



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-10567-TDI/942/ A

**MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL COMO UMA
FERRAMENTA AUXILIAR AO PLANEJAMENTO: SIMULAÇÃO
DE MUDANÇAS DE USO DA TERRA EM ÁREAS URBANAS
PARA AS CIDADES DE BAURU E PIRACICABA (SP), BRASIL**

Cláudia Maria de Almeida

Tese de Doutorado do Curso da Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Antonio Vieira Monteiro e Gilberto Câmara Neto, aprovada em
03 de outubro de 2003.

528.711.7

ALMEIDA, C. M.

Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP) / C. M. Almeida. – São José dos Campos: INPE, 2003.

351p. – (INPE-10567-TDI/942/A).

1.Autômatos celulares. 2.Planejamento urbano.
3.Modelagem. 4.Urbana. 5. Mudanças de uso de solo. 6.
Pesos de evidência. 7.Regressão logística. 8.Análise de
Regressão. I.Título.

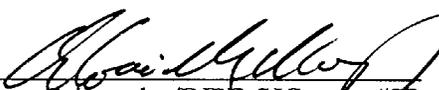
Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Doutora em Sensoriamento Remoto.**

Dr^a Leila Maria Garcia Fonseca



Presidente/INPE-SJCampos/SP

Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro



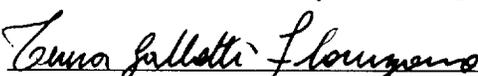
Orientador/INPE-SJCampos/SP

Dr. Gilberto Câmara Neto



Orientador/INPE-SJCampos/SP

Dr^a Teresa Gallotti Florenzano



Membro da Banca/INPE-SJCampos/SP

Dr. Britaldo Silveira Soares Filho



Membro da Banca
Convidado UFMG, Belo Horizonte/MG

Dr. Michael Batty



Membro da Banca
Convidado University College London, UK

Candidato (a): Cláudia Maria de Almeida

São José dos Campos, 03 de outubro de 2003.

*“A luz do conhecimento se alimenta do
incessante e incansável desejo de superação
daqueles que a perseguem...”*

*“Não se desbravam novos continentes sem consentir perder-se
a visão de terra firme por um longo período de tempo.”*

ANDRE GIDE (1869-1951)

*A meus pais,
Claudionor de Almeida (in memoriam) e
Antonita de Almeida.*

AGRADECIMENTOS

Eu sou grata a todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Os mais sinceros e profundos agradecimentos vão para os meus orientadores, Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro, chefe da Divisão de Processamento de Imagens (DPI), e Dr. Gilberto Câmara Neto, chefe da Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O imensurável apoio, orientação e constante incentivo dispensados foram cruciais para o desenvolvimento desta tese.

Eu sou igualmente grata pelo apoio e orientação fornecidos a mim pelo Prof. Michael Batty, diretor do Centro para Análise Espacial Avançada (Centre for Advanced Spatial Analysis) da University College London (CASA-UCL), onde parte desta pesquisa de Doutorado foi conduzida.

Especiais agradecimentos são devidos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, que patrocinou o meu programa de Doutorado no INPE.

Sinceros agradecimentos também são destinados à Coordenação Acadêmica do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, que me concedeu verbas para a digitalização do meu banco de dados bem como para a aquisição de programas computacionais e imagens de satélite.

Menção especial deve ser concedida à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo patrocínio do meu programa de Doutorado Sanduíche, realizado no CASA-UCL, de outubro de 2001 a fevereiro de 2002.

É mister expressar a minha gratidão ao INPE, por haver concedido o meu ingresso no programa de Doutorado em Sensoriamento Remoto e disponibilizado suas instalações e infra-estrutura de apoio. Eu devo da mesma forma expressar os meus agradecimentos aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, pelo conhecimento e experiência compartilhados. A dedicação e competência da equipe da Biblioteca do INPE, cujo auxílio e cooperação foram de grande valia para a realização deste trabalho, merecem o devido reconhecimento.

Valiosos e profundos agradecimentos são endereçados ao Dr. Britaldo Silveira Soares-Filho, chefe do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG), que me orientou no uso de métodos estatísticos e na operacionalização do modelo de simulação utilizados nesta pesquisa. Estes agradecimentos são extensivos a toda a equipe do CSR, em particular ao Gustavo, Araújo, Eliane, William e Leo.

Palavras de gratidão são também devidas à equipe da DPI, em especial ao Miro, Júlio D'Alge, Mari, Maurano, Rosa, Silvia, Eymar, Diehl e Fabiano.

Eu gostaria de expressar o meu reconhecimento pela cooperação prestada pelo Departamento de Água e Esgoto (DAE) de Bauru, bem como à Secretaria Municipal de Planejamento Urbano de Bauru (SEPLAN) no fornecimento dos mapas da cidade. Este reconhecimento é extensivo ao Departamento de Água e Esgoto (DAE) de Piracicaba e à Secretaria Municipal de Planejamento Urbano de Piracicaba (SEMUPLAN), pela disponibilização dos mapas da cidade de Piracicaba.

O apoio prestado pela equipe da “AJS Engenharia e Informática” na vetorização dos mapas de Bauru e Piracicaba deve ser igualmente reconhecido.

Eu sou particularmente grata pela orientação a mim fornecida sobre modelos de regressão logística por Rejane, do “Laboratório de Epidemiologia e Estatística do Instituto de Cardiologia Dante Pazzanese – São Paulo” (LEE), e por Alexandre Pantuzzo e Renato Assunção (UFMG). Estes agradecimentos são também endereçados à Camila (LEE), pela orientação prestada acerca de modelos de regressão linear e predições.

O apoio e auxílio a mim prestados pela equipe da Biblioteca do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela equipe da Biblioteca da Fundação Seade – São Paulo e pela Dra. Mérida do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) são dignos de reconhecimento.

Eu devo também agradecer a valiosa ajuda a mim concedida pela equipe de suporte técnico, em especial ao Prof. Eliseu Weber, do Centro de Recursos Idrisi da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CRIDRISI-UFRGS), e por Bartira Carvalho, da Geosoft Latinoamérica Ltda.

Especiais agradecimentos são também destinados ao Alfredo, pelo auxílio no manuseio do programa S-Plus; à Missae, por me ensinar a operar o módulo S-Carta do SPRING; e à Flávia, por me permitir usar o seu computador para executar as minhas simulações.

É oportuno reconhecer o apoio, amizade e companheirismo dos meus colegas do INPE, sobretudo Rosely, Waldiza, Marcus, Nina, Bianca, Mariza, Ezequiel, Patrícia, Fred Ramos, Fred Angelis, Thalês, Viviane, Cacá, Isabela, Emerson, Norton, Fernando Ventura, Marcos, Ana Paula, Tiago, Paulina, Gilberto, Rovedy, Silvana, Bel, Karine, Lúbia, Marcelino, Taciana, Piedade, Gibotti, Giane e Eduardo Pinheiro. Especial reconhecimento é devido ao meu colega Paulo Souza, que programou a macro utilizada na elaboração deste documento.

E finalmente, os meus maiores e mais profundos agradecimentos são destinados a meus pais, pelo constante apoio e entusiasmo dispensados ao longo da minha vida acadêmica.

RESUMO

Este trabalho propõe-se a fornecer diretrizes metodológicas para a simulação de dinâmicas de uso do solo urbano. Experimentos de modelagem de mudanças de uso foram realizados para duas cidades de médio porte (Bauru e Piracicaba) localizadas no interior do Estado de São Paulo, ao longo de séries multitemporais de aproximadamente trinta e cinco anos. As transições de uso do solo foram estimadas através de dois diferentes métodos probabilísticos empíricos – ‘pesos de evidência’, baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes, e regressão logística. As probabilidades de mudança de uso do solo obtidas a partir daí alimentaram um modelo de autômatos celulares, construído com base em algoritmos de transição estocásticos. Aspectos sócio-econômicos e de infra-estrutura demonstraram ser variáveis forçantes de mudanças de uso do solo em nível local, cuja lógica pode ser explicada à luz das teorias econômicas de crescimento e desenvolvimento urbano. Os resultados das simulações foram validados espacialmente em função de um procedimento estatístico de ajuste por múltiplas resoluções. Após a conclusão das simulações para sucessivos ciclos de tempo ao longo das séries multitemporais, foram realizadas simulações de prognóstico de cenários estacionários e não-estacionários de tendências de transição. Os primeiros foram determinados através do modelo Markoviano, ao passo que os cenários não-estacionários foram obtidos a partir de modelos de regressão linear, relacionando taxas de transição do uso do solo a dados demográficos e indicadores de desempenho econômico. Ambos os tipos de cenários de prognóstico foram conjecturados para o curto e médio prazo, respectivamente 2004 e 2007. E por fim, devida atenção foi dispensada a possíveis aplicações e extensões deste trabalho.

**SPATIAL DYNAMIC MODELING AS A PLANNING TOOL:
SIMULATION OF URBAN LAND USE CHANGE
IN BAURU AND PIRACICABA (SP), BRAZIL**

ABSTRACT

This work is committed to provide methodological guidelines for the simulation of urban land use dynamics. Modeling experiments of urban land use change were conducted for two medium-sized cities (Bauru and Piracicaba) located in the inland of São Paulo State over time series of approximately thirty-five years. Land use transitions were estimated using two different empirical probabilistic methods – the ‘weights of evidence’ approach, based on Bayes’s theory, and logistic regression. The thereof derived land use change probabilities drove a cellular automata model, built upon basis of stochastic land use allocation algorithms. Socioeconomic and infrastructural factors demonstrated to be the drivers of local land use change, whose logic is explained in the light of economic theories of urban development and growth. The simulation outputs were statistically validated according to a multiple resolution fitting procedure. After the accomplishment of simulations for successive time cycles along the whole time series, forecast simulations were carried out for stationary and non-stationary scenarios of transition trends. The former ones were assessed through the Markov chain, while the latter were obtained from linear regression models relating rates of land use change to demographic data and economic performance indicators. Both types of forecast scenarios were built for the short- and medium-term, respectively 2004 and 2007. And finally, a due attention was drawn to possible extensions of this work throughout.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1	41
INTRODUÇÃO	41
1.1 Contexto do Tópico de Pesquisa	41
1.2 Objetivos Gerais	47
1.3 Objetivos Específicos	48
1.4 Hipóteses de Pesquisa	49
1.5 Sumário Comentado	50
CAPÍTULO 2	53
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE MODELOS URBANOS	53
2.1 O Objeto de Modelagem	53
2.1.1 Definição de Assentamentos Urbanos	53
2.1.2 O Objeto de Modelagem no Presente Trabalho	56
2.2 Breve Perspectiva Histórica sobre Modelos de Mudanças do Uso do Solo Urbano	57
2.2.1 Introdução	57
2.2.2 Modelos Não-Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano	60
2.2.3 Primeiros Modelos Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano	66
2.3 Modelos Dinâmicos Espaciais de Mudanças do Uso do Solo Urbano	76
2.3.1 Espaço e Tempo no Presente Trabalho	76
2.3.2 Autômatos Celulares e o Advento de Modelos Espacialmente Explícitos de Mudanças do Uso do Solo Urbano	77
2.3.2.1 Autômatos Celulares: Definição e Propriedades	77
2.3.2.2 Modelos Espacialmente Explícitos ou Modelos Dinâmicos Espaciais de Mudanças do Uso do Solo Urbano	80
2.3.2.3 Modelos Teóricos x Modelos Empíricos de Mudanças do Uso do Solo Urbano	85
2.3.3 Por Que Usar Autômatos Celulares para Modelagem Urbana?	88
2.4 Conclusões	89
CAPÍTULO 3	91
ÁREA DE ESTUDO	91
3.1 Localização	91
3.2 Retrospectiva Histórica do Processo de Urbanização	92
3.2.1 O Ciclo da Mineração (1580 – 1730)	92

3.2.2 O Ciclo da Cana-de-Açúcar (1730 – 1822)	93
3.2.3 O Ciclo do Café (1822 – 1920)	93
3.2.4 O Processo de Industrialização e a Dinâmica Econômica do Século XX	95
3.2.4.1 Anos 1920 – 1929	95
3.2.4.2 Anos 1930 – 1955	95
3.2.4.3 Anos 1956 – 1969	96
3.2.4.4 Anos 1970 – 1979	97
3.2.4.5 Anos 1980 – 1989	98
3.2.4.6 Anos 1990 – 1999	98
3.3 Configuração Espacial da Rede Urbana ao Longo do Rio Tietê no interior Estado de São Paulo	99
3.4 Cidades Selecionadas para Análise: Características Geográficas e Peculiaridades Sócio-Econômicas	103
3.4.1 Bauru	103
3.4.1.1 Características Geográficas	103
3.4.1.2 Peculiaridades Sócio-Econômicas	103
3.4.2 Piracicaba	107
3.4.2.1 Características Geográficas	107
3.4.2.2 Peculiaridades Sócio-Econômicas	107
3.5 Conclusões	109
CAPÍTULO 4.....	111
CONSTRUINDO O BANCO DE DADOS GEOGRÁFICOS	111
4.1 Dados Espaciais de Entrada: Produtos Cartográficos, Aerofotogramétricos e de Sensoriamento Remoto	111
4.1.1 Produtos Cartográficos	113
4.1.2 Fotos Aéreas Digitais	114
4.1.3 Dados de Sensoriamento Remoto	115
4.2 Dados Não-Espaciais de Entrada: Indicadores Sócio-Econômicos	117
4.2.1 Dados Demográficos	118
4.2.2 Dados Econômicos	118
4.3 Operações de Pré-Processamento dos Dados	122
4.3.1 Conversão Digital de Dados Cartográficos	122
4.3.2 Técnicas de Georreferenciamento	122
4.3.2.1 Georreferenciamento de Imagens	122
4.3.2.2 Registro Imagem-Imagem	125
4.3.2.3 Registro Imagem-Dado Vetorial	126
4.3.3 Análise Espacial e Processamento dos Dados	126
4.3.4 Atualizando os Mapas de Uso do Solo através de Sensoriamento Remoto	128
4.3.5 Procedimentos de Generalização Aplicados aos Mapas de Uso do Solo	130
4.4 Conclusões	131
CAPÍTULO 5.....	133
MÉTODOS PARA O MODELO DE SIMULAÇÃO DE DINÂMICAS DO USO DO SOLO URBANO	133
5.1 Introdução	133

5.2 Métodos de Simulação	133
5.2.1 O Método de Pesos de Evidência	133
5.2.1.1 Introdução ao Método de Pesos de Evidência	133
5.2.1.2 Análise Exploratória e Seleção de Variáveis	140
5.2.1.3 Estimativa das Probabilidades Globais de Transição	144
5.2.1.4 Cálculo das Probabilidades Locais de Transição	145
5.2.1.5 Calibração do Modelo	145
5.2.1.6 Teste de Validação Estatística	148
5.2.2 O Método de Regressão Logística	150
5.2.2.1 Introdução ao Método de Regressão Logística	150
5.2.2.2 Análise Exploratória e Seleção de Variáveis	157
5.2.2.3 Estimativa das Probabilidades Globais de Transição	159
5.2.2.4 Cálculo das Probabilidades Locais de Transição	159
5.2.2.5 Calibração do Modelo	160
5.2.2.6 Teste de Validação Estatística	163
5.3 Métodos de Prognóstico	164
5.3.1 A Cadeia de Markov e a Matriz de Probabilidades Futuras de Transição	164
5.3.2 Modelos de Regressão Linear para a Parametrização de Probabilidades Futuras de Transição do Uso do Solo	168
5.3.2.1 Introdução aos Modelos de Regressão Linear	168
5.3.2.2 Análise Exploratória	169
5.3.2.3 Estimadores de Mínimos Quadrados	171
5.3.2.4 Análise de Variância	172
5.3.2.5 Análise de Resíduos	175
5.3.2.6 Conversão de Áreas de Destino Previstas em Probabilidades de Transição	176
5.3.3 Concepção de Cenários e Horizontes de Projeto para Prognósticos	179
5.4 O Modelo de Simulação de Dinâmicas do Uso do Solo	180
5.4.1 Modelo de Dados Genérico para o DINAMICA	180
5.4.2 Estrutura do Programa e Parâmetros de Entrada	182
5.4.3 Algoritmos de Transição	183
5.4.3.1 A Função <i>Expander</i>	184
5.4.3.2 A Função <i>Patcher</i>	184
5.5 Fluxograma de Síntese Metodológica	185
5.6 Conclusões	185
CAPÍTULO 6	189
RESULTADOS E DISCUSSÕES	189
6.1 Bauru	189
6.1.1 Período de Simulação: 1967 - 1979	189
6.1.2 Período de Simulação: 1979 - 1988	203
6.1.2.1 Método de Pesos de Evidência	203
6.1.2.2 Método de Regressão Logística	214
6.1.3 Período de Simulação: 1988 - 2000	220
6.1.4 Simulações Anuais: 1967 - 2000	231
6.1.5 Prognósticos de Curto Prazo: 2000 - 2004	236
6.1.5.1 Prognósticos Estacionários	236

6.1.5.2	Prognósticos Não-Estacionários	237
6.1.5.2.1	Modelo de Regressão Linear "Não-Urbano para Uso Residencial (nu_res)"	238
6.1.5.2.2	Modelo de Regressão Linear "Não-Urbano para Uso Industrial (nu_ind)" ..	241
6.1.5.2.3	Modelo de Regressão Linear "Não-Urbano/Residencial para Uso de Serviços (nu/res_serv)"	244
6.1.5.3	Simulações de Prognósticos	248
6.1.6	Prognósticos de Médio Prazo: 2000 - 2007	250
6.1.6.1	Prognósticos Estacionários	250
6.1.6.2	Prognósticos Não-Estacionários	250
6.1.6.3	Simulações de Prognósticos	251
6.2	Piracicaba	253
6.2.1	Período de Simulação: 1962 - 1985	253
6.2.2	Período de Simulação: 1985 - 1999	266
6.2.3	Simulações Anuais: 1962 - 1999	277
6.2.4	Prognósticos de Curto Prazo: 2000 - 2004	283
6.2.4.1	Prognósticos Estacionários	283
6.2.4.2	Prognósticos Não-Estacionários	283
6.2.4.2.1	Modelo de Regressão Linear "Não-Urbano para Uso Residencial (nu_res)"	284
6.2.4.2.2	Modelo de Regressão Linear "Não-Urbano para Uso Industrial (nu_ind)" ..	287
6.2.4.3	Simulações de Prognósticos	291
6.2.5	Prognósticos de Médio Prazo: 2000 - 2007	293
6.2.5.1	Prognósticos Estacionários	293
6.2.5.2	Prognósticos Não-Estacionários	293
6.2.5.3	Simulações de Prognósticos	294
6.3	Conclusões	296
CAPÍTULO 7		301
CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES		301
7.1	Lidando com Modelos Dinâmicos Espaciais	301
7.2	Recentes Avanços e Potenciais Rumos para Modelos de Mudanças do Uso do Solo Urbano	302
7.3	Principais Contribuições desta Pesquisa	304
7.4	Possíveis Aplicações deste Trabalho	305
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		307

LISTA DE FIGURAS

2.1	– Triângulo clássico de Weber para a localização industrial.....	61
2.2	– Sistema hexagonal da teoria de lugares centrais de Christaller.....	62
2.3	– Ninhos hexagonais da teoria de regiões econômicas de Lösch.....	62
2.4	– Fluxograma genérico do modelo de Lowry.....	65
2.5	– Curvas de comportamento dinâmico em sistemas de recursos limitados.....	70
2.6	– Estrutura de atividades e usos do solo no modelo para Reading, UK.....	72
2.7	– A configuração de "glider" no "Jogo da Vida" - um exemplo de emergência	79
2.8	– Generalizações comuns de autômatos celulares (CA).....	80
2.9	– Um modelo de CA integrando micro e macro-escalas espaciais.....	83
2.10	– Um modelo de CA incorporando variáveis de macro-escala.....	84
3.1	– Localização das cidades em estudo: Bauru e Piracicaba, interior de SP.....	91
3.2	– Atual matriz de transportes no Estado de São Paulo e rede urbana ao longo da bacia do rio Tietê	94
3.3	– Vista de Piracicaba com edifícios residenciais ao fundo.....	102
3.4	– Vista aérea de Bauru com edifícios residenciais	105
3.5	– Evolução da área urbana de Bauru no século XX	106
3.6	– PIBs setoriais da cidade de Bauru nas últimas quatro décadas	106
3.7	– Vista da cidade de Piracicaba e suas áreas verdes.....	108
3.8	– PIBs setoriais da cidade de Piracicaba nas últimas quatro décadas	109
4.1	– Mapa de Piracicaba - 1999	113
4.2	– Mosaico de fotos aéreas digitais para a cidade de Piracicaba - 1962.....	114
4.3	– Imagem TM – 5 de Piracicaba, 1B_4R_7G, 222/76 – 16/07/99.....	117
4.4	– Reconstituição do mapa da cidade de Piracicaba em 1962	123
4.5	– Imagem georreferenciada de Bauru com pontos de controle	124
4.6	– Acoplamento entre as imagens de Piracicaba de 1985 e 1999.....	125
4.7	– Registro imagem-dado vetorial para o mapa de Bauru em 2000	127
4.8	– Seqüência de operações para a geração de um mapa de distância aos núcleos de atividades comerciais	128
4.9a	– Setor oeste do mapa da cidade de Bauru sobreposto à imagem TM – 5	129
4.9b	– Setor leste do mapa da cidade de Bauru sobreposto à imagem TM – 5.....	129
5.1	– Esquema ilustrativo do método de pesos de evidência.....	134
5.2	– Imagem ilustrativa mostrando a análise visual para a identificação de fatores responsáveis pela transição `residencial_uso misto´ em Bauru: 1979-1988	143
5.3	– Exemplo de análise visual comparativa para a calibração empírica em relação à transição “residencial-uso de serviços (res_serv)” em Bauru de 1979 a 1988	146
5.4	– Exemplos de diagramas de espalhamento e linhas de tendência: relações entre subcategorias de evidências (<i>eixo X</i>) e pesos de evidência (<i>eixo Y</i>), considerando-se diferentes tipos de mudanças de uso do solo	147
5.5	– Exemplo do método de resoluções múltiplas para uma cena 10 x 10 pixels e com quatro classes	149

5.6	– Diagramas de espalhamento esquemáticos mostrando a presença/ausência de doença coronariana (DC) em relação à idade dos indivíduos (à esquerda), e a frequência de incidência de DC versus o ponto médio de grupos etários de dez anos	151
5.7	– Gráfico ilustrativo de <i>logits</i> para três modelos diferentes mostrando a presença e ausência de interação	158
5.8	– Gráficos ilustrativos de relações estatísticas com e sem um modelo de regressão linear ajustado.....	168
5.9	– Gráfico ilustrativo da função de autocorrelação para a variável resposta: área de destino - uso industrial (destarea) em Bauru para os anos 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995 e 2000	171
5.10	– Gráfico ilustrativo de resíduos padronizados versus a variável independente (valor adicionado industrial - `vaind`) de um modelo de regressão para a área industrial - Piracicaba: 1970-2000	176
5.11	– Modelo de dados genérico do DINAMICA para aplicações urbanas	181
5.12	– Fluxograma de síntese metodológica	186
6.1	– Mapa oficial da cidade de Bauru em 1967	190
6.2	– Mapa oficial da cidade de Bauru em 1979	190
6.3	– Mapa de uso do solo de Bauru em 1967 (esquerda) e 1979 (direita).....	191
6.4	– Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso de Bauru: 1967-1979	192
6.5	– Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Bauru durante o período de simulação 1967-1979.....	193
6.6	– Exemplo de um mapa de transição de uso do solo (não-urbano para lazer/recreação) de Bauru no período: 1967-1979	196
6.7a	– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1967-1979.....	198
6.7b	– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1967-1979 (continuação).....	199
6.8	– Melhores simulações comparadas com o uso do solo em Bauru-1979	201
6.9	– Mapa oficial da cidade de Bauru em 1979	204
6.10	– Imagem TM – 5 de Bauru e mapa oficial da cidade em 1988.....	204
6.11	– Mapa de uso do solo de Bauru em 1979 (esquerda) e 1988 (direita).....	205
6.12	– Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso de Bauru:1979-1988	206
6.13	– Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Bauru durante o período de simulação 1979-1988.....	207
6.14a	– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1979-1988, obtidos pelo método de pesos de evidência	211
6.14b	– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1979-1988, obtidos pelo método de pesos de evidência (continuação)	212
6.15	– Melhores simulações produzidas pelo método de pesos de evidência comparadas com o uso do solo real em Bauru-1988.....	213
6.16	– <i>Boxplot</i> da transição `residencial para uso misto` versus conjuntos habitacionais (esquerda) e <i>boxplot</i> da transição `não-urbano para uso industrial` versus distâncias a zonas industriais (direita) - Bauru: 1979-1988.	214
6.17	– Conversão de grades numéricas em banco de dados estatísticos no MINITAB 13.0	216

6.18a– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1979-1988, obtidos pelo método de regressão logística.....	218
6.18b– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1979-1988, obtidos pelo método de regressão logística (continuação).....	219
6.19 – Melhores simulações produzidas pelo método de regressão logística comparadas com o uso do solo real em Bauru-1988	220
6.20 – Imagem TM – 5 de Bauru e mapa oficial da cidade em 1988.....	221
6.21 – Imagem TM – 5 de Bauru e mapa oficial da cidade em 2000.....	221
6.22 – Mapa de uso do solo de Bauru em 1988 (esquerda) e 2000 (direita).....	222
6.23 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso de Bauru:1988-2000	223
6.24 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Bauru durante o período de simulação 1988-2000.....	224
6.25a– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1988-2000	228
6.25b– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru: 1988-2000 (continuação).....	229
6.26 – Melhores simulações comparadas com o uso do solo em Bauru-2000	230
6.27a– Simulações anuais para Bauru: 1967-1974.....	232
6.27b– Simulações anuais para Bauru: 1975-1982	233
6.27c– Simulações anuais para Bauru: 1983-1990.....	234
6.27d– Simulações anuais para Bauru: 1991-1998	235
6.27e– Simulações anuais para Bauru: 1999-2000.....	236
6.28 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso residencial (destarea)	239
6.29 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo "nu_res": Bauru, 2000-2004	240
6.30 – Análise de resíduos para o modelo "nu_res": Bauru, 2000-2004.....	241
6.31 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso industrial (destarea)	242
6.32 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo "nu_ind": Bauru, 2000-2004	243
6.33 – Análise de resíduos para o modelo "nu_ind": Bauru, 2000-2004	244
6.34 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso de serviços (destarea).....	245
6.35 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo "nu/res_serv": Bauru, 2000-2004	246
6.36 – Análise de resíduos para o modelo "nu/res_serv": Bauru, 2000-2004	247
6.37 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2004 comparadas ao uso do solo real em Bauru-2000	249
6.38 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2007 comparadas ao uso do solo real em Bauru-2000	252
6.39 – Mapa oficial da cidade de Piracicaba em 1962 (mapa reconstituído).....	254
6.40 – Imagem TM – 5 de Piracicaba e mapa oficial da cidade em 1985.....	254
6.41 – Mapa de uso do solo de Piracicaba em 1962 (esquerda) e 1985 (direita).....	255
6.42 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de Piracicaba:1962-1985.....	256
6.43 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Piracicaba durante o período de simulação 1962-1985.....	258

6.44a– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Piracicaba: 1962-1985	263
6.44b– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Piracicaba: 1962-1985 (continuação).....	264
6.44c– Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Piracicaba: 1962-1985 (continuação).....	265
6.45 – Melhores simulações comparadas com o uso real em Piracicaba-1985	266
6.46 – Imagem TM – 5 de Piracicaba e mapa oficial da cidade em 1985	267
6.47 – Imagem TM – 5 de Piracicaba e mapa oficial da cidade em 1999	267
6.48 – Mapa de uso do solo de Piracicaba em 1985 (esquerda) e 1999 (direita)	268
6.49 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de Piracicaba: 1985-1999	269
6.50 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Piracicaba durante o período de simulação 1985-1999	270
6.51 – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Piracicaba: 1985-1999	274
6.52 – Melhores simulações comparadas com o uso real em Piracicaba-1999	276
6.53a– Simulações anuais para Piracicaba: 1962-1969	278
6.53b– Simulações anuais para Piracicaba: 1970-1977.....	279
6.53c– Simulações anuais para Piracicaba: 1978-1985.....	280
6.53d– Simulações anuais para Piracicaba: 1986-1993.....	281
6.53e– Simulações anuais para Piracicaba: 1994-1999	282
6.54 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso de serviços (destarea).....	285
6.55 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo "nu_res": Piracicaba, 2000-2004	286
6.56 – Análise de resíduos para o modelo "nu_res": Piracicaba, 2000-2004	287
6.57 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso industrial (destarea)	288
6.58 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo "nu_ind": Piracicaba, 2000-2004	289
6.59 – Análise de resíduos para o modelo "nu_ind": Piracicaba, 2000-2004	290
6.60 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2004 comparadas ao uso do solo real em Piracicaba-1999	292
6.61 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2007 comparadas ao uso do solo real em Piracicaba-1999	295

LISTA DE TABELAS

1.1	– Tendências e projeções da população urbana por região, 1950-2010.....	42
3.1	– Evolução comparativa do incremento de áreas urbanas entre a metrópole de São Paulo e principais cidades do interior paulista – 1974-1989.....	101
4.1	– População urbana, PIB total e setorial de Bauru – 1970-2000.....	121
4.2	– População urbana, PIB total e setorial de Piracicaba – 1970-2000.....	121
4.3	– Coordenadas dos pontos de controle no georreferenciamento para Bauru	124
4.4	– Coordenadas dos pontos de controle no georreferenciamento para Piracicaba.	124
6.1	– Transições de uso do solo existentes em Bauru: 1967-1979.....	192
6.2	– Matriz de probabilidades globais de transição para Bauru: 1967-1979	192
6.3	– Variáveis independentes das transições de uso em Bauru: 1967-1979	194
6.4	– Seleção de variáveis para as transições de uso em Bauru: 1967-1979.....	194
6.5	– Associações entre variáveis independentes - Bauru: 1967-1979.....	195
6.6	– Valores de W^+ para as variáveis independentes - Bauru: 1967–1979	197
6.7	– Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições do uso do solo em Bauru: 1967–1979.....	200
6.8	– Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Bauru: 1967–1979	202
6.9	– Transições de uso do solo existentes em Bauru: 1979-1988.....	206
6.10	– Matriz de probabilidades de transição globais para Bauru: 1979-1988	206
6.11	– Variáveis independentes das transições de uso em Bauru: 1979-1988	208
6.12	– Seleção de variáveis para as transições de uso em Bauru: 1979-1988.....	208
6.13	– Associações entre variáveis independentes - Bauru: 1979-1988.....	209
6.14	– Valores de W^+ para as variáveis independentes - Bauru: 1979–1988	209
6.15	– Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Bauru: 1979–1988.....	212
6.16	– Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso obtidas pelo método de pesos de evidência para Bauru: 1979–1988.....	213
6.17	– Correlações entre variáveis independentes - Bauru: 1979-1988	215
6.18	– Resultados das análises de regressão logística para Bauru: 1979-1988.....	217
6.19	– Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso obtidas pelo método de regressão logística para Bauru: 1979–1988	219
6.20	– Transições de uso do solo existentes em Bauru: 1988-2000.....	223
6.21	– Matriz de probabilidades globais de transição para Bauru: 1988-2000	223
6.22	– Variáveis independentes das transições de uso em Bauru: 1988-2000	225
6.23	– Seleção de variáveis para as transições de uso em Bauru: 1988-2000.....	225
6.24	– Associações entre variáveis independentes - Bauru: 1988-2000.....	226
6.25	– Valores de W^+ para as variáveis independentes - Bauru: 1988–2000	226
6.26	– Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Bauru: 1988–2000.....	229
6.27	– Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Bauru: 1988–2000	230
6.28	– Matriz de probabilidades de transição anuais para Bauru: 1967–1979.....	231

6.29 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Bauru: 1979–1988	231
6.30 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Bauru: 1988–2000	231
6.31 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Bauru, 2000–2004	237
6.32 – Áreas de uso de destino, população urbana, PIB total e setorial (US\$): Bauru - 1970-2000	238
6.33 – Matriz de correlação para o modelo "nu_res": Bauru, 2000–2004	240
6.34 – Análise de variância para o modelo "nu_res": Bauru, 2000–2004	240
6.35 – Matriz de correlação para o modelo "nu_ind": Bauru, 2000–2004	243
6.36 – Análise de variância para o modelo "nu_ind": Bauru, 2000–2004	243
6.37 – Matriz de correlação para o modelo "nu/res_serv": Bauru, 2000–2004	246
6.38 – Análise de variância para o modelo "nu/res_serv": Bauru, 2000–2004	246
6.39 – Matriz de probabilidades de transição otimistas para Bauru: 2000–2004	248
6.40 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas para Bauru: 2000–2004	248
6.41 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Bauru, 2000–2007	250
6.42 – Matriz de probabilidades de transição otimistas para Bauru: 2000–2007	251
6.43 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas para Bauru: 2000–2007	251
6.44 – Transições de uso do solo existentes em Piracicaba: 1962-1985	256
6.45 – Matriz de probabilidades globais de transição para Piracicaba: 1962-1985	257
6.46 – Variáveis independentes das transições de uso em Piracicaba: 1962-1985	257
6.47 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Piracicaba: 1962-1985	259
6.48 – Associações entre variáveis independentes -Piracicaba: 1962-1985	259
6.49 – Valores de W^+ para as variáveis independentes -Piracicaba: 1962–1985	260
6.50 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Piracicaba: 1962–1985	265
6.51 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Piracicaba: 1962–1985	266
6.52 – Transições de uso do solo existentes em Piracicaba: 1985-1999	269
6.53 – Matriz de probabilidades globais de transição para Piracicaba: 1985-1999	269
6.54 – Variáveis independentes das transições de uso em Piracicaba: 1985-1999	271
6.55 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Piracicaba: 1985-1999	271
6.56 – Associações entre variáveis independentes -Piracicaba: 1985-1999	272
6.57 – Valores de W^+ para as variáveis independentes -Piracicaba: 1985–1999	272
6.58 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Piracicaba: 1985–1999	275
6.59 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Piracicaba: 1985–1999	275
6.60 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Piracicaba: 1962–1985	277
6.61 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Piracicaba: 1985–1999	277
6.62 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Piracicaba, 2000–2004	283
6.63 – Áreas de uso de destino, população urbana, PIB total e setorial (US\$): Piracicaba - 1970-2000	284
6.64 – Matriz de correlação para o modelo "nu_res": Piracicaba, 2000–2004	286
6.65 – Análise de variância para o modelo "nu_res": Piracicaba, 2000–2004	286
6.66 – Matriz de correlação para o modelo "nu_ind": Piracicaba, 2000–2004	289
6.67 – Análise de variância para o modelo "nu_ind": Piracicaba, 2000–2004	289

6.68 – Matriz de probabilidades de transição otimistas: Piracicaba, 2000–2004.....	291
6.69 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas: Piracicaba, 2000–2004	291
6.70 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Piracicaba, 2000–2007	293
6.71 – Matriz de probabilidades de transição otimistas: Piracicaba, 2000–2007.....	294
6.72 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas: Piracicaba, 2000–2007	294

LISTA DE EQUAÇÕES

- 2.1 $D_j = A \exp(-\beta d_j)$ 63
- 2.2 $P(t+1) = a_1 + b_1 E(t-1)$ 67
- 2.3 $S(t+1) = a_2 + b_2 P(t)$ 67
- 2.4 $E^b(t+1) = a_3 + b_3 X(t+1)$ 67
- 2.5 $E(t+1) = E^b(t+1) + E^l(t+1) + S(t+1)$ 67
- 2.6 $W_j^\circ = \varepsilon \sum_i \frac{W_j^a \exp(-\beta_i c_{ij})}{\sum_j W_j^a \exp(-\beta_i c_{ij})} e_i P_i - k W_j$ 73
- 2.7 $W_j^\circ = \varepsilon \sum_i \frac{[A_j (k + c_{ij}) - \beta_i]^a}{\sum_j [A_j (k + c_{ij}) - \beta_i]^a} e_i P_i - (k + c_{ij}) W_j$ 74
- 4.1 $\frac{PIB\ 1996\ (US\$ de\ 1998)}{PIB\ 2000\ (US\$ de\ 1998)} = \frac{PIB\ 1996\ (R\$ de\ 2001)}{PIB\ 2000\ (R\$ de\ 2001)}$ 119
- 4.2 $\frac{PIB\ 1996\ (US\$ de\ 1998)}{PIB\ 1995\ (US\$ de\ 1998)} = \frac{PIB\ 1996\ (R\$ de\ 2001)}{PIB\ 1995\ (R\$ de\ 2001)}$ 119
- 4.3 $VA\ (R\$ de\ 2000) = VA\ (R\$ de\ 2001) \times \frac{IPCA\ (2000)}{IPCA\ (2001)}$ 120
- 4.4 $PIB_k\ setorial\ (US\$ de\ 1998) = PIB\ total\ (US\$ de\ 1998) \times \frac{PIB_k\ set./VA_k\ set.\ (R\$ de\ 2000)}{PIB\ total/VA\ total\ (R\$ de\ 2000)}$ 120
- 4.5 $PIB_k\ setorial\ (US\$ de\ 1998) = PIB\ total\ (US\$ de\ 1998) \times Taxa\ Proporcional_k^{1990}$ 120
- 4.6 $Taxa\ Proporcional_k^{1990} = \frac{Taxa\ Proporcional_k^{(1989 + 1991)}}{2}$ 120

$$4.7 \quad Taxa \text{ Proporcional}_k^{1991} = \frac{Taxa \text{ Proporcional}_k^{(1989 + 1993)}}{2} \quad 120$$

$$4.8 \quad Taxa \text{ Proporcional}_k^{1989} = \frac{Taxa \text{ Proporcional}_k^{(1985 + 1993)}}{2} \quad 121$$

$$4.9 \quad Taxa \text{ Proporcional}_k^{1985} = \frac{PIB \text{ Setorial}_k^{1985}}{PIB \text{ Total}^{1985}} \quad 121$$

$$4.10 \quad Taxa \text{ Proporcional}_k^{1993} = \frac{VA \text{ Setorial}_k^{1993}}{VA \text{ Total}^{1993}} \quad 121$$

$$5.1 \quad P \{R/S\} = \frac{P \{R \cap S\}}{P \{S\}} \quad 134$$

$$5.2 \quad P \{R/S\} = \frac{N \{R \cap S\}}{N \{S\}} \quad 134$$

$$5.3 \quad P \{S/R\} = \frac{P \{S \cap R\}}{P \{R\}} \quad 135$$

$$5.4 \quad P \{R/S\} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S/R\}}{P \{S\}} \quad 135$$

$$5.5 \quad P \{R/\bar{S}\} = \frac{P \{R\} \cdot P \{\bar{S}/R\}}{P \{\bar{S}\}} \quad 135$$

$$5.6 \quad \frac{P \{R/S\}}{P \{\bar{R}/S\}} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S/R\}}{P \{\bar{R}/S\} \cdot P \{S\}} \quad 135$$

$$5.7 \quad P \{\bar{R}/S\} = \frac{P \{\bar{R} \cap S\}}{P \{S\}} = \frac{P \{S/\bar{R}\} \cdot P \{\bar{R}\}}{P \{S\}} \quad 136$$

$$5.8 \quad \frac{P \{R/S\}}{P \{\bar{R}/S\}} = \frac{P \{R\}}{P \{\bar{R}\}} \cdot \frac{P \{S\}}{P \{S\}} \cdot \frac{P \{S/R\}}{P \{S/\bar{R}\}} \quad 136$$

$$5.9 \quad O \{R/S\} = O \{R\} \cdot \frac{P \{S/R\}}{P \{S/\bar{R}\}} \quad 136$$

$$5.10 \quad \text{logit} \{R/S\} = \text{logit} \{R\} + W^+ \quad 136$$

$$5.11 \quad O \{R/\bar{S}\} = O \{R\} \cdot \frac{P \{\bar{S}/R\}}{P \{\bar{S}/\bar{R}\}} \quad 136$$

$$5.12 \quad \text{logit} \{R/\bar{S}\} = \text{logit} \{R\} + W^- \quad 137$$

$$5.13 \quad P \{R/S_1 \cap S_2\} = \frac{P \{R \cap S_1 \cap S_2\}}{P \{S_1 \cap S_2\}} \quad 137$$

$$5.14 \quad P \{R/S_1 \cap S_2\} = \frac{P \{S_1 \cap S_2/R\} \cdot P \{R\}}{P \{S_1 \cap S_2\}} \quad 138$$

$$= \frac{P \{S_1 \cap S_2/R\} \cdot P \{R\}}{P \{S_1 \cap S_2/R\} \cdot P \{R\} + P \{S_1 \cap S_2/\bar{R}\} \cdot P \{\bar{R}\}} \quad 138$$

$$5.15 \quad P \{S_1 \cap S_2/R\} = P \{S_1/R\} \cdot P \{S_2/R\} \quad 138$$

$$5.16 \quad P \{R/S_1 \cap S_2\} = P \{R\} \cdot \frac{P \{S_1/R\}}{P \{S_1\}} \cdot \frac{P \{S_2/R\}}{P \{S_2\}} \quad 138$$

$$5.17 \quad O \{R/S_1 \cap S_2\} = O \{R\} \cdot LS_1 \cdot LS_2 \quad 138$$

$$5.18 \quad \text{logit} \{R/S_1 \cap S_2\} = \text{logit} \{R\} + W^+_1 + W^+_2 \quad 139$$

$$5.19 \quad \text{logit} \{R/S_1 \cap \bar{S}_2\} = \text{logit} \{R\} + W^+_1 + W^-_2 \quad 139$$

$$5.20 \quad \text{logit} \{R/\bar{S}_1 \cap S_2\} = \text{logit} \{R\} + W^-_1 + W^+_2 \quad 139$$

$$5.21 \quad \text{logit} \{R/\bar{S}_1 \cap \bar{S}_2\} = \text{logit} \{R\} + W^-_1 + W^-_2 \quad 139$$

$$5.22 \quad O \{R/S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots S_n\} = O \{R\} \cdot \prod_{i=1}^n LS_i \quad 139$$

$$5.23 \quad \text{logit} \{R/S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots S_n\} = \text{logit} \{R\} + \sum_{i=1}^n W^+_i \quad 139$$

$$5.24 \quad T_{ij}^* = \frac{T_i \cdot T_j}{T_{..}} \quad 141$$

$$5.25 \quad X^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{ij}^*} \quad 141$$

$$5.26 \quad V = \sqrt{\frac{X^2}{T_{..} M}} \quad 141$$

$$5.27 \quad H(A) = - \sum_{j=1}^m p_{.j} \ln p_{.j} \quad 142$$

$$5.28 \quad H(B) = - \sum_{i=1}^n p_{i.} \ln p_{i.} \quad 142$$

$$5.29 \quad H(A,B) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad 142$$

$$5.30 \quad U(A,B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A,B)}{H(A) + H(B)} \right] \quad 142$$

$$5.31 \quad C = W^+ - W^- \quad 144$$

$$5.32 \quad S^2(C) = \frac{1}{P \{S \cap R\}} + \frac{1}{P \{S \cap \bar{R}\}} + \frac{1}{P \{\bar{S} \cap R\}} + \frac{1}{P \{\bar{S} \cap \bar{R}\}} \quad 144$$

$$5.33 \quad P_{x,y} \{R/S_1 \cap S_2 \cap \dots S_n\} = \frac{O \{R\} \cdot e^{\sum_{i=1}^n W^+_{x,y}}}{1 + O \{R\} \cdot e^{\sum_{i=1}^n W^+_{x,y}}} \quad 145$$

$$5.34 \quad F_w = \frac{\sum_{s=1}^{tw} \left[1 - \sum_{i=1}^p \frac{|a_{i1} - a_{i2}|}{2w^2} \right]^s}{tw} \quad 148$$

$$5.35 \quad F_t = \frac{\sum_{w=1}^n F_w e^{-k(w-1)}}{\sum_{w=1}^n e^{-k(w-1)}} \quad 149$$

$$5.36 \quad L = \log \left[\frac{P_{i,j}(x,y)}{1 - P_{i,j}(x,y)} \right] = \beta_{0,ij} + \beta_{1,ij} \cdot V_{1,xy} + \dots + \beta_{k,ij} \cdot V_{k,xy} \quad 151$$

$$5.37 \quad P_{i,j}(x,y) = \frac{e^L}{1 + e^L} \quad 152$$

$$5.38 \quad g_1(x) = \log \left[\frac{P(Y=1/X_{1-p})}{P(Y=0/X_{1-p})} \right], \quad g_1(x) = \beta_{10} + \beta_{11} \cdot X_1 + \dots + \beta_{1p} \cdot X_p \quad 152$$

$$5.39 \quad g_2(x) = \log \left[\frac{P(Y=2/X_{1-p})}{P(Y=0/X_{1-p})} \right], \quad g_2(x) = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot X_1 + \dots + \beta_{2p} \cdot X_p \quad 152$$

$$5.40 \quad P(Y=0/X_{1-p}) = \frac{1}{1 + e^{g_1(x)} + e^{g_2(x)}} \quad 153$$

$$5.41 \quad P(Y=1/X_{1-p}) = \frac{e^{g_1(x)}}{1 + e^{g_1(x)} + e^{g_2(x)}} \quad 153$$

$$5.42 \quad P(Y=2/X_{1-p}) = \frac{e^{g_2(x)}}{1 + e^{g_1(x)} + e^{g_2(x)}} \quad 153$$

$$5.43 \quad l(\beta) = \prod_{i=1}^n \{ \pi(x_i)^{y_i} [1 - \pi(x_i)]^{1-y_i} \}, \quad 153$$

$$5.44 \quad \pi(x_i) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p}} \quad 153$$

$$5.45 \quad L(\beta) = \ln [l(\beta)] = \sum_{i=1}^n \{y_i \ln[\pi(x_i)] + (1 - y_i) \ln [1 - \pi(x_i)]\} \quad 153$$

$$5.46 \quad \sum_{i=1}^n [y_i - \pi(x_i)] = 0 \quad 154$$

$$5.47 \quad \sum_{i=1}^n x_i [y_i - \pi(x_i)] = 0 \quad 154$$

$$5.48 \quad l(\beta) = \prod_{i=1}^n [\pi_0(x_i)^{y_{0i}} \pi_1(x_i)^{y_{1i}} \pi_2(x_i)^{y_{2i}}] \quad 154$$

$$5.49 \quad L(\beta) = \sum_{i=1}^n y_{1i} g_1(x_i) + y_{2i} g_2(x_i) - \ln (1 + e^{g_1(x_i)} + e^{g_2(x_i)}) \quad 154$$

$$5.50 \quad \frac{\partial L(\beta)}{\partial \beta_{jk}} = \sum_{i=1}^n x_{ki} (y_{ji} - \pi_{ji}) \quad 154$$

$$5.51 \quad W = \frac{\hat{\beta}_i}{(\hat{SE}) \hat{\beta}_i} \quad 155$$

$$5.52 \quad G = -2 \{L(\beta) - [n_1 \ln(n_1) + n_0 \ln(n_0) - n \ln(n)]\} \quad 155$$

$$5.53 \quad \Delta_{A,B} = 1/N \sum_{i=1}^N (x_A(i) - \bar{x}_A(i)) (x_B(i) - \bar{x}_B(i)) \quad 157$$

$$5.54 \quad \alpha'_{A,B} = \frac{\Delta_{A,B}}{\sqrt{\sigma_A^2 \cdot \sigma_B^2}} \quad 158$$

$$5.55 \quad P_{i,j}(x,y) = \frac{e^{\beta_0 + \gamma_{i,j} V(x,y)}}{1 + \sum_{i=1}^t e^{\beta_0 + \gamma_{i,j} V(x,y)}} \quad 160$$

$$5.56 \quad m_j \hat{\pi}_j = m_j (\exp [\hat{g}(x_j)] / \{1 - \exp [\hat{g}(x_j)]\}) \quad 161$$

$$5.57 \quad r(y_j, \hat{\pi}_j) = \frac{(y_j - m_j \hat{\pi}_j)}{\sqrt{m_j \hat{\pi}_j (1 - \hat{\pi}_j)}} \quad 161$$

$$5.58 \quad X^2 = \sum_{j=1}^J r(y_j, \hat{\pi}_j)^2 \quad 161$$

$$5.59 \quad d(y_j, \hat{\pi}_j) = \pm \left\{ 2 \left[y_j \ln \left(\frac{y_j}{m_j \hat{\pi}_j} \right) + (m_j - y_j) \ln \left(\frac{(m_j - y_j)}{m_j (1 - \hat{\pi}_j)} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad 162$$

$$5.60 \quad d(y_j, \hat{\pi}_j) = - \sqrt{2m_j \left| \ln(1 - \hat{\pi}_j) \right|} \quad 162$$

$$5.61 \quad d(y_j, \hat{\pi}_j) = - \sqrt{2m_j \left| \ln(\hat{\pi}_j) \right|} \quad 162$$

$$5.62 \quad D = \sum_{j=1}^J d(y_j, \hat{\pi}_j)^2 \quad 162$$

$$5.63 \quad \hat{C} = \sum_{k=1}^g \frac{(o_k - n'_k \bar{\pi}_k)^2}{n'_k \bar{\pi}_k (1 - \bar{\pi}_k)} \quad 162$$

$$5.64 \quad o_k = \sum_{j=1}^{c_k} y_j \quad 163$$

$$5.65 \quad \bar{\pi}_k = \sum_{j=1}^{c_k} \frac{m_j \hat{\pi}_j}{n'_k} \quad 163$$

$$5.66 \quad \prod (t + 1) = P^n \cdot \prod (t) \quad 164$$

$$5.67 \quad P_{ij} = a_{ij} / \sum_j a_{ij} \quad 165$$

$$5.68 \quad P = H V H^{-1} \quad 166$$

$$5.69 \quad P^n = H V^n H^{-1} \quad 166$$

$$5.70 \quad P^\infty = H \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} H^{-1} \quad 166$$

$$5.71 \quad \sqrt{\quad} (t + 1) = P [f(t)] \cdot \sqrt{\quad} (t) \quad 167$$

$$5.72 \quad Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad 169$$

$$5.73 \quad E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_{p-1} X_{p-1} \quad 169$$

$$5.74 \quad \gamma_k = \text{Cov}(Z_t, Z_{t+k}) = E(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu) \quad 170$$

$$5.75 \quad \rho_k = \frac{\text{Cov}(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{\text{Var}(Z_t)} \sqrt{\text{Var}(Z_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad 170$$

$$5.76 \quad \underset{nx1}{Y} = \underset{nxp}{X} \underset{px1}{\beta} + \underset{nx1}{\varepsilon} \quad 171$$

$$5.77 \quad E(Y) = X \beta \quad 172$$

$$5.78 \quad \sigma^2(Y) = \sigma^2 I \quad 172$$

$$5.79 \quad \underset{px1}{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{p-1} \end{bmatrix} \quad 172$$

$$5.80 \quad \underset{pxp}{(X'X)} \underset{px1}{b} = \underset{pxn}{X'} \underset{nx1}{Y} \quad 172$$

$$5.81 \quad \underset{px1}{b} = \underset{pxp}{(X'X)^{-1}} \underset{px1}{X'Y} \quad 172$$

$$5.82 \quad \hat{Y}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_1 \\ \hat{Y}_2 \\ \cdot \\ \hat{Y}_n \end{bmatrix} \quad 173$$

$$5.83 \quad e_{n \times 1} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ e_n \end{bmatrix} \quad 173$$

$$5.84 \quad \hat{Y} = Xb \quad 173$$

$$5.85 \quad e = Y - \hat{Y} \quad 173$$

$$5.86 \quad SSTO = Y'Y - n\bar{Y}^2 \quad 173$$

$$5.87 \quad SSR = b'X'Y - n\bar{Y}^2 \quad 173$$

$$5.88 \quad SSE = e'e = Y'Y - b'X'Y \quad 173$$

$$5.89 \quad MSR = \frac{SSR}{p - 1} \quad 174$$

$$5.90 \quad MSE = \frac{SSE}{n - p} \quad 174$$

$$5.91 \quad F^* = \frac{MSR}{MSE} \quad 174$$

$$5.92 \quad R^2 = \frac{SSR}{SSTO} = 1 - \frac{SSE}{SSTO} \quad 174$$

$$5.93 \quad \hat{Y}_h \pm t(1 - \alpha/2; n - p) S(Y_{h(nova)}) \quad 175$$

$$5.94 \quad S^2(Y_{h(nova)}) = MSE(1 + X'_h(X'X)^{-1}X_h) \quad 175$$

5.95	$zre_i = \frac{e_i}{\sqrt{MSE}}$	175
5.96	$P_{nu_ind} = \frac{ind_f - ind_i}{n\tilde{a}o-urb_i}$	177
5.97	$P_{nu_res} = \frac{res_f - res_i}{n\tilde{a}o-urb_i}$	177
5.98	$P_{nu_serv} = \frac{(serv_f - serv_i) - res_serv}{n\tilde{a}o-urb_i}$	178
5.99	$P_{res_serv} = \frac{(serv_f - serv_i) - nu_serv}{n\tilde{a}o-urb_i}$	178
5.100	$P_{nu_res} = \frac{(res_f - res_i) - [(serv_f - serv_i) - nu_serv] - (mist_f - mist_i)}{n\tilde{a}o-urb_i}$	179
5.101	$Q_{ij} = r \times (\text{função expander}) + s \times (\text{função patcher})$	183
5.102	$\text{If } n_j > 3 \text{ então } P'_{ij}(x,y) = P_{ij}(x,y) \text{ senão}$	184
	$P'_{ij}(x,y) = P_{ij}(x,y) \times (n_j)/4$	
6.1	$Y = 29.705,243 + 0,116 \cdot popurb$	239
6.2	$Y = 0,008343 \cdot pibind$	242
6.3	$Y = 1.590,457 + 0,02401 \cdot popurb$	245
6.4	$Y = 0,008081 \cdot pibtot$	285
6.5	$Y = 1.105,895 + 0,001795 \cdot pibind$	288

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACF	- Função de Autocorrelação (Autocorrelation Function)
AI	- Inteligência Artificial (Artificial Intelligence)
ANOVA	- Análise de Variância
a.C.	- Antes de Cristo (Ano Cristão)
c.	- cerca, aproximadamente
CA	- Autômatos Celulares (Cellular Automata)
CASA	- Centre for Advanced Spatial Analysis - University College London
CEPAM	- Centro de Estudos e Pesquisas de Administração Municipal
CESP	- Companhia Energética de São Paulo
CIAGRI	- Centro de Informática - Escola de Agronomia da Universidade de São Paulo
CITP	- Consórcio Intermunicipal Tietê-Paraná
DAEE	- Departamento de Água e Energia do Estado de São Paulo
d.C.	- Ano Cristão
EMPLASA	- Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano SA
EPUSP	- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ESA	- European Space Agency
ESALQ	- Escola de Agronomia “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo
GIS	- Sistemas de Informações Geográficas (Geographical Information Systems)
GISc	- Ciência da Informação Geográfica (Geographical Information Science)
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	- Institute of Electrical and Electronic Engineers

INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JRC	- Joint Research Center – European Commission
IPCA	- Índice de Preços ao Consumidor Anual
IPEA	- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITE-FCEB	- Instituto Toledo de Ensino – Faculdade de Ciências Econômicas – Bauru
LEGAL	- Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
LSN	- Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ
LUCC	- Mudanças de Uso e Cobertura do Solo (Land Use & Land Cover Change)
MAS	- Sistemas Multi-Agentes (Multi-Agent Systems)
MSS	- Sensor Multispectral Scanner
NICs	- Países Recém-Industrializados (Newly Industrialized Countries)
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NPP	- Produção Primária Líquida (Net Primary Production)
ORB	- Online Reference Book (Manual de Referência Online)
PC	- Ponto de Controle
PIB	- Produto Interno Bruto
PND	- Plano Nacional de Desenvolvimento
RS	- Sensoriamento Remoto (Remote Sensing)
SEPLAN	- Secretaria Municipal de Planejamento de Bauru
SOC	- Criticalidade Auto-Organizável (Self-Organized Criticality)
SUDENE	- Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SUDAM	- Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia
TOMM	- Time-Oriented Metropolitan Model (Modelo Metropolitano Baseado no Tempo)
TM	- Sensor Thematic Mapper

- TM - 5 - Sensor Thematic Mapper do Landsat 5
- TNCs - Corporações Transnacionais (Transnational Corporations)
- USP - Universidade de São Paulo
- UNESP - Universidade Estadual de São Paulo
- UTM - Universal Transverse Mercator (Sistema de Projeção Geográfica)
- VA - Valor Adicionado
- WRS - Sistema Internacional de Referência (Worldwide Reference System)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tópico de Pesquisa

Nos últimos dois séculos, em particular nas últimas décadas, a humanidade presenciou a drástica mudança de população de áreas rurais para urbanas. De acordo com um relatório do Banco Mundial, a proporção da população mundial morando em áreas urbanas passou de 33,6% em 1960 para 46,6% em 1999, e espera-se que esta quota atinja até 75,8% nos países recém-industrializados (“Newly Industrialized Countries” - NICs) e desenvolvidos (Easterly e Sewadeh, 2000). É igualmente previsto que 55% da população mundial seja constituída de moradores urbanos por volta de 2015 (United Nations, 1996).

