe, enquanto na modificação as alterações ocorrem internamente à classe de uso ou cobertura das terras como, por exemplo, um adensamento de uma área residencial.

Myint & Wang (2006, p. 391) ressaltam a importância da busca pelas forças que estão por trás das mudanças nos usos das terras, que poderiam ser identificadas por meio de modelos

que visem a projetar a distribuição dos usos a partir do conhecimento obtido nos períodos anteriores.

O SIG utilizado foi o Idrisi (MYINT & WANG, 2006, p. 393) e os dados de usos das terras foram obtidos por tratamento de imagens Landsat entre 1979 e 2000. Os critérios para a seleção de áreas para serem urbanizadas foram divididos em duas categorias – limitações e parâmetros diretores. As limitações são áreas impróprias, como corpos d'água, e foram tratadas como Planos de Informações (PI) booleanos. Parâmetros diretores, determinados com métodos multicriteriais, estabelecem diferentes níveis de adequação das terras para serem urbanizadas, como distância de áreas agrícolas e distância das vias de circulação, entre outros. As cadeias de Markov fornecem as imagens de probabilidade de transição entre classes de usos e a matriz de área de transição. No modelo AC os PI que tratam da adequação das terras foram processados para alocar os diversos usos das terras.

Os resultados de Myint & Wang (2006, p. 400) apresentam acurácia de 86,22%, e índice Kappa de 0,83. Os autores destacam que "a parte mais importante do desenvolvimento do modelo e da predição são os mapas de adequação das terras derivados empregando métodos de tomada de decisão multicriterial, pois esses mapas influenciam fortemente as mudanças" (MYINT & WANG, 2006, p. 402).

Kocabas & Dragicevic (2007, p. 682) buscam melhorar o desempenho dos modelos AC pela utilização de redes bayesianas. Com as redes bayesianas é possível reconstruir partes de um sistema complexo com base na teoria dos grafos e essas partes podem ser ligadas a outras a partir de teorias probabilísticas.

São empregados quatro elementos de decisão sobre o desenvolvimento urbano: custo da mudança no uso, declividade, distância das áreas construídas e áreas verdes (KOCABAS & DRAGICEVIC, 2007, p. 688). A estratégia de integração é fraca, pois as ferramentas para a rede bayesiana e AC são desenvolvidas no Matlab. No SIG ArcGis são preparados os dados e visualizados os resultados (KOCABAS & DRAGICEVIC, 2007, p. 689).

Como forma de analisar os resultados os autores utilizam algumas métricas espaciais como número de manchas, tamanho médio das manchas, desvio padrão do tamanho médio, coeficiente de variação e perímetro total (KOCABAS & DRAGICEVIC, 2007, p. 698). Os autores alertam, entretanto, que "algumas vezes não é possível comparar os resultados da

modelagem com situações reais, desde que estas são afetadas por eventos não previsíveis. Além disso, é mais provável que as relações entre as variáveis não se mantenham as mesmas no futuro, pois a mudança nos usos das terras é um processo dinâmico, complexo e não linear" (KOCABAS & DRAGICEVIC, 2007, p. 699).

Liu (2009) desenvolve um modelo AC limitado para desenvolvimento urbano para a metrópole de Sidney. Modelos AC limitados – ou restritos – levam em consideração, além das regras internas ao sistema sendo modelado, um conjunto de limitações impostas por outras escalas de atuação, tais como planos macroeconômicos ou regionais. Em estudos como o proposto neste trabalho, as limitações poderiam ser as projeções de área cultivada com cana-de-açúcar desenvolvidas pelo Ministério da Agricultura e Abastecimento, por exemplo.

A velocidade do processo de desenvolvimento urbano é tratada dentro da lógica *fuzzy*, com regras determinando as classes entre extremamente rápido e extremamente lento com lapsos temporais de zero a mais de 35 anos. Desse modo, além das características da célula-foco e da vizinhança, é considerada a velocidade na alteração dos usos das terras (LIU, 2009, p. 76). Algumas regras levam à aceleração ou diminuição do ritmo da mudança, como, por exemplo, a proximidade de áreas urbanizadas tende a acelerar a urbanização enquanto áreas distantes do sistema viário poderiam ter seu desenvolvimento delongado.

Como forma de avaliação dos resultados a autora propõe a utilização da matriz de erros modificada. Nessa abordagem o PI que resulta da modelagem é submetido a um procedimento de filtragem espacial com uma janela de 3 x 3 *pixels* e a moda dos valores é atribuída ao *pixel* central. Esse PI generalizado é comparado com os dados de referência para gerar a matriz de erros (LIU, 2009, p. 126). Com essa metodologia os resultados do modelo apresentam acurácia total de 82,7% e o índice Kappa é calculado em 74% (LIU, 2009, p. 128).

A implementação do modelo é feita internamente ao SIG ArcGis, e programada em linguagem VBA (LIU, 2009, p. 130). Entretanto, a interface é específica para o modelo proposto, não há como alterar as variáveis (PI) empregadas, a não ser refazendo-se o código-fonte na fase de programação.

Tsang & Leung (2011) buscam criar um modelo AC focado no ambiente urbano no qual as regras são derivadas pela aplicação de uma teoria sobre a renda da terra. Pela proposta dos autores a dinâmica urbana é dependente do retorno que os proprietários têm em face das opções

de utilização do tecido urbano. A proposta de regras a partir de uma teoria busca não depender do comportamento isolado dos atores, pois as decisões dos indivíduos face a mudanças econômicas podem ser diferentes sob as mesmas condições econômicas (TSANG & LEUNG, 2011, p. 146).

Simulando a dinâmica de usos das terras para Hong Kong entre 1966 e 2000 a partir do modelo com regras derivadas da teoria da diferença de renda da terra, Tsang & Leung (2011, p.164) obtém índice Kappa de 0,67 e acurácia total de 0,79 para os dados simulados.

Entretanto, a construção do modelo sobre uma teoria que pressupõe o comportamento humano individual como condicionado pela busca de maior retorno econômico, desconsidera que as pessoas respondem a valores éticos e morais que podem, muitas vezes, ir de encontro ao que seria esperado pelo comportamento economicamente racional.

5.3 Análises multicritérios e sistemas de informações geográficas

Eastman et al. (1995, p. 539) estabelecem três domínios de aplicação dos SIG, inicialmente como um sistema de gerenciamento de uma base de dados geoespaciais; mais recentemente como uma ferramenta analítica para derivar informações por meio de relações lógicas e matemáticas entre mapas; e, a partir dessas duas aplicações iniciais, o estágio dos SIG funcionarem como sistemas de suporte à decisão.

Os autores fornecem um conjunto de definições de itens ligados aos procedimentos de tomada de decisões multicriteriais e multiobjetivas. Os critérios compõem alguma base sobre a qual as decisões possam ser mensuradas e avaliadas, e podem ser subdivididos em fatores – que permitem reforçar ou não uma determinada decisão – e restrições, que funcionam como limites absolutos às várias alternativas (EASTMAN et al., 1995, p. 539).

As regras de decisão são procedimentos pelos quais os critérios podem ser combinados para obter-se uma avaliação da situação e que permitem a comparação entre alternativas. São estruturadas em relação a objetivos específicos (EASTMAN et al., 1995, p. 540).

As avaliações multicriteriais visam a determinar a adequabilidade das várias decisões alternativas a partir de um conjunto amplo de critérios. Um dos métodos mais comuns é a combinação linear ponderada, onde os critérios são multiplicados por pesos e somados para obter-se um índice de adequação (EASTMAN et al., 1995, p. 540). Avaliações multiobjetivos

lidam com vários objetivos conflitantes e buscam uma solução de compromisso que minimize ou maximize determinado objetivo comum (EASTMAN et al., 1995, p. 541).

São identificadas duas fontes de incertezas e riscos no processo de tomada de decisão, a base de dados e as regras de decisão. Na base de dados podem ocorrer erros de medição e na seleção de critérios. Enquanto a forma como são combinados os critérios – regras – podem ser incorretas, ambos os tipos de incerteza levam ao risco de as decisões tomadas serem errôneas (EASTMAN et al., 1995, p. 541).

Os autores apresentam várias formas de padronizar os critérios, balanceá-los a partir dos pesos e proceder à avaliação dos fatores e restrições para a tomada de decisão multicriterial. Em relação aos procedimentos multiobjetivos são apresentadas formas de ordenar objetivos conflitantes. Todos os procedimentos são empregados em um estudo de caso de zoneamento para ordenar a expansão industrial sobre áreas agrícolas no vale do Katmandu - vários módulos do SIG Idrisi foram utilizados no estudo (EASTMAN et al., 1995, p. 543).

Jankowski (1995, p. 266) considera que para melhorar as capacidades de suporte à decisão dos SIG duas abordagens podem ser identificadas. Uma visando à solução de problemas tem como linha mestra os Sistemas de Suporte à Decisão Espacial *(Spatial Decision Support System*) e a outra pela integração de sistemas analíticos especializados com SIG. Ambas as abordagens têm como foco fornecer melhores procedimentos para a tomada de decisões espaciais.

Os métodos multicriteriais de tomada de decisão têm como objetivo geral "auxiliar o tomador de decisões na seleção da melhor alternativa entre várias escolhas viáveis na presença de critérios múltiplos e prioridades diferentes" (JANKOWSKI, 1995, p. 266). Seriam duas as facetas desse desafio: (a) identificar alternativas que satisfaçam os objetivos das partes envolvidas, e (b) reduzir ou ordenar o conjunto de escolhas possíveis para identificar a preferível.

Segundo Jankowski (1995, p. 267), os métodos de análise multicriterial estão embasados no princípio da racionalidade limitada, segundo o qual indivíduos e organizações apresentam um comportamento na tomada de decisões que busca satisfazer determinados níveis de aspiração em vez de aperfeiçoar o comportamento visando encontrar a melhor solução em uma situação de decisão. A tomada de decisões segundo este modelo demanda a definição do problema, a busca por alternativas e de critérios de seleção, a avaliação das alternativas e, por fim, ordenamento e

seleção das alternativas, selecionando-se a mais adequada. A aplicação de SIG na implantação desse processo seria na fase de busca de alternativas e de critérios (JANKOWSKI, 1995, p. 268).

São apresentados um modelo geral para tomada de decisão multicritérios e os procedimentos para a obtenção dos pesos dos critérios, além de técnicas compensatórias (os desempenhos das alternativas nos vários critérios podem ser equilibrados) e não-compensatórias (o desempenho fraco de uma alternativa em um critério não pode ser balanceado pelo desempenho forte em outro) para o ordenamento das alternativas.

As estratégias para a integração de métodos multicriteriais e SIG são debatidas. Em relação ao modelo de dados matricial, o autor esclarece que "cada célula individual é considerada como uma escolha alternativa e, portanto, é candidata a avaliação" (JANKOWSKI, 1995, p. 279). Devido ao normalmente elevado número de células em bases de dados matriciais, é considerada proibitiva a comparação entre pares de alternativas, que é computacionalmente intensiva, sendo mais adequado um procedimento de soma ponderada. Dessa maneira, a análise multicritérios seria composta de duas etapas em um SIG matricial, (a) o resultado da soma ponderada resultaria no mapa de adequabilidade frente ao objetivo, e (b) um ordenamento dessas células indicaria aquelas mais viáveis. No modelo de dados vetorial, cada alternativa é representada com pontos, linhas ou polígonos e a quantidade de alternativas é reduzida permitindo a comparação entre pares de opções com métodos multicriteriais mais intensivos (JANKOWSKI, 1995, p. 279).

As duas estratégias – fraca e forte – para a integração de métodos multicritérios e SIG vetorial são descritas, mas apenas para a primeira é apresentado um exemplo de aplicação com o SIG ArcInfo (JANKOWSKI, 1995, p. 282).

Malczewski (1999) traz um tratamento mais completo da aplicação de técnicas multicriteriais com SIG para análise de decisões. Inicialmente é feito um tratamento básico – denominado pelo autor de "preliminares" – de dados geográficos e níveis de medida, SIG e de métodos multicriteriais.

Sobre a integração da análise multicriterial e do SIG, o autor esclarece que os atributos são utilizados para mensurar o desempenho das alternativas nos diversos critérios em relação a um objetivo e que, depois de estabelecida a estrutura hierárquica de objetivos e atributos, os critérios devem ser representados como PI em um banco de dados geoespaciais. A análise

multicriterial demanda que os valores contidos nos mapas de critérios sejam transformáveis para uma escala de valores comparáveis (MALCZEWSKI, 1999, p. 103).

Em relação à definição de critérios para avaliação duas considerações devem ser balanceadas. Em primeiro lugar, o número de critérios de avaliação é definido de maneira que o modelo de decisão descreva a situação-problema o mais fielmente possível e, em segundo, o menor número aceitável de critérios deve ser utilizado para abordar-se a decisão. Como guias para o processo de seleção considera o autor que o conjunto de atributos deve ser completo (deve cobrir todos os aspectos do problema), operacional (pode ser utilizado no processo de decisão), separável (pode ser separado em partes para tornar o processo mais simples), não redundante (para evitar a sobreposição de critérios) e mínimo (deve conter o menor número de atributos possível) (MALCZEWSKI, 1999, p. 107). Os critérios podem ser selecionados a partir da revisão de literatura, por meio de modelos analíticos e pesquisas de opiniões.

São examinados vários métodos para a geração dos mapas de critérios e para sua normalização. Os procedimentos podem ser determinísticos (transformação linear e funções de valor ou utilidade), probabilísticos e *fuzzy*. O autor esclarece que "um mapa de critério representa a distribuição espacial do grau que um atributo aproximou-se de seu objetivo relacionado" (MALCZEWSKI, 1999, p. 135). Dessa maneira, nos PI de critérios estariam embutidos os objetivos parciais do problema.

Ao tratar de alternativas e restrições, Malczewski (1999, p. 137) esclarece que poucos problemas reais podem ser considerados irrestritos e nas aplicações SIG as restrições servem para eliminar objetos que apresentem determinados atributos que tornam sua consideração inviável. Assim, as restrições determinam as dimensões do espaço de decisão. O autor destaca, ainda, o princípio da eficiência, segundo o qual, se uma alternativa "A" é considerada tão desejável quanto a alternativa "B" em todos os critérios, e é mais desejável em pelo menos um critério, a opção "A" domina a opção "B". As alternativas não dominadas devem receber prioridade na decisão (MALCZEWSKI, 1999, p. 137).

Variáveis de decisão podem ser classificadas em determinísticas, aleatórias (estocásticas) e lingüísticas (*fuzzy*). São apresentados métodos para quantificá-las e representá-las e as restrições. As alternativas em um problema de decisão espacial consistem de "pelo menos

dois elementos básicos: ação (o que fazer?) e localização (onde fazê-lo?)" (MALCZEWSKI, 1999, p. 138).

Malczewski (1999, p. 177) esclarece que seria temerário interpretar os pesos atribuídos aos critérios como medidas gerais da importância destes. Para a implementação da análise multicriterial os pesos são normalizados de maneira que a somatória resulte na unidade (MALCZEWSKI, 1999, p. 178). O autor apresenta métodos de ordenamento, de valorização e de comparação entre critérios e de criação de regras de decisão para a ordenação das alternativas. Programas para suporte à decisão espacial multicriterial são descritos juntamente com alguns exemplos de aplicação.

Joerin et al. (2001, p. 154) buscam por meio de técnicas de análise multicriterial responder a dois pré-requisitos para a aceitação dos planos de usos das terras que seriam (a) manter o equilíbrio ecológico e contribuir para o crescimento econômico, e (b) mediar os conflitos reduzindo as objeções e evitando a oposição.

O modelo Magister (*Multicriteria Analysis and GIS for Territory*) foi utilizado como ferramenta de suporte à decisão no planejamento de usos das terras. O programa é composto por três componentes principais: sistema de gerenciamento de banco de dados, um conjunto de modelos e um módulo para a avaliação e seleção de alternativas (JOERIN et al., 2001, p. 155). Dois SIG foram utilizados na criação da base de dados, um vetorial (MapInfo) e outro matricial (Idrisi), para um estudo de caso em cantão na Suíça (JOERIN et al., 2001, p. 158).

Com o objetivo de criar um mapa de adequação das terras para projetos habitacionais, oito critérios foram selecionados: impactos na paisagem, aumento na poluição atmosférica, crescimento no nível de ruídos, acessibilidade até os locais de trabalho, microclima, risco de deslizamentos, distância de outras localidades e redes de serviços públicos, qualidade paisagística. Para geração dos mapas de critérios os procedimentos de análise espacial foram empreendidos no formato matricial (JOERIN et al., 2001, p. 159).

Os procedimentos para a geração dos mapas para os oito critérios são detalhados. O modelo Electre-tri é empregado para as análises multicriteriais. As tabelas de dados que foram processadas pelo modelo foram armazenadas no SIG MapInfo e uma interface comum permitiu a troca de arquivos entre o modelo e o SIG (JOERIN et al., 2001, p. 168).

Malczewski (2006) faz uma revisão da literatura sobre aplicação de métodos de análise multicriterial com SIG. Apresenta uma definição básica segundo a qual "SIG-AMD (Análise Multicriterial de Decisões) pode ser pensado como um processo que transforma e combina dados geográficos e julgamentos de valores (preferências) para obter informações para tomada de decisão" (MALCZEWSKI, 2006, p. 703).

São identificados três elementos para a rápida disseminação do tema de análises multicriteriais entre pesquisadores interessados em SIG, (a) o maior reconhecimento do papel do suporte à tomada de decisões, campo relevante na ciência da informação geográfica, (b) a maior disponibilidade de programas de baixo custo para AMD, e (c) a inclusão de módulos de AMD em pacotes SIG comerciais (MALCZEWSKI, 2006, p. 705).

Dos artigos revisados pelo citado autor, uma ligeira maioria utilizou-se de SIG matriciais (47,6%), enquanto em 47% dos trabalhos o modelo de dados vetorial compunha a base dos SIG empregados. Outros 5,4% não especificaram se os dados eram matriciais ou vetoriais (MALCZEWSKI, 2006, p. 707).

O autor esclarece que, se existe apenas uma estrutura de preferências, o processo de tomada de decisões é considerado como se houvesse apenas um único tomador, independentemente do número de pessoas envolvidas. Por outro lado, se os indivíduos ou grupos de interesse são caracterizados por preferências diversas, o problema de decisão é caracterizado pela atuação coletiva. A maioria dos artigos listados pelo autor lida com um único tomador de decisões (MALCZEWSKI, 2006, p. 712).

Em relação às condições de tomada de decisões, o domínio dos procedimentos determinísticos sobre os estocásticos ou *fuzzy* é marcante, pois 77% dos trabalhos seguem essa linha de pensamento (MALCZEWSKI, 2006, p. 713).

A principal vantagem da integração de métodos AMD e SIG reside no fato de que essa abordagem permite que os tomadores de decisão incorporem seus julgamentos no modelo e percebam o reflexo de suas premissas nos resultados do modelo, interativamente. Dessa maneira, por permitir uma melhoria na comunicação e compreensão das divergências pelos vários agentes responsáveis, facilitaria a construção do consenso e de políticas de compromisso (MALCZEWSKI, 2006, p. 717).

Segundo Malczewski (2006, p. 718), “modelos AMD-SIG devem ser construídos com duas perspectivas em mente: a perspectiva técnico-científica em relação aos SIG e a sociopolítica com um SIG participativo”. Uma proposta nesse sentido visando a desenvolver um modelo AMD-SIG participativo com auxílio da Internet é descrito por Jankowski et al. (2008) no caso do “Sistema de Informações Geográficas Participativo”, no qual moradores de municípios de três estados norte-americanos foram aleatoriamente selecionados para inserir suas preferências para gerar decisões em relação ao sistema viário.

5.4 Períodos na agroindústria canavieira do ponto de vista ambiental

A produção da cana-de-açúcar passou por diversas fases ao longo de sua história e o quadro atual é mais um momento desse processo. Do ponto de vista ambiental, duas grandes fases podem ser identificadas. A primeira, relacionada à produção de açúcar e álcool para abastecer os mercados, é caracterizada por vários momentos diferentes, e a mais recente é a fase do etanol travestido de base para uma matriz energética verde e ambientalmente correta. Ao descrever as fases, o enfoque será destinado aos efeitos espaciais da lavoura canavieira no Estado de São Paulo.

Dentro da postura que governou o primeiro período – buscava a produção de açúcar e, posteriormente, álcool combustível – podemos identificar três fases: a primeira focada na produção de açúcar para abastecimento da metrópole durante o período colonial, uma segunda, também voltada primordialmente para o açúcar, aproximadamente entre 1930 e as crises nos preços do petróleo na década de 1970, e, por fim, a fase de meados da década de 1970 até cerca de 1990, na qual o álcool combustível e o açúcar são os produtos principais.

Em São Paulo, a primeira fase de produção que se estende de meados do século XVIII até 1851 é caracterizada pelo pioneirismo na ocupação do território paulista, resultando na estruturação inicial do sistema de circulação para ligar as áreas de produção no interior ao porto de escoamento no litoral e pelo início da substituição da vegetação nativa por culturas agrícolas.

Segundo Petrone (1968, p. 23) o crescimento da produção de açúcar nesse período deveu-se ao aumento da área cultivada e muito pouco ao aperfeiçoamento das técnicas de plantio e produção. Duas áreas produtoras com destaque de açúcar e aguardente concentravam-se no

litoral norte – que perde importância devido à proibição de se embarcar açúcar em outros portos que não o de Santos, e nas terras do vale do Paraíba, que abasteciam o mercado carioca; mas a principal área (PETRONE, 1968, p. 41) era formada pelas terras de "serra acima" em um quadrilátero limitado pelos municípios de Jundiaí, Sorocaba, Mogi-Guaçu e Piracicaba (figura 5.2). Essas terras combinavam solos e clima adequados à produção de cana-de-açúcar com uma distância relativamente pequena do porto de Santos.

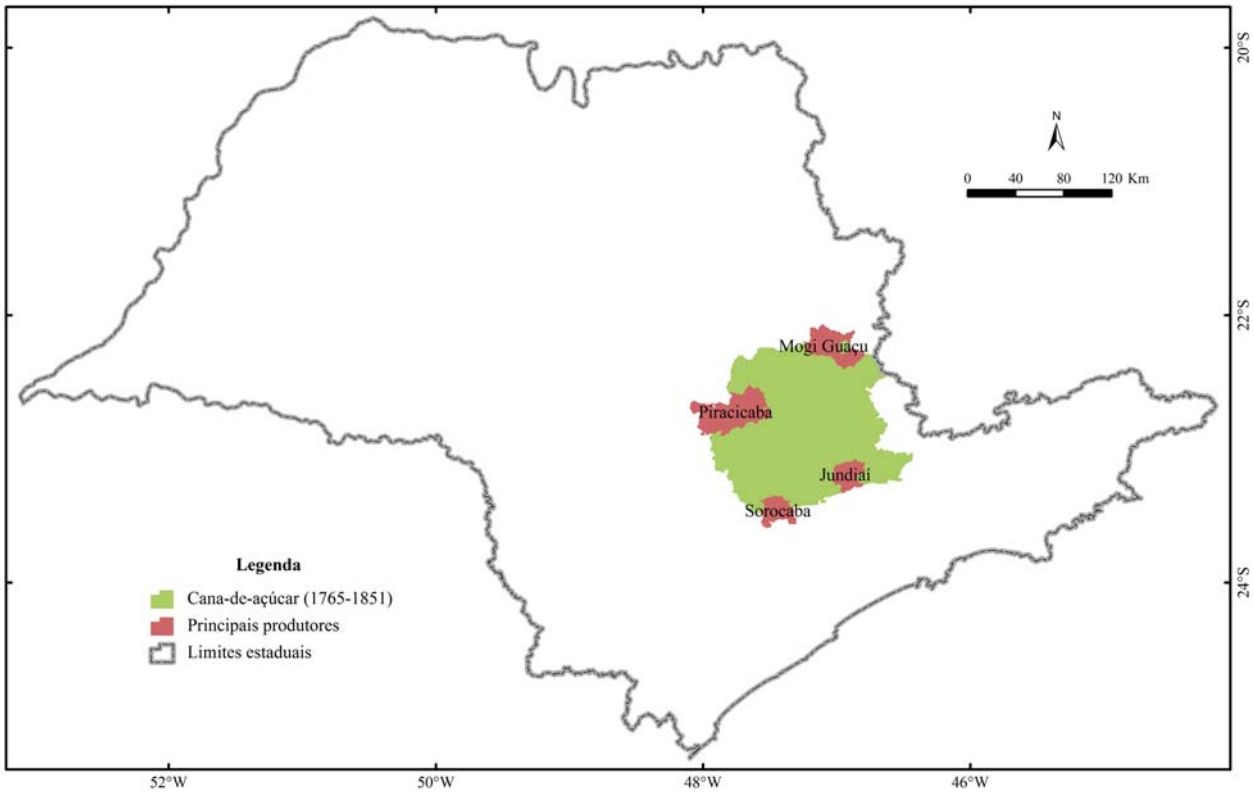

Figura 5.2 – Principal área de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nos séculos XVIII e XIX, limites aproximados, derivado de Petrone (1968). Elaboração: S.F. Adami.

Nessa época, as fazendas de cana-de-açúcar localizavam-se próximas aos corpos d'água para o engenho e deveriam dispor de grandes quantidades de madeira para abastecer as fornalhas. A escassez de lenha é considerada uma das causas da penetração da lavoura em direção ao interior do estado, conforme Petrone (1968, p. 82). O trabalho agrícola seguia o ciclo: derrubada e queimada da mata e plantio, o arado não tinha uso disseminado no campo (PETRONE, 1968, p. 85). Inicialmente os escravos derrubavam e queimavam a mata, as cinzas funcionavam como

adubo para as culturas, limpava-se o terreno e tinha início o plantio de milho, feijão ou leguminosas, em seguida cultivava-se a mandioca e depois a cana-de-açúcar (PETRONE, 1968, p. 88).

Nesse período "o principal produto de exportação paulista era o açúcar" (PETRONE, 1968, p. 144). O ano-safra de 1846-1847 registra a maior produção no período, e nesse mesmo ano os agricultores iniciam a substituição da cana pelo café. Em 1850-1851, a rubiácea ultrapassaria o volume de açúcar (PETRONE, 1968, p. 162).

O papel desse período para a estruturação do espaço paulista é ressaltado por Petrone (1968, p. 223): "o açúcar teve de organizar toda a infra-estrutura indispensável à sua comercialização. As estradas, o porto, o comércio, tudo se desenvolveu em consequência da nova atividade econômica dos paulistas e se adequou a essa função. Santos, antes de ser porto do café, foi porto de açúcar".

Durante o reinado do café, o açúcar e suas lavouras foram apenas coadjuvantes na vida econômica paulista. Essa situação transforma-se com a crise dos mercados de 1929 e a perda de importância da cafeicultura. A produção de açúcar volta a ganhar destaque.

Nessa fase, Szmrecsányi (1979, p. 161) caracteriza a história da indústria canavieira pela ocorrência periódica de crises de superprodução e queda nos preços. Destacando que a oferta potencial de açúcar tende a ser bastante superior à demanda do produto, tanto no mercado nacional quanto no exterior. Desse quadro resultou a criação, em 1933, do IAA (Instituto do Açúcar e do Álcool), que passa a tentar controlar a produção de açúcar e planejar o desenvolvimento do setor.

Nesse cenário, considerado de intervenção estatal no setor (RAMOS, 1999; MORAES, 2007), São Paulo obtém a liderança na produção de açúcar, em decorrência dos problemas com a navegação de cabotagem ocorridos durante a Segunda Guerra Mundial. Para suprir a demanda dos principais mercados internos (centro-sul), o IAA permite aumentos consecutivos de produção e ampliação da capacidade de beneficiamento das usinas nessa região em detrimento da produção nordestina (SZMRECSÁNYI & MOREIRA, 1991, p. 58).

Sob esse novo quadro foi buscada a modernização do setor entre 1969 e 1974. Entre seus objetivos estavam a concentração das unidades industriais e das terras em grandes estabelecimentos (SZMRECSÁNYI & MOREIRA, 1991, p. 68). Isto porque, a maior

participação da cana produzida pela própria usina possibilita um melhor planejamento do abastecimento das moendas, resultando em períodos menores de moagem e maior produção (MANOEL, 1986, p. 125). A distribuição espacial das áreas de plantio concentra-se em um raio aproximado de 20 Km das usinas (MANOEL, 1986, p. 95).

Após os choques do petróleo em meados da década de 1970 é estabelecido o Proálcool. Segundo Szmrecsányi & Moreira (1991, p. 71) a justificativa oficial para o programa era a busca de um substituto para a gasolina como forma de diminuir a pressão sobre a balança comercial, mas, esclarecem os autores, mais importante que a busca de uma nova matriz energética era solucionar o problema da grande capacidade ociosa do parque canavieiro.

Inicialmente o enfoque do programa esteve centrado no álcool anidro, que é adicionado à gasolina. Depois do segundo choque nos preços do petróleo em 1979, buscou-se enfatizar a produção de álcool hidratado, que atua como combustível automotivo exclusivo. A produção de álcool cresceu 35% durante os primeiros dez anos do Proálcool (SZMRECSÁNYI & MOREIRA, 1991, p. 72).

Entre 1979 e 1989 os preços do petróleo caíram e a situação da produção de álcool combustível deteriorou-se paulatinamente, levando a uma crise de abastecimento do combustível (SZMRECSÁNYI & MOREIRA, 1991, p. 74). A partir de meados da década de 1980, a queda significativa nos preços do barril de petróleo e a diminuição dos subsídios estatais levam à diminuição na produção do etanol, resultando em crises de abastecimento. A área ocupada pela lavoura canavieira diminuiu no país em geral.

Uma crescente preocupação com a emissão de gases causadores do efeito-estufa destaca a queima de combustíveis fósseis como um dos principais responsáveis por essas emissões. Depois do início do século XXI o etanol volta a ganhar destaque como substituto para a gasolina, e esse cenário é reforçado por altas intermitentes nos preços do petróleo e pelo concomitante desenvolvimento de motores bicombustíveis.

Entretanto, diferente da década de 1970, o etanol não é tratado apenas como substituto da gasolina em virtude dos altos preços desta, mas como um "novo" combustível ambientalmente eficiente e, portanto, sua escolha como fonte de energia não seria condicionada apenas pelos aspectos conjunturais do mercado de hidrocarbonetos. No território brasileiro, a nova expansão da cultura canavieira ocorreu associada a um novo ambiente institucional caracterizado pela

concorrência entre empresas, a não-intervenção estatal e a entrada de capitais estrangeiros nas produções agrícola e industrial. A dinâmica territorial da lavoura de cana-de-açúcar utiliza-se dos resultados das fases de desenvolvimento anteriores e reforça o estado de São Paulo como o maior produtor do país, explorando a rede de circulação mais densa e de melhor qualidade e com maior proximidade de centros de pesquisa e dos mercados consumidores.

A indústria sucroenergética atualmente encontra-se em um regime de regulação totalmente privado, excluindo a ação do Estado na gestão do território, pois os critérios e as formas de relacionamento entre produtores de matéria-prima e as unidades de processamento são decididos em um conselho interno ao setor. No interior desse quadro, está ocorrendo um amplo processo de oligopolização dessa cadeia produtiva com grandes grupos adquirindo as empresas menores e assim tornando ainda mais desigual a relação entre a produção agrícola e o processamento industrial.

O cenário atual é reforçado pelo rótulo de combustível ambientalmente adequado do etanol e pela concorrência entre as empresas do setor, caracterizando-se pela alteração dos usos das terras nas regiões agrícolas do país.

Visando a formar uma imagem de combustível "verde" frente aos mercados internacionais, o Estado e as associações de produtores têm buscado mecanismos para garantir a origem ambientalmente equilibrada do combustível e instituíram um protocolo de cooperação que prevê a eliminação da queima da cana no Estado de São Paulo e a certificação ambiental do etanol produzido em conformidade com normas aceitas pelo mercado internacional. Além do processo de buscando tornar o etanol uma *commodity* que possa ser uniformemente comercializada mundialmente e com destacado papel nas bolsas de mercadorias.

Outro aspecto do atual movimento de expansão da cultura canavieira é o deslocamento de outras culturas consideradas menos lucrativas, como a citricultura, ou de usos das terras menos intensos como pastagens.

Ao longo de grande parte da história da agroindústria da cana-de-açúcar, as estratégias das usinas seguiram na direção da concentração de terras visando a garantir seu abastecimento com matéria-prima para a produção de açúcar e álcool. Esse fato é notável em tradicionais áreas produtoras de cana-de-açúcar. Os empreendimentos ligados ao novo cenário produtivo não são caracterizados pela propriedade direta da terra, com muitas usinas não dispondo de áreas de

plantio próprias. O mecanismo de controle sobre o fornecimento é feito por meio de contratos de arrendamento e pagamento aos proprietários das terras pela sua utilização no plantio.

Nesse cenário é que deve focar o modelo AC para simulação da dinâmica da lavoura canavieira e os limites dos resultados são dados pela manutenção dessas características atuais. Por exemplo, a produção de etanol de segunda geração a partir da celulose pode alterar significativamente as relações entre o campo e a indústria. Nessa situação outros critérios e outra simulação devem ser necessários, pois o presente modelo é válido apenas se mantidas as características do período atual.

6. Material e métodos

6.1 Localização e caracterização da área de estudos

A área de atuação do EDR de Araçatuba é composta pelos municípios paulistas de Alto Alegre, Araçatuba, Avanhandava, Barbosa, Bilac, Birigui, Braúna, Brejo Alegre, Clementina, Coroados, Gabriel Monteiro, Glicério, Guararapes, Luiziânia, Penápolis, Piacatú, Rubiácea e Santópolis do Aguapeí. Localizada no Noroeste do estado de São Paulo, entre as coordenadas 20° 50' S e 21°45' S e 49° 48' W e 51° W (figura 6.1), ao norte está limitada pelos reservatórios de água construídos ao longo do rio Tietê e ao sul pelo canal fluvial do rio Aguapeí.

Os tipos geológicos predominantes, segundo Almeida et al. (1981), na EDR de Araçatuba são litologias representadas pelos derrames de basaltos e intrusivas associadas da Formação Serra Geral pertencentes ao Grupo São Bento. Em grande parte do estado de São Paulo esses derrames sustentam cuestas basálticas e morros testemunhos, mas na área de estudos ocorre em pequenos afloramentos escavados pelos canais fluviais de maior porte, como o rio Aguapeí. A deposição dos sedimentos do Grupo Bauru, no Cretáceo Superior, ocorreu sobre os basaltos da Formação Serra Geral, sendo a formação Santo Anastácio encontrada nas cotas mais baixas ao longo dos vales dos rios que afluem para o rio Paraná. Na EDR de Araçatuba pequenas áreas afloram nos vales dos rios Aguapeí e Tietê. Essa formação é caracterizada por arenitos marrons-avermelhados a arroxeados, de textura fina a média e grau de seleção regular a ruim. Predominam grãos de quartzo arredondados a subarredondados recobertos por película limonítica. Seu ambiente de deposição, provavelmente, está ligado a um ambiente fluvial de padrão anastomosado, com grande quantidade de carga sedimentar e pequena capacidade de seleção (ALMEIDA et al., 1981).

A maior parte da área de estudo é sustentada por sedimentos da Formação Adamantina. Essa unidade é caracterizada por arenitos finos a muito finos, com cores de róseo a castanho, estratificação cruzada, alternado com bancos de lamitos e siltitos de cores castanho-avermelhado a cinza-castanho com textura maciça e acamamento plano-paralelo. Em relação à Formação Santo Anastácio apresenta maior grau de seleção e granulação mais fina. O ambiente de deposição característico é o de canais fluviais de padrão meandrante (ALMEIDA et al., 1981).

Ao longo dos maiores rios são encontrados depósitos aluvionares em planícies fluviais, compostos de cascalhos e areias (ALMEIDA et al., 1981). Atualmente muitas dessas áreas foram recobertas pelas águas dos reservatórios voltados à produção de energia elétrica.

O relevo que caracteriza a paisagem na área de estudos é, conforme Ponçano et al. (1981), composto por relevo colinoso com colinas médias próximas ao interflúvio Tietê-Aguapeí e colinas amplas em direção aos vales desses rios (figura 6.2).

As colinas médias são caracterizadas por topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos e drenagem de baixa a média densidade, enquanto as colinas baixas por topos aplainados, vertentes retilíneas e convexas e baixa densidade de drenagem. Em áreas restritas ocorrem planícies com relevo plano ao longo dos vales dos rios Aguapeí e Tietê, sendo que, neste último, grande parte dessas áreas atualmente encontra-se submersa pelas águas das represas para geração de energia.

O tipo de modelado que predomina na área de estudos apresenta vertentes com baixos valores de declividade. Essa característica é importante, pois vertentes inclinadas impõem restrições às atividades de mecanização agrícola e aumentam os problemas de erosão dos solos e demandam práticas conservacionistas mais elaboradas.

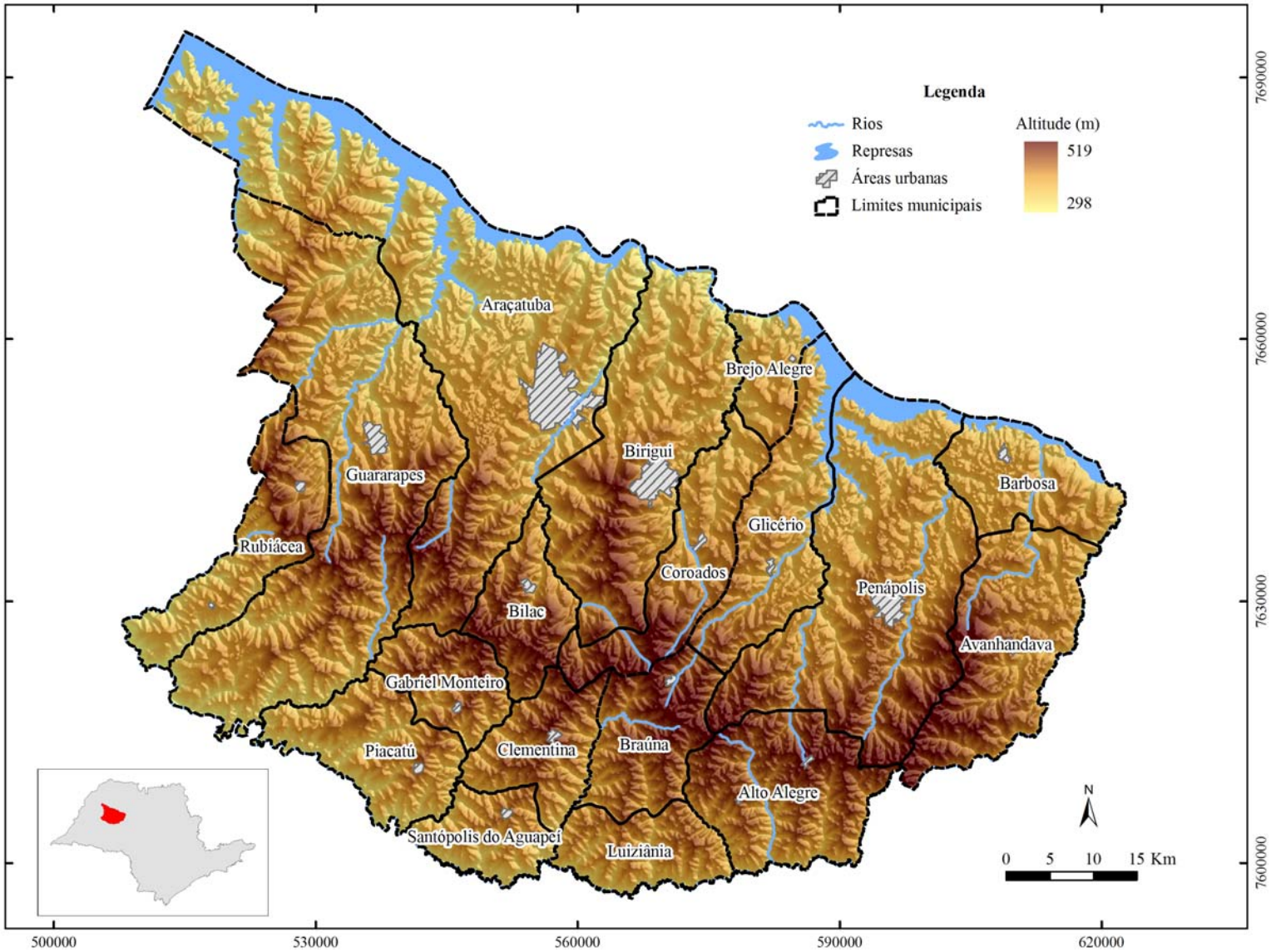

Figura 6.1 – Localização e municípios da área de estudos. Elaboração: S.F. Adami. Fonte: IBGE e IGG.