Uma das primeiras e mais importantes forças direcionadoras destas mudanças no ambiente urbano do mundo desenvolvido desde o século XIX e início do século XX foi a Revolução Industrial, a qual se iniciou de fato a partir da segunda metade do século XVIII. O excedente populacional que se fazia sentir à época, fortalecido por contínuas quedas na taxa de mortalidade, em conjunção com fluxos migratórios de trabalhadores rurais expatriados causou sérios impactos nos centros urbanos deste período. Este aumento populacional foi acompanhado por um crescimento de bens e serviços em áreas urbanas, amparado por ganhos de produtividade na agricultura e indústria, possibilitados pelos rápidos avanços tecnológicos e conseqüente desenvolvimento econômico. Citando-se alguns exemplos, a população de Manchester passou de 12.000 habitantes em 1760 para mais de 400.000 na metade do século XIX. Londres, que já possuía um milhão de habitantes no final do século XVIII, passou a abrigar dois milhões e meio de pessoas por volta de 1851 (Benevolo, 1983).

Processos semelhantes de rápida industrialização e urbanização crescente foram vividos nos países em desenvolvimento no século XX. Na América Latina, o Brasil e a

Argentina entraram na era de produção industrial de larga escala a partir dos anos 50, ao passo que países como a Coréia do Sul, Indonésia e Malásia experienciaram a transição de uma economia basicamente rural para uma eminentemente industrial no final dos anos 70 e 80.

Entre 1950 e 1995, a população urbana na Ásia, África, América Latina e Caribe cresceu mais de cinco vezes, passando de 346 milhões para 1,8 bilhões de pessoas. Embora a Ásia e a África ainda possuam mais habitantes rurais do que urbanos (TABELA 1.1), ambas apresentam grandes contingentes de habitantes urbanos em números absolutos. Projeções das Nações Unidas sugerem que as populações urbanas estão crescendo de forma tão rápida, que 80% do crescimento da população mundial entre 1990 e 2010 ocorrerá em áreas urbanas, sobretudo na África, Ásia e América Latina (United Nations, 1998).

TABELA 1.1 – Tendências e projeções da população urbana por região, 1950 – 2010.

<i>Percentual de População Morando em Áreas Urbanas</i>					
<i>Região</i>	<i>1950</i>	<i>1965</i>	<i>1980</i>	<i>1995</i>	<i>2010*</i>
<i>África</i>	14,6	20,7	27,3	34,9	43,6
<i>Ásia</i>	17,4	22,4	26,7	34,7	43,6
<i>América Latina e Caribe</i>	41,4	53,4	64,9	73,4	78,6
<i>Restante do mundo</i>	55,3	64,1	70,5	74,2	78,0

* Projeções de acordo com censos realizados por volta de 1990. O restante do mundo inclui todos os países na Europa, América do Norte e Oceania.

FONTE: United Nations (1998, p. 25).

Dois aspectos correlatos deste rápido crescimento da população urbana foram o aumento do número de grandes cidades e a dimensão sem precedentes históricos adquirida por tais cidades de grande porte. Há apenas dois séculos, havia apenas duas “mega-cidades” no mundo (cidades portando um milhão de habitantes ou mais) –

Londres e Pequim. Em 1950, havia 80, e em 1990, já se somavam 293 “mega-cidades”. Uma grande (e crescente) proporção destas “mega-cidades” encontram-se na África, Ásia e América Latina, e muitas possuem populações que cresceram mais de dez vezes entre 1950 e 1990 (Hardoy et al. 2001).

No Brasil, o crescimento e desenvolvimento urbano estiveram por um longo período concentrados nas capitais de Estado ao longo da costa. Algumas delas passaram a ser reconhecidas como áreas metropolitanas nos anos 70, em vista da sua elevada densidade demográfica. Dada a sua localização estratégica e o fato de que eram bem supridas em termos de infra-estrutura e equipamentos sociais, elas puderam assegurar fortes laços com as regiões circunvizinhas, organizando de forma centralizada as relações econômicas das suas áreas de influência.

As estratégias de desenvolvimento adotadas no Brasil, assim como em muitos países latino-americanos, eram orientadas para mercados externos, objetivando eficiência econômica e crescente competitividade. Isto implicou o crescente aparecimento de economias externas de aglomeração¹, levando a um padrão espacial de desenvolvimento altamente concentrado, conforme anteriormente mencionado (Fernandes et al. 1977).

Entretanto, esta estrutura de desenvolvimento multi-centralizada baseada em “economias de aglomeração” apresentava sérias limitações. Após um período inicial de bom desempenho econômico, as áreas metropolitanas começaram a se comportar como “deseconomias de aglomeração”, devido a problemas que incluíam o crescente aumento do preço da terra; a possibilidade de colapso dos sistemas de transporte, telecomunicações e/ou abastecimento de água; maior tempo e custos despendidos para deslocamentos diários; maiores salários; problemas ambientais; e criminalidade.

Políticas para superar estes desequilíbrios regionais e os efeitos adversos do desenvolvimento espacialmente concentrado foram estabelecidas pelo governo brasileiro desde o final dos anos 50 e início dos anos 60, as quais culminaram na criação

¹ O termo “economias de aglomeração” é usado em economia urbana para descrever os benefícios que as empresas obtêm quando se localizam próximas entre si. Isto está relacionado com a idéia de economias de escala e efeitos em cadeia, segundo a qual, quanto mais empresas aproximarem-se umas das outras, menor o custo de produção e maior o mercado consumidor a ser atingido (Wikipedia, 2003).

da zona franca de Manaus (1957); na fundação da nova capital federal, Brasília (1960); na criação de instituições para o desenvolvimento regional, como a Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) em 1959, a Superintendência para o Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) em 1956, etc.; e em ações promotoras da descentralização do desenvolvimento industrial existente na área metropolitana de São Paulo, dentre outras iniciativas.

De todas essas ações, o II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND), lançado em 1974, constituiu-se no plano mais ambicioso para relocar parte das indústrias situadas na área metropolitana de São Paulo para outras regiões do Brasil. Este plano incluía a criação de fundos de desenvolvimento industrial e políticas para promover a exportação e a agroindústria, assim como para descentralizar a produção de insumos industriais. Seus objetivos foram parcialmente alcançados, uma vez que parte da pretendida relocação industrial efetivamente ocorreu no interior do Estado de São Paulo. Esta região apresentava boas infra-estrutura, uma agricultura bem-sucedida e uma rede urbana sem precedentes, consolidada desde a expansão do ciclo cafeeiro durante o século XIX (Fundação Seade, 1992).

Duas das cidades de médio porte localizadas no interior do Estado de São Paulo que herdaram parte do desenvolvimento industrial metropolitano são os focos da presente pesquisa de Doutorado: Bauru e Piracicaba. Em ambos os casos, os desafios para estudá-las reside no fato de que elas vivenciaram “booms” urbanizatórios e apresentam uma grande diversidade de especialização econômica nas últimas décadas.

A importância em se dirigir especial atenção e se conduzir pesquisa aprofundada sobre áreas urbanas pode ser explicada pelo fato de que essas áreas não apenas irão abrigar a maior parte da população do planeta, conforme já exposto, como também pelo fato de que as mesmas detêm o controle da economia mundial na presente era da globalização, gerenciando os fluxos de capital financeiro, recursos naturais e manufaturados, capital humano, informação, conhecimento tecnológico e científico e poder de decisão. De uma sábia e prudente administração de seus aparatos financeiros e institucionais, bem como

de um hábil gerenciamento de sua estrutura física, dependerá o sucesso ou o malogro da maior parte dos empreendimentos humanos.

É exatamente este o âmbito de interesse do planejamento estratégico local, o qual objetiva o melhor entendimento das dinâmicas que ocorrem na esfera física de áreas urbanas, além da conseqüente concepção de ferramentas e habilidades para antecipar prováveis eventos que terão lugar no ambiente urbano em um futuro próximo.

O planejamento tradicional sempre procurou racionalizar e esclarecer mudanças de caráter territorial nas cidades, assim como antecipar possíveis transformações. Da mesma forma, métodos quantitativos têm sido há tempos empregados em questões urbanas, visando-se ao entendimento de tais processos de mudanças. A teoria de anéis concêntricos de Von Thünen, o modelo clássico de Weber para a localização industrial, a teoria de lugares centrais de Christaller e a teoria de regiões econômicas de Lösch datam das últimas décadas do século XIX e início do século XX, respectivamente 1826, 1909, 1933 e 1940 (Merlin, 1973).

Com o advento de microcomputadores e da Revolução Quantitativa nas Ciências Sociais e áreas afins no final dos anos 50 e começo dos 60, modelos urbanos computacionais entraram em cena. Inicialmente, esses modelos eram seccionais no tempo e, salvo raras exceções, setorializados, no sentido de que diferentes aspectos da vida urbana (transporte, demanda residencial, localização comercial, etc.) eram abordados por diferentes modelos. O modelo de localização residencial de Clark (Clark, 1951), o modelo de transportes de Lowry (Lowry, 1964) e o modelo de localização comercial de Lakshmanan e Hansen (Lakshmanan e Hansen, 1965) são dignos de nota.

A geração de modelos seguinte procurou lidar com as dinâmicas temporais e fornecer uma abordagem mais integradora (Crecine, 1964; Batty, 1971, 1976; Allen et al. 1981; Wilson, 1981; Wegener et al. 1986). Os aprimoramentos introduzidos por estes modelos incluíam: (a) adição da dimensão temporal na análise quantitativa; (b) emprego de sofisticadas ferramentas teóricas e matemáticas (equações diferenciais, teoria da catástrofe e bifurcação, etc.); (c) análise das interações espaciais entre diferentes atividades urbanas. Apesar dos refinamentos incorporados, esses modelos

permaneceram não-espaciais a grosso modo, em especial no sentido de que seus resultados não podiam ser visualizados espacialmente.

Efetivos avanços na representação espacial de modelos urbanos ocorreram apenas no final dos anos 80, quando modelos de autômatos celulares (“cellular automata” - CA) começaram a ser amplamente utilizados. Autômatos celulares são meros sistemas formais baseados em grades, nos quais processos de mudanças são representados célula a célula, como um simples mapeamento do estado atual de uma célula e das suas vizinhas para o estado da mesma no instante de tempo seguinte. Um modelo de CA para uma cidade enfocará dinâmicas urbanas e será usado para investigar processos de mudanças (Couclelis, 1985; Batty e Xie, 1996; Xie, 1996).

De acordo com Batty et al. (1997), CA estiveram de alguma forma implícitos na onda de modelos computacionais de uso do solo e de planejamento de transportes já no começo dos anos 60. Chapin e seus colegas da Carolina do Norte, ao modelarem processos de ocupação da terra, utilizaram-se de modelos celulares nos quais mudanças de estado eram previstas em função de uma variedade de fatores intervenientes em cada célula, alguns dos quais incorporavam efeitos de vizinhança (Chapin e Weiss, 1968), ao passo que Lathrop e Hamburg (1965) propuseram simulações celulares semelhantes para o desenvolvimento do oeste do Estado de Nova York.

“Modelos de CA foram introduzidos no âmbito urbano a partir de uma outra fonte – a geografia quantitativa. Isto foi em grande parte devido a Waldo Tobler, o qual trabalhou na Universidade de Michigan durante os anos 70, onde Arthur Burks e seu grupo de Lógica Computacional atuavam. Tobler (1970) foi o primeiro a propor modelos celulares para o desenvolvimento de Detroit, mas em 1974 ele começou a formalmente explorar aplicações de CA em sistemas geográficos, culminando no seu artigo intitulado “Cellular geography” (Tobler, 1979). Em Santa Barbara, nos anos 80, Couclelis, influenciada por Tobler, continuou estas especulações até o final dos anos 80, quando essas aplicações passaram a tomar vulto com o concomitante avanço de áreas como computação gráfica, fractais, caos e complexidade” (Batty et al. 1997).

Os anos 90 experienciaram sucessivos melhoramentos em modelos urbanos de CA, os quais passaram a incorporar dimensões ambientais, sócio-econômicas e políticas, e finalmente foram bem-sucedidos na articulação analítica de fatores de micro e macroescala espaciais (Phipps e Langlois, 1997; White e Engelen, 1997; White et al. 1998). Há atualmente pouco mais de vinte aplicações urbanas de CA (Batty, 2000), tais como intra-migração e segregação social (Portugali et al. 1997), otimização de localização comercial (Benati, 1997), expansão do sistema viário (Batty e Xie, 1997), crescimento urbano (Clarke et al. 1997; Clarke e Gaydos, 1998), mudanças do uso do solo urbano (Phipps e Langlois, 1997; White e Engelen, 1997; White et al. 1998), etc.

É válido lembrar que modelos de dinâmica espacial representam um desafio imediato para a próxima geração de Sistemas de Informações Geográficas (“Geographical Information Systems” - GIS). De acordo com Burrough (1998), métodos para a modelagem de sistemas abertos, dos quais CA são um dos melhores exemplos e respondem a muitos dos requisitos para a simulação de processos dinâmicos de forma rápida e eficiente, são raramente implementados em GIS. Na opinião de Openshaw, “...GIS permanecem surpreendentemente restritos, ..., privados de modelagem e simulação tão relevantes ao mundo atual...” (Openshaw, 2000). Estes argumentos são respaldados pelo trabalho de Câmara et al. (2003), para quem os atuais paradigmas computacionais de representação do conhecimento são essencialmente estáticos e incapazes de modelar apropriadamente a dimensão temporal e os relacionamentos de contexto dinâmico entre entidades e seus atributos.

Esta pesquisa de Doutorado se insere neste contexto, e ao realizar simulações de mudanças de uso do solo para duas cidades reais, procura fornecer respostas às necessidades da comunidade de Ciência da Informação Geográfica (“Geographical Information Science” - GISc) em conceber técnicas e abstrações capazes de representar adequadamente fenômenos ambientais dinâmicos.

1.2 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais desta pesquisa são os seguintes:

- Realizar experimentos de mudanças de uso do solo para duas cidades – Bauru e Piracicaba, localizadas no oeste do Estado de São Paulo – utilizando um modelo de autômatos celulares, alimentado por parâmetros obtidos através de dois métodos estatísticos empíricos (pesos de evidência e regressão logística), bem como por informação espacial extraída de imagens do Thematic Mapper – Landsat 5 (TM – 5); de mapas digitais de uso do solo, densidade de ocupação, infra e super-estrutura²; e de fotos aéreas digitais.
- Identificar, por meio de análises multitemporais de processos de mudanças de uso do solo observados nas duas cidades, o exato papel das variáveis biofísicas e sócio-econômicas na configuração da forma urbana. A meta neste caso é o entendimento da interação dinâmica entre esses fatores para a elaboração de possíveis cenários de organização do uso do solo no curto e médio prazo.
- Colaborar, através dos experimentos de modelagem, para fornecer insights e respostas às necessidades da GISc em desenvolver técnicas e abstrações capazes de propriamente representar eventos dinâmicos do mundo real.

1.3 Objetivos Específicos

Em relação a objetivos de pesquisa específicos, esta tese de Doutorado deverá:

- Servir como referência para a realização de simulações de mudanças de uso do solo em outras cidades brasileiras e internacionais.
- Subsidiar, de forma geral, os processos de tomada de decisão de administradores locais e regionais envolvidos com o planejamento urbano e ambiental de Bauru e Piracicaba, assim como daqueles envolvidos com o planejamento regional das regiões administrativas de Bauru e Campinas, as quais compreendem respectivamente as municipalidades de Bauru e Piracicaba.

² Infra-estrutura pode ser entendida como o arcabouço de apoio ao funcionamento de uma cidade, que consiste dos sistemas viário e de transportes, de energia, abastecimento de água e esgoto, telecomunicações, etc. Super-estrutura, por um outro lado, constitui-se em um aparato mais sofisticado de apoio às atividades urbanas, como equipamentos educacionais e de saúde; instalações de comércio e serviços, esportivas, religiosas e de serviço público; áreas de lazer, etc.

- Fornecer diretrizes para planos setoriais na escala intra-urbana, tais como:
 - planos de localização industrial (subdivididos de acordo com o ramo de produção);
 - planos de loteamentos residenciais;
 - planos de localização de equipamentos sociais (escolas, postos de saúde, creches, etc.);
 - planos para a implementação de infra-estrutura (rotas e paradas de ônibus, pavimentação de vias, extensão da rede de água e esgoto, construção de aterros sanitários, expansão do fornecimento de energia, etc.).

1.4 Hipóteses de Pesquisa

Em face do exposto nas seções anteriores, esta pesquisa de Doutorado postula as seguintes hipóteses:

- a) É possível construir modelos de mudanças do uso do solo urbano baseados em autômatos celulares que simulem padrões e processos de transformações espaciais de uso do solo em diferentes cidades paulistas de médio porte submetidas a “booms” urbanizatórios?
- b) No caso de a primeira hipótese ser afirmativa, esses modelos podem ser alimentados por informação espacial obtida a partir de mapas digitais, imagens de sensoriamento remoto (“Remote Sensing” – RS) e fotos aéreas digitais? É possível que as variáveis espaciais identificadas nestes produtos cartográficos forneçam indicação de como e onde ocorrem as mudanças do uso do solo urbano, e com isso, permitam a elaboração de mapas mostrando as áreas mais suscetíveis a transições de uso?
- c) Caso se confirme esta última hipótese, quais seriam essas variáveis? Como selecioná-las? De que forma elas podem ser combinadas para a geração dos mapas supramencionados?
- d) Ademais, quais seriam os métodos estatísticos adequados para se valorar diferentes variáveis de acordo com sua contribuição para tornar certas áreas

mais ou menos suscetíveis a mudanças? Qual seria a eficácia comparativa desses métodos para a detecção de transições de uso do solo?

- e) E por fim, pode a informação obtida nos estágios anteriores ser usada para a concepção de cenários de prognóstico de transições do uso do solo? Quais seriam os métodos estatísticos apropriados para a estimativa de probabilidades futuras de transição do uso do solo? Modelos de regressão relacionando probabilidades passadas de transição e indicadores sócio-econômicos seriam indicados para este fim?

As respostas a estas indagações serão apresentadas ao final do Capítulo 6, quando então o pré-processamento dos dados espaciais, seleção e ponderação de variáveis, parametrização e calibração dos modelos, e execução dos experimentos de simulação terão sido concluídos, validados e devidamente avaliados.

1.5 Sumário Comentado

Após uma contextualização introdutória dos tópicos de pesquisa e da exposição de seus objetivos gerais e específicos no Capítulo 1, trata-se no Capítulo 2 acerca da fundamentação teórica de modelos urbanos.

A princípio, uma antologia de definições de áreas urbanas e conceitos correlatos é apresentada, seguida de uma breve perspectiva histórica sobre modelos urbanos na segunda parte do Capítulo, na qual se expõem os sucessivos avanços alcançados nas últimas décadas, em particular com respeito à sua representação espacial.

Uma vez que modelos dinâmicos espaciais constituem o tema central desta tese, a terceira parte do Capítulo 2 é dedicada a considerações sobre como o espaço e o tempo são abordados no presente trabalho. A terceira parte do Capítulo 2 ainda contém uma seção especial sobre Autômatos Celulares (CA), dado que eles melhor representam sistemas de modelagem dinâmica, além de uma seção conclusiva justificando o uso de um modelo de CA para as simulações de mudanças do uso do solo urbano conduzidas nesta tese.

O Capítulo 3 introduz as duas cidades em estudo adotadas para os experimentos de modelagem - Bauru e Piracicaba – em termos de sua localização, histórico e particularidades sócio-econômicas. O recente perfil de especialização econômica dessas cidades será entendido em vista do processo de desenvolvimento do Estado de São Paulo e do Brasil desde os primórdios da colonização. Este Capítulo procura esclarecer as razões subjacentes às suas altas taxas de urbanização, assim como ao seu status de pólos de desenvolvimento regional e industrial do Estado de São Paulo.

O Capítulo 4 destina-se a apresentar os dados espaciais e não-espaciais que alimentam os experimentos de simulação. A primeira seção introduz os dados espaciais, a exemplo de mapas de uso do solo, fotos aéreas e imagens de satélite, mencionando seus atributos como fonte, escala, tipo de informação fornecida, nível de detalhamento e data de aquisição. Os dados não-espaciais, referentes a indicadores demográficos e sócio-econômicos exclusivamente utilizados para a simulação de prognósticos, são apresentados na segunda seção. Uma seção conclusiva descreve as operações de pré-processamento necessárias à construção do banco de dados geográficos.

Atenção particular é dedicada a aspectos metodológicos no Capítulo 5, o qual consiste de duas seções a respeito dos métodos estatísticos empíricos (pesos de evidência e regressão logística) empregados para a parametrização dos modelos de simulação, além de uma seção conclusiva, onde se apresenta o programa de simulação utilizado nos experimentos de modelagem.

O Capítulo 6 reporta os resultados obtidos para os diferentes períodos de simulação, incluindo os prognósticos de curto (2004) e médio prazo (2007). Especial atenção é dedicada à justificativa do conjunto de variáveis selecionadas para explicar as respectivas transições de uso do solo em cada um dos períodos de simulação, à luz das teorias econômicas de crescimento e desenvolvimento urbano.

Finalmente no Capítulo 7, procura-se sintética e conclusivamente reunir a gama de tópicos, constatações e questionamentos levantados nos capítulos precedentes. Recomendações de direcionamentos para trabalhos futuros são adicionadas à discussão.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE MODELOS URBANOS

2.1 O Objeto de Modelagem

Considerando que o presente trabalho lida com modelagem de uso do solo em áreas urbanas, é essencial dirigir-se a devida atenção às definições deste objeto de pesquisa.

2.1.1 Definições de Assentamentos Urbanos

O Homem, gregário desde tempos remotos, sempre viveu em bandos ou comunidades. Os humanos são seres que, por razões de auxílio mútuo (reprodução, alimentação, proteção) e territorialidade, tendem a formar comunidades (ORB, 2002). Desde o seu aparecimento na Terra há cerca de 500.000 anos e por um longo período de tempo a partir de então (que corresponde à era do Pleistoceno), eles viveram coletando alimentos e procurando por abrigo no ambiente natural, sem modificá-lo de forma profunda e permanente.

Por volta de 10.000 anos atrás, após o degelo da superfície terrestre – transformação ambiental que assinala a passagem do Pleistoceno para o Holoceno – os habitantes da zona temperada aprenderam a produzir seu próprio alimento, cultivando plantas e domesticando animais, dando origem aos primeiros assentamentos estáveis – as aldeias – localizadas próximas às áreas de cultivo. Este é o período neolítico, o qual perdurou para muitos povos até a colonização européia (para os Maoris na Nova Zelândia, este período durou até o século XIX).

Aproximadamente 5.000 anos atrás, nas planícies inundáveis do Oriente Médio, algumas aldeias se transformaram em cidades. Os fornecedores de alimentos foram convencidos ou obrigados a gerar um excedente, de modo a sustentar uma casta de trabalhadores especializados: artesãos, comerciantes, guerreiros e sacerdotes. Dado que estes se encontravam em uma condição mais favorável por habitarem nas cidades, eles

pueram manter uma ascendência sobre o campo. Esta organização social demandou a invenção da escrita; e este é exatamente o marco de transição da História Moderna em oposição à Pré-História. A partir daí, todos os eventos históricos que se sucederão dependerão da quantidade e distribuição do excedente de alimentos (Benevolo, 1983).

Pesquisadores neste âmbito distinguiram no período supramencionado a) a Idade do Bronze, época em que os metais usados para ferramentas e armas eram raros e dispendiosos, ficando reservados a uma restrita classe dirigente, a qual absorvia todo o excedente de alimentos disponível, mas controlava ao mesmo tempo o crescimento populacional e da produção; e b) a Idade do Ferro, a qual se iniciou por volta de 1.200 a.C. com a difusão da escrita alfabética, de moedas cunhadas e de ferramentas metálicas mais acessíveis, expandindo a classe dirigente e permitindo o aumento populacional. A civilização greco-romana se desenvolveu segundo esses preceitos em uma ampla região – a Bacia Mediterrânea – porém escravizou e empobreceu os fornecedores de alimentos, se auto-condenando a um colapso econômico, o qual efetivamente ocorreu a partir do século IV d.C.

Outros eventos históricos – as civilizações feudal e burguesa – abriram caminho para o surgimento da civilização industrial, caracterizada pelo emprego de métodos científicos diretamente na produção. O sempre crescente excedente de alimentos não se achava mais reservado a uma minoria dirigente, mas passa a ser distribuído para uma maior parcela da população (teoricamente a toda ela), que não mais apresenta obstáculos para o seu crescimento. Neste novo quadro, a cidade - sede das classes dominantes - ainda se opõe ao campo – sede das classes subordinadas -, mas esta dicotomia deixa de ser inevitável para permitir-se ser superada. E é exatamente desta possibilidade ousada de superação que nasce a cidade moderna (Benevolo, 1983).

Em relação ao tópico central desta seção, é importante notar que o termo assentamentos urbanos engloba um conjunto de conceitos correlatos: áreas urbanas, centros urbanos, cidades. De acordo com Hardoy et al. (2001), não há consenso entre autoridades governamentais acerca da definição destes conceitos. Em praticamente todos os países, áreas urbanas incluem todos os assentamentos com 20.000 habitantes

ou mais, mas os governos diferem quanto à conceituação de quais assentamentos podem ser chamados de urbanos – desde os que apresentam poucas centenas de habitantes até os que de fato incluem 20.000 habitantes ou mais.

A maior parte dos governos definem áreas urbanas segundo uma das quatro formas: por limites de tamanho (p.ex. todos os assentamentos com 2.000 habitantes ou mais são urbanos); por limites de tamanho combinados com outros critérios (p.ex. densidade populacional ou proporção da população economicamente ativa engajada em atividades não rurais); pelo status administrativo ou político (p.ex., todos os assentamentos designados como capitais municipais, estaduais ou nacionais são áreas urbanas); ou através de listagens de assentamentos nomeados em censos como áreas urbanas.

Os termos cidade e centro urbano são freqüentemente usados de forma alternada, e não há acordo sobre as divergências conceituais entre esses termos. Poucas pessoas considerariam reconhecer assentamentos com 1.000 ou 2.000 habitantes como sendo cidades. Há, no entanto, milhares de assentamentos na África, Ásia e América Latina que possuem apenas uns poucos milhares de habitantes e são considerados pelos seus governos como centros urbanos, os quais carecem do status econômico, administrativo ou político normalmente atribuídos a cidades. Em países com longa história urbana, há muitas cidades históricas que alcançaram esse status muitas décadas ou séculos atrás, em vista da sua importância à época (p.ex., por serem capitais políticas, centros religiosos ou comerciais), e ainda são consideradas como cidades, ainda que relativamente pequenas se comparadas à rede urbana nacional de seus respectivos países (Hardoy et al. 2001).

As definições acima expostas são oficiais e comumente empregadas por instituições governamentais nacionais e internacionais. Para os pesquisadores procedentes das ciências urbanísticas e afins, as cidades podem assumir uma ampla e diversa gama de conceitualizações. Merlin (1973), à luz do materialismo histórico, define cidade como sendo um lugar para a associação de indivíduos e suas atividades, de forma a permitir meios de produção mais eficientes. Para Serra (1991), também um teórico materialista, cidades são aglomerações, cujo papel principal é o controle de excedentes. De acordo

com a teoria ecológica, a cidade pode ser vista como um ecossistema antrópico, com seus próprios fluxos de energia e espécies eco-culturais (Odum, 1963; Watt, 1973). Mc Loughlin (1972), orientando-se pela Teoria de Sistemas, considera a cidade uma máquina cibernética ou um sistema complexo de atividades e fluxos hierarquicamente organizados em subsistemas especiais. Para a teoria contemporânea de planejamento e gerenciamento estratégicos, a cidade é uma mega-organização, i.e., um vasto conjunto de ações coletivas multidimensionais (Fischer, 1996).

2.1.2 O Objeto de Modelagem no Presente Trabalho

No Brasil, não há definição ou classificação oficial de cidades em relação ao seu tamanho em termos populacionais. As áreas metropolitanas no Estado de São Paulo, por exemplo, são definidas sem menção à quantidade de população como “...o agrupamento de municípios limítrofes que assuma destacada expressão nacional, em razão de elevada densidade demográfica, significativa conurbação e de funções urbanas e regionais com alto grau de diversidade, especialização e integração sócio-econômica, exigindo planejamento integrado e ação conjunta permanente dos entes públicos nela atuantes” (São Paulo, 1989).

A Constituição Federal Brasileira obriga cada cidade com uma população mínima de 20.000 habitantes a ter o seu próprio plano diretor (Brasil, 1988), o que torna implícito que assentamentos urbanos com menos população que este patamar sejam também considerados como cidades. Na região amazônica, por exemplo, novas municipalidades são criadas para a melhoria da administração local, e suas sedes administrativas não raro contêm apenas poucos milhares de habitantes. De acordo com estudos cartográficos oficiais, assentamentos urbanos contendo entre 5.000 e 20.000 habitantes são vistos como “cidades rurais”, e qualquer assentamento humano com menos de 5.000 habitantes é considerado como uma aldeia ou vila.

Qualquer regulamento oficial sobre o porte de cidades brasileiras em função da sua população teria de ser continuamente revisado, dado os rápidos processos de urbanização experienciados por muitas cidades. Uma cidade considerada como grande nas primeiras

décadas do século passado, poderia ser considerada como média nos anos 40 ou 50, e até mesmo como pequena no começo deste século.

Alguns limiares de população são extra-oficialmente adotados em alguns estudos urbanos. Considerando os atuais padrões da rede urbana brasileira, é razoável classificarem-se assentamentos urbanos com autonomia política e contendo mais de 20.000 e menos de 100.000 habitantes como cidades pequenas; mais de 100.000 e menos de 500.000 habitantes, como cidades de médio porte; mais de 500.000 e menos de 1.000.000 de habitantes como cidades relativamente grandes; e aqueles abrigando mais de 1.000.000 de habitantes como cidades grandes, as quais podem tornarem-se sedes de áreas metropolitanas. Algumas definições internacionais empregam o termo “mega-cidades” para aquelas que contêm mais de 10.000.000 de habitantes.

Assentamentos urbanos de pequeno porte e isolados de aglomerações urbanas principais são considerados distritos urbanos e estão politicamente subordinados ao município que os contém.

O objeto de modelagem no presente trabalho concerne duas cidades de médio porte localizadas no oeste do Estado de São Paulo: Bauru e Piracicaba, que possuíam uma população urbana respectivamente de 310.442 e 317.374 habitantes no ano de 2000 (IBGE, 2000). Apenas as suas aglomerações principais e circunvizinhanças imediatas são consideradas nas simulações, excluindo-se dos experimentos de modelagem os distritos urbanos localizados além de 10 km do perímetro urbano oficial.

2.2 Breve Perspectiva Histórica sobre Modelos de Mudanças do Uso do Solo Urbano

2.2.1 Introdução

Antes de se introduzir um breve histórico sobre modelos de mudanças do uso do solo urbano, é necessário esclarecerem-se os termos a eles relacionados. Várias são as definições para os termos solo (terra), uso do solo e mudanças de uso do solo, os quais variam com a finalidade de aplicação e o contexto de seu emprego (Briassoulis, 2000).

Wolman (1987) cita a definição de terra de Stewart (1968) no âmbito das ciências naturais: “o termo terra é usado em um sentido compreensivo, integrador ... para referir-se a um vasto espectro de atributos de recursos naturais em um perfil que vai desde a atmosfera até alguns metros abaixo da superfície terrena. Os principais atributos são clima, relevo, solo, vegetação, fauna e recursos hídricos.”

Em uma abordagem mais econômica, Hoover e Giarratani (1984) afirmam que terra “a princípio, denota espaço ... As qualidades da terra incluem, adicionalmente, atributos como propriedades topográficas, estruturais, agrícolas e minerais do sítio; o clima; a disponibilidade de ar e água; e finalmente, uma gama de características ambientais subliminares tais como tranquilidade, privacidade, aparência estética, e outras.”

Uso do solo, à sua vez, denota a destinação que o Homem dá à terra (Turner e Meyer, 1994). Skole (1994) afirma que “uso do solo é o emprego humano de uma certa cobertura da terra, o meio pelo qual a atividade humana se apropria dos resultados da produção primária líquida (“Net Primary Production” - NPP) conforme determinado por um complexo de fatores sócio-econômicos.” Finalmente, FAO/IIASA (1993) afirmam que “uso do solo diz respeito à finalidade para a qual a terra é usada pela população humana local e pode ser definida como as atividades humanas que estão diretamente relacionadas à terra, fazendo uso de seus recursos ou tendo um impacto sobre eles.”

Para Briassoulis (2000), mudança de uso do solo “... significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo....”. Segundo Jones e Clark (1997), ela pode envolver a) conversão de um uso em outro, ou b) modificação de um certo tipo de uso, tais como mudanças de áreas residenciais de alto para baixo padrão (sem alteração física ou quantitativa dos edifícios), etc.

Essas diversidades de conceitualização revelam como diferentes disciplinas teorizam e modelam mudanças de uso do solo (Briassoulis, 2000).

Em relação ao termo “modelo”, pode-se entendê-lo como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica, etc., e segundo uma ou mais teorias (Novaes, 1981).

Um sistema é um conjunto de partes, apresentando interdependência entre seus componentes e atributos (Chadwick, 1973). Teoria, por sua vez, pode ser definida como um conjunto de afirmações interconexas que, através de construções lógicas, fornece uma explicação de um processo, comportamento, ou outro fenômeno de interesse, conforme existente na realidade (Chapin e Kaiser, 1979; Johnston et al. 1994).

De acordo com Batty (1976), o conceito de ciência proposto por Popper como sendo “um processo de conjectura e refutação de problemas, seguido por tentativas de solução, eliminação de erros e redefinição de problemas (Popper, 1972)” reflete-se no desenvolvimento de teorias e modelos urbanos.

De modo geral, os modelos podem ser basicamente classificados de acordo com as seguintes tipologias (Echenique, 1968; Novaes, 1981):

- *modelo descritivo*: objetiva apenas o entendimento do funcionamento de um sistema;
- *modelo exploratório*: é um modelo descritivo que envolve a análise paramétrica de vários estados, por meio de variações nos elementos dos sistemas e nos seus relacionamentos, sem interferência externa sobre ele. Esses tipos de modelos destinam-se a responder perguntas do tipo “*what if*”;
- *modelo preditivo*: é um modelo exploratório que envolve a variável tempo, compreendendo a projeção de alguns elementos básicos;
- *modelo operacional*: possibilita a interferência do modelador, o qual pode introduzir fatores exógenos nos componentes do sistema e nos seus relacionamentos, de modo a alterar o seu comportamento³.

Categorizações mais detalhadas de modelos de uso do solo urbano são propostas por inúmeros outros autores. Merlin (1973), por exemplo, divide modelos urbanos em três categorias – desenvolvimento urbano, transporte, e recursos urbanos - subdividindo cada uma dessas três categorias de acordo com seus objetivos e métodos.

³ Uma ramificação de modelos operacionais diz respeito a modelos prescritivos ou normativos, os quais procuram modificar o sistema em análise, de forma a se atingir um estado ótimo.

Modelos explanatórios, descritivos e estocásticos integram a primeira categoria; modelos econômicos de escolha de meios de transporte e de deslocamentos geográficos (incluindo modelos gravitacionais) constituem a segunda categoria; e finalmente, modelos de investigação geográfica (incluindo modelos de lugar central), econométricos e estatísticos são abordados na categoria de modelos de recursos urbanos.

Perraton e Baxter (1974) e Novaes (1981) classificam modelos urbanos e regionais genéricos em modelos empíricos, microeconômicos ou comportamentais, macroeconômicos ou da física social, e modelos de simulação dinâmica.

A mais extensiva categorização de modelos genéricos de mudanças de uso do solo é apresentada por Briassoulis (2000). Segundo ela, os modelos podem ser classificados em vista de seus aspectos metodológicos e funcionais em estatísticos ou econométricos; modelos de interação espacial; modelos de otimização (que incluem programação linear, dinâmica, hierárquica e não-linear assim como modelos de maximização de utilidades e modelos multi-critérios de tomada de decisão); modelos integrados (modelos de gravidade, de simulação e de entrada-saída); modelos baseados em ciências naturais; modelos baseados em GIS e modelos baseados na cadeia de Markov.

A classificação de modelos de mudanças do uso do solo urbano (e regional) aqui proposta enfoca aspectos conceituais e operacionais básicos dos mesmos, como a sua habilidade em apreender e lidar com representações de eventos espaço-temporais, observando uma seqüência cronológica em relação ao seu aparecimento.

2.2.2 Modelos Não-Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano

Modelos teóricos e matemáticos têm sido há tempos criados para fins de estudos urbanos, visando esclarecer processos de mudanças urbanas e regionais. Uma das mais antigas contribuições neste sentido é a teoria de anéis concêntricos de Von Thünen, de 1826 (Merlin, 1973). Von Thünen abordou, de fato, questões de localização agrícola, mas o uso urbano foi decisivo para o seu problema. Ele concebeu um modelo econômico muito simples, consistindo de uma cidade e regiões concêntricas à mesma. De acordo com este modelo, a partir de uma certa distância do centro, uma dada cultura

irá suplantar as demais; em uma segunda área, uma outra cultura irá prevalecer sobre as restantes, e assim por diante. Neste caso, o uso mais intenso da terra será próximo ao centro, e o preço do aluguel e da terra decresce na periferia (Perraton e Baxter, 1974).

Uma outra abordagem semelhante em teoria econômica é o modelo de localização industrial desenvolvido por Weber em 1909. Ele propôs-se a explicar a localização de uma indústria em um plano simples e homogêneo. A localização final será no ponto onde os custos de transporte da matéria-prima até a indústria e de entrega dos produtos finais no mercado sejam mínimos (Merlin, 1973; Perraton e Baxter, 1974). Isto foi chamado de triângulo clássico de Weber (FIGURA 2.1).

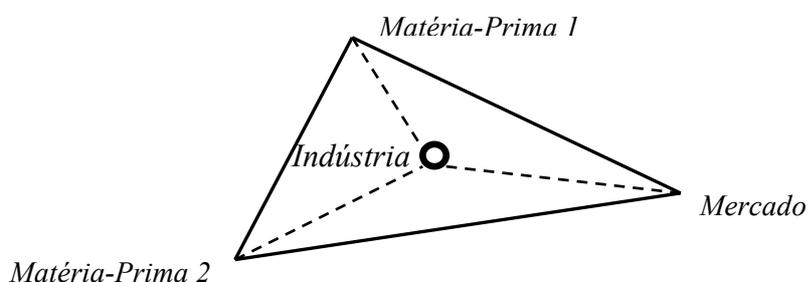


FIGURA 2.1 – Triângulo clássico de Weber para a localização industrial.

FONTE: Perraton e Baxter (1974, p. 36).

Uma outra realização baseada em teoria econômica foi o modelo de lugares centrais de Christaller, de 1933 (Merlin, 1973). Segundo ele, cidades são lugares centrais hierarquicamente organizados, cujo papel fundamental é a provisão de bens e serviços. Sua idéia básica era de que cada ponto no espaço deve distar menos de uma hora (cerca de 4 km) de um lugar central. Este pretexto o levou, por meio de triângulos equiláteros, a organizar o espaço regional em estruturas hexagonais regulares (FIGURA 2.2), as quais refletem a área de influência de cada lugar, i.e., seu raio de ação.

Lösch aprimorou a idéia de Christaller, concebendo em 1940 a sua teoria de regiões econômicas. Enquanto Christaller preocupava-se com a localização de assentamentos e

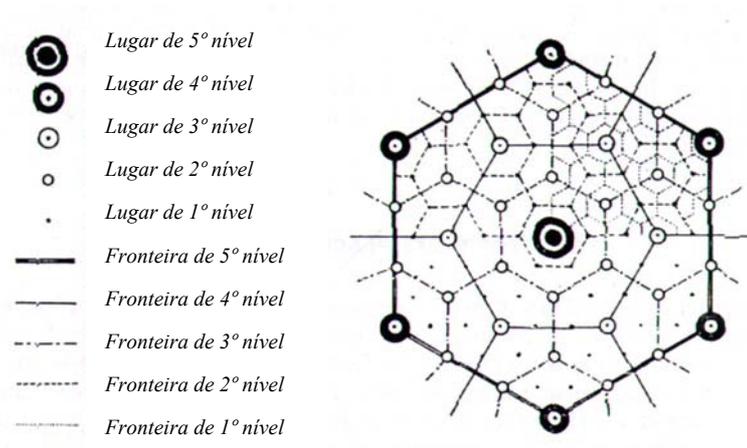


FIGURA 2.2 – Sistema hexagonal da teoria de lugares centrais de Christaller.

FONTE: Merlin (1973, p.152).

vilas, Lösch enfocava a localização de comércio e serviços. Para ele, os centros podem ser classificados em grupos hierárquicos de acordo com o tipo de serviço e o tamanho do mercado. Se a população é homoganeamente distribuída ao longo da área considerada, há um aumento na demanda por um bem particular próximo ao centro, dado que os custos decrescem em direção a ele; i.e., a curva de demanda decai a partir do centro. Uma vez que as áreas de mercado são circulares, a livre entrada de empresas em um sistema de competição perfeita, produz um complexo de hexágonos aninhados (FIGURA 2.3), aproximando-se do ideal de círculos (Perraton e Baxter, 1974).

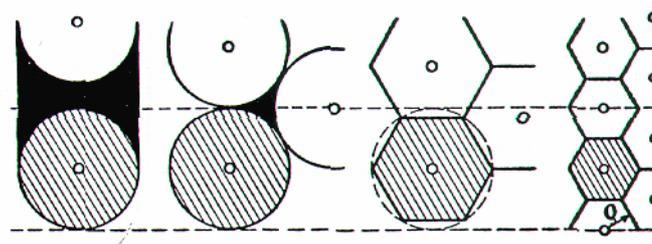


FIGURA 2.3 – Ninhos hexagonais da teoria de regiões econômicas de Lösch.

FONTE: Merlin (1973, p.135).

Sucedendo essas simples realizações em modelagem urbana baseadas em teorias econômicas, uma nova geração de modelos computacionais entrou em cena no final dos

anos 50 e começo dos anos 60, imediatamente após notáveis avanços nas facilidades computacionais e o advento da Revolução Quantitativa (uma revolução científica destinada a introduzir rigor e qualidade em disciplinas como Sociologia, Ciências Políticas e Urbanismo).

Desenvolvimentos pioneiros em modelagem urbana surgiram quase que exclusivamente na América do Norte, onde a crescente propriedade de automóveis durante os anos 40 e início dos anos 50 levou à constatação de que as cidades, com sua estrutura física tradicional, não poderiam fazer frente às novas necessidades de mobilidade. Os primeiros estudos de transportes envolviam prognósticos de geração de viagens e sua distribuição espacial, sendo os primeiros estimados por regressão linear, e a distribuição, por modelos gravitacionais, assim denominados em analogia à Lei de Gravitação de Newton. Estes primeiros estudos, contudo, negligenciavam questões importantes sobre o uso do solo. Porém, a crescente consciência acadêmica e profissional à época em relação ao inter-relacionamento entre tráfego e uso do solo permitiram a construção de modelos de uso do solo já por volta de 1960 (Batty, 1976).

Em paralelo a estes desenvolvimentos em planejamento de transportes, dois importantes projetos de pesquisa referentes a economia urbana e locacional também tiveram um profundo impacto no âmbito de modelagem à época. O primeiro deles é um modelo econômico teórico para localização residencial proposto por Alonso (1960), o qual levou à frente o trabalho de Von Thünen, contextualizando este modelo na teoria microeconômica de comportamento do consumidor baseado na maximização de utilidades, onde o consumidor define seu local de residência em função de compensações entre custos de transportes e de moradia. O segundo projeto de impacto é o modelo de localização intra-urbana concebido por Wingo (1961), também baseado no trabalho de Von Thünen, o qual operava sobre custos detalhados de transportes para explicar a densidade populacional. Pouco antes, Clark (1951) em um modelo similar, também baseou-se na teoria de Von Thünen, descrevendo as densidades residenciais a partir do centro como uma função exponencial que decai com a distância (Equação 2.1).

$$D_j = A \exp(-\beta d_j) \quad . \quad (2.1)$$

onde, D_j é a densidade residencial em um local j ; A é uma constante; d_j é a distância ao centro da cidade, e β é um parâmetro.

Alguns exemplos dignos de nota entre os primeiros experimentos de modelagem são o modelo de Greensborough (Chapin e Weiss, 1962) e os modelos de Baltimore e Connecticut (Lakshmanan, 1964, 1968), todos baseados em técnicas estatísticas lineares e se utilizando de uma abordagem indutiva ancorada, por assim dizer, em uma teoria 'a priori'. Por um outro lado, modelos indutivos não-lineares também foram construídos, tais como o modelo de alocação de atividades do vale de Delaware (Seidman, 1969).

Muitos modelos, contudo, foram construídos com base no modelo gravitacional, sugerindo uma abordagem mais dedutiva, na qual mecanismos específicos atuantes no sistema urbano foram simulados. O modelo de Pittsburgh (Lowry, 1964) e seus sucessores são bons exemplos da abordagem gravitacional, a qual foi responsável por produzir uns dos mais bem sucedidos modelos urbanos deste período (Batty, 1976).

O modelo de Lowry organiza a economia do espaço urbano em atividades (população, empregos secundários e empregos terciários) e em usos do solo (residencial, serviços e industrial). A seguir, o modelo aloca essas atividades em zonas da região urbana. A população é alocada proporcionalmente à população potencial de cada zona, e os empregos terciários são alocados em proporção aos empregos potenciais ou mercado potencial de cada zona.

Alocando-se as várias atividades de acordo com restrições pré-determinadas, o modelo testa então a distribuição projetada de população versus a distribuição usada para computar os potenciais, a fim de verificar se ambas são coincidentes. Isto é necessário para assegurar consistência entre essas distribuições, uma vez que o modelo usa as distribuições de população e empregos para calcular os potenciais, o que indiretamente afeta a localização dessas variáveis projetadas. Isto é feito por meio da retro-alimentação ao modelo dos dados de população e empregos projetados, reiterando-se na seqüência todo o procedimento de alocação, até que as distribuições de entrada do modelo sejam coincidentes com as de saída. Um diagrama interpretativo desta seqüência de operações é apresentado na FIGURA 2.4.

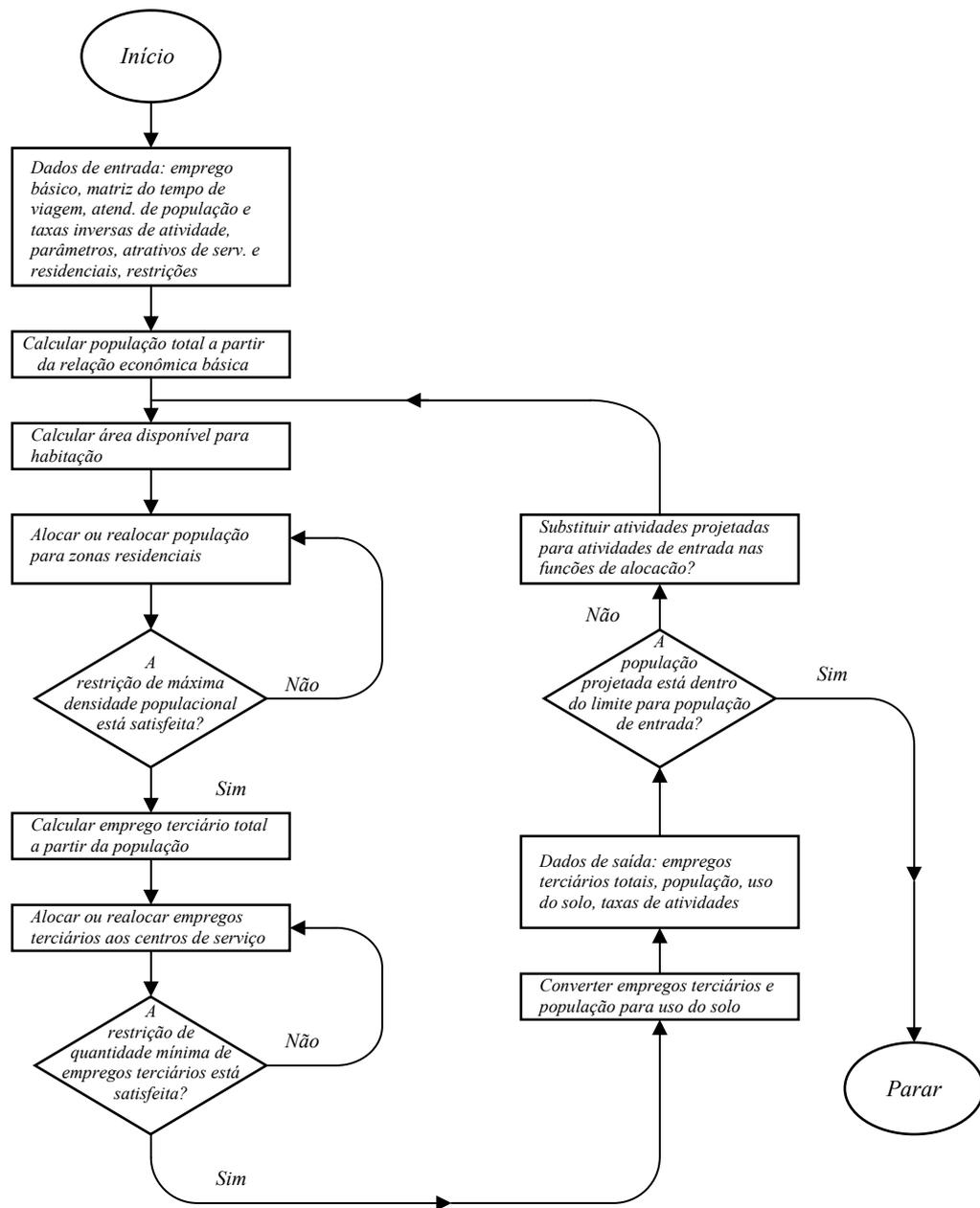


FIGURA 2.4 – Fluxograma genérico do modelo de Lowry.

FONTE: Batty (1976, p. 61).

Muitas são as limitações desses primeiros modelos, e críticas incisivas foram feitas aos mesmos, sobretudo em questões do seu dimensionamento. Alguns destes modelos eram tão ambiciosos em termos de abrangência, dados requeridos e capacidade de

processamento computacional, que vários foram abandonados ou drasticamente reduzidos. Um outro problema se refere ao fato de que, embora baseados em bem definidas estruturas formais, alguns modelos ancoravam-se esparsamente em teorias, aparentando um caráter arbitrário e mecanicista. Uma terceira crítica se relaciona ao fracasso de muitos modeladores em reconhecer limitações contextuais inerentes ao objeto de modelagem, em vista do complexo conjunto de variáveis intervenientes em sistemas urbanos, as quais não podem ser analisadas simultaneamente, mas sim, em separado. E finalmente, muitos desses primeiros modelos puderam apenas descrever a estrutura urbana em um instante no tempo, ou no melhor dos casos, comparar essas estruturas estáticas, incorporando um equilíbrio artificial de longo prazo, o que os tornou meras simulações de estruturas urbanas estáticas observáveis (Batty, 1976).

2.2.3 Primeiros Modelos Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano⁴

Em um esforço de superação das limitações da primeira geração de modelos urbanos, um novo grupo de modelos propõe-se, dentre outras coisas, a operar sobre uma base dinâmica. Nem todos eram totalmente dinâmicos, o que torna importante a introdução, por hora, de algumas definições básicas em termos de modelagem dinâmica.

De acordo com Wegener et al. (1986), um modelo se denomina *dinâmico*, se ele possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo, e se seus estados dependem de estados anteriores. Uma forma simples de modelo dinâmico é o *estático comparativo*, que procura representar a estrutura estática de sistemas urbanos em um instante de tempo sem recorrer a explicações de mudanças de estrutura ao longo do tempo, as quais constituem o comportamento do sistema⁵ (Batty, 1976).

Uma seqüência de modelos estáticos comparativos é chamada modelo *recursivo*, no qual o estado final de um período de tempo serve como estado inicial do período

⁴ Esta seção é fundamentalmente estruturada no trabalho de Batty (1976), pelo fato deste livro consistir na melhor revisão literária sobre modelos urbanos das primeiras gerações, apresentando um amplo espectro de exemplos pertencentes a este âmbito de modelagem de forma concisa e objetiva.

⁵ De acordo com a Teoria de Sistemas (Bertalanffy, 1951), a estrutura do sistema não pode ser interpretada sem o conhecimento do comportamento do sistema e vice-versa. A Teoria de Sistemas postula a idéia de sistemas sendo descritos em termos de estrutura e comportamento, em termos de entradas e saídas, e a noção de controle intencional desses sistemas em termos de retroalimentações positivas e negativas.

subseqüente (Wegener et al. 1986). Batty (1976) faz mais uma distinção, ao afirmar que um modelo é *quase-dinâmico*, se ele contém partes estáticas em uma estrutura dinâmica.

Perraton e Baxter (1974) apresentam um modelo estático comparativo, analisando as repercussões de disposições alternativas de redes de transporte, regulações de ocupação e serviços públicos na distribuição de população. O trabalho de Butler (1969) é um exemplo de modelo recursivo, onde a redistribuição residencial é abordada em dois submodelos – quais moradores se mudam e para onde – sendo que a nova distribuição residencial é usada para determinar quais famílias se mudarão no período seguinte.

Modelos quase-dinâmicos são comumente construídos com base em modelos de interação espacial, como o concebido por Lowry (1964). Neste caso, o modelo de interação espacial é generalizado pela incorporação de capacidade zonal ou de rede ou restrições de oferta em uma estrutura de multiatividades, por meio de otimizações não-lineares. Bons exemplos dessa categoria de modelos são Boyce (1977), Coelho e Williams (1978), Leonardi (1981), etc.

Dentre os primeiros modelos dinâmicos de ordem linear está o proposto por Czamanski (1965), que aplicou um simples modelo econômico baseado no tempo à região de Baltimore. Este é um modelo de segunda ordem e quatro equações, descrito a seguir:

$$P(t+1) = a_1 + b_1E(t-1), \quad (2.2)$$

$$S(t+1) = a_2 + b_2P(t), \quad (2.3)$$

$$E^b(t+1) = a_3 + b_3X(t+1), \quad (2.4)$$

$$E(t+1) = E^b(t+1) + E^l(t+1) + S(t+1), \quad (2.5)$$

onde P é população; S é emprego terciário; E^b é emprego básico derivado; X é emprego básico exógeno e E^l é emprego básico baseado em localização, que inclui X ; a_1 , a_2 , a_3 e b_1 , b_2 , b_3 são parâmetros a serem estimados; a notação de tempo é auto-explicativa. O

modelo fornece uma abordagem simples para a geração de atividades urbanas, embora não apresente dimensão espacial.

Um outro exemplo de modelagem dinâmica é o modelo EMPIRIC, o qual é baseado em um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, referente a diferentes zonas e atividades. Este modelo foi concebido por Hill (1965) para o Projeto de Planejamento Regional de Boston e possui várias versões, resultado de sucessivas revisões. Diferentemente de Czamanski, o EMPIRIC tem caráter espacial e reconhece a natureza simultânea dos inter-relacionamentos urbanos, adotando para este fim soluções formais como o método de mínimos quadrados de duplo estágio. O intervalo de tempo é de dez anos, e conseqüentemente, a ênfase em dinâmicas é implícita ao invés de explícita.

Um problema básico com esses modelos lineares supramencionados concerne o fato de que eles não procuram distinguir agentes transitórios (grupo de atividades em relocação na cidade) dos estacionários. Além disso, há um enviesamento indutivo, no sentido de que a ênfase sobre explicações é completamente estatística, e assim sendo, há poucos princípios diretrizes na escolha do intervalo de tempo.

A definição do intervalo de tempo é de grande importância em modelagem dinâmica. Para Forrester (1969), o período de simulação deve ser curto o suficiente para não influenciar o comportamento do modelo; em particular, ele não deve ser usado para introduzir intervalos implícitos. Batty (1976) citando Broadbent (1969) afirma que o intervalo de tempo deve ser pequeno o suficiente para detectar os fenômenos de interesse; se o intervalo é muito grande, o modelo pode tornar-se trivial, e portanto, passível de decomposição em uma série de modelos estáticos comparativos para cada período de tempo.

Forrester (1969) sugere que a extensão do período de simulação deve ser metade ou menos do que o menor atraso⁶ presente no sistema. Para ele, atrasos são essenciais para o entendimento de sistemas complexos, e isto está em concordância com a Teoria da

⁶ Atraso é o tempo decorrido entre a introdução de um certo estímulo e a manifestação de seus impactos no sistema em consideração.

Bifurcação⁷, segundo a qual pequenas mudanças no conjunto de variáveis do sistema podem levar a trajetórias significativamente distintas de comportamento do mesmo. De acordo com esta regra, a maior parte dos modelos urbanos dinâmicos com períodos de simulação de cinco anos ou mais são fortemente inadequados para capturar as dinâmicas de mudanças urbanas (Wegener et al. 1986).

O Modelo Metropolitano Baseado no Tempo (“Time-Oriented Metropolitan Model” - TOMM), desenvolvido por Crecine (1964) para o Programa de Renovação da Comunidade de Pittsburgh, procurava tornar um simples modelo estático baseado no modelo original de Pittsburgh (Lowry, 1964) em um modelo dinâmico mais complexo, pela consideração do comportamento do sistema. Importante distinção foi feita entre agentes transitórios e estacionários. Na sua segunda versão, adotou-se um intervalo de tempo de dois anos bem como uma formulação mais realística das medidas de atração locacional, incorporando aluguel, amenidades e custos de transporte (Crecine, 1968). Na terceira versão, questões sobre comportamento de agentes transitórios foram abordadas.

Muito embora este modelo apresente alguns avanços significativos, não há consistência entre atividades móveis e o seu relacionamento com a base econômica. Apesar de o TOMM ser organizado em torno do conceito de agente transitório, novos agentes em processo de locação ou relocação não estão devidamente separados, dificultando o rastreamento das propriedades de equilíbrio do modelo (Batty, 1976).

Um conjunto de técnicas formuladas para a simulação de processos industriais, coletivamente denominadas Dinâmica de Sistemas, foi empregado na modelagem de sistemas urbanos e globais hipotéticos, adotando-se intervalos de cinco anos ou mais em período de 250 anos (Forrester, 1969, 1971). Estas técnicas possuem os seus fundamentos na engenharia de controle, onde o conceito de estrutura e comportamento do sistema é concebido em termos de níveis de estoques, que são progressivamente alterados ao longo do tempo por taxas afetadas positiva ou negativamente por retro-alimentações dentro do sistema de interesse.

⁷ A Teoria da Bifurcação é comumente mencionada em associação com a Teoria da Catástrofe, em vista dos seus interrelacionamentos. A última diz respeito basicamente a processos submetidos a mudanças rápidas, e que apresentam conseqüentemente um comportamento descontínuo (Bak et al. 1989).

Muitos desses modelos são baseados na noção de que um sistema é limitado por uma quantidade fixa de recursos, os quais afetam o crescimento do sistema ao longo do tempo. Tipicamente, esse sistema cresce exponencialmente a princípio, e conforme se aproxima do limite de recursos, o crescimento decai, e uma eventual condição de equilíbrio é atingida, em geral com oscilações em torno do estado estável (FIGURA 2.5).

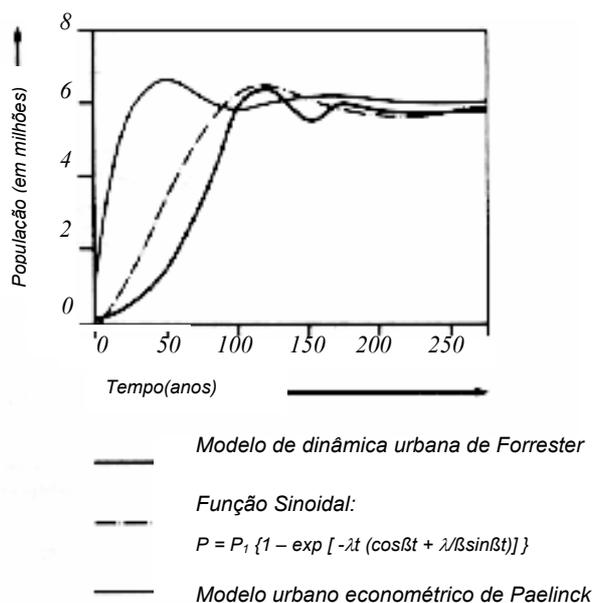


FIGURA 2.5 – Curvas de comportamento dinâmico em sistemas de recursos limitados: modelo dinâmico de Forrester e modelo econométrico de Paelinck.

FONTE: Batty (1976, p. 305).

Os modelos de Forrester não são espaciais e não reconhecem que a estrutura de atividades em uma cidade possa ser explicada em termos de interação espacial (Batty, 1971). Eles também desconsideram bem demonstradas e reconhecidas teorias urbanas, e muitas de suas hipóteses não podem ser provadas ou testadas (Batty, 1976).

Entretanto, estes modelos foram aplicados em duas situações reais. A primeira é o caso do Condado de Harris, Texas (Porter e Henley, 1972), que não é de muito interesse. O segundo caso, que se mostrou ser um experimento promissor, refere-se à sub-região de Veneza (Costa e Piasentin, 1971). Veneza foi dividida em três zonas – *Centro Urbano*,

Estuario e Terra Ferma – e o modelo simula o crescimento de população, emprego e moradia de 1951 a 1971. A adequabilidade desta aplicação reside no fato de que a subregião de Veneza em questão é marcadamente limitada em termos espaciais, e portanto, inadequada para modelos de alocação de atividades.

Uma outra classe de modelos urbanos dinâmicos foi elaborada em seqüência ao trabalho de economistas como Paelinck (FIGURA 2.5), baseada na especificação de dinâmicas urbanas em termos de equações diferenciais relacionando fenômenos macroeconômicos (Paelinck, 1970; Blokland et al. 1972). Um dos aspectos de modelos como estes, cujo componente espacial é implícito ao invés de explícito, refere-se ao fato de que muito mais hipóteses são necessárias para a sua validação do que nos seus similares espaciais. Apesar desses modelos serem mais ricos em detalhes, eles são freqüentemente mais difíceis de calibrar em situações reais. Por um outro lado, suas hipóteses são normalmente fundamentadas sobre teorias econômicas consolidadas, e a estimativa dos seus parâmetros é uma área bem desenvolvida em Econometria, o que os torna de mais fácil aplicação a situações reais do que os modelos de Dinâmica de Sistemas (Batty, 1976).

Batty (1971) desenvolveu um modelo dinâmico, aplicado à região de Reading, UK, matematicamente formulado como um sistema de equações diferenciais relacionando população, emprego terciário e básico através do tempo, por meio de hipóteses de base econômica, e através do espaço, por meio de modelos gravitacionais que simulam os fluxos entre várias atividades. Uma das principais suposições subliminares é a de que a cidade está sempre em desequilíbrio, uma vez que em qualquer instante de tempo, sempre há repercussões no modelo que ainda não foram processadas pelo sistema.

Este modelo foi posteriormente detalhado (Batty, 1976), diferenciando agentes em locação daqueles em relocação. As interações espaciais orientam-se em função da localização de atividades, divididas em três tipos: população residencial, serviços e emprego básico. Serviços são subdivididos em grupos orientados a consumidores e produtores, e emprego básico é separado em emprego dependente de emprego já existente, e agentes em locação, cuja localização não pode ser prevista pelo modelo.

Conforme Batty (1976) explica, os agentes em locação fornecem o estímulo externo ao modelo, porque embora o nível total de emprego básico seja exógeno, a outra categoria de emprego básico é distribuída espacialmente usando um modelo linear. População e emprego terciário são alocados usando-se modelos de gravidade limitados por atração e produção (Wilson, 1970). Estes modelos procuram simular, embora de modo grosseiro, um equilíbrio entre oferta e demanda de atividades, enquanto que no modelo de localização residencial, um submodelo foi previsto para lidar com a oferta de área residencial horizontal e vertical. A FIGURA 2.6 ilustra o modelo e os principais relacionamentos entre os diferentes setores de forma esquemática.

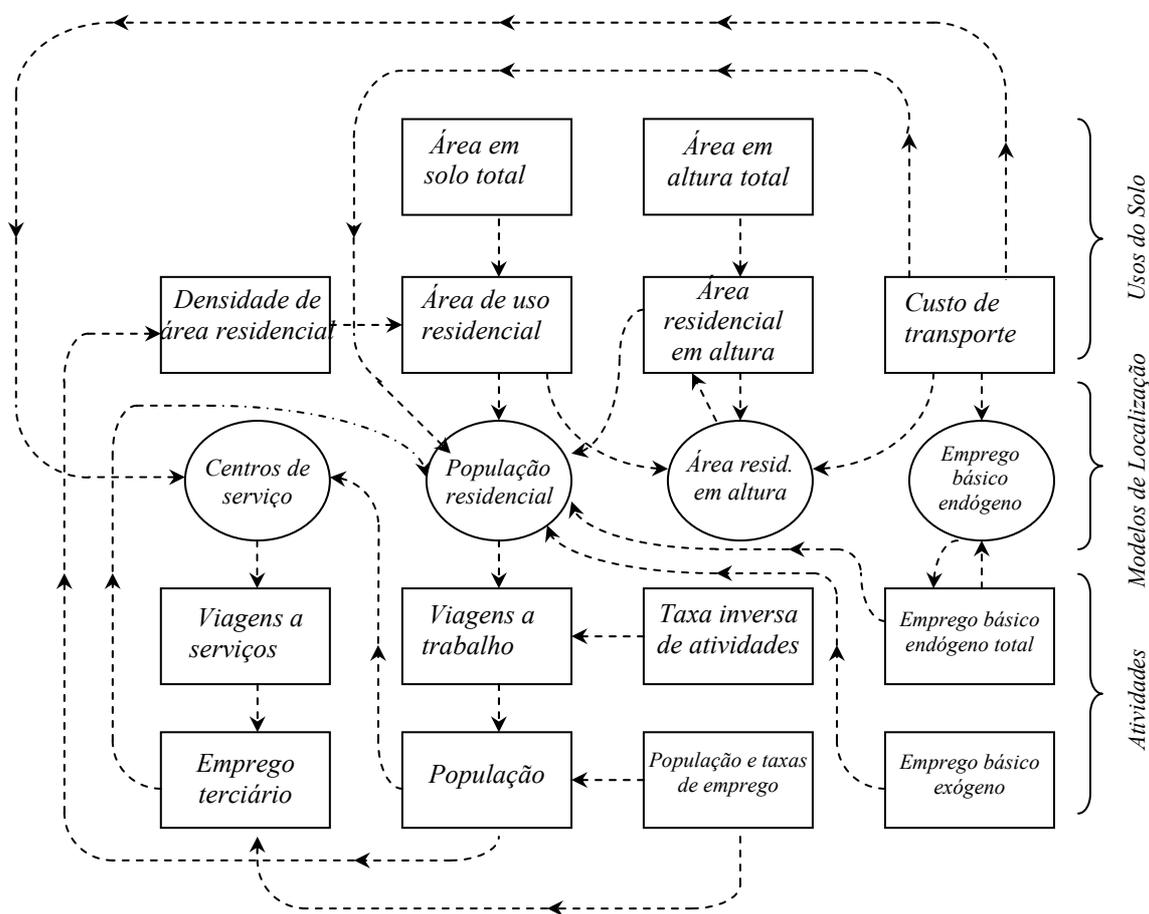


FIGURA 2.6 – Estrutura de atividades e usos do solo no modelo de dinâmica urbana para Reading, UK.

FONTE: Batty (1976, p. 315).

Um outro modo de se obter modelos urbanos totalmente dinâmicos é interpretar a convergência de modelos estáticos ao equilíbrio como um processo de ajuste no tempo. Isto permite a investigação da trajetória de um sistema urbano como uma seqüência de passos, os quais podem ou não atingir o equilíbrio dependendo de influências exógenas.

Beaumont et al. (1981) propuseram um modelo neste sentido, cuja idéia básica é bem simples: ele parte do modelo de viagens-compras limitado pela produção conforme proposto por Lakshmanan-Hansen (1965) e interpreta as somas de colunas, dependendo do sinal, como demanda não atendida ou excesso de oferta, e usa essa informação para direcionar o crescimento ou declínio de atividades comerciais (Equação 2.6).

$$W_j^\circ = \varepsilon \sum_i \frac{W_j^a \exp(-\beta_l c_{ij})}{\sum_j W_j^a \exp(-\beta_l c_{ij})} e_i P_i - k W_j W_j, \quad (2.6)$$

onde W_j = atividades comerciais em zonas de comércio j ; e_i = despesas com compras da população P_i das zonas i em j ; k = custos para o fornecimento de atividades de comércio em j ; ε é um parâmetro de elasticidade determinante da velocidade do processo de ajuste; e β_l = o parâmetro da função de impedimento. Na ausência de estímulos externos, o modelo produz um crescimento logístico de centros de compra até um equilíbrio espacial, mas devido a suas não-linearidades, ele apresenta uma variedade de bifurcações para diferentes combinações de seus parâmetros α , β_l , e ε , e para diferentes distribuições iniciais de P_i e W_j .

Um outro modelo dinâmico destinado a produzir bifurcações é o proposto pelo grupo de Brussels (Allen et al. 1981). Este modelo aborda a questão de dinâmicas em sistemas urbanos a partir de um ponto de vista diferenciado. Ele é baseado no conceito de auto-organização através de perturbações aleatórias encontradas no nível molecular ou genético de sistemas físicos ou biológicos. Allen e sua equipe levou à frente este conjunto de idéias segundo o que ele denominou “modelo dinâmico geral da evolução espacial de sistemas urbanos”, o qual baseava-se em conceitos sofisticados como sistemas abertos e adaptáveis, caos e complexidade (Allen et al. 1986).

O modelo de Brussels é mais elaborado do que o anterior., com quatro setores industriais e, ao invés de habitação, dois grupos populacionais. A forma para a previsão do crescimento e declínio de comércio W_j em zonas comerciais j é dada por (Equação 2.7):

$$W_j^\circ = \varepsilon \sum_i \frac{[A_j (k + c_{ij}) - \beta_i]^a}{\sum_j [A_j (k + c_{ij}) - \beta_i]^a} e_i P_i - (k + c_{ij}) W_j \quad W_j, \quad (2.7)$$

onde A_j é a atratividade da zona j , e as notações restantes têm o mesmo significado como na Equação 2.6.

Os dois modelos têm diferentes formulações para a atratividade. Eles também diferem na forma de produzir bifurcações. Enquanto no primeiro caso, as bifurcações são sistematicamente exploradas por variações paramétricas, no modelo de Brussels elas são geradas por perturbações aleatórias, embora o comportamento dinâmico produzido pelos dois modelos seja muito similar.

Da mesma forma que nos exemplo precedentes, estes dois modelos receberam inúmeras críticas, dentre as quais uma concerne o fato de que, como todos os modelos de interação espacial, eles prevêm um processo lento (estabelecimento de comércio) a partir de um processo rápido (viagens comerciais). Wegener et al. (1986), os autores dessas críticas, propuseram então um modelo urbano dinâmico observando diferentes escalas de tempo para as mudanças urbanas, i.e., um modelo temporal multinível.

Wegener e sua equipe classificaram processos de mudanças urbanas em três níveis de acordo com sua velocidade de ocorrência. Processos lentos (Nível 1) referem-se à construção de infra-estrutura de transportes, indústrias públicas e habitação popular. Estes investimentos tendem a ser duráveis e envolvem intervalos mais longos entre planejamento e conclusão. Processos de velocidade média (Nível 2) referem-se a mudanças econômicas, sociais e tecnológicas (envelhecimento, óbito, formação de novos lares, mudança de emprego, etc.), uma vez que estas mudanças são visíveis apenas em uma escala de médio prazo, enquanto que processos rápidos (Nível 3) dizem

respeito à mobilidade, dado que esses deslocamentos representam as ocorrências mais voláteis no escopo de transformações urbanas.

Este modelo temporal multinível compreende três módulos (escolha, transição e fatores exógenos), e cada uma das mudanças urbanas elencadas são assinaladas a um desses módulos. Investimentos públicos são sempre incluídos no módulo de fatores exógenos; envelhecimento, óbito, aposentadoria e processos afins, por se constituírem em mudanças involuntárias, são adicionados ao módulo de transição; e as mudanças restantes, ao módulo de escolha. Esses módulos são interligados por um gerenciador de arquivos e acionados por um agendador.

A estrutura do modelo consiste de um aparato temporal, com períodos interconexos de simulação de diferentes extensões, múltiplas de um período muito curto de tempo, que pode ser um mês ou um trimestre. Se um módulo é ativado pelo agendador, ele será informado do número de unidades de tempo em que deverá permanecer ativo. O módulo usará essa informação para calcular o número de micro-eventos a serem processados durante este intervalo de tempo. Se o número é muito grande, o módulo pode aumentar o seu fator de amostragem ou resolução, e assim, economizar tempo de processamento. Em vista da detalhada abordagem da dimensão temporal e do comportamento microeconômico, o modelo não foi integralmente implementado, possuindo contudo, muitos de seus componentes operacionais. Este modelo foi aplicado para a simulação de processos de mudanças de longo prazo na região urbana de Dortmund, Alemanha (Wegener et al. 1986).

Concluindo, pode-se finalmente afirmar que embora refinamentos consideráveis tenham sido introduzidos na primeira geração de modelos dinâmicos no sentido de dotá-los de habilidade para lidar com as complexas, e por vezes recursivas, interações espaciais dentre as diferentes atividades em uma cidade, de incorporar a dimensão temporal (multinível) na análise quantitativa e de empregar sofisticados recursos teóricos e matemáticos – p.ex. equações diferenciais, Teoria da Catástrofe e Bifurcação, etc. -, estes modelos permaneceram fundamentalmente não-espaciais, especialmente no sentido de que seus resultados não podiam ser visualizados espacialmente.

2.3 Modelos Dinâmicos Espaciais de Mudanças do Uso do Solo Urbano

2.3.1 Espaço e Tempo no Presente Trabalho

Considerando que a “finalidade de qualquer modelo é simplificar a realidade” (Batty, 1976, p. 353), a discretização será o tom deste trabalho com relação tanto à sua dimensão espacial quanto temporal. Com base nesta premissa, o espaço será tratado como um artefato representado por uma estrutura em grade regular, bidimensional, consistindo de unidades quadriculares homogêneas – as células – formando o assim-chamado espaço celular. O tempo, por sua vez, será considerado sob um ponto de vista absoluto como uma entidade unidimensional independente, e no caso particular desta pesquisa, será considerado como constituído de sucessivos intervalos discretos, onde cada intervalo pode corresponder, em alguns casos, a um conjunto de anos, ou referir-se a períodos anuais em outros casos.

É importante, a esta altura, esclarecer que a adoção de um conceito de espaço métrico (Euclidiano) não restringirá a possibilidade de se lidar com interações espaciais não-contíguas. Como será a seguir demonstrado nos Capítulos 5 e 6, os métodos estatísticos empíricos empregados para parametrizar os modelos de simulação de mudanças do uso do solo urbano serão baseados, em alguns casos, em faixas de distâncias a certas variáveis físicas, e em determinadas situações, quanto maior a distância, mais decisiva será a contribuição da variável para um dado tipo de transição de uso do solo.

Mesmo nos casos onde as implementações computacionais são baseadas em modelos teóricos de espaço proximal, torna-se evidente que a estrutura espacial adotada situa-se no domínio de espaços Euclidianos. Exemplos disso são os modelos de CA baseados em grafos ou “graph-CA” (O’Sullivan, 2000, 2001a, 2001b), nos quais os grafos (estruturas lineares interconexas) operam sobre modelos de autômatos celulares para redefinir relações funcionais como sendo aquelas não exclusivamente derivadas da contigüidade espacial, e o modelo de geo-álgebra (Couclelis, 1997; Takeyama, 1997; Takeyama e Couclelis, 1997), onde por meio de várias operações matriciais, executadas em um ambiente de CA, levando-se em consideração matrizes de conectividade, mapas

relacionais e metarelacionais, determinam-se influências não-locais, que são então incorporadas à dinâmica do sistema urbano em análise.

É essencial salientar o papel decisivo que a formulação do espaço como uma entidade celular representou para as realizações no campo de simulações urbanas. De fato, esta concepção drasticamente impactou todo o cenário de modelagem dinâmica nos mais diversos ramos do conhecimento científico.

2.3.2 Autômatos Celulares e o Advento de Modelos Espacialmente Explícitos de Mudanças do Uso do Solo Urbano

2.3.2.1 Autômatos Celulares: Definição e Propriedades

De acordo com o exposto nas Seções 2.2.1 a 2.2.3, os modelos urbanos desenvolvidos no final dos anos 50 até a metade dos anos 80, de uma maneira geral, não operavam sobre uma dimensão espacial. Quando isto acontecia, o espaço urbano era desagregado em unidades (usualmente zonas de origem-destino ou definidas de acordo com distritos censitários ou outros critérios afins), mas o resultado destes modelos não podia ser visualizado espacialmente. De fato, efetivos avanços na representação espacial de modelos urbanos ocorreu apenas no final dos anos 80, quando modelos de autômatos celulares (CA) começaram a ser utilizados em larga escala.

Stephen Wolfram, um dos mais renomados teóricos sobre autômatos celulares, os define como sendo:

“... idealizações matemáticas de sistemas físicos, no qual o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Um autômato celular consiste de uma grade regular uniforme (ou `campo matricial`), comumente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada localidade (`célula`). O estado de um autômato celular é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula. Um autômato celular evolui em passos de tempo discretos, com o valor da variável em uma célula sendo afetado pelos valores das variáveis nas células vizinhas encontrados no

passo de tempo anterior. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências imediatas. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente ('sincronicamente'), baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto pré-definido de 'regras locais' (Wolfram, 1983, p. 603)".

Modelos de autômatos celulares (CA) possuem aplicações nas mais diversas áreas, desde a física teórica e empírica até mudanças de uso e cobertura do solo, engenharia e controle de tráfego, disseminação de epidemias, biologia comportamental, dentre outras. O artigo de Wolfram (1983) refere-se a cerca de 50 outros artigos que tratam de possíveis aplicações de autômatos celulares.

O Jogo da Vida ("Game of Life") de John Conway (Gardner, 1970), ou 'Life' como ficou conhecido, imortalizou o conceito de CA. No 'Life', o espaço celular é composto de uma grade quadrada regular bidimensional, onde a vizinhança das células consiste de seus oito vizinhos imediatos, isto é, quatro vizinhos ortogonais e quatro vizinhos diagonais⁸. Qualquer célula pode estar viva ('on') ou morta ('off'), e há apenas duas regras simples para uma célula tornar-se viva ou morrer. Uma célula morta torna-se viva se há exatamente três células vivas imediatamente adjacentes à mesma. Uma célula permanece viva se há duas ou três células vivas nas suas adjacências, senão ela morre. Isto significa que uma célula morre de isolamento ou superpopulação. Apesar da simplicidade das regras, este jogo suporta a geração de inumeráveis padrões de comportamento dinâmico.

De fato, o 'Life' demonstrou ser rico o suficiente para suportar a computação universal (Berlekamp et al. 1982). É evidente que mesmo nos mais simples CA, padrões globais complexos emergem diretamente da aplicação de regras locais, e é exatamente esta propriedade de complexidade emergente que torna os CA tão fascinantes, e o uso de seus modelos tão atrativos.

⁸ Esta vizinhança de oito células é chamada de vizinhança de 'Moore'. Uma vizinhança de apenas quatro células ortogonais adjacentes é conhecida como vizinhança de 'von Neumann'.

Uma outra propriedade interessante do 'Life' foi a possibilidade de apresentar certas configurações que se auto-perpetuam. Um exemplo bem conhecido destas configurações é o 'glider'. Um 'glider' é feito de cinco células vivas, dispostas como na FIGURA 2.7, no passo de tempo $t = 0$. A seqüência de quatro passos de tempo resulta nas mudanças mostradas, ao final da qual a configuração se deslocou uma célula acima e à direita. Como afirma O'Sullivan (2000), um aspecto interessante de um 'glider' é que o seu comportamento pode ser descrito sem conhecimento das regras subjacentes.

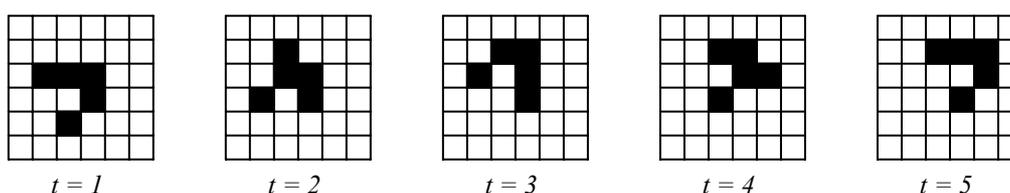


FIGURA 2.7 – Configuração de um 'glider' em o "Jogo da Vida" – um exemplo de emergência. Células vivas estão mostradas em preto.

FONTE: O'Sullivan (2000, p. 58).

Apesar dos CA lidarem com a emergência observável em fenômenos complexos, possuírem grande flexibilidade para fazer frente aos diversos processos dinâmicos, e revelarem uma incrível simplicidade operacional, eles são limitados, a princípio, em vista de restrições impostas pela maior parte de suas suposições teóricas.

Em resposta a isto, Couclelis (1997) propõe uma série de melhoramentos a serem incorporados em modelos de CA, os quais representam uma possibilidade técnica para se relaxar uma ou todas as suposições de CA convencionais (FIGURA 2.8). Estas proposições visam atender sobretudo as demandas de modelagem urbana e regional.

De acordo com a sua opinião, o espaço não mais necessita ser homogêneo em termos de suas propriedades e estrutura; vizinhanças não necessitam ser uniforme no espaço, e as funções de transição não necessitam ser universais (i.e., igualmente aplicáveis em cada ponto). Para ela, efeitos de decaimento com a distância poderiam integrar as vizinhanças de $CÁ$, regras de transição poderiam ser probabilísticas ao invés de determinísticas, e passos de tempo variáveis poderiam ser usados em ajuste a certos calendários.

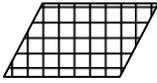
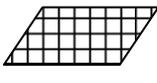
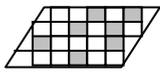
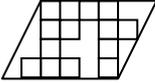
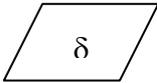
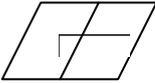
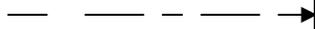
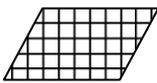
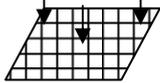
Espaço	Estrutura	regularidade 	irregularidade 
	Propriedades	uniformidade 	não-uniformidade 
Vizinhança		estacionariedade 	não-estacionariedade 
Função de transição		universalidade 	não-universalidade 
Tempo		regularidade 	não-regularidade 
Condições do sistema		fechado 	aberto 

FIGURA 2.8 – Generalizações comuns de autômatos celulares (CA).

FONTE: Couclelis (1997, p. 168).

Alguns teóricos de CA poderiam argumentar que, neste caso, o paradigma de autômatos celulares não mais se sustenta, especialmente devido a relaxamentos na noção de vizinhança local e de regras de transição, e que estes modelos adaptados deveriam ser preferencialmente denominados como modelos celulares (Albin, 1975; Batty, 2000)

2.3.2.2 Modelos Espacialmente Explícitos ou Modelos Dinâmicos Espaciais de Mudanças do Uso do Solo Urbano

De acordo com o exposto na Seção 1.1, CA estiveram de alguma forma implícitos na primeira geração de modelos computacionais nos anos 60, com os experimentos de Chapin e Weiss (1968) e de Lathrop e Hamburg (1965), executados respectivamente para a Carolina do Norte e o oeste do Estado de Nova York. Nos anos 70, Tobler (1970), influenciado pela geografia quantitativa, propôs modelos celulares para o desenvolvimento de Detroit. Pouco depois, em 1974, ele começou a formalmente

explorar a forma pela qual CA *stricto sensu* poderiam ser aplicados a sistemas geográficos, resultando no seu famoso artigo “Cellular geography” (Tobler, 1979). Finalmente, no final dos anos 80, CA começaram a ser amplamente utilizados para questões urbanas, impelidos pelo desenvolvimento paralelo no âmbito de computação gráfica e de teoria da complexidade, caos, fractais e afins (Batty et al. 1997).

Os anos 90 experienciaram sucessivos melhoramentos em modelos urbanos de CA, os quais passaram a incorporar dimensões ambientais, sócio-econômicas e políticas, e finalmente foram bem-sucedidos na articulação analítica de fatores de micro e macro-escala espaciais (Phipps e Langlois, 1997; White e Engelen, 1997; White et al. 1998).

Autômatos celulares podem ser considerados como uma categoria de modelos espacialmente explícitos (ou mais genericamente, modelos dinâmicos espaciais). O termo “espacialmente explícito” não é novo, mas ainda é empregado para caracterizar modelos que procuram descrever e prever a evolução de atributos ambientais em subunidades de área com distintas localização e configuração (Baker, 1989). Briassoulis (2000) subdivide estes modelos em espacialmente explícitos integrais (georreferenciados) e espacialmente explícitos parciais (não-georreferenciados).

Modelos de CA podem contemplar aplicações teóricas e práticas, onde as primeiras concernem exercícios abstratos, e as de caráter prático, experimentos que lidam com estudos de caso reais. Há atualmente cerca de vinte ou mais aplicações de CA a cidades (Batty, 2000), incluindo um vasto repertório tanto temático quanto metodológico.

Os primeiros modelos urbanos de CA não raro eram baseados em procedimentos metodológicos simples, como restrições de coerência de vizinhança (Phipps, 1989) ou regras Booleanas (Couclelis, 1985) para as funções de transição. Mais tarde, sucessivos refinamentos passaram a ser incorporados nestes modelos, a exemplo da adoção de regras de transição dinâmicas (Deadman et al. 1993), as quais poderiam se alterar com a concomitante mudança das condições e políticas da municipalidade em estudo.

Outros exemplos neste sentido são o trabalho de Wu (1996), que concebeu regras de transição para capturar processos desordenados de ocupação da terra, baseadas em heurística e lógica fuzzy, e o trabalho de Ward et al. (1999), no qual regras de transição são modificadas segundo limiares-meta de otimização econômica, social e ambiental, associados ao desenvolvimento urbano sustentável.

Outros refinamentos referem-se à introdução de abordagens microeconômicas em CA, o que levou ao aparecimento sistemas multiagentes (“Multi-Agent Systems” - MAS). Como exemplos, citam-se o trabalho de Semboloni (1997), descrevendo os padrões de desenvolvimento de cidades principais e satélites em função de diferentes categorias de população e atividades, os trabalhos de Sanders et al. (1997) e Torrens (2003) bem como os trabalhos de Batty et al. (1998) e Schelhorn et al. (1999) sobre movimento de pedestres, segundo o que se denomina modelos “atômicos” ou “microscópicos”⁹.

As funções de transição de CA também foram melhoradas pela incorporação de ferramentas de suporte à decisão, incluindo AHP ou técnicas baseadas em processos analíticos hierárquicos, o que foi em grande parte possibilitado pelas ligações entre CA e GIS (Engelen et al. 1997; Wu, 1998). Além de processar operações internas de CA (Clarke e Gaydos, 1998; Batty et al. 1999; Li e Yeh, 2000), GIS foram igualmente úteis na implementação de CA baseados em modelos de espaço proximal (Takeyama e Couclelis, 1997) e na articulação de níveis analíticos de micro e macro-escala (Phipps e Langlois, 1997; White e Engelen, 1997; White e Engelen, 2000).

Um exemplo ilustrativo de modelos de CA integrando fatores analíticos de micro e macro-escala espaciais é o trabalho de White et al. (1998), no qual a demanda por área de uso residencial é estimada através de um subsistema social que leva em consideração fluxos migratórios inter-regionais, e onde a demanda por atividades econômicas (industrial, comercial, serviços) é obtida por meio de subsistemas regionalizados que avaliam o desempenho de diferentes setores econômicos, fornecendo paralelamente informações sobre oportunidades de emprego, as quais serão novamente utilizadas para

⁹ Modelos “atômicos” ou “microscópicos” são aqueles que dizem respeito a objetos com resolução ao nível de entidade, tais como pedestres, domicílios, veículos, habitações, etc. (Benenson e Torrens, 2003).

computar a demanda residencial. Este modelo destina-se a estimar a demanda para os diversos tipos de uso do solo, considerando ao mesmo tempo, a capacidade de suporte ambiental dos sítios em questão (subsistema natural), assim como as restrições impostas em nível local por aspectos funcionais, físicos, institucionais e de infra-estrutura (FIGURA 2.9).

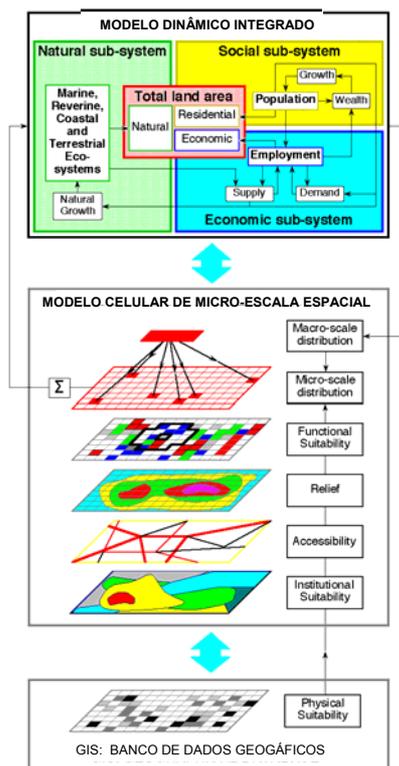


FIGURA 2.9 – Um modelo de CA integrando micro e macro-escalas espaciais.

FONTE: WHITE et al. (1997, p. 237).

Phipps e Langlois (1997) foram igualmente bem-sucedidos ao estimar os impactos de fatores analíticos de níveis macro e nacional, como políticas restritivas de imigração, no nível local. O seu modelo de dados contém um módulo chamado de Dinâmica Global dos Sistemas (“Global Systems Dynamics” - GSD), o qual recebe uma entrada que reflete o macroestado do padrão espacial em cada unidade de tempo, e cuja saída altera, em cada unidade de tempo, uma matriz markoviana de probabilidades espaciais de transição (“Spatial Transition Probability Matrix” - STPM). Este modelo foi implementado através de computação paralela e não por meio de GIS (FIGURA 2.10).

Avanços teóricos no campo de sistemas complexos também foram adicionados a autômatos celulares através do trabalho pioneiro de Wolfram (1984). Artigos lidando com temas relacionados a complexidade, como caos¹⁰, fractais¹¹ e criticalidade auto-organizável (“self-organized criticality” - SOC)¹² começaram a ser produzidos após o trabalho de Wolfram e são recorrentes na comunidade científica de CA (Couclelis, 1988; Batty e Longley, 1991; White e Engelen, 1993; Batty e Longley, 1994; Portugali et al. 1997; Portugali et al. 1999; Sobreira e Gomes, 2001; Batty, 2003).

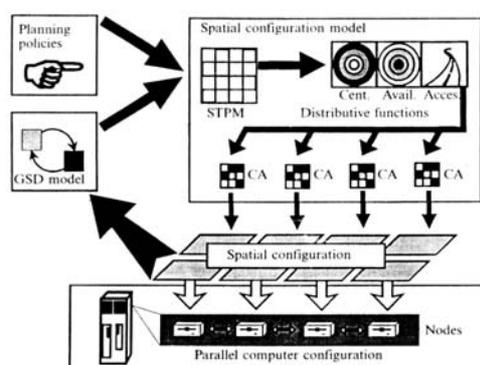


FIGURA 2.10 – Um modelo de CA incorporando variáveis de macro-escala.

FONTE: Phipps e Langlois (1997, p. 196).

Progressos teóricos inovadores no vasto campo de inteligência artificial (“artificial intelligence” - AI), tais como sistemas especialistas, redes neurais artificiais e computação evolucionária, foram recentemente incluídos no escopo de simulações em CA. Moore (2000), citando Weiss e Kulikowski (1984), define sistemas especialistas como “sistemas computacionais que aconselham ou auxiliam a solucionar problemas do mundo real, usando-se um modelo de raciocínio baseado no conhecimento de um

¹⁰ Caos é formalmente definido como o estudo de sistemas dinâmicos complexos não-lineares, sendo que o termo complexo envolve uma multiplicidade de variáveis intervenientes e seus interrelacionamentos em um dado fenômeno (Thompson, 1997).

¹¹ Fractais são objetos de qualquer espécie, cuja forma espacial nunca é regular (lisa), e sim irregular, e esta irregularidade se propaga geometricamente através de muitas escalas. Fractais podem ser chamados como a geometria do caos (Batty and Longley, 1994).

¹² Criticalidade auto-organizável (SOC) refere-se a sistemas onde os componentes individuais seguem sua própria dinâmica local até um estado crítico, no qual as dinâmicas emergentes são globais, e a comunicação flui livremente através de todo o sistema. Complexidade é a consequência da criticalidade auto-organizável (Bak et al. 1989).

especialista humano, que chegam à mesma conclusão que o especialista humano chegaria, caso confrontado com um problema semelhante.” Redes neurais, por sua vez, procuram simular o raciocínio humano (Moore, 2000) oferecendo soluções tolerantes a falhas. De acordo com Fischer e Abraham (2000), estes mecanismos são capazes de aprender e tomar decisões baseadas em informação incompleta, confusa ou vaga. E finalmente, métodos de computação evolucionária constituem um procedimento de busca extremamente flexível e inteligente, o qual reproduz os mecanismos conhecidos da evolução natural (Diplock, 2000).

Conforme exposto por Almeida et al. (2003), métodos recém-incorporados em modelos de CA, como ferramentas de ajuste de padrões por redes neurais (Wu, 1998; Xia e Yeh, 2000) e aprendizagem evolucionária (Papini et al. 1998) têm se revelado como os mais promissores para a próxima geração de modelos urbanos de CA.

2.3.2.3 Modelos Teóricos x Modelos Empíricos de Mudanças do Uso do Solo Urbano

Não há consenso entre pesquisadores, sobretudo aqueles do âmbito de modelagem de mudanças do uso do solo, a respeito de onde a tênue linha entre teoria e modelos principia e onde exatamente ela termina, e até mesmo se há ou não essa linha fronteiriça. Para Batty (1976), “modelagem urbana não é apenas uma reflexão de teoria urbana formulada alhures; mas ela constitui uma parte essencial da teoria nos campos de economia urbana, geografia e planejamento.” Esta afirmativa foi feita por volta de meados dos anos 70, quando os modelos urbanos concentravam-se basicamente em torno de abordagens econométricas, teorias gravitacionais e de alocação de atividades.

É interessante notar o câmbio de opinião ao longo da presente década, onde os impactos de massivos avanços em ferramentas computacionais, ancoradas principalmente sobre rotinas algorítmicas e lógicas, se fizeram sentir de forma pronunciada. Torrens e O’Sullivan (2001) reportam que “uma das limitações de modelos urbanos de CA é a de que em alguns casos eles contribuíram relativamente pouco do ponto de vista teórico. Argui-se que os modelos exploram várias hipóteses sobre a cidade, mas os resultados concernem freqüentemente detalhes da construção de modelos às custas das teorias que

estes se propõem a explorar. Pesquisa em modelagem urbana de CA é simplesmente isso: pesquisa em modelagem, e não pesquisa sobre teoria e dinâmica urbanas.”

Seguindo uma argumentação similar, Briassoulis (2000), que se dedica a modelos de mudanças de uso e cobertura do solo (“land use and cover change” - LUCC), afirma que “apesar do uso da teoria em modelos parecer ser indispensável, das várias teorias de mudanças de uso propostas, relativamente poucas têm sido usadas na operacionalização de modelos. Algumas teorias e modelos são concebidos simultaneamente; e daí o uso dos termos teoria e modelo de forma alternada ... mas a maioria das teorias ainda estão sem as suas contrapartes (não necessariamente matemáticas) em modelagem, e a recíproca também é válida. Vários modelos estão privados de fundamentações teóricas.”

As razões para este lapso no relacionamento entre teorias e modelos são duplas (Briassoulis, 2000): a) a primeira se refere a diferentes posicionamentos epistemológicos¹³ adotados por teóricos e modeladores, onde modelos normalmente se orientam por um tradição positivista¹⁴, ao passo que as teorias cobrem um espectro muito mais vasto de epistemologias; e b) uma segunda razão concerne o fato de que a realidade é altamente complexa, o que leva a uma dicotomia no campo de modelagem: ou a redução e simplificação do mundo real resulta em uma representação rudimentar da realidade, ou os modelos dotados de estruturas muito complicadas acabam inoperantes dentro dos limites viáveis de tempo e de demais recursos para a solução de problemas.

O hiato “teoria x modelagem” encontra exemplos em todo o horizonte histórico de modelagem urbana: desde a primeira geração de ambiciosos modelos de transportes em meados dos anos 60 (ver Seção 2.2.2, p. 49), que foram abandonados ou drasticamente reduzidos, até as relativamente recentes abordagens microeconômicas que procuram aprofundar-se em demasia sobre o comportamento individual (Wegener et al. 1986; Wegener, 2000), e por esse motivo, tornam a integral implementação computacional de seus postulados praticamente impossível. Em suma, esforços para apreender um dado

¹³ Epistemologia refere-se ao estudo crítico de princípios, hipóteses e resultados de ciências reconhecidas, visando à determinação de fundamentações lógicas, valores e contexto objetivo de cada uma delas (Ferreira, 1986).

¹⁴ O Positivismo diz respeito a um conjunto de doutrinas, as quais impõem uma orientação científica ao pensamento filosófico, atribuindo à ciência todo e qualquer progresso do conhecimento (Ferreira, 1986).

contexto real com um nível de detalhamento excessivo provaram ser parcial ou totalmente impraticáveis de um ponto de vista operacional.

Modelos teóricos podem ser entendidos como aqueles cuja gama de suposições, premissas e equações derivadas (quando existentes) explicativas do comportamento do sistema são definidas 'a priori'. Modelos empíricos, por um outro lado, apóiam-se nos dados disponíveis para emitir conclusões sobre o sistema 'a posteriori', empregando métodos estatísticos empíricos ou mesmo simples regras determinísticas. Modelos de CA teóricos sobre mudanças do uso do solo urbano podem lidar tanto com cidades abstratas/hipotéticas quanto com cidades reais, enquanto que modelos empíricos concernem estritamente áreas urbanas reais.

Couclelis (1985), Portugali et al. (1997) e Semboloni (1997), a título de exemplo, trabalham com modelos de CA teóricos para cidades hipotéticas. Batty e Xie (1997) também lidam com modelos de CA teóricos, porém sob uma ótica mais estocástica. Papini et al. (1998), a sua vez, trabalham com um modelo de CA teórico, porém aplicado a um ambiente urbano real: a área metropolitana de Roma. O trabalho de Clarke et al. (1997), por um outro lado, é um bom exemplo de um modelo de CA empírico, no qual regras de transição determinísticas são estabelecidas com base na observação do objeto de estudo, a área da baía de São Francisco, e onde a calibração é também executada levando em consideração o comportamento mutável do estudo de caso ao longo do intervalo de tempo considerado para a simulação.

A divisão entre modelos de CA teóricos e empíricos deve ser cuidadosamente observada, pois apresenta fronteiras mais nebulosas do que delimitações estritamente rígidas. Alguns modelos de CA podem ser chamados de híbridos, pois sua estrutura interna concilia teoria e empirismo. O modelo proposto por White et al. (1998) exemplifica esta situação, pois ele define acessibilidade com base na teoria gravitacional, e estima a adequabilidade de uma dada célula para abrigar um novo uso do solo através de uma equação probabilística, construída portanto, empiricamente.

Os modelos de CA a serem apresentados nos próximos capítulos podem ser da mesma forma considerados como híbridos. Embora estes modelos estimem seus parâmetros

diretamente a partir dos dados, existe de fato um robusto corpo teórico subjacente aos métodos estatísticos empíricos empregados, os quais se referem à teoria de probabilidade e dos conjuntos, teorema de Bayes, pesos de evidência, regressões linear e logística multivariada, etc. E com relação aos fenômenos em estudo propriamente ditos – mudanças do uso do solo urbano – todo um conjunto de argumentos teóricos de caráter econômico é adotado para explicá-los, levando em conta noções de maximização de utilidade do consumidor e otimização de vantagens locais.

De fato, escolher entre uma abordagem teórica ou empírica, ou mesmo adotar uma solução híbrida, dependerá sempre de um julgamento sensato do modelador, que considerará o perfil específico do objeto de estudo, assim como a(s) finalidade(s) particulares objetivadas pelo experimento de modelagem. Isto deve ser feito com o fim de se evitar problemas metodológicos básicos em modelagem, como os identificados por Harris (1975) já em meados dos anos 70. Para ele, um grande número de modelos urbanos não se originou da necessidade em se solucionar problemas urbanos práticos e específicos, mas ao contrário, novas abordagens parecerão sempre derivar da expansão ou refinamento de estruturas disponíveis no âmbito de modelagem.

E finalmente, a seguinte recomendação sugerida por Oppenheim (1986) será deixada aqui como um mandamento diretriz para todo e qualquer idealizador de modelos: “... a modelagem consiste no desenvolvimento de uma representação para uma dada situação, e não na identificação de uma situação que se ajusta a um dado modelo.”

2.3.3 Por Que Usar Autômatos Celulares para Modelagem Urbana?

Modelos de CA tornaram-se populares em grande parte devido ao fato de serem tratáveis, apresentarem uma incrível simplicidade operacional, gerarem uma dinâmica que pode reproduzir processos tradicionais de mudanças por difusão, e conterem complexidade suficiente para simular mudanças inesperadas e surpreendentes como as observadas em fenômenos emergentes. Esses modelos são flexíveis, no sentido de que fornecem uma estrutura não sobrecarregada com suposições teóricas, e que é aplicável a um espaço representado como uma grade. Estes modelos podem, portanto, articularem-se com dados matriciais, comumente usados em GIS (Almeida et al. 2003).

CA são também considerados como modelos flexíveis, porque eles lidam com os mais diversos processos dinâmicos do mundo real e podem ser vinculados a um amplo espectro de teorias do campo de complexidade: caos, emergência, fractais, criticalidade auto-organizável, etc., bem como do campo de AI, como sistemas especialistas, redes neurais artificiais, aprendizagem evolucionária.

Em face do acima exposto, é sensato afirmar-se que este tipo de representação de modelos constitui ainda uma das melhores técnicas atualmente disponíveis para responder às necessidades e interesses das investigações da presente pesquisa.

2.4 Conclusões

O Capítulo 2 propôs-se a fornecer uma retrospectiva histórica e o atual panorama de modelos urbanos dinâmicos. Embora modelos tenham sido alvo de severo criticismo, principalmente em vista do seu reducionismo e limitações para capturar integralmente a complexidade inerente da realidade (Briassoulis, 2000), pode-se argumentar em prol de sua existência e continuidade, pois eles oferecem uma maneira incomparável de se abstrair padrões, ordem e tendências dinâmicas diretrizes de processos do mundo real.

Conforme exposto por Batty (1976), “... padrão e ordem existem de fato, e é relativamente fácil identificá-los ... em sistemas urbanos e regionais. Se uma pessoa concorda ou não com a descrição estatística desses padrões é uma questão de opinião, e ultimamente de fé nas idéias fundamentais.”

Na verdade, modelos urbanos devem ser concebidos, manipulados, aplicados e interpretados de uma forma sábia e crítica, de modo que os modeladores, planejadores, tomadores de decisão da esfera pública e privada, assim como cidadãos de maneira geral possam extrair o melhor de seus resultados e sensatamente reconhecer os seus limites. Essas idéias são bem sintetizadas por Batty (1976), ao afirmar que “é necessário uma perspectiva mais liberal no estado-da-arte de todos aqueles envolvidos em modelagem urbana, promovendo assim a visão de que modelos são auxílios à imaginação dentro de um processo maior de projeto, solução de problemas e tomada de decisão na sociedade como um todo.”

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

As duas cidades em estudo, Bauru e Piracicaba, adotadas como objetos de modelagem da presente pesquisa estão localizadas no meio-oeste do Estado de São Paulo, Brasil, dentro dos limites da bacia do rio Tietê. Bauru se encontra mais precisamente na porção central do Estado, e pertence à subbacia do médio Tietê inferior, enquanto que Piracicaba está situada a leste de Bauru e pertence à subbacia do médio Tietê superior. (FIGURA 3.1).

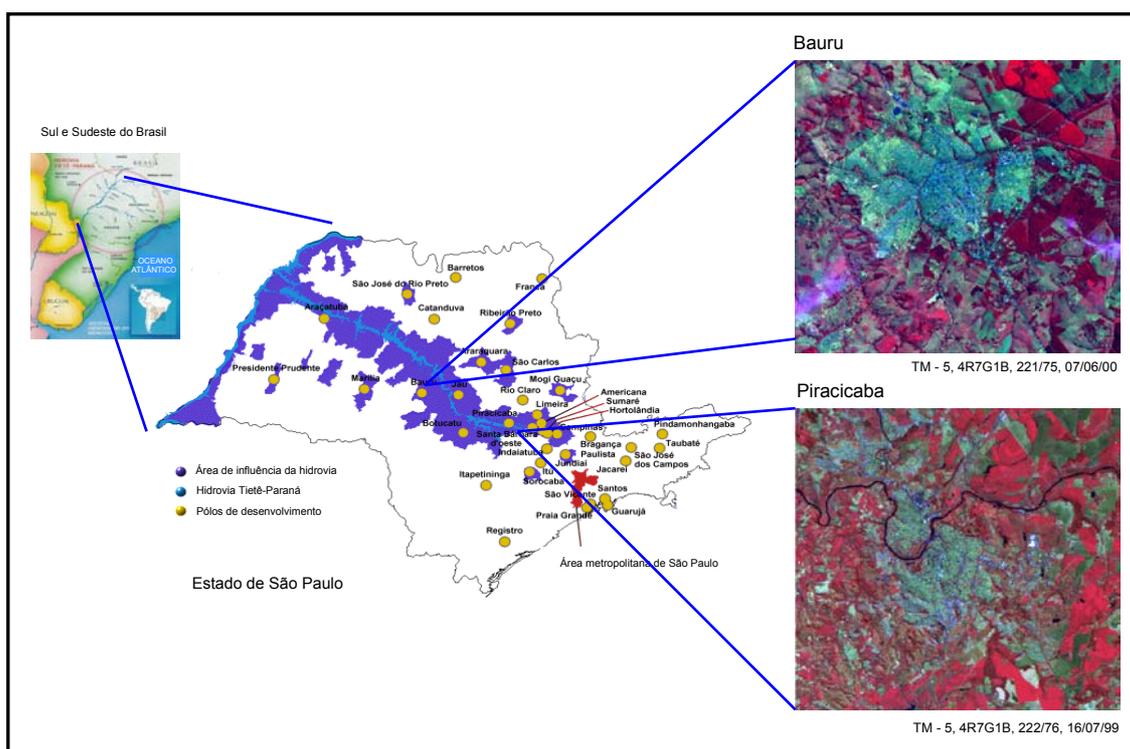


FIGURA 3.1 – Localização das cidades em estudo: Bauru e Piracicaba, interior de SP.

FONTE: CESP (1998); Fund. SEADE (1999); INPE (1999, 2000).

Bauru é delimitada pelas seguintes coordenadas geográficas:

o 49° 09' 28"	s 22° 25' 03"	[Sistema de Projeção: UTM Datum: Córrego Alegre.
o 48° 55' 43"	s 22° 15' 02"	

E Piracicaba, por sua vez, pelas coordenadas geográficas dadas abaixo:

o 47° 43' 30"	s 22° 47' 59"	[Sistema de Projeção: UTM Datum: Córrego Alegre.
o 47° 32' 48"	s 22° 39' 06"	

3.2 Retrospectiva Histórica do Processo de Urbanização

Uma retrospectiva histórica do processo de urbanização em relação aos dois objetos de pesquisa não irá focalizar apenas estas cidades, mas irá abranger a história de urbanização da bacia do rio Tietê e do interior do Estado de São Paulo como um todo, uma vez que o entendimento do processo de formação urbana dessas cidades não pode ser isolado do contexto histórico da macroárea onde se localizam.

3.2.1 O Ciclo da Mineração (1580 – 1730)

A ocupação humana ao longo das margens interioranas do rio Tietê remonta à época do Brasil colonial. Entre 1580 e 1640, a vila de Piratininga, como então era conhecida São Paulo, abrigou o porto de partida para expedições desbravadoras (“Bandeiras”) ao longo do Tietê na conquista de novas terras, ouro e pedras preciosas. Seus membros também saíam à procura de indígenas para serem domesticados e escravizados, o que resultou na exterminação de várias tribos do interior de São Paulo (Nóbrega, 1981).

Segundo Ohtake (1991), o ciclo de mineração propriamente dito ao longo do Tietê se iniciou em 1640 e durou até 1730, período em que o rio adquiriu importância também como veio de transporte para amplas minas de ouro descobertas em Goiás e Mato Grosso do Sul.

Por volta de 1720, o rio assistiu a um novo ciclo de expedições, as “Monções”, que se prolongaram além do ciclo minerador e eram de caráter eminentemente comercial e colonizador, possuindo como porto de partida a vila de Araraitaguaba, atual cidade de Porto Feliz.

Em vista do intenso número de expedições, vilas e assentamentos foram fundados ao longo das margens do Tietê para o provimento dos viajantes, tendo o rio atuado como um vetor de expansão de centros urbanos durante os séculos XVII e XVIII (Ohtake, 1991).

3.2.2 O Ciclo da Cana-de-Açúcar (1730 – 1822)

Por volta de 1775, São Paulo vivenciou um ciclo açucareiro tardio e de importância secundária no cenário econômico colonial de forma geral. Ao lado das lavouras de subsistência das vilas e assentamentos difundidos ao longo das margens do Tietê, grandes fazendas de engenho começaram a se estabelecer a partir da primeira metade do século XVIII, coincidindo com o declínio do ciclo da mineração.

A cultura açucareira encontrou nos vales do médio Tietê condições ideais para o seu desenvolvimento, tais como: solo fértil, trechos navegáveis do rio Tietê para o transporte de cana, o comércio trazido com as Monções, as condições sócio-econômicas locais, e por fim, as medidas governamentais fomentando o comércio exterior e a utilização do porto de Santos. Em pouco tempo, a cultura açucareira se tornou a força motora da economia da Capitania, o que resultou no surgimento de importantes cidades na região (Ohtake, 1991).

3.2.3 O Ciclo do Café (1822 – 1920)

Com o declínio do ciclo açucareiro às épocas da decretação do Império (1822), o café desponta no cenário nacional, tornando-se já na primeira metade do século XIX, o principal produto de exportação do Brasil, e fazendo do Estado de São Paulo, por volta de 1890, o principal centro mundial de produção cafeeira. Em sua grande parte coberto pela terra roxa, de alta adequabilidade para o cultivo do café, o vale do Tietê propiciou a

rápida e intensa ocupação do oeste do Estado. Muitas de suas cidades desenvolveram-se de forma tal que tornaram-se, a exemplo de Itu, centros políticos de maior importância, responsáveis até por alguns movimentos políticos que culminaram com a ruína do Império, e a instituição do Regime Republicano em 1889 (Ohtake, 1991).

A constituição do sistema urbano paulista tal como se apresenta mais recentemente remonta, portanto, à economia cafeeira. A rápida e intensa incorporação de terras àquela cultura, tendo como ponta de lança os eixos das ferrovias, fazia surgir a ossatura básica da sua futura rede de cidades (FIGURA 3.2). Ao mesmo tempo, iriam se consolidando os centros regionais dessa rede, muitos dos quais evoluíram da função de “boca de sertão” ou “ponta de trilhos”, verdadeiros suportes logísticos no processo de ocupação da zona pioneira (Fundação Seade, 1992).

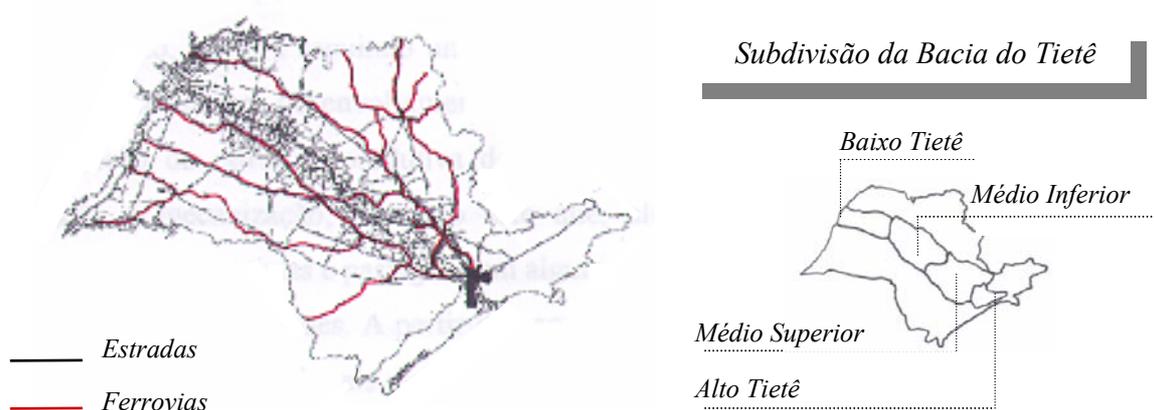


FIGURA 3.2 – Atual matriz de transportes no Estado de São Paulo e rede urbana (divisão municipal) ao longo da bacia do rio Tietê.

FONTE: CITP e CEPAM (1994).