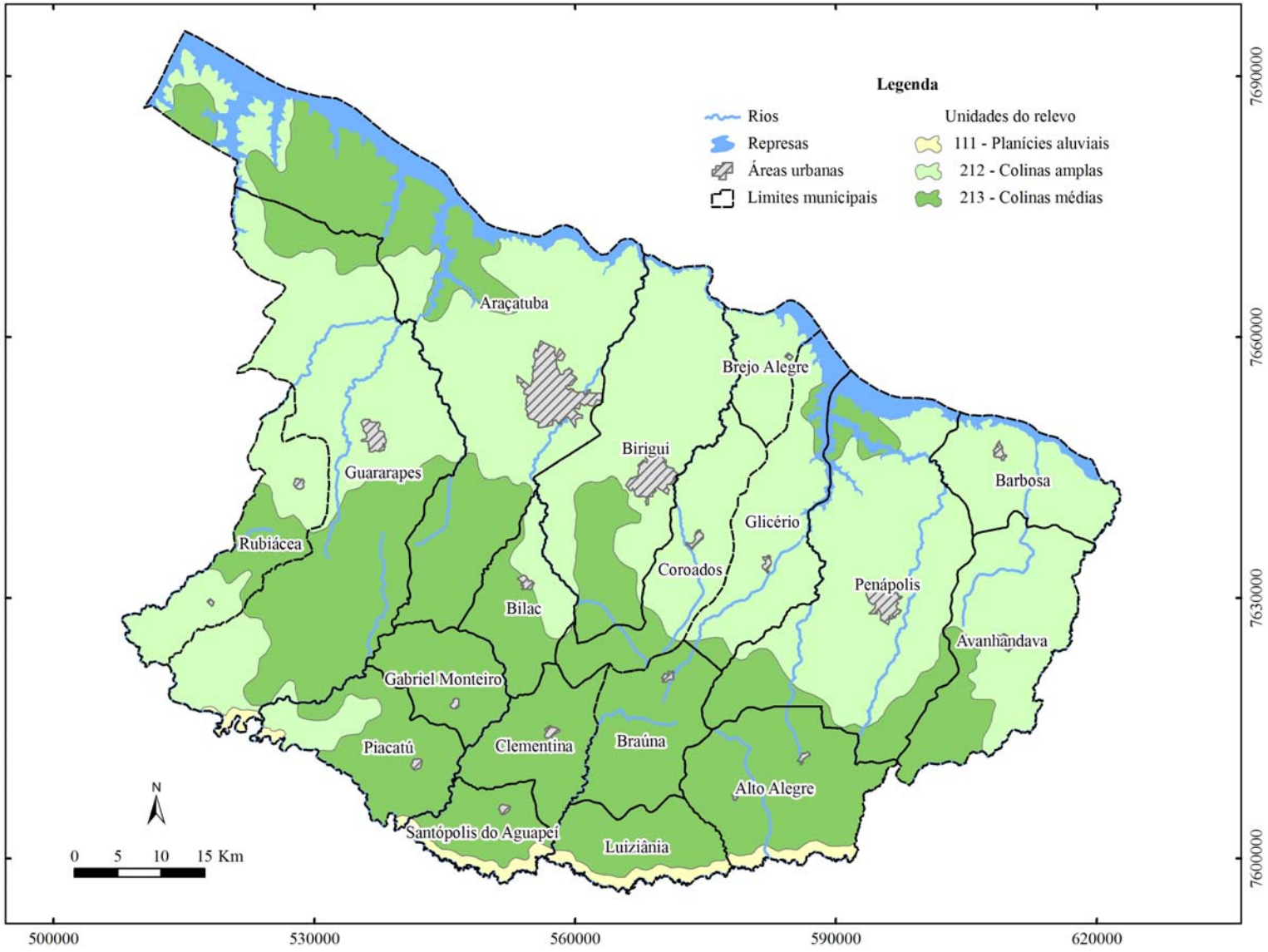

Figura 6.2 – Geomorfologia da EDR de Araçatuba, adaptado de Ponçano et al. (1981). Elaboração: S.F. Adami.

Na área de estudos o mosaico de solos (figura 6.3) compõe-se, conforme Oliveira et al. (1999), de Latossolos Vermelhos distróficos com horizonte A moderado e textura média em relevo plano a suave ondulado em direção ao vale do Tietê. Nas áreas de colinas médias próximas ao interflúvio Tietê-Aguapeí, predominam os Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos associados aos Argissolos Vermelhos distróficos e eutróficos com textura arenosa no horizonte A e média no horizonte B ou média em ambos os horizontes em relevo suave ondulado; nas áreas de relevo plano são encontrados Latossolos Vermelhos distróficos com textura média e A moderado. Essa última unidade reaparece no extremo Sudoeste da área de estudos. Entre essas classes ocorrem os Latossolos Vermelhos distróficos com A moderado textura média em relevos planos e, subsidiariamente, Argissolos Vermelho-Amarelos ou Vermelhos, eutróficos ou distróficos com A moderado e texturas arenosa/média e média. Ocorrem na vertente voltada para o rio Tietê manchas menores de Latossolos Vermelhos distróficos e Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos com horizonte A moderado e textura média.

Nas margens do rio Tietê, entre os municípios de Brejo Alegre e Birigui, há uma mancha de Latossolo vermelho eutroférrico e distroférrico associado a Nitossolos Vermelhos eutroférricos ambos com horizontes A moderado ou chernozêmico e textura argilosa. Na vertente voltada ao rio Aguapeí e no setor Noroeste do município de Araçatuba, ocorrem Argissolos Vermelhos eutróficos abrúpticos ou não com horizonte A moderado e textura arenosa/média. Nas áreas de planícies fluviais são encontrados Gleissolos Háplicos eutróficos e distróficos com argila baixa atividade e texturas variadas e, subsidiariamente, Neossolos Flúvicos eutróficos com A moderado e textura argilosa.

Devido às suas diferentes características, as várias classes de solos apresentam importâncias diversas para os usos agrícolas, em especial as diferenças de profundidade efetiva e fertilidade natural são importantes. Em trabalhos pedológicos voltados especificamente à cultura canavieira, a textura dos solos e a existência de gradiente textural entre horizontes, além de outros atributos, ganham importância, pois esses atributos estariam relacionados com maior armazenamento de água no perfil de solo e, possivelmente, maior disponibilidade hídrica para a cultura.

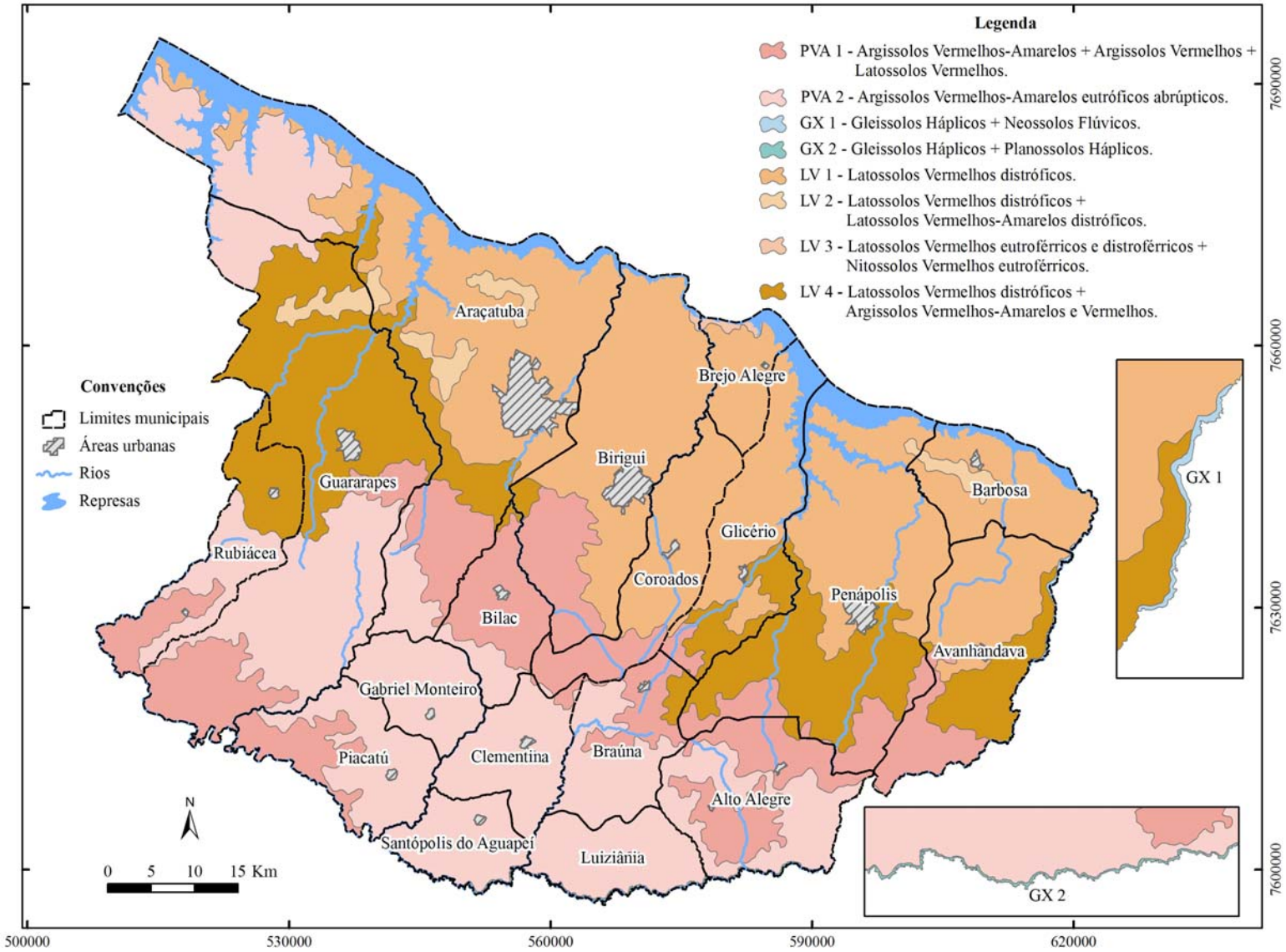

Figura 6.3 – Solos da EDR de Araçatuba, adaptado de Oliveira et al. (1991). Elaboração: S.F. Adami.

Os totais médios de precipitação (figura 6.4), para a área da EDR de Araçatuba variam entre menos de 1.200mm anuais nos vales dos rios Tietê e Aguapeí e aumentam em direção ao divisor dessas bacias até atingir valores acima de 1.300mm anuais nos setores mais elevados, entre os municípios de Alto Alegre e Avanhandava, segundo Secretaria de Economia e Planejamento, São Paulo (1978).

As temperaturas médias anuais variam entre 22 °C a mais de 24 °C. Os valores mais elevados ocorrem ao longo do vale do rio Tietê, enquanto as partes mais elevadas próximas ao divisor Tietê-Aguapeí tendem a apresentar temperaturas ligeiramente mais tênues (figura 6.5).

Segundo São Paulo (1972), os meses mais chuvosos são janeiro/fevereiro com totais mensais entre 150 e 200 mm e o mais seco julho/agosto com valores próximos a 20 mm. Participam e determinam o ritmo climático, a Massa Tropical Atlântica quente e úmida que traz estabilidade e tempo bom, a Massa Equatorial Continental responsável pelo aquecimento e pelas chuvas no verão, a Massa Tropical Continental quente e seca, e a Massa Polar Atlântica que controla o regime de chuvas no inverno e leva a diminuições na temperatura (SÃO PAULO, SECRETARIA DE ECONOMIA E PLANEJAMENTO, 1972).

A variação climática na totalidade da área da EDR de Araçatuba não impõe limites ao cultivo da cana-de-açúcar, sendo considerada em condições térmicas e hídricas ótimas, pois apresenta temperaturas acima de 21°C e deficiência hídrica entre de 0 a 140 mm anuais, não demandando a irrigação da cultura, conforme São Paulo, Secretaria da Agricultura (1974).

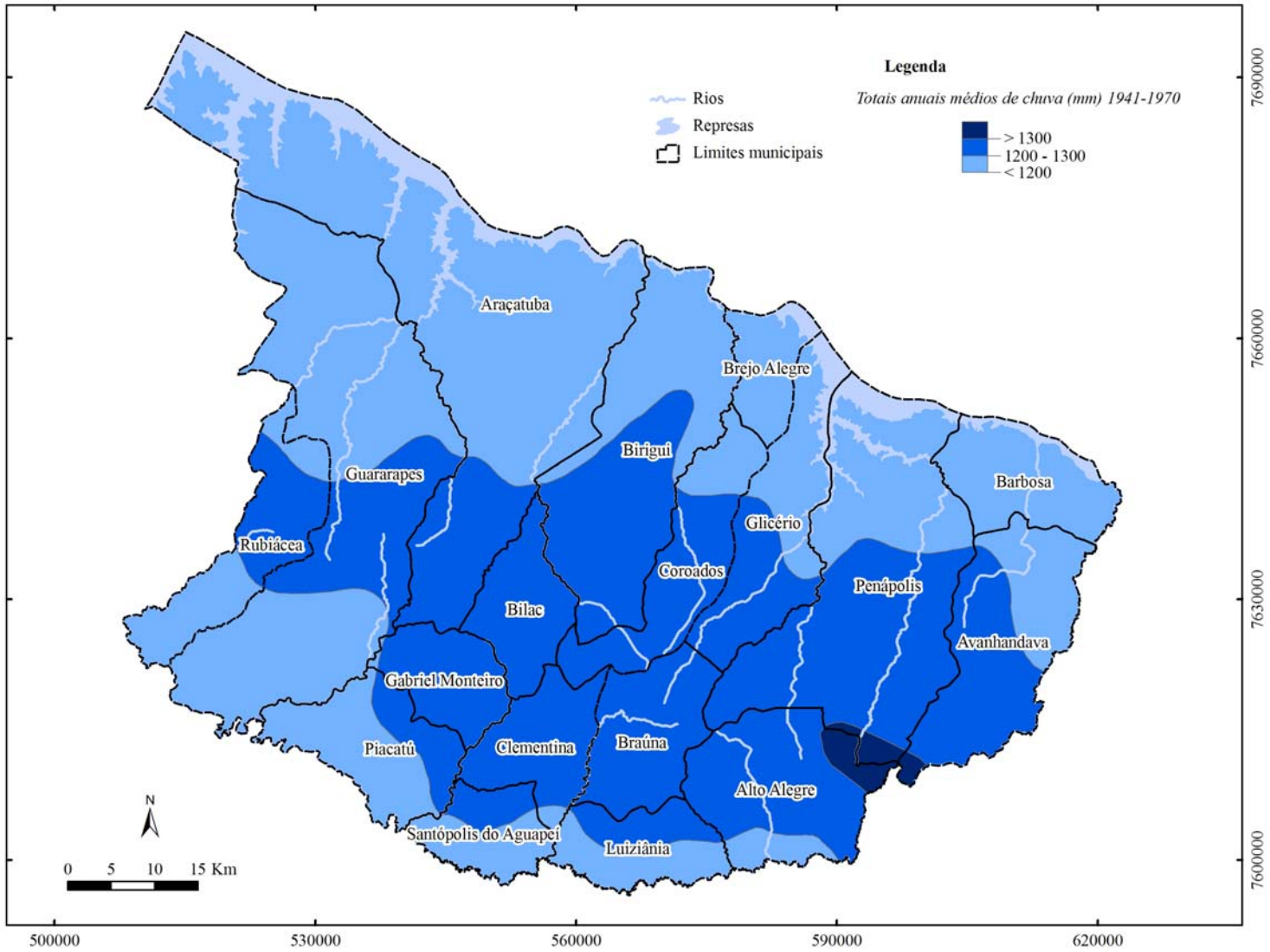

Figura 6.4 – Totais anuais médios de precipitação na EDR de Araçatuba, adaptado de São Paulo, Secretaria de Economia e Planejamento (1978). Elaboração: S.F. Adami.

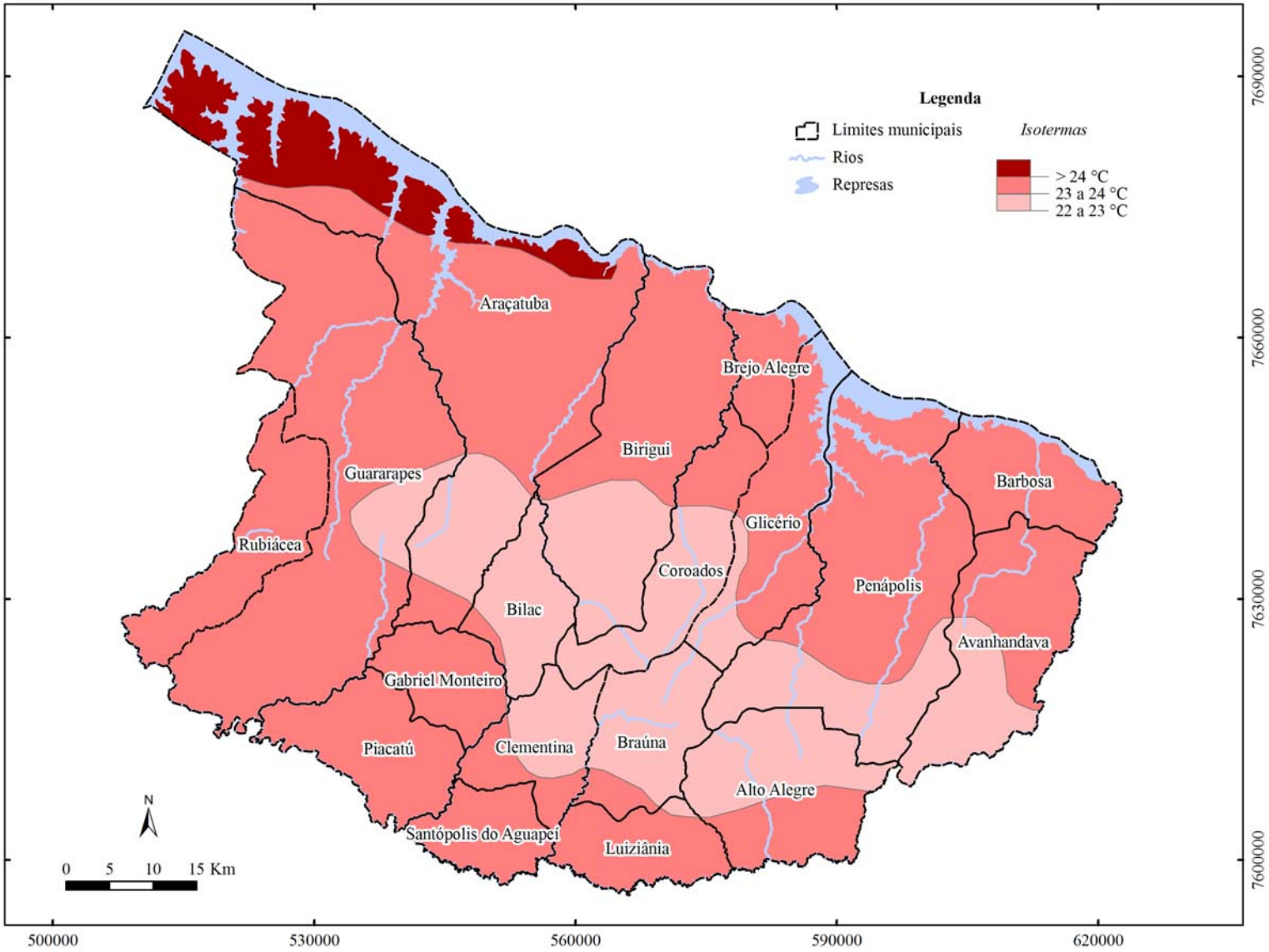

Figura 6.5 – Temperatura média anual na EDR de Araçatuba, adaptado de Brunini et al. [2008?]. Elaboração: S.F. Adami.

A cultura da cana-de-açúcar expandiu-se continuamente pelo território paulista, em especial após os choques nos preços do petróleo da década de 1970, colocando o estado de São Paulo como o maior produtor nacional de cana-de-açúcar. Desde as regiões-símbolo da produção de cana-de-açúcar, como Campinas e, especialmente, Ribeirão Preto, ocorreu uma expansão para outras áreas do Planalto Ocidental (figura 6.6), como as regiões de Assis, Presidente Prudente, São José do Rio Preto, Birigui e Araçatuba.

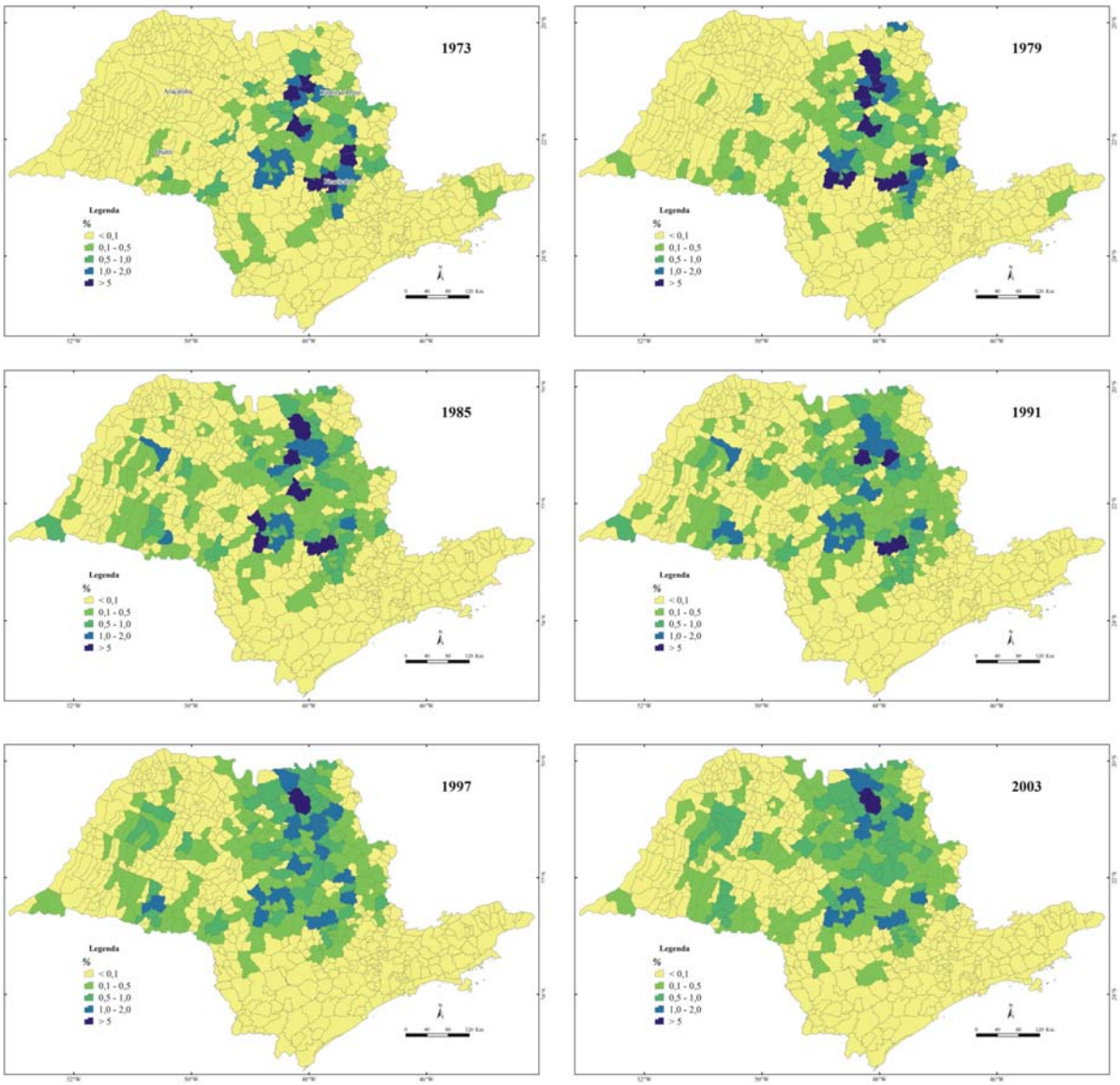

Figura 6.6 – Produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo por município, em toneladas, fonte IpeaData. Elaboração: S.F. Adami.

Segundo dados do Lupa (Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo), a EDR de Araçatuba passou por uma forte alteração nos usos das terras entre os dois períodos de levantamento. Em 1995/1996 a EDR era predominantemente ocupada por pastagens, pois quase 70% da área destinada às atividades agrícolas estavam destinadas aos pastos; com quase 18%, a cultura canavieira era o segundo uso predominante. Mesmo acrescentando-se os 11,4% de cultivos anuais à proporção ocupada pela cana-de-açúcar, as pastagens ainda compunham a principal classe de uso das terras. Culturas perenes e reflorestamento atingiam cerca de 1% da área cada (figura 6.7).

Os dados do segundo levantamento Lupa (2007/2008) descrevem uma situação amplamente diversa. A cultura canavieira na área de estudos atinge quase 50% da área cultivada, enquanto as pastagens reduzem-se para 40,5%. As áreas de culturas anuais diminuem ligeiramente para 8%, enquanto as perenes e reflorestamento flutuam em valores próximos aos do primeiro levantamento, com 0,7% e 1,2% da área cultivada respectivamente (figura 6.7).

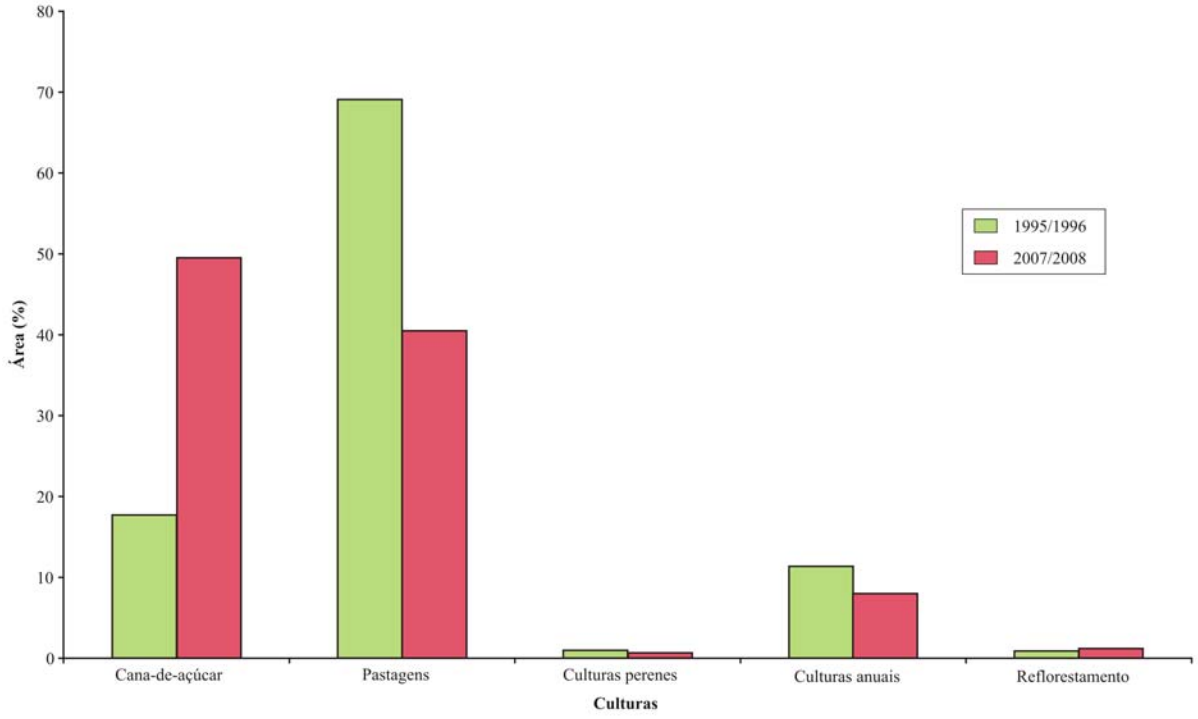

Figura 6.7 – Área ocupada pelos principais usos agrícolas na EDR de Araçatuba, percentual da área cultivada, adaptado de São Paulo, Secretaria de Agricultura e Abastecimento (2008). Elaboração: S.F. Adami.

Nos anos de 1995/1996 a cultura canavieira ocupava menos de 20% da área cultivada na maioria dos municípios da EDR de Araçatuba (figura 6.8a) com exceção de Penápolis, Santópolis do Aguapeí e, principalmente, Avanhandava. Em doze anos, no levantamento de 2007/2008, a situação torna-se contrastante, pois todos os municípios apresentam mais de 20% da área cultivada ocupada pela cultura canavieira (figura 6.8b), e os municípios de Penápolis e Avanhandava mantêm-se como destaques. A faixa grosseiramente NE-SO composta pelos municípios com menor índice de ocupação com cana-de-açúcar (entre 20,1 e 40%) em 2007-2008, corresponde em linhas gerais à faixa considerada viável à expansão da cana-de-açúcar para a produção de etanol, com limitação de deficiência hídrica sazonal, segundo São Paulo, Secretaria de Agricultura (1976).

Entretanto, ao contrário do que ocorre em regiões tradicionalmente ligadas à cultura canavieira, como a de Ribeirão Preto, onde as terras mais adequadas para o cultivo da gramínea estão por ela ocupadas há vários anos, na EDR de Araçatuba ainda existem frações do território com terras ideais ou que demandam poucos investimentos que podem ser facilmente convertidas para a cana-de-açúcar. Sugere-se que a situação difere também do ponto de vista organizacional e competitivo entre as usinas, pois como existem relativamente poucas unidades comparativamente em relação às áreas de produção mais tradicionais, o recobrimento entre seus "territórios potenciais" é pequeno e, assim, os conflitos pela busca de matéria-prima poderiam ser reduzidos.

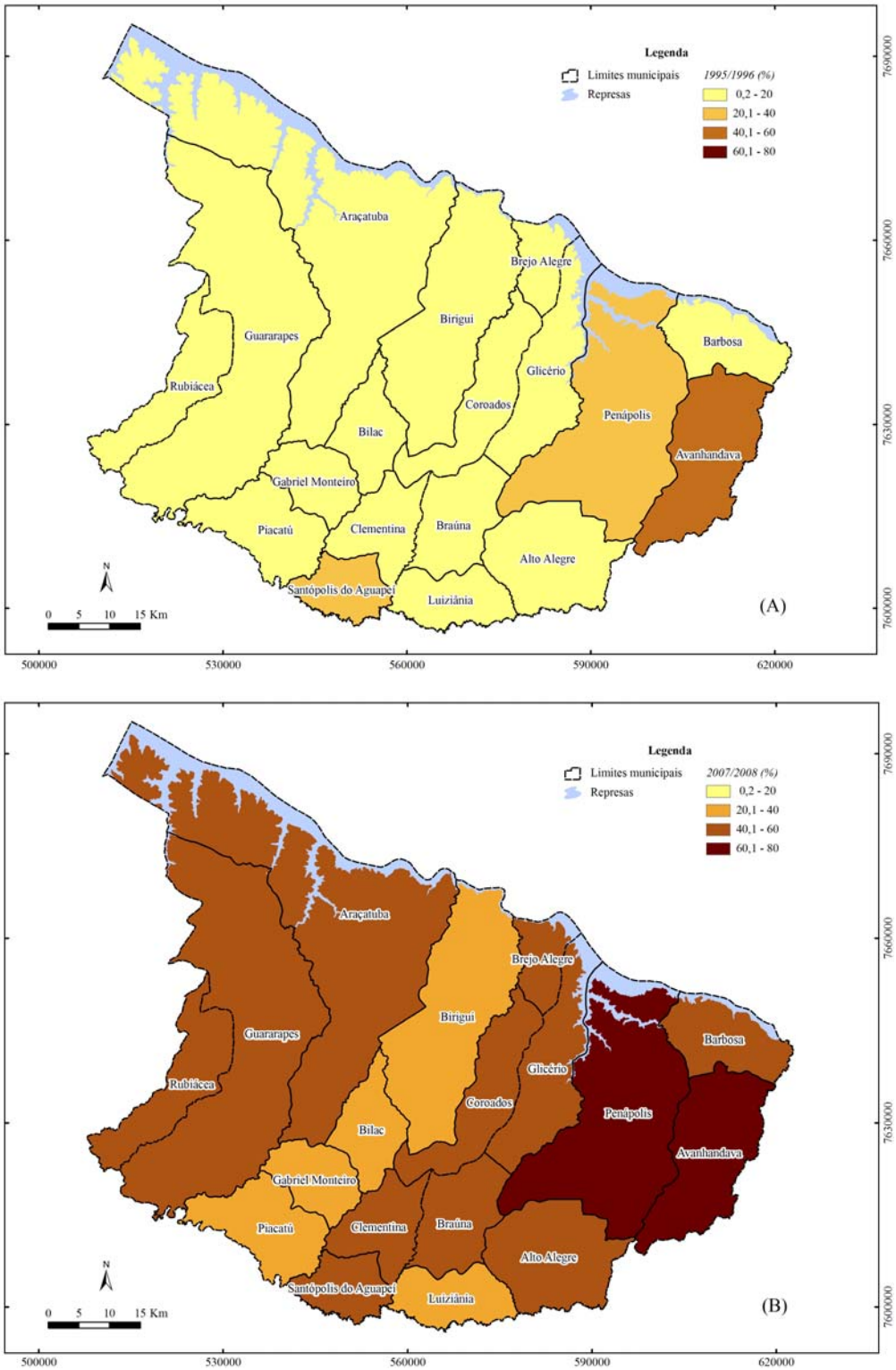

Figura 6.8 – Área ocupada pela cultura canavieira nos municípios da EDR de Araçatuba, (a) 1995/1996, (b) 2007/2008, percentual da área cultivada, adaptado de São Paulo, Secretaria de Agricultura e Abastecimento (2008). Elaboração: S.F. Adami.

6.2. Procedimentos metodológicos

O quadro resultante da dinâmica espacial dos usos das terras pode ser considerado como consequência das muitas decisões e ações humanas individuais que são tomadas em um contexto de competição pela terra. Os atores, ou seja, os tomadores de decisões individuais possuem um conhecimento limitado da realidade e buscam atingir algum grau de satisfação de seus interesses – não necessariamente econômicos – num quadro composto por restrições e possibilidades.

Em uma visão sinóptica, o fluxo de procedimentos iniciou-se pela montagem do banco de dados geoespaciais, seguida pela análise em um módulo de avaliação multicriterial para determinação das áreas consideradas mais adequadas para a implantação da cultura canavieira a partir da opinião de técnicos e de tomadores de decisão ligados às usinas na área de estudos. Os dados foram alimentados para um modelo autômato celular integrado a um SIG. O estudo sobre os períodos da indústria canavieira identificou fases relativamente homogêneas para o desenvolvimento e aplicação do modelo AC. Os resultados do modelo foram comparados com dados de usos das terras gerados por interpretação visual para determinação da acurácia da simulação na predição da estrutura geral do sistema (figura 6.9).

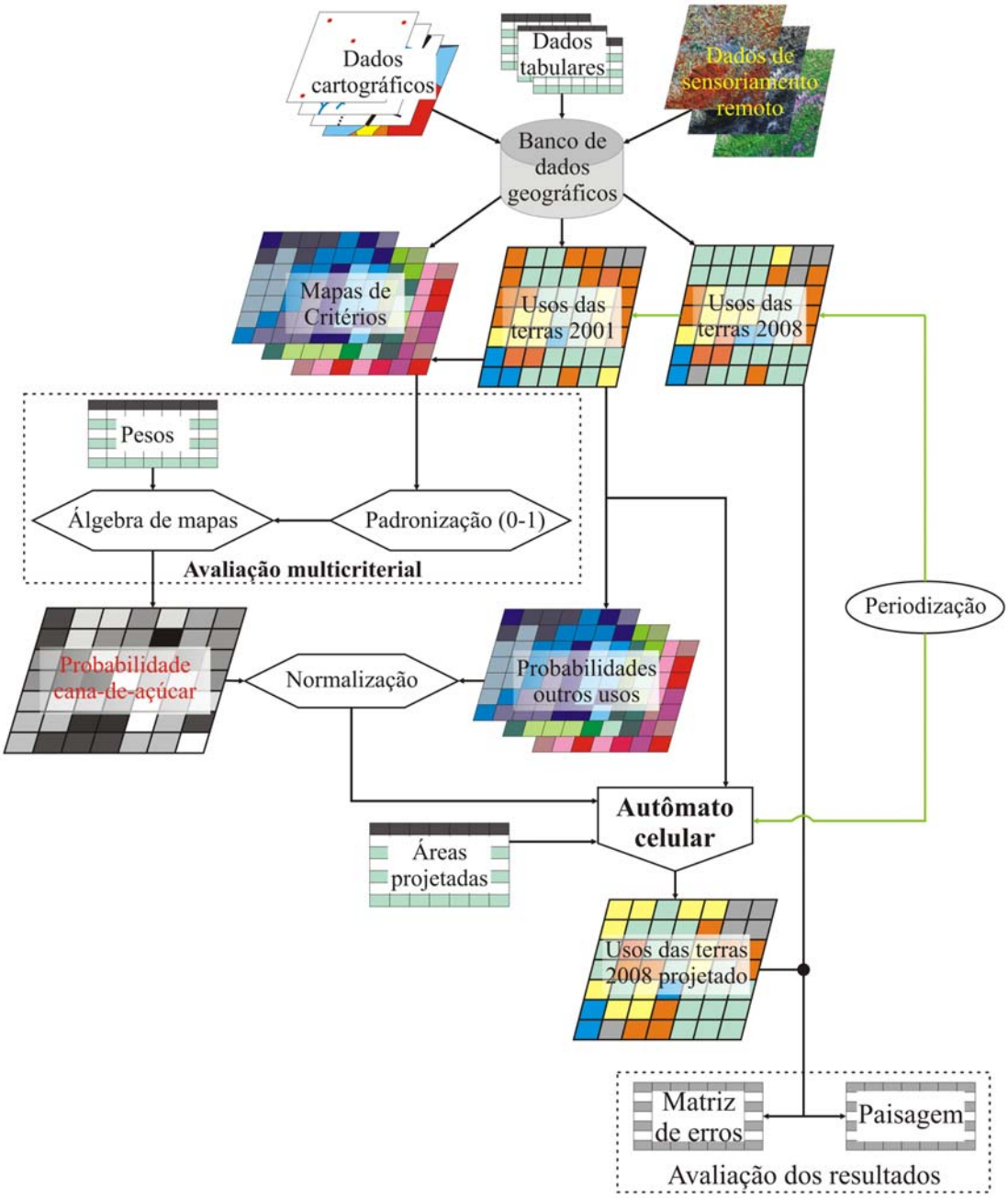

Figura 6.9 – Fluxograma de procedimentos para a efetivação da proposta metodológica.