A dinâmica de reprodução da economia cafeeira tinha caráter essencialmente urbano. Indústrias, bancos, escritórios, oficinas de reparação, estabelecimentos atacadistas, comércio de importação e exportação eram exigidos nesse processo, a maior parte do qual, centralizava-se em São Paulo, sede do governo estadual e ponto de convergência para o sistema de transportes, bem como para a distribuição do fluxo de imigrantes. A

população do Estado ascendeu de 1,4 milhão de habitantes em 1890 para 4,6 milhões em 1920 e 6,4 milhões em 1934. A ocupação do território significou não apenas a conquista de terras para o café, mas também a diversificação da atividade agrícola paulista (Fundação Seade, 1992).

3.2.4 O Processo de Industrialização e a Dinâmica Econômica do Século XX

3.2.4.1 Anos 1920 –1929

Segundo a Fundação Seade (1992), a atividade industrial, engendrada com o café, tenderia a concentrar-se na capital, que nos anos 20 iria crescentemente adquirindo as características de cidade grande, abrigando a massa de trabalhadores urbanos da própria indústria e do terciário. No interior, iriam fixar-se os núcleos agroindustriais, processadores da matéria-prima de origem agrícola, mas contavam-se também alguns importantes estabelecimentos industriais, notadamente têxteis.

Na história econômica de São Paulo, a década de 20 se apresenta como um momento de transição. A economia cafeeira engendraria uma crise de superacumulação que teria de fazer frente à violenta contração da demanda internacional a partir de 1929. A indústria passaria por processo semelhante, vivendo uma crise de superacumulação de capital, principalmente no setor têxtil-algodoeiro. Assim, a transição encontraria seu momento de ruptura na “crise de 1929” e no movimento revolucionário de outubro de 1930 (Fundação Seade, 1992).

3.2.4.2 Anos 1930 – 1955

A política de recuperação então implantada propiciou a passagem para um novo padrão de acumulação: entre 1930 e 1955, agora sob o comando do capital industrial, avançaria a industrialização, embora seguindo um padrão restrito, dado que setores da indústria pesada apresentariam um desenvolvimento tardio. A partir dos anos 50, iria acelerar-se a modernização da estrutura produtiva do agro paulista, com avanço moderado da quimificação e mecanização; processo este que, aliado à substituição de culturas permanentes por temporárias e pastagens em algumas zonas, contribuiria para acelerar o

êxodo rural dirigido às cidades. A partir dos anos 50, também seriam intensificados os fluxos migratórios inter-regionais dirigidos ao Estado, os quais passariam a representar importante componente da aceleração do processo de urbanização.

Conforme exposto pela Fundação Seade (1992), seriam esses os processos, em traços gerais, que dariam suporte à urbanização nesse período. O estreitamento dos nexos indústrias/agricultura bem como a enorme diversificação das respectivas pautas produtivas impactariam necessariamente sobre o terciário das cidades, exigindo a ampliação dos circuitos comerciais e de serviços de apoio. No mesmo sentido, o incremento populacional, lastreado principalmente nos deslocamentos migratórios, mudaria a escala das demandas por serviços pessoais e sociais.

3.2.4.3 Anos 1956 – 1969

O caráter restringido da industrialização em curso iria manifestar-se com clareza no final dos anos 50. A intensidade do crescimento, com os avanços simultâneos na constituição da estrutura produtiva, demandaria crescentemente a implantação de novos ramos e setores. Nesse sentido é que a segunda metade dos anos 50 marcam um período particular na trajetória brasileira de desenvolvimento: os segmentos pesados da indústria ganham peso e o Brasil, em face mais uma vez da vinculação do setor primário à indústria, aumenta a sua presença internacional no comércio de bens agrícolas e agroindustriais, impondo forte avanço tecnológico na agricultura, incorporando novos cultivos e transformando as relações de trabalho no agro (Fundação Seade, 1992).

Essas transformações na base produtiva primária e secundária iriam manifestar-se nas cidades, sob a forma de uma estrutura social cada vez mais complexa. Atividades tipicamente urbanas receberiam enorme impulso. Novas formas de comercialização e consumo, coerentes com a massificação e a alteração de hábitos, adquiririam um peso sem precedente. Seria no Estado de São Paulo que estas mudanças apareceriam com toda a clareza, em primeiro lugar na metrópole, mas também, progressivamente, no restante da rede urbana do interior.

3.2.4.4 Anos 1970 – 1979

Completada a primeira etapa do processo de industrialização pesada (1956-62), e superada a crise de 1962-67, a economia brasileira ingressou num período de elevadas taxas de crescimento do produto e da renda, o que permitiu o avanço da industrialização, sobretudo pela expansão em demasia do subsistema de filiais das empresas transnacionais do segmento de bens duráveis. Em vista da impossibilidade desses setores de liderarem um ciclo de crescimento auto-sustentado, da estratégia brasileira de desenvolvimento atrelada ao financiamento externo, bem como do choque do petróleo de 1973 conjugado a um ajuste recessivo do conjunto da economia mundial, o Brasil acabou por mergulhar em profunda crise.

Passado o “milagre”, o Governo brasileiro, alheio ao novo quadro internacional, formularia ainda assim o II PND, propondo expansão da indústria de bens de capital e investimentos no setor energético e de infra-estrutura, ampliando o endividamento externo, o que piorou ainda mais a partir de 1978-79, com o segundo choque do petróleo: a economia brasileira entra em definitivo na crise que se estenderia por todos os próximos dez anos. Em suma, os anos 70 representaram um gigantesco esforço de modernização e avanço das bases materiais do capitalismo nacional. Ainda assim, esse período viu agudecer a histórica desigualdade e pobreza da sociedade brasileira (Fundação Seade, 1992).

Neste período, apesar da relativa “desconcentração” da indústria nacional, promovida pelo II PND, e do crescimento da produção agrícola no restante do país, foi também em São Paulo que a maturação da industrialização atingiu sua maior expressão: sua estrutura industrial diferenciou-se pelo aumento do peso dos setores de bens duráveis e de capital; sua agricultura voltou-se para a exportação ou os energéticos, integrando-se à indústria (pelo processamento, insumos ou mecanização); seu terciário diferenciou-se pelo crescimento dos setores mais dinâmicos; suas cidades atingiram proporções gigantescas e o Estado absorveu quase três milhões de migrantes.

3.2.4.5 Anos 1980 – 1989

Os anos 80, também conhecidos como “década perdida”, iniciaram-se com uma das mais graves crises da história do Brasil urbano. A recessão, a elevação do desemprego e a crise social adquiriram expressão maior exatamente no Estado de São Paulo. A participação da indústria no produto interno bruto (PIB) estadual reduziu-se de cerca de 51% para 43% em 1988. A retração industrial, contudo, não revela o conjunto das transformações internas desta indústria exigido pela crise, como racionalização, ganhos de produtividade e maior competitividade, sobretudo dos setores voltados para a exportação. Alguns setores de ponta, montados na década anterior, tiveram um desempenho extremamente favorável, como a indústria aeronáutica, de material bélico, a agroindústria de processamento, a informática, a microeletrônica e telecomunicações.

Apesar da retração do crédito subsidiado, a agricultura paulista cresceu em média 2,1% entre 1980 e 1988, atenuando os efeitos da crise. Isto se deveu majoritariamente à maturação do Proálcool¹⁵, com o avanço da produção de cana, bem como à ampliação das lavouras de exportação, sobretudo a laranja, favorecida pela participação crescente no mercado internacional de suco concentrado. Assim, as áreas mais capitalizadas da agricultura, sobretudo ligadas a atividades de exportação, asseguraram rendas elevadas, exigindo o crescimento de segmentos complementares do terciário, com claras repercussões no adensamento da rede urbana estadual (Fundação Seade, 1992).

3.2.4.6 Anos 1990 – 1999

Esta década representou um marco no que se refere à evolução das estratégias de ajuste empresarial iniciadas nos anos 80. Com a edição do Plano Collor, apoiado no trinômio liberalização, desregulamentação, privatização - medidas estas que tiveram seqüência nos governos ulteriores -, as empresas de modo geral viram-se impelidas a impor ajustes defensivos severos (cortes e racionalização da produção), bem como organizacionais, privilegiando os trabalhadores com maior escolaridade e mais qualificados (Fundação Seade, 1995).

¹⁵ Proálcool refere-se a um programa nacional, destinado a financiar a produção (plantio, processamento e refinamento) de álcool obtido a partir da cana-de-açúcar para fins de abastecimento de veículos automotivos.

Frente a este cenário de reestruturação e globalização no âmbito internacional, e de abertura comercial e recessão no mercado interno, agravou-se ainda mais a questão do desemprego, sobretudo no Estado de São Paulo, onde o franco processo de modernização da agricultura aliado à desconcentração de alguns segmentos industriais para outros Estados, atraídos por incentivos fiscais e outras vantagens econômicas, vieram a acirrar os problemas sociais e urbanos das décadas precedentes.

Esta recessão econômica, aliada a um declínio nas taxas de crescimento da população¹⁶ devido a um processo de transição no cenário demográfico brasileiro, levou a um pronunciado refreamento no ritmo de urbanização da metrópole de São Paulo e nas cidades do interior do Estado, o que contrasta fortemente com o fenômeno de urbanização acelerada vivenciado nas décadas anteriores.

3.3 Configuração Espacial da Rede Urbana ao Longo do Rio Tietê no Interior do Estado de São Paulo

Parte significativa do crescimento industrial ocorrido nos anos 70 deu-se no interior do Estado, devido ao que se convencionou chamar “interiorização do desenvolvimento econômico de São Paulo”, promovido indiretamente por iniciativas federais. Na verdade, o II PND empreendeu um conjunto de políticas de promoção à desconcentração industrial de São Paulo, através de fundos de desenvolvimento, de políticas de incentivo às exportações ou à agroindústria bem como da descentralização da produção de insumos básicos, de forma a favorecer a desconcentração da produção para as demais regiões do país.

Contudo, apesar do esforço governamental, foi o interior do Estado o maior beneficiário dessa desconcentração industrial. Aqui concentrava-se uma infra-estrutura significativa, a principal agricultura nacional e uma rede de cidades sem paralelo no país, estabelecida desde a expansão da cultura cafeeira durante o século XIX (Fundação Seade, 1992).

¹⁶ De acordo com a Fundação Seade (1992), a taxa de crescimento da população no Estado de São Paulo decaiu de 2,7% nos anos 80 para 1,9% nos anos 90.

Com isso, o interior do Estado não receberia apenas mais indústrias e mais progresso, mas também uma parcela significativa de problemas urbanos e sociais. A entrada dos anos 70, portanto, mostraria uma urbanização explosiva e caótica, sobretudo na Grande São Paulo, que, infelizmente, passaria a se reproduzir tanto nas principais cidades brasileiras quanto naquelas do interior do Estado. Antigas cidades de porte médio assistiram à generalização das formas díspares de reprodução da vida social que caracteriza as sociedades de massa com desenvolvimento tardio: de um lado, um arcabouço material e social crescentemente diferenciado e complexo; de outro, as marcas de exclusão e segmentação que deixariam também de ser exclusivas dos grandes centros (Fundação Seade, 1992).

A década de 80 presenciou a seqüência da desconcentração industrial da metrópole paulista em direção às demais regiões brasileiras, em especial, ao interior do Estado. No interior, a desconcentração industrial proporcionou crescimento acima da média nacional, *performance* acompanhada por um bom desempenho agrícola e agroindustrial, gerando-se uma trajetória mais positiva do emprego também no terciário. Assim, se a década de 70 foi marcada pela interiorização do desenvolvimento liderada pela indústria, a de 80 assistiu a uma verdadeira “interiorização dos serviços”. A instalação dos grandes supermercados; cadeias de lojas ou shoppings; bancos estrangeiros; empresas de consultoria; agências de publicidade; hotéis das maiores redes ou de emissoras de TV são fenômenos da década de 80 nas principais cidades do interior.

Assim, os anos 80 contribuíram para acentuar o comportamento distinto das economias da metrópole e do interior, que já se anunciava no final dos anos 70. Na metrópole, o baixo crescimento econômico esteve fundado no desempenho do setor terciário, e, no interior, a continuidade da “interiorização” assegurou uma *performance* ligeiramente melhor. Este quadro pode ser explicitado pela evolução comparativa das manchas urbanas da metrópole e do interior (TABELA 3.1), conduzida para a época, através de imagens da série Landsat – Sensor Multispectral Scanner (MSS) e Thematic Mapper (TM), sob a coordenação de Wilson Cano (Fundação Seade, 1992).

TABELA 3.1 – Evolução comparativa do incremento de áreas urbanas entre a metrópole de São Paulo e principais cidades do interior paulista – 1974 – 1989.

<i>INCREMENTO DE ÁREA (MIL HA) POR PERÍODO</i>			
<i>ÁREAS URBANAS</i>	<i>1974 – 1980</i>	<i>1980 – 1984</i>	<i>1984 - 1989</i>
<i>Metrópole de São Paulo</i>	<i>46,9</i>	<i>21,0</i>	<i>18,4</i>
<i>Principais Cidades do Interior Paulista</i>	<i>27,0</i>	<i>29,4</i>	<i>18,1</i>

FONTE: Adaptado de FUNDAÇÃO SEADE (1992, p. 58).

Com particularidades no espaço e em ritmos distintos, o processo de urbanização das últimas décadas marcou a generalização de um padrão de crescimento urbano no conjunto do Estado. Durante esses anos, processos expansivos de verticalização (FIGURA 3.3) e as ampliações das periferias de baixa renda se apresentaram em quase todos os centros mais relevantes, multiplicaram-se os casos de conurbação, e, pela primeira vez, um processo embrionário de metropolização¹⁷ deixou de ser exclusivo da Grande São Paulo: novas áreas metropolitanas foram estabelecidas no Estado de São Paulo, tais como Santos em 1996, e Campinas em 2000 (EMPLASA, 2000).

A verticalização (construção de edifícios residenciais ou comerciais em altura), com o conseqüente adensamento de determinadas áreas, resulta tanto do aumento da demanda residencial, da multiplicação dos usos não-residenciais, da busca de economias pessoais externas (derivadas da concentração dos serviços e da infra-estrutura em determinadas áreas), dos diferenciais de preços da terra urbana, da ação do capital especulativo, das dificuldades crescentes de locomoção dentro das cidades, do aumento da violência urbana, etc.

A periferização, por sua vez, também tem origem neste complexo de fatores, sendo ainda potencializada pelo próprio adensamento (que valoriza áreas mais adensadas em

detrimento daquelas de ocupação rarefeita), e sancionada pelo Estado, que acaba valorizando terrenos vagos e relativamente distantes do centro pela implementação de conjuntos habitacionais, e que contribui permissivamente para a abertura de loteamentos carentes de infra-estrutura em áreas estritamente periféricas (Fundação Seade, 1992).



FIGURA 3.3 – Vista de Piracicaba com edifícios residenciais ao fundo.

FONTE: CIAGRI-USP (2003).

Conclusivamente, em quase todas as grandes cidades do interior paulista, o crescimento econômico de 50 a 70 e os efeitos menos problemáticos da crise dos anos 80 permitiram uma expansão física acentuada das mesmas. Muitas delas, com um histórico de maior consolidação urbana e diversificação de serviços, vieram a se constituir, desde o final dos 50 e início dos 60, em pólos regionais de desenvolvimento (ver FIGURA 3.1), organizando assim o conjunto da rede urbana de sua região administrativa e a teia de relações sócio-econômicas e funcionais de centros de menor porte ao seu redor.

Na entrada do século XXI, novos horizontes econômicos despontam para o oeste paulista. A consolidação do complexo hidroviário Tietê-Paraná oferecerá a possibilidade de dinamização econômica entre os países sul-americanos, principalmente no que diz respeito ao transporte de grãos. A queda das barreiras alfandegárias, possibilitada pelo mercado comum sul-americano (“Mercosul”), aliada ao transporte

¹⁷ Outros Estados do sudeste brasileiro, como Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina, também testemunharam a fundação de áreas metropolitanas no seu interior (EMPLASA, 2000).

mais barato, poderão ocasionar grandes mudanças no perfil agrícola do Estado, principalmente na área de influência da hidrovia (CITP e CEPAM, 1994), propiciando a continuidade da escalada de seu curso desenvolvimentista das últimas décadas.

3.4 Cidades Seleccionadas para Análise: Características Geográficas e Peculiaridades Sócio-Econômicas

3.4.1 Bauru

3.4.1.1 Características Geográficas

Bauru está localizada na bacia do médio Tietê inferior, meio oeste do Estado de São Paulo, e aproximadamente a 345 km da capital – a cidade de São Paulo. Este município contém uma população de 316.064 habitantes, dos quais 310.442 habitantes moram em áreas urbanas (IBGE, 2000). A cidade de Bauru está situada sobre a unidade geomorfológica denominada “Depressão Periférica”, que data do Período Alto Cretáceo, sendo predominantemente coberta por cerrado. A cidade apresenta clima tropical de altitude, com temperaturas médias oscilando de 17° C a 29° C ao longo do ano, e precipitação média de 1.310 mm/ano (DAEE, 1990).

3.4.1.2 Peculiaridades Sócio-Econômicas

Bauru é considerada como o maior ponto de entroncamento intermodal da América Latina, reunindo ferrovias, hidrovia e rodovias. A cidade em si nasceu como um ponto de cruzamento ferroviário durante a marcha de expansão da cultura cafeeira no século. Quatro rodovias inter-regionais atravessam a cidade, conectando-a à capital do Estado, ao extremo oeste de São Paulo, assim como aos Estados do Mato Grosso do Sul e Paraná.

O transporte ferroviário, através da sua ramificação sul, conecta a cidade aos mercados da Argentina e Uruguai. Em direção a oeste, é possível alcançar-se o Paraguai e a Bolívia, o norte da Argentina, e cruzando-se o Chile, o oceano Pacífico. Na direção leste, as ferrovias conduzem aos portos marítimos de Santos e Paranaguá na costa atlântica, e também a centros de produção de matéria-prima siderúrgica, tais como Volta

Redonda, no Estado do Rio de Janeiro, e Cubatão, no Estado de São Paulo. O município de Bauru também está localizado a apenas 25 km de um terminal de cargas intermodal da hidrovía Tietê-Paraná, situado no município vizinho de Pederneiras. Ao longo da hidrovía, será possível atingir-se portos fluviais no Uruguai e Argentina.

Bauru abriga um aeroporto estadual, que oferece vôos regulares para as principais cidades do Estado de São Paulo, como a cidade de São Paulo propriamente dita, Campinas, Guarulhos e São José do Rio Preto. Um aeroporto maior está sendo construído atualmente, o qual irá operar vôos convencionais para o todo o país e localidades em países sul-americanos, o que será crucial para o desenvolvimento econômico da região.

Um duto de gás que se estende da Bolívia em direção à costa atlântica brasileira atravessa a cidade de Bauru, fornecendo gás natural à sua população. Esta rota também comporta dutos de fibra ótica, que conectam Bauru à capital paulista.

A cidade também abriga um diversificado parque industrial, com um notável desempenho do setor agroindustrial. Cerca de trinta empresas instaladas no município exportam produtos como notebooks, maquinário industrial, baterias automotivas, carne bovina processada, suco em pó, massas alimentícias, artigos em couro e utensílios plásticos.

Em relação a facilidades comerciais, a cidade é bem suprida, possuindo várias lojas de departamento, um hipermercado e um shopping center. Um segundo shopping center encontra-se atualmente em construção. Em termos de serviços, a cidade oferece cerca de quarenta agências bancárias, hotéis de padrão internacional, várias estações retransmissoras de TV e provedores de internet. A cidade também conta com um grande número de estabelecimentos de saúde, alguns dos quais de elevado padrão, como hospitais universitários de base e hospitais altamente especializados. Há também um grande número de oportunidades de lazer e turismo na cidade, como o jardim botânico, o aeroclube, a fazenda experimental e diversos clubes de campo. E finalmente, Bauru também é conhecida como uma cidade educacional, abrigando duas universidades

estaduais (Universidade de São Paulo – USP e Universidade Estadual de São Paulo – UNESP), duas universidades privadas e três faculdades (Fundação Seade, 2000a).

Por apresentar uma estrutura urbana altamente diversificada, deduz-se que a cidade vivenciou processos urbanizatórios acentuadamente rápidos. Bauru junto com a maior parte das cidades do oeste paulista foram as cidades que mais cresceram em termos comparativos nos anos 80, reproduzindo em menor escala o padrão de grandes cidades latino-americanas, com edifícios elevados em áreas centrais (FIGURA 3.4), vazios urbanos dispersos em meio à aglomeração principal como resultado de ações especulativas, e loteamentos periféricos de baixa renda (Fundação Seade, 1992).

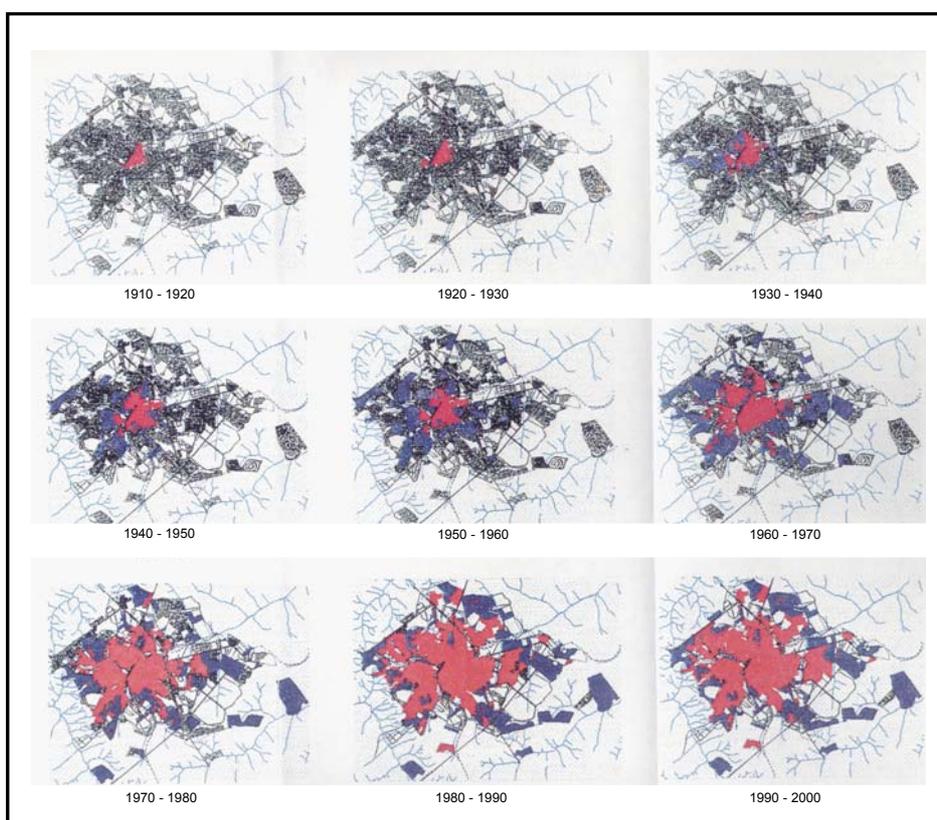


FIGURA 3.4 – Vista aérea de Bauru com edifícios residenciais.

FONTE: ITE-FCEB (1998).

Este boom urbanizatório é relatado no seu plano diretor (SEPLAN – Bauru, 1997), onde através de uma evolução comparativa de manchas urbanas no último século, constatou-se que sua área urbana cresceu mais de 300% nos últimos 50 anos (FIGURA 3.5).

Conforme já explicado na Seção 3.3, o desenvolvimento industrial no interior paulista durante os anos 70 reforçou indiretamente as atividades terciárias, especialmente durante as décadas subseqüentes. Bauru é um caso típico em que as atividades de comércio e serviços são preponderantes em relação ao setor industrial, o que pode ser comprovado pelas quotas setoriais do PIB municipal (FIGURA 3.6).



* A cor vermelha corresponde às áreas efetivamente ocupadas, e o azul, a loteamentos aprovados.

FIGURA 3.5 – Evolução da área urbana de Bauru no século XX.

FONTE: SEPLAN - BAURU (1997).

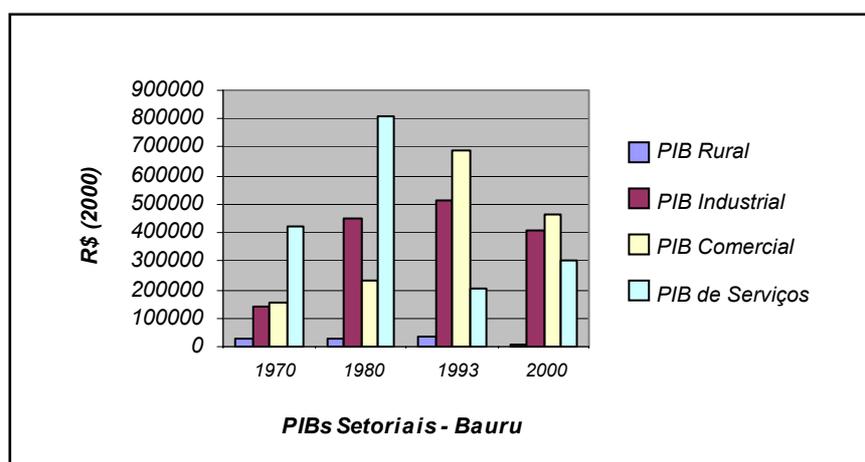


FIGURA 3.6 – PIBs setoriais da cidade de Bauru nas últimas quatro décadas.

FONTE: Adaptado de IPEA (2001); FUND. SEADE (2002).

3.4.2 Piracicaba

3.4.2.1 Características Geográficas

Piracicaba está localizada na bacia do médio Tietê superior, interior do Estado de São Paulo, e aproximadamente a 152 km da capital – a cidade de São Paulo. Este município possui uma população de 329.158 habitantes, dos quais 317.374 habitantes moram na sua cidade-sede (IBGE, 2000). Piracicaba está situada sobre parte da “Depressão Periférica” que data do Período Pré-Cambriano. Esta unidade geomorfológica é parcialmente coberta pelo cerrado, e parcialmente, pela Mata Atlântica. A cidade apresenta clima tropical de altitude, com temperaturas médias anuais variando de 12° C a 22° C, e precipitação média de 1.405 mm/ano, com chuvas distribuídas em duas estações (DAEE, 1990).

3.4.2.2 Peculiaridades Sócio-Econômicas

Piracicaba é considerada uma das cem melhores cidades brasileiras para investimentos empresariais, de acordo com uma pesquisa conduzida pela revista econômica – Exame - em 2001 (Fundação Seade, 2000b).

A cidade é servida por duas estradas principais: a primeira conecta a cidade a duas auto-estradas paralelas que ligam a capital paulista à metrópole de Campinas, e a segunda, conecta Piracicaba a uma auto-estrada que conduz ao oeste do Estado de São Paulo.

A cidade contém um aeroporto local, que comporta o tráfego diurno e noturno de aeronaves de médio porte. Em todo o caso, o aeroporto internacional de Viracopos, localizado em Campinas, dista apenas 85 km da cidade.

Piracicaba também se beneficiará da hidrovia Tietê-Paraná, com a construção de uma represa e eclusa na vizinha municipalidade de Santa Maria da Serra, o que tornará o rio Piracicaba navegável até Artemis, um distrito pertencente ao município de Piracicaba. A construção de um terminal ferroviário para ser integrado ao futuro terminal intermodal de Artemis está em estudos.

O duto de gás que se estende da Bolívia em direção à costa atlântica brasileira também atravessa a cidade de Piracicaba, fornecendo gás natural às suas indústrias e à sua população.

Piracicaba se distinguiu como um importante pólo produtor de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, e concentra amplos complexos sucro-alcooleiros. A cidade também abriga um diversificado parque industrial, com indústrias de grande porte e de tecnologia de ponta, cujos setores de destaque são metalurgia, processamento de alimentos, celulose e têxteis. Em relação a facilidades comerciais, a cidade possui três zonas comerciais, vários supermercados e quatro shopping centers. Em termos de serviços, a cidade oferece dezenas de agências bancárias, hotéis de padrão internacional, cinco estações de TV e inúmeros provedores de internet. A cidade conta ainda com quatro hospitais e vários postos de saúde.

O turismo é um forte setor econômico em Piracicaba, dado que esta cidade fluvial oferece uma agradável paisagem urbana (FIGURA 3.7); um notável patrimônio histórico e arquitetônico, como museus, engenhos e igrejas; um observatório astronômico; e belas áreas de lazer. Piracicaba também se destaca por ter sido uma das primeiras cidades brasileiras a implementar a Agenda 21 local, uma carta de diretrizes ambientais para o desenvolvimento sustentável, criada como um compromisso coletivo entre países-membros participantes da Conferência – ECO 92, no Rio de Janeiro.



FIGURA 3.7 – Vista da cidade de Piracicaba e suas áreas verdes.

Da mesma forma que Bauru, Piracicaba também é conhecida por ser uma cidade educacional, possuindo centros de pesquisa e universidades de excelência, e atuando como referência nacional nas áreas de agronomia e biotecnologia. A cidade abriga dois centros de pesquisa públicos (um voltado à energia nuclear na agricultura, e o outro, a tecnologias sucro-alcooleiras), o campus da escola de agronomia - USP, duas faculdades públicas, uma universidade e uma faculdade privadas (Fundação Seade, 2000b).

Porém, em contraste ao perfil econômico de Bauru, o setor industrial em Piracicaba, majoritariamente liderado pelos complexos sucro-alcooleiros, prevalece sobre as atividades terciárias - comércio e serviços -, conforme indicado no gráfico dos valores de PIBs setoriais (FIGURA 3.8).

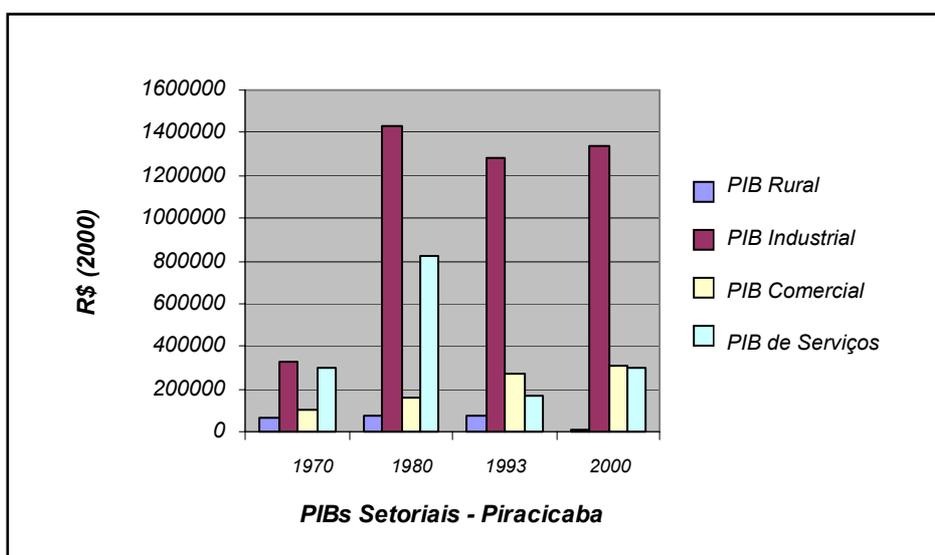


FIGURA 3.8 – PIBs setoriais da cidade de Piracicaba nas últimas quatro décadas.

FONTE: Adaptada de IPEA (2001); SEADE (2002).

3.5 Conclusões

As duas cidades adotadas para os experimentos de modelagem desta pesquisa de Doutorado apresentam semelhanças em relação ao seu passado histórico, pois ambas nasceram ao longo do vale do rio Tietê como resultado da ocupação humana

materializada pelas primeiras expedições fluviais durante os séculos XVII e XVIII, destinadas ao desbravamento da terra e à exploração mineradora. Ambas cresceram em importância com o apogeu da economia cafeeira no século XIX e início do século XX, bem como com o concomitante aparecimento das ferrovias e atividades de comércio e serviços mais sofisticadas. De igual forma, essas duas cidades possuem uma destacada tradição do setor de agroindústria e ambas herdaram parte do desenvolvimento industrial metropolitano a partir dos anos 70, como resultado de iniciativas políticas federais. E por fim, ainda com relação a aspectos de semelhança, é válido lembrar que Bauru e Piracicaba constituem pólos de desenvolvimento do Estado de São Paulo State, possuindo uma sofisticada e complexa estrutura urbana e um alto nível de infraestrutura educacional.

Entretanto, essas cidades diferem em termos de morfologia e paisagem urbanas. Bauru, a qual surgiu a partir de um entroncamento ferroviário, ainda apresenta um tecido urbano fortemente condicionado pelo sistema de transportes: a cidade é organizada em torno de quatro rodovias interregionais e a linha férrea, a qual atravessa o coração da cidade ainda nos dias atuais.

Embora a ferrovia ainda alcance o centro de Piracicaba, e as estradas ainda desempenhem um papel importante na estruturação de sua área urbana, a cidade deposita grande ênfase no rio, que representa um referencial paisagístico e urbano para a vida social de seus habitantes. A principal zona comercial ladeia áreas verdes estabelecidas às margens do rio Piracicaba, assim como as amplas áreas de campi universitários situados nos setores norte e nordeste da cidade.

Um outro aspecto divergente entre ambas cidades concerne sua vocação econômica. Enquanto Bauru é tipicamente reconhecida pela forte presença de atividades terciárias, o setor industrial representa o carro-chefe da economia de Piracicaba.

Em suma, em ambos os casos, os desafios para estudar essas cidades reside no fato de que elas vivenciaram booms urbanizatórios e apresentam uma grande diversidade com relação aos perfis de especialização econômica ao longo das últimas décadas.

CAPÍTULO 4

CONSTRUINDO O BANCO DE DADOS GEOGRÁFICOS

4.1 Dados Espaciais de Entrada: Produtos Cartográficos, Aerofotogramétricos e de Sensoriamento Remoto

Conforme anteriormente exposto, o tópico central da presente pesquisa foca modelagem de mudanças do uso do solo urbano. Na realidade, uma variedade de dados espaciais (mapas, imagens de satélite, fotos aéreas) fornecem informação sobre aspectos urbanos, como extensão e formato de áreas urbanas, áreas verdes, rede urbana de tráfego, etc. Mas para se extrair informação específica sobre uso do solo urbano com um alto grau de precisão e confiabilidade, é crucial contar-se com mapas de uso do solo urbano, comumente fornecidos pelos departamentos de planejamento de governos locais.

Este trabalho baseou-se essencialmente neste tipo de informação para gerar mapas digitais de uso do solo urbano que alimentaram o modelo de simulação. E por esta razão, as datas de início e término dos consecutivos períodos de simulação foram definidas em função dos mapas de uso do solo existentes para as duas cidades em estudo. Por exemplo, a Secretaria de Planejamento de Bauru produziu mapas de uso do solo nas últimas quatro décadas em 1967, 1979, 1988 e 2000. Deste modo, a série multitemporal adotada para os experimentos de simulação de Bauru, compreendendo trinta e três anos, foi dividida em três períodos: 1967-1979, 1979-1988 e 1988-2000.

No caso de Piracicaba, apenas dois mapas de uso do solo foram elaborados durante as últimas quatro décadas: em 1985 e 1999. Entretanto, a primeira lei de zoneamento urbano (sem mapas) sancionada para a cidade data de 1964 (Piracicaba, 1964), imediatamente após a conclusão de um levantamento aerofotogramétrico executado para a cidade e arredores em 1962. Portanto, as simulações de mudanças de uso do solo urbano para Piracicaba são baseadas em uma série multitemporal, compreendendo trinta e sete anos e consistindo de dois períodos consecutivos: 1962-1985 e 1985-1999.

Quarenta anos foram considerados como uma extensão ideal para as séries das simulações, uma vez que uma das metas principais deste estudo diz respeito ao entendimento de forças recentes das mudanças de uso do solo durante a época em que as duas cidades estavam sujeitas a booms urbanizatórios. Os anos 70 e 80 foram marcados pelo fortalecimento do processo de relocação industrial em direção ao interior do Estado (ver Seção 3.2.4.4), e conseqüentemente, pela rápida expansão urbana de suas principais cidades. Estas duas décadas foram incluídas na análise, juntamente com a década precedente, dado que o fenômeno de êxodo rural no Brasil, sobretudo no Estado de São Paulo, foi pronunciadamente reforçado por volta dos anos 60.

Uma razão ulterior para se limitar a análise às últimas quatro décadas se refere à disponibilidade de dados. Mapas de uso do solo nos anos 50 e anteriores são raros (quando não totalmente inexistentes), e ainda mais escassos são mapas de infra e super-estrutura e de densidade, os quais respondem pelas variáveis de entrada das simulações. Neste sentido, lidar com séries mais extensas que quarenta anos seria inviável.

Uma importante consideração deve ser dirigida à delimitação dos períodos de simulação. Conforme já dito, suas fronteiras (tempo inicial e final) são confinadas à edição de mapas de uso oficiais. Estes períodos, contudo, poderiam ser definidos de acordo com circunstâncias homogêneas, tais como mandatos de governo com semelhantes plataformas, cenários macroeconômicos estáveis, etc. Alguns trabalhos em modelagem de desflorestamento adotam esta metodologia (Soares-Filho, 1998; Mertens e Lambin, 1999; Mertens et al. 2000). Este procedimento de delimitação é funcional devido ao fato de que as variáveis forçantes determinando as mudanças de uso tendem a se alterar de tempos em tempos, como resultado de forças exógenas, a exemplo de contextos político-econômicos. Esta sugestão permanece como uma diretriz metodológica para estudos futuros, no caso de mapas de uso de solo tornarem-se disponíveis com maior frequência.

As seções seguintes serão dedicadas aos dados de entrada utilizados nos experimentos de modelagem, relatando suas principais propriedades técnicas e também a sua utilidade específica na elaboração dos mapas de uso do solo e de variáveis.

4.1.1 Produtos Cartográficos

Todos os dados cartográficos usados nos experimentos de modelagem foram plantas em papel referentes a mapas de arruamento, uso do solo, infra e super-estrutura, assim como mapas de densidade ocupacional. Muitos deles, usualmente os mais recentes, existiam em formato digital, mas devido a restrições de direito autoral, eles não puderam ser disponibilizados pelos seus detentores: as secretarias municipais de planejamento e de água e esgoto de Bauru e Piracicaba.

As plantas foram em grande parte desenhadas na escala de 1:20.000 para ambas cidades, às exceções do mapa de zoneamento de Bauru em 1967, desenhado na escala 1:10.000, e o mapa de estradas interregionais de terra e pavimentadas de Bauru em 1988, na escala 1:75.000. As plantas mais antigas são de papel vegetal, ao passo que as mais recentes constituem impressões digitais. Os mapas oficiais de arruamento mais recentes foram inicialmente escaneados e posteriormente vetorizados em tela. Detalhes deste processo de conversão digital serão fornecidos na Seção 4.3.1. Abaixo encontra-se um exemplo de planta em papel convertida em formato digital (FIGURA 4.1).

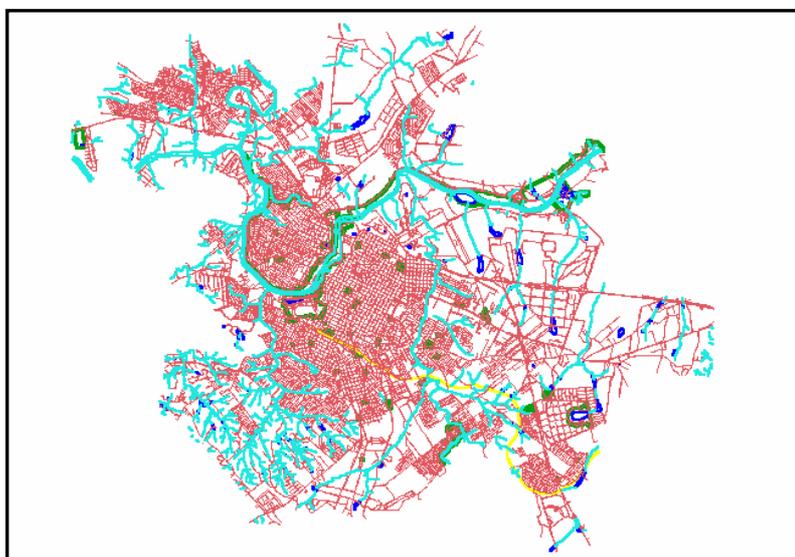


FIGURA 4.1 – Mapa de Piracicaba - 1999. Quadras em vermelho, ferrovia em amarelo, lazer em verde, rios em azul claro e lagoas em azul escuro.
FONTE: SEMUPLAN (1999).

4.1.2 Fotos Aéreas Digitais

Conforme já exposto na Seção 4.1, um levantamento aerofotogramétrico foi conduzido sobre a cidade de Piracicaba e arredores em 1962. Este levantamento foi realizado pela empresa “Terrafoto S.A.”, e a escala de vôo foi 1:100.000.

As fotos recobrando a cidade de Piracicaba foram convertidas em formato digital através de um escaneamento com o Scanjet HP 6350 - 1250 dpi, e a sua subsequente montagem em um mosaico digital (FIGURA 4.2), realizada com o programa TNT@mips 6.6. Este mosaico foi feito pela equipe sob a coordenação do Prof. Dr. Gerd Sparovek do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas (LSN), pertencente à Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). A área urbana de Piracicaba foi visualmente delimitada por edição vetorial, através de polígonos desenhados em tela (cor laranja) diretamente sobre o mosaico de fotos.

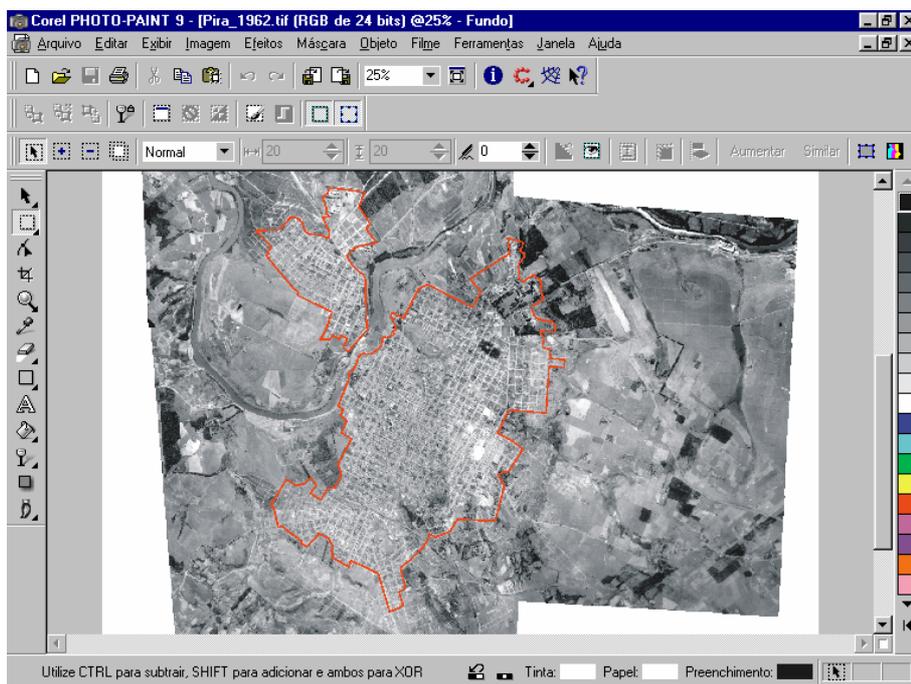


FIGURA 4.2 – Mosaico de fotos aéreas digitais para a cidade de Piracicaba - 1962.
FONTE: LSN - ESALQ-USP (2002).

4.1.3 Dados de Sensoriamento Remoto

Imagens do satélite Landsat foram usadas neste trabalho para atualizar os mapas oficiais de arruamento, posto que loteamentos residenciais ilegais não constam desses mapas. Suas datas de aquisição correspondem às fronteiras dos períodos de simulação (ver Seção 4.1) adotada para cada uma das cidades. Uma imagem Landsat – 3 MSS de 1979, e duas imagens TM - 5 de 1988 e 2000 (INPE, 1979, 1988, 2000) foram usadas para atualizar os mapas da cidade de Bauru. No caso de Piracicaba, duas imagens TM – 5 de 1985 e 1999 (INPE, 1985, 1999) foram empregadas. Os mapas de uso do solo datados da década de 60 não puderam ser atualizados por meio de dados de RS, uma vez que imagens de satélite tornaram-se disponíveis a partir do começo dos anos 70.

Dentre a comunidade científica envolvida com aplicações de dados de sensoriamento remoto em estudos urbanos, não existe consenso acerca da composição de bandas TM mais apropriada para a detecção de áreas urbanas e diferenciação de suas estruturas. Seevers et al. (1985) reporta que a combinação de bandas 5, 4, 3 é ideal para a interpretação visual de áreas urbanas, e as bandas 5, 4, 1, para classificação automática. Johnston e Watters (1996) trabalharam com uma classificação isodata¹⁸ nas bandas 2, 3, 4, 5 e 7 para fins de interpretação manual e agrupamento de classes divididas em tipos de cobertura "pavimentadas" e "não-pavimentadas". Liu (2003) citando um estudo do Centro de Dados USGS EROS, afirma que para o mapeamento de feições urbanas, as combinações 5, 4, 3; 4, 3, 2 e 7, 4, 3 são preferíveis para interpretação visual.

A natureza heterogênea de áreas urbanas implica uma grande complexidade espectral, explicada pela diversidade de comportamento dos materiais nelas encontrados e pela inclusão freqüente de usos não-urbanos, tais como áreas verdes, solo exposto, etc. Essa diversidade contextual cria portanto problemas para a classificação (Haack et al. 1987). Algumas soluções alternativas têm sido propostas para enfrentar este problema. Gong e Howarth (1990) propuseram um método de classificação destinado a extrair segmentos contendo uma densidade elevada de alta freqüência espacial, que segundo eles, melhor

¹⁸ Richards (1995) citando Ball e Hall (1965) define o algoritmo isodata como aquele que se destina a estimar as respectivas classes de vetores de pixels em agrupamentos candidatos, movendo-os de um agrupamento para outro de tal forma que a soma dos erros quadráticos médios da seção precedente seja reduzida.

caracteriza as áreas urbanas. Solberg et al. (1990) desenvolveram um algoritmo para a detecção de áreas urbanas baseado em filtragem de interferência. Este método, restrito apenas a sensores de alta resolução espacial (10m ou 20m), compreende a extração da rede de tráfego da imagem, que é sucedida por uma operação de filtragem, destinada a destacar áreas com alta densidade de elementos lineares. O algoritmo de filtragem cria assim interferências entre as linhas, tornando a resposta ampliada quando a densidade de linhas é maior. Embora este método possa detectar áreas urbanas com um alto grau de acurácia, suas bordas são incertas e pouco detalhadas.

Jensen-Moller (1990) criou um algoritmo para a detecção de áreas urbanas baseado em regras de classificação flexíveis, compreendendo tanto informação quantitativa quanto suposições heurísticas, refletindo critérios que seriam normalmente adotados pelo intérprete humano. Os procedimentos são os seguintes: a) detecção inteligente de estradas e estruturas lineares; b) processamento de atributos da imagem, como média, variância e textura; c) classificação final com o auxílio de sistemas especialistas.

Um método alternativo para a descrição de coberturas urbanas é o modelo V-I-S (vegetação – superfície impermeabilizada – solo), concebido por Ridd (1995), o qual se propõe a determinar a composição biofísica da paisagem urbana, atribuindo valores para estes três componentes. Em suma, este método lida com questões relacionadas à mistura ou interferência entre alvos em uma escala subpixel.

A utilização de dados de sensoriamento remoto neste trabalho, entretanto, foi limitada à interpretação visual de composições coloridas, uma vez que informação detalhada sobre a estrutura urbana das cidades em estudo já se encontrava disponível, ficando as imagens de satélite destinadas apenas a identificar loteamentos ilegais eventualmente existentes. Com este propósito, mapas digitais de arruamento foram sobrepostos às respectivas imagens, submetidas previamente a correções radiométrica e geométrica, operações de georreferenciamento e realce de contraste. Informação detalhada sobre essas técnicas de georreferenciamento são fornecidas na Seção 4.3.2.

Para as composições coloridas, as bandas TM 1 (0,45 μm – 0,52 μm), 4 (0,76 μm – 0,90 μm) e 7 (2,08 μm – 2,35 μm) foram selecionadas. A banda 1 foi submetida a correção

atmosférica. Áreas construídas apresentam uma alta resposta nas bandas 1 e 7 (Bowker et al. 1985), enquanto que a vegetação apresenta um pico de resposta na banda 4 (Richards, 1995), a qual é comumente usada para a identificação de biomassa (Novo, 1988). Esta combinação de bandas oferece portanto uma boa diferenciação entre áreas urbanas e não-urbanas. Uma outra vantagem em se trabalhar com estas bandas é a baixa correlação entre as mesmas. Um exemplo de imagem de composição colorida (1B_4R_7G) é dado abaixo, mostrando a cidade de Piracicaba em 1999 (FIGURA 4.3).

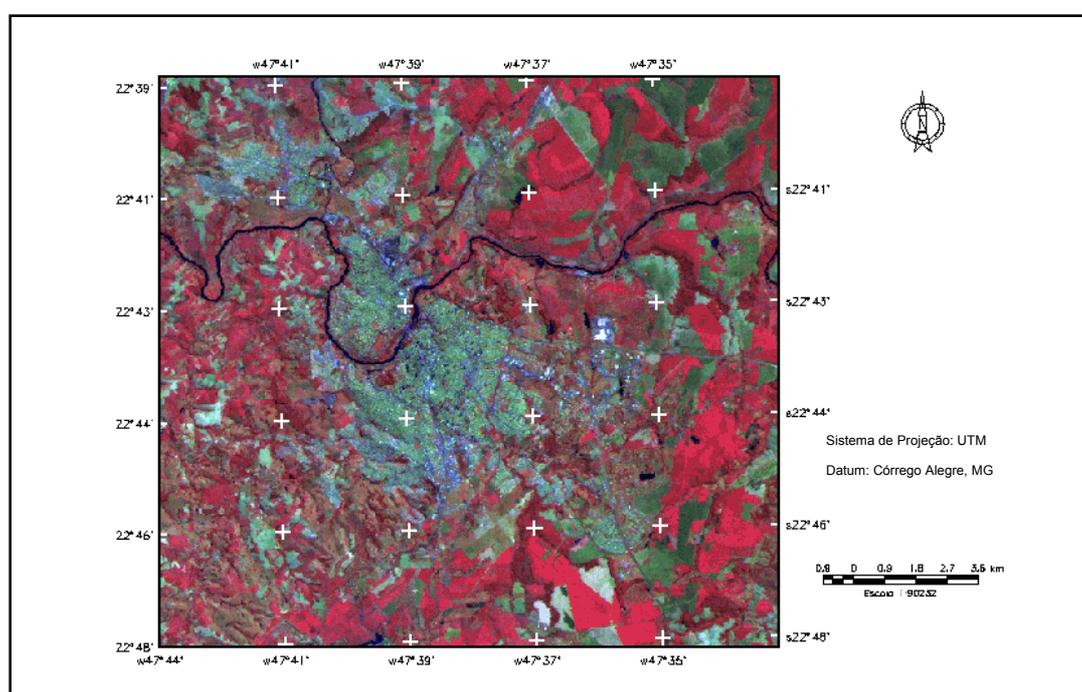


FIGURA 4.3 – Imagem TM – 5 de Piracicaba, 1B_4R_7G, 222/76 – 16/07/99.

FONTE: INPE (1999).

4.2 Dados Não-Espaciais de Entrada: Indicadores Sócio-Econômicos

Os dados não-espaciais foram usados neste trabalho para parametrizar a demanda total de mudanças de uso nos cenários de prognóstico. Esses cenários futuros foram construídos com base em análises de regressão linear, onde a variável dependente corresponde a taxas (em hectares) de transições de uso, enquanto dados demográficos e

indicadores de desempenho econômico referem-se às variáveis independentes. Maiores detalhes sobre esses métodos de parametrização de cenários de prognóstico são encontrados na Seção 5.3.2. Esta seção se destina basicamente a introduzir esses dados não-espaciais e suas respectivas fontes, apresentando a forma pela qual conversões de dados econômicos em diferentes moedas foram feitas.

4.2.1 Dados Demográficos

Dados demográficos foram obtidos para a maior parte das séries de Bauru e Piracicaba em intervalos de cinco anos. Isto se deve ao fato de que indicadores econômicos estavam disponíveis apenas em quinquênios a partir de 1970. Apenas população urbana foi considerada nas análises de regressão, porque ela representa a quota da população municipal efetivamente impactando o crescimento de áreas urbanas.

De acordo com a Fundação Seade (2003), população urbana se refere à contagem de habitantes residentes dentro do perímetro urbano de um dado município, assim definido por lei municipal. Apenas as populações urbanas pertencentes às cidades-sede dos municípios de Bauru e Piracicaba foram consideradas nas análises de regressão.

Os dados de população foram obtidos através de censos demográficos para os anos de 1970, 1980 e 2000 (IBGE, 1971, 1982, 2000). Estimativas de população foram usadas para se determinar a população urbana de Bauru e Piracicaba nos anos de 1985, 1990 e 1995 (IBGE, 1987, 1991, 1997). Uma vez que apenas a população total é fornecida por essas estimativas, as populações urbanas foram calculadas interpolando-se a proporção de população urbana identificada nos dois censos mais próximos. E finalmente, as populações urbanas dessas cidades em 1975 foram estimadas obtendo-se a média aritmética entre os dados de população de 1970 e 1980 (TABELAS 4.1 e 4.2).

4.2.2 Dados Econômicos

O produto interno bruto (PIB) municipal total e setorial foi selecionado como indicador para se determinar o desempenho econômico das cidades em estudo. O PIB municipal total é definido como sendo o valor de bens e serviços produzidos em um dado

município durante um ano, do qual deduzem-se as despesas com entradas utilizadas no processo produtivo. Ele se refere à medida do valor adicionado total gerado por todas as atividades econômicas (IBGE, 2002).

Um termo equivalente para o PIB é o valor adicionado (VA), que corresponde ao valor que as atividades econômicas agregam aos bens e serviços consumidos no seu próprio processo produtivo. Resumindo, é a contribuição ou produto doméstico bruto gerado pelas diferentes atividades econômicas, obtido pela diferença entre o valor da produção e o consumo intermediário absorvido por essas atividades (IBGE, 2002).

Na realidade, o PIB é o valor adicionado, e estes termos são freqüentemente usados de forma alternada. Os PIBs totais dos municípios de Bauru e Piracicaba estão disponíveis em US\$ de 1998 para os anos de 1970, 1975, 1980, 1985, 1990 e 1996 (IPEA, 2001). PIBs totais e setoriais (rural, industrial, comercial e de serviços) para estes mesmos municípios estão disponíveis em R\$ de 2000 para os anos de 1970, 1975, 1980 e 1985 (IPEA, 2003b). Valores adicionados totais (VA) estão disponíveis em R\$ de 2001 para os anos de 1993 a 2000, e valores adicionados setoriais são fornecidos em R\$ de 2000 também para os anos de 1993 a 2000 (Fundação Seade, 2002).

Para se obter valores padronizados de PIBs municipais totais e setoriais para os anos de 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995 e 2000, os seguintes procedimentos de conversão foram adotados:

a) Estimativa do PIB total em 2000 (US \$ de 1998):

$$\frac{PIB\ 1996\ (US\$ de\ 1998)}{PIB\ 2000\ (US\$ de\ 1998)} = \frac{PIB\ 1996\ (R\$ de\ 2001)}{PIB\ 2000\ (R\$ de\ 2001)} \quad (4.1)$$

b) Estimativa do PIB total em 1995 (US \$ de 1998):

$$\frac{PIB\ 1996\ (US\$ de\ 1998)}{PIB\ 1995\ (US\$ de\ 1998)} = \frac{PIB\ 1996\ (R\$ de\ 2001)}{PIB\ 1995\ (R\$ de\ 2001)} \quad (4.2)$$

c) Conversão do VA total em R\$ de 2001 para R\$ de 2000:

$$VA \text{ (R\$ de 2000)} = VA \text{ (R\$ de 2001)} \times \frac{IPCA \text{ (2000)}}{IPCA \text{ (2001)}} \quad (4.3)$$

Estas fórmulas constituem simples regras de três, pois conversões de câmbio concernem transformações lineares.

d) Estimativa dos PIBs setoriais em US\$ de 1998:

$$PIB_k \text{ setorial (US\$ de 1998)} = PIB \text{ total (US\$ de 1998)} \times \frac{PIB_k \text{ set. / VA}_k \text{ set. (R\$ de 2000)}}{PIB \text{ total / VA total (R\$ de 2000)}} \quad (4.4)$$

onde k denota um certo tipo de PIB setorial, que pode ser rural, industrial, comercial ou de serviços.

e) Cálculo dos PIBs setoriais para 1990 em US\$ of 1998:

$$PIB_k \text{ setorial (US\$ de 1998)} = PIB \text{ total (US\$ de 1998)} \times Taxa \text{ Proporcional}_k^{1990} \quad (4.5)$$

E esta taxa proporcional pode ser obtida através da seguinte seqüência de razões:

$$Taxa \text{ Proporcional}_k^{1990} = \frac{Taxa \text{ Proporcional}_k^{(1989 + 1991)}}{2} \quad (4.6)$$

$$Taxa \text{ Proporcional}_k^{1991} = \frac{Taxa \text{ Proporcional}_k^{(1989 + 1993)}}{2} \quad (4.7)$$

¹⁹ IPCA refere-se ao “Índice Anual Geral de Preços ao Consumidor”, e os valores de IPCA em 2000 e 2001 são respectivamente R\$1.683,47 e R\$ 1.812,65 (IPEA, 2003a).

²⁰ Valores de PIB foram usados nos anos 1970, 1975, 1980 e 1985, enquanto que valores de VA foram usados em 1995 e 2000.

$$Taxa\ Proporcional_k^{1989} = \frac{Taxa\ Proporcional_k^{(1985 + 1993)}}{2}, \quad (4.8)$$

$$Taxa\ Proporcional_k^{1985} = \frac{PIB\ Setorial_k^{1985}}{PIB\ Total^{1985}}, \quad (4.9)$$

$$Taxa\ Proporcional_k^{1993} = \frac{VA\ Setorial_k^{1993}}{VA\ Total^{1993}}. \quad (4.10)$$

Os valores finais de PIB em US\$ de 1998 assim como os dados de população usados na parametrização dos cenários de prognósticos estão abaixo (TABELAS 4.1 e 4.2).

TABELA 4.1 – População urbana, PIB total e setorial (US\$) de Bauru – 1970-2000.

<i>Anos</i>	<i>Pop.Urbana</i>	<i>PIB Total</i>	<i>PIB Rural</i>	<i>PIB Ind.</i>	<i>PIB Com.</i>	<i>PIB Serv.</i>
1970	61.592	526.500,428	24.884,128	124.826,722	136.439,859	376.832,414
1975	110.166	718.986,733	14.959,686	233.091,154	155.342,626	470.935,893
1980	159.926	983.887,317	23.486,596	344.767,749	176.902,442	1.572.421,062
1985	215.153	1.222.203,235	62.325,610	428.632,198	201.542,378	731.245,427
1990	237.954	1.358.236,390	46.922,487	472.677,454	479.003,725	419.780,872
1995	279.407	2.256.520,737	11.292,207	705.164,856	891.184,402	299.490,980
2000	310.442	1.906.359,257	6.512,305	627.732,044	713.024,547	467.496,231

FONTE: Adaptada de IPEA (2001, 2003a, 2003b) e SEADE (2002).

TABELA 4.2 – População urbana, PIB total e setorial (US\$) de Piracicaba – 1970-2000.

<i>Anos</i>	<i>Pop.Urbana</i>	<i>PIB Total</i>	<i>PIB Rural</i>	<i>PIB Ind.</i>	<i>PIB Com.</i>	<i>PIB Serv.</i>
1970	73.153	666.029,934	60.056,683	314.733,774	95.101,568	291.239,467
1975	115.960	1.312.284,818	39.437,798	853.930,964	121.743,828	418.916,047
1980	158.708	2.126.207,943	66.581,222	1.307.157,079	147.927,333	752.469,633
1985	198.407	1.704.037,322	68.131,878	1.075.191,585	128.818,571	560.713,867
1990	218.590	2.424.143,275	96.842,165	1.615.544,478	289.475,481	432.548,144
1995	236.687	3.251.245,119	24.907,799	2.108.284,969	491.681,220	277.346,390
2000	317.374	3.335.315,985	17.102,944	2.170.367,463	494.371,845	492.749,832

FONTE: Adaptada de IPEA (2001, 2003a, 2003b) e SEADE (2002).

É importante lembrar que a soma de PIBs setoriais ultrapassa o PIB total devido ao fato de que as atividades financeiras de “dummy” são dedutíveis apenas do PIB total, pois elas não podem ser contabilizadas para cada setor separadamente (IBGE, 1999, 2002).

4.3 Operações de Pré-Processamento dos Dados

4.3.1 Conversão Digital de Dados Cartográficos

Conforme exposto na Seção 4.1.1, os mapas mais recentes de arruamento de Bauru (DAE, 2000) e Piracicaba (SEMUPLAN, 1999) foram escaneados em preto e branco no scanner holandês OCE – G6035S. Os arquivos TIFF daí originados foram convertidos em arquivos com extensão OLE ou XREF através do programa australiano DESKAN 4.5, e então exportados para o AUTOCAD 14.

Estes mapas foram vetorizados em tela. Plantas de arruamento mais antigas foram recompostas diretamente sobre os mapas digitais recentes por meio de uma comparação visual entre esses mapas recentes e as respectivas plantas antigas em papel. A reconstituição do mapa da cidade de Piracicaba em 1962, entretanto, foi baseada em uma comparação entre o mapa digital da cidade em 1985 e um mosaico digital de fotos aéreas (ver Seção 4.1.2) de 1962 (FIGURA 4.4). Estes procedimentos foram adotados visando-se a um perfeito ajuste entre os mapas existentes ao longo de toda a série multitemporal das duas cidades.

Demais informações, como infra e super-estrutura, densidade de ocupação e uso do solo em diversos anos foram desenhadas em diferentes planos (“layers”), sempre se utilizando os respectivos mapas de arruamento como uma base de referência.

4.3.2 Técnicas de Georreferenciamento

4.3.2.1 Georreferenciamento de Imagens

Inicialmente, imagens de satélite TM – 5 de Bauru e Piracicaba, respectivamente adquiridas em 1984 e 1985 (INPE, 1984, 1985) foram usadas para procedimentos de georreferenciamento com base em cartas topográficas (IBGE, 1969, 1973) no SPRING

(Câmara et al. 1996). Embora a imagem de Bauru de 1984 não tenha sido usada nos processos de modelagem propriamente ditos, ela foi extremamente útil no estágio de georreferenciamento, uma vez que ela apresentava o melhor contraste para visualização.

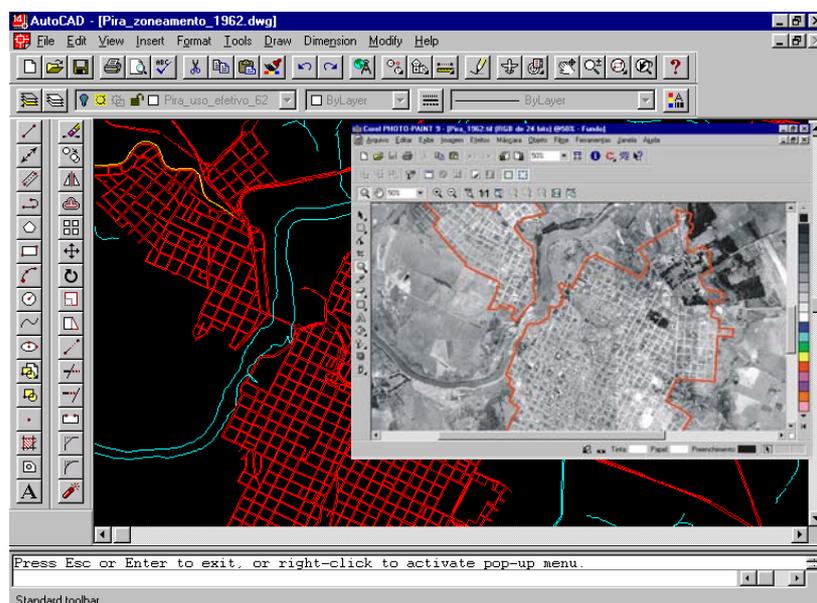


FIGURA 4.4 – Reconstituição do mapa de Piracicaba em 1962: mapa digital recente e mosaico digital de fotos aéreas de 1962.

FONTE: SEMUPLAN (1985); LSN – ESALQ-USP (2002).

Em ambas cidades, o georreferenciamento usou cinco pontos de controle (PC) e polinômios de primeira ordem para a correção. Um mínimo de quatro pontos é necessário quando este método é adotado, e sistemas sobredeterminados são empregados (Richards, 1995), mas dado que as imagens apresentam um alto nível de correção geométrica e que as áreas urbanas representam uma pequena parte da cena, cinco pontos foram julgados convenientes. Em todos os casos, procurou-se espalhar ao máximo esses pontos sobre a área urbana, de modo a melhorar os resultados do georreferenciamento (FIGURA 4.5). No caso de Bauru, o erro total foi de 1,3 pixels, e em Piracicaba, 1,2 pixels, o que não ultrapassa o limiar admissível de 1,5 pixels (Machado e Silva e D'Alge, 1986; D'Alge, 1987). As coordenadas dos pontos de controle para as duas cidades estão apresentadas nas TABELAS 4.3 e 4.4.

TABELA 4.3 – Coordenadas dos pontos de controle para o georreferenciamento da imagem de Bauru (TM – 5 221/75, 01/10/84).

<i>Pontos de Controle (PC)</i>	<i>Latitude (UTM, Datum: SAD - 69)</i>	<i>Longitude (UTM, Datum: SAD - 69)</i>
1	s 22° 16' 53,90"	o 49° 05' 10,97"
2	s 22° 21' 44,21"	o 49° 02' 25,74"
3	s 22° 18' 24,85"	o 49° 07' 22,76"
4	s 22° 19' 07,70"	o 49° 03' 11,47"
5	s 22° 18' 56,31"	o 49° 08' 20,56"

TABELA 4.4 – Coordenadas dos pontos de controle para o georreferenciamento da imagem de Piracicaba (TM – 5 220/76, 10/08/85).

<i>Pontos de Controle (PC)</i>	<i>Latitude (UTM, Datum: SAD - 69)</i>	<i>Longitude (UTM, Datum: SAD - 69)</i>
1	s 22° 42' 10,03"	o 47° 39' 00,98"
2	s 22° 42' 55,82"	o 47° 39' 28,20"
3	s 22° 42' 08,72"	o 47° 38' 52,95"
4	s 22° 42' 31,81"	o 47° 38' 42,38"
5	s 22° 40' 45,18"	O 47° 40' 30,28"

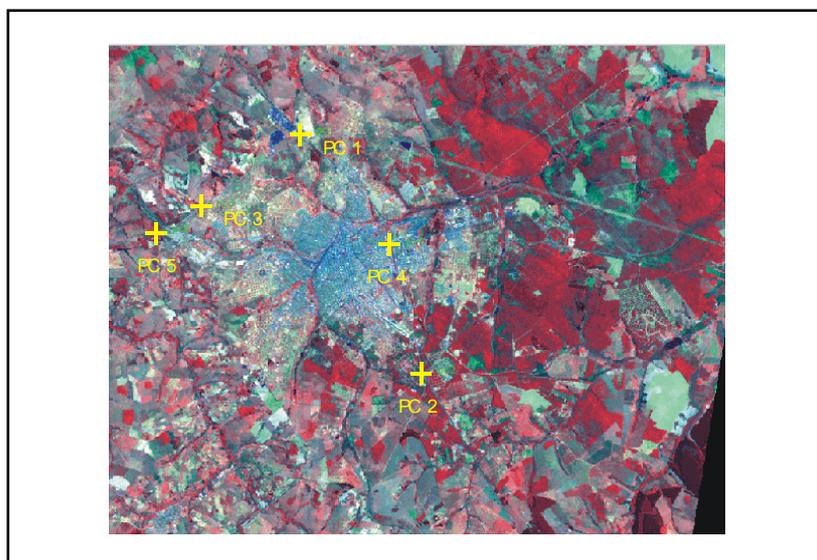


FIGURA 4.5 – Imagem georreferenciada de Bauru com pontos de controle (TM – 5 221/75, 01/10/84).

FONTE: INPE (1984).

4.3.2.2 Registro Imagem-Imagem

O registro imagem-imagem é necessário para o perfeito ajuste entre diferentes imagens ao longo de uma série multitemporal. A distorção geométrica das imagens de satélite pode ser atribuída a variados fatores. Estas distorções sistemáticas são causadas principalmente por alterações na localização, altitude, atitude e velocidade da plataforma, calibração do sensor, assim como no relevo e curvatura da superfície terrestre e pelo movimento da terra (Machado e Silva, 1989).

A imagem de Piracicaba de 1999 foi co-registrada com a imagem de 1985, e as imagens de 1988 e 2000 de Bauru foram co-registradas com a imagem de 1984. No primeiro caso, o erro total ficou em torno de 0,3 pixel, e no caso de Bauru, os erros permaneceram por volta de 0,5 pixel. Três pontos de controle foram usados em ambos os casos, em vista do alto nível de correção geométrica das imagens. Para se checar o ajuste entre imagens, o recurso de acoplamento do SPRING foi usado (FIGURA 4.6).

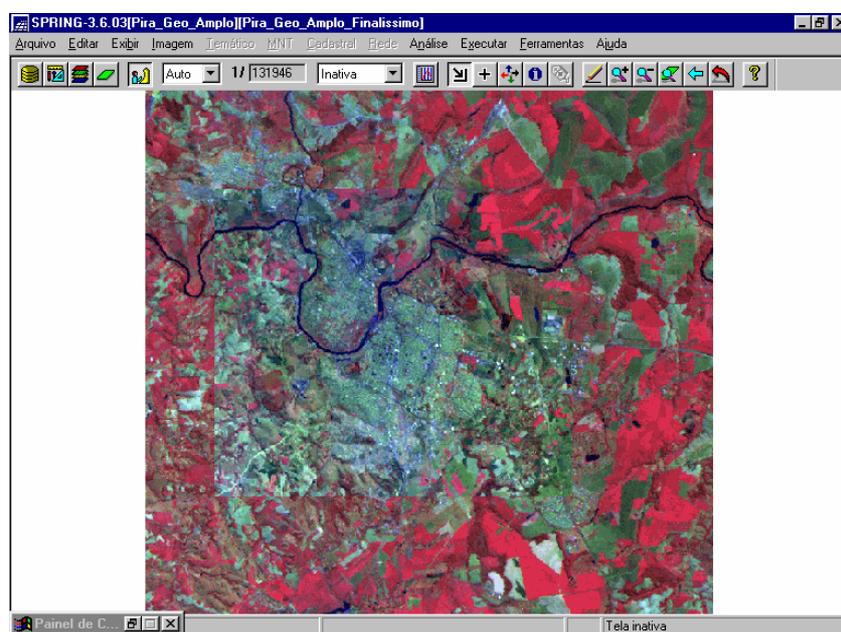


FIGURA 4.6 – Acoplamento entre as imagens de Piracicaba de 1985 e 1999 (TM – 5 220/76, 10/08/85 e 16/07/99).
FONTE: INPE (1985, 1999).

4.3.2.3 Registro Imagem-Dado Vetorial

Todos os dados vetoriais foram exportados como arquivos com extensão DXF, e importados em um projeto do SPRING sem sistema de projeção geográfica pertencente ao banco de dados contendo as imagens georreferenciadas.

O conjunto de pontos de controle usado no georreferenciamento das imagens também foi usado para se registrar os dados vetoriais importados do AUTOCAD. Tanto para Bauru quanto para Piracicaba, os dados vetoriais empregados no registro foram os mapas de arruamento mais recentes, mostrando as quadras e rede de transportes, dado que todos os pontos se localizavam em cruzamentos entre vias ou entre vias e ferrovias.

No SPRING, reserva-se a janela principal para a imagem já georreferenciada, e carregam-se os dados vetoriais em um janela secundária. Os pontos de controle, cujas coordenadas foram registradas em datum SAD-69 e digitadas em tela, foram um a um colados em suas respectivas posições sobre os mapas de arruamento das duas cidades (FIGURA 4.7).

Os três pontos de controle produzindo o melhor ajuste por meio de um polinômio de primeira ordem foram mantidos, e os outros dois pontos, excluídos. O conjunto desses três pontos é salvo com a extensão PRO. O mapa recente de arruamento de cada uma das cidades, assim como os demais mapas em formato vetorial são finalmente importados em um projeto definitivo do SPRING com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). Durante este processo, o arquivo PRO é usado para se inserir cada um dos mapas na posição correta em relação ao sistema de projeção adotado.

4.3.3 Análise Espacial e Processamento dos Dados

Os dados vetoriais georreferenciados submeteram-se a operações preliminares de processamento no SPRING, tais como edição vetorial (eliminação de linhas duplicadas e/ou espúrias), poligonalização e associação de classes temáticas a polígonos. Um estágio ulterior de processamento foi conduzido para se gerar mapas matriciais derivados dos dados vetoriais, como mapas de distância e mapas de análise estatística

espacial, a exemplo do estimador de densidade de pontos Kernel (Bailey e Gatrell, 1996).

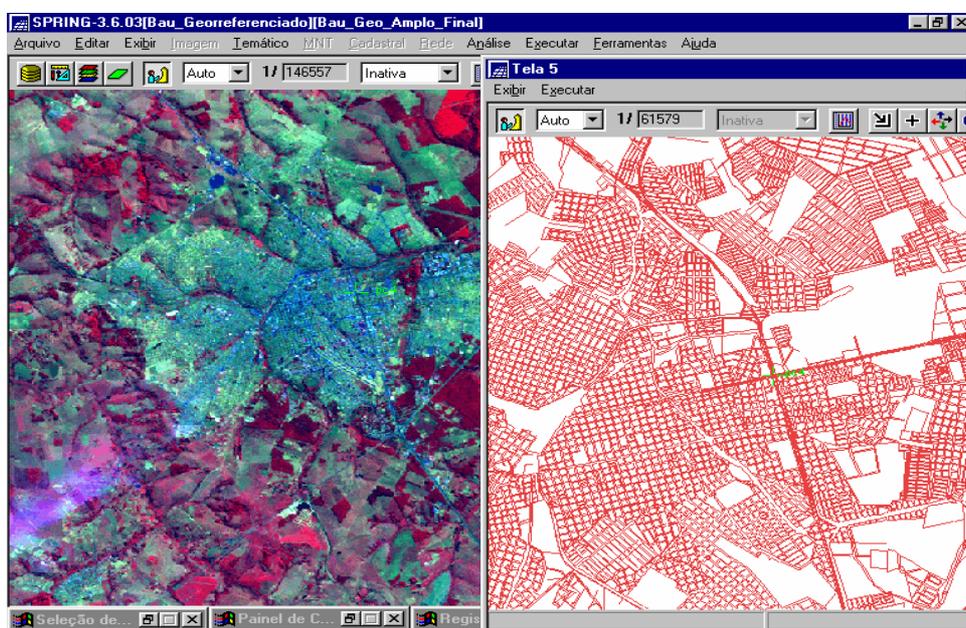


FIGURA 4.7 – Registro imagem-dado vetorial para o mapa de Bauru em 2000 (TM – 5 221/75, 07/06/00).

FONTE: INPE (2000) e DAE (2000).

Mapas de distância concernem tanto elementos lineares (estradas, rios, ferrovias) quanto polígonos (classes de uso do solo, tipos de densidade ocupacional, etc). Em alguns períodos de simulação, como se verá no Capítulo 6, algumas variáveis de entrada se referem a mapas de distância a faixas de densidades de agrupamentos, definidos com base no estimador de densidade de pontos Kernel. Este foi o caso, por exemplo, do mapa de atividades comerciais de Bauru em 1979 (FIGURA 4.8). Para o morador, distâncias aos principais agrupamentos de atividades comerciais são o que realmente importa, e não as distâncias individuais a estabelecimentos comerciais em particular.

Alguns mapas foram mantidos em formato binário (presença/ausência), como rede de água, habitação popular e faixas de densidade ocupacional. No último caso, cada

intervalo de densidade de ocupação (0%-5%; 5%-10%; 10%-15%; 15%-25%; 25%-40%; 40%-70%; mais de 70%) foi considerado em planos diferentes, i.e., diferentes tipos de densidade ocupacional foram representados em diferentes mapas.

Mapas binários foram convertidos para arquivos matriciais com resolução 100 x 100 (m), que também foi mantida nos mapas de distância. A resolução adotada é aproximadamente o tamanho de uma quadra, e foi julgada conveniente para a análise de uso do solo urbano, pois variações de uso do solo internas às quadras são desprezadas.

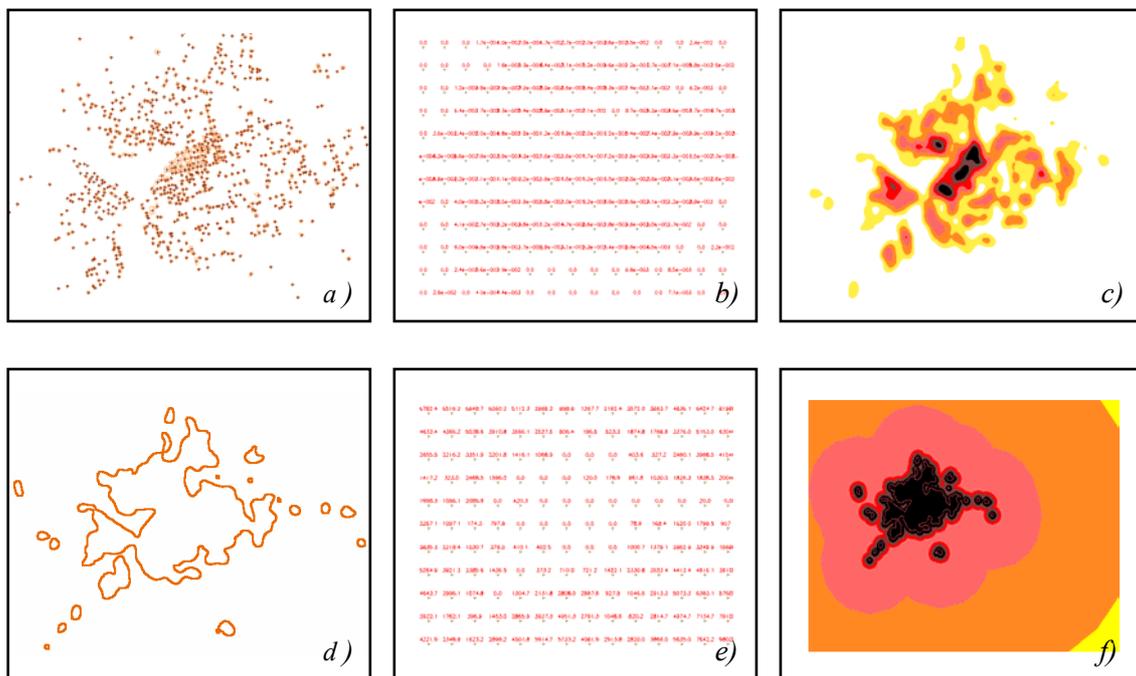


FIGURA 4.8 – Seqüência de operações para se gerar um mapa de distância aos agrupamentos comerciais: a) polígonos de comércio e seus centróides; b) grade numérica de densidade Kernel ($\tau = 5.000$ m); c) fatiamento da grade Kernel; d) vetorização do fatiamento; e) grade de distância aos fatiamentos; f) mapa de distância fatiado.

4.3.4 Atualizando os Mapas de Uso do Solo através de Sensoriamento Remoto

Conforme já mencionado na Seção 4.1.3, os dados de sensoriamento remoto foram visualmente interpretados de modo a atualizar os mapas oficiais de uso do solo, dado

que loteamentos residenciais ilegais não são mostrados nestes mapas. Isto foi feito através da sobreposição dos mapas vetoriais de arruamento sobre as respectivas imagens de composições coloridas realçadas (FIGURA 4.9a e 4.9b). Na realidade, imagens de satélite (e fotos aéreas) também poderiam ter sido utilizadas para remover dos mapas oficiais os loteamentos aprovados e não construídos. Mas considerando-se que não há verdade terrestre (levantamento aerofotogramétrico) para a cidade de Bauru em 1967, este procedimento não foi adotado devido a restrições de padronização ao longo das séries multitemporais. Nas duas cidades, favelas existem em pouquíssima quantidade, são de pequeno porte e praticamente absorvidas por áreas residenciais regulares.

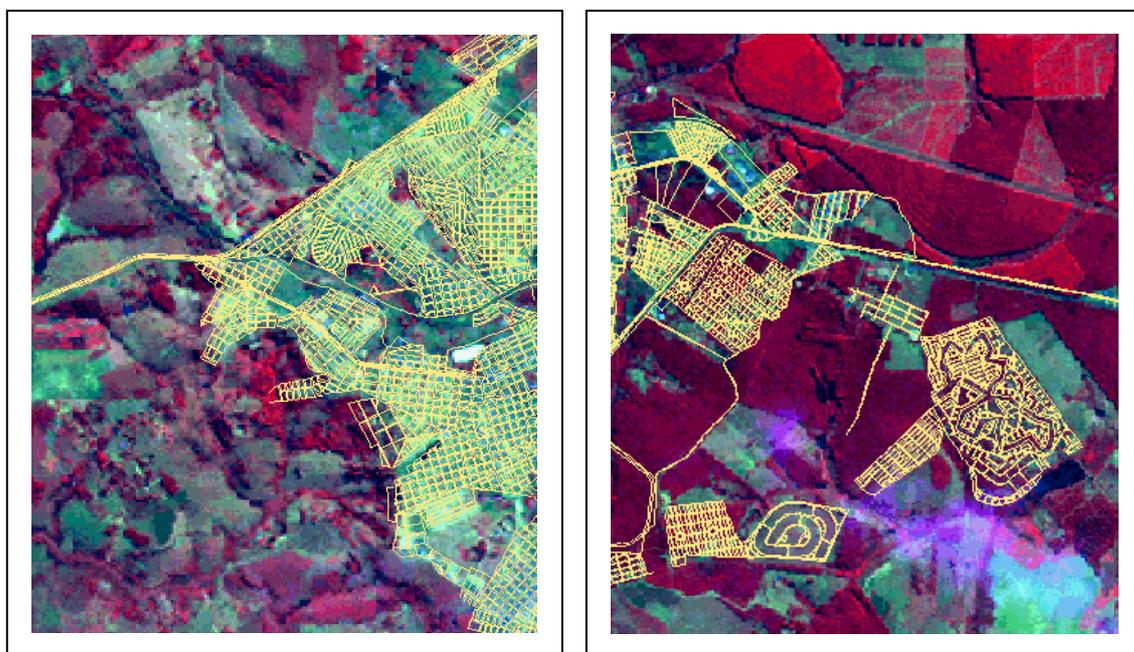


FIGURA 4.9a e 4.9b – Mapa de Bauru sobreposto à imagem TM – 5 de Bauru, 1B_4R_7G, 221/75 – 07/06/00. Setor oeste da cidade à esquerda (a) e setor leste da cidade à direita (b).

FONTE: INPE (2000) e DAE (2000).

Os mapas da cidade de Bauru apresentam pequenas distorções nos setores oeste e leste, ao passo que os mapas da cidade de Piracicaba, como pode ser averiguado no Capítulo

6, apresentam distorções generalizadas em toda a área urbana. Estas deformidades, entretanto, variam de moderadas a sutis e não prejudicam a identificação de loteamentos ilegais, pois isto não é feito automaticamente, e sim por análise visual.

Estas distorções podem ser atribuídas a problemas de integridade nos dados cartográficos originais, tais como:

- a) qualidade dos procedimentos estereoscópicos;
- b) baixa precisão de desenhos tradicionais em caneta nanquin dos mapas urbanos mais antigos;
- c) dilatações do papel vegetal em virtude de umidade e calor;
- d) atualizações de mapas urbanos mais antigos realizadas pela simples junção de fotos aéreas a mapas pré-existentes, sem o devido cuidado de acurácia estereoscópica.

A inclusão de pontos de controle adicionais e o uso de polinômios de maior ordem poderiam resultar em melhores ajustes entre as imagens e os respectivos mapas oficiais de arruamento em detrimento de distorções indesejáveis nesses dados vetoriais.

4.3.5 Procedimentos de Generalização Aplicados aos Mapas de Uso do Solo

Os mapas fornecidos pelas autoridades de Bauru e Piracicaba demonstraram conter várias inconsistências. Algumas zonas de uso referem-se a áreas que não estão ainda ocupadas, e algumas outras categorias de zoneamento não correspondem ao uso de fato encontrado em seus limites, refletindo apenas intenções futuras de uso. Por exemplo, uma zona designada como industrial pode, na realidade, conter apenas esparsamente indústrias de pequeno porte, e abrigar genericamente loteamentos residenciais.

Assim sendo, os seguintes procedimentos de generalização foram aplicados aos mapas de uso do solo de Bauru e Piracicaba, de modo a torná-los coerentes com a realidade à qual se reportam e, ao mesmo tempo, tratáveis do ponto de vista computacional:

- a) reclassificação das zonas instituídas pelas autoridades urbanas locais em função do uso predominante e efetivamente existente;

- b) generalização de zonas semelhantes para uma única categoria (ex.: zonas de uso residencial de diferentes densidades são reclassificadas como zonas residenciais apenas; zonas de uso especial e de equipamentos institucionais passam a ser enquadradas como zonas de uso institucional, etc.);
- c) adoção de oito categorias de uso do solo²¹: residencial, comercial, industrial , serviços, institucional, zona mista, lazer/recreação e uso não-urbano;
- d) exclusão de distritos isolados da mancha urbana, situados a uma distância superior a 10 km do perímetro urbano oficial; e,
- e) desconsideração de pequenos vazios urbanos e da rede viária, dado que esta última possui uma resolução ínfima para ser representada como uma categoria de uso.

4.4 Conclusões

A construção do banco de dados geográficos foi uma tarefa complexa. O pré-processamento dos dados envolveu um grande número de procedimentos operacionais, como a padronização de dados não-espaciais, a conversão de plantas em papel para o formato digital, o georreferenciamento e processamento digital das imagens de satélite, o cruzamento de dados vetoriais e de sensores remotos, etc. Ajustes foram feitos nos mapas de uso do solo para torná-los mais compatíveis com a situação urbana de fato existente. Neste caso, a fidelidade à realidade observada nos contextos de uso do solo das duas cidades foi preservada em um nível mais genérico.

Todos esses procedimentos corroboram com o reducionismo implícito na construção de modelos. No entanto, conforme afirma Briassoulis (2000), quando os modelos se recusam submeter-se a abordagens viáveis de generalização, eles se tornam passíveis de serem condenados, segundo as reais restrições de tempo e outros recursos, à ineficácia ou à total inexequibilidade.

²¹ Zonas de uso misto compreendem basicamente os usos residencial, comercial e de serviços. As zonas de lazer/recreação incluem parques, zoológico e outras áreas verdes públicas. Zonas de uso institucional referem-se às áreas abrigando grandes equipamentos públicos, como campi universitários, aeroportos, áreas de apoio a ferrovias, grandes complexos hospitalares ou de outra super-estrutura.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS PARA O MODELO DE SIMULAÇÃO DE DINÂMICAS DO USO DO SOLO URBANO

5.1 Introdução

Este capítulo tratará inicialmente de dois métodos estatísticos empíricos usados para parametrizar o modelo de simulação. Ambos os métodos – “pesos de evidência” e “regressão logística” – são baseados em manipulações algébricas da função logarítmica.

Métodos estatísticos empregados para determinar a quantidade total de mudanças do uso nos cenários de prognóstico são apresentados na terceira seção. A abordagem estacionária, na qual as taxas de transição do uso do solo urbano são supostamente constantes no tempo, é dada pela cadeia de Markov, enquanto que procedimentos não-estacionários para se estimar a quantidade global de mudança são obtidos por análises de regressão linear, relacionando a taxa de transição a tendências demográficas e de desempenho econômico. Estas análises de regressão fornecem tanto cenários otimistas quanto pessimistas, com base em variações sutis das variáveis explicativas.

E finalmente, similaridades e divergências entre “pesos de evidência” e “regressão logística” assim como *prós* e *contras* na aplicação de cada um destes métodos serão tratados na última seção deste capítulo.

5.2 Métodos de Simulação

5.2.1 O Método de Pesos de Evidência

5.2.1.1 Introdução ao Método de Pesos de Evidência

O método pesos de evidência é baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes (Bonham-Carter, 1994). Basicamente, este teorema concerne a propensão para se

do uso (p.ex. uso não-urbano para residencial), posto que uma evidência (p.ex. suprimento de água), também chamada variável explicativa, já ocorreu (FIGURA 5.1).

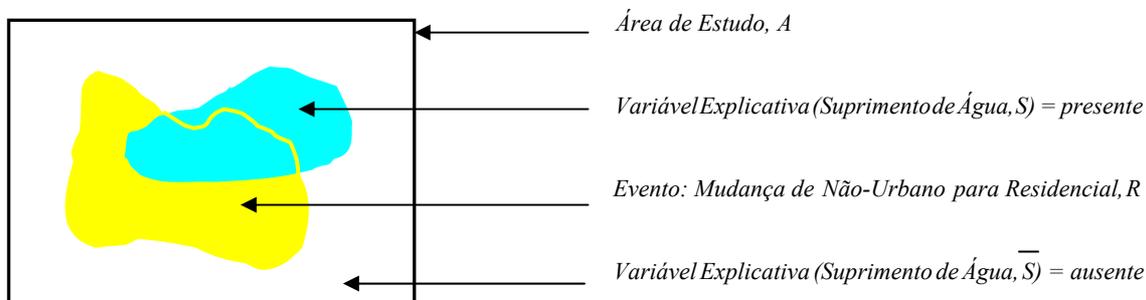


FIGURA 5.1 – Esquema ilustrativo do método de pesos de evidência.

A propensão para se encontrar a classe residencial R em vista da presença da evidência, ou seja, do padrão binário S (suprimento de água), é dada por:

$$P \{R/S\} = \frac{P \{R \cap S\}}{P \{S\}}, \quad (5.1)$$

onde $P \{R/S\}$ é a probabilidade condicional de ocorrência do evento de transição R , dada a presença da variável explicativa ou evidência S . Mas, $P \{R \cap S\}$ é igual à proporção da área total ocupada por R e S juntos. Sendo N a contagem de células dos mapas (área de um evento ou uma evidência), a fórmula anterior pode ser reescrita para:

$$P \{R/S\} = \frac{N \{R \cap S\}}{N \{S\}}. \quad (5.2)$$

Para se obter uma expressão relacionando-se a probabilidade *a posteriori* de ocorrência do evento R em termos da probabilidade *a priori* e de um fator de multiplicação, pode-

se afirmar que a probabilidade condicional de se estar na área da evidência S , dada a presença do evento R , é definida por:

$$P \{S/R\} = \frac{P \{S \cap R\}}{P \{R\}} . \quad (5.3)$$

Como $P \{S \cap R\}$ é o mesmo que $P \{R \cap S\}$, as Equações (5.3) e (5.1) podem ser combinadas para determinar $P \{R/S\}$:

$$P \{R/S\} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S/R\}}{P \{S\}} . \quad (5.4)$$

Uma expressão semelhante pode ser derivada para a probabilidade *a posteriori* de ocorrência do evento R , dada a ausência da evidência \bar{S} . Portanto,

$$P \{R/\bar{S}\} = \frac{P \{R\} \cdot P \{\bar{S}/R\}}{P \{\bar{S}\}} . \quad (5.5)$$

Essas equações acima apresentadas podem ser expressas sob a forma de *odds*. *Odds* é definido como a razão da probabilidade de que um evento irá ocorrer pela probabilidade de que ele não irá ocorrer. O método de pesos de evidência usa os logaritmos naturais dos *odds*, conhecidos por *log odds* ou *logits*. Para se clarificar essa abordagem, a Equação (5.5) será convertida para *odds*. Para tanto, basta dividirem-se os dois lados da equação por $P \{R/\bar{S}\}$:

$$\frac{P \{R/S\}}{P \{\bar{R}/S\}} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S/R\}}{P \{\bar{R}/S\} \cdot P \{S\}} . \quad (5.6)$$

Mas, a partir das definições de probabilidade condicional, tem-se que:

$$P \{ \bar{R}/S \} = \frac{P \{ \bar{R} \cap S \}}{P \{ S \}} = \frac{P \{ S/\bar{R} \} P \{ \bar{R} \}}{P \{ S \}} . \quad (5.7)$$

Substituindo-se a Equação (5.7) na Equação (5.6), chega-se à seguinte fórmula:

$$\frac{P \{ R/S \}}{P \{ \bar{R}/S \}} = \frac{P \{ R \}}{P \{ \bar{R} \}} \cdot \frac{P \{ S \}}{P \{ S \}} \cdot \frac{P \{ S/R \}}{P \{ S/\bar{R} \}} . \quad (5.8)$$

Substituindo-se *odds* na Equação (5.8), tem-se que:

$$O \{ R/S \} = O \{ R \} \cdot \frac{P \{ S/R \}}{P \{ S/\bar{R} \}} , \quad (5.9)$$

onde $O \{ R/S \}$ é o *odds* condicional (*a posteriori*) de R dado S , $O \{ R \}$ é o *odds a priori* de R e $P\{S/R\} / P\{S/\bar{R}\}$ é conhecido como razão de suficiência ou **sufficiency ratio** (LS). No método de pesos de evidência, calcula-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação Equação (5.9), e o $\log_e LS$ é denominado *peso positivo de evidência* W^+ , o qual é calculado a partir dos dados. Assim:

$$\text{logit} \{ R/S \} = \text{logit} \{ R \} + W^+ . \quad (5.10)$$

Tratamentos algébricos semelhantes levam à derivação de uma expressão de *odds* para a probabilidade condicional de R dada a ausência da evidência S , como sendo:

$$O \{ R/\bar{S} \} = O \{ R \} \cdot \frac{P \{ \bar{S}/R \}}{P \{ \bar{S}/\bar{R} \}} . \quad (5.11)$$

O termo $P\{\bar{S}/R\} / P\{\bar{S}/\bar{R}\}$ é chamado de razão de necessidade ou *necessity ratio* (LN). No método de pesos de evidência, o *peso negativo de evidência* W^- é o logaritmo natural de LN , ou $\log_e LN$. Portanto, na forma de *logit*, a Equação (5.11) se torna:

$$\text{logit } \{R/\bar{S}\} = \text{logit } \{R\} + W^- . \quad (5.12)$$

LS e LN são também denominadas razões de probabilidade ou *likelihood ratios*. Quando evento e evidência são *positivamente correlacionados*, o valor de LS é maior do que 1, ao passo que LN situa-se no intervalo $[0,1]$. Entretanto, se uma evidência é *negativamente correlacionada* com o evento, LN será maior do que 1, e LS se encontrará no intervalo $[0,1]$. Se a evidência é *descorrelacionada* com o evento, então $LS=LN=1$, e a probabilidade *a posteriori* se iguala à *a priori*, e a probabilidade de um evento não se altera pela presença ou ausência de uma dada evidência.

De modo semelhante, W^+ é positivo e W^- , negativo, devido à correlação positiva entre as evidências e os eventos. Inversamente, W^+ seria negativo e W^- , positivo, para os casos em que uma porção muito limitada do evento ocorresse na área da evidência do que seria de se esperar devido ao acaso. Se os eventos independem do fato da evidência estar presente ou não, então $W^+ = W^- = 0$, e as probabilidades *a posteriori* e *a priori* se igualariam, como acima (Bonham-Carter, 1994).

Quando a evidência de vários mapas é combinada, os pesos são calculados para cada mapa independentemente, e então combinados em uma única equação. A probabilidade condicional de um evento ocorrer, dada a presença de duas evidências, S_1 (suprimento de água) e S_2 (suprimento de esgoto) é:

$$P \{R/S_1 \cap S_2\} = \frac{P \{R \cap S_1 \cap S_2\}}{P \{S_1 \cap S_2\}} , \quad (5.13)$$

a qual pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
P \{R/S_1 \cap S_2\} &= \frac{P \{S_1 \cap S_2/R\} \cdot P \{R\}}{P \{S_1 \cap S_2\}} \\
&= \frac{P \{S_1 \cap S_2/R\} \cdot P \{R\}}{P \{S_1 \cap S_2/R\} \cdot P \{R\} + P \{S_1 \cap S_2/\bar{R}\} \cdot P \{\bar{R}\}}. \quad (5.14)
\end{aligned}$$

Este é o teorema de Bayes. Segundo ele, há apenas duas hipóteses mutuamente exclusivas, R e \bar{R} , com $P \{R\} + P \{\bar{R}\} = 1$. Os efeitos da interação entre S_1 e S_2 podem ser ignorados supondo-se a independência condicional entre eles. Isto fornece uma simplificação, pois permite que os efeitos de cada mapa de evidência sejam avaliados individualmente e então combinados pela multiplicação (ou adição no caso log-linear) dos fatores dos vários mapas juntos.

A suposição de independência condicional pode ser expressa como:

$$P \{S_1 \cap S_2/R\} = P \{S_1/R\} \cdot P \{S_2/R\}, \quad (5.15)$$

o que permite que a Equação (5.14) seja simplificada da seguinte forma:

$$P \{R/S_1 \cap S_2\} = P \{R\} \cdot \frac{P \{S_1/R\}}{P \{S_1\}} \cdot \frac{P \{S_2/R\}}{P \{S_2\}}. \quad (5.16)$$

Usando-se a forma de *odds*, o *odds* condicional ou posterior é dado por:

$$O \{R/S_1 \cap S_2\} = O \{R\} \cdot LS_1 \cdot LS_2, \quad (5.17)$$

ou utilizando-se a forma log-linear de pesos de evidência, como:

$$\text{logit } \{R/S_1 \cap S_2\} = \text{logit } \{R\} + W^+_{1} + W^+_{2} . \quad (5.18)$$

Qualquer que seja a formulação usada para o modelo, há quatro modos diferentes de se combinar dois mapas de evidência: a primeira sendo ambas evidências presentes (Equação 5.18); e as outras três maneiras são S_1 presente e S_2 ausente; S_1 ausente e S_2 presente; e S_1 e S_2 ausentes. Na forma log-linear, essas combinações são escritas como:

$$\text{logit } \{R/S_1 \cap \bar{S}_2\} = \text{logit } \{R\} + W^+_{1} + W^-_{2} , \quad (5.19)$$

$$\text{logit } \{R/\bar{S}_1 \cap S_2\} = \text{logit } \{R\} + W^-_{1} + W^+_{2} , \quad (5.20)$$

$$\text{logit } \{R/\bar{S}_1 \cap \bar{S}_2\} = \text{logit } \{R\} + W^-_{1} + W^-_{2} . \quad (5.21)$$

Com três evidências, há 2^3 ou 8 possíveis combinações, e de modo geral, com n mapas, há 2^n possíveis combinações. A expressão geral para se combinar $i = 1, 2, \dots, n$ mapas é tanto:

$$O \{R/S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots S_n\} = O \{R\} \cdot \prod_{i=1}^n LS_i \quad (5.22)$$

para as razões de probabilidade, ou

$$\text{logit } \{R/S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots S_n\} = \text{logit } \{R\} + \sum_{i=1}^n W^+_{i} , \quad (5.23)$$

para os pesos. Nessas formulas genéricas, LS se torna LN , e W^+ converte-se em W^- , se o i -ésimo mapa de evidência for ausente ao invés de presente. Quando houver dados omissos em algumas localizações de um determinado mapa, a razão de probabilidade é ajustada para 1, ou o peso é considerado como sendo 0. As Equações (5.22) e (5.23) apresentam as formulas para se combinar um conjunto de evidências no modelo Bayesiano.

De acordo com Bonham-Carter (1994), as vantagens do modelo Bayesiano são:

- objetividade, que impede a escolha subjetiva de fatores de ponderação;
- a possibilidade de combinação de múltiplos mapas de evidências em um modelo de fácil adaptação a linguagens computacionais;
- a incorporação ao modelo de mapas de entrada com dados incompletos;
- a possibilidade de aplicação de mapas multiclasse, onde cada fatia é tratada como uma evidência presente (ou razão de probabilidade);
- a modelagem de incertezas devido a variações nos pesos e dados incompletos.

E as desvantagens são:

- a combinação de mapas de entrada assume que os mesmos são condicionalmente independentes entre si. O teste para independência condicional só é possível quando o método for aplicado de maneira orientada aos dados, dado que ele requer a tabulação cruzada entre pares de mapas de evidência.
- a limitação da aplicação do modelo aos casos em que a variável resposta (evento) é bem conhecida.

5.2.1.2 Análise Exploratória e Seleção de Variáveis

Dado que o método de pesos de evidência é baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes, conforme já dito, a seleção de variáveis para a análise de modelagem deve considerar a avaliação da independência entre pares de variáveis explicativas selecionadas para explicar o mesmo tipo de transição de uso do solo.

Para este fim, dois métodos foram usados: o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U). Em ambos os casos, é necessário obterem-se valores de áreas de uma tabulação cruzada entre pares de mapas de variáveis sob análise. Chamando-se a tabela de áreas entre os mapas A e B como matriz T , com elementos T_{ij} , onde há $i = 1$,

2, ..., n classes do mapa B (linhas da tabela) e $j = 1, 2, \dots, m$ classes do mapa A (colunas da tabela). Os totais marginais de T são definidos como T_i para a soma da i -ésima linha, T_j para a soma da j -ésima coluna, e $T_{..}$ para o grande somatório de linhas e colunas. Se os dois mapas são independentes um do outro, sem qualquer correlação entre eles, então a área esperada em cada categoria de sobreposição é dada pelo produto entre os totais marginais, dividido pelo somatório total. Portanto, a área esperada T_{ij}^* para a i -ésima linha e j -ésima coluna são:

$$T_{ij}^* = \frac{T_i \cdot T_j}{T_{..}} \quad (5.24)$$

Assim, a estatística **qui-quadrado** é definida como:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{ij}^*} \quad , \quad (5.25)$$

a familiar expressão $(\text{observado} - \text{esperado})^2/\text{esperado}$, que possui um limite inferior de 0 quando as áreas observadas coincidem exatamente com as áreas esperadas, e os dois mapas são completamente independentes. Quando as áreas observadas tornam-se cada vez mais diferentes das esperadas, a qui-quadrado cresce e possui limites superiores variáveis. O Índice de Cramer (V) é então definido por (Bonham-Carter, 1994):

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{T_{..} M}} \quad , \quad (5.26)$$

onde M é o mínimo de $(n-1, m-1)$.

A Incerteza de Informação Conjunta (U) pertence à classe das medidas de **entropia**, também baseadas na matriz de tabulação cruzada T , que podem ser usadas para medir associações. Supondo-se que os valores T_{ij} sejam transformados em proporções de área,

p , dividindo-se cada elemento de área pelo somatório total $T_{..}$. Portanto, $p_{ij} = T_{ij}/T_{..}$, e as proporções marginais são definidas como $p_{i.} = T_{i.}/T_{..}$ e como $p_{.j} = T_{.j}/T_{..}$. Medidas de entropia, ou *estatísticas da informação*, são definidas usando-se as proporções de área como estimativas de probabilidades. Proporções não possuem dimensão, o que faz com que índices de entropia possuam vantagem sobre os de qui-quadrado, por não serem afetados por unidades de medida (Bonham-Carter, 1994).

Assumindo-se que uma matriz de proporções de área para os mapas A e B tenha sido determinada a partir de T , então a *entropia* de A e de B são definidas como:

$$H(A) = - \sum_{j=1}^m p_{.j} \ln p_{.j} \quad e \quad (5.27)$$

$$H(B) = - \sum_{i=1}^n p_{i.} \ln p_{i.} \quad , \quad (5.28)$$

onde \ln é o logaritmo natural. A **entropia conjunta** da combinação, $H(A,B)$, é simplesmente

$$H(A,B) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad . \quad (5.29)$$

Assim, a “**Incerteza de Informação Conjunta**” de A e B, $U(A,B)$, pode ser usada como uma medida de associação e é definida por

$$U(A,B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A,B)}{H(A) + H(B)} \right], \quad (5.30)$$

a qual varia entre 0 e 1. Quando os dois mapas são completamente independentes, então $H(A,B) = H(A) + H(B)$ e $U(A,B)$ é 0, e quando os dois mapas são completamente dependentes, $H(A) = H(B) = H(A,B) = 1$, e $U(A,B)$ é 1.

O critério que é usado nesta pesquisa para se determinar se uma variável é independente ou não de outra é em grande parte arbitrário, já que inexistem um grande número de casos associados com a aplicação destas medidas (Almeida et al. 2003). Onde esta variante particular de modelagem com *logit* foi usada em geociências, Bonham-Carter (1994) reporta que valores inferiores a 0,5 tanto para o Índice de Cramer como para a Incerteza de Informação Conjunta sugerem menos associação do que mais.

Na prática, a rotina de seleção de variáveis também incluiu procedimentos empíricos no SPRING, baseados na visualização de distintas variáveis sobrepostas ao mapa real de uso do solo em formato vetorial, de forma a identificar aquelas mais significativas para explicar os diferentes tipos de mudanças do uso do solo urbano (FIGURA 5.2).

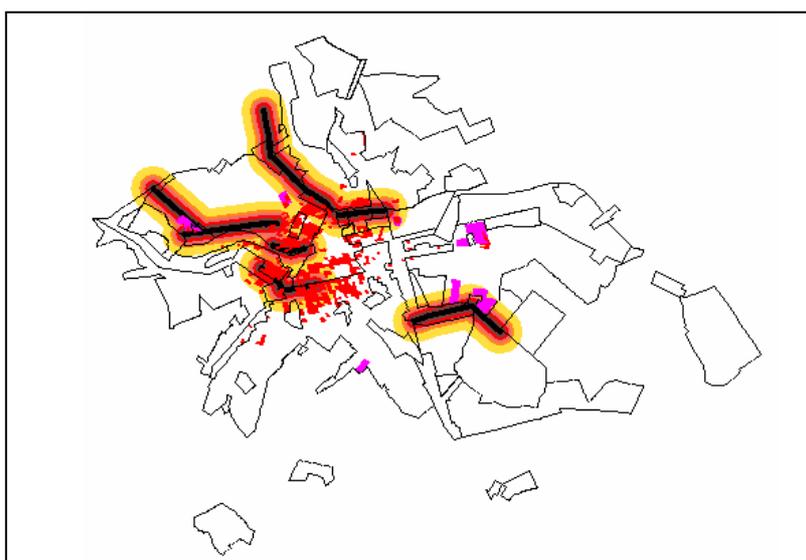


FIGURA 5.2 – Imagem ilustrativa mostrando a análise visual para identificação de variáveis determinantes da transição de uso residencial para uso misto em Bauru de 1979 a 1988. Os fatiamentos referem-se a distâncias a vias planejadas; os polígonos vermelhos são áreas com densidade de ocupação média-alta (40%-70% de área construída por quadra); e os polígonos rosa correspondem a habitação popular.

Nos casos onde elevadas correlações positivas ou negativas são identificadas, dois mapas de evidência podem ser combinados em um através de uma operação Booleana, ou um deles deve ser descartado, preferivelmente aquele que apresentar a menor associação com a variável resposta ou evento (Bonham-Carter, 1994).

Uma medida útil e comumente usada para medir associação espacial entre uma evidência (S) e um dado evento (R) é o contraste C , cuja fórmula é dada por:

$$C = W^+ - W^- . \quad (5.31)$$

Para se determinar se a magnitude do contraste é suficientemente grande para ser estatisticamente significativa, pode-se avaliar a variância do contraste, $S^2(C)$, estimada a partir da expressão (Goodacre et al. 1993):

$$S^2(C) = \frac{I}{P \{S \cap R\}} + \frac{I}{P \{S \cap \bar{R}\}} + \frac{I}{P \{\bar{S} \cap R\}} + \frac{I}{P \{\bar{S} \cap \bar{R}\}} . \quad (5.32)$$

5.2.1.3 Estimativa das Probabilidades Globais de Transição

As probabilidades globais de transição referem-se à quantia total de mudanças para cada tipo de transição do uso do solo em um dado período de simulação. Através de uma série multitemporal suficientemente longa, a cadeia de Markov pode ser utilizada para se estimar o total global de mudanças nos casos em que mapas de uso do solo estejam indisponíveis ou omissos em uma certa fronteira de um determinado período de simulação, desde que haja mapas de uso do solo em pelo menos duas fronteiras precedentes (tempo inicial e final do período de simulação imediatamente anterior). A cadeia de Markov será abordada com profundidade na Seção 5.3.1.

Probabilidades globais de transição, no entanto, foram estimadas nos experimentos de modelagem em relação a instantes presentes e passados, por meio de operações de tabulação cruzada entre os mapas de uso inicial e final de cada período de simulação.

5.2.1.4 Cálculo das Probabilidades Locais de Transição

Conforme exposto na Seção 5.2.1.2, o *logit* da probabilidade condicional (posterior) de ocorrer um certo evento (R) em face de “ n ” evidências (S) é dado por uma fórmula relacionando o *logit a priori* do evento e a soma dos pesos positivos para cada evidência ou classe de evidência (Equação 5.23). Nos experimentos de simulação desta pesquisa, as probabilidades locais de transição são calculadas para cada célula, representada por suas coordenadas x,y , e a equação usada para este fim converte a fórmula de *logit* em uma fórmula de probabilidade condicional (Equação 5.33). O *odds* de R é definido como sendo 1, de forma a elevar o valor final da probabilidade posterior. No denominador, valores de e elevados à soma dos pesos positivos de evidência relacionados a outras transições (t) são incluídos, para se gerar valores mais criteriosos de probabilidades de transição.

$$P_{x,y} \{R/S_1 \cap S_2 \cap \dots S_n\} = \frac{O \{R\} \cdot e^{\sum_{i=1}^n W_{x,y}^+}}{1 + O \{R\} \cdot \sum_{j=1}^t e^{\sum_{i=1}^n W_{x,y}^+}} \quad (5.33)$$

5.2.1.5 Calibração do Modelo

A calibração do modelo visa à seleção do melhor conjunto de variáveis de entrada e parâmetros internos do programa, de forma a produzir o melhor ajuste entre os dados empíricos e a realidade observada. Esta tarefa consiste de dois estágios. Primeiro, uma análise visual comparativa é executada, para cada tipo de mudança de uso do solo, entre as tendências gerais de resultados preliminares de simulação, as dicas fornecidas pelos mapas de transição do uso e de probabilidades de transição, e as informações diretrizes contidas na sobreposição simultânea de diferentes mapas de variáveis explicativas sobre o mapa real de uso do solo em formato vetorial. Esta comparação objetiva separar aquelas variáveis ou evidências que estão efetivamente contribuindo para explicar os respectivos eventos daquelas que constituem apenas ruído para a modelagem.

Um exemplo desta análise visual comparativa é mostrada na FIGURA 5.3 para Bauru em relação à transição “residencial-serviços (res_serv)” de 1979 a 1988. O mapa de probabilidades de transição é visto no canto superior esquerdo; o mapa de transição de uso, no canto superior direito; um resultado preliminar de simulação, no canto inferior esquerdo; o mapa real de uso, no canto inferior direito; e uma sobreposição simultânea dos mapas de rede de água e de distâncias a eixos de serviços sobre as fronteiras do mapa de uso, executado no SPRING, é visto ao centro. A elaboração dos mapas de transição e de probabilidades de transição será detalhada no Capítulo 6.

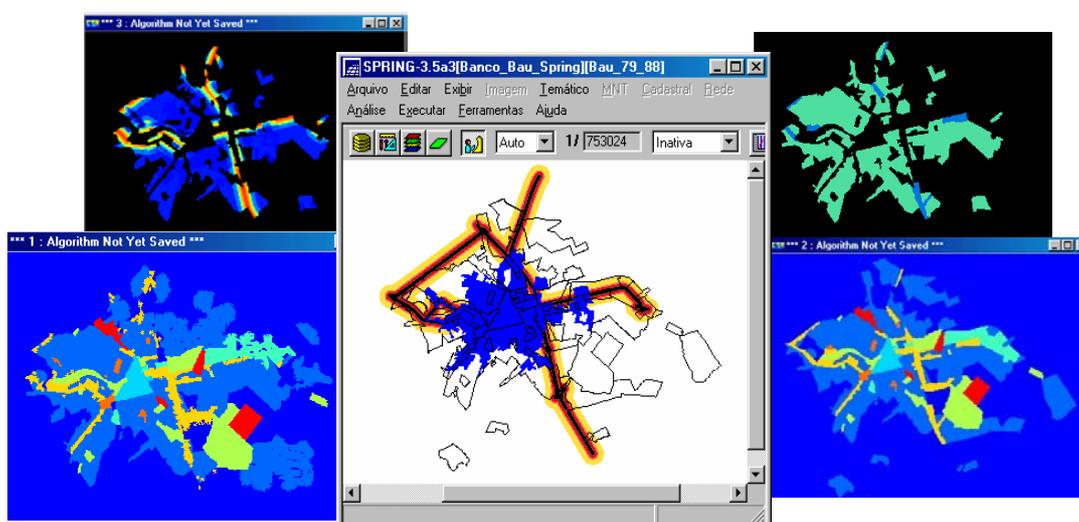


FIGURA 5.3 – Exemplo de análise visual comparativa para a calibração empírica do modelo em relação à transição “residencial-serviços (res_serv)” em Bauru, de 1979 a 1988.

A calibração do modelo, por um outro lado, também é executada através da análise de diagramas de espalhamento relacionando subcategorias de evidências (faixas de distância), com os respectivos pesos positivos de evidência. De modo geral, quando há um bom ajuste de linhas de tendência (que pode assumir diferentes graus e funções), i.e., quando as linhas não demandam modelos complexos para seu ajuste, as evidências associadas a esses pesos são altamente suscetíveis à inclusão no modelo (FIGURA 5.4).