Elaboração: S.F. Adami.

6.2.1 Banco de dados geoespaciais

A efetivação da proposta metodológica iniciou-se pela seleção dos programas SIG que seriam utilizados e pela montagem e organização de um banco de dados geográficos.

Para a seleção do programa ou conjunto de programas SIG empregados afluiu uma série de possibilidades e, especialmente, restrições. Os sistemas utilizados deveriam apresentar a capacidade de permitir a entrada e a edição de dados, o tratamento de imagens de sensoriamento remoto, e capacidades de análise espacial e de modelagem com autômatos celulares. Por outro lado, a pesquisa ocorreu em uma determinada estrutura institucional que apresenta um leque de escolhas possíveis entre sistemas, além da capacidade limitada do operador de obter conhecimento e familiaridade com alguns pacotes computacionais dentro do período necessário.

Foram utilizados três sistemas de informações geográficas em diversas etapas do processo. O SIG Ilwis (ITC, 1997) foi amplamente empregado nas tarefas de entrada de dados cartográficos, tratamento de dados de sensoriamento remoto, avaliação dos resultados e na aplicação de métodos multicriteriais. Para complementar a entrada de dados e para a apresentação dos resultados finais utilizou-se o ArcGis (ESRI, 2008). O modelo autômato celular foi a demanda específica para a utilização do programa Idrisi (EASTMAN, 2006).

Os planos de informação iniciais foram vetorizados a partir de folhas topográficas escaneadas ou importados em formato digital. Os temas básicos são compostos pela hidrografia (rios e lagos), altimetria (curvas-de-nível e pontos cotados) e vias de circulação. Esses dados foram vetorizados a partir de 17 folhas (figura 6.10) na escala 1:50.000 produzidas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pelo IGG (Instituto Geológico e Geográfico).

A maior parte da vetorização foi empreendida no ArcGis com o módulo ArcScan. As imagens foram georreferenciadas a partir da malha de coordenadas UTM existentes nas folhas topográficas e transformadas para imagens binárias. A partir dessas imagens preto & branco, o operador indica o início da feição a ser vetorizada e o programa segue pela linha até que ocorra o cruzamento com outra feição. Nessa situação o operador deve informar ao programa qual direção prosseguir na vetorização. Algumas folhas passaram por vetorização no Ilwis, o procedimento é mais manual, mas para operadores com pouco treinamento em cartografia, torna-se um método mais confiável, pois se podem utilizar as imagens coloridas e feições são levantadas ponto a ponto.

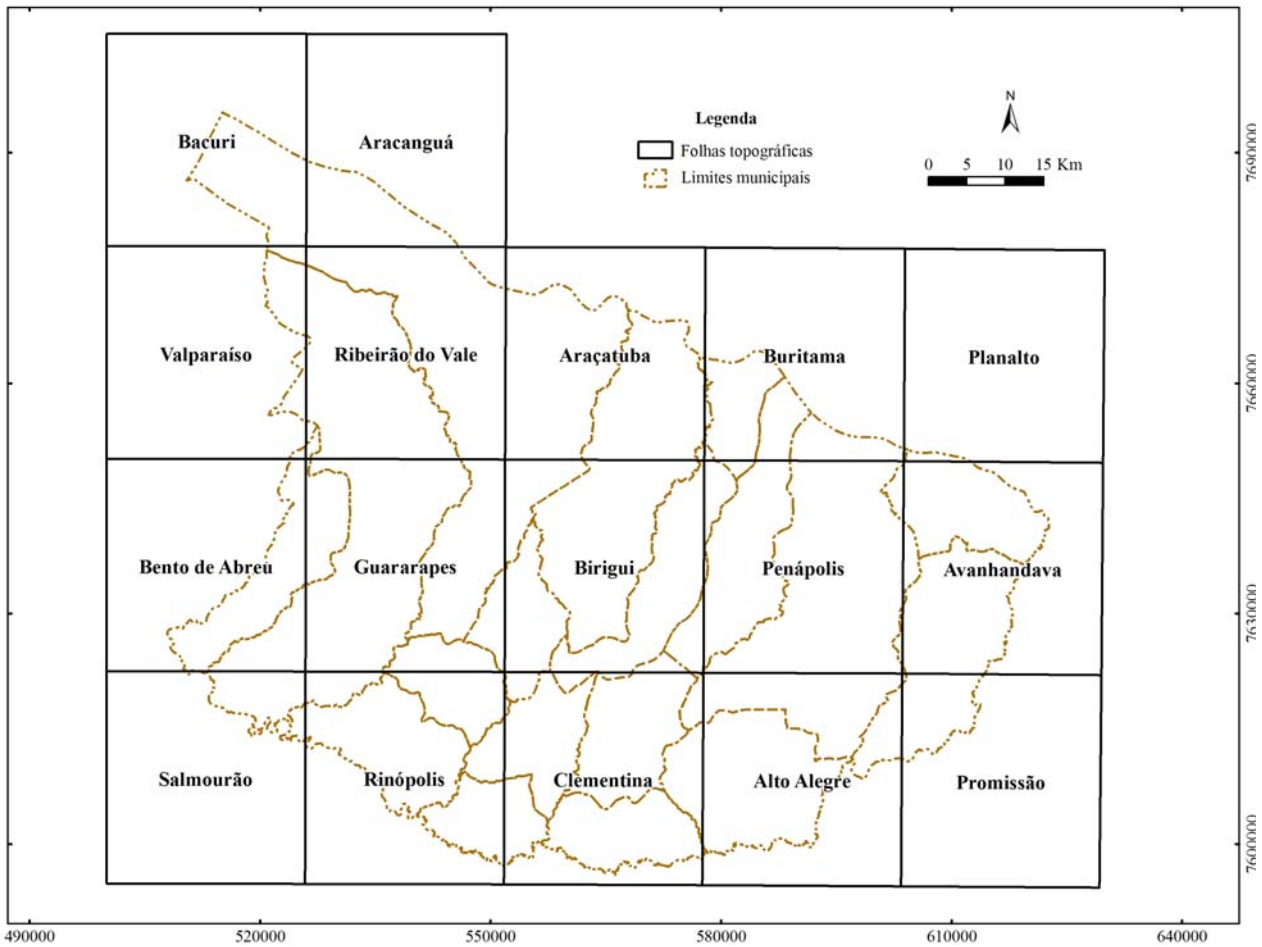

Figura 6.10 – Articulação das folhas topográficas 1:50.000 que compõem a base de dados. Elaboração: S.F. Adami.

Alguns dados temáticos foram obtidos em formato digital, tais como o mapa pedológico do Estado de São Paulo e a malha municipal associada a esse último, ambos na escala 1:500.000 e fornecidos pelo Instituto Agronômico, e o zoneamento agroambiental da Cana-de-Açúcar, fornecido pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo.

A partir da leitura dos períodos da indústria canavieira, identificou-se um período recente em que o apelo ambiental e a difusão de motores bicombustíveis têm formado a base para um novo ciclo de expansão do cultivo de cana-de-açúcar. Esse período inicia-se por volta do início da década de 2000, e por isso selecionou-se como o ano inicial para a modelagem 2001. Em virtude da rápida expansão da cultura-objetivo e da ocorrência da crise econômica em 2009,

na qual o ritmo de crescimento do agronegócio diminuiu, e da incerteza do comportamento do modelo nessa situação, selecionou-se o ano de 2008 para a data final do processo de modelagem.

Desse modo, buscaram-se imagens dos anos de 2001 e 2008 para a área de estudos. Para o ano inicial foram utilizados dados multiespectrais do sensor ETM^+ abordo satélite Landsat 7 datadas de 12 de agosto de 2001 (órbita 222, ponto 75) e de 24 de outubro de 2001 (órbita 221, ponto 75), com resolução espacial de 30 metros. Em relação ao ano final foram utilizados, para o mapeamento de usos das terras, dados do satélite Cbers 2, sensor CCD, datadas de 21 de julho de 2008 (órbita 159, ponto 124), 16 de agosto de 2008 (órbita 159, ponto 123) e 10 de outubro de 2008 (órbita 158, ponto 124), com resolução espacial de 20 metros. Esses dados foram georreferenciados tomando como referência espacial os dados cartográficos de base e tratados para gerar composições coloridas falsa-cor. Essas imagens serviram de base para interpretação visual dos usos das terras para os anos de 2001 e 2008.

Para auxiliar na interpretação dos usos das terras de 2008 utilizaram-se imagens pancromáticas do sensor HRC, satélite Cbers 2, disponíveis para os anos de 2007, 2008 e 2009. A maior resolução espacial desses dados tornou possível identificar facilmente os tipos de uso (figura 6.11); entretanto, o traçado das unidades de mapeamento de usos das terras foi desenvolvido sobre as imagens CCD.

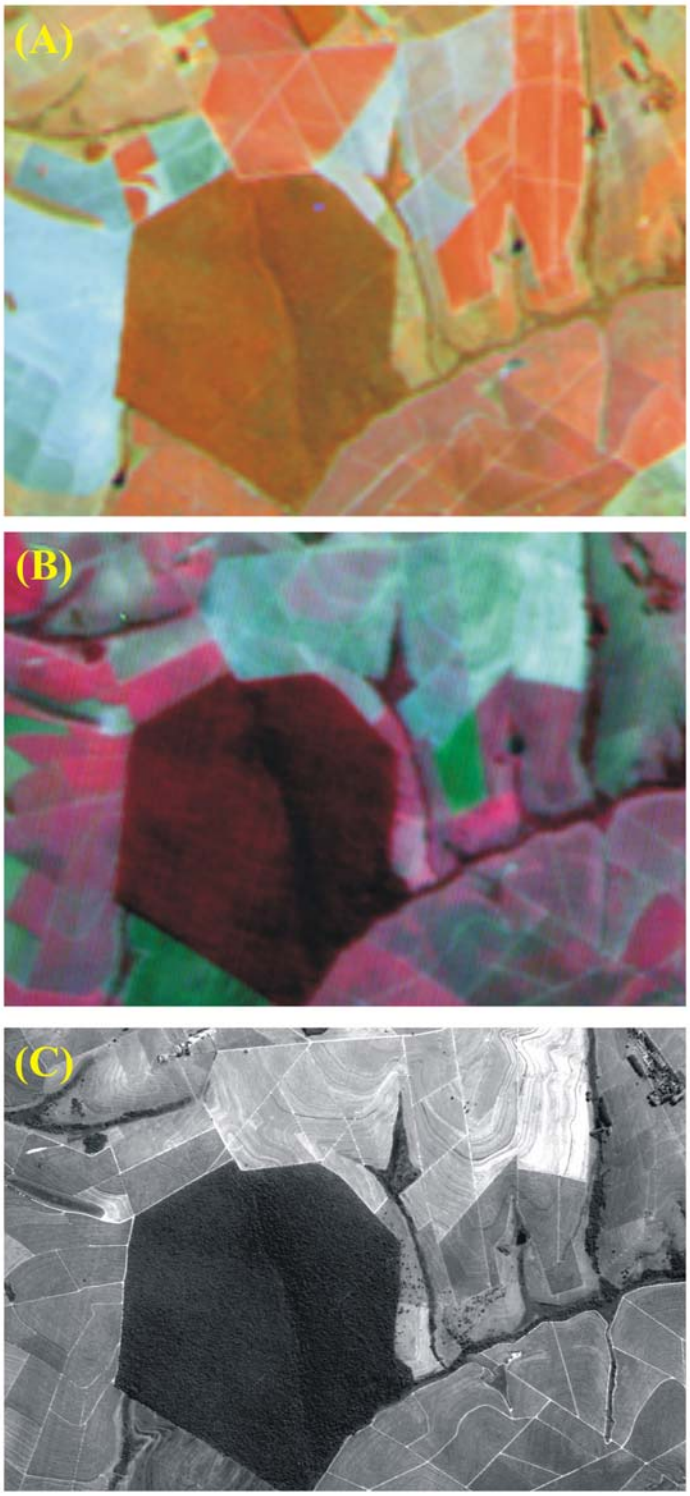

Figura 6.11 – Exemplos das resoluções das imagens, (A) dados ETM em falsa-cor, (B) dados CCD em falsa-cor e (C) dados HRC pancromáticos. Elaboração: S.F. Adami.

Os mapas de usos das terras seguiram uma legenda (tabela 6.1) que identifica as áreas de corpos d'água (água), cidades e outras áreas construídas (áreas urbanizadas), áreas de matas em diversos estágios e reflorestamentos (formações arbóreas), plantios de cana-de-açúcar e áreas correlatas (cana-de-açúcar), cultivos arbóreos (culturas perenes), cultivos baixos ou hortícolas (culturas anuais), e áreas de pastagens (pastos).

Tabela 6.1 – Legenda dos mapas de usos das terras.

Classe	***Descrição***
Água	Lagos, reservatórios para geração de energia e açudes.
Áreas urbanizadas	Cidades, loteamentos residenciais e áreas de expansão urbana.
Cana-de-açúcar	Áreas de plantio de cana nos diversos estágios de manejo.
Culturas anuais	Olericultura e demais cultivos de ciclo curto.
Culturas perenes	Pomares, cafezais e outras culturas de porte arbóreo.
Formações arbóreas	Remanescentes de vegetação nativa, estágios diversos de regeneração, reflorestamento com espécies nativas ou exóticas.
Pastos	Pastagens plantadas em diversos estágios de conservação.

Classes como água e áreas urbanas são facilmente interpretadas nas imagens devido a suas cores e padrões espaciais característicos. Formações arbóreas quando analisadas em composições coloridas falsa-cor apresentam tons de vermelho especialmente destacado, facilitando sua identificação. Na área de estudos as culturas anuais normalmente apresentam-se em áreas pequenas e relativamente próximas de centros urbanos, além de um conjunto de cores em um padrão alternado rapidamente. Culturas perenes apresentam cores semelhantes às das formações arbóreas, mas o padrão espacial é mais geométrico permitindo sua identificação.

O maior desafio foi a identificação e a separação de áreas de pastagens e de cana-de-açúcar entre si, pois as texturas são muito semelhantes entre esses usos. Entretanto, o padrão de ocupação da cultura canavieira apresenta-se mais organizado, com talhões e carreadores estruturados e, muitas vezes, hierarquicamente interligados, enquanto nas áreas de pastagens são escassos os caminhos maior largura e ocorrem elementos como curais e caixas de sal espalhadas pelo campo. A aparência das manchas é diferente, pois as pastagens são mais homogêneas e as

áreas de cana de açúcar apresentam diferenças entre talhões devido às diversas épocas de plantio e manejo das diferentes variedades.

Sobre a base de dados foi empregado um conjunto de operações espaciais para derivar os dados utilizados no módulo de análise multicriterial, desenvolvidas no Ilwis. Essas operações envolviam, entre outras, a transformação entre modelos de dados (vetoriais para matriciais), seleção de células a partir de seus atributos, reclassificação, cálculos de superfícies de distância a partir de alguns elementos do espaço, interpolação dos dados altimétricos e derivação da declividade do terreno.

Alguns dados, como os usos das terras, foram originalmente gerados no formato vetorial, mas necessitaram ser transformados para o formato matricial, pois as análises espaciais no Ilwis ocorrem predominantemente com grades. Para a normalização de valores nos diversos PIs procedeu-se a reclassificação de valores. Algumas variáveis são relativas a proximidade ou distanciamento de feições espaciais e demandaram a criação de superfícies de distância.

6.2.2 Análise multicriterial

Um elemento chave da proposta metodológica é a incorporação do conhecimento e das preferências dos profissionais ligados à agroindústria canavieira e dos especialistas em algumas áreas do conhecimento que têm relação com a agricultura, meio ambiente e planejamento espacial. Dessa maneira, buscou-se controlar a seleção de áreas para a implantação ou manutenção pelo modelo autômato celular e tornar os resultados mais próximos da realidade da área de estudos.

Como o objetivo é identificar e simular as decisões e o comportamento dos tomadores de decisão das usinas na área de estudos, seria ideal que apenas profissionais diretamente ligados às unidades da EDR de Araçatuba tivessem suas opiniões avaliadas. Se, por um lado, essa abordagem diminuiria a aplicabilidade do modelo especificado em outras situações, por outro possivelmente tornaria os resultados mais precisos.

A aplicação da proposta metodológica em outras regiões dependeria do levantamento das opiniões dos profissionais das usinas dessa outra área. Existe uma ampla gama de situações diferentes em diversos enquadramentos territoriais, pois em áreas como a EDR de Araçatuba, por exemplo, são poucas as usinas instaladas e a concorrência por matéria-prima (cana-de-açúcar)

entre as unidades industriais é relativamente pequena. Isso torna a relação entre fornecedores e usinas amplamente desbalanceada a favor dessas últimas. No outro extremo do espectro, como na região de Ribeirão Preto, o número de unidades instaladas é alto, impondo forte concorrência pela matéria-prima e diferentes graus nas relações entre fornecedores e usinas. Esses diferentes quadros podem resultar em estratégias e opções diferentes entre as unidades industriais, reforçando a necessidade do levantamento das preferências específicas para cada enquadramento territorial.

Entretanto, a coleta das preferências dos responsáveis pelas usinas mostrou-se insuficiente. Mesmo após o contato com a Udop (União dos Produtores de Bioenergia), apenas duas das oito usinas existentes na área de estudos respondeu a carta que solicitava a avaliação das variáveis. Desse modo, buscou-se a opinião de especialistas em algumas áreas de conhecimento que pudessem complementar as opiniões das usinas. As áreas de especialização dos profissionais estendem-se desde a economia agrícola, geoprocessamento, irrigação e recursos hídricos, geografia rural, pedologia, climatologia, e conservação do solo.

Aos respondentes foi solicitada a avaliação de pesos e notas para um conjunto de critérios considerados importantes para a seleção de áreas de plantio de cana-de-açúcar na EDR de Araçatuba. Essa consideração locacional é sobrelevada, pois os pesos atribuídos aos critérios podem variar conforme a configuração espacial do enquadramento territorial sendo avaliado. Em algumas áreas a importância atribuída à declividade ou ao tipo de solo pode ser maior do que aquela concedida à distância da usina ou zoneamento agroambiental, por exemplo. Os critérios ligados as variáveis climáticas não foram considerados na análise, pois a totalidade do território da EDR de Araçatuba encontra-se em condições ótimas para a produção de cana-de-açúcar. Assim, o papel do clima na seleção de áreas de plantio provavelmente seria menor do que aquele desempenhado por outras variáveis. Outra variável não incorporada na análise refere-se aos diversos tipos de variedades de cana-de-açúcar disponíveis, pois se partiu da premissa de que uma vez selecionada a área para plantio, as variedades mais adequadas seriam empregadas.

Cada especialista ou gestor atribuiu uma nota de 0 a 10 para cada um dos quinze critérios (tabela 6.2). O conjunto de critérios buscou ser o mais abrangente possível e incorporar elementos ligados ao ambiente agrícola e às condições de produção, além de variáveis legais e econômicas. Não obstante, a lista de critérios foi estruturada apenas para uma gama relativamente estreita de escalas espaciais, não considerando critérios que podem relevantes em escalas maiores

e próximas do terreno, ou mesmo variáveis que operam em escalas menores. A relação que se busca esclarecer com esse conjunto de critérios ocorre entre as áreas de plantio e a unidade de processamento da cana-de-açúcar. A busca de locais para a instalação das próprias usinas não é investigada e a localização das unidades de processamento foi tomada como fixa. Isso não impede que sejam adicionados no modelo empreendimentos novos ou em projeto para simular a espacialização da cana-de-açúcar.

Tabela 6.2 – Critérios de decisão.

Nº	***Critérios***
1	Classes de solos.
2	Usos atuais das terras.
3	Proximidade da usina.
4	Proximidade da malha viária.
5	Declividade do terreno.
6	Zoneamento agroambiental.
7	Proximidade de unidades de conservação.
8	Proximidade de centros urbanos.
9	Proximidade de corpos d'água.
10	Áreas de Preservação Permanente (APP).
11	Custo da terra.
12	Custo da mão-de-obra.
13	Nível de treinamento da mão-de-obra.
14	Disponibilidade de mão-de-obra.
15	Nível de desenvolvimento do município.

Todos os critérios foram normalizados em valores na faixa entre zero e um (0-1) para apresentarem a mesma amplitude de variação. Diversos critérios demandam diferentes estratégias de normalização (figura 6.12), selecionadas de acordo com o tipo de dado geoespacial e segundo a importância que a variação do critério apresenta para a seleção de áreas.

Variáveis qualitativas, normalmente implantadas como polígonos, tais como classes de solos ou de usos das terras, foram reclassificadas a partir da atribuição de valores entre zero (menos adequadas à implantação de cana-de-açúcar) e um (mais adequadas). Os valores intermediários foram atribuídos proporcionalmente ao número de classes.

Algumas variáveis quantitativas com implantação poligonal, tais como custo da terra e nível de desenvolvimento municipal, foram normalizadas empregando o aumento linear de contraste, normalmente utilizado em processamentos de imagens de sensoriamento remoto. Nesse procedimento, ao menor valor é atribuído um novo valor zero e o maior valor recebe o valor um, e os valores intermediários são redistribuídos conforme a variação original dos dados. Algumas variáveis podem ser invertidas (negativadas) quando valores menores sejam mais adequados ao objetivo de selecionar áreas para plantio da *Saccharum officinarum*.

Para a normalização das superfícies com valores contínuos, como declividade e distâncias, utilizou-se do aumento linear de contraste e, nos casos onde valores menores eram mais adequados, as grades foram invertidas multiplicando-as por -1 anteriormente ao aumento de contraste. Na área de estudos e para as variáveis selecionadas não ocorreram situações em que houve um limiar, além do qual a variável seria considera ótima ou péssima independentemente de sua variação, por exemplo, declividades acima de 16% não viáveis para a mecanização agrícola. Nesses casos, o aumento de contraste seria executado apenas ao longo da gama de valores considerados úteis, e níveis acima ou abaixo dos limiares receberiam valores máximos ou mínimos.

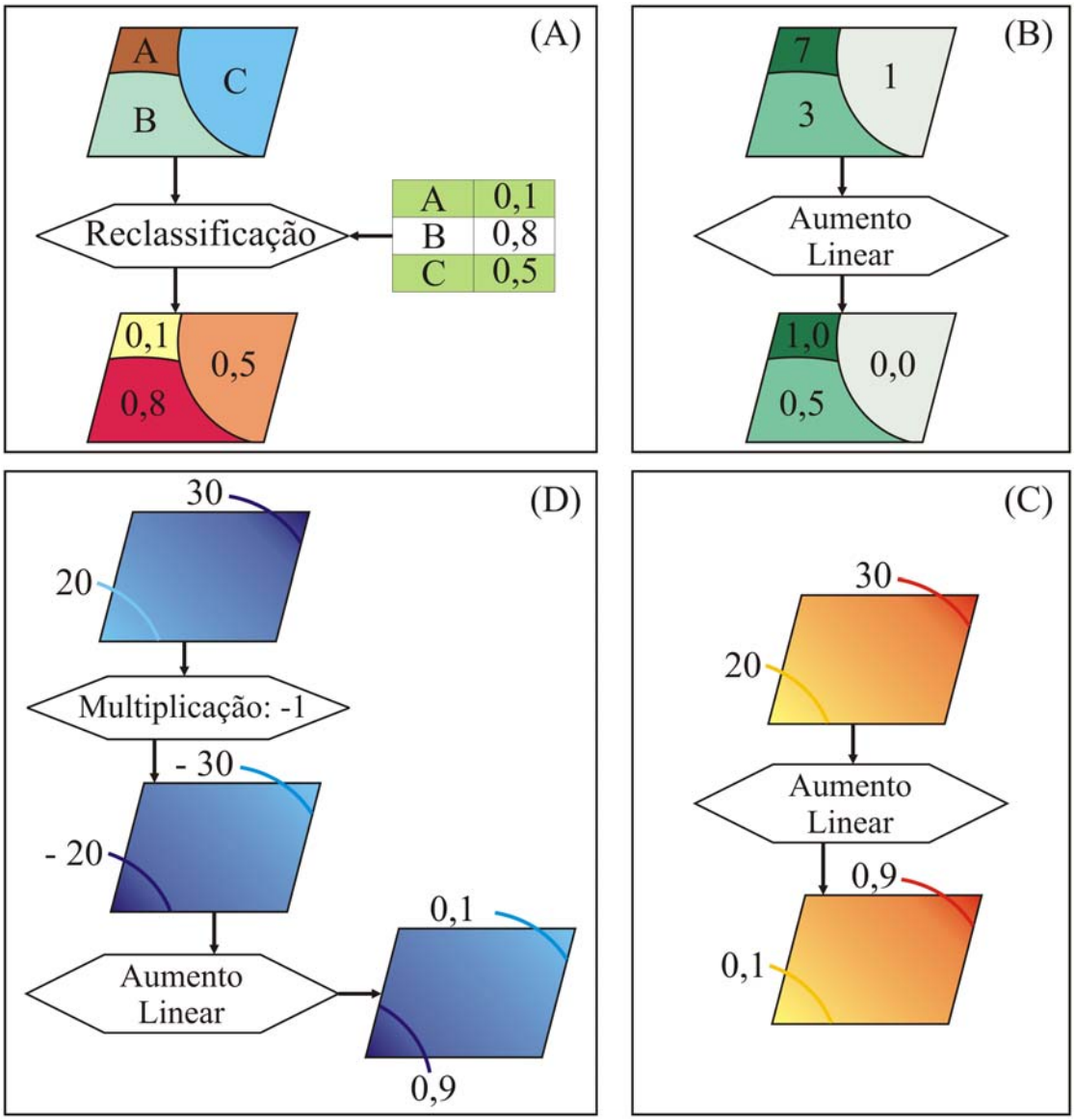

Figura 6.12 – Estratégias de normalização dos critérios, (A) reclassificação de polígonos com variáveis qualitativas, (B) aumento linear de contraste em polígonos com variáveis quantitativas, (C) aumento linear de contraste em superfícies, e (D) aumento linear invertido de contraste em superfícies. Elaboração: S.F. Adami.

As **classes de solos** (figura 6.3) compõem um dos principais elementos do ambiente e, em especial, quando se considera o meio rural e a produção agrícola. Diferentes atributos pedológicos, tanto físicos como químicos, representam limitações ou potencialidades para as culturas. Muitas vezes, atributos pedológicos adequados para determinada espécie vegetal podem ser desfavoráveis a outras. Para a cana-de-açúcar, desse modo, foram desenvolvidas

classificações de ambientes de produção a partir das características dos solos. Uma dessas classificações (PRADO et al., 2008) serviu de base para a reclassificação e normalização do critério classes de solos (tabela 6.3).

Tabela 6.3 – Classes de solos, ambientes de produção e valores normalizados.

Classes de solos	*Ambientes de produção*	*Valores normalizados*
PVA 2	A1	1,0
GX 2	A1	1,0
PVA 1	A2	0,75
GX 1	A2	0,75
LV 3	B1	0,5
LV 1	C1	0,25
LV 4	C1	0,25
LV 2	C2	0,0

Atributos físicos, como textura dos horizontes A e B, profundidade e presença de plintita e características químicas do horizonte subsuperficial, determinam a disponibilidade de água para a cultura e a fertilidade natural do solo. Solos com boa disponibilidade de água e grande fertilidade são mais adequados à cultura canavieira e são classificados nos ambientes de produção melhores (A1 e A2). À medida que as características tornam-se menos favoráveis, isto resulta em ambientes inferiores, menos produtivos e que demandam maior aporte de insumos (E1 e E2), mas na área de estudos os piores ambientes enquadram-se nas classes C1 e C2.

Nos levantamentos pedológicos realizados para as usinas esses procedimentos de reclassificação são realizados a partir das descrições de campo e dos resultados de análises laboratoriais; entretanto, no presente estudo havia disponível apenas a legenda do mapa de solos com a descrição das unidades de mapeamento e a partir desse conjunto de informações buscou-se enquadrar os solos em ambientes de produção. A necessidade de levantamentos pedológicos sistemáticos e a ampla disponibilização de seus resultados é uma demanda importante e uma forte restrição na construção de modelos ambientais.

A **declividade do terreno** apresenta grande importância para a organização do espaço rural, pois, quanto maior a inclinação das vertentes, maior o risco de erosão do solo e práticas conservacionistas mais elaboradas são demandadas, e valores acima de 16% impedem a utilização de mecanização agrícola. Na EDR de Araçatuba (figura 6.13), predominam vertentes com declividades inferiores a 4%; nas bacias que drenam para o rio Tietê o modelado é ainda mais suave com amplas áreas abaixo de 2%, e em nenhuma situação a inclinação é superior a 14%. Essas características permitem a ampla utilização de mecanização, mas o comprimento relativamente elevado das vertentes demanda práticas de conservação mais intensivas para diminuir o risco de erosão. A estratégia de normalização dessa variável demandou a inversão dos valores de declividade, pois menores inclinações são mais adequadas e receberam valores normalizados maiores.

Os usos atuais das terras (figura 7.1) são importantes na seleção de áreas para o plantio de cana-de-açúcar, pois em alguns tipos de usos se exclui a sua conversão para áreas agrícolas, como represas e áreas urbanas. Mesmo usos rurais apresentam suscetibilidades diversas para sua transformação em plantios de cana-de-açúcar.

Desse modo, as pastagens e culturas anuais seriam mais facilmente suprimidas e suas áreas ocupadas pela cultura canavieira, do que culturas perenes e reflorestamentos ou áreas de regeneração de vegetação nativa, que demandariam mais operações de mecanização agrícola antes da implantação da gramínea açucareira (tabela 6.4).

As classes de usos <u>atuais</u> das terras são derivadas do <u>mapa inicial</u> no processo de modelagem por autômatos celulares, na presente pesquisa sendo 2001.

Tabela 6.4 – Classes de usos das terras e valores normalizados.

Classes de usos das terras	*Valores normalizados*
Água	0,0
Áreas urbanizadas	0,0
Formações arbóreas	0,2
Culturas perenes	0,4
Culturas anuais	0,6
Pastos	0,8
Cana-de-açúcar	1,0

O conjunto de critérios de distância é composto por dois subgrupos. O primeiro classifica as áreas mais **próximas das usinas** e da malha viária (figura 6.14) como mais adequadas para plantio de cana-de-açúcar. O aumento linear invertido de contraste foi a estratégia adotada para a normalização dos valores nesses planos de informação.

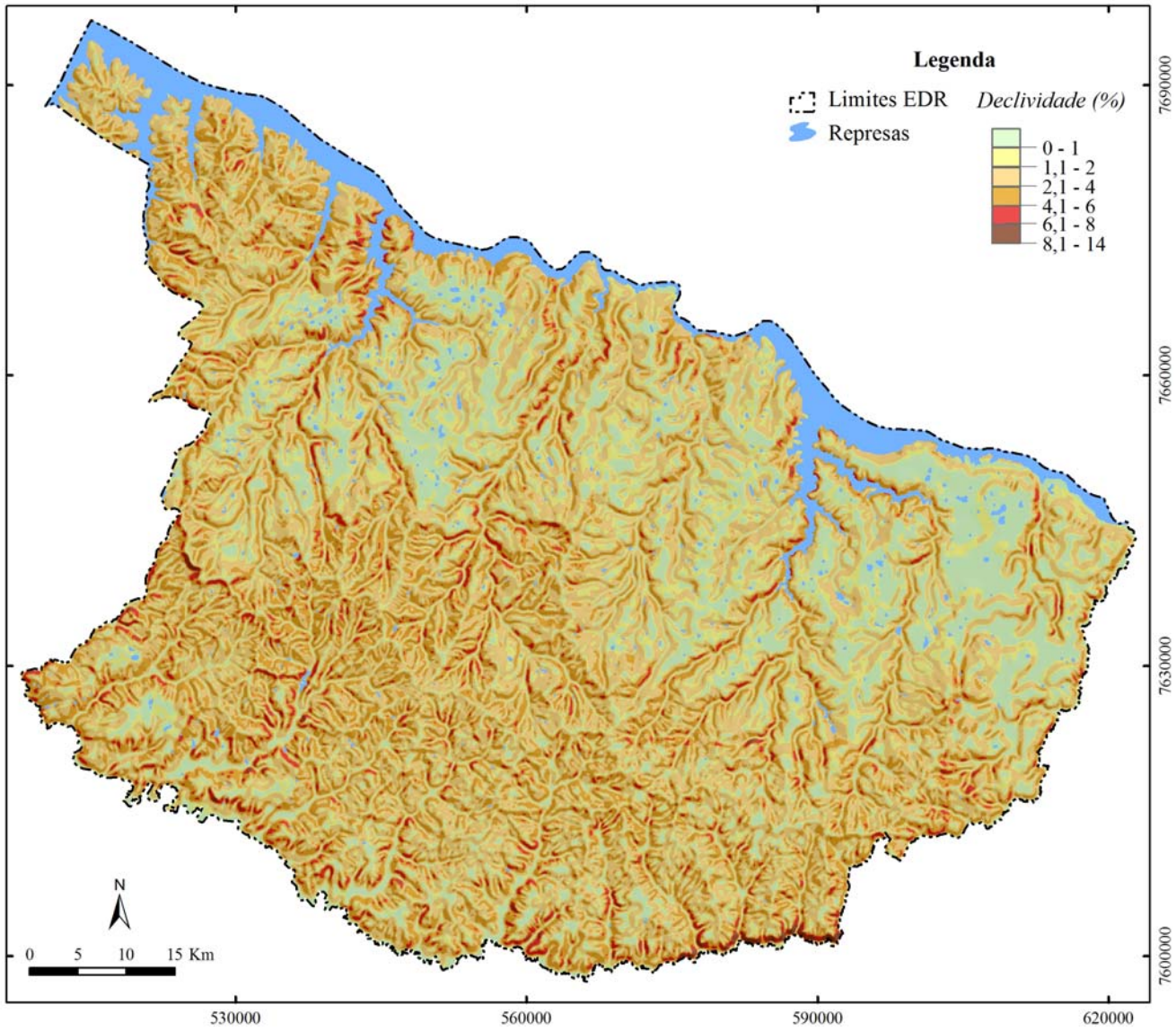

Figura 6.13 – Carta de declividades da EDR de Araçatuba. Elaboração: S.F. Adami.

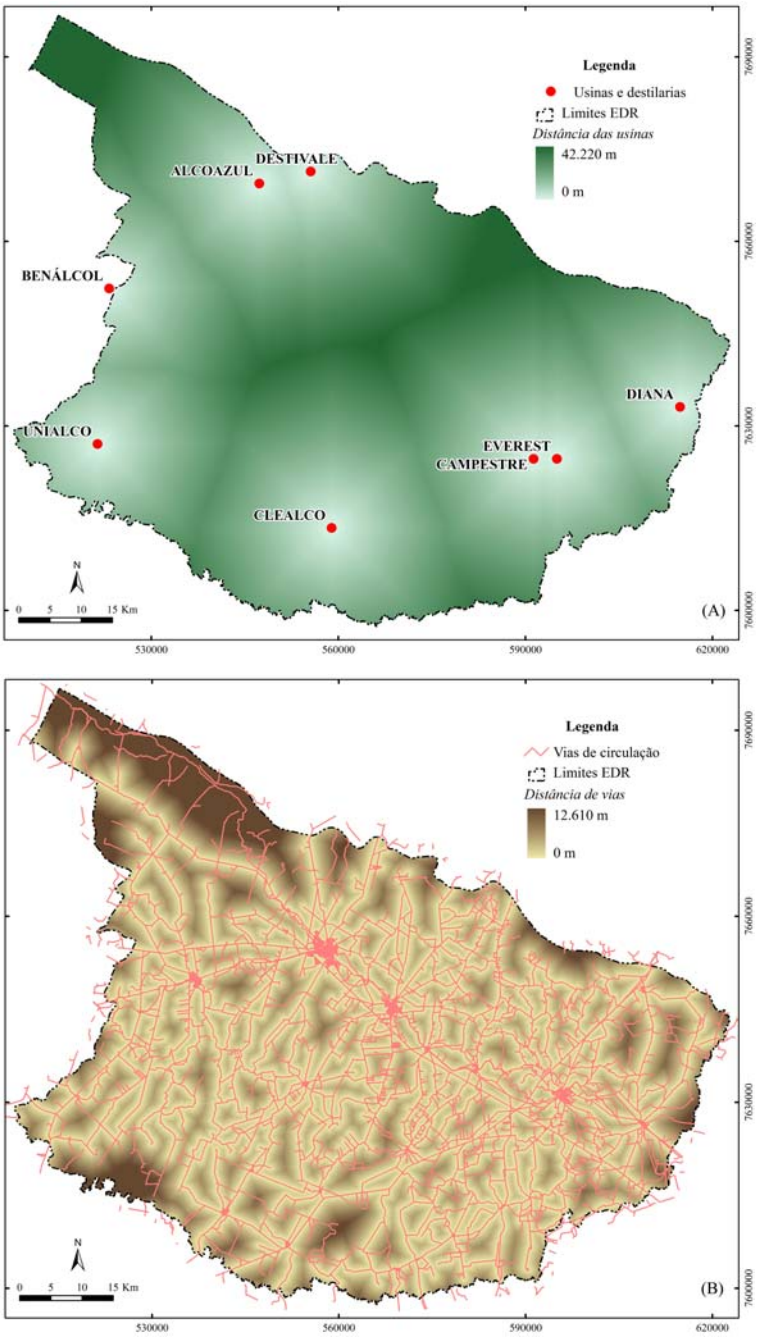

Figura 6.14 – Critérios de proximidade: (A) usinas, (B) malha viária. Elaboração: S.F. Adami.