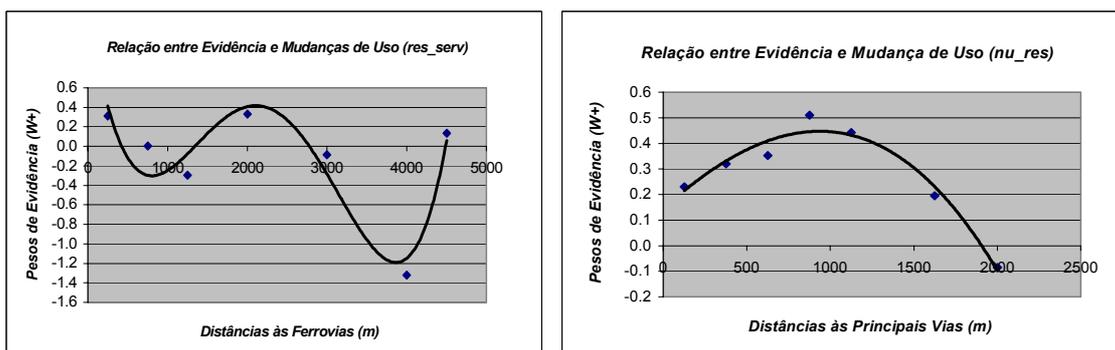


FIGURA 5.4 – Exemplos de diagramas de espalhamento e linhas de tendência: relações entre subcategorias de evidências (*eixo X*) e seus respectivos pesos de evidência (*eixo Y*), considerando diferentes tipos de mudanças de uso do solo.

Os diagramas de espalhamento acima referem-se às transições “residencial-serviços (*res_serv*)” e “não-urbano-serviços (*nu_serv*)” ocorridas na cidade de Bauru durante o período de simulação 1979 – 1988. O diagrama à esquerda mostra um caso de ajuste complexo, e portanto, de provável exclusão da evidência. De modo contrário, o diagrama à direita apresenta um bom ajuste de linha de tendência, o que implica a alta probabilidade de inclusão de tal evidência no modelo de simulação de dinâmicas de uso.

A análise desses diagramas é uma mera ferramenta auxiliar de calibração e não é um critério decisivo para a seleção de variáveis. A decisão final acerca da inclusão ou exclusão de uma dada variável ou evidência sempre dependerá de um amplo julgamento, no qual a importância ambiental da evidência e sua coerência com relação ao fenômeno (mudança de uso) sendo modelado sejam analisadas (Soares-Filho, 1998).

O segundo estágio de calibração concerne o ajuste dos parâmetros internos do programa de simulação: tamanho e variância de manchas, número de iterações, proporções dos algoritmos de transição. Como será detalhado na Seção 5.4, técnicas heurísticas são empregadas para definir estes parâmetros do modelo de simulação com base em uma análise visual comparativa entre resultados preliminares de simulação, o mapa real de uso, o de probabilidades de transição e o de transição de uso, conforme FIGURA 5.3.

5.2.1.6 Teste de Validação Estatística

Testes de validação podem ser entendidos como procedimentos para se verificar se os modelos refletem ou não a realidade no grau desejado (Batty, 1976). Com o fim de se conduzir testes estatísticos de validação espacial para modelos de dinâmicas de uso, Constanza (1989) apresenta um procedimento intitulado “*Método de Resoluções Múltiplas*”, o qual pode ser aplicado a uma variedade de resoluções espaciais através da mudança de tamanho de uma janela de amostragem.

Esta janela de amostragem varre as imagens (FIGURA 5.5), e o ajuste médio entre as duas cenas (real e simulada) para um tamanho de janela em particular é calculado pela seguinte expressão:

$$F_w = \frac{\sum_{s=1}^{t_w} \left[1 - \sum_{i=1}^p \frac{|a_{i1} - a_{i2}|}{2w^2} \right]_s}{t_w}, \quad (5.34)$$

onde F_w é o ajuste para a janela de tamanho $w \times w$; a_{i1} é o número de células pertencentes à classe i na cena 1 (imagem simulada) e a_{i2} é o número de células pertencentes à classe i na cena 2 (imagem real) dentro da janela de amostragem; p refere-se ao número de diferentes classes encontradas na janela de amostragem e t_w , ao número total de janelas amostradas em uma cena para uma janela de tamanho $w \times w$.

Para duas cenas idênticas, um diagrama relacionando F_w e w irá fornecer uma linha reta. Mas, se as cenas apresentam a mesma proporção de classes de uso do solo com diferentes padrões espaciais, esta linha irá gradualmente aumentando até que F_w alcance o valor 1. Quando isto acontecer, a janela de amostragem será idêntica à cena em análise. Entretanto, se um ajuste razoável de padrões espaciais existir, esta curva crescerá rapidamente de forma assintótica.

A qualidade total do ajuste é dada pela equação abaixo:

$$F_t = \frac{\sum_{w=1}^n F_w e^{-k(w-1)}}{\sum_{w=1}^n e^{-k(w-1)}}, \quad (5.35)$$

onde F_t é a média de todas as medidas de ajuste obtidas pelos diferentes tamanhos de janela empregados na análise, F_w é o ajuste para janelas de amostragem de dimensão linear w , e k , uma constante.

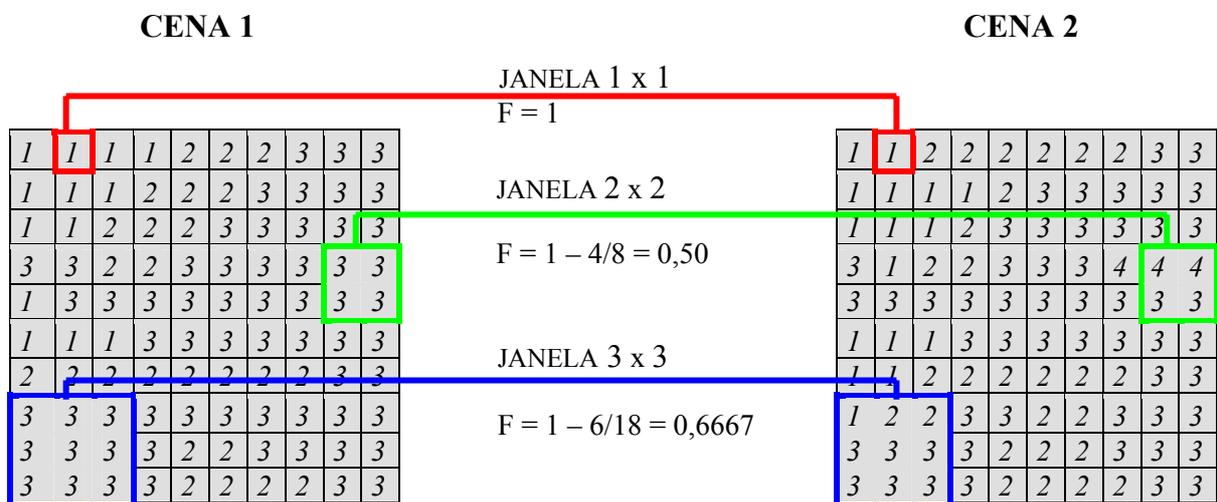


FIGURA 5.5 – Exemplo do método de resoluções múltiplas para uma cena 10 x 10 e com quatro classes. Neste caso, $k = 0,1$ e $F_t = 0,84$.
FONTE: CONSTANZA (1989).

Quando k é zero, todos os tamanhos de janela têm o mesmo peso, ao passo que quando $k=1$, apenas as janelas maiores são importantes. Segundo Constanza (1989), os valores de k podem ser ajustados em função do objetivo do modelo e da qualidade dos dados.

Este método de resoluções múltiplas foi implementado em um programa de plataforma UNIX chamado FIT, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFGM).

Outros modelos estatísticos de validação espacial operando sobre múltiplas resoluções foram propostos por Pontius Jr. (2000, 2002), nos quais a determinação do erro é subdividida em erro de quantificação e erro locacional. Nos seus métodos, a proporção do ajuste é calculada separadamente para áreas que sofreram mudanças de uso e áreas onde não houve transições. Devido ao fato de que o modelo de simulação utilizado nesta pesquisa contém uma rotina algorítmica que impede que as áreas de permanência de uso na realidade sofram mudanças na simulação, os métodos de validação estatística de Pontius não puderam ser aplicados.

5.2.2 O Método de Regressão Logística

5.2.2.1 Introdução ao Método de Regressão Logística

O método de regressão logística é aplicável nos casos onde a variável resposta ou dependente é discreta, assumindo dois ou mais possíveis valores, i.e., a variável possui um caráter qualitativo. Este método foi originalmente concebido para responder às necessidades das ciências biomédicas e de saúde pública, visando à modelagem de variáveis forçantes de patologias de um modo geral.

Um bom exemplo que ilustra uma possível aplicação do método de regressão logística é a incidência de doença coronariana (DC). Uma pesquisa neste sentido foi conduzida por Hosmer e Lemeshow (1989) para um grupo amostral de 100 indivíduos com diferentes idades. Neste exemplo, a variável resposta ou de saída é binária ou dicotômica, i.e., apresenta dois níveis apenas, que são codificados com valor *zero* para indicar a ausência de DC, ou *1* para indicar se a doença está presente no indivíduo. A conversão de um simples diagrama de presença/ausência de DC em um diagrama de proporção dos indivíduos com DC versus o ponto médio de diferentes grupos etários, mostra que a curva resultante possui o formato de um “s” (FIGURA 5.6). Isto consiste na chamada curva de “distribuição logística” ou “função logística”, que apresenta tendências constantes ou estacionárias nos seus extremos e um comportamento intermediário marcadamente linear. É observável que a frequência de ocorrência de DC aumenta com a idade.

Quando o método de regressão logística incorpora mais de dois níveis para a variável de saída, ele é chamado “modelo de regressão logística politômica”. Neste caso, a variável resposta ou de saída pode assumir n valores ($n \in N$), i.e., $Y = 0, 1, 2, \dots, n$.

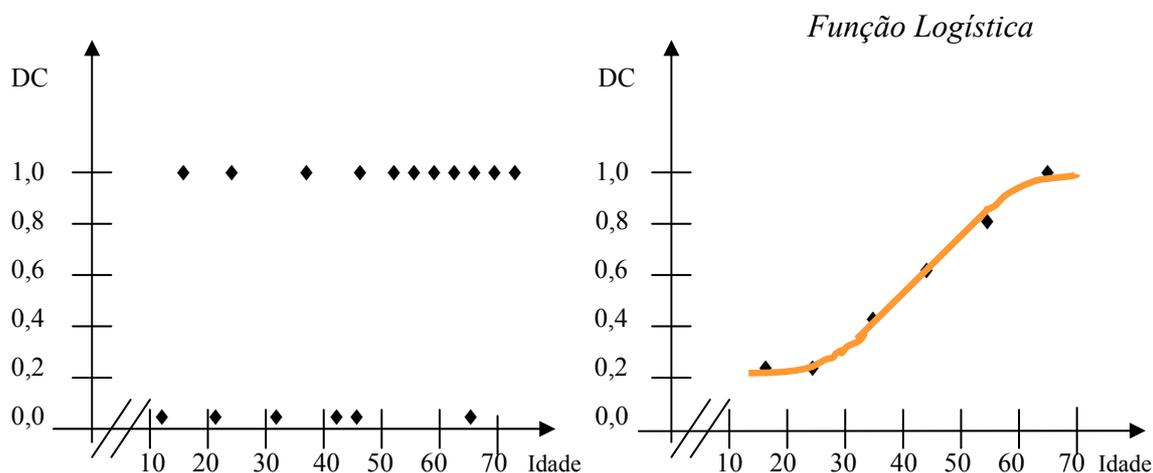


FIGURA 5.6 – Diagrama esquemático mostrando a presença/ausência de doença coronariana (DC) em relação à idade de indivíduos em estudo (esquerda), e a freqüência de incidência de DC versus o ponto médio de grupos etários com intervalos de dez anos .

FONTE: Adaptada de Hosmer e Lemeshow (1989, p. 4, 5).

O modelo de regressão logística binário ($Y=0$ ou $Y=1$) consiste na extração do logaritmo natural da chance ou *odds* em relação aos dois níveis da variável de saída. Conforme já definido na Seção 5.2.1.1, *odds* é a razão entre a probabilidade de que um evento irá ocorrer e a sua probabilidade complementar, i.e., a probabilidade de que ele não irá ocorrer. No caso da regressão binária, *odds* é a razão $P(1)/P(0)$. O logaritmo de *odds* ou *logit* corresponde à regressão linear uni ou multivariada convencional, que é então transposta à função logística. A Equação (5.36) é um exemplo dessa transformação logarítmica para o caso de uma regressão multivariada:

$$L = \log \left[\frac{P_{i,j}(x,y)}{1 - P_{i,j}(x,y)} \right] = \beta_{0,ij} + \beta_{1,ij} \cdot V_{1,xy} + \dots + \beta_{k,ij} \cdot V_{k,xy} , \quad (5.36)$$

$$P_{i,j}(x,y) = \frac{e^L}{1 + e^L}, \quad (5.37)$$

onde i e j representam estados ou classes de uso do solo das células; x,y indicam uma dada célula em função de suas coordenadas; e V refere-se às k variáveis independentes selecionadas para explicar a transição do estado i para o estado j .

O modelo de regressão logística politômica, à sua vez, agrega regressões logísticas binárias parciais, onde o *logit* sempre adota como denominador um dos níveis da variável de saída, que passa então a ser chamada de nível de referência. O nível de referência é determinado pelo modelador e é usualmente um nível cujo comportamento se distingue do comportamento dos demais níveis. O nível de referência também pode ser escolhido em função de vantagens que ele possa oferecer à análise de regressão ao ser comparado com os demais níveis da variável dependente.

Abaixo estão as fórmulas para se calcular a probabilidade de um modelo de regressão logística politômica, no qual a variável dependente assume três níveis (0, 1 e 2), e onde 0 é eleito como o nível de referência. As Equações (5.38) e (5.39) correspondem aos *logits*, e as Equações (5.40), (5.41) e (5.42) apresentam os cálculos de probabilidade propriamente ditos.

$$g_1(x) = \log \left[\frac{P(Y=1 / X_{1-p})}{P(Y=0 / X_{1-p})} \right], \quad g_1(x) = \beta_{10} + \beta_{11} \cdot X_1 + \dots + \beta_{1p} \cdot X_p \quad (5.38)$$

$$g_2(x) = \log \left[\frac{P(Y=2 / X_{1-p})}{P(Y=0 / X_{1-p})} \right], \quad g_2(x) = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot X_1 + \dots + \beta_{2p} \cdot X_p \quad (5.39)$$

$$P (Y=0/X_{1-p}) = \frac{1}{1 + e^{g^1(x)} + e^{g^2(x)}} \quad (5.40)$$

$$P (Y=1/X_{1-p}) = \frac{e^{g^1(x)}}{1 + e^{g^1(x)} + e^{g^2(x)}} \quad (5.41)$$

$$P (Y=2/X_{1-p}) = \frac{e^{g^2(x)}}{1 + e^{g^1(x)} + e^{g^2(x)}} \quad (5.42)$$

O método comumente adotado para a estimativa de parâmetros em modelos de regressão logística é a máxima verossimilhança. De um modo geral, este método fornece valores para os parâmetros desconhecidos (β_i) que maximizam a probabilidade de se obter o conjunto de dados observados (Hosmer e Lemeshow, 1989). Para um modelo de regressão binária, a função de verossimilhança (l) é obtida a partir de:

$$l(\beta) = \prod_{i=1}^n \{ \pi(x_i)^{y_i} [1 - \pi(x_i)]^{1-y_i} \}, \quad (5.43)$$

onde

$$\pi(x_i) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}} \quad (5.44)$$

Uma vez que é matematicamente mais fácil trabalhar-se com o log da Equação (5.43), tem-se que o log da verossimilhança é definido por:

$$L(\beta) = \ln [l(\beta)] = \sum_{i=1}^n \{ y_i \ln[\pi(x_i)] + (1 - y_i) \ln [1 - \pi(x_i)] \} \quad (5.45)$$

Para se encontrar o valor de β que maximize $L(\beta)$, diferencia-se $L(\beta)$ com respeito a β_0 e β_1 e igualam-se as expressões resultantes a zero. Essas equações são as seguintes:

$$\sum_{i=1}^n \left[y_i - \pi(x_i) \right] = 0 \quad (5.46)$$

e

$$\sum_{i=1}^n x_i \left[y_i - \pi(x_i) \right] = 0 \quad (5.47)$$

Para um modelo de regressão logística politômica, onde a variável resposta apresenta três níveis (0, 1 e 2), a função de verossimilhança (l) é obtida a partir de:

$$l(\beta) = \prod_{i=1}^n \left[\pi_0(x_i)^{y_{0i}} \pi_1(x_i)^{y_{1i}} \pi_2(x_i)^{y_{2i}} \right] \quad (5.48)$$

Extraindo-se o log e dado que $\sum y_{ji} = 1$ para cada i , a função de verossimilhança é:

$$L(\beta) = \sum_{i=1}^n y_{1i} g_1(x_i) + y_{2i} g_2(x_i) - \ln(1 + e^{g_1(x_i)} + e^{g_2(x_i)}) \quad (5.49)$$

As equações de verossimilhança são obtidas extraindo-se a primeira derivada parcial de $L(\beta)$ com relação a cada um dos 2 ($p + 1$) parâmetros desconhecidos. Para se simplificar a notação, faz-se $\pi_{ji} = \pi_j(x_i)$. A forma geral dessas equações é a seguinte:

$$\frac{\partial L(\beta)}{\partial \beta_{jk}} = \sum_{i=1}^n x_{ki} (y_{ji} - \pi_{ji}), \quad (5.50)$$

para $j = 1, 2$ e $k = 0, 1, 2, \dots, p$; onde $x_{0i} = 1$ para cada observação. O estimador de máxima verossimilhança, $\hat{\beta}$, é obtido igualando-se essas equações a zero e resolvendo-

as em β . Em ambos os modelos de regressão logística, binário e politômico, a solução das equações de verossimilhança requer métodos iterativos, usualmente disponíveis em pacotes estatísticos.

O objetivo de qualquer modelo estatístico de regressão é selecionar o mínimo, e ao mesmo tempo, o melhor conjunto de variáveis de entrada para explicar um certo fenômeno (Neter e Wasserman, 1974). Em outras palavras, e meta é extrair o conjunto mais parsimonioso de variáveis independentes para integrar o modelo final de regressão. Com este propósito, o método “backward stepwise” foi adotado para a seleção do conjunto final de variáveis independentes. O modelo inicial incluiu todas as variáveis e excluiu a variável menos significante a cada passo. A significância foi avaliada com base no teste qui-quadrado de Wald e na estatística G. O teste de Wald é obtido pela comparação entre o parâmetro estimado de máxima verossimilhança, $\hat{\beta}_i$, e o seu erro padrão estimado. A estatística G, por sua vez, avalia o modelo com uma certa variável incluída em relação ao modelo sem essa mesma variável (Hosmer e Lemeshow, 1989). As fórmulas para estes testes de significância são dadas abaixo:

$$W = \frac{\hat{\beta}_i}{(SE) \hat{\beta}_i} \quad (5.51)$$

e

$$G = -2 \{L(\beta) - [n_1 \ln(n_1) + n_0 \ln(n_0) - n \ln(n)]\} \quad , \quad (5.52)$$

onde

$$n_1 = \sum y_i \quad , \quad n_0 = \sum 1 - y_i \quad e \quad n = n_1 + n_0$$

O modelo é aceito quando todas as variáveis independentes são significantes no nível 0,05 e a perda da estatística G permanece inferior a 5% (Soares-Filho et al. 2001).

Uma das primeiras questões levantadas na condução de experimentos de modelagem baseados em regressão logística concerne a forma pela qual a variável resposta deve ser modelada. No caso de um modelo politômico, as permanências de uso do solo seriam consideradas como o nível de referência (e seriam designadas com o valor 0), e as diferentes transições de uso do solo assumiriam valores naturais, variando de 1 a n , em face dos n tipos de transições observadas no período de simulação em estudo.

Uma segunda alternativa seria a adoção de modelos politômicos parciais, onde transições possuindo estados de origem idênticos seriam tratadas no mesmo modelo. Desta forma, um período de simulação apresentaria diferentes modelos politômicos. Por exemplo, transições como 'não-urbano para residencial' e 'não-urbano para industrial' responderiam como diferentes níveis da variável de saída em um dos modelos, ao passo que a permanência de áreas urbanas enquanto tal corresponderia ao nível de referência desta mesma variável. Em um outro modelo referente ao mesmo período de simulação, transições como 'residencial para serviços' e 'residencial para uso misto' representariam os níveis 1 e 2 da variável resposta, enquanto que a permanência do uso residencial seria considerada como o nível de referência, e assim por diante.

Uma terceira e última solução concerne o emprego de modelos binários para cada tipo de transição do uso do solo observada em um período de simulação. De acordo com este procedimento, o valor 1 é atribuído à transição considerada, e o valor 0 , à respectiva permanência de uso.

Na presente pesquisa, o modelo de regressão logística foi experimentalmente empregado para a cidade de Bauru apenas no período de simulação de 1979 a 1988. Aplicar este modelo a todos os períodos de simulação de ambas cidades seria uma tarefa demasiado extensa, e desnecessária para o propósito de análise comparativa com o método de pesos de evidência. A modelagem binária foi adotada devido ao fato de que, em cada caso, apenas as variáveis independentes selecionadas para explicar as respectivas transições são consideradas. Como conseqüência, o aporte de ruído é evitado pelo fato de que as variáveis designadas para explicar outras transições são excluídas do modelo. Além disso, a modelagem binária concorda com a lógica

algorítmica do modelo de simulação, no qual cada transição de uso do solo tem os seus parâmetros de calibração individualmente ajustados.

É válido lembrar que a regressão logística pertence à categoria de modelos lineares generalizados – GLM ou “Generalized Linear Models” (McCullagh e Nelder, 1989). Nesses modelos, há um parâmetro natural a ser estimado, para o qual a convergência assintótica de estimadores é muito rápida. Este parâmetro natural $[g(x)]$ é expresso como uma função linear de variáveis independentes. Portanto, a regressão logística é considerada um método robusto, uma vez que ela opera sobre regressões lineares.

5.2.2.2 Análise Exploratória e Seleção de Variáveis

No modelo de regressão logística assim como nos métodos de regressão linear de maneira geral, a seleção de variáveis independentes é baseada na análise de índices de correlação entre cada uma delas e a variável de saída, bem como na correlação entre pares de variáveis independentes.

Uma medida útil para se avaliar colinearidade é a matriz de correlação, que fornece informação básica sobre os dados de entrada do modelo, indicando o grau de associação entre duas variáveis independentes e entre uma variável independente e a variável de saída. O índice de correlação é obtido a partir do conceito de covariância ($A_{A,B}$), que mede a média total da soma dos produtos entre desvios de variáveis pertencentes a dois conjuntos de dados numéricos distintos (A,B) em relação às suas respectivas médias:

$$\Delta_{A,B} = 1/N \sum_{i=1}^N (x_A(i) - \bar{x}_A(i)) (x_B(i) - \bar{x}_B(i)) \quad . \quad (5.53)$$

O índice de correlação ($\alpha_{A,B}$), por sua vez, indica associação entre dois conjuntos de dados numéricos com base em uma escala absoluta. Em suma, ele normaliza a covariância dentro do intervalo $[-1, +1]$, onde valores próximos ou iguais a -1 indicam correlação negativa, e valores próximos ou iguais a $+1$, denotam correlação positiva. Este índice é calculado dividindo-se a covariância pela raiz quadrada do produto entre as variâncias dos dois conjuntos de dados:

$$\alpha'_{A,B} = \frac{\Delta_{A,B}}{\sqrt{\sigma_A^2 \cdot \sigma_B^2}} \quad (5.54)$$

Um outro aspecto importante na análise exploratória refere-se à existência de interação e confusão. A interação ocorre quando duas variáveis independentes, que não apresentam correlação entre si, juntas contribuem para realçar a variável de saída. Gráficamente, a ausência de interação fornece um modelo com duas linhas paralelas, uma para cada variável independente. De modo semelhante, a presença de interação entre duas variáveis independentes é identificada por duas linhas não-paralelas. A FIGURA 5.7 apresenta um gráfico ilustrativo de uma variável independente relacionada a distância no eixo X , versus os *logits* de outras variáveis independentes (l_1 , l_2 e l_3).

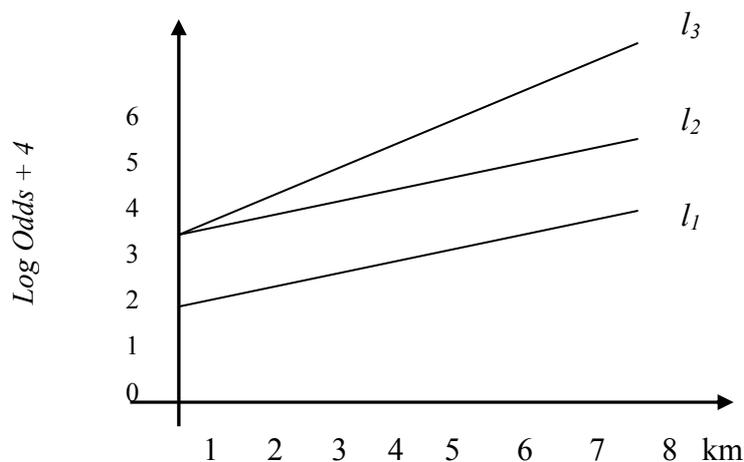


FIGURA 5.7 – Gráfico ilustrativo de *logits* para três modelos diferentes mostrando a presença (l_1 - l_3) e ausência (l_1 - l_2) de interação.

FONTE: Adaptada de Hosmer e Lemeshow (1989, p. 65).

O termo confusão é usado para descrever uma variável independente que é associada tanto com a variável de saída quanto com outra variável independente. Exceto nos casos em que a variável de confusão e a variável independente a ela associada sejam ambas decisivas para explicar a variável resposta, uma delas deve ser descartada do modelo.

A maneira certa para se lidar com o termo de interação é a inclusão das duas variáveis independentes, contanto que pelo menos uma seja significativa para integrar o modelo, e também o produto entre essas variáveis. E para os casos em que a variável de confusão e a independente a ela associada não possam ser excluídas do modelo, um produto entre esses dois termos deve ser da mesma forma incluído.

5.2.2.3 Estimativa das Probabilidades Globais de Transição

Da mesma forma que no método de pesos de evidência, a cadeia Markoviana pode ser empregada para estimar a quantidade global de mudanças quando os dados sobre uso do solo em uma certa fronteira de um período de simulação forem ausentes, contanto que dados sobre uso do solo em pelo menos duas fronteiras precedentes (tempo inicial e final do período de simulação anterior) estejam disponíveis.

Probabilidades globais de transição são estimadas nos experimentos de modelagem, em relação a instantes presentes e passados, por meio de operações de tabulação cruzada entre os mapas de uso inicial e final de cada período de simulação.

5.2.2.4 Cálculo das Probabilidades Locais de Transição

De acordo com as Equações (5.36) e (5.37) expostas na Seção 5.2.2.1, a fórmula para se estimar a probabilidade de transição do uso do solo de uma dada célula leva em consideração a função logística e apresenta o modelo de regressão linear como o expoente do termo “ e ”.

Embora o modelo binário tenha sido adotado para a estimativa dos parâmetros de regressão nas simulações do presente trabalho, a fórmula empregada para o cálculo das probabilidades de transição das células (Equação 5.55) é muito semelhante à fórmula do modelo de regressão logística politômica, pois ele insere no denominador valores de e elevado a modelos de regressão linear referentes a outras transições de uso do solo (t). Este artefato matemático ajuda a prevenir o empate entre os vários valores de probabilidades das células, produzindo ao mesmo tempo valores mais criteriosos para essas probabilidades de transição.

$$P_{i,j}(x,y) = \frac{e^{\beta_0 + \gamma_{i,j} \cdot V_{(x,y)}}}{1 + \sum_{i=1}^t e^{\beta_0 + \gamma_{i,j} \cdot V_{(x,y)}}}, \quad (5.55)$$

onde t refere-se a outras transições que não i,j , como i,k ; i,l ; k,l ; etc.; $\gamma_{i,j}$ é um vetor de parâmetros: $\gamma_{i,j} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$; e $V_{(x,y)}$ um vetor de variáveis independentes:

$$V_{(x,y)} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix}.$$

5.2.2.5 Calibração do Modelo

De acordo com o que foi apresentado na Seção 5.2.2.1, os testes de significância de qui-quadrado de Wald e da estatística G correspondem a uma espécie de calibração do modelo, pois eles contribuem para definir se uma variável independente permanece ou é excluída do modelo de regressão logística final.

Outros recursos para se definir sobre a manutenção ou alteração do conjunto de variáveis selecionadas são os testes de qualidade do ajuste (“goodness-of-fit”) utilizados em modelos logísticos e usualmente disponíveis em pacotes estatísticos, tais como os testes de qui-quadrado de Pearson, de desvio (“deviance”) e de Hosmer-Lemeshow.

A qualidade do ajuste é avaliada com base no conjunto de parâmetros ajustados determinados pelas variáveis independentes que integram o modelo, e não no conjunto total dessas variáveis. Por exemplo, supondo-se que um dado modelo ajustado contém p variáveis independentes, $x' = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$, e J denota o número de distintos valores de x observados. Se algumas observações possuem o mesmo valor para x , então $J < n$. O número de observações com $x = x_j$ será indicado por m_j , $j = 1, 2, 3, \dots, J$. Daí segue

que $\sum m_j = n$. Sendo y_i o número de respostas positivas, $y = 1$, entre as m_j observações com $x = x_j$. Segue que $\sum y_j = n_1$, o número total de observações com $y = 1$. A distribuição dos testes de qualidade do ajuste é obtida deixando-se n grande. Se o número de padrões de variáveis independentes também crescer com n , então cada valor de m_j tenderá a ser pequeno. Resultados de distribuição obtidos sob a condição de que apenas n é grande são chamados *n-assintóticos*. Se $J < n$ é fixo e tornando n grande, então cada valor de m_j também tenderá a tornar-se grande. Resultados de distribuição em que cada m_j é grande são denominados *m-assintóticos* (Hosmer e Lemeshow, 1989).

Os valores ajustados na regressão logística são calculados para cada padrão de variável independente e dependem da probabilidade estimada para cada padrão. Sendo \hat{y}_j o valor ajustado, tem-se que:

$$m_j \hat{\pi}_j = m_j (\exp [\hat{g}(x_j)] / \{1 - \exp [\hat{g}(x_j)]\}), \quad (5.56)$$

onde $\hat{g}(x_j)$ é o *logit* estimado. Duas medidas da diferença entre os valores observados e os ajustados, os resíduos de Pearson e do desvio (“deviance”), serão considerados. O resíduo de Pearson é definido da seguinte forma:

$$r(y_j, \hat{\pi}_j) = \frac{(y_j - m_j \hat{\pi}_j)}{\sqrt{m_j \hat{\pi}_j (1 - \hat{\pi}_j)}}. \quad (5.57)$$

A estatística resumida baseada nesse resíduo é a estatística qui-quadrado de Pearson:

$$X^2 = \sum_{j=1}^J r(y_j, \hat{\pi}_j)^2. \quad (5.58)$$

O resíduo do desvio (“deviance”) é dado por:

$$d(y_j, \hat{\pi}_j) = \pm \left\{ 2 \left[y_j \ln \left(\frac{y_j}{m_j \hat{\pi}_j} \right) + (m_j - y_j) \ln \left(\frac{(m_j - y_j)}{m_j (1 - \hat{\pi}_j)} \right) \right] \right\}^{1/2}, \quad (5.59)$$

onde o sinal é o mesmo que o sinal de $(y_j - m_j \hat{\pi}_j)$. Para padrões de variáveis independentes com $y_j = 0$, o resíduo do desvio é:

$$d(y_j, \hat{\pi}_j) = - \sqrt{2m_j \left| \ln(1 - \hat{\pi}_j) \right|}. \quad (5.60)$$

e o resíduo do desvio quando $y_j = m_j$, é:

$$d(y_j, \hat{\pi}_j) = - \sqrt{2m_j \left| \ln(\hat{\pi}_j) \right|}. \quad (5.61)$$

A estatística resumida baseada nesse resíduo é o desvio (“deviance”):

$$D = \sum_{j=1}^J d(y_j, \hat{\pi}_j)^2. \quad (5.62)$$

A estatística de ajuste Hosmer-Lemeshow, \hat{C} , é obtida calculando-se a estatística qui-quadrado de Pearson a partir da tabela $2 \times g$ de frequências esperadas observadas e estimadas. A fórmula que define o cálculo de \hat{C} é a seguinte:

$$\hat{C} = \sum_{k=1}^g \frac{(o_k - n_k \bar{\pi}_k)^2}{n_k \bar{\pi}_k (1 - \bar{\pi}_k)}, \quad (5.63)$$

onde n_k' é o número total de observações no k -ésimo grupo,

$$o_k = \sum_{j=1}^{c_k} y_j, \quad (5.64)$$

é o número de respostas entre os c_k padrões de variáveis independentes (covariáveis), e

$$\bar{\pi}_k = \sum_{j=1}^{c_k} \frac{m_j \hat{\pi}_j}{n'_k}, \quad (5.65)$$

é a probabilidade média estimada e c_k denota o número de padrões de variáveis independentes ou covariáveis no k -ésimo decil.

Os resultados fornecidos pelos testes estatísticos acima expostos devem ser usados de maneira sábia e crítica. Os procedimentos estatísticos apresentados na Seção 5.2.1.5 também deve ser usados no caso de modelagem por regressão logística, dado que a análise visual é decisiva para a identificação de erros e acertos na calibração do modelo.

Não apenas testes de qualidade do ajuste como também testes de significância estatística (W e G) devem ser vistos como critérios não-exclusivos para a inserção ou retirada de variáveis independentes no método de regressão logística. De acordo com Hosmer e Lemeshow (1989, p.32), "... não se pode basear modelos inteiramente em testes de significância estatística ... há inúmeras outras considerações que irão influenciar a decisão para se incluir ou excluir variáveis de um modelo."

5.2.2.6 Teste de Validação Estatística

Em algumas situações, é possível separar-se uma subamostra de observações, desenvolver-se um modelo com os dados remanescentes, e então testar-se o modelo com as observações inicialmente excluídas. Em outras situações, é possível obter-se um novo conjunto amostral de dados para se determinar a qualidade do ajuste de um modelo desenvolvido previamente.

Modelos ajustados sempre se comportam de uma maneira otimista em relação ao conjunto de dados amostrais. Isto explica porque é preferível aplicarem-se testes quando o modelo ajustado é teoricamente conhecido, mas nenhuma estimativa tenha sido conduzida ainda (Hosmer e Lemeshow, 1989).

No caso particular dos experimentos executados nesta pesquisa, este tipo de teste de validação não é eficaz. A razão para isto pode ser atribuída ao fato de que esta pesquisa lida com experimentos de simulação espacial, e testes de validação têm que necessariamente considerar a dimensão espacial dos resultados da modelagem. Assim sendo, apenas o método de resoluções múltiplas proposto por Constanza (1989), apresentado na Seção 5.2.1.6, foi aplicado aos resultados da modelagem por regressão logística para fins de validação.

5.3 Métodos de Prognóstico

5.3.1 A Cadeia de Markov e a Matriz de Probabilidades Futuras de Transição

A cadeia de Markov é um modelo matemático que descreve um certo tipo de processo que se move em uma seqüência de passos e através de um conjunto de estados (JRC e ESA, 1994). O modelo de Markov é expresso em notação matricial como (Baker, 1989):

$$\prod(t + 1) = P^n \cdot \prod(t), \quad (5.66)$$

onde $\prod(t)$ é um vetor coluna, com k elementos, representando a fração de terra em cada um dos s estados no tempo t , n é o número de passos de tempo entre (t) e $(t+1)$. Se n corresponde a seis meses, então n seria 2 na fórmula acima, considerando-se que a adição de tempo corresponderia a 1 ano. $\prod(t+1)$ é um vetor coluna mostrando a fração de ocupação dos s estados no tempo $t+1$, e P^n é a matriz cujos elementos são probabilidades de transição P_{ij} , representando a probabilidade de uma certa célula para mudar do estado i para o estado j durante o intervalo de tempo $t \rightarrow t+1$.

A atratividade da cadeia de Markov reside no fato de que os parâmetros do modelo são facilmente estimados. As probabilidades de transição podem ser estimadas

estatisticamente a partir de uma amostra de transições ocorridas durante algum intervalo de tempo. Dado que a_{ij} indica transições entre pares de estados em algum intervalo de tempo, as probabilidades de transição P_{ij} são estimadas por (JRC e ESA, 1994):

$$P_{ij} = a_{ij} / \sum_j a_{ij} . \quad (5.67)$$

Dessa forma, a cadeia de Markov apenas requer o estabelecimento de um número finito de estados e que as probabilidades de transição sejam conhecidas. Apesar da sua relativa simplicidade, várias limitações e suposições estão associadas com o emprego de modelos Markovianos para se simular mudanças de uso do solo.

Uma importante limitação da cadeia de Markov reside na suposição de que a probabilidade de um conjunto particular de saídas depende unicamente da distribuição atual entre os estados e das probabilidades de transição – i.e., a cadeia de Markov é um processo de primeira ordem. Entretanto, de acordo com JRC e ESA (1994), também é possível definirem-se cadeias cuja relação de dependência envolva mais de um estado precedente. Uma cadeia de dupla dependência, por exemplo, é dependente de dois estados precedentes. Se esses dois estados forem os dois imediatamente precedentes, a cadeia é de segunda ordem. No entanto, neste caso, a projeção de um comportamento futuro seria muito mais difícil (Bell e Hinojosa, 1977).

Uma outra suposição, que nem sempre é adequada do ponto de vista do conhecimento empírico de fenômenos de mudança de uso, é a estacionariedade da matriz de transição ou homogeneidade temporal (JRC e ESA, 1994). Se isto se confirmar, então consecutivas iterações entre o vetor coluna de estados e a matriz de transição n vezes resultaria em um vetor representando os estados do sistema no tempo $(t+n)$. Se este vetor convergir em direção a uma distribuição de probabilidades limite entre os possíveis estados do sistema independentemente da sua condição inicial, então a cadeia de Markov é dita estacionária ou ergódica (Facelli e Steward, 1990).

Portanto, uma cadeia de Markov é ergódica se ela apresenta um número finito de estados, sua dinâmica é não-periódica e ela não possui estados absorventes (quando

$P_{ij}=1$). Neste caso, é possível calcular-se o estado do sistema em um equilíbrio hipotético futuro. De acordo com Bell e Hinojosa (1977), isto pode ser obtido pelo método de principais componentes:

$$P = H V H^{-1} , \quad (5.68)$$

onde H é a matriz de autovetores, H^{-1} é a matriz transposta de autovetores, e V é a matriz de autovalores.

Assim sendo, P pode ser decomposta em:

$$P^n = H V^n H^{-1} , \quad (5.69)$$

onde n é o número de passos de tempo. Quando o primeiro autovalor é igual a 1 e os outros menores que 1 , para $n \rightarrow \infty$, obtém-se:

$$P^\infty = H \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} H^{-1} , \quad (5.70)$$

cujo resultado corresponde à proporção do equilíbrio entre os estados do sistema. Conforme afirmam Facelli e Steward (1990), a razão entre o primeiro autovetor e o segundo autovalor ainda poderia ser usada para prever o tempo no qual o sistema alcançará o equilíbrio.

De acordo com Baker (1989), a não-estacionariedade sozinha não impede o uso da cadeia de Markov, uma vez que “mesmo se as transições forem não-estacionárias na realidade, a estacionariedade pode ser assumida como um dispositivo heurístico.”

Cadeias de Markov podem ser ajustadas para incorporar efeitos de mais alta ordem, como a influência de variáveis endógenas e exógenas, efeitos espaciais e heterogeneidade. A contribuição de variáveis endógenas e exógenas para as transições

de uso do solo, estacionárias ou não-estacionárias, pode ser modelada usando-se a seguinte abordagem, na qual a Equação (5.66) é modificada para (Baker, 1989):

$$\vec{P}(t + 1) = P [f(t)] \cdot \vec{P}(t) , \quad (5.71)$$

onde P é uma matriz com elementos P_{ij} , com $P_{ij} = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$ e $b_1\dots b_n$ são os parâmetros que relacionam P_{ij} às variáveis X_1, X_2, \dots, X_n . Seguindo essa linha de pensamento, X_1, \dots, X_n podem representar variáveis endógenas e exógenas. No caso da modelagem de mudanças do uso do solo urbano, variáveis endógenas correspondem à disponibilidade de infra e super-estrutura, tipos de densidade ocupacional, relevo, zoneamento, etc., enquanto que variáveis exógenas referem-se a rupturas nas tendências econômicas gerais (crises financeiras ou econômicas, déficits energéticos, etc.); distúrbios climáticos que afetem as atividades agrícolas ou turísticas; políticas locais ou regionais que impactem o desempenho esperado dos diferentes setores econômicos, etc.

Em conclusão, é importante aqui reiterar que a cadeia de Markov é adequada para a geração de prognósticos de mudanças de uso do solo urbano. Ela também pode ser usada para se estimar a quantia global de mudança quando dados sobre o uso do solo urbano em uma dada fronteira de um período de simulação forem ausentes, posto que dados sobre o uso do solo em pelo menos duas fronteiras precedentes estejam disponíveis (tempo inicial e final do período de simulação anterior).

O método de principais componentes aplicado ao modelo Markoviano é útil para permitir a decomposição das probabilidades da matriz de transição, as quais são então estimadas para intervalos de tempo menores, p.ex. passos de um ano ou menos. Isto foi usado nas simulações para se gerar mapas de uso do solo anuais ao longo de todas as séries multitemporais de ambas cidades em estudo.

E finalmente, possíveis formas para se superar a estacionariedade da cadeia Markoviana, conforme proposto por Baker (1989), serão abordadas na próxima seção.

5.3.2. Modelos de Regressão Linear para a Parametrização de Probabilidades Futuras de Transição do Uso do Solo

5.3.2.1 Introdução aos Modelos de Regressão Linear

A análise de regressão é uma ferramenta estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis quantitativas, de modo que uma variável possa ser prevista a partir de outra, no caso de modelos univariados, ou a partir de outras, no caso de modelos multivariados (Neter e Wasserman, 1974).

Uma relação estatística, de forma diferenciada de uma relação funcional, não chega a ser perfeita. De maneira geral, as observações de uma relação estatística não caem diretamente sobre a curva de relacionamento (FIGURA 5.8).

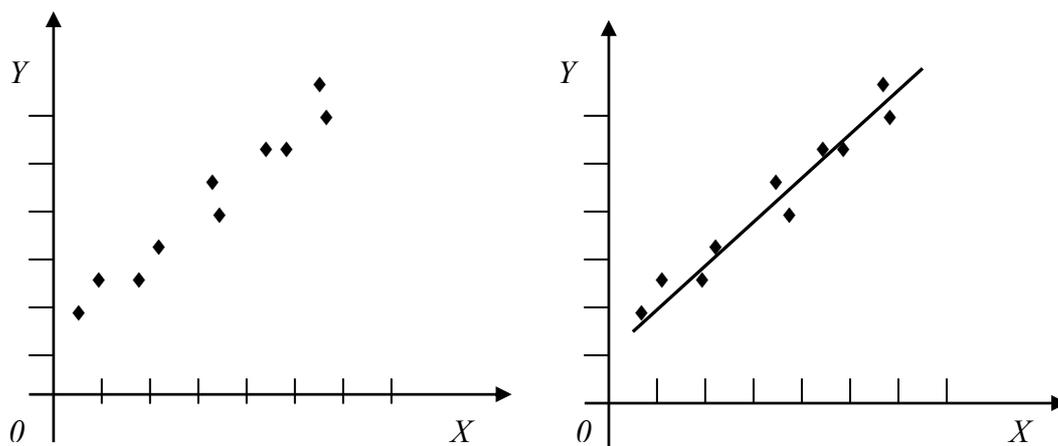


FIGURA 5.8 – Gráficos ilustrativos de relações estatísticas sem e com um modelo de regressão linear ajustado.

FONTE: Adaptada de Neter e Wasserman (1974, p. 24).

Nos modelos multivariados, é possível que o relacionamento entre uma ou mais variáveis independentes (X_i) e a variável resposta (Y) não seja linear. Quando isto

acontece, esses relacionamentos são linearizados através de transformações matemáticas de modo a ajustá-los ao modelo de regressão.

O modelo de regressão linear no caso multivariado é obtido a partir da equação geral:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad , \quad (5.72)$$

onde Y_i é a resposta obtida na i -ésima observação; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ são parâmetros para serem estimados; $X_{i1}, \dots, X_{i,p-1}$ são variáveis conhecidas; ε_i são erros independentes com distribuição normal, com média igual a zero e variância constante – $N(0, \sigma^2)$; i são as observações, $i = 1, 2, \dots, n$.

A função resposta do modelo, que é a média de várias observações, é dada por:

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_{p-1} X_{p-1} \quad . \quad (5.73)$$

O parâmetro β_0 refere-se ao intercepto do plano de regressão. Se nenhuma das variáveis independentes pode assumir valor zero, β_0 perde o seu significado. Contudo, muitos estatísticos preferem incluí-lo no modelo final por razões de ajuste matemático.

O parâmetro β_1 corresponde à alteração média na variável de saída $E(Y)$ para cada unidade de incremento no valor de X_1 , mantendo-se todas as outras variáveis independentes constantes, e assim por diante para os parâmetros remanescentes associados com as variáveis explicativas.

5.3.2.2 Análise Exploratória

Um dos primeiros passos para se conduzir uma análise de regressão linear é a verificação de independência entre as observações obtidas para a variável resposta ou de saída (Y_i). Isto é feito por meio de um teste intitulado função de autocorrelação (“Autocorrelation Function” - ACF), a qual checa as correlações em uma série temporal através de intervalos dela mesma. Autocorrelações são calculadas para $1, 2, \dots, n$ intervalos determinados. A ACF pode ser executada de maneira parcial, quando ela

correlaciona os valores de uma série com os valores obtidos para intervalos de l ou mais casos, após a remoção dos efeitos de correlação nos intervalos considerados.

De acordo com Wei (1990), para um processo estacionário $\{Z_t\}$, a média é $E(Z_t) = \mu$ e a variância $Var(Z_t) = E(Z_t - \mu)^2 = \sigma^2$, que são constantes, e as covariâncias $Cov(Z_t, Z_s)$ são funções apenas da diferença de tempo $|t - s|$. Assim, neste caso, a covariância entre Z_t e Z_{t+k} é dada por:

$$\gamma_k = Cov(Z_t, Z_{t+k}) = E(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu) \quad (5.74)$$

e a correlação entre Z_t e Z_{t+k} por:

$$\rho_k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{Var(Z_t)} \sqrt{Var(Z_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (5.75)$$

onde se nota que $Var(Z_t) = Var(Z_{t+k})$. Como funções de k , γ_k é chamada de função de autocovariância e ρ_k é chamada de função de autocorrelação (ACF) em análises de séries temporais, uma vez que elas representam a covariância e correlação entre Z_t e Z_{t+k} do mesmo processo, separadas apenas por k intervalos de tempo.

Observa-se que para um processo estacionário, a função de autocovariância, γ_k , e a função de autocorrelação, ρ_k , possuem as seguintes propriedades:

- a. $\gamma_0 = Var(Z_t)$; $\rho_0 = 1$;
- b. $|\gamma_k| \leq \gamma_0$; $|\rho_k| \leq 1$;
- c. $\gamma_k = \gamma_{-k}$ e $\rho_k = \rho_{-k}$, para todos k , i.e., γ_k e ρ_k são funções uniformes, e portanto simétricas com relação à origem do tempo, $k = 0$. Isto decorre do fato de que as diferenças de tempo entre Z_t e Z_{t+k} e Z_t e Z_{t-k} são as mesmas.

A função de correlação, não raro, é computada graficamente apenas para os intervalos não-negativos (FIGURA 5.9). Este gráfico é por vezes chamado de correlograma.

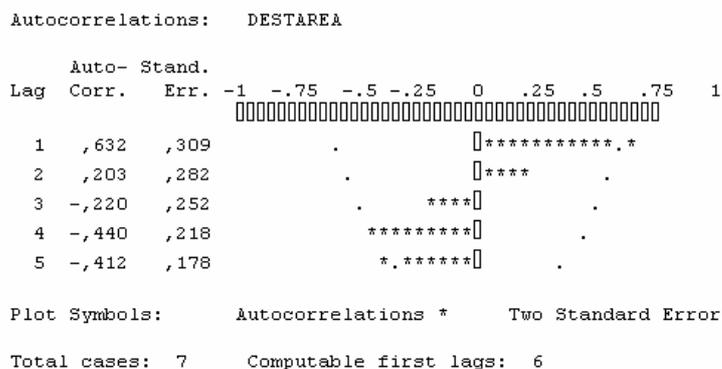


FIGURA 5.9 – Gráfico ilustrativo da função de autocorrelação para a variável resposta: área de destino - uso industrial (destarea) em Bauru para os anos 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995 e 2000.

Outros passos importantes na análise exploratória são as análises de “boxplot”, análises de matriz de correlação e a verificação de interação e confusão. Correlação, interação e confusão assim como abordagens para lidar com esses temas foram anteriormente explicadas na Seção 5.2.2.2.

5.3.2.3 Estimadores de Mínimos Quadrados

Em termos matriciais, o modelo geral de regressão linear (Equação 5.72) é:

$$Y_{n \times 1} = X_{n \times p} \beta_{p \times 1} + \varepsilon_{n \times 1}, \tag{5.76}$$

onde Y é um vetor de observações, β é um vetor de parâmetros, X é uma matriz de constantes, ε é um vetor de variáveis independentes aleatórias com distribuição normal, média $E(\varepsilon) = 0$ e matriz de variância-covariância $\sigma^2(\varepsilon) = \sigma^2 I$.

Conseqüentemente, o vetor aleatório Y tem média:

$$E(Y) = X\beta \quad (5.77)$$

e a matriz de variância-covariância de Y é:

$$\sigma^2(Y) = \sigma^2 I \quad (5.78)$$

O vetor de coeficientes de regressão estimados b_0, b_1, \dots, b_{p-1} pode ser indicado por b :

$$b_{p \times 1} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{p-1} \end{bmatrix} \quad (5.79)$$

As equações de mínimos quadrados para o modelo geral de regressão linear são:

$$(X'X)_{p \times p} b_{p \times 1} = X'Y_{p \times n \quad n \times 1} \quad (5.80)$$

e os estimadores mínimos são:

$$b_{p \times 1} = (X'X)^{-1}_{p \times p} X'Y_{p \times 1} \quad (5.81)$$

Os estimadores de mínimos quadrados são também estimadores de máxima verossimilhança e possuem as propriedades de serem estimadores não tendenciosos de variância mínima, consistentes e suficientes (Neter e Wasserman, 1974).

5.3.2.4 Análise de Variância

Fazendo-se com que o vetor de valores ajustados \hat{Y}_i seja denotado por \hat{Y} , e o vetor de termos residuais $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ por e , tem-se que:

$$\hat{Y}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_1 \\ \hat{Y}_2 \\ \cdot \\ \hat{Y}_n \end{bmatrix}, \quad (5.82)$$

$$e_{n \times 1} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ e_n \end{bmatrix}. \quad (5.83)$$

Os valores ajustados são representados por:

$$\hat{Y} = Xb \quad (5.84)$$

e os termos residuais por:

$$e = Y - \hat{Y}. \quad (5.85)$$

A soma de quadrados para a análise de variância é a seguinte:

$$SSTO = Y'Y - n\bar{Y}^2, \quad (5.86)$$

$$SSR = b'X'Y - n\bar{Y}^2, \quad (5.87)$$

$$SSE = e'e = Y'Y - b'X'Y. \quad (5.88)$$

SSTO significa *soma total de quadrados* e possui $n - 1$ graus de liberdade a ela associados. *SSE* denota *soma de quadrados do erro* e tem $n - p$ graus de liberdade associados a ela, posto que p parâmetros necessitam ser estimados no modelo de regressão (Equação 5.76). Finalmente, *SSR*, a *soma de quadrados da regressão*, possui $p - 1$ graus de liberdade a ela associados, representando o número de variáveis X_1, \dots, X_{p-1} .

Os quadrados médios MSR (quadrado da média de regressão ou “*regression mean square*”) e MSE (erro quadrático médio ou “*error mean square*”) são dados por:

$$MSR = \frac{SSR}{p - 1} , \quad (5.89)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n - p} . \quad (5.90)$$

A esperança de MSE é σ^2 , como na regressão simples. A esperança de MSR é σ^2 mais uma quantidade positiva se qualquer dos coeficientes β_k ($k = 1, \dots, p - 1$) não for zero.

Para se testar se há uma relação entre a variável dependente Y e o conjunto de variáveis X_1, \dots, X_{p-1} , isto é, para se escolher entre as alternativas:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_{p-1} = 0$$

$$H_1: \text{nem todos } \beta_k \text{ (} k = 1, \dots, p - 1 \text{) iguais a } 0,$$

a seguinte estatística é usada:

$$F^* = \frac{MSR}{MSE} . \quad (5.91)$$

$$\text{Se } F^* \leq F(1 - \alpha; p - 1; n - p), \text{ aceitar } H_0;$$

$$\text{Se } F^* > F(1 - \alpha; p - 1; n - p), \text{ aceitar } H_1.$$

Uma medida importante usada para se determinar o ajuste de um modelo linear de regressão é o coeficiente de determinação múltipla, indicado por R^2 , que é definido conforme segue:

$$R^2 = \frac{SSR}{SSTO} = 1 - \frac{SSE}{SSTO} . \quad (5.92)$$

R^2 está compreendido no intervalo $[0,1]$ e assume valor 0 quando todos $b_k = 0$ ($k = 1, \dots, p - 1$). R^2 assume valor 1 quando todas as observações caem diretamente na superfície de resposta ajustada, isto é, quando $Y_i = \hat{Y}_i$ para todos i .

A existência de uma relação de regressão, por si só, não assegura que predições úteis possam ser feitas a partir do modelo. Um intervalo de predição com coeficiente $1 - \alpha$ de confiança para uma nova observação $Y_{h(nova)}$ correspondente a X_h (valores específicos de X variáveis) é:

$$\hat{Y}_h \pm t(1 - \alpha/2; n - p) S(Y_{h(nova)}) \quad (5.93)$$

A variância do erro de predição (diferença entre uma nova observação e o valor estimado) é:

$$S^2(Y_{h(nova)}) = MSE(1 + X'_h(X'X)^{-1}X_h) \quad (5.94)$$

5.3.2.5 Análise de Resíduos

A adequação de um modelo de regressão linear também pode ser testada por uma análise de resíduos (Neter e Wasserman, 1974). Por razões de conveniência analítica, resíduos também são usados de forma padronizada (“*standardized residuals*” - zre_i) de acordo com a seguinte fórmula:

$$zre_i = \frac{e_i}{\sqrt{MSE}} \quad (5.95)$$

Um gráfico dos resíduos e_i versus os valores ajustados \hat{Y}_i deve fornecer pontos dispersos que não apresentem padrão de correlação algum. Quando uma ausência de correlação é detectada no gráfico, isto indica que (a) o modelo de regressão está bem ajustado, (b) a suposição de homogeneidade da variância foi atendida; (c) e o modelo não contém *outliers*. Ao invés de e_i , os resíduos padronizados (zre_i) também podem ser usados.

Um gráfico de uma distribuição normal padrão versus os resíduos e_i é apropriada para se avaliar a suposição de normalidade dos errors. Quando esta suposição for verdadeira, este gráfico deve apresentar um padrão de correlação linear.

Um gráfico dos resíduos e_i versus uma variável independente é útil para se determinar se a função de regressão linear é apropriada e se existem problemas de ordem, bem como para se examinar se a variância dos erros é constante. Uma variável independente também pode ser plotada em relação aos resíduos padronizados (zre_i). Em ambos os casos, os gráficos não devem apresentar padrão de correlação algum (FIGURA 5.10).

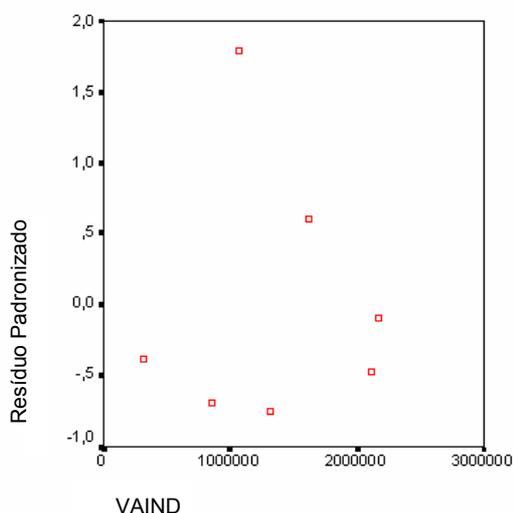


FIGURA 5.10 – Gráfico ilustrativo de resíduos padronizados versus a variável independente (valor adicionado industrial - `vaind`) de um modelo de regressão para a área industrial-Piracicaba:1970-2000.

5.3.2.6 Conversão de Áreas de Destino Previstas em Probabilidades de Transição

Modelos de regressão linear relacionando a área de certos usos do solo com dados demográficos e indicadores econômicos foram construídos para fins de previsões de cenários futuros de uso do solo. Como os dados populacionais e de desempenho econômico demonstraram ser altamente correlacionados, todos os modelos de regressão linear destinados a parametrizar prognósticos de mudanças do uso do solo acabaram

tornando-se modelos univariados, i.e., ou população ou um indicador econômico (PIB total ou setorial) foram eleitos como a variável independente em cada um dos modelos.

Em todos os modelos de regressão onde a correlação de dados econômicos superou a correlação de dados demográficos em relação à variável resposta, o “PIB total” apresentou a maior correlação com esta variável. Entretanto, nem em todos os casos o PIB total foi escolhido como a variável independente. Quando a variável resposta é o uso industrial, o PIB industrial foi eleito como a variável explicativa ou independente, uma vez que esta categoria de PIB apresentou uma correlação elevada com a variável resposta em questão.

Para se converter a área de uso do solo (variável de saída dos modelos de regressão linear) em probabilidades de transição destinadas a alimentar o modelo de simulação, um conjunto de fórmulas foi utilizado de acordo com o caso.

Há basicamente três casos relacionando usos de origem e destino em transições do uso do solo. O primeiro deles é quando o uso de origem de uma certa transição é também o uso de origem de outras transições. Por exemplo, as transições “não-urbano para uso industrial” (nu_ind) e “não-urbano para uso residencial” (nu_res) apresentam o uso não-urbano como seu uso de origem. Neste caso, as seguintes fórmulas são empregadas para o cálculo das probabilidades de transição:

$$P_{nu_ind} = \frac{ind_f - ind_i}{n\tilde{a}o-urb_i} \quad (5.96)$$

e

$$P_{nu_res} = \frac{res_f - res_i}{n\tilde{a}o-urb_i} \quad (5.97)$$

onde P_{nu_ind} é a probabilidade para a transição “não-urbano para uso industrial”; ind_i e ind_f são respectivamente as áreas de uso industrial nos instantes inicial e final do período de simulação; $n\tilde{a}o-urb_i$ é a área de uso não-urbano no instante inicial da

simulação; P_{nu_res} é a probabilidade para a transição “não-urbano para uso residencial”, e res_i e res_f são respectivamente as áreas de uso residencial nos instantes inicial e final da simulação.

O segundo caso refere-se a situações onde o uso de destino em uma certa transição é também o uso de destino em outras transições. Por exemplo, as transições “não-urbano para uso de serviços” (nu_serv) e “residencial para uso de serviços” (res_serv) possuem o uso de serviços como uso de destino comum. Neste caso, as fórmulas abaixo são usadas para o cálculo das probabilidades de transição:

$$P_{nu_serv} = \frac{(serv_f - serv_i) - res_serv}{n\tilde{a}o-urb_i} \quad (5.98)$$

$$P_{res_serv} = \frac{(serv_f - serv_i) - nu_serv}{n\tilde{a}o-urb_i} \quad (5.99)$$

onde P_{nu_serv} é a probabilidade para a transição “não-urbano para uso de serviços”; $serv_i$ e $serv_f$ são respectivamente as áreas de uso de serviços nos instantes inicial e final da simulação; $n\tilde{a}o-urb_i$ é a área de uso não-urbano no instante inicial da simulação; res_serv é a área de uso residencial convertida em uso de serviços, e nu_serv é a área de uso não-urbano convertida em uso de serviços. res_serv e nu_serv são obtidas através de um *sistema simples de equações* construído com base na *teoria dos conjuntos*.

Finalmente, o terceiro caso concerne as situações nas quais o uso de destino em uma certa transição é o uso de origem em outras transições, e eventualmente o uso de origem da transição considerada é também o uso de origem das demais transições existentes no período de simulação. Por exemplo, o conjunto de transições “não-urbano para uso residencial” (nu_res), “residencial para uso de serviços” (res_serv), “residencial para uso misto” (res_mist) e “não-urbano para uso de serviços” (nu_serv) exemplifica este terceiro caso. A seguinte fórmula deve ser empregada nesta situação para a estimativa da probabilidade de transição “não-urbano para uso residencial” (nu_res):

$$P_{nu_res} = \frac{(res_f - res_i) - [(serv_f - serv_i) - nu_serv] - (mist_f - mist_i)}{n\tilde{a}o-urb_i}, \quad (5.100)$$

onde P_{nu_res} é a probabilidade para a transição “não-urbano para uso residencial”; $serv_i$ e $serv_f$ são respectivamente as áreas de uso de serviços no início e fim da simulação; $mist_i$ e $mist_f$ são respectivamente as áreas de uso misto no tempo inicial e final da simulação; $n\tilde{a}o-urb_i$ é a área de uso não-urbano no início da simulação, e nu_serv corresponde à área de uso não-urbano convertida em uso de serviços, obtida por meio de um *sistema triplo de equações* construído com base na *teoria dos conjuntos*. Este sistema de equações, além de nu_serv , envolve as variáveis desconhecidas nu_res (área não-urbana convertida em uso residencial) e res_serv (área de uso residencial convertida em serviços). As probabilidades restantes neste terceiro caso (P_{nu_serv} , P_{res_serv} , P_{res_mist}) são então calculadas com base nos valores estimados de nu_serv , nu_res e res_serv .

5.3.3 Concepção de Cenários e Horizontes de Projeto para Prognósticos

Conforme exposto na Seção 5.3.1, a cadeia de Markov foi usada para gerar prognósticos estacionários de mudanças de uso do solo. Cenários otimistas e pessimistas de mudanças do uso também foram concebidos, respectivamente com suaves super e subestimações da variável independente. Ambos foram baseados, da mesma forma que na cadeia de Markov, em transições observadas exclusivamente no último período de simulação, i.e., de 1988 a 2000, para Bauru, e de 1985 a 1999, para Piracicaba.

Esses cenários não-estacionários foram formulados através de modelos de regressão linear, relacionando áreas de certos usos do solo com população e dados econômicos (ver Seção 5.3.2), onde, conforme dito acima, suaves super e subestimações da variável independente produziram cenários otimistas e pessimistas de mudanças de uso.

A adoção de variações amenas nas projeções de dados populacionais e econômicos pode ser justificada pelo fato de que os cenários demográficos e macroeconômicos do Brasil nos últimos anos provavelmente se reproduzirão na próxima década, em vista de taxas de crescimento populacional continuamente decrescentes, assim como em face da tendência de continuidade administrativa demonstrada pelo atual governo federal.

Quanto à delimitação de horizontes de projeto, inexistem definições oficiais com relação a curto e médio prazos para fenômenos de mudanças de uso do solo urbano. De modo geral, é sensato definir-se o curto prazo como sendo um período de tempo de até cinco anos, e o médio prazo como um intervalo de tempo compreendido entre mais de cinco e menos de dez anos. Na pesquisa atual, o horizonte de **curto prazo** foi alocado para o ano de **2004**, e o horizonte de **médio prazo**, para **2007**.

Especificamente com relação à modelagem de mudanças do uso do solo urbano, é inadequado lidar com prognósticos de longo prazo, devido a duas razões principais. Primeiro, mudanças de uso do solo de longo prazo são dificilmente previsíveis, e por esse motivo, sujeitas a erro, em razão de alterações inesperadas na esfera macroeconômica, e conseqüentemente no comportamento do uso do solo, que podem eventualmente ocorrer ao final do médio prazo e início do longo prazo. Segundo, para o planejamento urbano estratégico, apenas o curto e médio prazo são relevantes para a definição de prioridades, alocação de recursos e processos de tomada de decisão.

5.4 O Modelo de Simulação de Dinâmicas do Uso do Solo

5.4.1 Modelo de Dados Genérico para o DINAMICA

O modelo de simulação de dinâmicas do uso do solo urbano empregado para conduzir os experimentos de simulação nesta pesquisa foi o DINAMICA, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR – UFMG). O programa DINAMICA foi escrito em linguagem C++ orientada a objetos, e sua versão atual roda em sistema Windows © 32 bits (Soares-Filho et al. 2002).

O DINAMICA é um modelo de autômatos celulares, implementado através de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo. Um modelo de dados genérico para o DINAMICA é apresentado na FIGURA 5.11. Para operar este programa, são necessários um mapa inicial de uso do solo e dois conjuntos de dados correspondentes às variáveis de entrada estáticas e dinâmicas. Todos esses mapas em conjunto com os parâmetros obtidos tanto pelo método de pesos de evidência como por regressão logística serão usados para o cálculo das probabilidades de transição das células.

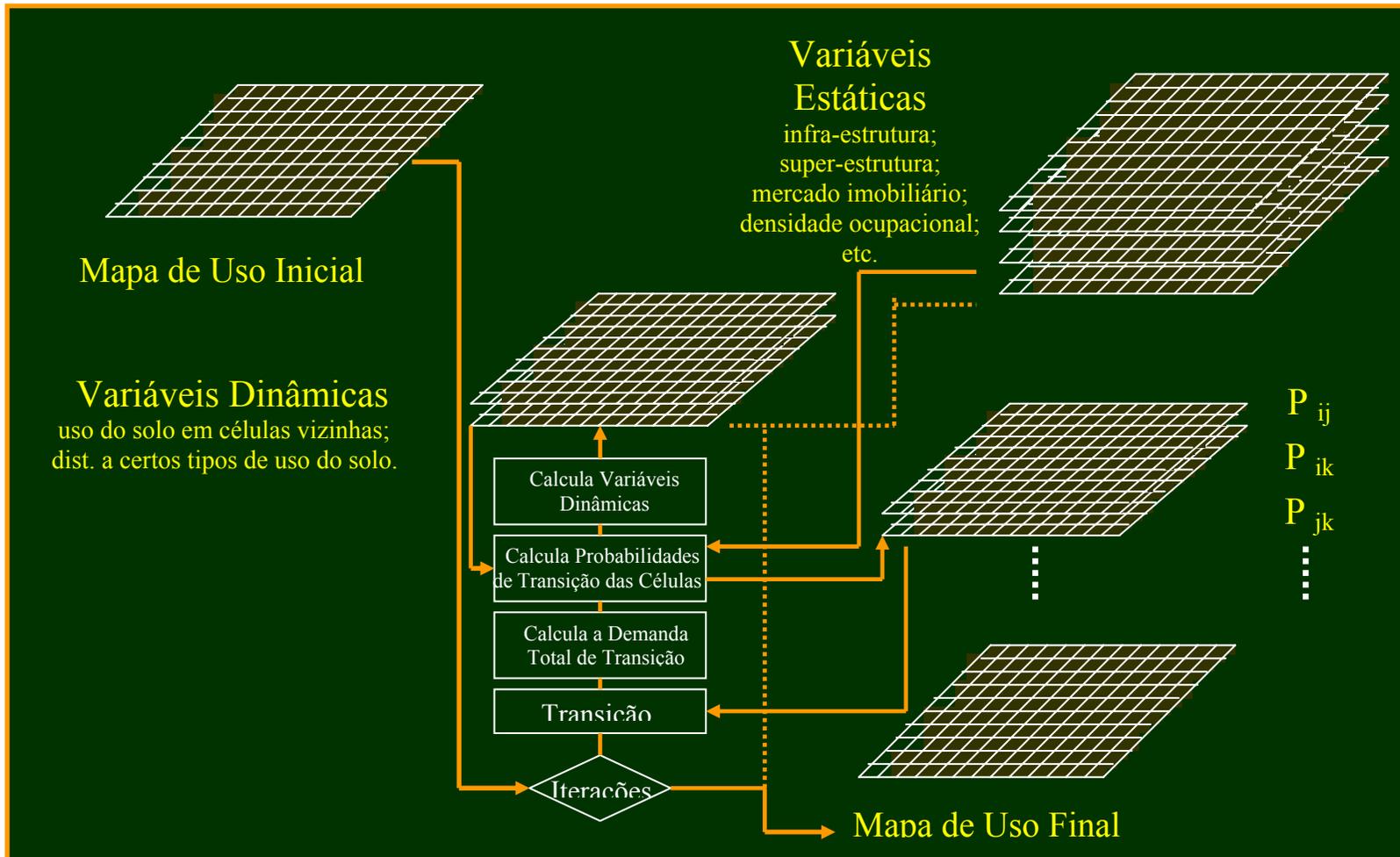


FIGURA 5.11 – Modelo de dados genérico do DINAMICA para aplicações urbanas.

FONTE: Adaptado de SOARES-FILHO (1998, p.257).

As variáveis estáticas referem-se a mapas de disponibilidade de infra e super-estrutura, tipos de densidade de ocupação urbana, relevo, zoneamento urbano, etc. As variáveis dinâmicas referem-se a mapas de distância a certos tipos de uso do solo. Essas variáveis sofrem alterações a cada iteração do programa, que são continuamente atualizadas de modo a influenciar o cálculo das probabilidades de transição na próxima iteração. Portanto, a cada iteração do programa, ocorrem mudanças no estado (uso do solo) das células, mudando assim a distância a esses usos, estimados a partir de outras células.

A partir das probabilidades de transição (P_{ij} , P_{ik} , etc.), os mapas de transição de uso são elaborados, os quais serão usados para procedimentos heurísticos na calibração do modelo (ver Seção 5.2.1.5). Finalmente, com as probabilidades de transição das células calculadas e a quantia total de mudanças de uso estimada através de tabulação cruzada, cadeia de Markov ou modelos de regressão linear, mudanças no uso do solo das células ocorrerão em sucessivas iterações, de forma a gerar o mapa final de uso do solo urbano.

5.4.2 Estrutura do Programa e Parâmetros de Entrada

O DINAMICA é um modelo de CA baseado em uma vizinhança de Moore (ou oito células), implementado através de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo. Os parâmetros do DINAMICA incluem:

- a) um arquivo contendo os valores dos pesos positivos de evidência (W^+) ou os parâmetros (β_0 , β_i) dos modelos de regressão logística, dependendo do método de estimativa adotado;
- b) as probabilidades globais de transição para cada mudança de uso do solo identificada no período de simulação considerado;
- c) o tamanho e a variância de manchas para cada transição;
- d) a proporção dos algoritmos de transição ou alocação ('função *expander*' e 'função *patcher*') também considerando-se cada transição; e,
- e) o número total de iterações.

A última versão do DINAMICA permite o ajuste dos parâmetros por interfaces gráficas, embora a versão DOS do DINAMICA tenha sido usada nesta pesquisa.

5.4.3 Algoritmos de Transição

O DINAMICA apresenta dois algoritmos de transição do uso do solo (ou de alocação do uso do solo): as funções *expander* e *patcher*. A função *expander* responde pela expansão de manchas previamente existentes de uma certa classe de uso do solo. A função *patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas através de um mecanismo de constituição de sementes (Soares-Filho et al. 2002). Em suma, a função *expander* executa transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado j . E a função *patcher* realiza transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de j .

Esses dois processos podem se fundir na seguinte equação:

$$Q_{ij} = r \times (\text{função } \textit{expander}) + s \times (\text{função } \textit{patcher}) \quad , \quad (5.101)$$

onde Q_{ij} corresponde à quantia total de transições do tipo ij especificadas por cada período de simulação, e r e s são respectivamente o percentual de transições executadas por cada função, com $r + s = 1$.

De acordo com Soares-Filho et al. (2002), ambos algoritmos de transição adotam um mecanismo estocástico de seleção. O algoritmo aplicado consiste no escaneamento do mapa de uso do solo inicial para identificar as células com valores de probabilidade mais elevados, e dispô-las em um vetor de dados. Seguindo este procedimento, as células desse vetor são selecionadas aleatoriamente em sentido descendente (o mecanismo estocástico de seleção interna pode ser suavizado ou realçado, dependendo do grau de aleatoriedade desejada). Em um estágio final, o mapa de uso do solo é novamente escaneado para se executar as transições selecionadas.

No caso de a função *expander* não executar a quantia de transições desejadas após um número fixo de iterações, ela transfere à função *patcher* um número residual de

transições, de modo que o número total de transições sempre alcance um valor esperado (Soares-Filho et al. 2002).

5.4.3.1 A Função *Expander*

O algoritmo *expander* é expresso pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{If } n_j > 3 \text{ então } P'_{ij}(x,y) &= P_{ij}(x,y) \text{ senão} \\ P'_{ij}(x,y) &= P_{ij}(x,y) \times (n_j)/4 \end{aligned} \quad (5.102)$$

onde n_j corresponde ao número de células do tipo j ocorrendo em uma janela 3×3 . Este método garante que a máxima P'_{ij} será a P_{ij} original, sempre que uma célula do tipo i esteja cercada por pelo menos 50% de células vizinhas do tipo j .

5.4.3.2 A Função *Patcher*

A função *patcher* procura simular padrões de mudanças do uso do solo gerando manchas difusas e impedindo, ao mesmo tempo, a formação de manchas de apenas uma célula. Esta função emprega um dispositivo que procura por células em torno de uma dada localização considerada para transição. Isto é obtido primeiramente pela seleção de uma célula núcleo da nova mancha, e então pela seleção de um número específico de células ao redor da célula núcleo, de acordo com as suas probabilidades de transição P_{ij} .

As funções *expander* e *patcher*, conforme anteriormente mencionado, incorporam um dispositivo de alocação que é responsável pela identificação de células com as maiores probabilidades para cada transição ij . Este dispositivo armazena as células e as organiza para ulterior seleção. Neste processo, cada célula recém-selecionada formará o núcleo de uma nova mancha ou franja de expansão, que ainda necessita ser consolidada usando-se um dos dois algoritmos de transição. Os tamanhos das novas manchas e franjas de expansão são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade lognormal, cujos parâmetros são determinados em função do tamanho médio e variância de cada tipo de mancha e franja de expansão a ser gerada (Soares-Filho et al. 2002).

5.5 Fluxograma de Síntese Metodológica

Um fluxograma que sintetiza os procedimentos metodológicos para modelagem de dinâmicas do uso do solo urbano é apresentado na FIGURA 5.12. No bloco inicial, que concerne os dados de entrada, dados de sensoriamento remoto, cartográficos e censitários são coletados e devidamente processados para inserção em um banco de dados geográficos. No passo seguinte, conduz-se uma análise exploratória dos dados de entrada, visando-se à seleção de variáveis. A meta é a extração do mínimo e, ao mesmo tempo, melhor conjunto de variáveis para se explicar as transições de uso do solo.

Após a definição do conjunto final de variáveis para cada tipo de transição, chega-se ao estágio de modelagem. Primeiramente, taxas de transição são calculadas através de tabulação cruzada ou cadeia Markoviana. A seguir, as probabilidades de transição das células são obtidas ou por regressão logística ou pelo método de pesos de evidência.

Com as taxas de transição e probabilidades de transição das células estimadas, executam-se as simulações. As saídas das simulações são continuamente calibradas até a obtenção de resultados satisfatórios, que serão por fim validados.

Portanto, familiarizando-se com as tendências de mudanças do uso do solo ao longo de uma série multitemporal suficientemente longa, o modelador encontra-se finalmente apto para conceber cenários de transições futuras. Neste caso, as taxas de transição podem ser estacionárias, isto é, estimadas pela cadeia de Markov; ou não-estacionárias, as quais são obtidas a partir de modelos de regressão linear relacionando áreas de certos usos do solo com dados demográficos e econômicos. Em todos os casos, prognósticos de mudanças de uso do solo urbano são gerados para horizontes de curto e médio prazo.

5.6 Conclusões

O Capítulo 5 apresentou as técnicas estatísticas destinadas a conduzir os experimentos de simulações e prognósticos de mudanças de uso do solo nas cidades de Bauru e Piracicaba. O método de pesos de evidência, baseado no teorema de Bayes ou da probabilidade condicional, foi usado em todos os períodos de simulação, enquanto que

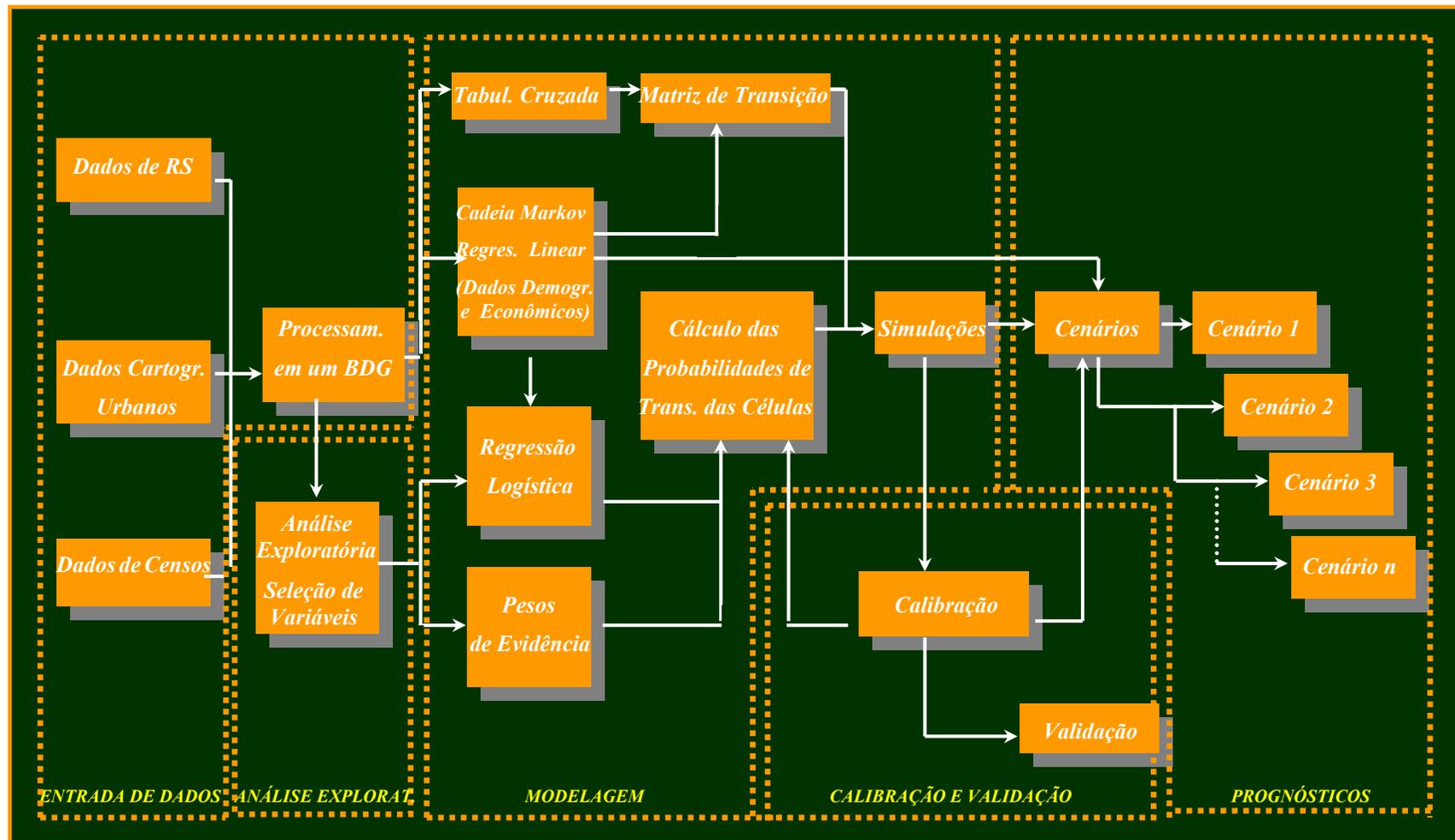


FIGURA 5.12 – Fluxograma de síntese metodológica.

o método de regressão logística foi experimentalmente aplicado à cidade de Bauru, apenas para o período de simulação de 1979 a 1988.

Ambos os métodos são baseados em *logits*, i.e., o logaritmo natural de *odds*, definido como uma razão entre a probabilidade de que um evento ocorrerá e a probabilidade de que ele não ocorrerá. O método de pesos de evidência calcula os parâmetros para cada evidência (variável explicativa) ou classe de evidência de uma forma univariada, i.e., cada variável tem o seu peso positivo de evidência (W^+) e o peso negativo de evidência (W^-) individualmente determinados. No método de regressão logística, por um outro lado, a determinação dos parâmetros de regressão (β_0, β_i) é feita simultaneamente para todas as variáveis integrando o modelo.

De acordo com Hosmer e Lemeshow (1989), “um problema com a abordagem univariada é o de que ela ignora a possibilidade de que uma coleção de variáveis, cada uma delas fracamente associada com a variável de saída, possa tornar-se um importante preditor dessa mesma variável quando tomadas em seu conjunto.”

Embora a determinação de parâmetros no método de pesos de evidência seja feita individualmente para cada variável, a fórmula de probabilidade agrega toda a informação relacionada a cada uma dessas variáveis.

O pesos de evidência pode ser considerado como um método muito mais intuitivo, já que o modelador monitora todo o processo de determinação de parâmetros. De forma oposta, a estimativa de parâmetros no modelo de regressão logística, executada através de métodos continuamente iterativos, permanece uma caixa preta para os modeladores. Esses dois métodos apresentam resultados muito similares. No entanto, o método de pesos de evidência merece preferência de aplicação em vista de sua transparência e simplicidade operacional, que juntas contribuem para uma calibração do modelo mais rápida e consistente.

Um aspecto metodológico que deve ser aqui salientado é o fato de que nos experimentos de simulação que fornecem saídas anuais, as variáveis de entrada deveriam ser preferivelmente atualizadas ano a ano da mesma forma, de modo a permitir resultados

mais sensatos. Infelizmente, a maior parte das variáveis de entrada usadas em modelagem de mudanças de uso do solo urbano são muito complexas e detalhadas para serem atualizadas anualmente por meio de dados de sensoriamento remoto ou cartográficos.

E finalmente, é válido notar que os métodos de simulação de prognósticos não-estacionários, os quais são baseados em modelos de regressão linear, devem empregar o método estatístico de “análise de séries temporais” para a estimativa das variáveis independentes. Como séries temporais requerem um mínimo de trinta observações (Wei, 1990), e como os dados anuais de PIB municipal total e setorial de Bauru e Piracicaba nas últimas três décadas não estavam disponíveis à época que esta pesquisa foi concluída, esta técnica estatística não pôde ser adotada. De qualquer forma, o emprego de análises de séries temporais nas simulações de prognósticos permanece como uma direção para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Bauru

Conforme mencionado anteriormente na Seção 3.4.1.2, Bauru nasceu como ponto de entroncamento entre ferrovias durante a marcha de ocupação interiorana da cultura cafeeira no século XIX. Ainda hoje, a cidade é marcadamente delineada pelo seu sistema de transportes: sua estrutura urbana é organizada em torno de quatro estradas inter-regionais e a linha férrea, que ainda cruza a área central da cidade.

Bauru é considerada atualmente como um pólo de desenvolvimento regional do centro-oeste do Estado de São Paulo, com um notável desempenho de atividades terciárias (comércio e serviços). Em face das suas condições estratégicas de desenvolvimento histórico, a cidade sofreu processos urbanizatórios notadamente rápidos. Esses booms foram acompanhados de processos especulativos, levando à formação de um tecido urbano descontínuo, marcado pela profusão de vazios urbanos, baixas densidades de ocupação em áreas mais periféricas e a existência de loteamentos residenciais isolados orbitando em torno da área central, como será visto nas próximas seções.

Na seqüência, os resultados para as simulações de mudanças de uso do solo ao longo da série multitemporal de 1967 a 2000 serão apresentados, seguidos das simulações de prognósticos geradas para o curto e médio prazo, respectivamente 2004 e 2007.

6.1.1 Período de Simulação: 1967 - 1979

Não há dados oficiais sobre a população de Bauru em 1967. O primeiro censo demográfico no Brasil foi feito em 1970 (IBGE, 1971), e a população total desta municipalidade à época era de 64.859 habitantes, dos quais 61.592 habitantes moravam em áreas urbanas. Pode-se inferir aproximadamente que a população de Bauru em 1967

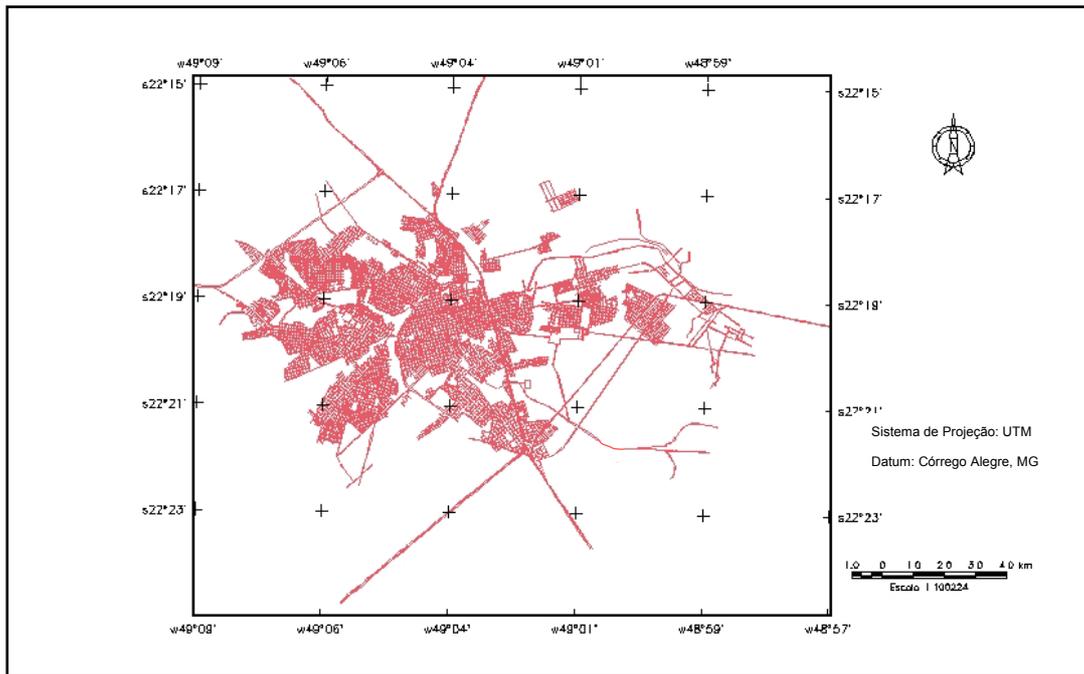


FIGURA 6.1 – Mapa oficial da cidade de Bauru em 1967.

FONTE: CEPEU-FAUUSP (1967a).

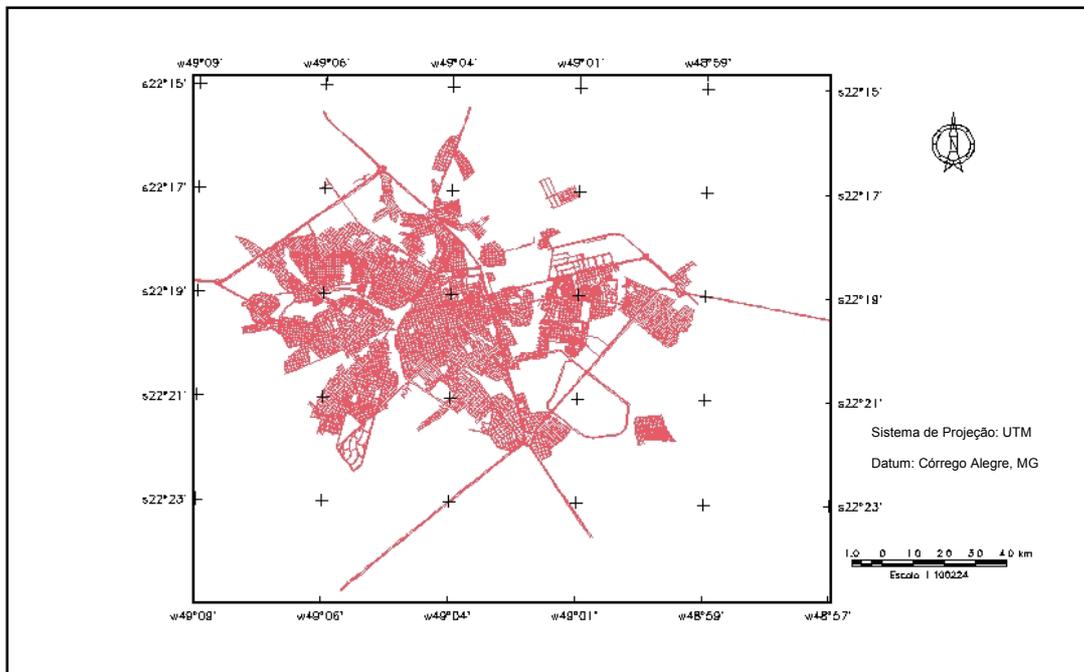


FIGURA 6.2 – Mapa oficial da cidade de Bauru em 1979.

FONTE: SEPLAN (1979a).

somava em torno de 57.000 habitantes. No censo nacional de 1980 (IBGE, 1982), a população total passou para 164.105 habitantes, dos quais 159.926 pessoas eram habitantes urbanos. A taxa de crescimento da população urbana neste período (1967-1979) foi elevada, por volta de 2,81%. Os impactos disso na área urbana podem ser vistos nas FIGURAS 6.1 e 6.2, que apresentam os mapas oficiais da cidade no período.

Os mapas de uso do solo inicial e final usados no período de simulação 1967 – 1979 (FIGURA 6.3) foram elaborados com base nos dois mapas oficiais da cidade acima apresentados, bem como em procedimentos de generalização aplicados aos mapas originais de uso do solo de 1967 (CEPEU-FAUUSP, 1967b) e 1979 (SEPLAN, 1979a) e na imagem de satélite impressa de Bauru em 1979 (INPE, 1979).

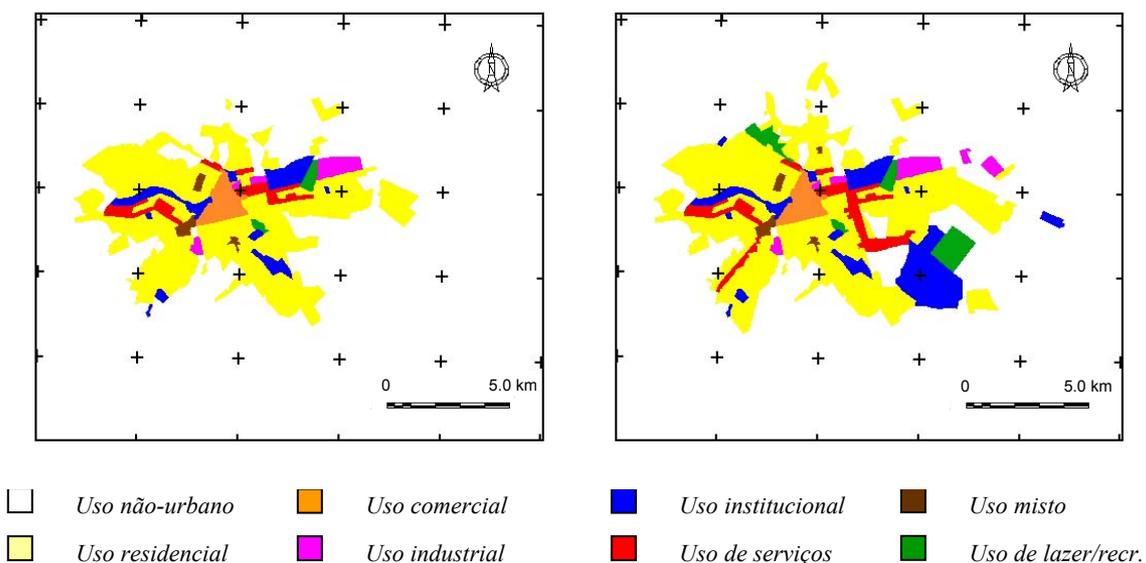


FIGURA 6.3 – Mapa de uso do solo de Bauru em 1967 (esquerda) e 1979 (direita).

Para se calcular as taxas de transição de uso do solo para o período 1967-1979, os mapas de uso do solo inicial e final, processados no SPRING, foram convertidos em arquivos matriciais com extensão TIFF e resolução 100 x 100 (m), e então exportados para o Sistema de Informações Geográficas IDRISI. Uma operação de tabulação cruzada foi feita entre ambos mapas de uso do solo (FIGURA 6.4) de modo a gerar os percentuais de transição para as mudanças de uso existentes (TABELAS 6.1 e 6.2).

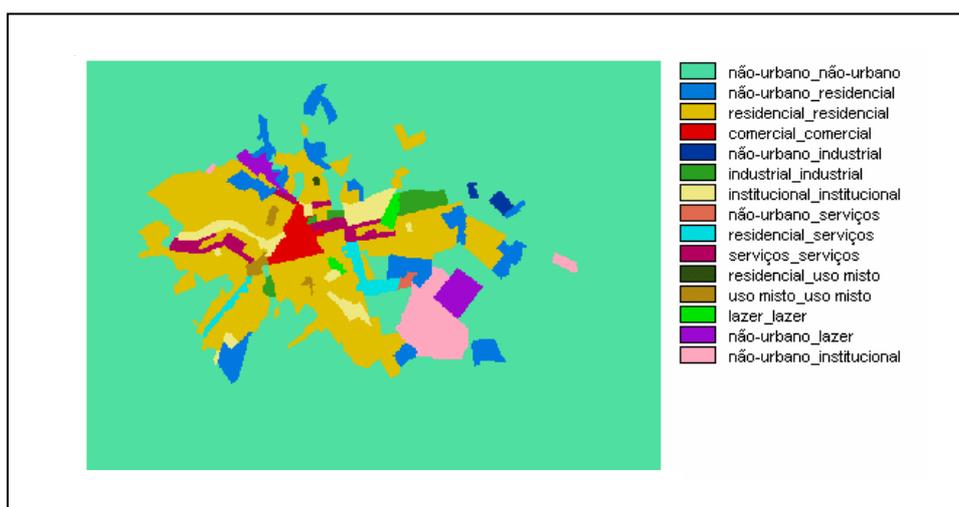


FIGURA 6.4 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso de Bauru: 1967-1979.

TABELA 6.1 – Transições de uso do solo existentes em Bauru: 1967-1979.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>TRANSIÇÃO DE USO DO SOLO</i>
<i>NU_RES</i>	<i>Não-urbano para residencial</i>
<i>NU_IND</i>	<i>Não-urbano para industrial</i>
<i>NU_INST</i>	<i>Não-urbano para institucional</i>
<i>NU_SERV</i>	<i>Não-urbano para serviços</i>
<i>NU_LAZ</i>	<i>Não-urbano para lazer/recreação</i>
<i>RES_SERV</i>	<i>Residencial para serviços</i>
<i>RES_MIST</i>	<i>Residencial para uso misto</i>

TABELA 6.2 – Matriz de probabilidades globais de transição para Bauru: 1967–1979.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Com.</i>	<i>Industr.</i>	<i>Instít.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-urbano</i>	<i>0,9361</i>	<i>0,0315</i>	<i>0</i>	<i>0,0022</i>	<i>0,0199</i>	<i>0,0009</i>	<i>0</i>	<i>0,0094</i>
<i>Resid.</i>	<i>0</i>	<i>0,9498</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,0485</i>	<i>0,0016</i>	<i>0</i>
<i>Com.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Industr.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Instít.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Serviços</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Misto</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>
<i>Laz./Recr.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>

Após estimarem-se as probabilidades globais de transição, i.e., a quantia total de mudanças de uso para Bauru no período 1967 – 1979, é necessário determinarem-se as probabilidades locais de transição (probabilidades das células). Para este fim, o conjunto de variáveis para explicar cada tipo de transição deve ser definido. Procedimentos heurísticos e testes estatísticos são empregados neste processo de seleção (ver Seção 5.2.1.2). Para o período de simulação 1967–1979, doze variáveis foram selecionadas (CEPEU-FAUUSP, 1967a, 1967b, 1967c), algumas delas apresentadas na FIGURA 6.5.

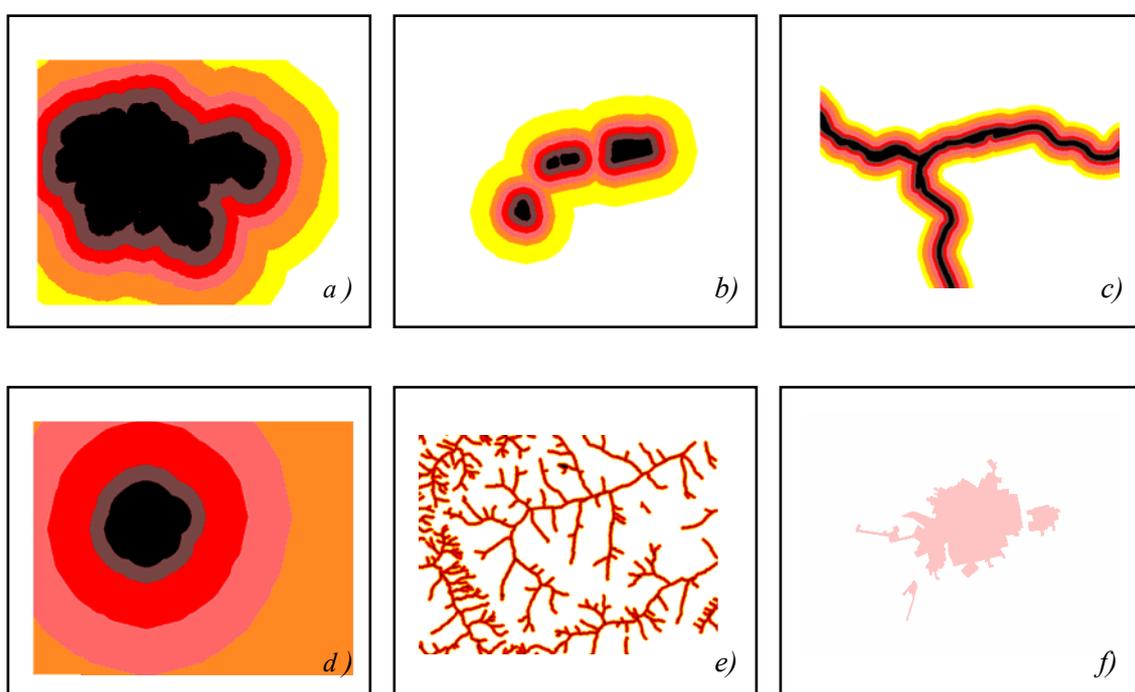


FIGURA 6.5 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso do solo em Bauru no período 1967 – 1979: a) distâncias a zonas residenciais; b) distâncias a zonas industriais; c) distâncias a ferrovias; d) distâncias a faixas de agrupamentos de atividades comerciais; e) distâncias a rios e corpos d’água; f) rede de água.

A TABELA 6.3 mostra as notações utilizadas para cada mapa de variável empregado nesta simulação; a TABELA 6.4 indica quais variáveis foram selecionadas para explicar cada uma das transições existentes; e finalmente, a TABELA 6.5 apresenta os valores

obtidos para o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U) para pares de variáveis usados para explicar o mesmo tipo de transição do uso do solo.

TABELA 6.3 – Variáveis independentes das transições de uso em Bauru: 1967-1979.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>VARIÁVEIS DE MUDANÇAS DE USO FÍSICAS OU SÓCIO-ECONÔMICAS</i>
<i>agua</i>	<i>Área servida por rede de água.</i>
<i>dist_rios</i>	<i>Distâncias a rios e corpos d'água.</i>
<i>dist_com</i>	<i>Distâncias a zonas comerciais em geral.</i>
<i>com_kern</i>	<i>Distâncias a diferentes faixas de concentração de atividades comerciais, definidas pelo estimador Kernel.</i>
<i>dist_ind</i>	<i>Distâncias a zonas industriais.</i>
<i>dist_res</i>	<i>Distâncias a zonas residenciais.</i>
<i>dist_fer</i>	<i>Distâncias a ferrovias.</i>
<i>trv_est</i>	<i>Distâncias a estradas periféricas transversais (so-ne; se-no).</i>
<i>exist_est</i>	<i>Distâncias às principais vias existentes.</i>
<i>serv_eix</i>	<i>Distâncias aos eixos de serviços e industrial.</i>
<i>asf_est</i>	<i>Distâncias às estradas asfaltadas.</i>
<i>per_est</i>	<i>Distâncias a estradas periféricas, que atravessam áreas não-ocupadas.</i>

TABELA 6.4 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Bauru: 1967-1979.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>NU_RES</i>	<i>NU_IND</i>	<i>NU_INST</i>	<i>NU_SERV</i>	<i>NU_LAZ</i>	<i>RES_SERV</i>	<i>RES_MIST</i>
<i>agua</i>							♦
<i>dist_rios</i>					♦		
<i>dist_com</i>			♦	♦			♦
<i>com_kern</i>	♦						
<i>dist_ind</i>		♦					
<i>dist_res</i>	♦		♦	♦			
<i>dist_fer</i>		♦					
<i>trv_est</i>					♦		
<i>exist_est</i>	♦			♦			
<i>serv_eix</i>		♦				♦	♦
<i>asf_est</i>						♦	
<i>per_est</i>			♦				

De acordo com o exposto na Seção 5.2.1.2, Bonham-Carter (1994) relata que valores menores que 0,5 para o Índice de Cramer e a Incerteza de Informação Conjunta sugerem menos associação ao invés de mais. Como nenhum dos valores de associação ultrapassou este limiar simultaneamente para ambos os índices, nenhuma das variáveis preliminarmente selecionadas para a modelagem foram descartadas da análise.

TABELA 6.5 – Associações entre variáveis independentes - Bauru: 1967-1979.

<i>VARIÁVEL A</i>	<i>VARIÁVEL B</i>	<i>ÍNDICE DE CRAMER (V_{A,B})</i>	<i>INCERTEZA (U_{A,B})</i>
<i>dist_com</i>	<i>exist_est</i>	0,3552	0,2674
	<i>dist_res</i>	0,3878	0,3189
	<i>per_est</i>	0,1448	0,0580
	<i>serv_eix</i>	0,1650	0,0753
<i>com_kern</i>	<i>dist_res</i>	0,5334	0,3822
	<i>exist_est</i>	0,4751	0,3039
<i>dist_res</i>	<i>per_est</i>	0,1470	0,0461
	<i>exist_est</i>	0,5774	0,4249
<i>serv_eix</i>	<i>agua</i>	0,2446	0,0475
	<i>dist_ind</i>	0,1279	0,0497
	<i>asf_est</i>	0,0548	0,0130
	<i>dist_fer</i>	0,1334	0,0426
<i>dist_ind</i>	<i>serv_eix</i>	0,1279	0,0497
<i>trv_est</i>	<i>dist_rios</i>	0,0420	0,0025

Com a definição do conjunto final de variáveis independentes, procedimentos para obter o peso positivo de evidência (W^+) são tomados finalmente. No IDRISI, o mapa de tabulação cruzada de uso do solo de Bauru (1967-1979) foi usado para gerar mapas de transição de uso (FIGURA 6.6) para cada um dos sete tipos de transições apresentadas na TABELA 6.1. Isto foi feito através de tabelas de reclassificação, nas quais as seguintes regras foram observadas:

- a todos os valores matriciais correspondentes a classes de permanência ou de transição de uso do solo cujo uso inicial difere da categoria de uso inicial da mudança de uso em consideração foi atribuído valor 0 (*cor preta*);
- a todos os valores matriciais correspondentes a classes de transição de uso do solo cujas categorias de uso inicial e final são iguais às categorias inicial e final da mudança de uso em questão foi atribuído valor 2 (*cor azul*);
- a todas as demais classes de permanência ou transição de uso do solo foi atribuído valor 1 (*cor verde*).

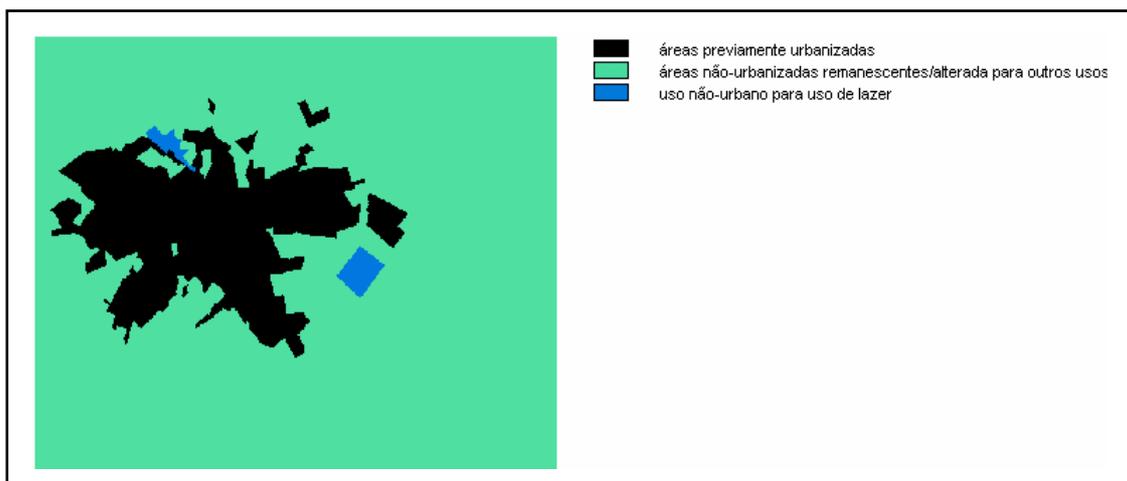


FIGURA 6.6 – Exemplo de um mapa de transição de uso do solo (não-urbano para lazer/recreação) de Bauru no período: 1967-1979.

Uma vez que todos os tipos possíveis de mapas de transição de uso foram elaborados, eles se submeteram a tabulações cruzadas parciais com os respectivos mapas de variáveis independentes, de acordo com os relacionamentos estabelecidos na TABELA 6.4. Os mapas de variáveis (evidências), pré-processados no SPRING, foram da mesma maneira que os mapas de uso do solo inicial e final, convertidos para arquivos matriciais com resolução 100 x 100 (m).

As tabulações cruzadas parciais desconsideram os valores matriciais 0 (cor preta) nos mapas de transição de uso do solo. Os valores numéricos de proporções de células existentes na ausência/presença de uma evidência binária (p.ex. rede de água) ou em diferentes faixas dos mapas de distâncias e em sobreposição à classe 1 (cor verde) ou 2 (cor azul) dos mapas de transição de uso são (para cada tabela de tabulação cruzada) seletivamente transferidos para arquivos especialmente criados para o cálculo dos pesos de evidência (Equações 5.9 e 5.10).

Usando os valores dos pesos positivos de evidência W^+ (TABELA 6.6) concernentes aos vários mapas de evidências empregados na análise de cada categoria de mudança de uso do solo, o DINAMICA irá então calcular as probabilidades de transição (Equação 5.33) para os sete tipos de mudanças de uso existentes.

TABELA 6.6 – Valores de W^+ para as variáveis independentes - Bauru: 1967–1979.

Transição de Uso	Variável	Pesos Positivos de Evidência W^+						
		1	2	3	4	5	6	7
NU_RES	<i>com_kern</i> ¹	2,876	2,126	0,846	-0,515	0	nd	nd
	<i>dist_res</i> ²	1,849	-0,102	-0,772	-0,407	-3,087	0	0
	<i>exist_est</i> ³	1,383	0,739	-2,352	-1,887	-1,120	0	0
NU_IND	<i>dist_ind</i> ⁴	0	0	0	3,273	0,916	2,510	0
	<i>dist_fer</i> ⁵	2,247	2,425	2,450	1,315	0	0	0
	<i>serv_eix</i> ⁶	2,527	2,462	2,498	2,523	2,353	1,982	0
NU_INST	<i>dist_com</i> ⁷	0	0	0	0	-0,466	1,082	-2,235
	<i>dist_res</i> ²	0,366	1,283	0,623	-1,647	0	0	0
	<i>per_est</i> ⁸	3,247	2,550	1,194	0	0	-1,818	0
NU_SERV	<i>dist_com</i> ⁷	0	0	0	0	3,259	0	0
	<i>dist_res</i> ²	2,067	0	0	0	0	0	0
	<i>exist_est</i> ³	1,973	-3,784	0	0	0	0	0
NU_LAZ	<i>trv_est</i> ⁹	3,850	2,188	0	0	0	0	0
	<i>dist_rios</i> ¹⁰	0,909	0,836	0,668	-0,730	nd	nd	nd
RES_SERV	<i>serv_eix</i> ⁶	1,619	1,242	0,504	-0,305	-0,349	-0,536	-0,348
	<i>asf_est</i> ⁶	3,069	1,324	-0,764	-2,504	0	0	-0,158
RES_MIST	<i>agua</i>		<u>Presença 1,300</u>			<u>Ausência -0,959</u>		
	<i>serv_eix</i> ⁶	0	0	1,591	1,691	2,294	-0,712	0
	<i>dist_com</i> ⁷	0	1,817	0	0	0	0	0

Nota: Faixas de distância em metros

nd : não disponível

¹ 1: 0 -3000; 2: 3000-6000; 3: 6000-14500; 4: 14500-23500; 5: > 23500

² 1: 0 -2000; 2: 2000-5000; 3: 5000-7500; 4: 7500-10000; 5: 10000-15000; 6: 15000-20000; 7: >20000

³ 1: 0 -2250; 2: 2250-5000; 3: 5000-7500; 4: 7500-10000; 5: 10000-15000; 6: 15000-20000; 7: >20000

⁴ 1: 0 -500; 2: 500-1500; 3: 1500-2500; 4: 2500-3500; 5: 3500-4500; 6: 4500-7000; 7: >7000

⁵ 1: 0 -500; 2: 500-1000; 3: 1000-1500; 4: 1500-2500; 5: 2500-3500; 6: 3500-4500; 7: > 4500

⁶ 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1250; 6: 1250-2000; 7: > 2000

⁷ 1: 0 -2250; 2: 2250-4500; 3: 4500-6650; 4: 6650-8900; 5: 8900-11000; 6: 11000-19750; 7: > 19750

⁸ 1: 0 -1000; 2: 1000-3500; 3: 3500-5000; 4: 5000-7500; 5: 7500-10000; 6: 10000-23500; 7: > 23500

⁹ 1: 0 -1000; 2: 1000-3500; 3: 3500-5000; 4: 5000-7500; 5: 7500-10000; 6: 10000-23500; 7: > 23500

¹⁰ 1: 0 -50; 2: 50-350; 3: 350-500; 4: > 500

Por meio das probabilidades de transição das células, o DINAMICA irá gerar os respectivos mapas de probabilidades de transição (FIGURES 6.7a, 6.7b e 6.7c) para cada um dos sete tipos de mudanças do uso do solo existentes em Bauru de 1967 a 1979. Esses mapas são vistos no ERMAPPER, empregado pela versão DOS do DINAMICA para fins de visualização.