A proximidade de unidades de conservação não pôde ser implementada em sua formulação original, pois não foi obtido o mapa de unidades de conservação do estado. Desse modo, utilizou-se um substituto que foram as áreas de formações arbóreas do mapa de uso das terras de 2001 (figura 6.15). Essa opção pode ter superestimado as áreas de matas e tornado as distâncias menores do que seriam na realidade. Nesse critério estariam incorporadas as

preocupações das unidades de produção em relação à proteção de fragmentos e remanescentes de vegetação nativa. Essa preocupação é amplamente colocada em debates sobre a viabilidade ambiental da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

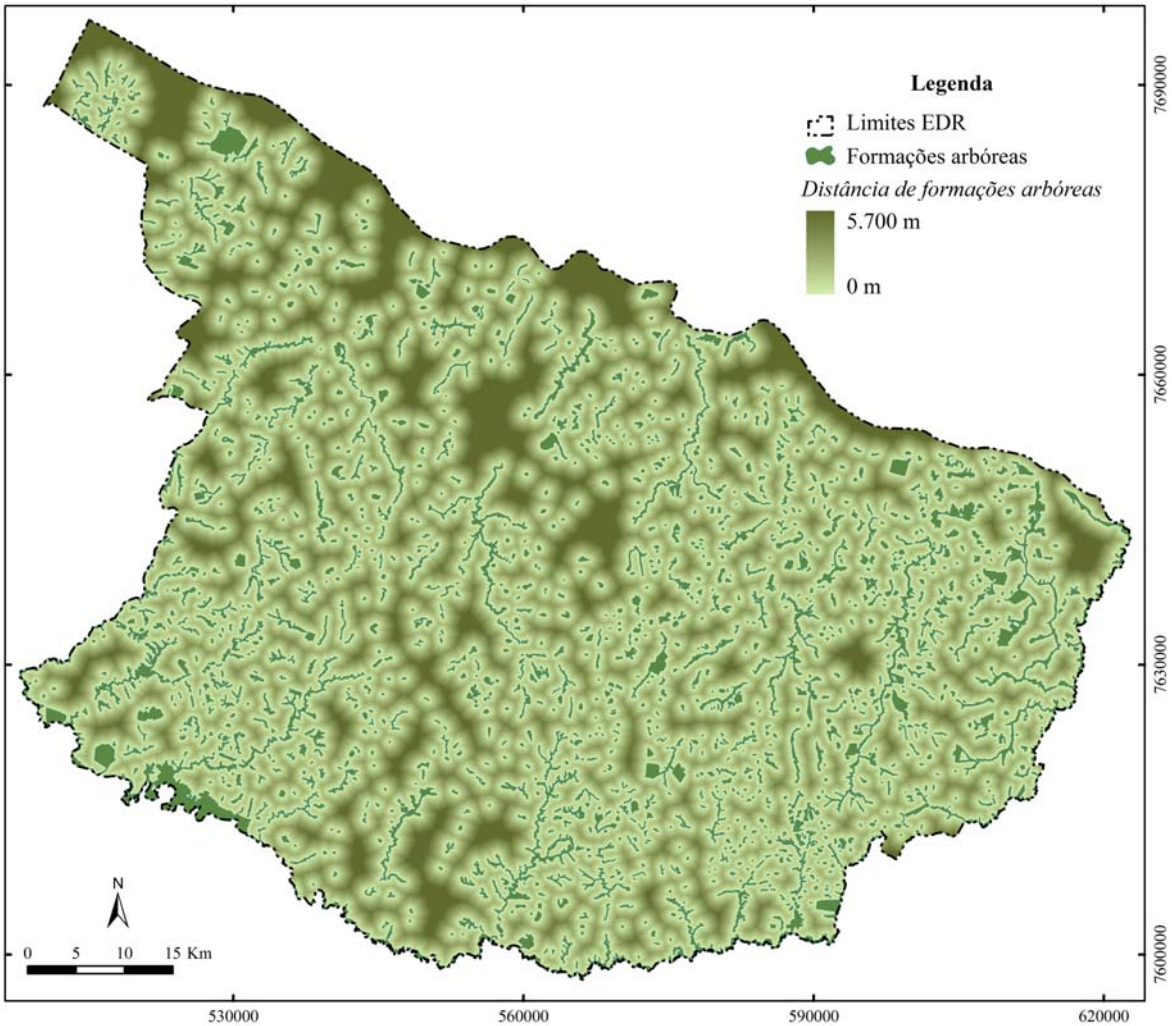

Figura 6.15 – Proximidade de formações arbóreas. Elaboração: S.F. Adami.

O critério de proximidade de áreas urbanas (figura 6.16 A) destaca-se duplamente, primeiro pela busca da imagem de produção ambientalmente equilibrada. Assim, a maior proximidade de centros urbanos poderia resultar na redução na qualidade ambiental urbana, em especial em face da queima para a colheita da cana e a poluição atmosférica resultante; e, segundo, em face dos preços das terras serem mais elevados nos arredores de áreas urbanizadas.

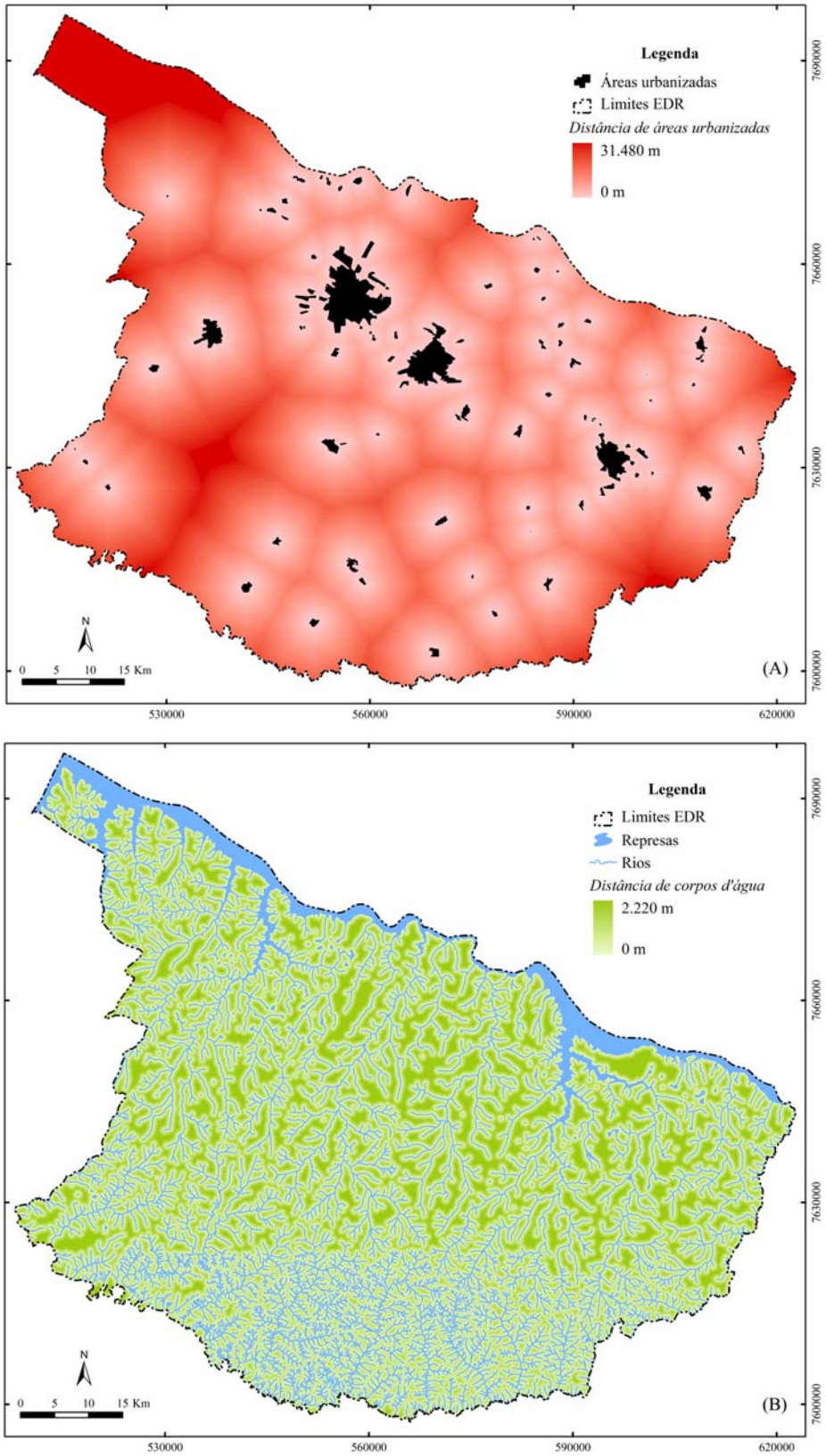

Figura 6.16 – Proximidade: (A) centros urbanos, (B) corpos d'água. Elaboração: S.F. Adami.

Áreas mais distantes em relação aos corpos d'água (figura 6.16 B) seriam mais adequadas porque evitariam a poluição dos recursos hídricos, ainda em face da busca de um rótulo de produção limpa. Por outro lado, esse critério poderia apresentar outra leitura, pois áreas mais próximas aos corpos d'água demandariam menores investimentos com equipamentos de irrigação. Essa última faceta foi preterida em relação à consideração da busca de uma imagem de combustível "verde" para o etanol e de certificações ambientais por parte das usinas, mais adequadamente representada pela forma como o critério foi implementado.

Os critérios **Áreas de Preservação Permanente** (APP) e **zoneamento agroambiental** representam duas restrições políticas sobre usos das terras em geral e a agroindústria sucroenergética especificamente.

As áreas de preservação permanente estabelecem que ao longo de cursos d'água com até 10 metros de largura e lagos deve ser protegida uma faixa com 30 metros medida a partir do leito maior e que ao redor de nascentes a preservação deve atingir um raio de 50 metros (figura 6.17). A ocupação dessas áreas deve ser voltada à preservação e recuperação da vegetação nativa. A normalização desse critério buscou direcionar a implantação da cana-de-açúcar para áreas não estabelecidas como APP, mas ainda assim conceder a essas áreas uma baixa viabilidade à ocupação. Desse modo, as áreas de APP receberam baixo valor (0,1) enquanto as outras áreas valores máximos (1,0). Esse critério poderá ser drasticamente alterado ou mesmo completamente invalidado a partir da atual discussão e reforma do Código Florestal.

Na figura 6.17 pode ser observado um dos maiores problemas nos procedimentos de modelagem espacial, pois dados de órgãos oficiais de mapeamento diferentes apresentam graus diversos de resolução da informação, no caso hidrografia com uma maior densidade ao sul e ao longo da ligação entre os mapas do IBGE e do IGC. O impacto dessas variações sobre os resultados do modelo não foi analisado, mas seu efeito provavelmente fez-se presente.

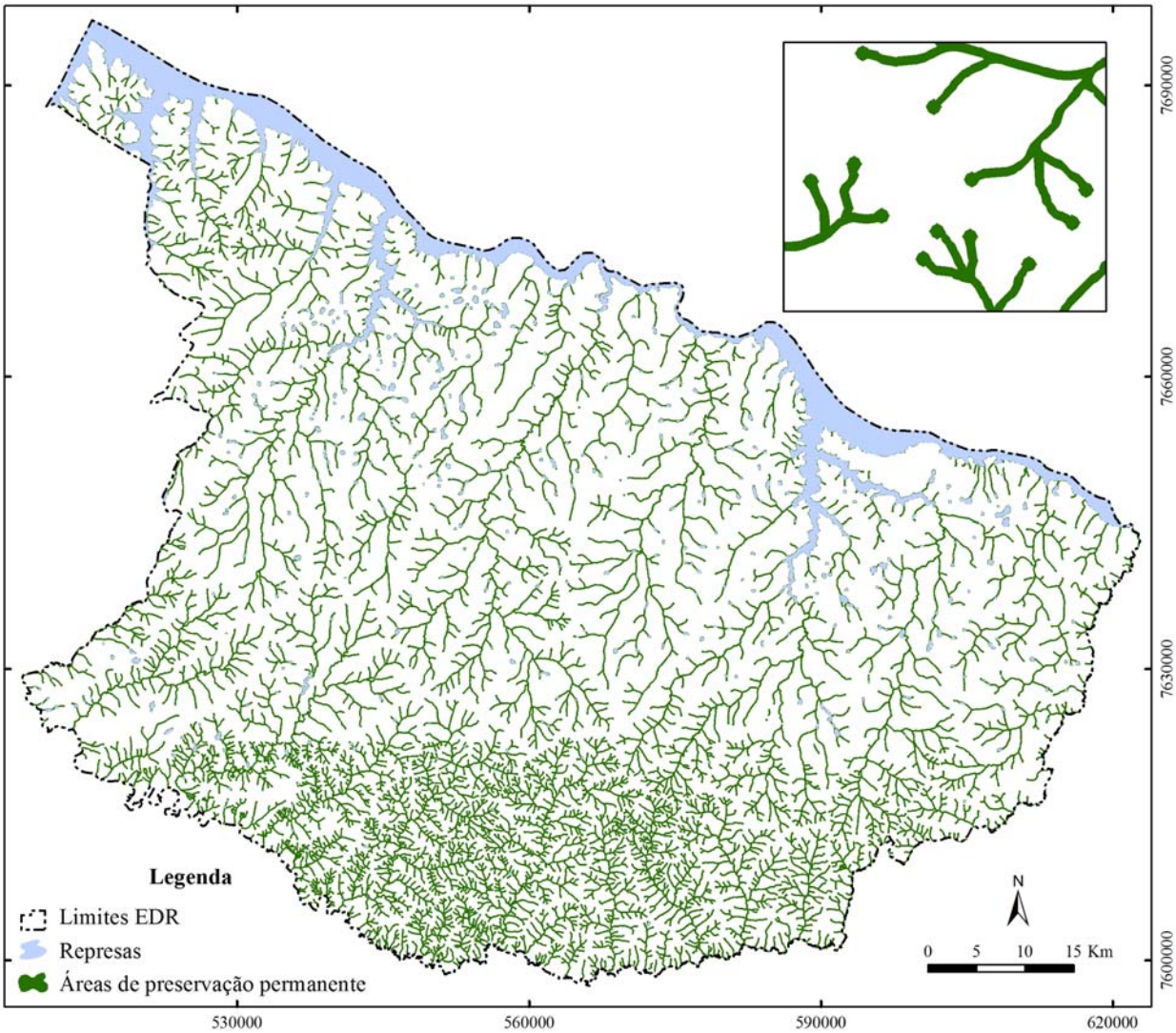

Figura 6.17 – Áreas de preservação permanente. Adaptação: S.F. Adami.

O zoneamento agroambiental (figura 6.18) é uma ferramenta jurídica empregada pela Secretaria de Meio Ambiente para regular o setor canavieiro no Estado de São Paulo, e é empregado para gerenciar as autorizações de queima da cana ou implantações de novas unidades, tal como na Resolução SMA nº 88/2008.

Este critério foi incorporado com esse enfoque legal à análise multicriterial, mesmo que do ponto de vista técnico exista alguma sobreposição com os critérios de classes de solos e de declividade. A normalização dos valores seguiu os critérios da tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Classes do zoneamento agroambiental e valores normalizados.

Classes	*Valores normalizados*
Inadequado	0,1
Adequado - restrições	0,6
Adequado - limitações	1,0

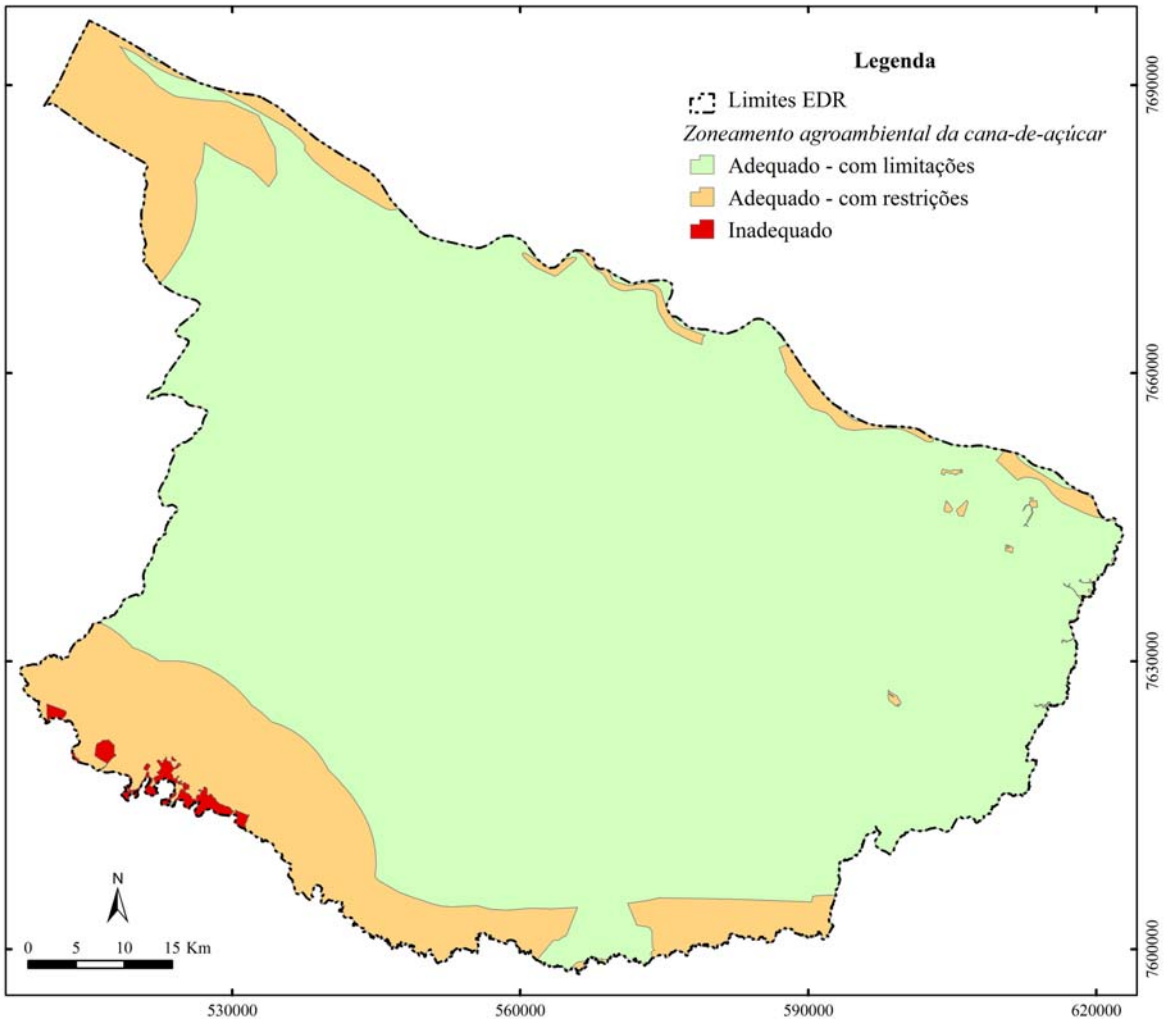

Figura 6.18 – Zoneamento agroambiental da cultura canavieira. Adaptação: S.F. Adami.

Os critérios socioeconômicos empregados foram derivados de estatísticas municipais geradas pelo Censo Agropecuário 2006 do IBGE e pela Fundação Seade (tabela 6.6).

Tabela 6.6 – Custo da terra, custo e porcentagem de mão-de-obra treinada e disponibilidade e IDH.

Município	***Terra ****	***CustoMO ****	***TreinaMO*****	***DispoMO******	***IDH***
Alto Alegre	439.683	11.082	2,1	34,8	0,774
Araçatuba	1.092.548	19.752	5,7	6,8	0,848
Avanhandava	1.102.562	39.688	0,6	36,1	0,768
Barbosa	3.129.734	17.120	1,3	12,6	0,746
Bilac	466.557	11.739	2,4	13,5	0,809
Birigui	680.232	13.947	9,9	2,8	0,829
Braúna	515.402	31.105	0,8	80,6	0,796
Brejo Alegre	786.636	16.879	3,6	9,9	0,748
Clementina	748.259	32.710	3,3	7,7	0,792
Coroados	738.550	13.313	12,0	33,1	0,802
Gabriel Monteiro	760.890	15.424	0,0	10,4	0,768
Glicério	830.287	17.843	1,3	34,6	0,761
Guararapes	1.738.821	21.115	33,9	41,1	0,802
Luiziânia	424.162	16.072	1,8	35,7	0,762
Penápolis	754.607	19.846	3,3	8,2	0,810
Piacatú	642.037	13.239	2,8	23,8	0,757
Rubiácea	1.309.422	23.624	23,7	54,4	0,781
Santópolis do Aguapeí	1.715.892	19.526	0,0	25,3	0,774

Observações: * valor médio anual por estabelecimento (R$), ** % da mão-de-obra (MO) com treinamento técnico, *** % dos vínculos empregatícios rurais.

As terras em municípios que apresentam valores menores nos critérios **Custo da terra** e **custo da mão-de-obra** (figura 6.19) foram consideradas mais interessantes e, portanto, estes critérios foram normalizados pelo aumento linear invertido de contraste.

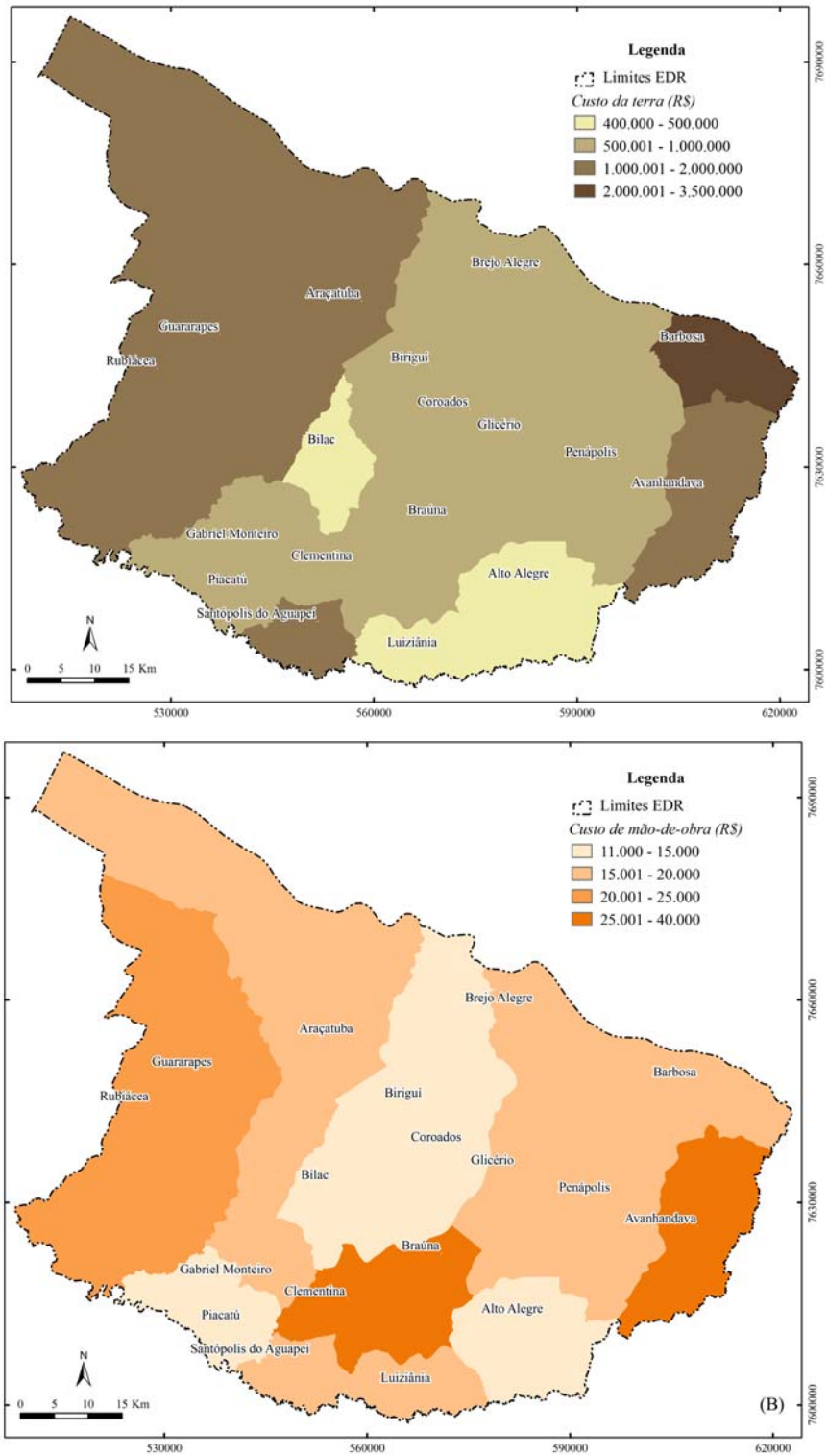

Figura 6.19 – Critérios socioeconômicos: (A) custo da terra, (B) custo da mão-de-obra. Organização: S.F. Adami. Fonte: IBGE (2006).

A proporção de técnicos agrícolas em relação ao total de mão-de-obra foi considerada um fator de atração para a seleção de terras visando à expansão canavieira, pois esses empreendimentos apresentam grandes demandas por esses profissionais para a condução dos trabalhos agrícolas. Representando **treinamento da mão-de-obra** (figura 6.20 A), valores maiores apresentam seriam mais adequados. A **disponibilidade de mão-de-obra** foi tratada a partir da proporção de empregados com vínculos rurais em relação à totalidade da mão-de-obra, e municípios com maior proporção podem apresentar maior número de trabalhadores rurais disponíveis para as plantações de cana (figura 6.20 B).

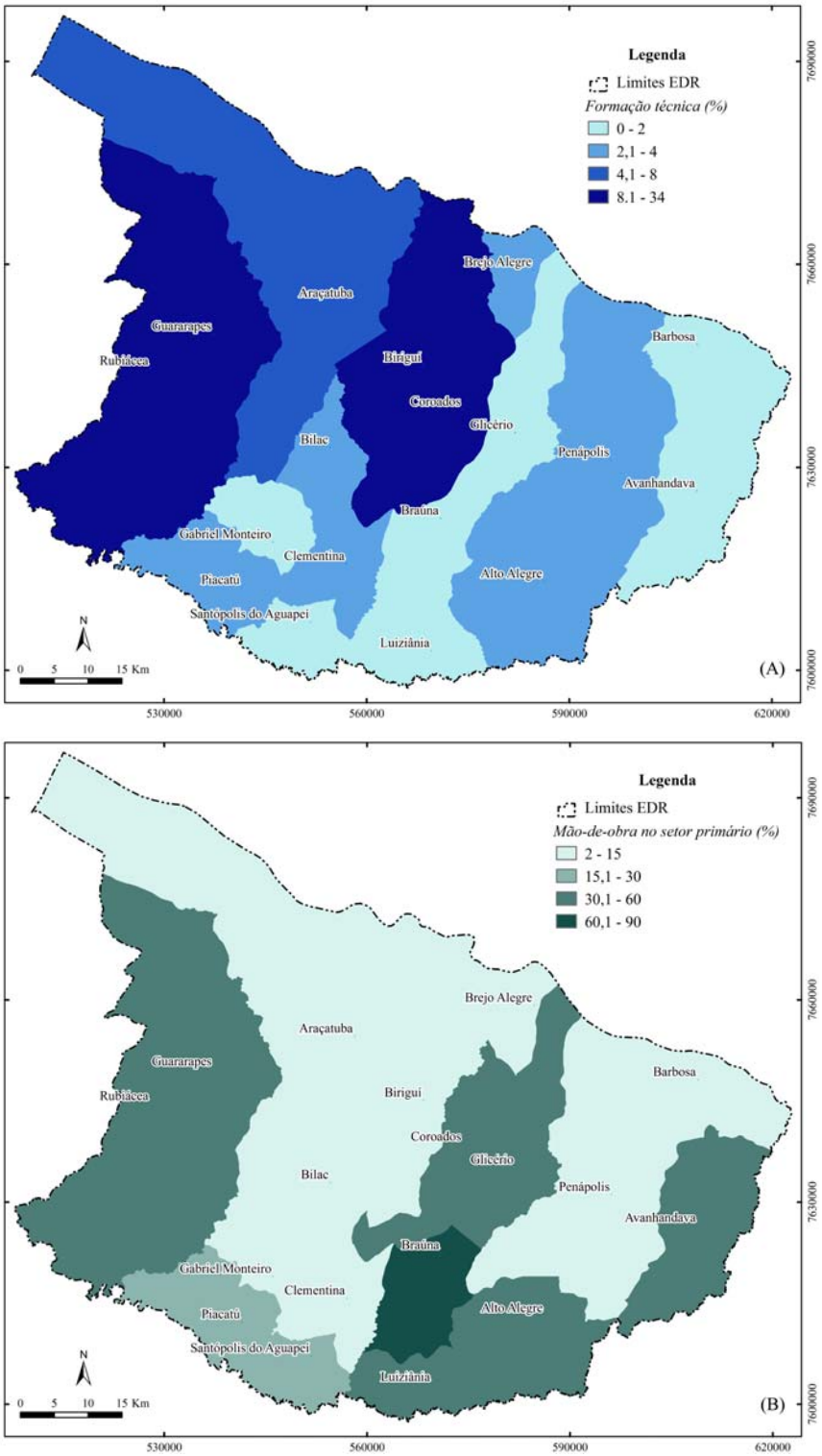

Figura 6.20 – Critérios socioeconômicos: (A) porcentagem mão-de-obra com formação técnica, (B) proporção da mão-de-obra no setor primário. Organização: S.F. Adami.

Para o critério **nível de desenvolvimento do município** foi selecionado o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) como um indicador que considera uma ampla gama de variáveis socioeconômicas municipais (figura 6.21). Essa variável busca incorporar uma visão de conjunto que os tomadores de decisão ligados às usinas podem desenvolver sobre o território onde buscam selecionar terras para expandir a cultura canavieira. Valores maiores de IDH seriam preferíveis aos gestores das usinas, pois representam municípios com maior disponibilidade de infraestrutura e serviços, desse modo, optou-se pelo aumento linear de contraste para a normalização dos valores nesse tema.

A operacionalização dos critérios enfrentou restrições em relação à disponibilidade, precisão, atualização e acurácia dos dados. Muitas vezes, os dados existentes não se encontram na escala adequada ou sua resolução espacial é baixa; em outras situações foram derivados de bases obsoletas. Na presente pesquisa, buscaram-se fontes facilmente disponíveis e gratuitas, tais como a base cartográfica e as estatísticas disponibilizadas pelo IBGE ou os dados de sensoriamento remoto fornecidos pelo INPE.

As manifestações dos gestores das usinas e dos especialistas foram levantadas por meio de questionários (apêndice 1). Solicitou-se aos respondentes que atribuíssem uma nota entre 0 e 10 para cada critério acima relacionado. Uma breve descrição dos critérios foi fornecida para auxiliar na avaliação e foi explanado que a nota zero excluiria o critério da avaliação. Além dessa avaliação quantitativa, foi solicitada uma qualitativa na qual os respondentes atribuíram um juízo de importância variando de muito baixa a muito alta frente ao objetivo de alocar áreas à cultura canavieira. Essa última proposta permitiria proceder-se a análise *fuzzy* dos critérios, incorporando um nível de imprecisão inerente a esse tipo de avaliação pessoal; entretanto, essa possibilidade não foi desenvolvida.

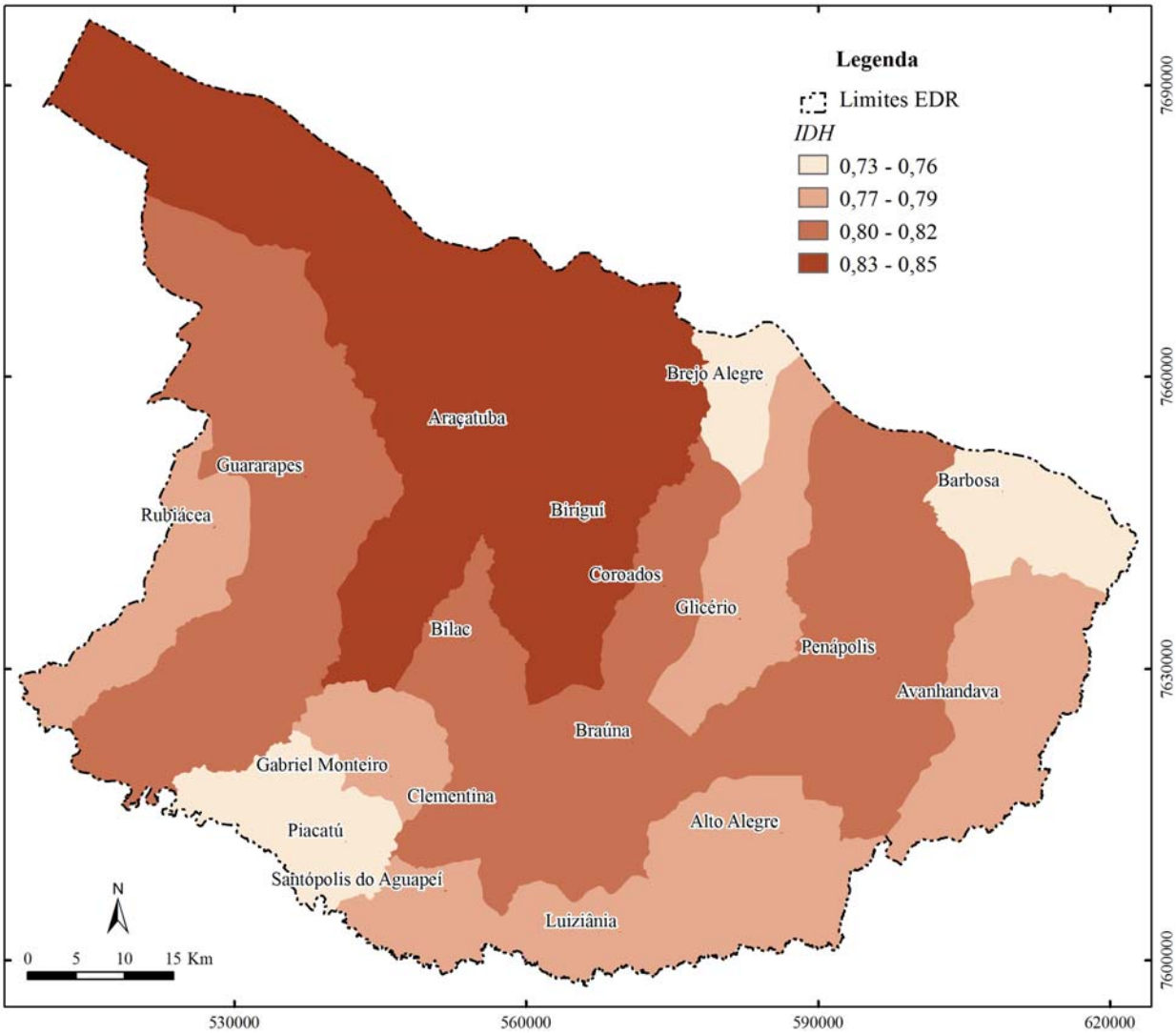

Figura 6.21 – Índice de desenvolvimento humano. Organização: S.F. Adami.

Visando a tratar com uma faixa próxima à moda das respostas, de forma que representasse a linha majoritária de pensamento do grupo de respondentes, buscou-se calcular a média expurgada (Francisco, 2006, p. 31) dos pesos atribuídos às variáveis nos questionários. Segundo esse procedimento, foram consideradas para o cálculo do peso médio final para cada critério, aquelas notas que estivessem dentro de um desvio-padrão positivo ou negativo em relação à média:

$$\bar{x} - dp \leq \alpha_i \leq \bar{x} + dp \quad (1)$$

Onde:

$\bar{x}$ – Média dos pesos para o critério "i".

dp – Desvio padrão dos pesos.

α_i – Peso sugerido por cada especialista para o critério "i".

Os pesos médios finais foram divididos pela soma dos pesos para que seus valores normalizados variassem entre zero e um. O resultado da análise multicriterial decorre da aplicação de métodos matemáticos que buscam estabelecer diferentes conjunturas nas relações entre os tomadores de decisão.

O método da Programação por Compromisso (PC) buscaria que as decisões atingissem uma "solução ideal", mas como uma solução comum para todos os *n* objetivos é pouco factível são identificadas "soluções alcançáveis". Esses resultados são representados por distâncias até o ponto ideal em um espaço multidimensional das diferentes preferências dos atores, sendo que quanto mais próximos da solução hipotética, mais preferível é a solução de compromisso (ZUFFO et al., 2002). A determinação da solução é dada por:

$$ls = \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^s \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i,w}} \right|^s \right)^{1/s} \quad (2)$$

Onde:

ls – Solução mais próxima da ideal.

α_i – Peso atribuído subjetivamente pelos tomadores de decisão ao critério *i*.

$f_{i,w}$ – Pior valor obtido pelo critério i.

$f_i(x)$ – Resultado da implementação da decisão *x* em relação ao $i_{ésimo}$ critério.

S – Constante de proporcionalidade entre os pesos.

Outra forma de avaliação multicriterial é a aplicação da Teoria dos Jogos Cooperativos (TJC). Segundo ZUFFO et al. (2002), a teoria é um estudo matemático de resolução de conflitos e considera que a melhor solução é a aquela que maximiza a distância de algum ponto mínimo. Dessa forma tem como premissa que os vários objetivos cooperam para atingirem uma solução satisfatória. Para identificar a solução ao problema de decisão aplica-se a fórmula:

$$ls(x) = \prod_{i=1}^{n} \left| f(x) - f_i^* \right|^{\alpha_1} \qquad (3)$$

Onde:

$ls_{(x)}$ – Solução mais próxima da ideal.

α_i – Peso do $i_{ésimo}$ critério.

f_i^* – Menor valor obtido pelo critério i.

$f(x)$ – Resultado da implementação da decisão *x* em relação ao $i_{ésimo}$ critério.

Em relação ao uso objeto do modelo (cana-de-açúcar), os resultados do módulo de análise multicriterial compõem os mapas de probabilidades de transição de uso das terras.

6.2.3 Modelagem com autômatos celulares

Decorrente da interação entre os diversos atores sociais, da relação entre suas forças e de suas decisões se estabelece uma determinada situação global de usos das terras de forma dinâmica e complexa observável em recortes temporais específicos. A partir desses considerandos, os modelos autômatos celulares seriam adequados para mimetizar as características gerais resultantes do elevado número de decisões ligadas aos usos das terras, pois eles permitem simular a estrutura global de sistemas por meio da aplicação de regras básicas de comportamento de pequena escala dos diversos elementos individuais, conforme Deadman & Brown (1993).

Um modelo autômato celular é composto por cinco elementos básicos, segundo Liu (2009):

1. **Células –** compõem a forma de representação do espaço;
2. **Estados –** atributos das células;
3. **Vizinhança –** conjunto de células que interagem com a célula-foco que normalmente é a célula central de uma vizinhança;
4. **Regras de transição –** determinam como as células mudam de estado;
5. **Tempo –** define a duração do período de simulação.

A semelhança conceitual entre a representação celular do espaço nos modelos de autômatos celulares e o modelo de dados geoespaciais matricial ou *raster* empregado em sistemas de informações geográficas forma a base para integração entre eles. Os *pixels* são as células de uma grade *raster*, os estados são representados pelos atributos armazenados para cada *pixel*, e a vizinhança e sua ação sobre o espaço são operacionalizadas por meio de janelas móveis com tamanho e peso definidos.

Regras de transição compõem o elemento mais importante para que a aplicação do modelo autômato celular resulte em simulações confiáveis. Muitas são as abordagens para a geração das regras, tais como a utilização de métodos multicriteriais (WU & WEBSTER, 1998) ou a aplicação da teoria de conjuntos *fuzzy* (DRAGICEVIC, 2004). O tempo é representado pelo número de interações do AC sobre o mapa de origem, sendo que o resultado de uma interação serve de mapa-base para a próxima interação de forma cumulativa. O Plano de Informação (PI) resultante de todas as interações representa as mudanças acumuladas ao longo do período considerado.

Para a efetivação do modelo autômato celular foi empregado o módulo CA_MARKOV do SIG Idrisi (EASTMAN, 2006). Tradicionalmente, a utilização desse módulo demanda a aplicação preliminar de outra rotina para o cálculo das probabilidades de transição entre as classes de usos das terras com cadeias de Markov. O módulo MARKOV demanda duas grades com as classes de usos das terras em diferentes datas, o lapso temporal entre essas imagens e o tempo de predição a ser aplicado sobre a imagem mais recente. A partir dessas informações o módulo apresenta como resultados duas matrizes; na primeira apresentam-se as probabilidades de transição entre as classes de usos e na segunda o número de células (áreas de transição) que deve

ser alocado em cada classe de uso no mapa simulado, além das imagens com probabilidades de transição para cada classe de uso das terras individualmente.

Após a utilização do módulo MARKOV, é aplicada a rotina CA_MARKOV inserindo-se no programa a grade inicial, a partir da qual será simulada a distribuição espacial do uso das terras e que é normalmente a imagem mais recente empregada no módulo MARKOV; também se insere a matriz com as áreas de transição entre usos, o conjunto de imagens de probabilidades de transição entre classes de uso e se informa o número de interações do modelo, que é proporcional ao lapso temporal da simulação.

Entretanto, na presente pesquisa buscou-se incorporar o conhecimento de especialistas e o comportamento dos gestores das usinas na condução do modelo autômato celular. Para essa abordagem, o módulo CA_MARKOV foi munido com a imagem de usos das terras de 2001, uma matriz de áreas de transição derivada do cruzamento entre o mapa de usos de 2001 e o de 2008 (tabela 6.1), um conjunto de imagens de probabilidades de transição que incorpora os resultados da análise multicriterial e o lapso temporal de sete anos (figura 6.22).

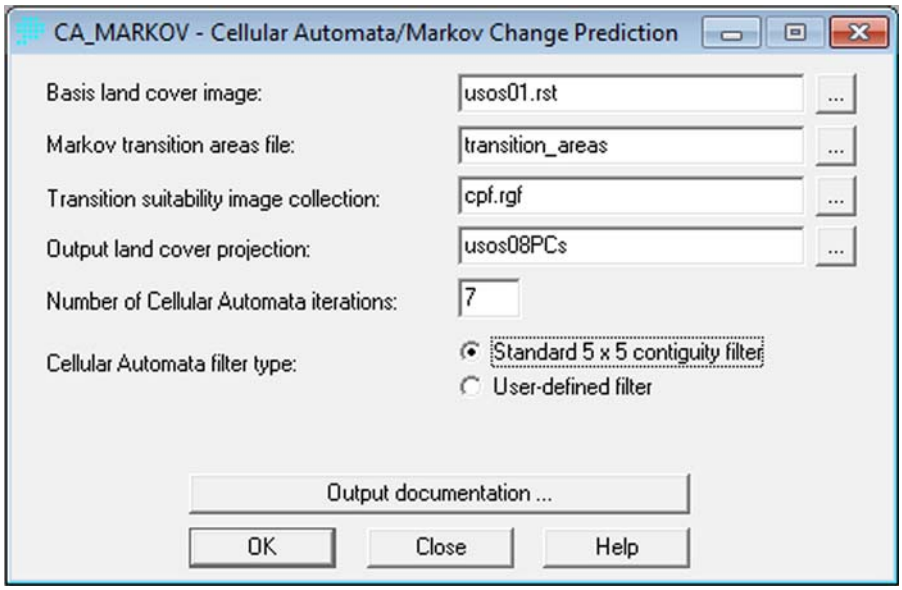

Figura 6.22 – Caixa de diálogo do módulo CA-MARKOV para geração dos usos das terras simulados a partir da aplicação dos resultados da programação por compromisso. Organização: S.F. Adami.

Aos resultados da aplicação dos métodos multicriteriais foram incorporadas duas restrições que visavam a excluir a transformação de áreas urbanas e de represas em cana-de-açúcar. A partir do mapa de uso das terras de 2001 foram selecionadas as células classificadas como áreas urbanizadas e água; esses elementos receberam valor zero e foram incorporados aos planos de informação multicriteriais (figura 6.23).

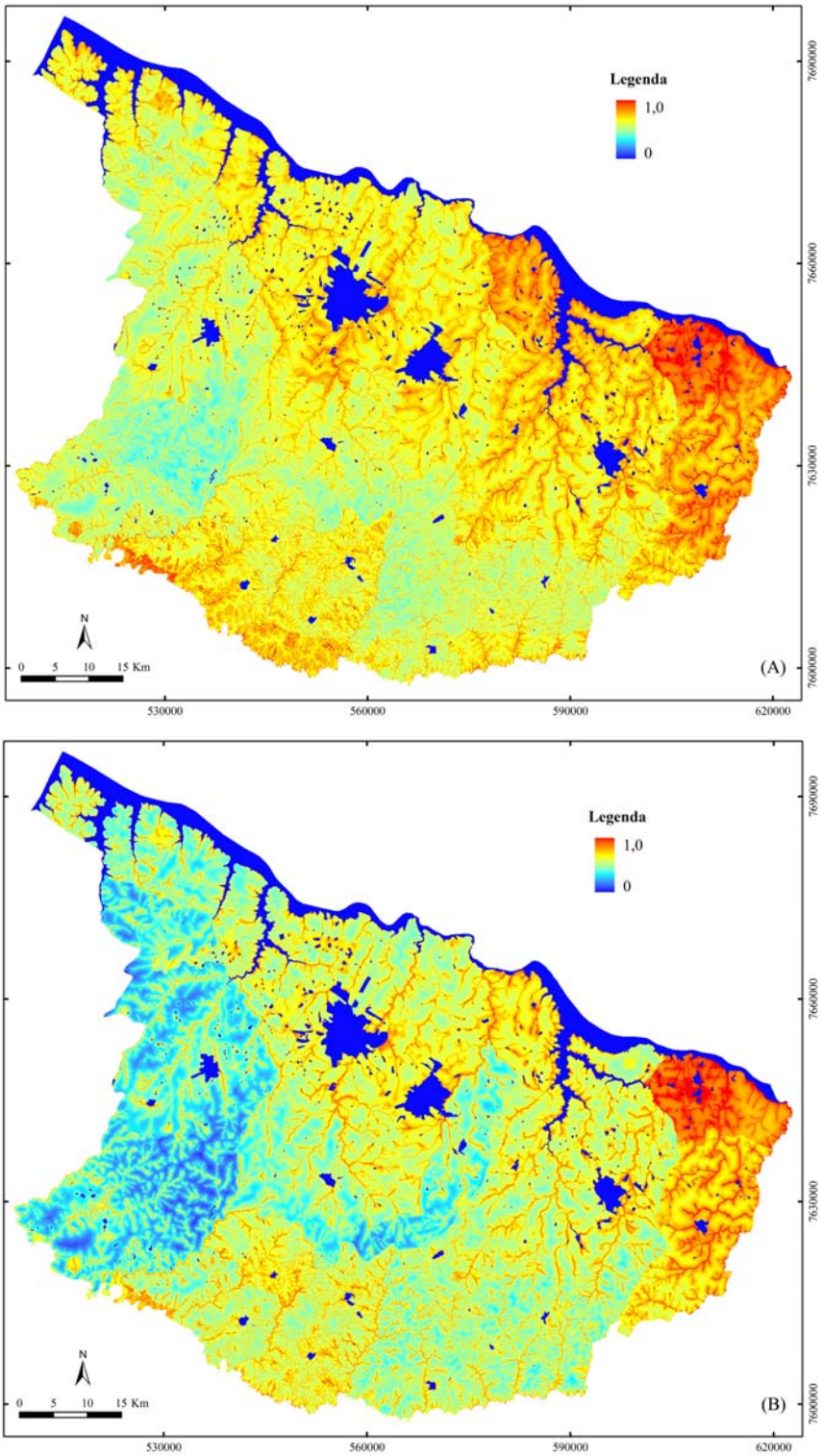

Figura 6.23 – Planos de informação com preferências para a implantação da cana-de-açúcar. (A) programação por compromisso e (B) teoria dos jogos cooperativos. Organização: S.F. Adami.

Demais classes de usos das terras foram selecionadas a partir do mapa de 2001 e atribuiu-lhes o valor fortuito de 0,5 (figura 6.24). Entretanto, todos os planos de informação criados para compor o conjunto de imagens de probabilidades de transição foram submetidos ao módulo NORMALIZE do Idrisi para que a soma focal fosse unitária, criando-se as imagens de probabilidades de transição para as diversas classes de usos das terras.

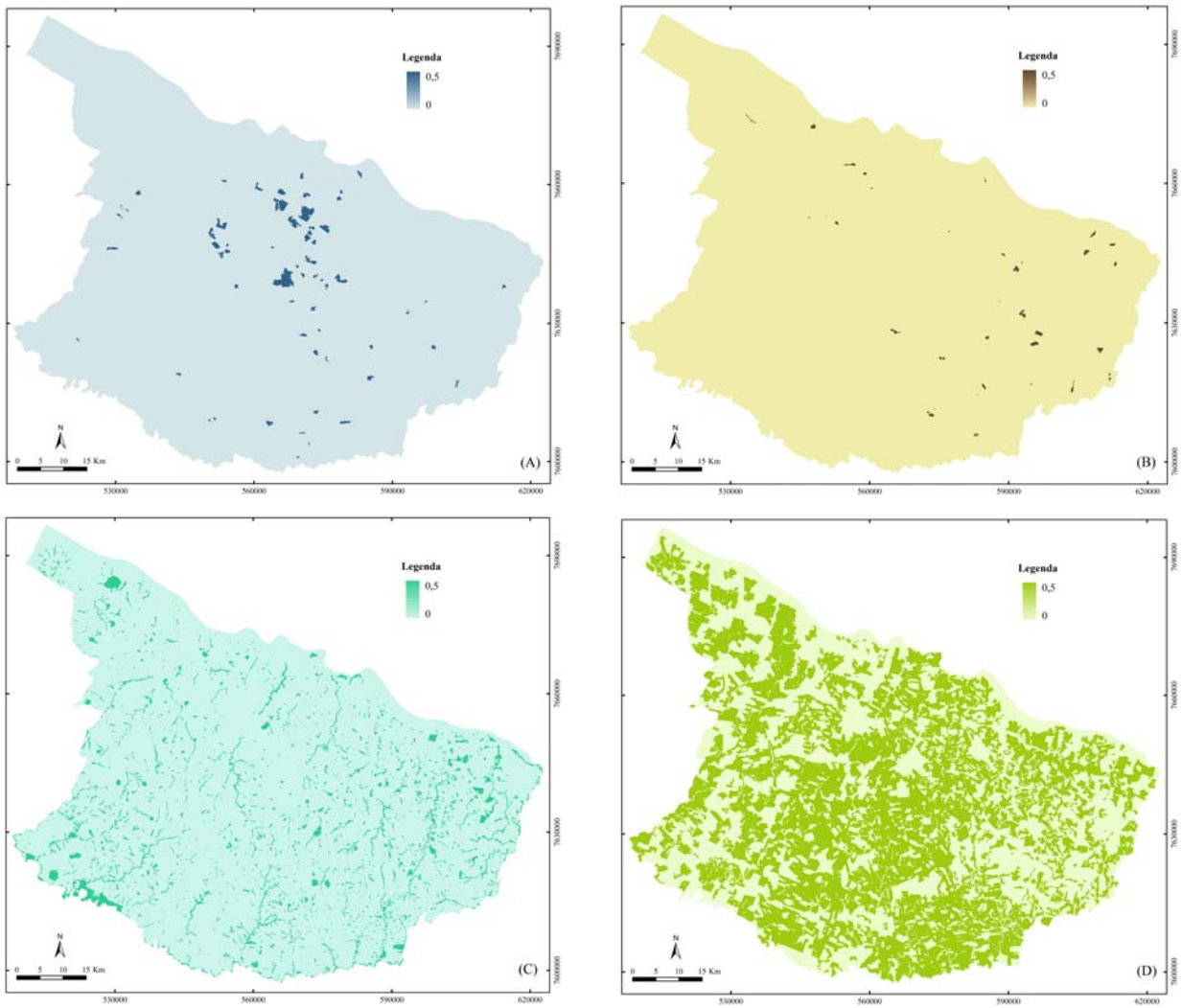

Figura 6.24 – Imagens de probabilidades dos demais usos das terras. (A) culturas anuais, (B) culturas perenes, (C) formações arbóreas e, (D) pastos. Organização: S.F. Adami.

Em relação à classe de uso "água", após as células serem selecionadas do mapa de 2001, o valor 1,0 foi atribuído para as áreas ocupadas por represas ou lagos. Assim, buscou-se

maximizar a probabilidade de uma célula classificada como água em 2001 ser atribuída à mesma classe no mapa simulado para 2008 (figura 6.25A).

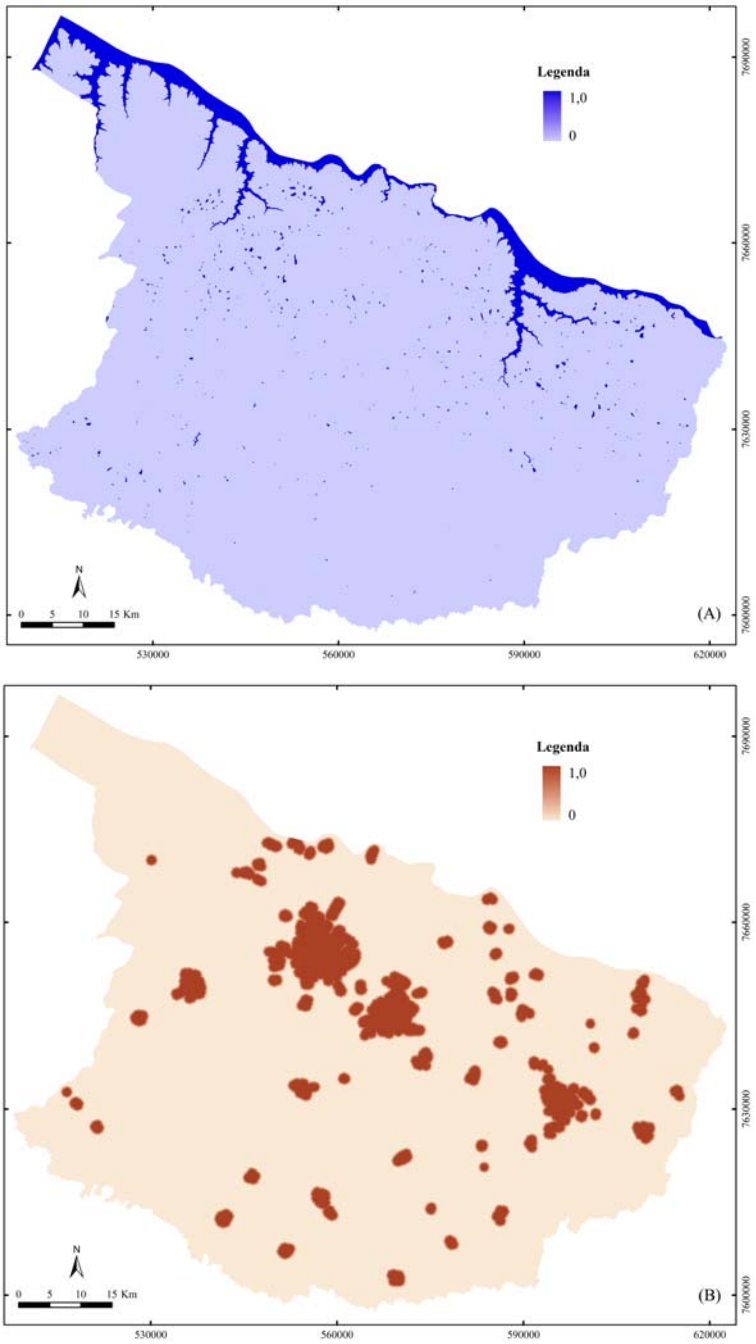

Figura 6.25 – Probabilidades das classes de uso água (A) e áreas urbanizadas (B). Organização: S.F. Adami.

Um procedimento semelhante foi aplicado à classe "áreas urbanizadas". Entretanto, às células de usos urbanos, foi calculada uma superfície de distância e um valor limiar de 1.000 metros estipulado. Um processo de aumento linear de contraste foi aplicado a essa imagem de distância negativada; desse modo, valores de probabilidade 1,0 foram atribuídos aos *pixels* mapeados como urbanos em 2001 e esse valor decresce para zero a um quilômetro da mancha urbana (figura 6.25B). Esse tratamento permitiu algum grau de liberdade para a expansão urbana ao redor das áreas urbanizadas existentes, de maneira semelhante ao observado nos mapeamentos de usos das terras por interpretação visual.

Após o desenvolvimento dos planos de informação de probabilidade preliminares e sua normalização pelo módulo *normalize*, cada classe de uso das terras apresentava uma imagem de probabilidade de transição final e a somatória de todas resultava no valor unitário. Esse conjunto de dados dirigiu a atribuição das diversas classes de usos das terras no processo de simulação pelo modelo autômato celular, conforme ordem decrescente de probabilidade até cumprir o valor estabelecido na matriz de áreas de transição.

O resultado da proposta metodológica foi comparado àqueles de dois outros métodos mais tradicionalmente estabelecidos, a saber: a Capacidade de Usos das Terras e as probabilidades derivadas pelas cadeias de Markov.

6.2.4 Procedimentos para avaliação dos resultados

Como forma de avaliar o desempenho do expediente metodológico proposto buscou-se comparar os resultados do modelo autômato celular associado à avaliação multicriterial com aqueles determinados pela aplicação dos modelos AC condicionados por métodos mais tradicionalmente estabelecidos.

Uma forma de avaliação do ambiente para fins de planejamento da ocupação agrícola é o levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso (LEPSCH, 1983). Esse método visa a identificar a adequabilidade das terras frente aos diversos tipos de utilização agrosilvipastoril de acordo com suas possibilidades e limitações (LEPSCH, op. cit., p. 14). Desse modo, a interpretação de dados do meio físico, em especial dos solos e do relevo, permite a identificação de unidades espaciais que permitem graus decrescentes de intensidade de usos rurais. A partir dessa classificação, pode-se orientar a utilização das terras

alocando usos mais intensos e que impõem maior pressão sobre os recursos naturais em unidades mais adequadas, enquanto áreas frágeis deveriam ser destinadas a sistemas produtivos menos intensivos, com maior aplicação de técnicas de conservação, ou mesmo, a total preservação da vegetação original.

As classes de capacidade de usos representam terras com mesmo grau de limitações ou riscos e são distribuídas em oito níveis (LEPSCH, 1983, p. 20-22):

Classe I: terras cultiváveis sem problemas especiais de conservação.

Classe II: áreas cultiváveis que apresentam problemas simples de conservação.

Classe III: manifestam restrições complexas; entretanto, são cultiváveis.

Classe IV: podem ser cultivadas de maneira restrita e ocasionalmente devido aos sérios problemas de conservação.

Classe V: terras adaptadas para pastagens e reflorestamento, cultiváveis apenas em casos especiais.

Classe VI: apresentam problemas de conservação do solo para pastagens e silvicultura, indicadas para cultivos com espécies perenes que forneçam boa proteção ao solo.

Classe VII: áreas adaptadas apenas para pastagens e reflorestamento, com problemas complexos de conservação.

Classe VIII: terras impróprias para culturas e indicadas para a preservação de remanescentes de vegetação e da fauna nativa.

Podem ser atribuídas subclasses de capacidade de uso de acordo com limitações específicas do meio físico. Um conjunto de letras determina o tipo de restrições apresentadas pela classe e podem ser empregadas simultaneamente (adaptado de LEPSCH, 1983, p. 23):

- **e:** risco de erosão do solo.
- **f:** problemas de fertilidade natural dos solos.
- **a:** excesso de água.

O mapa de capacidade de usos das terras para a EDR de Araçatuba (figura 6.26) foi estabelecido pelo cruzamento dos planos de informação de solos e de classes de declividade. Para

a carta clinográfica foram estabelecidas classes de 0-3 (poucos problemas de erosão), 3-6 (maior propensão ao desenvolvimento de processos erosivos), 6-12 (máximo aconselhável para a mecanização agrícola), 12- 20 (grande risco de erosão), 20-40 (limite para pastagens) e maior que 40% (usos de conservação).

Às classes de capacidade de uso foram atribuídos valores normalizados entre zero e um (tabela 6.7), considerando que as classes com menores restrições são mais indicadas à cultura canavieira, pois demandariam menores inversões de capital na forma de insumos e de técnicas de conservação do solo por parte das usinas. Além disso, a cana implantação ou reforma do canavial envolvem-se muitas operações agrícolas com maquinário pesado e se expõe a superfície do solo à ação dos fatores morfogenéticos, aumento as taxas de erosão nessas fases.

Tabela 6.7 – Classes de capacidade de uso das terras e valores normalizados.

Capacidade de usos das terras	***Valor***
I	1,0
IIf	0,9
IIe	0,8
IIef	0,7
IIIf	0,6
IIIe	0,5
IVe	0,4
IVef	0,3
VIe	0,2
Va	0,1

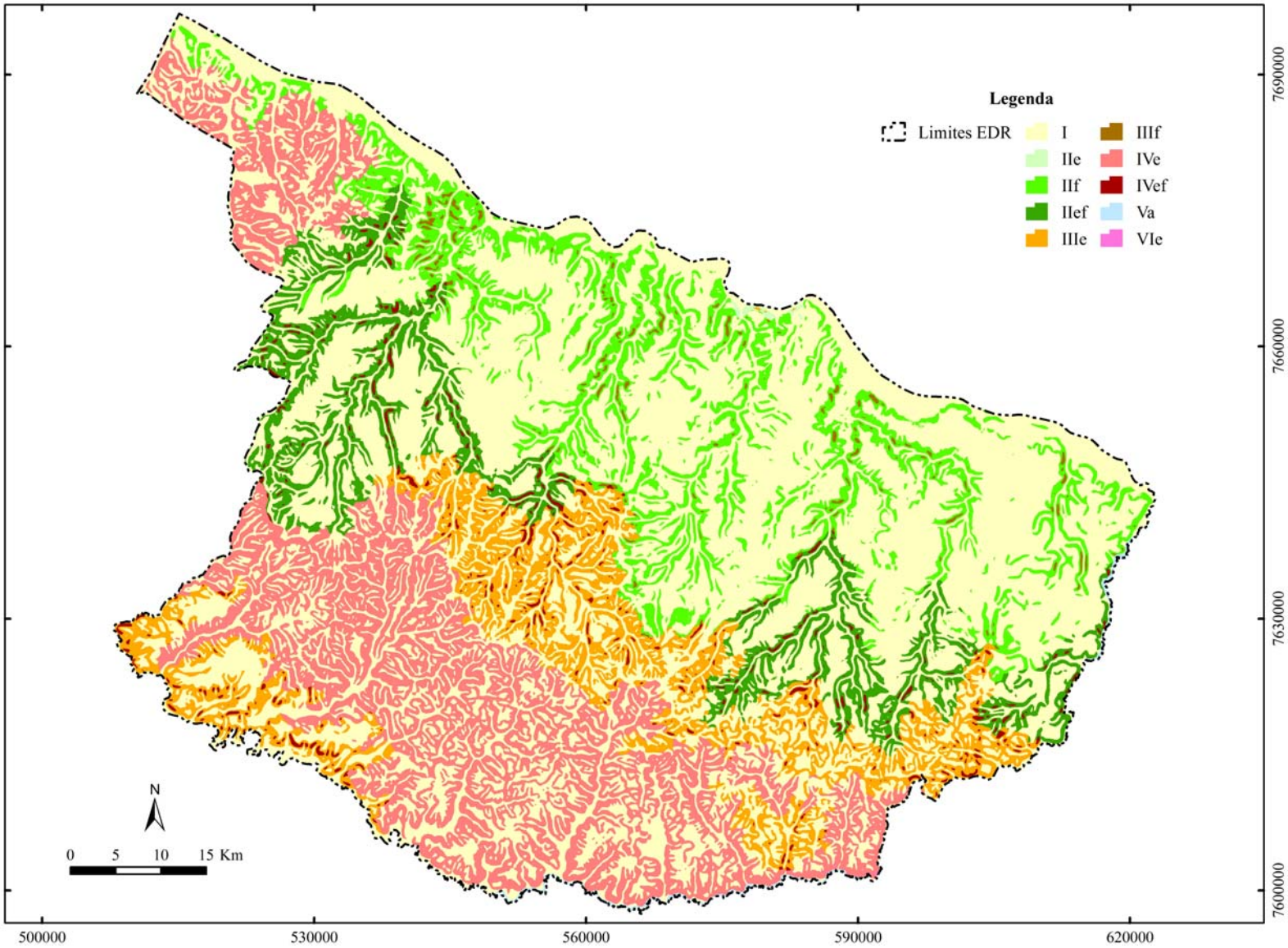

Figura 6.26 – Capacidade de usos das terras. Elaboração: S.F. Adami.

Entretanto, a reclassificação não considera a distribuição das demais classes de usos das terras envolvidas no mapeamento. A incorporação das demais classes envolveu a aplicação de um modelo embasado em premissas de teorias econômicas sobre a decisão de alocar os diversos usos das terras em função da adequação dos locais, conforme formulação abaixo (KOOMEN & STILLWELL, 2007, p. 6):

$$X_{ci} = \frac{e^{\beta * S_{ci}}}{\sum_{k} e^{\beta * S_{ck}}} \tag{4}$$

Onde:

X_{ci} – Probabilidade da célula *c* ser ocupada pelo uso *i*.

e – Logaritmo natural (2,71828).

S_{ci} – Adequabilidade da célula *c* para o uso *i*.

S_{ck} – Adequabilidade da célula *c* para frente aos outros usos.

β – Parâmetro para ajuste da sensibilidade.

Como resultado, obteve-se um plano de informações com valores normalizados derivado do mapa de capacidade de usos das terras (figura 6.27).

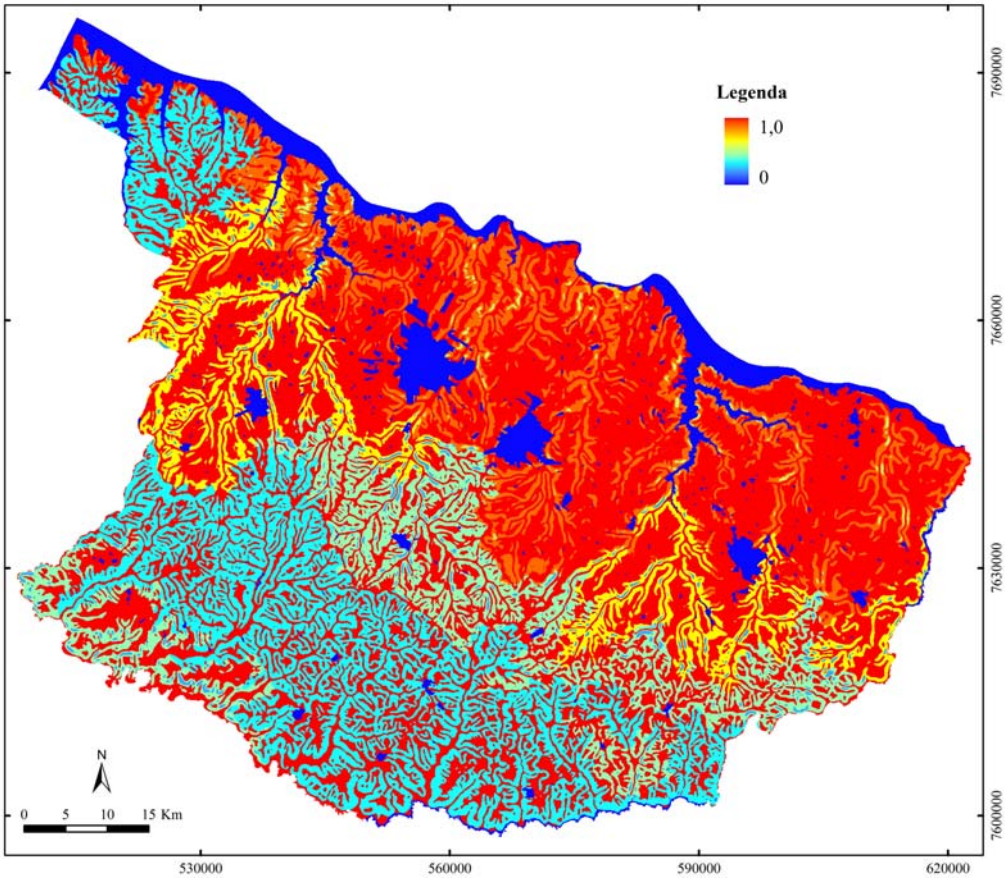

Figura 6.27 – Probabilidades associadas à ocupação com cana-de-açúcar derivadas do levantamento de capacidade de usos das terras. Organização: S.F. Adami.

O conjunto de procedimentos (figura 6.28) aplicados na modelagem com autômatos celulares a partir da capacidade de usos das terras foi semelhante aos constantes da proposta metodológica dessa pesquisa. Para a simulação utilizaram-se do mapa de 2001, da mesma matriz de áreas de transição e dos planos de informação relativos aos demais usos das terras, com exceção das probabilidades associadas à cultura canavieira.

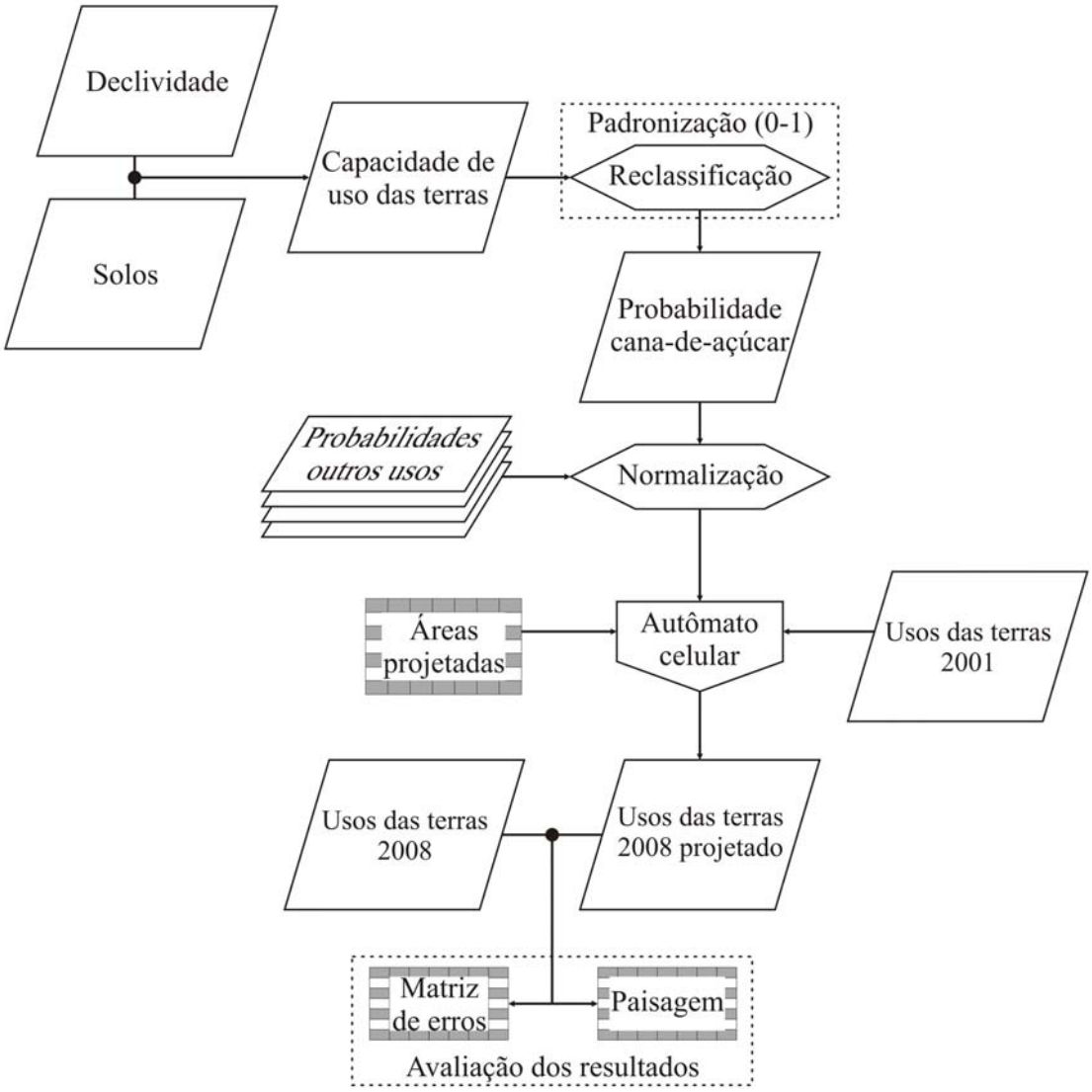

Figura 6.28 – Fluxograma de procedimentos do modelo embasado na capacidade de usos das terras. Elaboração: S.F. Adami.

Mesmo tratando-se a capacidade de usos das terras de uma metodologia tradicional no planejamento das atividades rurais, os resultados de sua aplicação para simular a dinâmica das áreas de plantio de cana-de-açúcar devem ser inferiores àqueles da proposta metodológica que incorpora, além dos conhecimentos de especialistas, as preferências dos gestores das usinas.

Outro método tradicionalmente empregado na modelagem dos usos das terras e incorporado ao SIG Idrisi é a integração das probabilidades markovianas de transição entre usos com autômatos celulares.

A partir dos mapas de usos das terras de 2001 e 2008 o módulo MARKOV calcula as probabilidades de transição entre as classes e estabelece a extensão das áreas que devem ser transformadas entre os diversos usos. Tais determinações são resultado da aplicação de cadeias de Markov aos dados de usos das terras, e essa abordagem se baseia na premissa de que a ocorrência de um evento está diretamente relacionada ao evento imediatamente precedente (HARVEY, 1967, p. 577).

As probabilidades de transição entre classes de usos são determinadas pela quantificação do número de células que têm seus usos alterados entre as datas analisadas. Considerando as probabilidades de transição como estáveis ao longo tempo seria possível simular o estado futuro no desenvolvimento do sistema (HARVEY, 1967, p. 577).

São gerados por esse processamento no Idrisi um conjunto de imagens com a espacialização das probabilidades de transição, uma para cada classe de uso, e uma matriz com a quantidade de células que devem ser atribuídas à situação futura simulada. Esses resultados são inseridos no módulo de autômatos celulares para determinação da distribuição espacial futura das diversas classes de usos.

Para comparação com os resultados da proposta medotológica apresentada, o conjunto de processos adotados (figura 6.29) difere daqueles anteriormente descritos, pois da aplicação de cadeias de Markov aos mapas de usos das terras, foi utilizada somente a grade de probabilidades de transição associadas à cultura canavieira (figura 6.30).

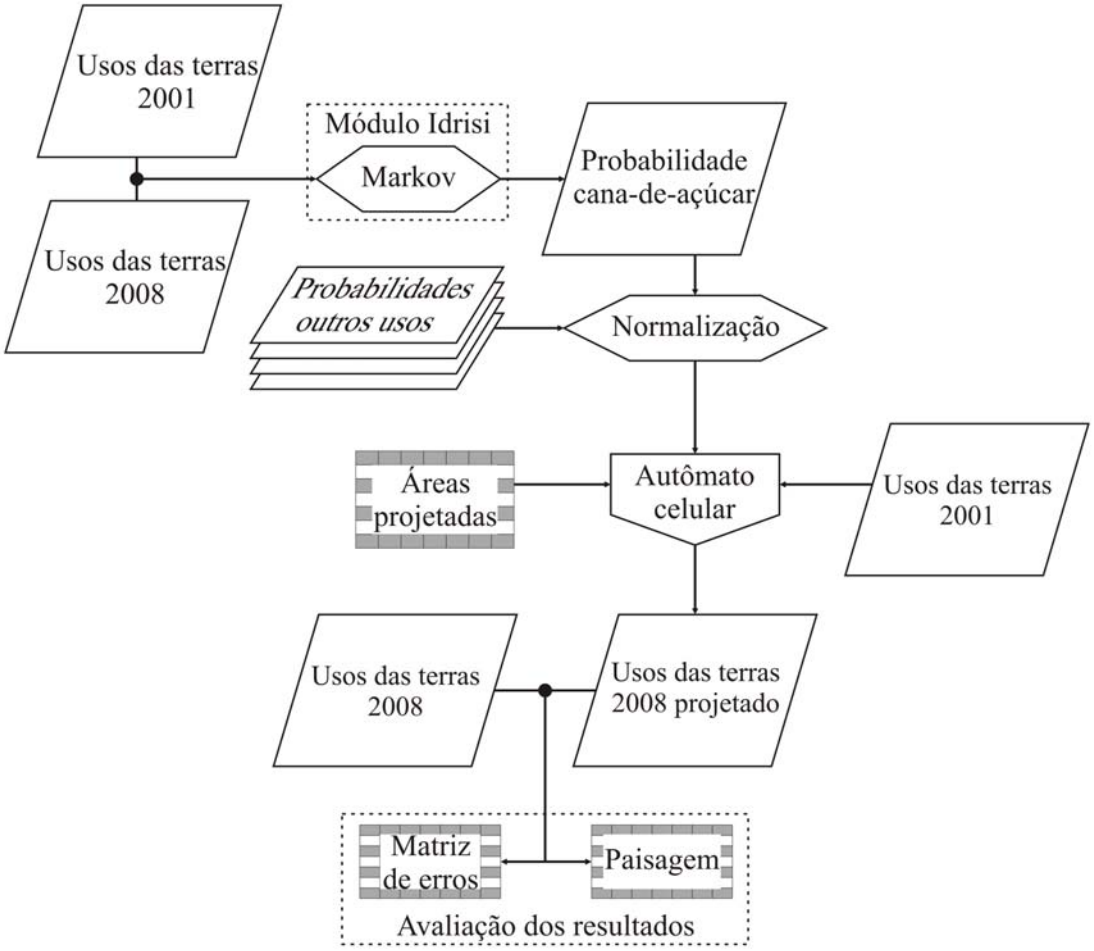

Figura 6.29 – Fluxograma de procedimentos do modelo condicionado pela aplicação de cadeias de Markov. Elaboração: S.F. Adami.

As imagens de probabilidades de transição dos demais usos das terras foram as mesmas empregadas no desenvolvimento do modelo autômato celular associado a métodos multicriteriais, pois buscou-se determinar o comportamento espacial da cultura canavieira. Para a utilização das probabilidades markovianas de transição das outras classes de usos, o modelo proposto nessa pesquisa deveria levantar as preferências de pecuaristas, de agricultores que cultivam culturas perenes e anuais, de moradores das áreas urbanas, e dos demais grupos que atuam sobre o território da EDR para, desse modo, aplicar os métodos multicriteriais às possibilidades de utilização das terras.

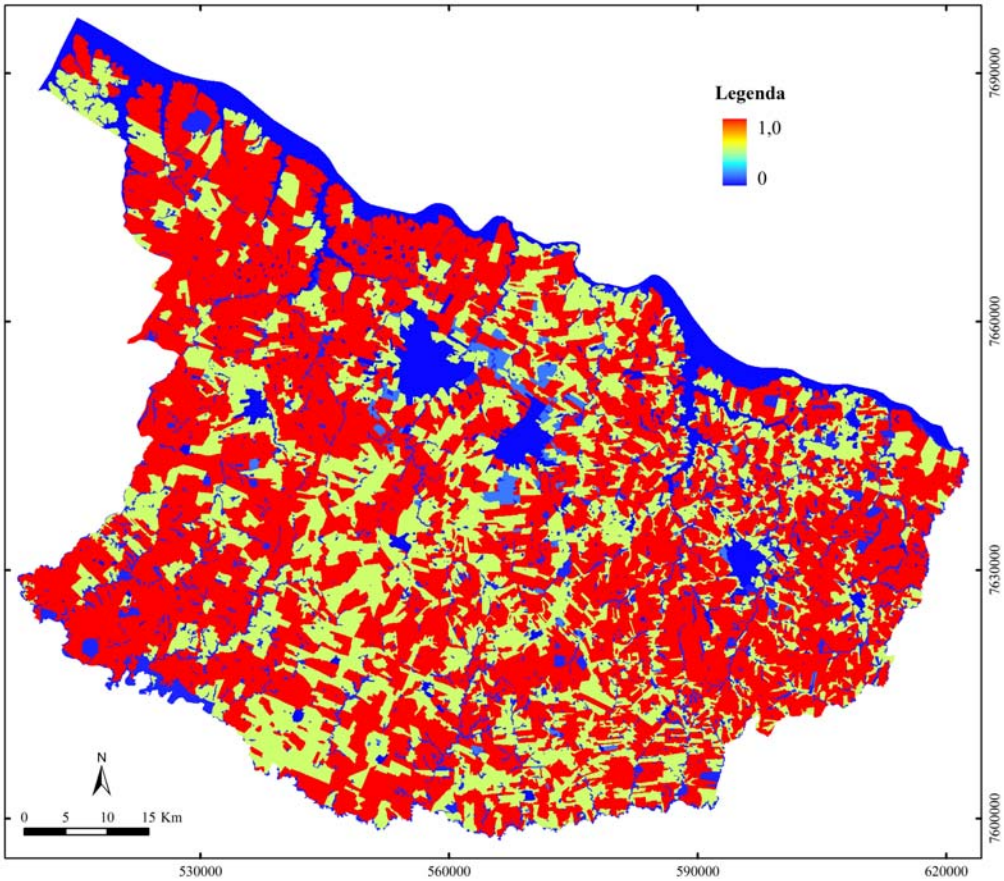

Figura 6.30 – Probabilidades markovianas de transição para a cana-de-açúcar na EDR de Araçatuba. Organização: S.F. Adami.

Os mapas de probabilidades de transição da cana-de-açúcar e dos demais usos foram tratados no módulo NORMALIZE, para que todos os planos de informação somados resultassem no valor um, distribuindo as probabilidades entre as grades. A matriz de áreas de transição entre usos foi a mesma aplicada ao método proposto, derivada do cruzamento dos mapas de usos das terras de 2001 e 2008.

Como forma de comparar os resultados do método com aqueles derivados da aplicação de tratamentos tradicionais buscaram-se, além da análise visual qualitativa, procedimentos quantitativos.

A comparação visual entre o mapa de usos das terras de 2008 levantado por interpretação visual e os resultados da aplicação de métodos multicriteriais integrados a autômatos celulares e com os mapas simulados a partir da capacidade de uso das terras e de cadeias de Markov teve por objetivo identificar a forma geral de que os modelos aproximam-se

dos dados de referência. Para auxiliar na visualização das alterações nos usos foram produzidos mapas de diferenças, enfocando a cana-de-açúcar, entre os PIs 2001 e 2008, entre os usos de 2008 e os resultados dos modelos. Para a preparação desses mapas empregou-se o SIG Ilwis e foram combinados os PI de interesse, posteriormente os resultados passaram por procedimentos de finalização cartográfica no ArcGis.

Um grau mais detalhado de comparação foi o cálculo de parâmetros ligados à métrica da paisagem. Três índices simples foram calculados a partir do mapa de 2008 e dos resultados dos modelos, a saber: número de polígonos, perímetro médio e área média dos polígonos.

Dessa forma, foi possível se identificar o grau com que os resultados dos modelos conseguiram aproximar-se dos dados de referência, pois não apenas as áreas atribuídas às diversas classes de usos das terras devem ser compatíveis com a quantidade de terras direcionadas ao vários usos, mas a sua forma de distribuição espacial ganha relevo, pois o método proposto objetiva simular o aspecto geral de utilização do território.

A abordagem quantitativa foi derivada da aplicação da matriz de erros (JENSEN, 1996, p. 248) entre o mapa de 2008 e os resultados das simulações. A partir da matriz foram calculados os erros de omissão e comissão para a cultura canavieira, e a acurácia total. Entretanto, conforme Al-Ahmadi *et al.* (2009), essa forma de avaliação não incorpora a ideia de forma e padrão dos usos, urbanos no caso do citado autor, pois se trata de uma avaliação feita ponto a ponto no espaço. Dessa maneira, torna-se interessante uma forma de avaliação que leve em consideração o arranjo espacial do uso. Um índice empregado para a avaliação de AC para usos urbanos será empregado visando a essa demanda, e trata-se do índice Lee-Sallee (LS), representado por (AL-AHMADI et al., 2009):

$$LS = \sum (Sij \cap Oij) / \sum (Sij \cup Oij)) \qquad (5)$$

Onde:

LS – Índice Lee-Sallee.

S_{ij} – Célula ij classificada pelo modelo como sendo do uso-objetivo.

O_{ij} – Célula ij do uso-objetivo observada.

Os erros de omissão indicam a probabilidade de uma célula ter sido corretamente classificada em relação aos dados de referência e os erros de comissão ou confiabilidade são a probabilidade de um *pixel* no modelo representar corretamente um uso real no terreno (JENSEN, 1996, p. 250).

Uma estatística multivariada aplicada aos dados, a partir da matriz de erros, foi o índice Kappa, como outra medida de concordância entre os dados de controle e os resultados das simulações. Jensen (1996, p. 251) estabelece o cálculo do Kappa como demonstrado:

$$K_{hat} = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r}(x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}(x_{i+} * x_{+i})} \qquad (6)$$

Onde:

K_{hat} – Estimativa de Kappa.

r – Número de linhas na matriz.

x_{ii} – Número de observações na linha *i* e na coluna *i*.

x_{i+} – Totais marginais da linha *i*.

x_{+i} – Totais marginais da coluna *i*.

N – Número total de observações.

Esse conjunto de procedimentos permitiu a avaliação dos resultados e uma estimativa do grau em que o método proposto aproxima-se do quadro de usos das terras levantado em relação aos expedientes considerados mais tradicionais.

7. Resultados e discussão

O principal resultado em relação aos objetivos propostos é a distribuição espacial dos usos das terras na área de estudos obtida a partir da integração de modelos autômatos celulares embasados nas preferências de especialistas e gestores das usinas de cana-de-açúcar. Por outro lado, foram levantados dados sobre a área de estudos tanto para comparação com os resultados da proposta metodológica, quanto para operacionalização dos procedimentos, tais como os mapas de usos das terras de 2001 e de 2008.

7.1 Mapas de usos das terras levantados por interpretação visual de imagens

A situação dos usos das terras considerado inicial na EDR de Araçatuba é relativo ao ano de 2001. A escolha dessa data decorreu da periodização ambiental da cultura canavieira, na qual se identificou que entre os anos finais da década de 1990 e o início do século XXI, um novo momento estava sendo encetado nesse ramo agroindustrial. Entretanto, nessa ocasião não ocorria a grande expansão que os canaviais iriam ainda experimentar.

A cana-de-açúcar ocupava cerca de 33% da área de estudos, totalizando 208.758 hectares (figura 7.1). O setor leste, com destaque para os municípios de Avanhandava e Penápolis, o sul, especialmente em Santópolis do Aguapeí, e o setor sudoeste, nas áreas meridionais dos territórios de Guararapes e Rubiácea, apresentavam predominância da ocupação por cana-de-açúcar. Essa distribuição espacial provavelmente está relacionada à localização das usinas Everest e Campestre a leste, Clealco ao sul e Unialco no sudoeste.

Entretanto, a maior parte da área era dedicada às pastagens, que ocupavam 323.289 hectares, ou mais de 51% do território da EDR, distribuídos de maneira relativamente ampla. Um eixo principal norte-sul entre Birigui e Piacatú apresentava grande concentração de pastagens, seguido por áreas do setor sudeste, em especial nos municípios de Luziânia e Alto Alegre. A busca por áreas de maior rendimento para o plantio da *Saccharum officinarum* em uma situação de menor demanda por matéria prima pelas usinas pode ter sido a motivação dessa distribuição.

Na área de estudos 44.777 hectares, aproximadamente 7% da área, eram ocupados por formações arbóreas, distribuídas em fragmentos relativamente pequenos e poucas manchas

maiores, com destaque para matas que ocorriam ao longo do rio Aguapeí no setor sul e sudeste da EDR. A maior parte dos remanescentes estava localizada ao longo dos canais fluviais, com poucas ocorrências nas terras mais altas.

As culturas anuais e perenes eram pouco representativas dos usos das terras na área de estudos; com 6.360 e 1.603 hectares, ocupavam 1% e 0,3% respectivamente do território. A parte maior desses plantios era localizada próxima das áreas urbanizadas e abastecia os mercados consumidores locais. A maior concentração das culturas perenes e anuais estava nos arredores dos municípios de Araçatuba, Birigui e Penápolis (figura 7.2).

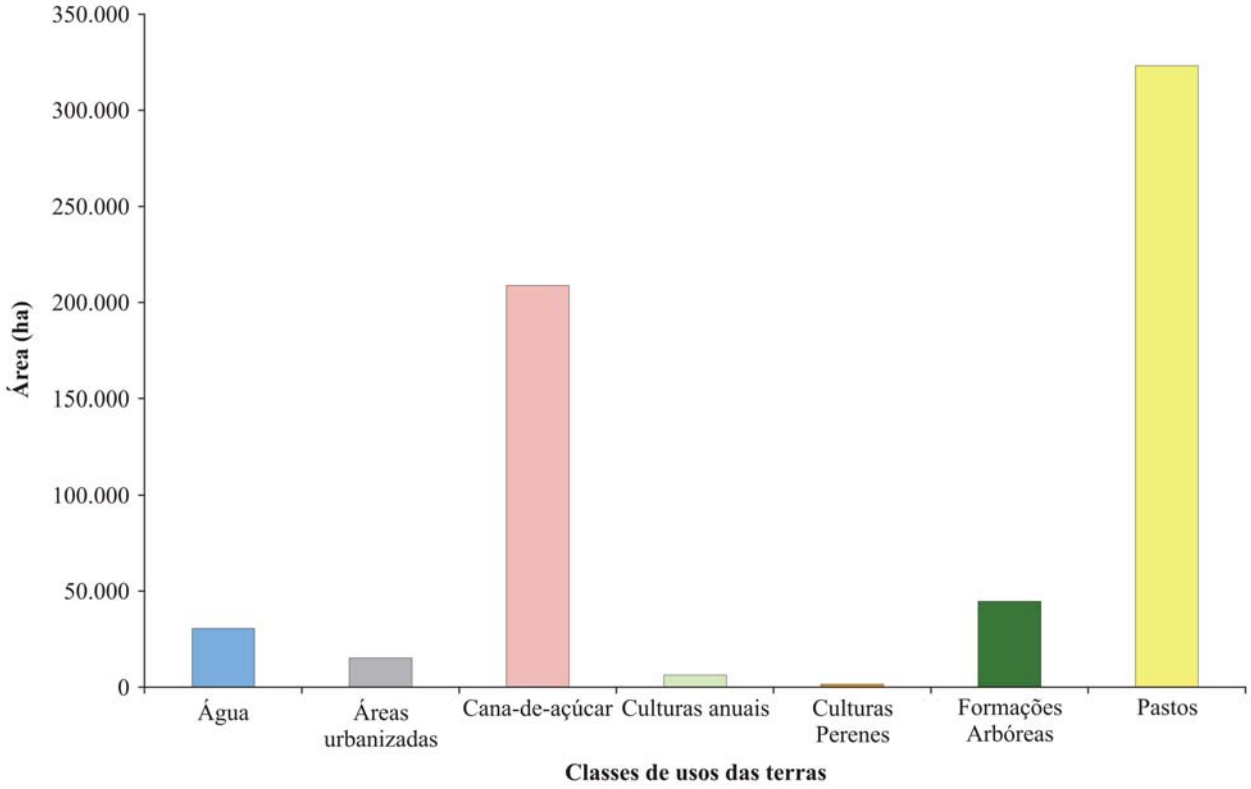

Figura 7.1 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2001, em hectares. Elaboração: S.F. Adami.

Ao longo do rio Tietê, ao norte, estão localizadas grandes represas para geração de energia elétrica. O relevo colinoso condicionou a existência de espelhos d'água grandes nas áreas inundadas pelas águas represadas e que, somadas a algumas represas menores ligadas aos usos

agrícolas, atingem quase 5% da área de estudos. Com 30.663 hectares ocupam maior área que os demais usos, com exceção da cana-de-açúcar e pastagens.

São 15.423 hectares, menos de 2,5% da área, a dimensão dos usos urbanos, concentrados nos grandes municípios Araçatuba, Birigui e Penápolis. Centros urbanos menores são representados por Avanhandava e Guararapes. Áreas urbanizadas são encontradas nas margens dos reservatórios de água e essas muito frequentemente apresentam dimensões iguais ou maiores que sedes municipais como Clementina ou Santópolis do Aguapeí.

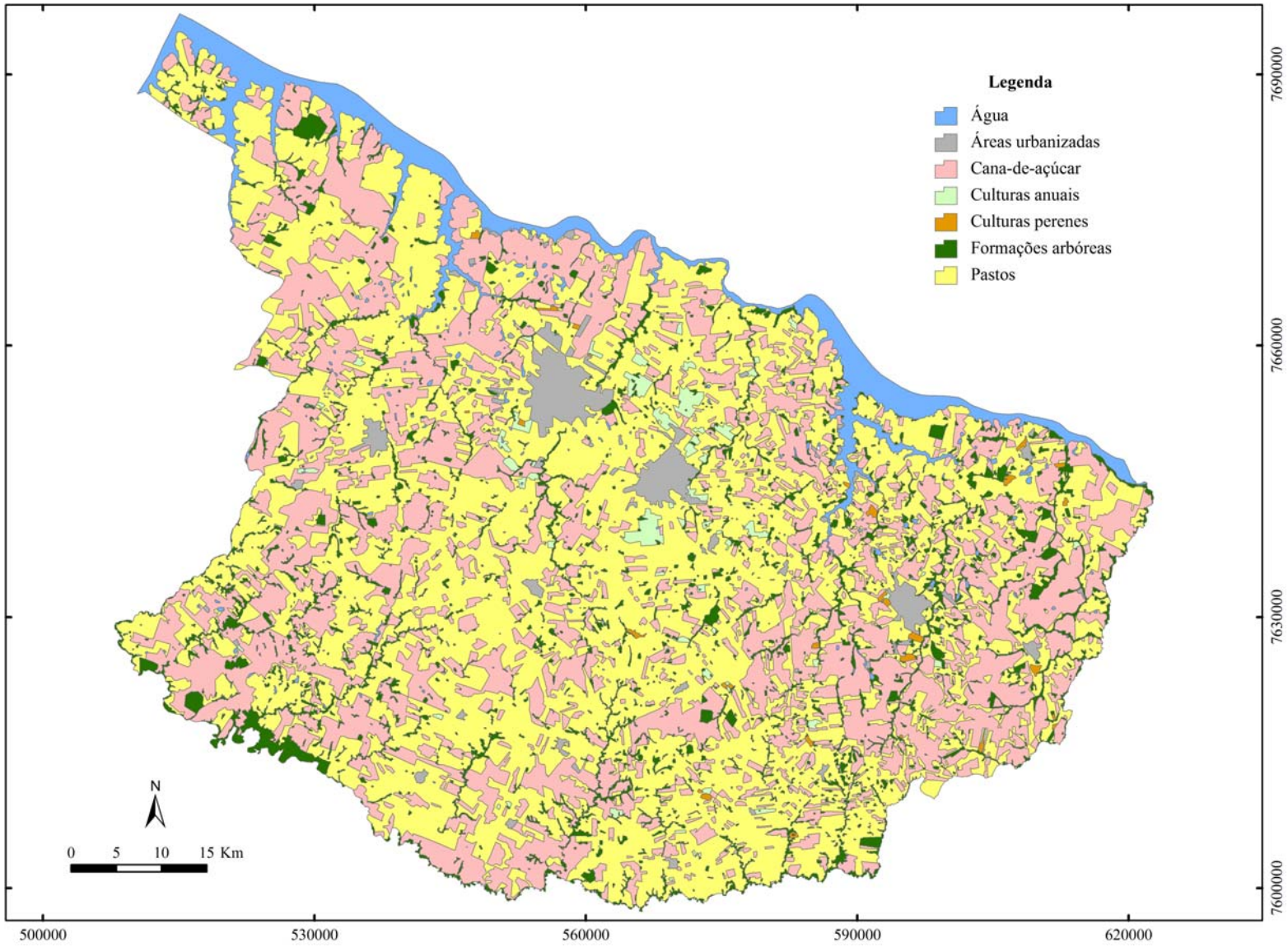

Figura 7.2 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2001 por interpretação visual. Elaboração: S.F. Adami.

O segundo período analisado representa a fase de grande expansão da cultura canavieira no Estado de São Paulo. Na área de estudos, em 2008, a superfície plantada com cana-de-açúcar somava 351.359 hectares (figura 7.3), aproximando-se de 56% da área, dominando completamente o mosaico de usos das terras. A expansão ocorreu em quase todas as direções, com destaque para as terras às margens dos reservatórios de água ao norte com relevo mais suave. Não obstante, pode ser identificado um palimpsesto da configuração espacial anterior, pois nas terras ao longo de eixo norte-sul entre Birigui e Piacatú a ampliação da cultura canavieira foi menor.

As pastagens, ocupando cerca de 29% da área, ou 180.854 hectares, apresentaram forte redução em sua extensão e deixaram de ser o uso das terras dominante na EDR de Araçatuba (figura 7.4). Sua distribuição espacial era caracterizada por manchas menores em relação àquela de 2001 e em linhas gerais ocupava os terrenos mais elevados.

Uma situação de estabilidade na superfície dedicada às formações arbóreas foi caracterizada no ano de 2008, pois totalizava 43.419 hectares, cerca de 7% da área, valor próximo daquele de 2001. A sua distribuição espacial também foi mantida e os maiores fragmentos mapeados em 2001 podem ser identificados no levantamento de 2008.

Culturas anuais e perenes mantiveram o mesmo padrão identificado na data inicial, apresentando flutuações decrescentes nas suas áreas com 6.067 hectares (~1%) e 1.065 hectares (~0,2%), respectivamente. Representam tipos de usos das terras relativamente pouco disseminados pela área de estudos e mantiveram a organização muito semelhante à situação levantada em 2001, ou seja, nas proximidades de áreas urbanizadas que, provavelmente, são os mercados consumidores de seus produtos.

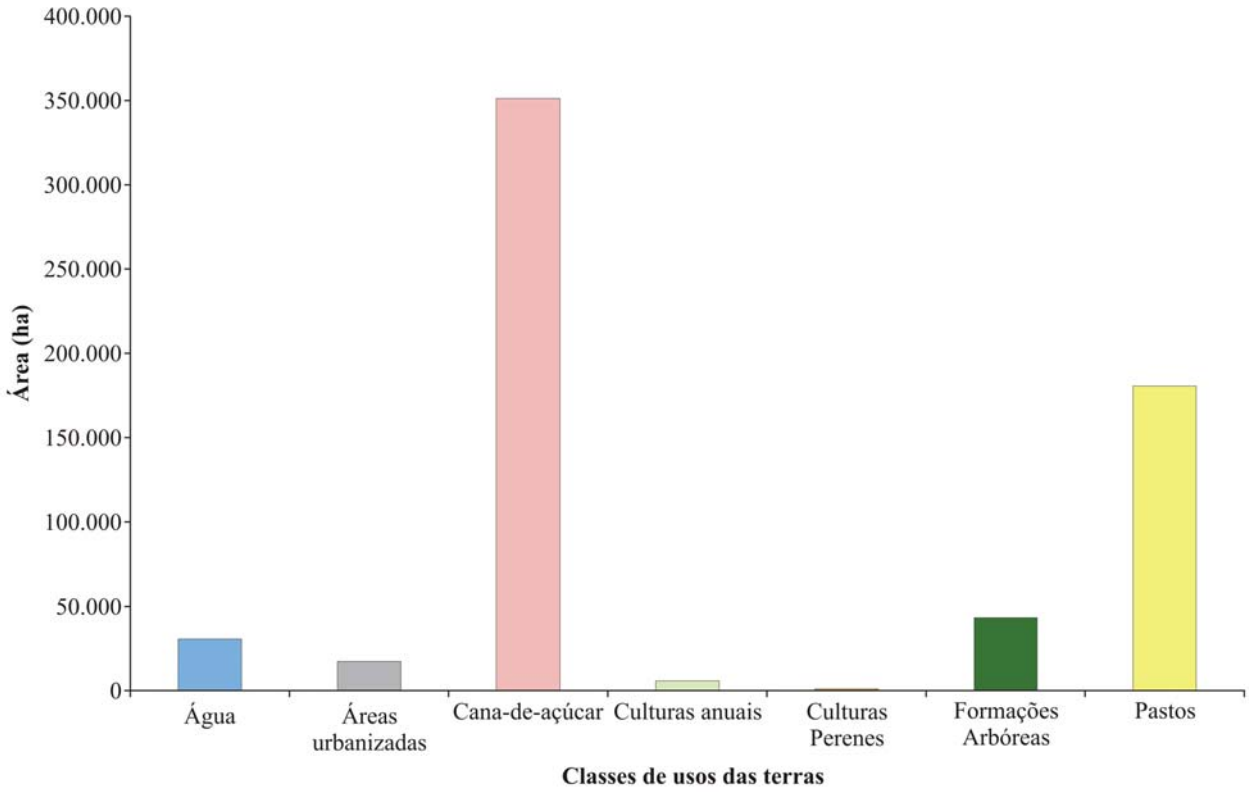

Figura 7.3 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares. Elaboração: S.F. Adami.

A extensão dos espelhos d'água dos reservatórios de água para geração de energia elétrica manteve-se estável no período, mas algumas alterações menores foram identificadas em represas menores ligadas aos usos agrícolas. O resultado é um acréscimo de 25 hectares na área ocupada por corpos d'água, atingindo 30.688 hectares, cerca de 5% da área total.

Para as áreas urbanizadas houve um crescimento nas superfícies ocupadas entre 2001 e 2008, passando de 2,5% para 2,8% da área total, alcançando 17.452 hectares. Essa dinâmica foi mais característica das cidades maiores, Araçatuba, Birigui e Penápolis, mas não excluiu as pequenas aglomerações urbanas. Nas margens dos reservatórios de água houve uma expansão marcante de condomínios, mas, devido à pequena extensão desse tipo de urbanização em relação ao território total da EDR, seu impacto sobre os valores foi pequeno.

Pelo cruzamento entre os mapas levantados para 2001 e 2008 foram identificadas as alterações nos usos das terras ocorridas durante o período (tabela 7.1). Esses dados compõem a

matriz de áreas de transição entre usos empregada nos processos de modelagem com autômatos celulares, em todos os processamentos.

Tabela 7.1 – Alterações nos usos das terras na EDR de Araçatuba entre 2001 e 2008, número de *pixels*. Elaboração: S.F. Adami.

		Mapa de usos de 2008						
		AG	*AU*	*CN*	*CA*	*CP*	*FA*	*PT*
Mapa de usos de 2001	*AG*	85.118	0	49	0	0	0	7
	AU	0	42.716	51	0	0	1	75
	CN	13	1.248	522.430	392	2	351	55.443
	CA	0	21	2.337	14.311	26	12	961
	CP	0	35	110	326	2.797	116	1.068
	FA	46	44	2.918	7	1	118.160	3.204
	PT	67	4.414	448.013	1.816	131	1.967	441.605

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas e, PT = pastos.

Ao longo da diagonal está determinado o número de células que mantiveram o mesmo tipo de uso das terras entre 2001 e 2008. Os outros valores identificam as alterações entre as classes de usos e permitem determinar a direção nas mudanças. Em linhas gerais, a estabilidade entre as datas é considerável, com exceção das classes de uso cana-de-açúcar e pastos.

Tais alterações não se deram apenas em uma direção, pois mesmo que a maior proporção do crescimento da cultura canavieira tenha ocorrido a expensas das pastagens, podem ser identificadas áreas de plantio de cana-de-açúcar que deram lugar aos pastos, em 55.443 células, ou aproximadamente 19.960 hectares (figura 7.5).

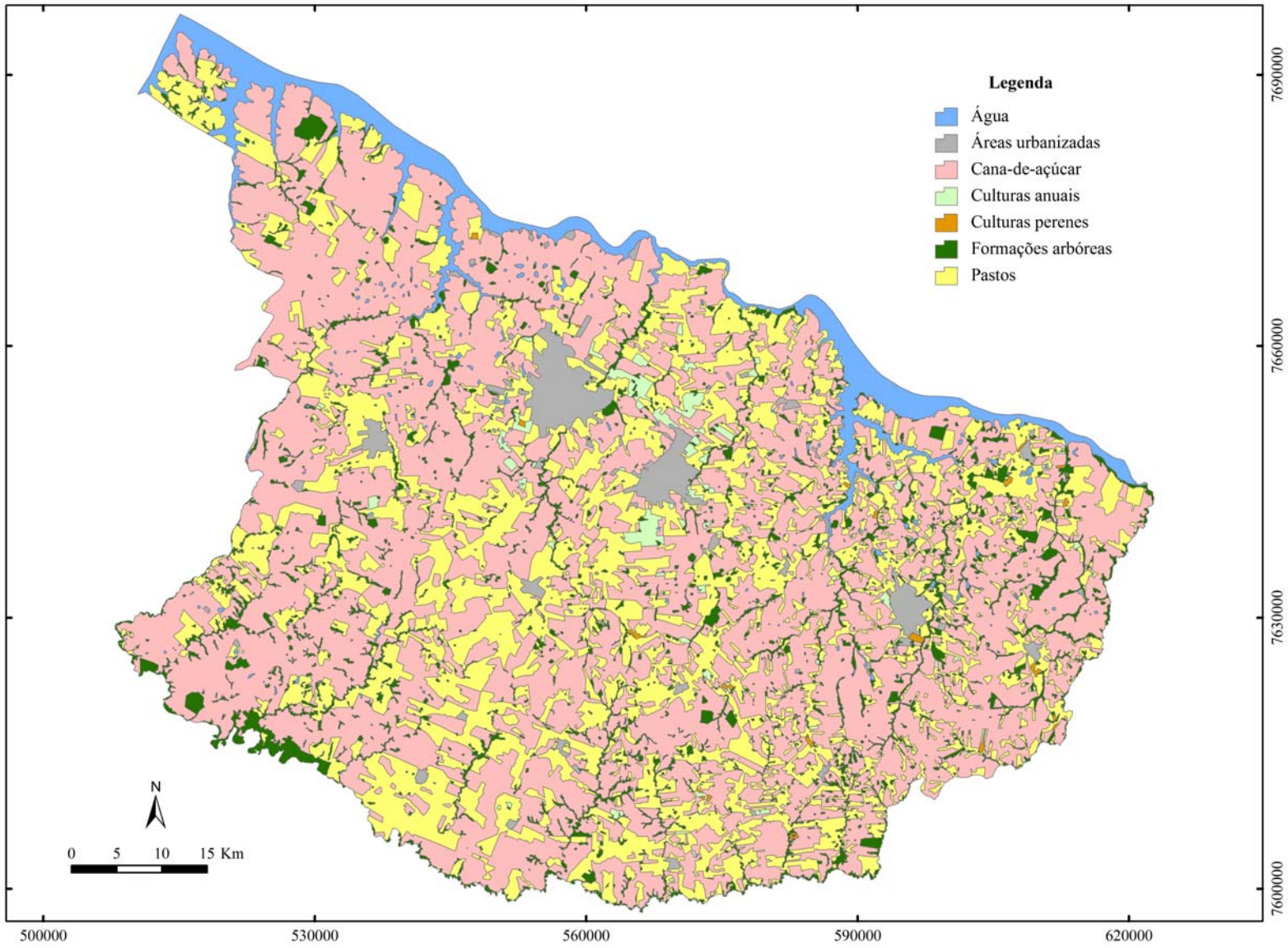

Figura 7.4 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008 por interpretação visual. Elaboração: S.F. Adami.

Alguns valores de transição são derivados de erros durante o processo de mapeamento. As fontes desses erros são diversas, tais como a identificação incorreta do tipo de uso por parte do analista, imprecisões no delineamento das unidades de mapeamento, pequenas alterações decorrentes do processo de georreferenciamento dos dados de sensoriamento remoto, mudanças na geometria do plano de informações pelo processo de transformação entre os formatos vetorial e matricial. Como resultados desses vários efeitos deletérios sobre os dados podem ser identificadas alterações pouco prováveis, como em células que foram mapeadas como áreas urbanizadas em 2001 e, em 2008, classificadas como cana-de-açúcar, pastos ou formações arbóreas. Muitas vezes, tais imprecisões são inferiores a um hectare (tabela 7.2) e suas pequenas dimensões não comprometem os processos de modelagem. Na matriz de transição de áreas esses valores espúrios foram mantidos, pois na comparação dos resultados das simulações esses problemas estariam incorporados aos dados de referência (mapa 2008).

Tabela 7.2 – Alterações nos usos das terras na EDR de Araçatuba entre 2001 e 2008, em hectares. Elaboração: S.F. Adami.

		Mapa de usos de 2008							
		AG	*AU*	*CN*	*CA*	*CP*	*FA*	*PT*	*Total*
Mapa de usos de 2001	*AG*	30.642	0	18	0	0	0	3	*30.663*
	AU	0	15.378	18	0	0	0	27	*15.423*
	CN	5	449	188.075	141	1	126	19.959	*208.756*
	CA	0	8	841	5.152	9	4	346	*6.360*
	CP	0	13	40	117	1.007	42	384	*1.603*
	FA	17	16	1.050	3	0	42.538	1.153	*44.777*
	PT	24	1.589	161.285	654	47	708	158.978	*323.285*
	Total	*30.688*	*17.452*	*351.327*	*6.067*	*1.065*	*43.419*	*180.851*	

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas e, PT = pastos.

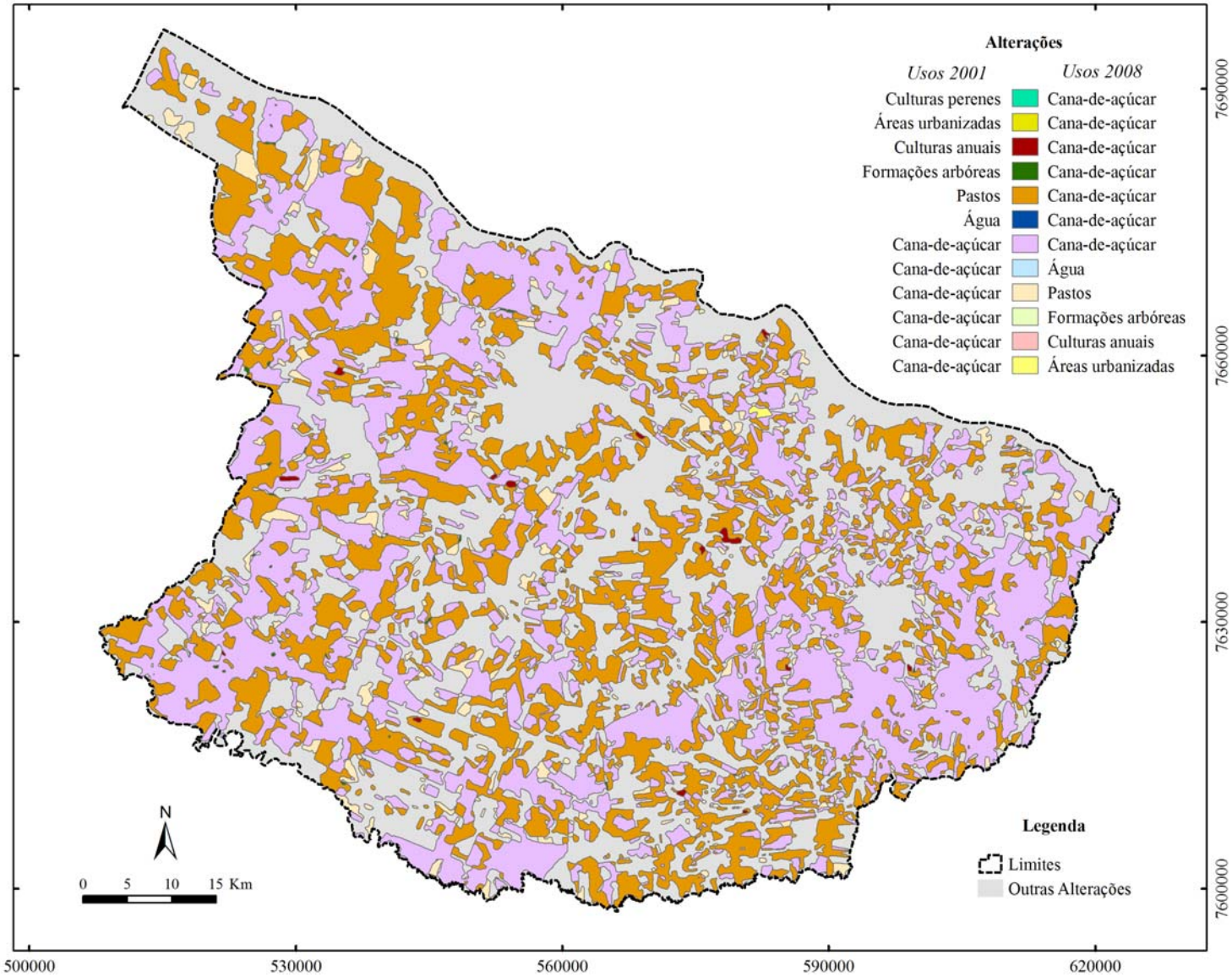

Figura 7.5 – Mapa de diferenças entre 2001 e 2008 para a cana-de-açúcar. Elaboração: S.F. Adami.

O plantio de *Saccharum officinarum* expandiu-se especialmente sobre as áreas de pastagens, pois cerca de 161.300 hectares de pastos foram transformados em áreas da cultura canavieira. Sobre culturas anuais e perenes, o impacto foi menor, em parte, pois se tratam de áreas pequenas e que abastecem o mercado local, gerando mais rendimento que sua conversão para a gramínea açucareira.

Os 161.285 hectares de pastos que deram lugar à cana-de-açúcar representam um acréscimo de quase 86% em relação aos 188.075 hectares que já estavam destinados à cultura canavieira. Por outro lado, cerca de 10% da área original ligada à produção de cana-de-açúcar foi transformada em pastagens.

Em relação às formações arbóreas, aproximadamente 1.000 hectares foram convertidos para produzir matéria-prima para as usinas e o impacto das pastagens não foi muito diverso, pois cerca de 1.100 hectares de fragmentos arbóreos deram lugar a pastagens.

A expansão da cultura canavieira pode estar se aproximando de um limiar superior, pois alterações nos usos das terras com a intensidade demonstrada no período de estudo são drásticas e fruto de expectativas de retorno financeiro que apenas uma situação de renovado entusiasmo poderia despertar. Em 2009, uma crise econômica parece ter imposto uma diminuição no ritmo de crescimento da indústria sucroalcooleira, mas pressões para abertura ou a flexibilização da entrada de etanol combustível no mercado norte-americano em 2011 podem levar à retomada do crescimento dos plantios de cana-de-açúcar, em especial se forem implantadas novas usinas ou destilarias na EDR de Araçatuba.

7.2 Modelos autômatos celulares e métodos multicriteriais

Na avaliação dos critérios de decisão pelos especialistas, os pesos em geral concentraram-se em uma faixa intermediária a alta (tabela 7.3) em uma escala que variava de 0 a 10. Dois respondentes são gestores de usinas e suas respostas estão destacadas na tabela 7.3. Entre os especialistas estão profissionais ligados à economia agrícola (1), geoprocessamento (2), irrigação e recursos hídricos (1), geografia rural (1), pedologia (3), climatologia (2), e conservação do solo (1), totalizando 11 respondentes. A participação dos gestores das usinas, entretanto, foi baixa (tabela 7.4).

Ocorreu apenas uma omissão em relação ao critério 10, na qual o especialista não atribuiu peso algum à condição de áreas de preservação permanente ao considerar sua importância para seleção das terras para cultivo da cana-de-açúcar. Nenhum dos critérios recebeu nota zero de qualquer dos respondentes, de forma que todos os critérios apresentariam alguma relevância frente ao objeto de alocação da cultura canavieira para o grupo.

Tabela 7.3 – Pesos atribuídos e valores de média e média expurgada.

No.	**Especialistas**													$\bar{x}$	$\bar{x}^*$
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*	*L*	*M*		
1	8	7	9	8	5	9	8	10	8	10	8	6	8	*8.0*	*8.1*
2	6	8	5	7	2	8	7	8	8	6	9	8	10	*7.1*	*7.5*
3	9	10	6	5.5	5	6	6	6	7	8	10	10	10	*7.6*	*6.9*
4	9	8	6	7	6	6	6	8	9	10	8	2	6	*7.0*	*7.2*
5	8	9	9	9	7	7	8	8	9	9	7	9	10	*8.4*	*8.7*
6	7	9	8	10	10	10	9	8	9	8	7	9	7	*8.5*	*8.6*
7	7	8	7	8	8	8	9	10	10	3	5	3	8	*7.2*	*7.6*
8	5	7	7	6.5	6	8	8	4	10	7	6	2	8	*6.5*	*6.9*
9	8	5	4	9	9	8	9	8	10	4	7	5	5	*7.0*	*7.3*
10	8	10	6	10	9	8	9	10	10	3	6	__	7	*8.0*	*8.5*
11	7	7	8	5.5	7	5	5	8	5	10	10	9	7	*7.2*	*7.1*
12	6	6	6	5.5	6	5	5	6	5	8	8	3	7	*5.9*	*5.8*
13	6	2	5	6.5	5	8	9	4	6	8	5	3	10	*6.0*	*5.9*
14	6	4	5	7.5	6	8	7	4	7	8	6	9	10	*6.7*	*6.7*
15	7	4	3	5	3	8	7	4	6	7	5	4	5	*5.2*	*4.7*

Obs. $\bar{x}^*$ - média expurgada.

Tabela 7.4 – Participação por categoria de informante.

Categoria	*Enviados*	*Respondentes*	*Não-respondentes*
Gestores de usinas	15	2	13
Pesquisadores e especialistas	15	11	4

Os critérios que apresentaram maior peso normalizado foram declividade do terreno (5), zoneamento agroambiental (6), áreas de preservação permanente (10) e classes de solos (1). Em uma zona de importância intermediária estão proximidade de unidades de conservação (7), usos atuais das terras (2), proximidade de corpos d'água (9), proximidade da malha viária (4), custo da terra (11), proximidade da usina (3), proximidade de centros urbanos (8) e disponibilidade de mão-de-obra (14). Receberam pesos menores: nível de treinamento da mão-de-obra (13), custo da mão-de-obra (12) e (15) nível de desenvolvimento do município (figura 7.6).

Os pesos elevados atribuídos aos critérios declividade e classes de solo são esperados, pois as operações de máquinas agrícolas tornam-se difíceis em vertentes com maiores inclinações, sendo consideradas perigosas acima do limite de 16%. A produtividade da cana-de-açúcar e as práticas de conservação do solo têm forte relação com os atributos pedológicos.

Valores intermediários conferidos aos critérios de distância da usina e distância da malha viária fogem ao quadro que teoricamente poderia ser estruturado, pois tanto os custos de produção agrícola são dependentes da distância entre o plantio e a usina, quanto o tempo para o processamento da cana é importante para a produção de etanol.

A elevada importância outorgada às áreas de preservação permanente e ao zoneamento agroambiental, que não necessariamente influenciam a produtividade agrícola e os retornos econômicos da cultura, podem ser considerados reflexos da atual busca do rótulo de combustível "verde". Essa qualificação serviria para fragilizar a retórica contrária ao etanol brasileiro nos mercados norte-americano e europeu, de ocupação indiscriminada das terras.

Os pesos atribuídos aos critérios permitem a incorporação das preferências dos gestores das usinas e do conhecimento dos especialistas. Por meio da aplicação do método de programação por compromisso associado ao modelo autômato celular para identificação de áreas mais adequadas ao plantio de cana-de-açúcar, resultou-se na distribuição de 361.444 hectares (~57%) para essa cultura (figura 7.7) em 2008.

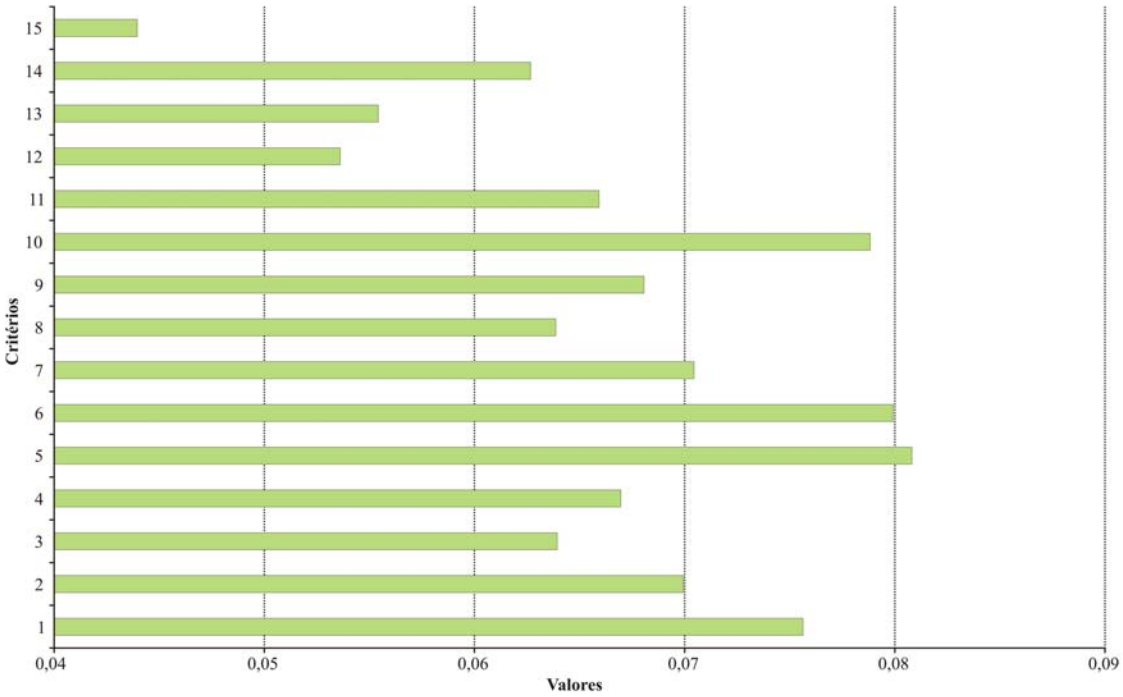

Figura 7.6 – Distribuição dos pesos normalizados dos critérios de avaliação. Elaboração: S.F. Adami.

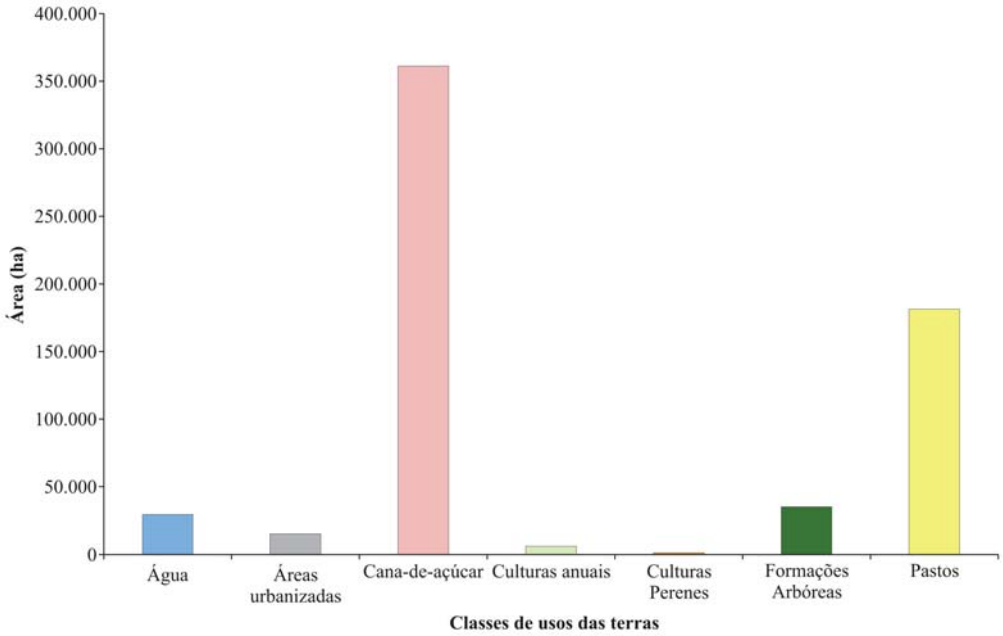

Figura 7.7 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC com regras derivadas pelo método programação por compromisso. Elaboração: S.F. Adami.

As pastagens somaram 181.543 hectares, cerca de 29% da área de estudos, enquanto para as formações arbóreas o modelo atribuiu 35.335 hectares (~6%). Culturas anuais e perenes estavam distribuídas em 6.049 (1%) e 1.235 (0,2%) hectares, respectivamente.

No processo de modelagem a classe de água recebeu 29.603 hectares, ou quase 5% do território, e as áreas urbanizadas atingiram 15.311 hectares (~2,4%). Esses valores são próximos dos registrados pelo mapa de usos das terras de 2008, levantado por interpretação visual, mas a distribuição espacial apresenta variações marcantes (figura 7.8).

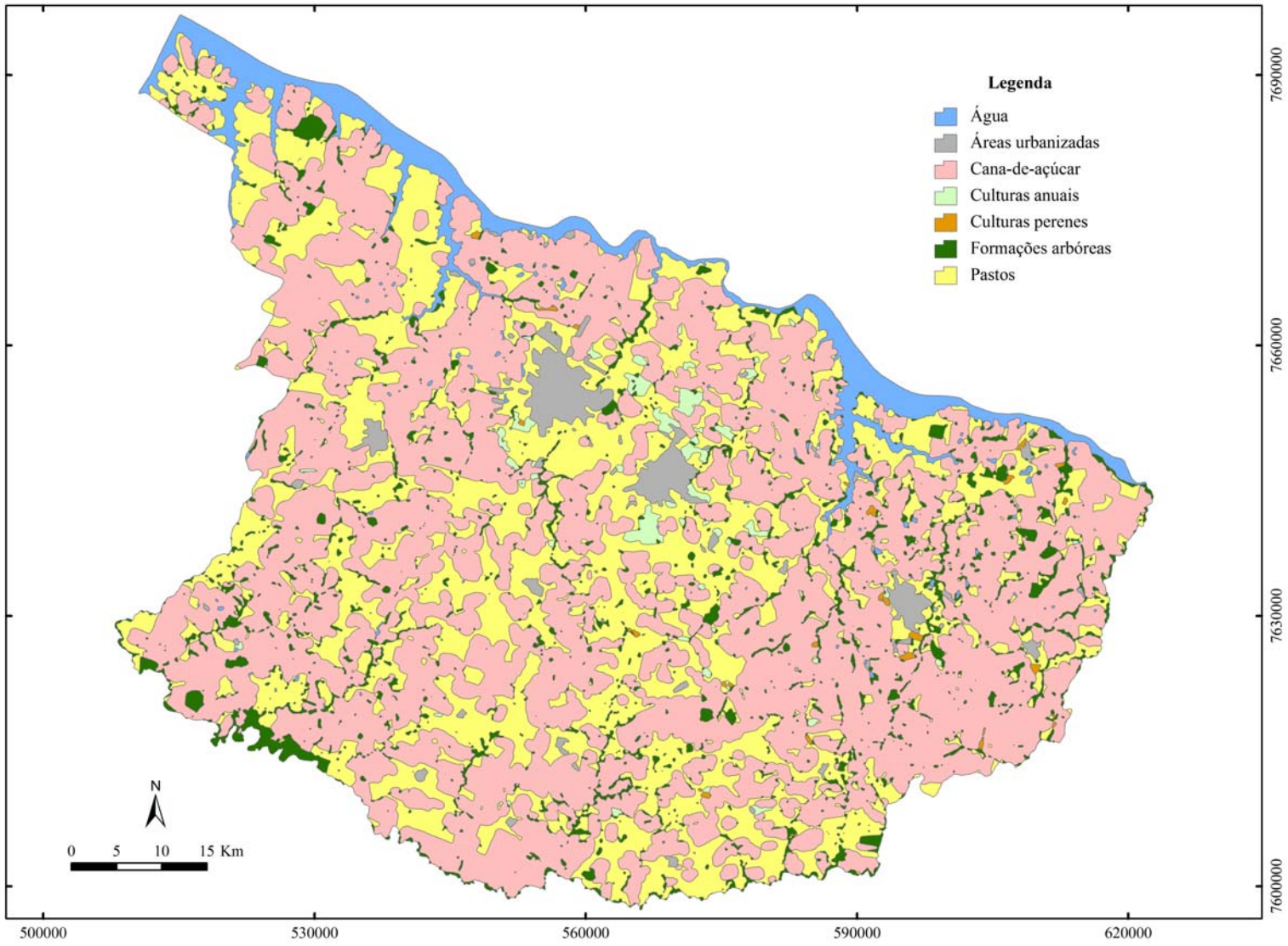

Figura 7.8 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC com regras derivadas pelo método programação por compromisso. Elaboração: S.F. Adami.

O mapa simulado incorporando os resultados da programação por compromisso é caracterizado por áreas maiores e com limites mais simples em relação aos dados de referência de 2008. Entretanto, a distribuição espacial geral da área é mantida com as pastagens predominando no eixo norte-sul entre Birigui e Piacatú, e no sudeste, no município de Alto Alegre.

Por meio do cruzamento do mapa de usos das terras de 2008 e dos resultados do modelo autômato celular embasado pelo método da programação por compromisso, obteve-se a matriz de erros (tabela 7.5). Cerca de 75% das células classificadas como cana-de-açúcar no mapa de 2008 foram adequadamente alocadas pelo modelo e as maiores divergências ocorrem em relação à classe de pastos. Tanto áreas plantadas com cana-de-açúcar foram classificadas como pastagens, quanto células dedicadas a pastos foram equivocadamente alocadas como pertencentes à cultura canavieira. Em 24% dos casos erros dessa natureza ocorreram (figura 7.9).

Tabela 7.5 – Matriz de erro entre o mapa de uso das terras de 2008 e a programação por compromisso associada ao modelo AC. Elaboração: S.F. Adami.

		Modelo AC + Programação por compromisso						
		AG	*AU*	*CN*	*CA*	*CP*	*FA*	*PT*
Mapa de usos de 2008	*AG*	85.104	2	60	0	6	44	28
	AU	0	42.677	1.554	131	29	48	4.039
	CN	91	1.286	736.006	2.284	122	3.448	232.671
	CA	0	3	1.804	12.189	238	74	2.544
	CP	0	25	21	36	1.971	696	208
	FA	3	3.671	2.575	12	61	112.686	1.599
	PT	53	814	233.897	1.896	821	3.610	261.272

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas e, PT = pastos.

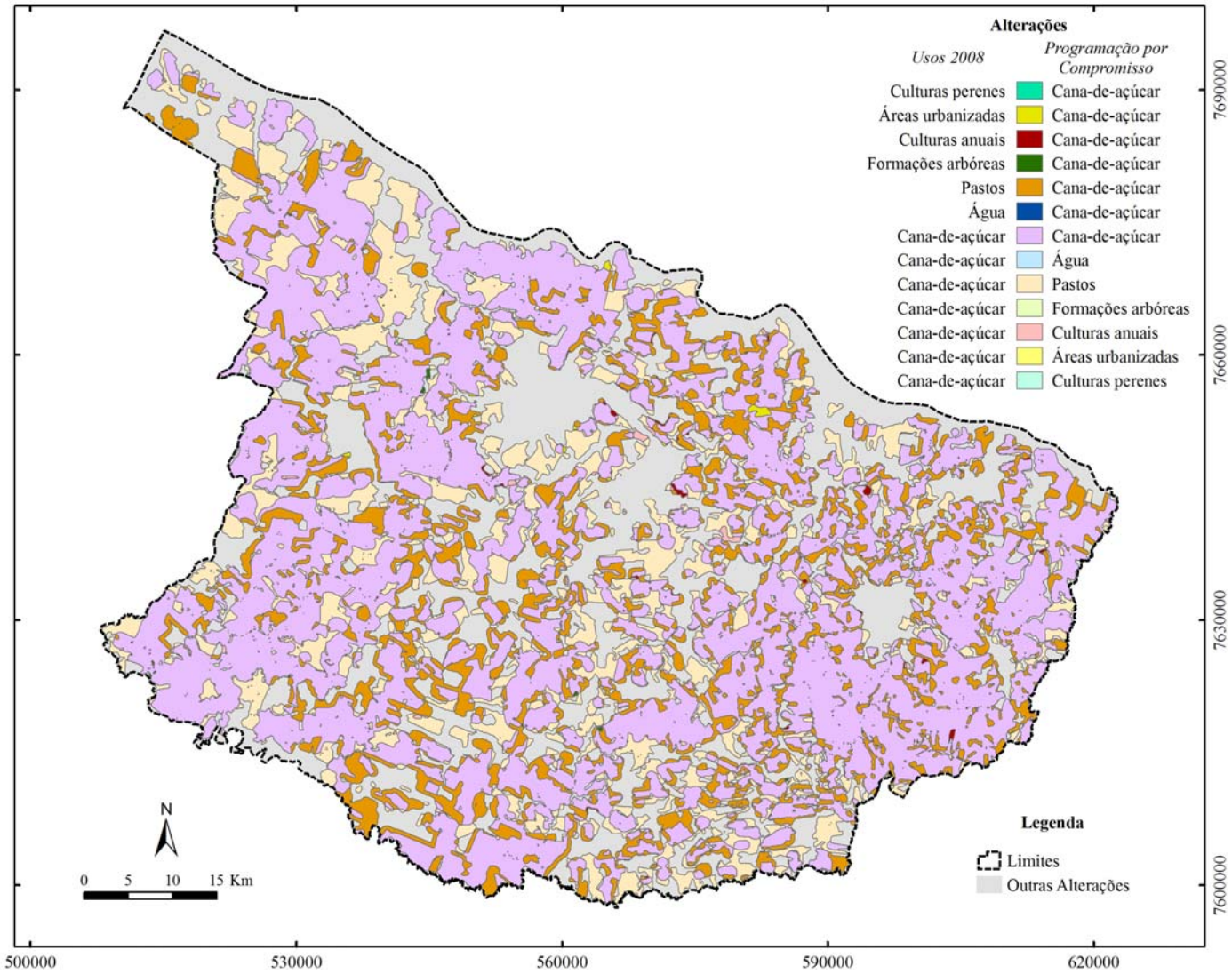

Figura 7.9 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado à programação por compromisso para a cana-de-açúcar. Elaboração: S.F. Adami.

As classes de usos de água, áreas urbanas e formações arbóreas apresentaram resultados de maior qualidade, provavelmente em decorrência da forma de tratamento dos planos de informações que representavam as suas probabilidades de transição e da estabilidade de suas áreas de ocorrência. Culturas anuais e perenes obtiveram acurácia próxima à da cana-de-açúcar, e os erros maiores estão ligados à confusão com pastos e a cultura canavieira. A alocação de células para pastagens apresentou a menor qualidade entre todas as classes, com apenas 52% da área adequadamente classificada.

A abordagem alternativa foi a aplicação do modelo autômato celular e das prioridades derivadas pela aplicação da teoria dos jogos cooperativos. Em linhas gerais, os resultados dessa visão não diferem amplamente da aplicação da programação por compromisso em termos de distribuição de áreas (figura 7.10) ou na sua distribuição espacial (figura 7.11).

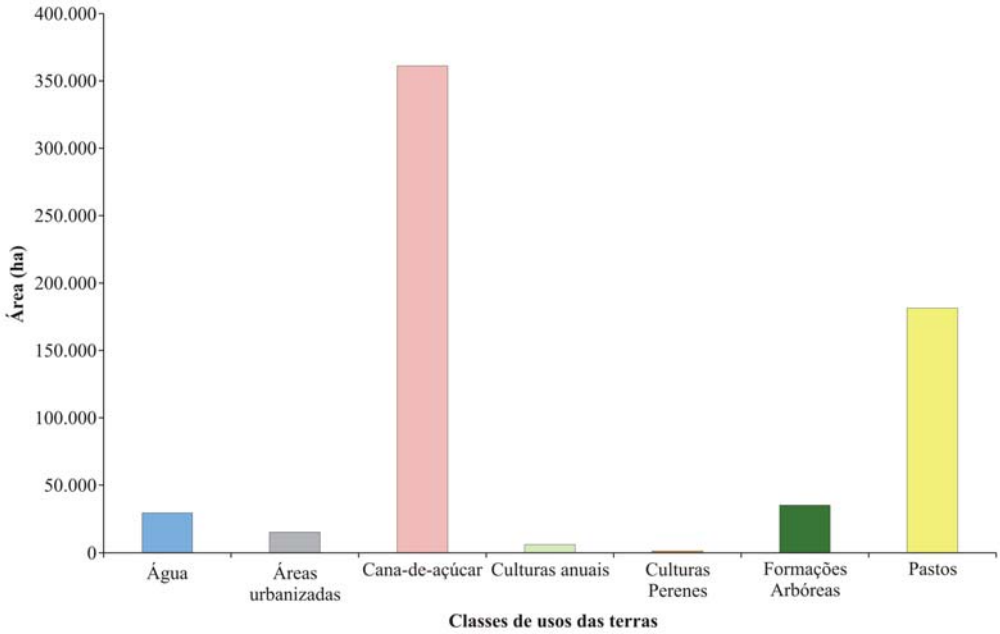

Figura 7.10 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC com regras derivadas pelo método teoria dos jogos cooperativos. Elaboração: S.F. Adami.

A proporção na distribuição das áreas entre as classes de usos é controlada pela matriz de áreas de transição. Como a mesma matriz foi aplicada a todas as alternativas de simulação

pode-se considerar adequado que a alocação de células aos diversos usos seja semelhante nas duas abordagens.

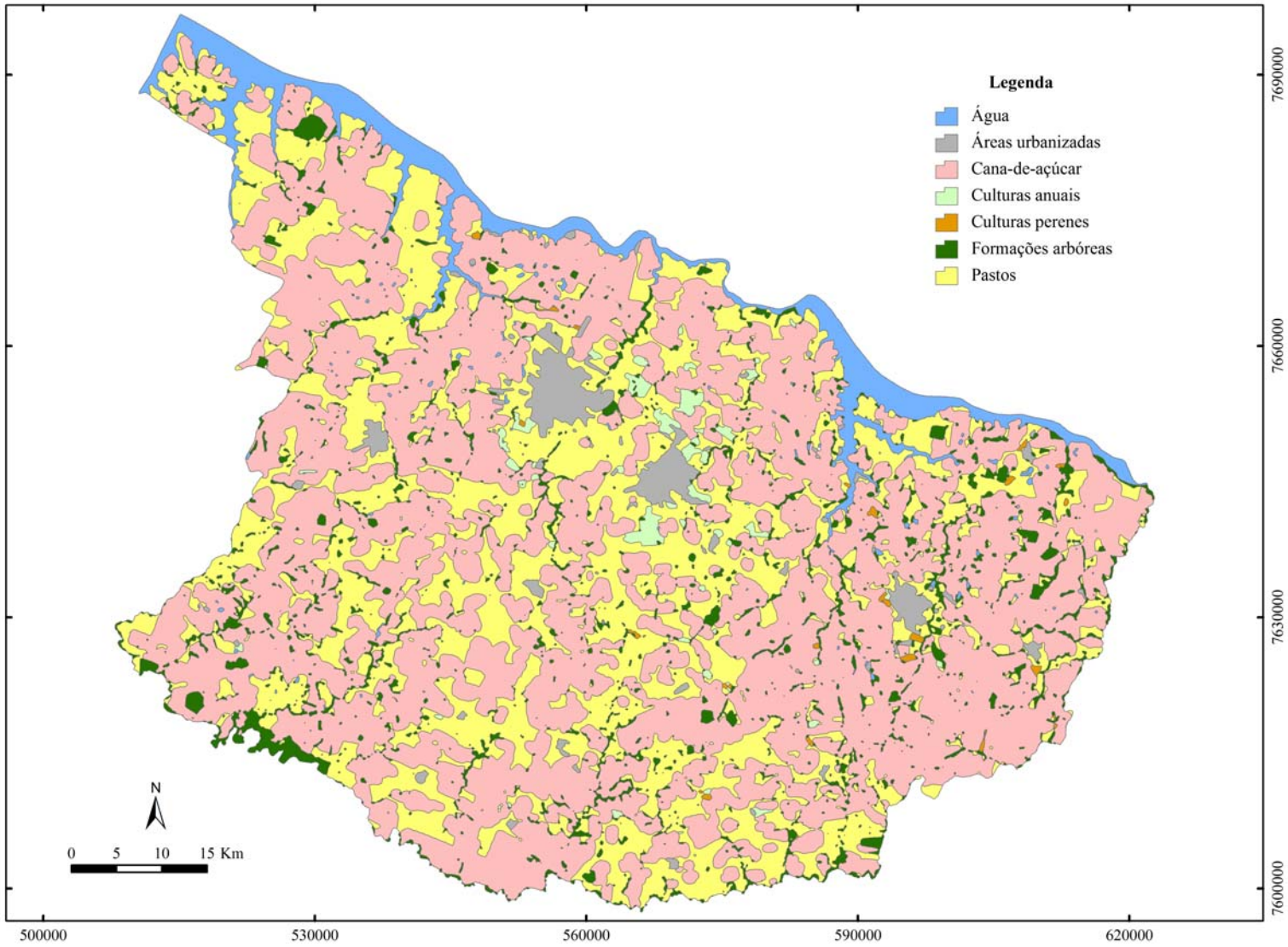

Figura 7.11 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC com regras derivadas pelo método teoria dos jogos cooperativos. Elaboração: S.F. Adami.

A implantação espacial do modelo apresenta mudanças em relação àquelas da programação por compromisso apenas em detalhes do mapa, pois sua configuração geral é semelhante.

Na matriz de erros entre o mapa de 2008 e a simulação segundo as prioridades dadas pela teria dos jogos cooperativos (tabela 7.6) pode-se perceber a grande similaridade com os resultados da aplicação do procedimento anterior. A mesma distribuição geral dos acertos e erros é mantida, com a cultura canavieira adequadamente classificada em 75% dos casos, com a maior parte dos erros para essa classe decorrente da alocação indevida de células plantadas com cana-de-açúcar à classe de pastagens e o contrário (figura 7.12). A eficiência do modelo para a alocação das outras classes é semelhante ao método da programação por compromisso.

Tabela 7.6 – Matriz de erro entre o mapa de uso das terras de 2008 e a teoria dos jogos cooperativos associada ao modelo AC. Elaboração: S.F. Adami.

		Modelo AC + teoria dos jogos cooperativos						
		AG	*AU*	*CN*	*CA*	*CP*	*FA*	*PT*
Mapa de usos de 2008	*AG*	85.104	0	59	0	6	47	28
	AU	0	42.673	1.606	129	26	52	3.992
	CN	92	1.270	733.626	2.339	118	3.465	234.998
	CA	0	3	1.836	12.159	236	80	2.538
	CP	1	16	18	38	1.970	702	212
	FA	4	3.693	2.631	12	52	112.649	1.566
	PT	50	822	236.143	1.871	840	3.612	259.025

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas e, PT = pastos.

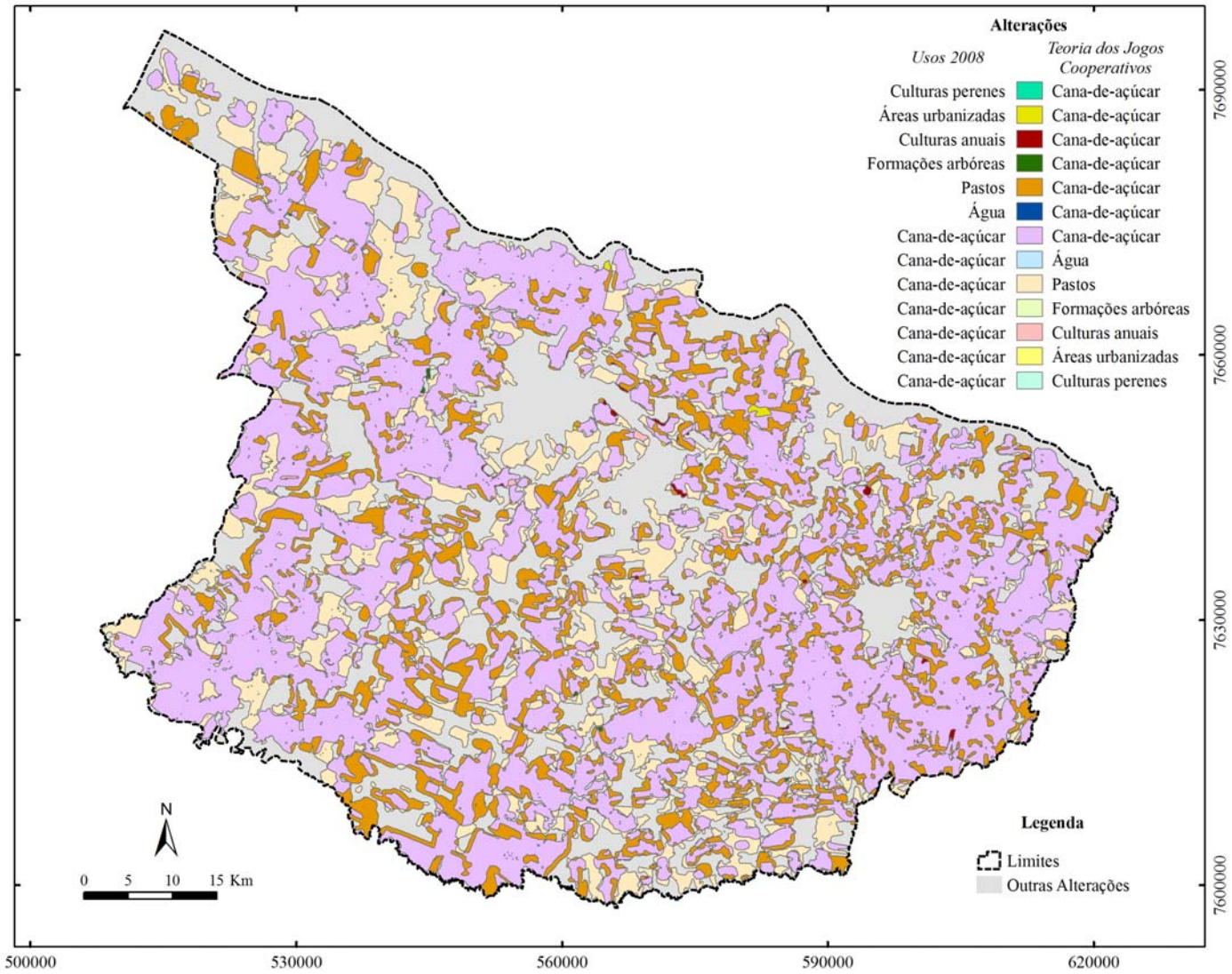

Figura 7.12 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado à teoria dos jogos cooperativos para a cana-de-açúcar. Elaboração: S.F. Adami.

7.3 Aplicações da capacidade de uso das terras padronizada e probabilidades markovianas

Os resultados obtidos pelos métodos mais tradicionais aproximam-se bastante em termos numéricos daqueles obtidos pela proposta metodológica. A utilização da mesma matriz de áreas de transição para todas as simulações responde por essa característica na aplicação dos diferentes métodos. Desse modo, a matriz de erros para o modelo autômato celular embasado pela capacidade de usos das terras (tabela 7.7) e para o método dependente da aplicação de cadeias de Markov (tabela 7.8) demonstram resultados semelhantes.

Tabela 7.7 – Matriz de erro entre mapa de uso das terras de 2008 e resultado do modelo AC apoiado pela capacidade de usos das terras. Elaboração: S.F. Adami.

		Modelo AC + capacidade de uso das terras padronizado						
		AG	*AU*	*CN*	*CA*	*CP*	*FA*	*PT*
Mapa de usos de 2008	*AG*	85.080	0	89	0	0	42	33
	AU	0	43.856	2.823	20	25	40	1.714
	CN	98	1.747	705.881	2.071	122	4.448	261.541
	CA	0	24	1.738	11.802	259	8	3.021
	CP	1	7	792	21	1.971	11	154
	FA	44	61	3.931	1.740	45	112.581	2.205
	PT	28	2.783	260.662	894	826	3.477	233.693

Tal grau de concordância entre os modelos reflete-se na distribuição semelhante de áreas entre as classes de usos das terras pelos dois métodos. Não são identificadas diferenças marcantes na aplicação da capacidade de usos das terras (figura 7.13) e das cadeias de Markov (figura 7.14).

Tabela 7.8 – Matriz de erro entre mapa de uso das terras de 2008 e resultado do modelo AC apoiado pelas cadeias de Markov. Elaboração: S.F. Adami.

		Modelo AC + cadeias de Markov						
		AG	*AU*	*CN*	*CA*	*CP*	*FA*	*PT*
Mapa de usos de 2008	*AG*	85.082	1	78	4	0	42	37
	AU	0	45.588	1.727	19	17	42	1.085
	CN	107	211	706.895	2.204	79	4.839	261.573
	CA	0	72	1.663	11.558	274	11	3.274
	CP	0	21	693	26	2.069	1	147
	FA	45	73	3.962	1.829	42	112.454	2.202
	PT	17	2.512	260.898	908	767	3.218	234.043

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas e, PT = pastos.

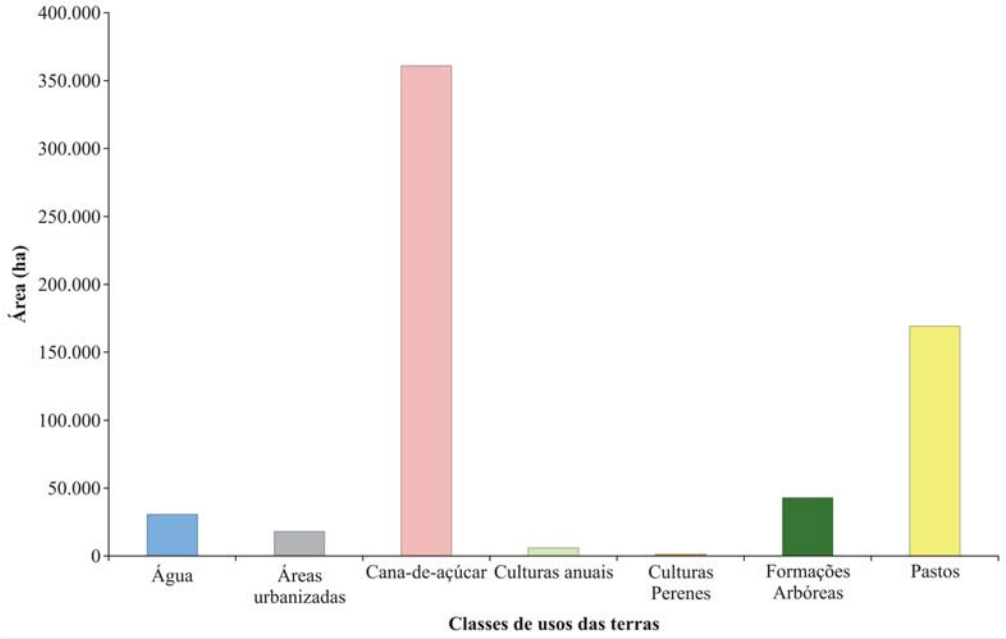

Figura 7.13 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC apoiado pela capacidade de usos das terras. Elaboração: S.F. Adami.

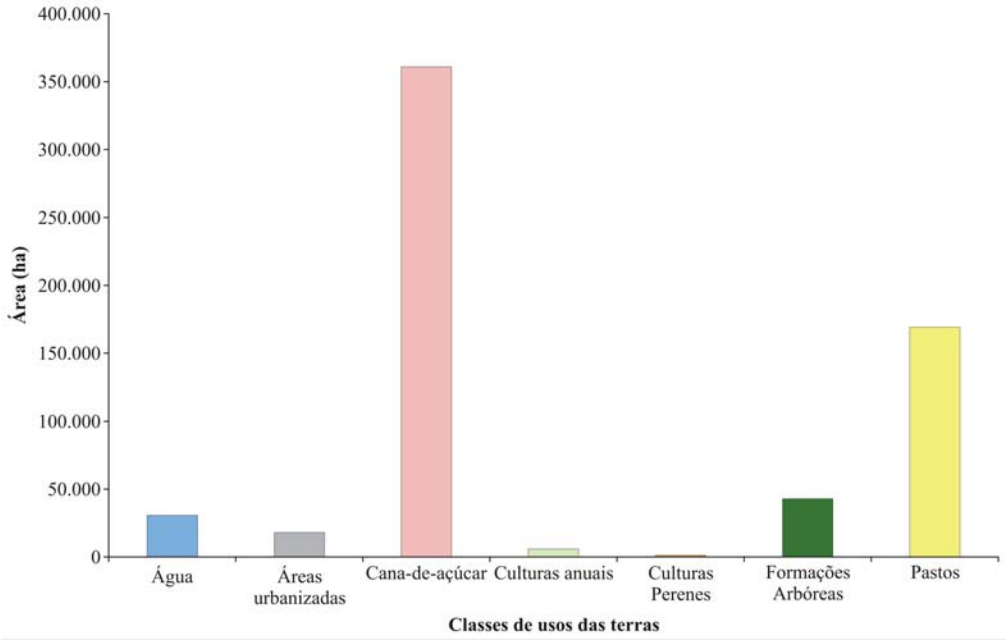

Figura 7.14 – Usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, em hectares, segundo o modelo AC apoiado pelas cadeias de Markov. Elaboração: S.F. Adami.

Entretanto, esse grau de semelhança entre os modelos esconde diferenças de alocação no espaço das classes de usos das terras. A aplicação da capacidade de usos das terras (figuras 7.15 e 7.17) e das cadeias de Markov (figuras 7.16 e 7.18) geraram mapas semelhantes entre si, mas não idênticos.

Caracteristicamente, as áreas destinadas aos pastos são pequenas e com limites de grande complexidade, enquanto a cana-de-açúcar forma a matriz da área de estudos. Áreas urbanizadas, água e culturas perenes e anuais mantêm distribuição dependente do mapa inicial. As formações arbóreas diferem entre os dois métodos, pois no modelo markoviano essa classe é apresentada às margens de áreas de pastagens, de maneira semelhante a cercas vivas.

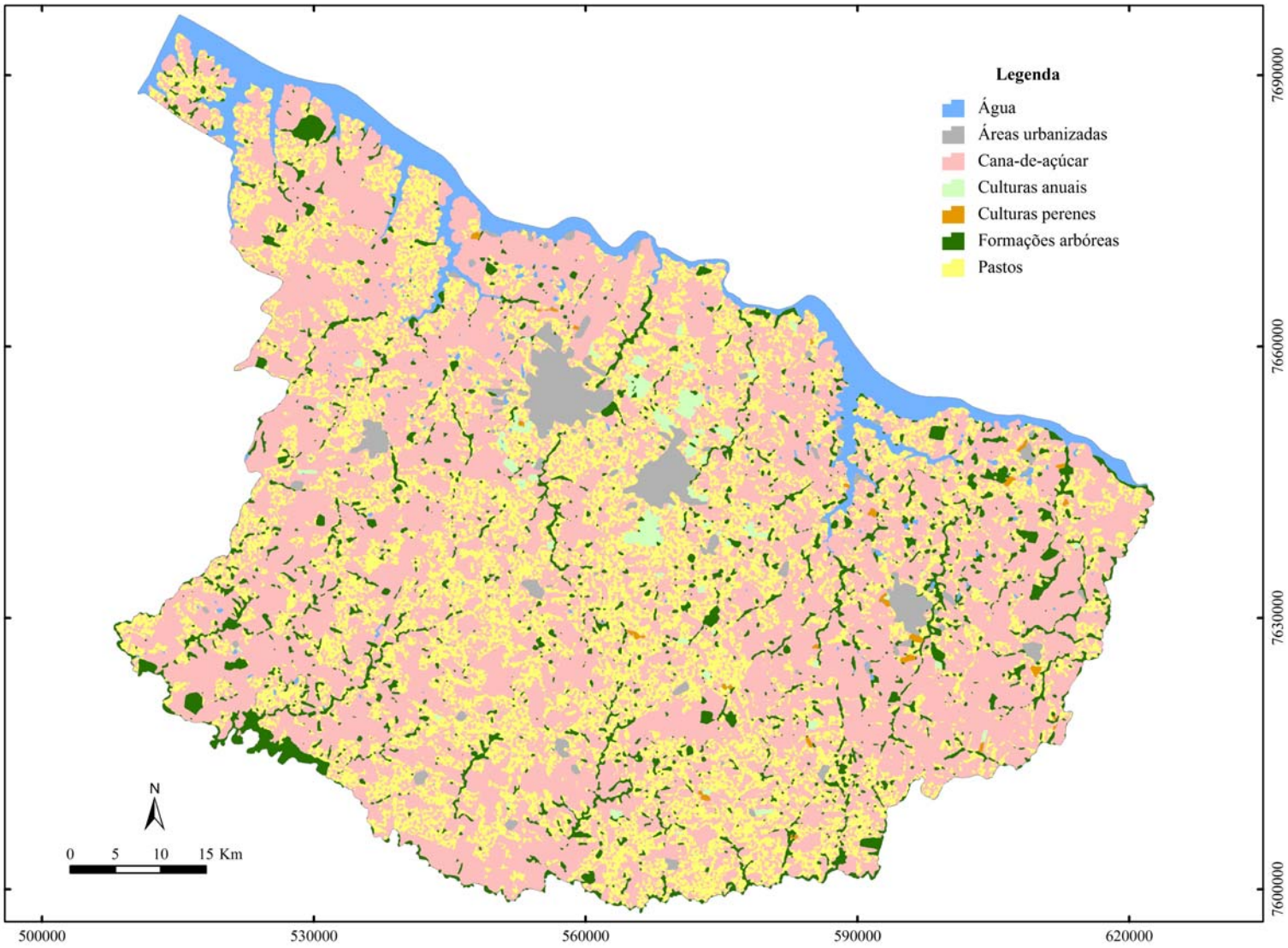

Figura 7.15 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC apoiado pela capacidade de usos das terras. Elaboração: S.F. Adami.

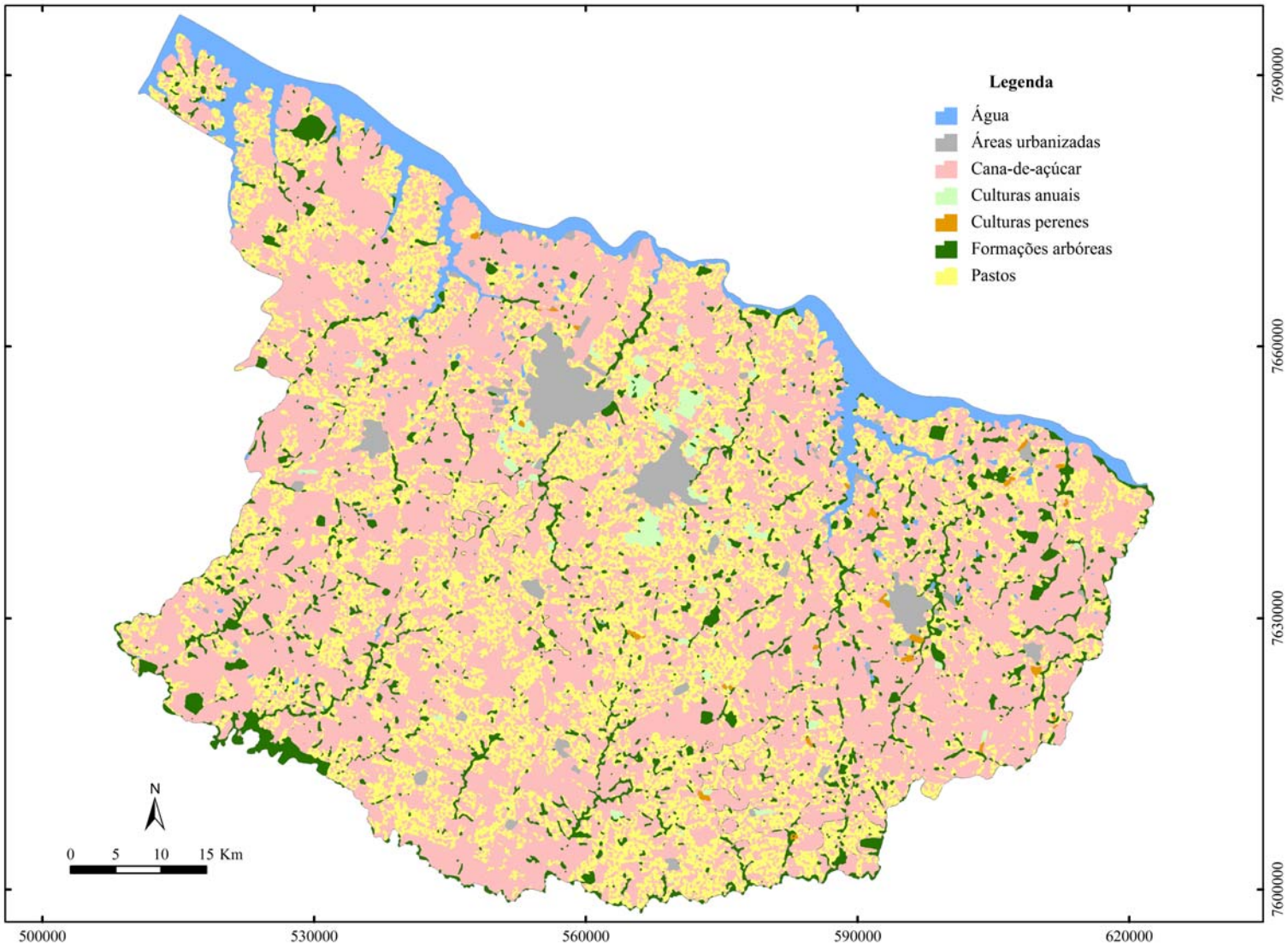

Figura 7.16 – Mapa de usos das terras da EDR de Araçatuba em 2008, resultado do modelo AC apoiado pela cadeia de Markov.

Elaboração: S.F. Adami.

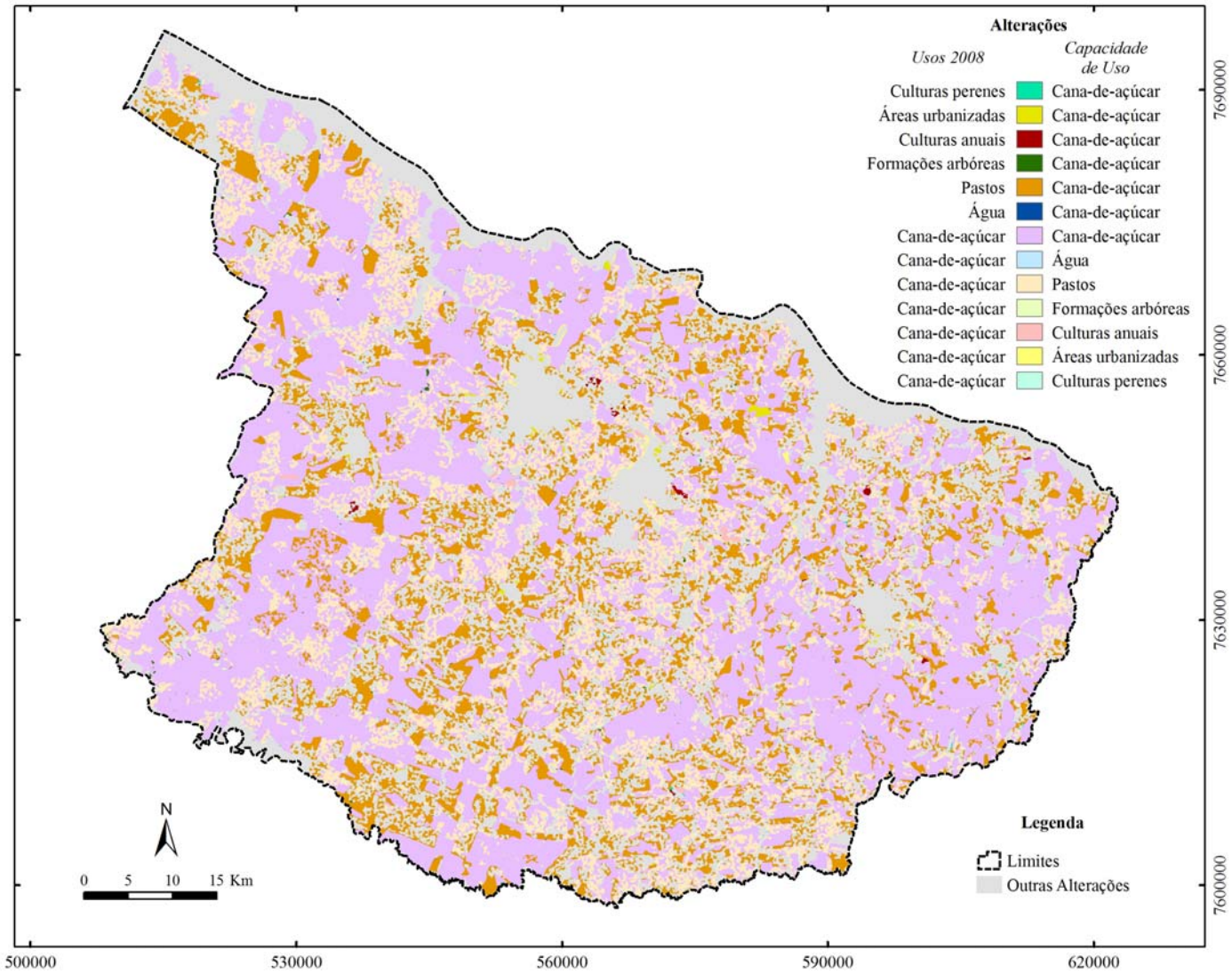

Figura 7.17 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado à capacidade de usos das terras para a cana-de-açúcar. Elaboração: S.F. Adami.

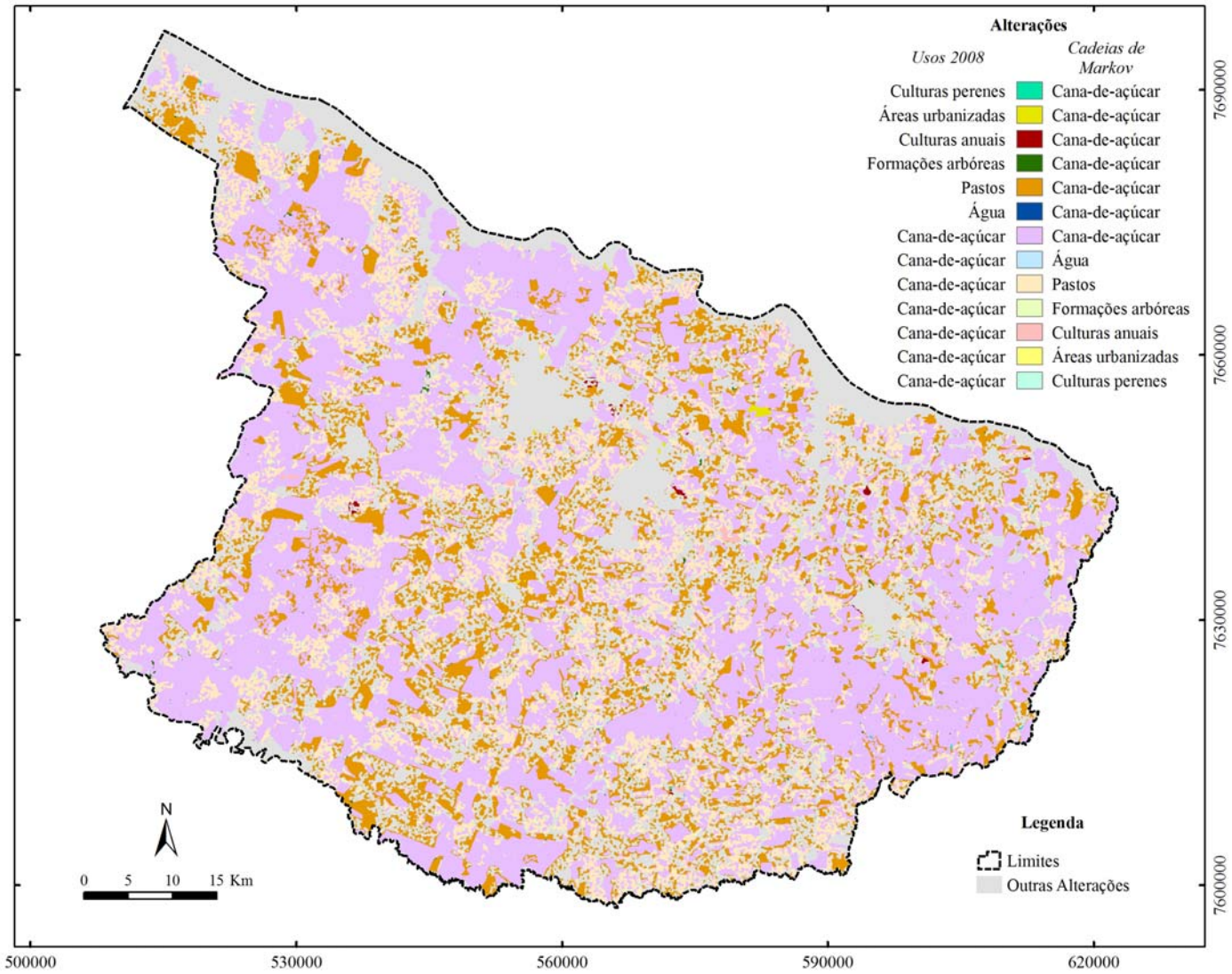

Figura 7.18 – Mapa de diferenças entre interpretação visual e modelo AC associado às cadeias de Markov para a cana-de-açúcar.

Elaboração: S.F. Adami.

7.4 Comparações entre os resultados dos diferentes métodos

Em relação à simulação geral da área de estudos, os resultados foram amplamente diversos, quando se observa variáveis ligadas à análise da paisagem. O número de polígonos (tabela 7.9) foi superestimado pelos métodos tradicionais enquanto, mesmo que mais próximos dos dados de referência, os métodos multicriteriais criaram poucos polígonos para a classe de cana-de-açúcar. Quadro semelhante ocorreu em relação às pastagens, mas nesse caso os resultados da proposta metodológica são mais próximos da realidade.

Tabela 7.9 – Número de polígonos. Elaboração: S.F. Adami.

Classe	Mapa 2008	PC	TJC	MKO	CUP
AG	444	208	201	251	258
AU	93	88	87	85	86
CN	279	94	85	7.247	7.406
CA	68	55	59	61	59
CP	41	38	35	36	35
FA	1667	1.767	1.740	1.808	1.853
PT	454	395	406	6.551	6.638

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas, PT = pastos, PC = programação por compromisso, TJC = teoria dos jogos cooperativos, MKO = cadeias de Markov e, CUS = capacidade de usos das terras padronizada.

Discrepâncias maiores são encontradas na simulação dos limites das unidades de mapeamento da cana-de-açúcar (tabela 7.10). Enquanto os resultados da proposta metodológica criaram manchas com perímetro cerca de 100% maiores em relação aos dados de referência, a aplicação dos métodos tradicionais resultam em perímetros médios pequenos, cerca de 10% do que seria identificado no mapa de 2008.

Em relação aos pastos, todos os resultados subestimam o perímetro médio, mas a aplicação de autômatos celulares com os métodos multicriteriais aproxima-se mais do quadro obtido pela interpretação visual.

Tabela 7.10 – Perímetro médio em metros. Elaboração: S.F. Adami.

Classe	Mapa 2008	PC	TJC	MKO	CUP
AG	2.519	3.868	3.995	3.513	3.409
AU	5.179	4.379	4.430	4.826	4.828
CN	27.946	50.167	55.686	2.591	2.557
CA	4.357	4.282	4.030	4.158	4.260
CP	2.226	2.222	2.433	2.536	2.656
FA	3.009	1.857	1.877	2.091	2.060
PT	15.045	11.375	10.984	2.546	2.616

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas, PT = pastos, PC = programação por compromisso, TJC = teoria dos jogos cooperativos, MKO = cadeias de Markov e, CUS = capacidade de usos das terras padronizada.

A área média dos polígonos (tabela 7.11) demonstra comportamento semelhante ao perímetro, mas a diferença entre a aplicação das cadeias de Markov ou a capacidade de usos das terras e os dados de referência são grandes. Pois, esses métodos tendem a criar áreas pequenas e espalhadas, ao contrário dos resultados da aplicação da teoria dos jogos cooperativos e da programação por compromisso, nos quais as áreas plantadas com cana-de-açúcar são maiores que aquelas existentes na realidade.

Em todos os três índices os resultados da simulação que incorporaram os conhecimentos de especialistas e de gestores foram mais próximos dos valores obtidos a partir dos dados de referência. A aplicação da programação por compromisso, dentre os métodos multicriteriais, foi a que obteve melhor desempenho, apresentando resultados mais próximos do mapa de 2008.

Tabela 7.11 – Área média em hectares. Elaboração: S.F. Adami.

Classe	Mapa 2008	PC	TJC	MKO	CUP
AG	69	142	147	123	120
AU	188	174	176	215	212
CN	1.260	3.845	4.254	50	49
CA	89	110	103	100	104
CP	26	33	35	37	38
FA	26	20	20	24	23
PT	398	460	447	45	57

Observações: AG = água, AU = áreas urbanizadas, CN = cana-de-açúcar, CA = culturas anuais, CP – culturas perenes, FA = formações arbóreas, PT = pastos, PC = programação por compromisso, TJC = teoria dos jogos cooperativos, MKO = cadeias de Markov e, CUS = capacidade de usos das terras padronizada.

Inicialmente, os resultados aparentemente semelhantes não permitem identificar as diferenças entre os métodos. Não obstante, pode-se observar que a aplicação de métodos multicriteriais apresenta maior acurácia na simulação da distribuição geral dos usos das terras na área de estudos. O índice Kappa e a acurácia total são superiores nos resultados da proposta metodológica em relação aos métodos tradicionais (tabela 7.12).

Em relação ao uso-objetivo para o qual foram levantadas as preferências dos gestores das usinas e dos especialistas, os resultados que utilizam esses conhecimentos são superiores às recomendações somente técnicas (capacidade de uso das terras) e à mera extrapolação de eventos passados (cadeias de Markov) na busca de simulações do comportamento espacial futuro da cultura canavieira.

A diferença entre os métodos multicriteriais programação por compromisso e teoria dos jogos cooperativos é extremamente baixa ou, muitas vezes, inexistente. Desse modo, a incorporação dos conhecimentos e preferências dos gestores e especialistas é importante, mas independe do método de tratamento dessas informações. O desempenho um pouco melhor do modelo condicionado pela programação por compromisso poderia significar que as usinas poderiam buscar aproximar-se de objetivos comuns e maximizar o rendimento geral de todas as

unidades. Por outro lado, esse quadro pode ser diferente em áreas com maior concentração de destilarias e usinas e que mantém elevada disputa por matéria-prima.

Tabela 7.12 – Síntese da avaliação da acurácia dos resultados. Elaboração: S.F. Adami.

Métodos	***Kappa***	***Acurácia***	***Lee-Sallee***	***Erro de omissão***	***Erro de comissão***
Programação por compromisso	0,52	71,44	2,50	75,42	75,42
Teoria dos jogos cooperativos	0,52	71,17	2,47	75,17	75,17
Capacidade de uso das terras	0,47	68,35	2,16	72,43	72,43
Cadeias de Markov	0,47	68,18	2,14	72,33	72,33

Os erros de omissão e comissão iguais entre os vários métodos reflete a dinâmica do modelo autômato celular em atribuir números semelhantes de células do uso-objetivo para outras classes e classificar como cana-de-açúcar *pixels* que são destinados a usos diferentes.

8 Conclusões

A integração entre modelos AC e SIG é um método efetivo para modelagem dos usos das terras e pode ser aplicado quando se busca conhecer a dinâmica dos usos agrícolas e de determinadas culturas. A incorporação dos conhecimentos de especialistas e dos diversos atores sociais permite o estabelecimento de modelos melhores e mais precisos, pois as decisões espaciais são fruto das opções pessoais e das características e possibilidades técnicas, e ambas são alteradas de maneira complexa e não-linear ao longo do tempo.

Os resultados da pesquisa demonstraram que a simples extrapolação de eventos passados não permite a determinação das possibilidades da dinâmica dos usos do espaço em momentos posteriores, tal como a aplicação das cadeias de Markov mostrou-se inferior à proposta metodológica.

Considerar que a ocupação do espaço segue pressupostos técnicos, como exemplificados pelo levantamento da capacidade de usos das terras, também apresenta limitações, pois muitas vezes a busca de objetivos econômicos ou estratégicos ocorre apesar de recomendações técnicas.

Modelos autômatos celulares em geral apresentam boa capacidade de simular a dinâmica dos usos das terras a partir de regras simples, como afirmado por muitos autores tratados na revisão da literatura, e os resultados obtidos nessa pesquisa são reflexos dessa característica.

Por outro lado, a incorporação das opiniões, preferências, preconceitos e conhecimentos de atores sociais e especialistas em diversas áreas correlatas do conhecimento pode melhorar o desempenho dos modelos celulares. A proposta metodológica foi uma tentativa nessa direção e os resultados demonstraram a sua viabilidade e maior acurácia em relação aos métodos tradicionais.

A maioria dos modelos AC é direcionada aos cenários urbanos e as propostas de simulação de usos agrícolas não apresentam componente espacial explícito, limitando a predição de áreas ocupadas pelas diversas culturas. Essa abordagem esconde uma questão importante. Onde os usos determinados serão substituídos por usos mais intensivos, ou muitas vezes socialmente excludentes?

Modelos AC associados a métodos multicriteriais que incorporarem as preferências dos atores no meio rural buscam explicitar um elemento espacial nas decisões e na dinâmica dos usos

das terras agrícolas. A proposta incorporou a opinião de especialistas e gestores de usinas de cana-de-açúcar pela abordagem da programação por compromisso e da teoria dos jogos cooperativos, e os resultados demonstram a maior acurácia dessa abordagem para predição do comportamento espacial da cultura canavieira.

Na EDR de Araçatuba, ocorreu uma grande expansão no plantio de cana-de-açúcar para abastecer usinas e destilarias em decorrência de um novo ciclo de crescimento na demanda por etanol, agora revestido de combustível ambientalmente equilibrado. Os modelos AC associados a análises multicriteriais permitiram simular essa dinâmica expansiva. Por um lado, a abordagem quantitativa no estudo do espaço permitiu uma forma de conhecimento sobre as ações humanas sobre o território, mas deve-se ressaltar que a aplicação de modelos para simulação de dinâmicas espaciais depende fortemente da disponibilidade e da natureza dos dados disponíveis. No exemplo estudado, a substituição de pastagens por cana-de-açúcar é o caso mais comum, mas o modelo não permite identificar a translação dos pastos para áreas com terras baratas e onde expedientes ilegais na ocupação das terras podem ser empregados mais facilmente, tal como áreas do domínio amazônico.

As características da dinâmica espacial dos usos das terras na EDR de Araçatuba são um exemplo das formas de organização de uma região competitiva, na qual o espaço é direcionado para a um único tipo de produção. Entretanto, mesmo que a abordagem proposta forneça subsídios e argumentos para o debate sobre o modelo de desenvolvimento agrícola brasileiro, resta a indagação chave de possíveis limites para o crescimento da indústria sucroalcooleira e de seu papel na busca por políticas para um progresso rural que resulte em uma sociedade mais justa e, ao mesmo tempo, na preservação do meio ambiente. Quando mais de 50% das terras de uma região estão dedicadas para o cultivo de apenas uma única espécie vegetal que visa a abastecer cerca de oito empreendimentos industriais, como no caso da EDR de Araçatuba, e que ainda parece estar numa fase de expansão, parece pertinente o questionamento da viabilidade ambiental de empreendimentos denominados, a princípio, “verdes”.

9 Referências bibliográficas

ABLER, R.; ADAMS, J. S.; GOULD, P. **Spatial organization:** the geographer's view of the world. London: Prentice-Hall International, 1972.

ABLER, R.F.; MARCUS, M.G.; OLSON, J.M. Afterword In: ABLER, R.F.; MARCUS, M.G.; OLSON, J.M. (eds.) **Geography's inner worlds:** pervasive themes in contemporary American geography. New Brunswick: Rutgers University Press, 1995. p. 391-401.

AL-AHMADI, K.; HEPPENSTALL, A.; HOGG, J.; SEE, L. A fuzzy cellular automata urban growth model (FCAUGM) for the city of Riyadh, Saudi Arabia. Part 1: model structure and validation. **Applied Spatial Analysis.** n. 2, p. 65-83. 2009.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W. L.; DANTAS, A. S. L.; CARNEIRO, C. D. R.; MELO, M. S.; BISTRICHI, C. A. **Mapa geológico do Estado de São Paulo.** São Paulo: IPT, 1981. Escala 1:500.000.

ASPINALL, R. J. Basic and applied land use science. In: ASPINALL, R. J.; HILL, M. J. **Land use change:** science, policy and management. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 3-15.

BALMANN, A. Farm-based modeling of regional structural change: a cellular automata approach. **European Review of Agricultural Economics,** v. 24, p. 85-108, 1997.

BARNES, T. J. A paper related to everything but more related to local things. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 94, n. 2, p. 278-283, 2004.

BATTY, M. Approaches to modeling in GIS: spatial representation and temporal dynamics. In: MAGUIRE, D.J.; BATTY, M.; GOODCHILD, M.F. **GIS, spatial analysis, and modeling.** Redlands: ESRI, 2000. p. 41-61.

BATTY, M.; XIE, Y.; SUN; Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems,** v. 23, n. 3, p. 205-233, May 1999.

BRUNINI, O.; CARVALHO, J. P.; PÁDUA JÚNIOR, A. L.; MORAES, J. F. L.; PRADO, H.; LANDELL, M. G. A. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo:** aptidão edafoclimática da cultura da cana-de-açúcar. Campinas: IAC, [2008?].

CHISHOLM, M. **Rural settlement and land use:** an essay in location. 2nd ed. London: Hutchinson University Press, 1968.

COMPANHIA NACIONAL ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira:** cana-de-açúcar - primeiro levantamento. Brasília: Conab, 2010.

DEADMAN, P.; BROWN, R. D. Modeling rural residential settlement patterns with cellular automata. **Journal of Environmental Management,** v. 37, p. 147-60, 1993

DICKEN, P.; LLOYD, P. E. **Location in space:** theoretical perspectives in economic geography. 3rd ed. New York: Harper Collins, 1990.

DRAGICEVIC, S. Coupling fuzzy sets theory and GIS-based cellular automata for land-use change modeling. In: **IEEE ANNUAL MEETING OF THE PROCESSING NAFIPS,** 2004. Banff, Canada, v. 1, 203-207.

DUNN JUNIOR, E. S. **The location of agricultural production.** Gainesville: University of Florida Press, 1954.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Andes:** guide to GIS and image processing**.** Worcester: Clark Labs, 2006.

EASTMAN, J. R.; JIN, W.; KYEM, P. A. K.; TOLEDANO, J. Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,** v. 61, n. 5, p. 539-547, May 1995.

ESRI. **ArcGIS 9:** what is ArcGIS 9.3**.** Redlands: Esri Press, 2008.

FARRELL, A. E.; PLEVIN, R. J.; TURNER, B. T.; JONES, A. D.; O'HARE, M. KAMMEN, D. M. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. **Science,** v. 311, n. 5760, p. 506-508, Jan. 2006.

FOUND, W. C. **A theoretical approach to rural land-use patterns.** London: Edward Arnold, 1974.

FRANCISCO, C. E. S. **Áreas de preservação permanente na bacia do ribeirão das Anhumas: estabelecimento de prioridades para recuperação por meio de análise multicriterial.** Campinas, 2006.

GARRISON, W. L.; MARBLE, D. F. The spatial structure of agricultural activities. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 47, n. 2, p. 137-144, Jun. 1957.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Models, paradigms and the new geography In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Models in geography.** London: Methuen, 1967. p. 19-41.

HALL, P. (Ed.). **Von Thünen's isolated state:** an English edition of der isolierte staat by Johann Heinrich von Thünen. Oxford: Pergamon press, 1966.

HARVEY, D. W. Theoretical concepts and the analysis of agricultural land-use patterns in geography. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 56, n. 2, p. 631-374, Jun. 1966.

HARVEY, D. W. Models of the evolution of spatial patterns in human geography In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Models in geography.** London: Methuen, 1967. p. 549-608.

HE, C.; OKADA, N.; ZHANG, Q.; SHI, P.; ZHANG, J. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and systems dynamic model in Beijing, China. **Applied Geography,** v. 26, p. 323-345, 2006.

HENSHALL, J. D. Models of agricultural activity In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Models in geography.** London: Methuen, 1967. p. 425-458.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006:** resultados preliminares. Rio de Janeiro, 2006.

ITC. **ILWIS 2.1 for windows:** users guide. Enschede: ITC. 1997.

JANKOWSKI, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. **International Journal of Geographical Information Systems,** v. 9, n. 3, p. 251-273, May 1995.

JANKOWSKI, P.; ZIELINSKA, A.-L.; SWOBODZINSKI, M. Choice modeler: a web-based spatial multiple criteria evaluation tool. **Transactions in GIS,** v. 12, n. 4, p. 541-561, 2008.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing:** a remote sensing perspective. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

JOERIN, F.; THÉRIAULT, M.; MUSY, A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. **International Journal of Geographical Information Science,** v. 15, n. 2, p. 153-174, Mar. 2001.

KEENEY, R.; HERTEL, T. W. The indirect land use impacts of the United States biofuel policies: the importance of acreage, yield, and bilateral trade responses. **American Journal of Agricultural Economics,** v. 91, n. 4, p. 895-909, Nov. 2009.

KOCABAS, V.; DRAGICEVIC, S. Enhancing a GIS cellular automata model for land use change: Bayesian networks, influence diagrams and causality. **Transactions in GIS,** v. 11, n. 5, p. 681-702, 2007.

KOOMEN, E.; STILLWELL, J. Modelling land-use change: theories and methods. In: KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H. J. **Modelling land-use change:** progress and applications. Dordrecht: Springer, 2007. p. 1-21.

LAPOLA, D. M.; SCHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J.; KOELKING, C.; PRIESS, J. A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. **PNAS,** v. 107, n. 8, p. 3388-3393, Feb. 2010.

LEPSCH, I. F. (coord.) **Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983.

LIU, Y. **Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata.** Boca Raton: CRC, 2009.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Systems,** v. 20, n. 7, p. 703-726, Aug. 2006.

MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis.** New York: John Wiley & Sons, 1999.

MANOEL, A. **Política agrícola, eficiência e concentração na agricultura brasileira:** um estudo do setor canavieiro paulista. São Paulo: Instituto de Pesquisas Econômicas, 1986.

MILLER, H. J. Tobler's first law and spatial analysis. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 94, n. 2, p. 284-289, 2004.

MORAES, A. C. R. **Geografia:** pequena história crítica. 2. ed. São Paulo: Hucitec, 1995.

MORAES, M. A. F. D. Introdução: as profundas mudanças institucionais ao longo da história da agroindústria canavieira e os desafios atuais. **Revista de Economia Aplicada,** v. 11, n. 4, p. 555-557, out./dez. 2007.

MYINT, S. W.; WANG, L. Multicriteria decision approach for land use cover change using Markov chain analysis and a cellular automata approach. **Canadian Journal of Remote Sensing,** v. 32, n. 6, p. 390-404, 2006.

NASS, L. L.; PEREIRA, P. A. A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop Science,** v. 47, p. 2228-2237, Nov./Dec., 2007.

O'SULLIVAN, D.; TORRENS, P. M. **Cellular models of urban systems.** London: Centre for Advanced Spatial Analysis, 2000. (Working paper series, 22).

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo.** Campinas: IAC, 1999. Escala 1:500.000.

PARK, S.; WAGNER, D. F. Incorporating cellular automata simulators as analytical engines in GIS. **Transactions in GIS,** v. 2, n. 3, p. 213-231, 1997.

PETRONE, M. T. S. **A lavoura canavieira em São Paulo:** expansão e declínio (1765-1851). São Paulo: Difel, 1968.

PIMENTEL, D. Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. **Natural Resources Research,** v. 12, n. 2, p. 127-134, June, 2003.

PINTO, E.G.M.; FOOK, K.D.; MONTEIRO, A.M.V.; CÂMARA, G. Modelagem de dinâmicas espaciais com autômatos celulares. In: WORKSHOP DOS CURSOS DE COMPUTAÇÃO APLICADA DO INPE, 5. (WORCAP), 2005, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. CD-ROM, On-line. Disponível em: <http://urlib.net/dpi.inpe.br/hermes2@1905/2005/10.04.00.31>. Acesso em: 06 mar. 2009.

PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, F. F. M.; PRANDINI, F. L. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo.** São Paulo: IPT, 1981. Escala 1:1.000.000.

PRADO, H.; PÁDUA JÚNIOR, A. L.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. F. L.; CARVALHO, J. P.; DONZELI, P. L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 179-204.

RAMOS, P. **Agroindústria canavieira e propriedade fundiária no Brasil.** São Paulo: Hucitec, 1999.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura. **Áreas com possibilidade de expansão da cultura da cana-de-açúcar para a produção de álcool combustível no Estado de São Paulo.** São Paulo, 1976.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura. **Atlas do zoneamento agrícola do Estado de São Paulo.** São Paulo, 1974.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **Levantamento censitário de unidades de produção agrícola do Estado de São Paulo.** São Paulo, 2008. Disponível em: http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa. Acesso em: 28/06/2010.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Economia e Planejamento. **Atlas regional do Estado de São Paulo.** São Paulo, 1978.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Economia e Planejamento. **9ª. Região administrativa:** diagnóstico. São Paulo, 1972.

SAWYER, D. Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. **Philosophical Transactions of the Royal Society B,** v. 363, p. 1747-1752, 2008.

SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R. A.; DONG, F.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J.; TOKGOZ, S.; HAYNES, D.; YU, T.-H. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. **Science,** v. 319, p. 1238-1240, Feb. 2008.

SPENCER, J. E.; STEWART, N. R. The nature of agricultural systems. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 63, n. 4, p. 529-544, Dec. 1973.

SMITH, J. M. Unlawful relations and verbal inflation. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 94, n. 2, p. 294-299, 2004.

SUI, D. Z. Tobler's first law of geography: a big idea for a small world? **Annals of the Association of American Geographers,** v. 94, n. 2, p. 269-277, 2004.

SZMRECSÁNYI, T.; MOREIRA, E. P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Estudos Avançados,** v. 5, n. 11, p. 57-79, jan./abr. 1991.

SZMRECSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930-1975).** São Paulo: Hucitec/Unicamp, 1979.

TOBLER, W.R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic geography,** v. 46, n. 2, p. 234-240, 1970.

TOBLER, W.R. Cellular geography. In: GALE, S.; OLSSON, G. **Philosophy in geography.** Dordrecht: D. Reidel, 1979. p. 379-386.

TOBLER, W.R. On the first law of geography: a reply. **Annals of the Association of American Geographers,** v. 94, n. 2, p. 304-310, 2004.

TSANG, S. W.; LEUNG, Y. A theory-based cellular automata for the simulation of land-use change. **Geographical Analysis.** n. 43, p. 142-171, 2011.

VAN VLIET, J.; WHITE, R.; DRAGICEVIC, S. Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton. **Computers, Environment and Urban Systems.** n. 33, p. 35-43, 2009.

WU, F.; WEBSTER, C. J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. **Environment and Planning B,** v. 25, n. 1, p. 103-126, Jan. 1998.

ZUFFO, A. C.; REIS, L. F. R.; SANTOS, R. F.; CHAUDHRY, F. H. Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** v. 7, n. 1, p. 81-102, jan./mar. 2002.

10 Apêndice

Prezada e Prezado Colega,

Estamos desenvolvendo uma pesquisa visando à modelagem da mudança de usos das terras na região de Araçatuba (SP) com a utilização de Métodos de Análise Multicriterial e Autômatos Celulares associados a Sistemas de Informações Geográficas, como parte de uma tese de doutoramento. O foco da pesquisa é dimensionar a dinâmica espacial da cultura canavieira na região.

Nessa etapa solicitamos sua contribuição para a atribuir graus de importância para um conjunto de critérios que poderiam orientar a tomada de decisão de usinas para a seleção de áreas para plantio de cana-de-açúcar. Neste exercício, sua experiência profissional estaria voltada para a orientação dessas decisões.

Instruções de preenchimento

- Avalie a importância de cada um dos critérios que estão na tabela.
- Na coluna "**Nota**" atribua um valor entre 0 e 10 para cada critério. Quanto maior o valor, maior a sua importância. O valor 0 (zero) exclui o critério da avaliação. Caso você acredite que dois critérios têm importância igual, atribua a mesma nota a ambos.
- Para a coluna "**Classe**" solicitamos a mesma avaliação, mas, em vez de uma nota, atribua um conceito conforme os graus abaixo:

Classes de importância
Muito baixa
Baixa
Média
Alta
Muito Alta

Agradecemos antecipadamente sua colaboração.

Atenciosamente,

Samuel Fernando Adami

Geógrafo – Pesquisador Científico

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais - Instituto Agronômico

Critério	Descrição	Nota	Classe
Classes de solos	Tipos de solos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Classes de solos mais aptas seriam preferíveis para a implantação da cana-de-açúcar.		
Usos atuais das terras	Classes de usos das terras que ocorrem no terreno no momento da tomada de decisão. Usos que demandam menor intervenção para sua transformação para cana-de-açúcar receberiam maior preferência.		
Proximidade da usina	Distância em linha reta entre a usina e as áreas potenciais. Áreas mais próximas seriam mais adequadas.		
Proximidade da malha viária	Distância em linha reta entre as áreas potenciais e a rede viária principal. Áreas mais próximas seriam mais adequadas.		
Declividade do terreno	Inclinação da superfície do terreno, em porcentagem. Quanto menor a declividade, melhor para a cultura canavieira.		
Zoneamento agroambiental	Classes de adequação segundo o zoneamento agroambiental da SAA/SMA do Estado de São Paulo. Classes mais aptas seriam preferíveis para a implantação da cana-de-açúcar.		
Proximidade de unidades de conservação	Distância em linha reta entre as unidades de conservação e as áreas potenciais. Áreas mais distantes seriam mais adequadas.		
Proximidade de centros urbanos	Distância em linha reta entre as áreas urbanizadas e as áreas potenciais. Áreas mais distantes seriam mais adequadas.		
Proximidade de corpos d'água	Distância em linha reta entre os corpos d'água e as áreas potenciais. Áreas mais distantes seriam mais adequadas.		
Áreas de Preservação Permanente (APP)	Existência de APP nas áreas potenciais. Áreas não destinadas como APP seriam preferíveis.		
Custo da terra	Preço de aquisição ou arrendamento das terras para implantação da cultura canavieira. Valores menores seriam preferíveis.		
Custo da mão-de-obra	Preço de contratação da mão-de-obra para as operações agrícolas. Valores menores seriam preferíveis.		
Nível treinamento da mão-de-obra	Nível de escolaridade da população economicamente ativa. Maiores níveis seriam preferíveis.		
Disponibilidade de mão-de-obra	Proporção da mão-de-obra disponível para contratação. Maiores níveis seriam preferíveis.		
Nível de desenvolvimento do município	Avaliação global do nível por meio do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Níveis maiores seriam preferíveis.		