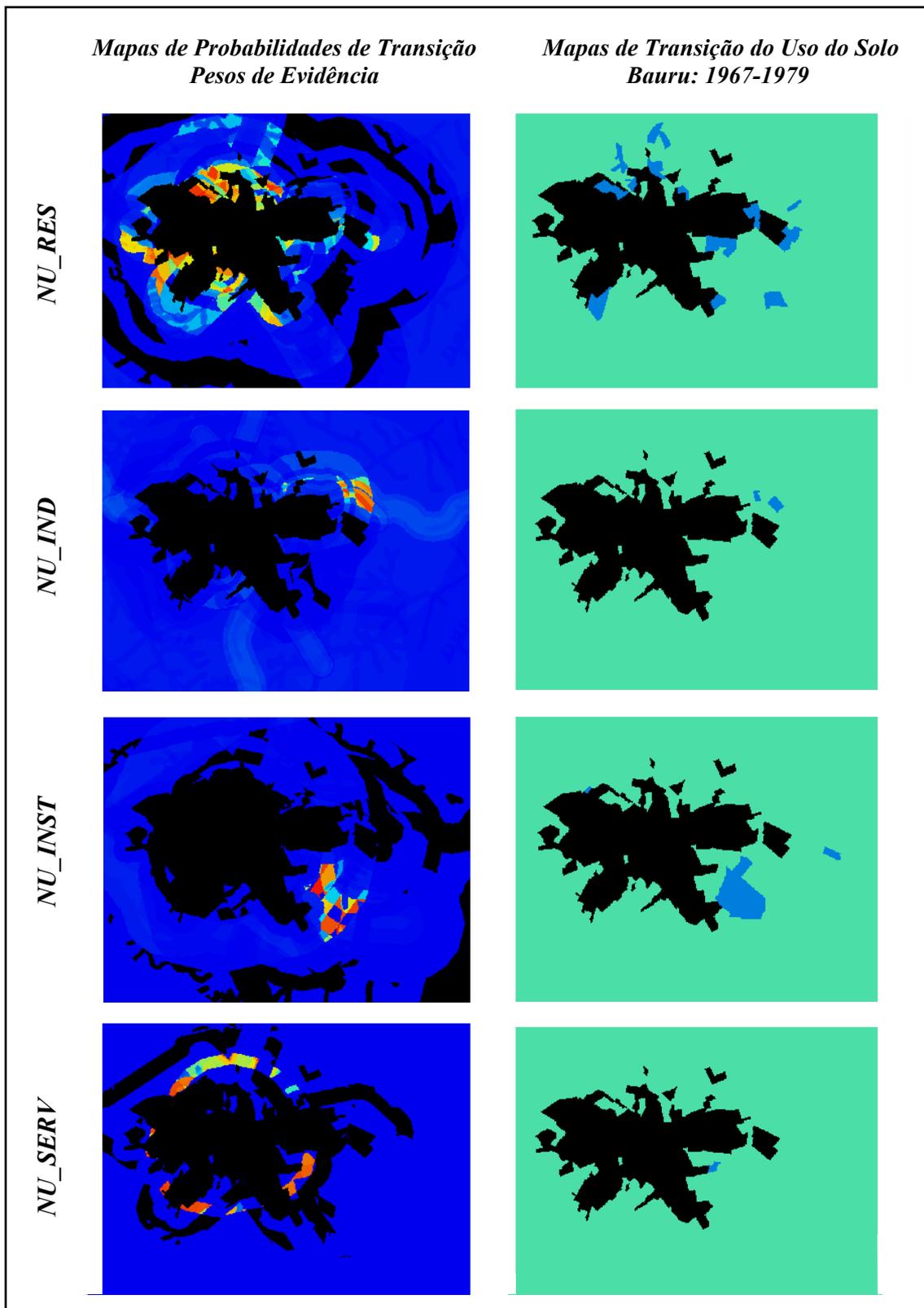
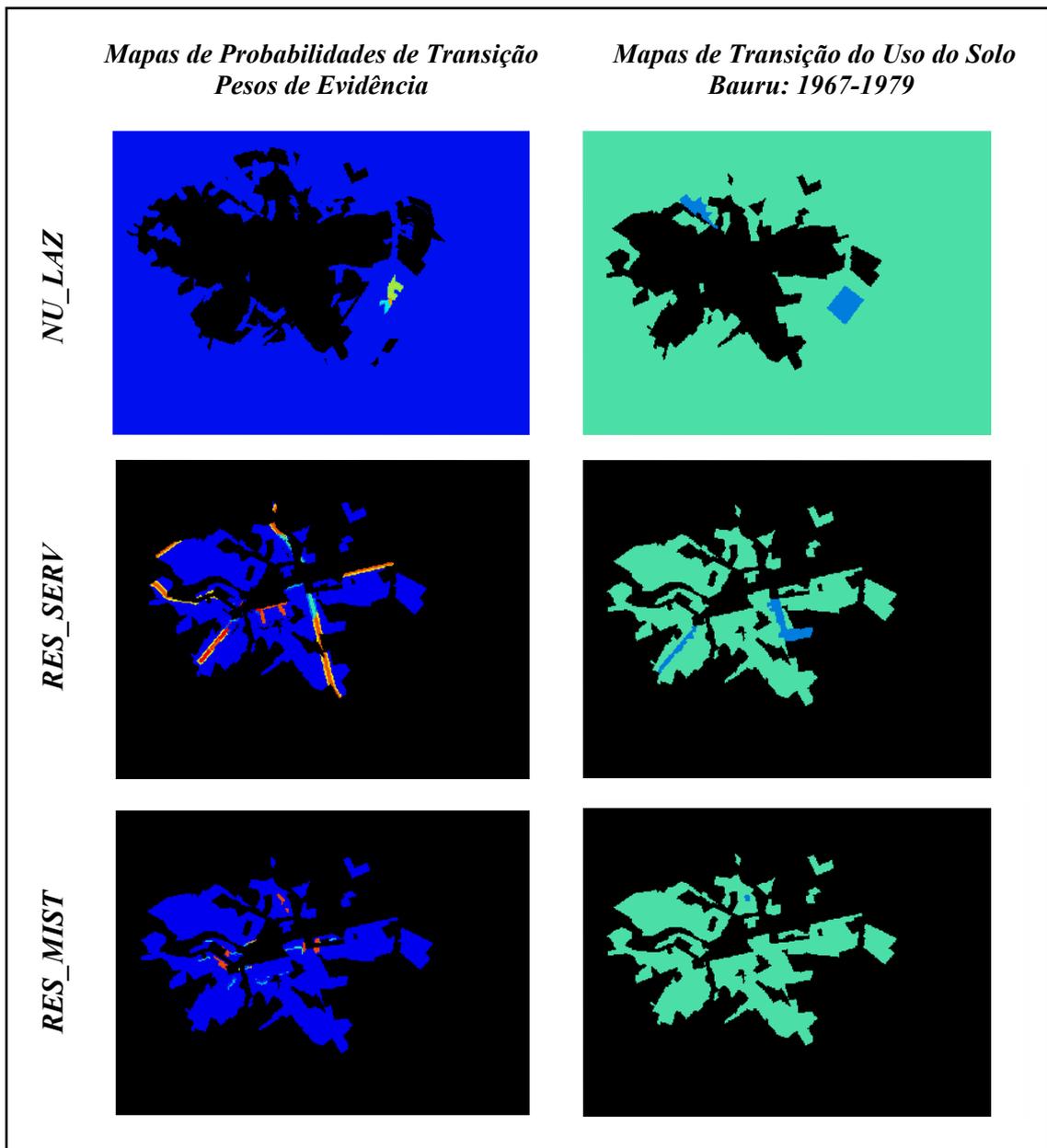


FIGURA 6.7a – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru.



Legendas:

	$P=0$	probabilidade nula		áreas onde transições de uso ocorreram
	↓	(valores crescentes)		áreas onde não ocorreram transições de uso
	$P=1$	probabilidade máxima		áreas não consideradas na análise de transição

FIGURA 6.7b – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru..

É válido realçar a habilidade desses mapas de probabilidades para detectar as áreas de mudanças (cor azul) nos correspondentes mapas de transição de uso, pois as regiões

avermelhadas nos mapas de probabilidades referem-se exatamente às áreas que possuem as mais altas probabilidades de transição.

Com os mapas de probabilidades de transição, é possível definirem-se os parâmetros internos do DINAMICA que produzem os melhores resultados de simulação (TABELA 6.7). Devido à aleatoriedade dos algoritmos de transição do DINAMICA, ainda que os mesmos conjuntos de mapas de evidências para cada tipo de transição e os parâmetros internos sejam mantidos em diferentes rodadas, distintos resultados de simulações serão produzidos. Assim, os melhores resultados de simulações de mudanças de uso do solo para a cidade de Bauru no período 1967–1979 são apresentados na FIGURA 6.8.

TABELA 6.7 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições do uso do solo em Bauru: 1967–1979.

<i>Transição de Uso do Solo</i>	<i>Tamanho Médio de Manchas</i>	<i>Variância do Tamanho</i>	<i>Proporção do 'Expand'</i>	<i>Proporção do 'Patcher'</i>	<i>Número de Iterações</i>
<i>NU_RES</i>	900	300	0,65	0,35	5
<i>NU_IND</i>	70	1	0	1,00	5
<i>NU_INST</i>	1000	0	0	1,00	5
<i>NU_SERV</i>	40	1	0	1,00	5
<i>NU_LAZ</i>	230	0	0	1,00	5
<i>RES_SERV</i>	25	1	0,10	0,90	5
<i>RES_MIST</i>	30	2	0	1,00	5

O algoritmo *patcher* provou ser adequado para a modelagem de loteamentos residenciais isolados da mancha urbana principal. No entanto, as formas desses loteamentos na modelagem não coincidem exatamente com aquelas observadas na realidade. Isto acontece porque esses contornos representam limites de propriedades imobiliárias. Dado que ações para a fusão ou desmembramento de lotes podem ocorrer a qualquer momento, alterando drasticamente suas formas, essas fronteiras podem ser consideradas como fatores instáveis, e portanto, impróprios para a modelagem.

As áreas exatas onde novos loteamentos residenciais são criados nem sempre são precisamente identificadas. Isto é devido ao fato de que esses novos investimentos

dependem das decisões de proprietários e empreendedores imobiliários, que definem as áreas a serem investidas em detrimento de outras localizações igualmente vantajosas. Entretanto, a meta da modelagem não é reproduzir fielmente a realidade, mas tão somente detectar principais padrões e tendências de mudanças do uso do solo.

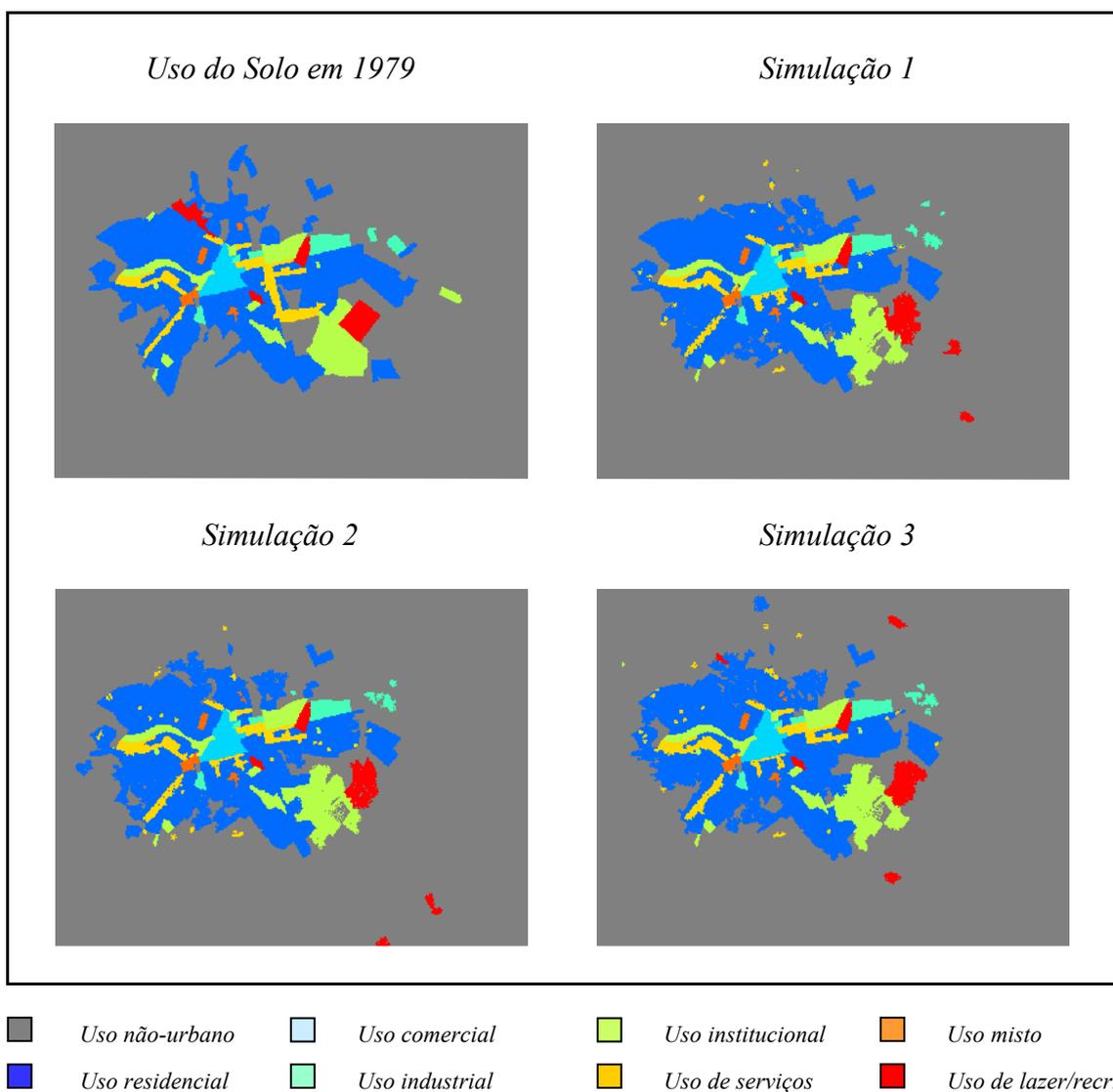


FIGURA 6.8 – Melhores simulações comparadas com o uso do solo em Bauri - 1979.

Esses resultados de simulação submeteram-se a testes de validação estatística baseados no procedimento de ajuste por resoluções múltiplas proposto por Constanza (1989), para janelas de tamanhos 3x3, 5x5 e 9x9, e $k = 0,5$ (TABELA 6.8).

TABELA 6.8 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Bauru: 1967-1979.

<i>Simulações</i>	<i>Qualidade do Ajuste (“Goodness-of-Fit” - F)</i>
S_1	$F = 0,944541$
S_2	$F = 0,942551$
S_3	$F = 0,941809$

Com base no processo de calibração executado, torna-se evidente que a probabilidade de certas áreas não-urbanas na cidade de Bauru abrigarem loteamentos residenciais (“transição de uso nu_res”) depende da existência prévia deste tipo de loteamentos nas circunvizinhanças, uma vez que isto implica a possibilidade de se estender rede de infraestrutura eventualmente existente nas imediações. Essa probabilidade também depende da maior proximidade dessas áreas aos agrupamentos de atividades comerciais, assim como na disponibilidade de acesso a essas áreas.

Quanto à transição de “áreas não-urbanas para uso industrial (nu_ind)”, há três grandes forçantes: a proximidade dessas áreas ao uso industrial previamente existente e a disponibilidade de acessos tanto rodoviário quanto ferroviário. Isto pode ser explicado pelo fato de que no processo produtivo industrial, a saída de algumas indústrias representa a matéria-prima de outras, o que acentua a necessidade de racionalização e otimização dos custos pela concentração de indústrias inter-relacionadas na mesma cadeia produtiva. Ademais, lotes nas vizinhanças de indústrias são não raro desvalorizados para outros usos, tornando-se competitivos para o uso industrial.

Com relação à implementação de grandes áreas institucionais (“nu_inst”), nota-se que elas surgem em áreas mais afastadas, relativamente distantes da zona comercial central da cidade, próximas de estradas periféricas, mas ao mesmo tempo, razoavelmente próximas às áreas de demanda (zonas residenciais).

Quanto à transição de “áreas não-urbanas para uso de serviços (nu_serv)”, três fatores são cruciais: a proximidade dessas áreas a agrupamentos de atividades comerciais, a sua

cercania ao uso residencial, e por fim, a sua localização estratégica em relação às principais vias de Bauru. O primeiro fator responde pelo mercado de fornecedores (e em alguns casos, também mercado de consumidores) de serviços; o segundo fator representa o mercado de consumidores por excelência; e o terceiro e último fator corresponde à acessibilidade para ambos mercados afeitos ao uso de serviços.

A criação de zonas de lazer e recreação (“nu_laz”) ocorre em áreas mais periféricas com boas condições de acessibilidade, e por vezes ao longo de margens baixas dos rios, uma vez que essas áreas são inundáveis, e assim, impróprias para abrigar outros usos urbanos.

A transição “residencial para uso de serviços (res_serv)” supõe a inserção de serviços em áreas urbanas previamente consolidadas. Desta forma, uma vez que este tipo de transição já ocorre em meio a mercados consumidores e fornecedores, ele irá apenas priorizar boas condições de acessibilidade, tais como a proximidade a estradas asfaltadas e uma localização estratégica em relação aos eixos de serviços N-S / E-O.

Finalmente, o último tipo de transição concerne a mudança de “uso residencial para uso misto (res_mist)”. As zonas de uso misto, que na verdade atuam como subcentros urbanos, constituem uma espécie de consolidação de centros comerciais secundários, que passam a atrair equipamentos sociais e de serviços além de atividades comerciais. Esta transição supõe a disponibilidade de rede de água e a existência de boas condições de acessibilidade. Essas áreas também procuram localizar-se não muito distantes das áreas comerciais centrais, já que elas dependem do fornecimento especializado por parte dessas áreas, mas não muito próximas às mesmas por razões de competitividade.

6.1.2 Período de Simulação: 1979 – 1988

6.1.2.1 Método de Pesos de Evidência

Conforme mencionado na Seção 6.1.1, a população de Bauru no tempo inicial deste período de simulação era de 164.105 habitantes, dos quais 159.926 pessoas eram habitantes urbanos. Em 1988, a população total somava 236.740, dos quais 232.005 habitantes moravam em áreas urbanas (IBGE, 1991). A taxa de crescimento da população

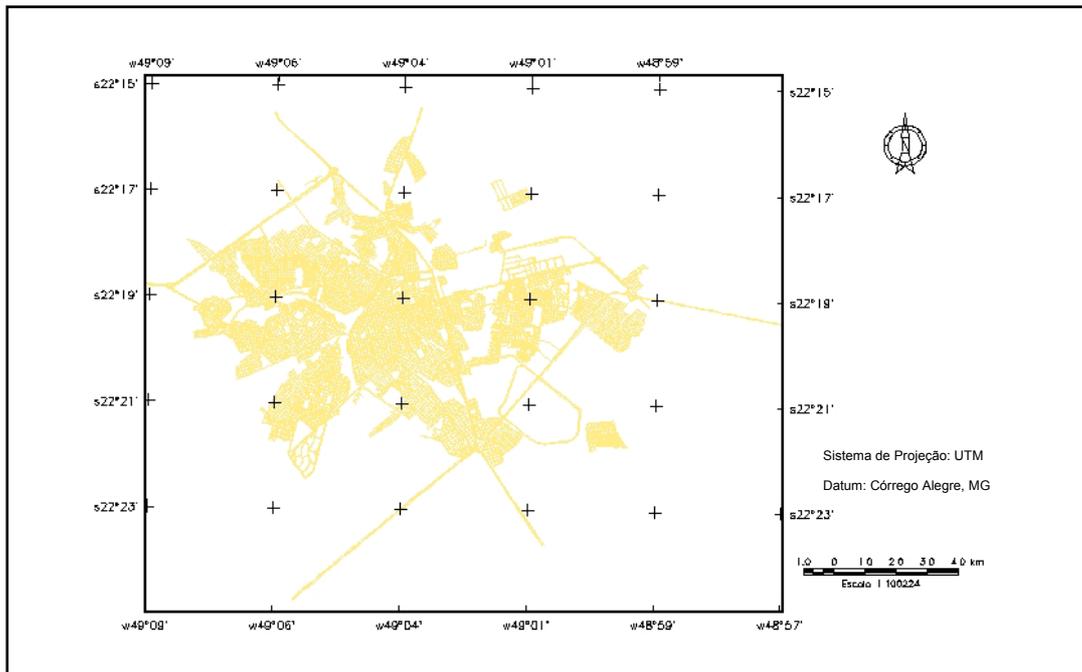


FIGURA 6.9 – Mapa oficial da cidade de Bauru em 1979.
 FONTE: SEPLAN (1979a).

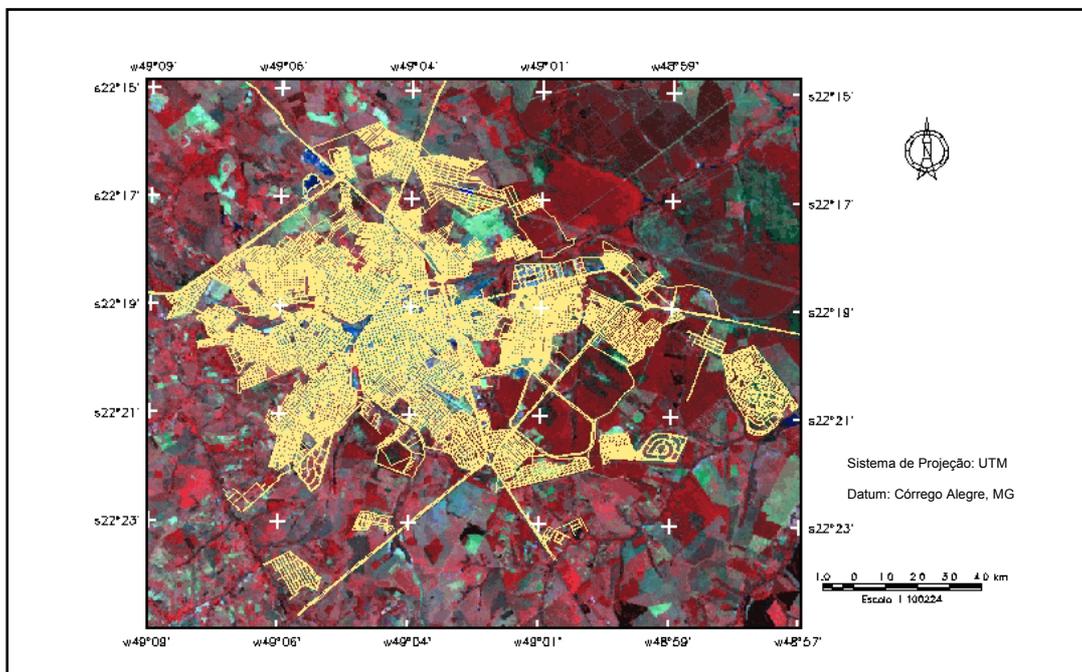


FIGURA 6.10 – Imagem TM – 5 de Bauru e mapa oficial da cidade em 1988.
 FONTE: INPE (1988) e SEPLAN (1988a).

para este período é comparativamente menor que nos períodos precedentes, permanecendo em torno de 1,45%. As correspondentes mudanças na área urbana podem ser vistas nas FIGURAS 6.9 e 6.10, que apresentam os mapas da cidade no período.

Os mapas de uso do solo inicial e final usados no período de simulação 1979 – 1988 (FIGURA 6.11) foram elaborados com base nos dois mapas oficiais anteriormente apresentados, em procedimentos de generalização aplicados aos mapas de uso do solo de 1979 (SEPLAN, 1979a) e 1988 (SEPLAN, 1988a), bem como na imagem de satélite impressa de Bauru em 1979 (INPE, 1979) e na imagem de satélite digital em 1988 (INPE, 1988).

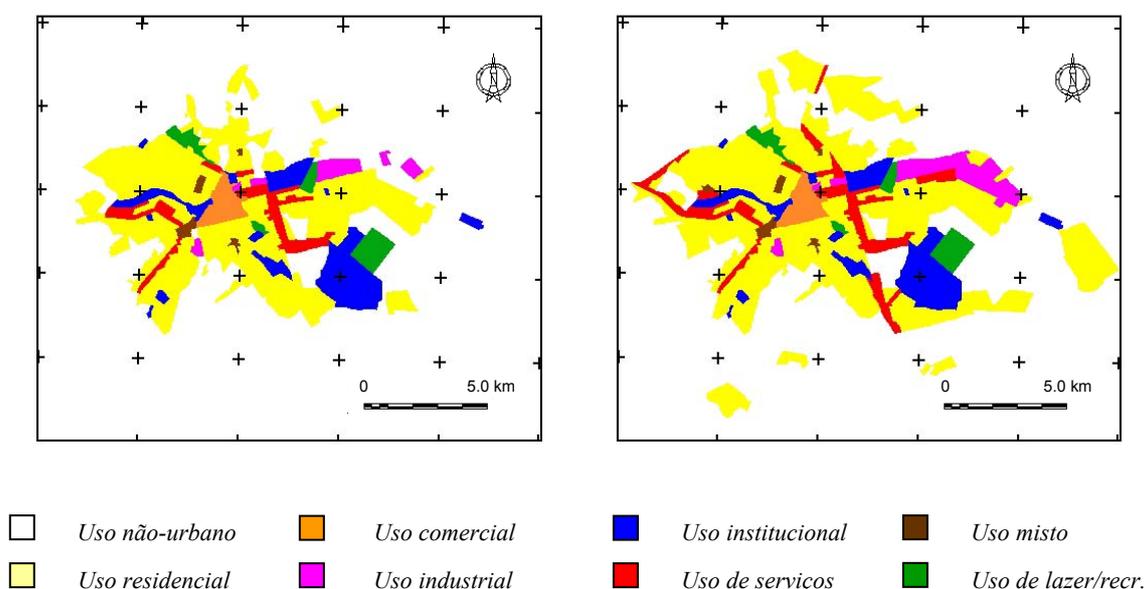


FIGURA 6.11 – Mapa de uso do solo de Bauru em 1979 (esquerda) e 1988 (direita).

Uma operação de tabulação cruzada foi feita entre ambos os mapas de uso do solo (FIGURA 6.12) de forma a gerar percentuais de transição para os diferentes tipos de mudanças de uso do solo existentes (TABELAS 6.9 e 6.10).

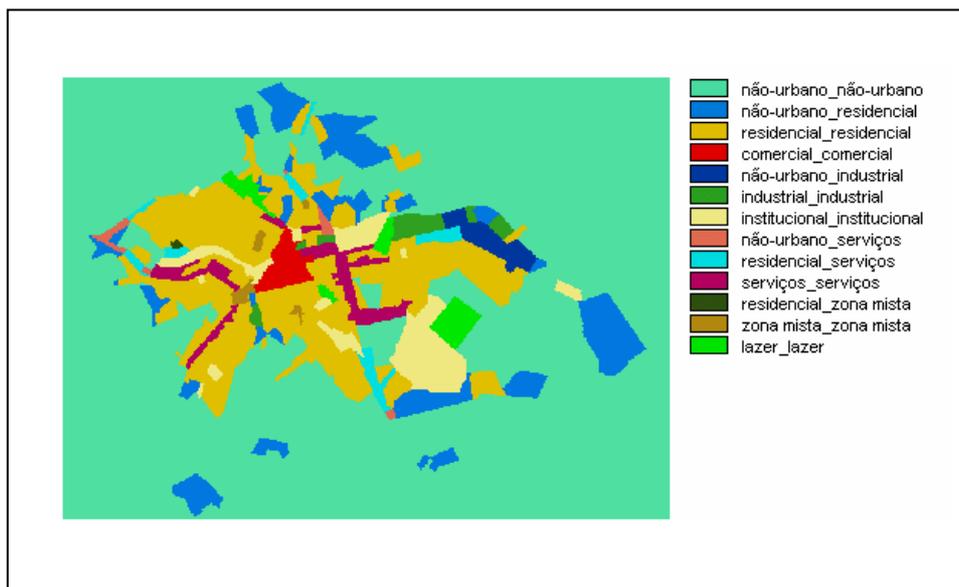


FIGURA 6.12 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso de Bauru: 1979-1988.

TABELA 6.9 – Transições de uso do solo existentes em Bauru: 1979-1988.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>TRANSIÇÃO DE USO DO SOLO</i>
<i>NU_RES</i>	<i>Não-urbano para residencial</i>
<i>NU_IND</i>	<i>Não-urbano para industrial</i>
<i>NU_SERV</i>	<i>Não-urbano para serviços</i>
<i>RES_SERV</i>	<i>Residencial para serviços</i>
<i>RES_MIST</i>	<i>Residencial para uso misto</i>

TABELA 6.10 – Matriz de probabilidades de transição globais para Bauru: 1979-1988.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Com.</i>	<i>Industr.</i>	<i>Instit.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-urbano</i>	0,9171	0,0698	0	0,0095	0	0,0036	0	0
<i>Resid.</i>	0	0,9380	0	0	0	0,0597	0,0023	0
<i>Com.</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Industr.</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Instit.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Para o período de simulação 1979–1988, doze variáveis foram selecionadas (DAE, 1979a, 1979b, 1979c, 1979d, 1979d; SEPLAN, 1979a, 1979b), algumas das quais são mostradas na FIGURA 6.13.

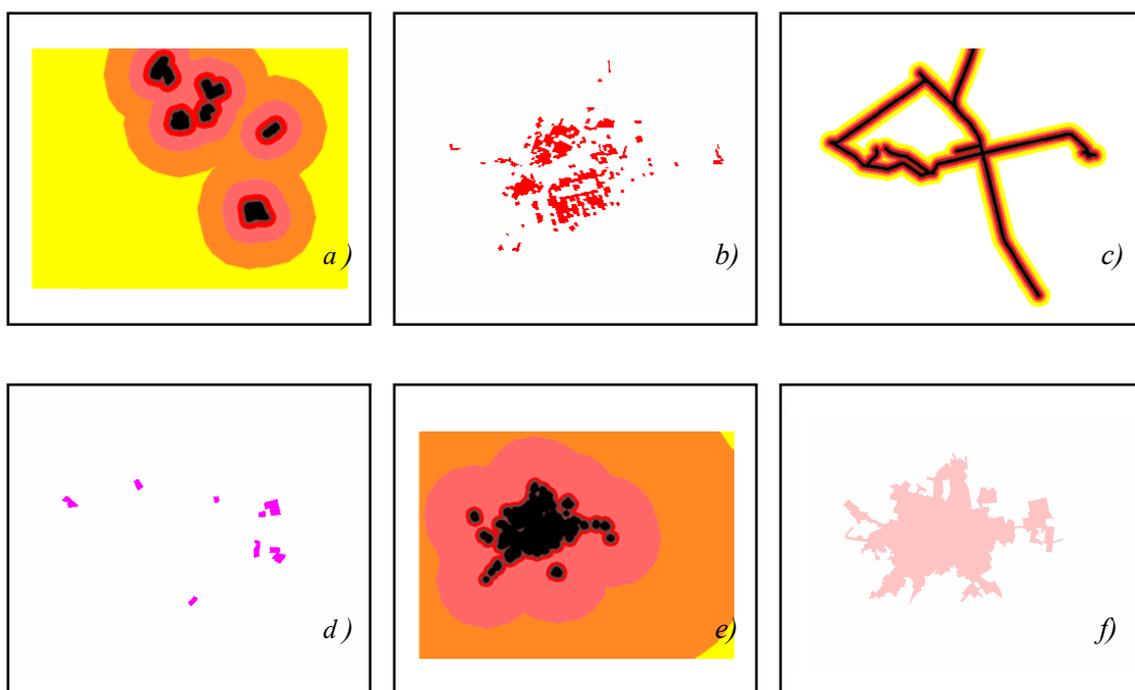


FIGURA 6.13 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições em Bauru durante o período 1979 – 1988: a) distâncias a loteamentos residenciais isolados; b) densidade média-alta de ocupação; c) distâncias aos eixos de serviços e comércio; d) existência de habitação popular; e) distâncias a faixas de agrupamentos de atividades comerciais; f) rede de água.

A TABELA 6.11 mostra as notações utilizadas para cada mapa de variável empregado neste experimento de simulação; a TABELA 6.12 indica qual variável foi selecionada para explicar cada uma das cinco transições existentes; a TABELA 6.13 apresenta os valores obtidos para o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U)

para os pares de variáveis usadas para explicar o mesmo tipo de transição; e finalmente a TABELA 6.14 apresenta os valores para os pesos positivos de evidência.

TABELA 6.11 – Variáveis independentes das transições de uso em Bauru: 1979-1988.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>VARIÁVEIS DE MUDANÇAS DE USO FÍSICAS OU SÓCIO-ECONÔMICAS</i>
<i>agua</i>	<i>Área servida por rede de água.</i>
<i>med_dens</i>	<i>Densidade média-alta de ocupação (25% a 40%).</i>
<i>hab_pop</i>	<i>Existência de habitação popular.</i>
<i>com_kern</i>	<i>Distâncias a diferentes faixas de concentração de atividades comerciais, definidas pelo estimador Kernel.</i>
<i>dist_ind</i>	<i>Distâncias a zonas industriais.</i>
<i>dist_res</i>	<i>Distâncias a zonas residenciais.</i>
<i>per_res</i>	<i>Distâncias a loteamentos residenciais periféricos, isolados da mancha urbana principal.</i>
<i>dist_inst</i>	<i>Distâncias a super-estrutura (uso institucional), isolada da mancha urbana principal.</i>
<i>exist_est</i>	<i>Distâncias às principais vias existentes.</i>
<i>serv_eix</i>	<i>Distâncias aos eixos de serviços e comércio.</i>
<i>plan_est</i>	<i>Distâncias às estradas planejadas.</i>
<i>per_est</i>	<i>Distâncias a estradas periféricas, que atravessam áreas não-ocupadas.</i>

TABELA 6.12 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Bauru: 1979-1988.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>NU_RES</i>	<i>NU_IND</i>	<i>NU_SERV</i>	<i>RES_SERV</i>	<i>RES_MIST</i>
<i>agua</i>				♦	
<i>med_dens</i>					♦
<i>hab_pop</i>					♦
<i>com_kern</i>	♦		♦		
<i>dist_ind</i>		♦			
<i>dist_res</i>			♦		
<i>per_res</i>	♦				
<i>dist_inst</i>	♦				
<i>exist_est</i>	♦				
<i>serv_eix</i>		♦	♦	♦	
<i>plan_est</i>					♦
<i>per_est</i>	♦				♦

Da mesma forma que no primeiro período de simulação, como nenhum dos valores de associação superou o limiar de 0,50 simultaneamente para ambos os índices, nenhuma das variáveis preliminarmente selecionadas para a modelagem foram descartadas da análise.

TABELA 6.13 – Associações entre variáveis independentes - Bauru: 1979-1988.

VARIÁVEL A	VARIÁVEL B	ÍNDICE DE CRAMER ($V_{A,B}$)	INCERTEZA ($U_{A,B}$)	
<i>agua</i>	<i>serv_eix</i>	0,3257	0,0767	
<i>med_dens</i>	<i>hab_pop</i>	0,0460	0,0017	
	<i>plan_est</i>	0,2617	0,0701	
	<i>per_est</i>	0,0201	0,0003	
	<i>plan_est</i>	0,1174	0,0188	
<i>hab_pop</i>	<i>per_est</i>	0,0480	0,0047	
	<i>dist_res</i>	0,4129	0,3447	
<i>com_kern</i>	<i>per_res</i>	0,1142	0,0310	
	<i>dist_inst</i>	0,1218	0,0520	
	<i>exist_est</i>	0,2685	0,1499	
	<i>serv_eix</i>	0,2029	0,1099	
	<i>per_est</i>	0,0434	0,0064	
	<i>dist_ind</i>	<i>serv_eix</i>	0,1466	0,0477
	<i>dist_res</i>	<i>serv_eix</i>	0,2142	0,1002
<i>per_res</i>	<i>dist_inst</i>	0,1487	0,0559	
	<i>exist_est</i>	0,0592	0,0078	
	<i>per_est</i>	0,1733	0,0553	
	<i>dist_inst</i>	<i>exist_est</i>	0,0601	0,0108
<i>dist_inst</i>	<i>per_est</i>	0,0765	0,0238	
	<i>exist_est</i>	0,0239	0,0019	
<i>plan_est</i>	<i>per_est</i>	0,0247	0,0029	

TABELA 6.14 – Valores de W^+ para as variáveis independentes - Bauru: 1979–1988.

Transição de Uso	Variável	Pesos Positivos de Evidência W^+						
		1	2	3	4	5	6	7
<i>NU_RES</i>	<i>com_kern</i> ¹	3,749	2,106	1,864	0,491	-0,323	0	nd
	<i>per_res</i> ³	1,968	1,615	1,392	0,892	-0,626	-0,469	nd
	<i>dist_inst</i> ⁴	0,003	0,600	1,254	0,727	-0,359	-0,089	nd
	<i>exist_est</i> ⁵	0,231	0,320	0,353	0,510	0,443	0,196	-0,085
	<i>per_est</i> ⁶	2,377	2,269	2,068	1,984	1,444	0,857	-0,127
<i>NU_IND</i>	<i>dist_inst</i> ²	3,862	4,016	3,792	3,452	1,763	0	0
	<i>serv_eix</i> ⁵	2,722	2,799	2,676	2,625	2,525	1,727	-3,832
<i>NU_SERV</i>	<i>com_kern</i> ¹	3,412	4,469	2,912	0,878	0	0	nd
	<i>dist_res</i> ³	2,144	1,523	0,621	-0,065	0	0	nd
	<i>serv_eix</i> ⁵	3,508	3,321	2,917	1,869	0,450	0	0
<i>RES_SERV</i>	<i>agua</i>	<u>Presença -0,6611</u>			<u>Ausência 0,2883</u>			
	<i>serv_eix</i> ⁵	2,780	1,948	1,461	0,888	-0,297	-1,412	-3,284
<i>RES_MIST</i>	<i>med_dens</i>	<u>Presença 0,6452</u>			<u>Ausência -0,0635</u>			
	<i>hab_pop</i>	<u>Presença 2,4678</u>			<u>Ausência -0,3214</u>			
	<i>plan_est</i> ⁵	3,506	1,863	0	0	0	0	0
	<i>per_est</i> ⁶	1,775	1,652	1,848	0,903	0	0	0

Nota: Faixas de distâncias em metros

nd : não disponível

¹ 1: 0-500; 2: 500-1000; 3: 1000-1500; 4: 1500-10000; 5: 10000-30000; 6: > 30000

² 1: 0-500; 2: 500-1000; 3: 1000-1500; 4: 1500-2000; 5: 2000-5000; 6: 5000-10000; 7: >10000

³ 1: 0-500; 2: 500-1000; 3: 1000-2000; 4: 2000-5000; 5: 5000-10000; 6: > 10000

⁴ 1: 0-500; 2: 500-1000; 3: 1000-3000; 4: 3000-8000; 5: 8000-15000; 6: > 15000

⁵ 1: 0-250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1250; 6: 1250-2000; 7: > 2000

⁶ 1: 0-250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1500; 6: 1500-2500; 7: > 2500

Os mapas de probabilidades de transição, gerados pelo DINAMICA com base nos valores dos pesos positivos de evidência (W^+), juntamente com os respectivos mapas de transição de uso são vistos nas FIGURAS 6.14 a e 6.14b.

Os argumentos empregados para explicar as transições “nu_res”, “nu_ind” e “nu_serv” no período 1967-1979 (Seção 6.1.1) também são válidos para justificar essas mesmas transições no presente período. Apenas diferenças menores dizem respeito aos requisitos para as transições “res_serv” e “res_mist”.

A transição “residencial para uso de serviços (res_serv)” de 1979 a 1988 supõe a inserção de serviços em áreas residenciais. Desta forma, uma vez que este tipo de transição já ocorre em meio a mercados fornecedores e consumidores, ele priorizará apenas uma localização estratégica em relação aos eixos de serviços N-S / E-O e irá ocorrer na ausência de rede de água. Nota-se que neste caso W^+ é negativo. Isto significa que áreas próximas aos eixos de serviços, porém privadas de água no início da simulação referem-se àquelas áreas localizadas no limite imediato de áreas urbanas consolidadas, exatamente onde novas zonas de serviços são suscetíveis de ocorrerem.

Os fatores decisivos para a conversão de “áreas residenciais em zonas de uso misto (res_mist)” no período 1979-1988 são (a) a existência de densidade média-alta de ocupação (valores maiores de densidade ocorrem apenas na zona comercial central da cidade ou nas imediações de zonas de uso misto já existentes); (b) a presença ou proximidade de conjuntos de habitação popular (pois eles abrigam as maiores densidades de ocupação em áreas mais periféricas, e assim, maiores mercados consumidores); (c) proximidade a vias planejadas ou periféricas, pois novas zonas de uso misto surgem em áreas distantes, de modo a não competir com a zona comercial central.

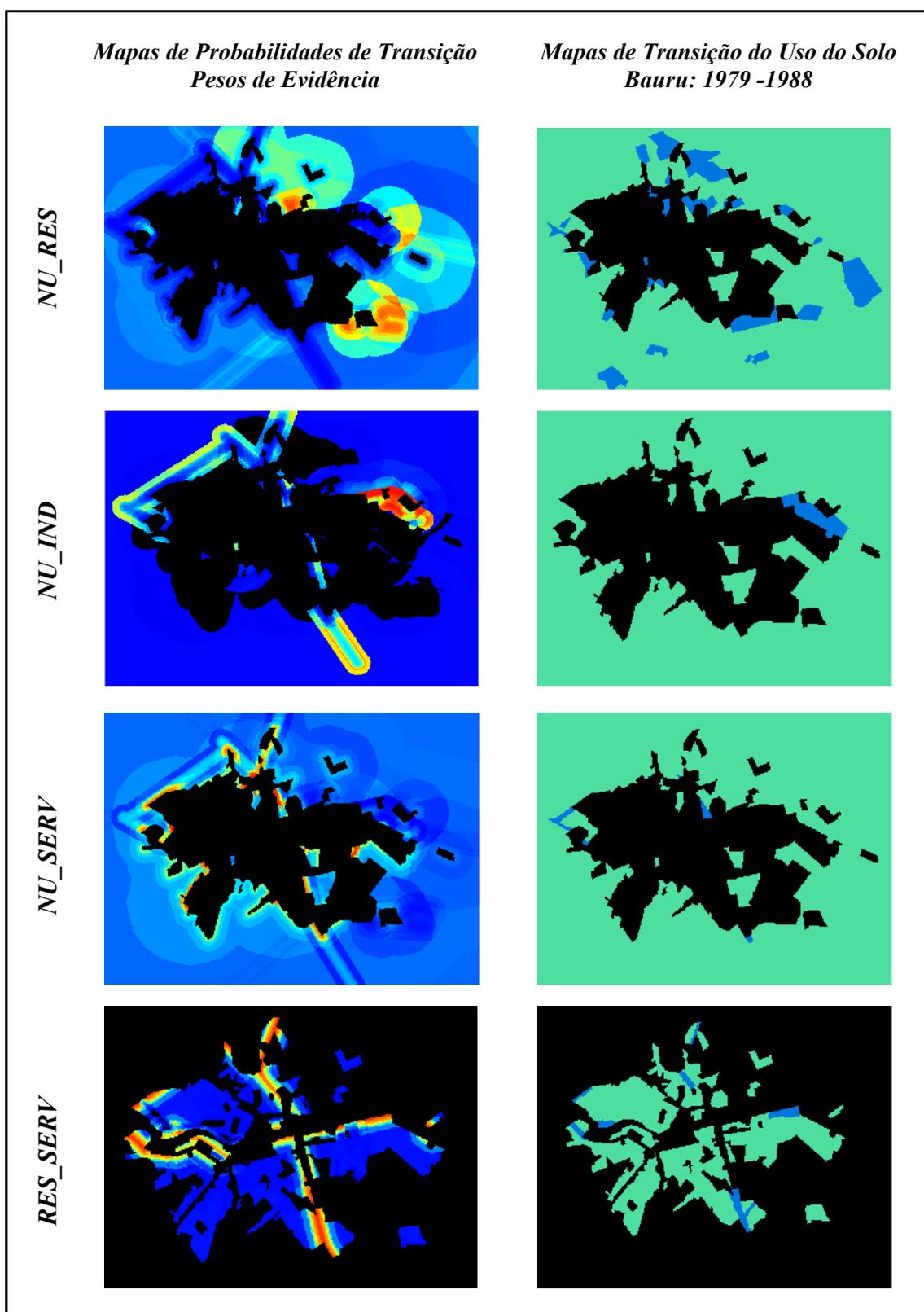


FIGURA 6.14a – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru..

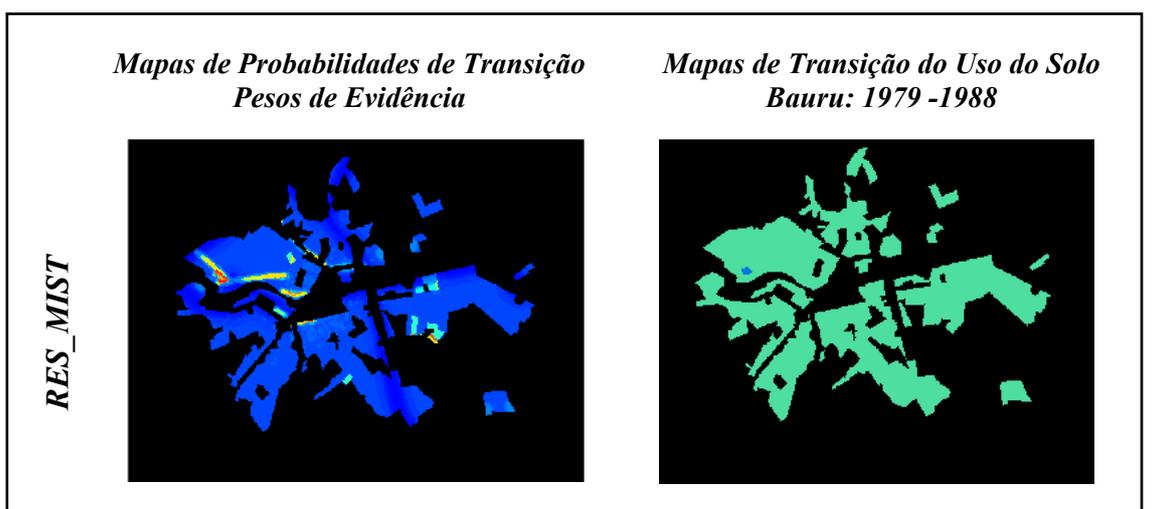


FIGURA 6. 14b – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru..

Os três melhores resultados de simulação produzidos para o período 1979-1988 são apresentados na FIGURA 6.15. Os parâmetros internos do DINAMICA associados com essas simulações ótimas são vistos na TABELA 6.15, cujos testes de validação estatística para janelas 3x3, 5x5 e 9x9, e $k = 0,5$ estão listados na TABELA 6.16.

TABELA 6.15 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições do uso do solo em Bauru: 1979–1988.

<i>Transição de Uso do Solo</i>	<i>Tamanho Médio de Manchas</i>	<i>Variância do Tamanho</i>	<i>Proporção do 'Expander'</i>	<i>Proporção do 'Patcher'</i>	<i>Número de Iterações</i>
<i>NU_RES</i>	<i>1100</i>	<i>500</i>	<i>0,65</i>	<i>0,35</i>	<i>5</i>
<i>NU_IND</i>	<i>320</i>	<i>1</i>	<i>1,00</i>	<i>0</i>	<i>5</i>
<i>NU_SERV</i>	<i>25</i>	<i>2</i>	<i>0,50</i>	<i>0,50</i>	<i>5</i>
<i>RES_SERV</i>	<i>25</i>	<i>2</i>	<i>0,10</i>	<i>0,90</i>	<i>5</i>
<i>RES_MIST</i>	<i>35</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>1,00</i>	<i>5</i>

TABELA 6.16 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso obtidas pelo método de pesos de evidência para Bauru: 1979–1988.

<i>Simulações</i>	<i>Qualidade do Ajuste (“Goodness-of-Fit” - F)</i>
S_1	$F = 0,903103$
S_2	$F = 0,896722$
S_3	$F = 0,901703$

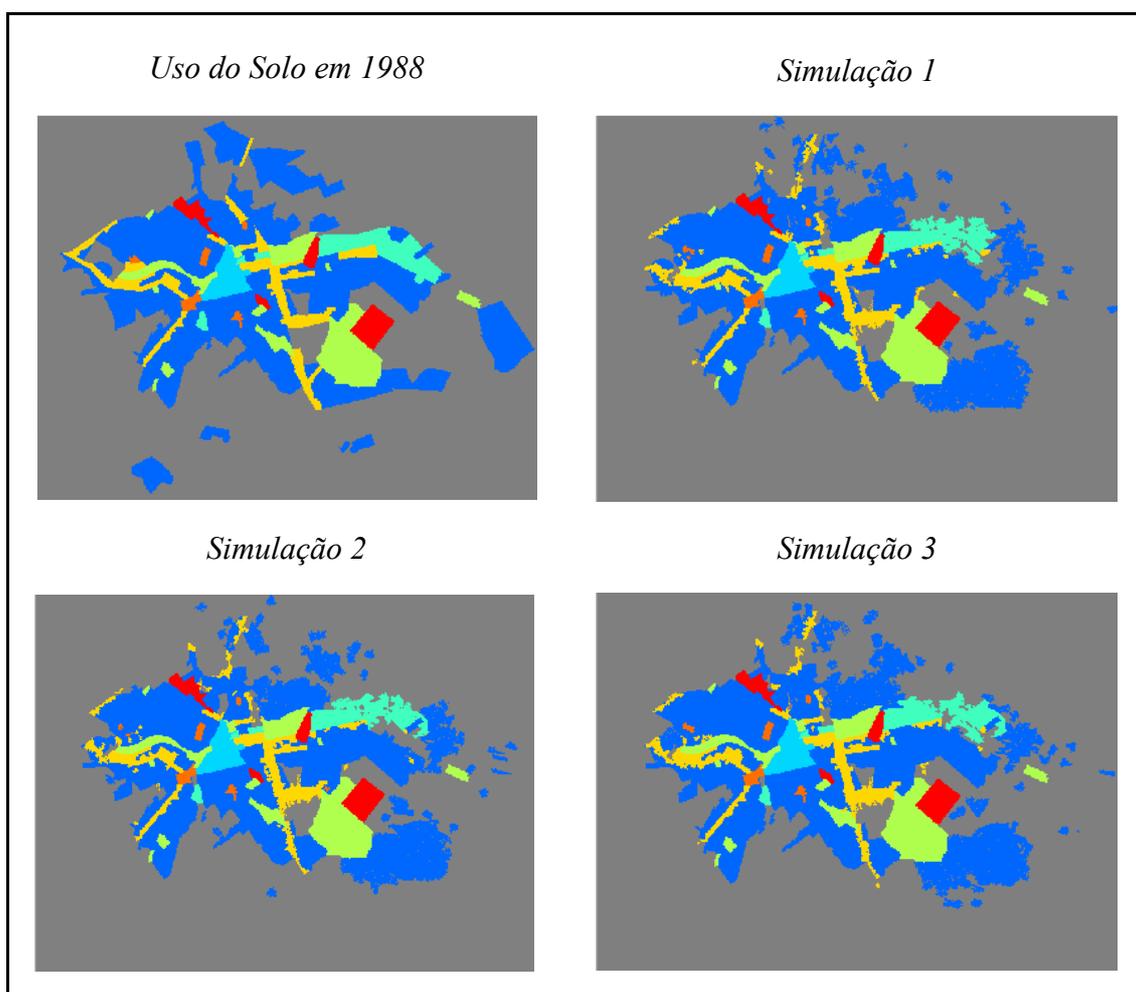


FIGURA 6.15 – Melhores simulações produzidas pelo método de pesos de evidência comparadas com o uso do solo real em Bauru - 1988.

6.1.2.2 Método de Regressão Logística

No método de regressão logística, todas as variáveis contínuas, i.e., todas as variáveis independentes relacionadas a mapas de distâncias, foram tratadas como categóricas, possuindo classes temáticas associadas a cada faixa de distância. Isto foi feito em vista do fato de que praticamente todas elas apresentavam um comportamento não-linear e/ou multimodal em relação às respectivas transições de uso do solo. Lidar com esta informação como variáveis contínuas implicaria uma grande heterogeneidade de dados, o que certamente traria ruído às simulações e prejudicaria a calibração do modelo.

De acordo com o que foi exposto na Seção 5.3.2.2, procedimentos empíricos foram usados para a seleção de variáveis, como a visualização das mesmas sobrepostas ao mapa final de uso do solo, visando à extração do conjunto daquelas mais significativas para explicar os cinco tipos existentes de mudanças de uso. Um outro método auxiliar foi a análise de *boxplots* gerados para cada variável independente em relação à respectiva transição de uso. A FIGURA 6.16 mostra exemplos de *boxplots*. Nota-se no primeiro caso, que a maioria das células onde a transição de uso residencial para misto ocorre coincide com as células onde habitação popular é também encontrada. No segundo caso, o *boxplot* mostra que a transição de não-urbano para uso industrial se sucede em áreas muito próximas de zonas industriais previamente existentes.

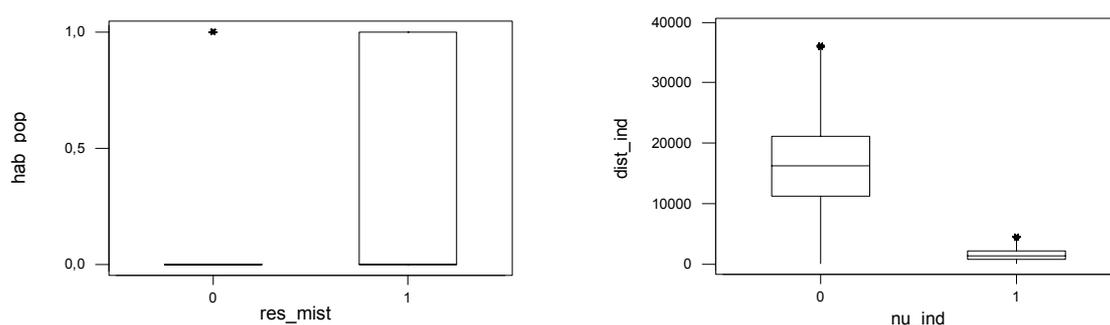


FIGURA 6.16 – *Boxplot* da transição 'residencial para uso misto' versus conjuntos habitacionais (esquerda) e *boxplot* da transição 'não-urbano para uso industrial' versus distâncias a zonas industriais (direita) – Bauru: 1979-1988.

A análise exploratória também levou em conta o índice de correlação (A), determinado para pares de variáveis selecionadas para explicar o mesmo tipo de transição do uso do solo. Este índice provou ser altamente sensível à autocorrelação espacial entre células, pois ele é obtido com base em uma estatística pixel a pixel. Assim, este índice não foi usado como um critério eliminatório para a seleção de variáveis, e as medidas de associação fornecidas pelo Índice de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) prevaleceram também na análise exploratória do método de regressão logística. A TABELA 6.17 apresenta os valores obtidos para o índice de correlação (A).

TABELA 6.17 – Correlações entre variáveis independentes - Bauru: 1979–1988.

<i>VARIÁVEL A</i>	<i>VARIÁVEL B</i>	<i>ÍNDICE DE CORRELAÇÃO ($A_{A,B}$)</i>
<i>agua</i>	<i>serv_eix</i>	-0,3060
<i>med_dens</i>	<i>hab_pop</i>	0,0530
	<i>plan_est</i>	-0,1600
	<i>per_est</i>	-0,0560
<i>hab_pop</i>	<i>plan_est</i>	-0,0760
	<i>per_est</i>	-0,0440
<i>com_kern</i>	<i>dist_res</i>	0,9050
	<i>per_res</i>	0,1580
	<i>dist_inst</i>	-0,2930
	<i>exist_est</i>	0,7670
	<i>serv_eix</i>	0,7060
<i>dist_ind</i>	<i>per_est</i>	0,4490
	<i>serv_eix</i>	0,5630
<i>dist_res</i>	<i>serv_eix</i>	0,7900
<i>per_res</i>	<i>dist_inst</i>	0,7070
	<i>exist_est</i>	0,1860
	<i>per_est</i>	0,5380
<i>dist_inst</i>	<i>exist_est</i>	-0,1190
	<i>per_est</i>	0,2170
<i>exist_est</i>	<i>per_est</i>	0,3090
<i>plan_est</i>	<i>per_est</i>	0,0658

Para se estimar os parâmetros (β_i) do modelo de regressão logística, as variáveis independentes e os mapas de transição de uso foram convertidos para grades numéricas no SPRING. Esses mapas de transição foram gerados através de uma operação de álgebra de mapas no SPRING, por meio de sua linguagem espacial denominada Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico ('LEGAL').

número de iterações (20.000). Conseqüentemente, os produtos dessas variáveis foram suprimidos do modelo.

Nota-se na TABELA 6.18, que em todos os modelos, exceto para o teste de Hosmer-Lemeshow referente à transição “res_mist”, os testes de qualidade do ajuste não indicam significância estatística ($p > 0,05$). Conforme a Seção 5.2.2.5, esses testes devem ser usados de maneira sábia e crítica. De qualquer forma, o ajuste desses cinco modelos foi efetivamente avaliado por meio do teste de validação estatística proposto por Constanza (1989), onde a dimensão espacial dos modelos é devida e cuidadosamente considerada.

TABELA 6.18 – Resultados das análises de regressão logística para Bauru: 1979–1988.

VARIÁVEIS	NU_RES		NU_IND		NU_SERV		RES_SERV		RES_MIST	
	β_k	P								
Constante (β_0)	7,646900	0,000	5,274530	0,000	4,865300	0,000	-1,551900	0,000	3,901200	0,000
agua	#	#	#	#	#	#	1,708810	0,000	#	#
med_dens	#	#	#	#	#	#	#	#	0,383300	0,232
hab_pop	#	#	#	#	#	#	#	#	-1,068800	0,000
com_kern	-0,924990	0,000	#	#	-1,461660	0,000	#	#	#	#
dist_ind	#	#	-1,048320	0,000	#	#	#	#	#	#
dist_res	#	#	#	#	0,027680	0,442	#	#	#	#
per_res	-0,392090	0,000	#	#	#	#	#	#	#	#
dist_inst	-0,405525	0,000	#	#	#	#	#	#	#	#
exist_est	0,051476	0,000	#	#	#	#	#	#	#	#
serv_eix	#	#	-0,741110	0,000	-0,974470	0,000	-0,929550	0,000	#	#
plan_est	#	#	#	#	#	#	#	#	-1,865200	0,000
per_est	-0,309469	0,000	#	#	#	#	#	#	-0,521040	0,000

RESULTADOS DOS TESTES DE QUALIDADE DO AJUSTE (GOODNESS-OF-FIT)										
Testes	Qui-quadrado	P								
Pearson	41.202,475	0,000	13.639,316	0,000	938,120	0,000	338,064	0,000	422,206	0,000
Deviance	30.435,653	0,000	6.055,790	0,000	774,369	0,000	341,693	0,000	328,558	0,000
Hosmer-Lem.	613,082	0,000	258,618	0,000	44,667	0,000	247,916	0,000	1,653	0,438

Com os parâmetros (β_i) estimados para cada um dos cinco tipos de transições de uso do solo, o DINAMICA irá produzir, da mesma forma que no método de pesos de evidência, os mapas de probabilidades de transição para cada tipo de mudança de uso existente. Esses mapas e seus respectivos mapas de transição de uso são apresentados nas FIGURAS 6.17a e 6.17b.

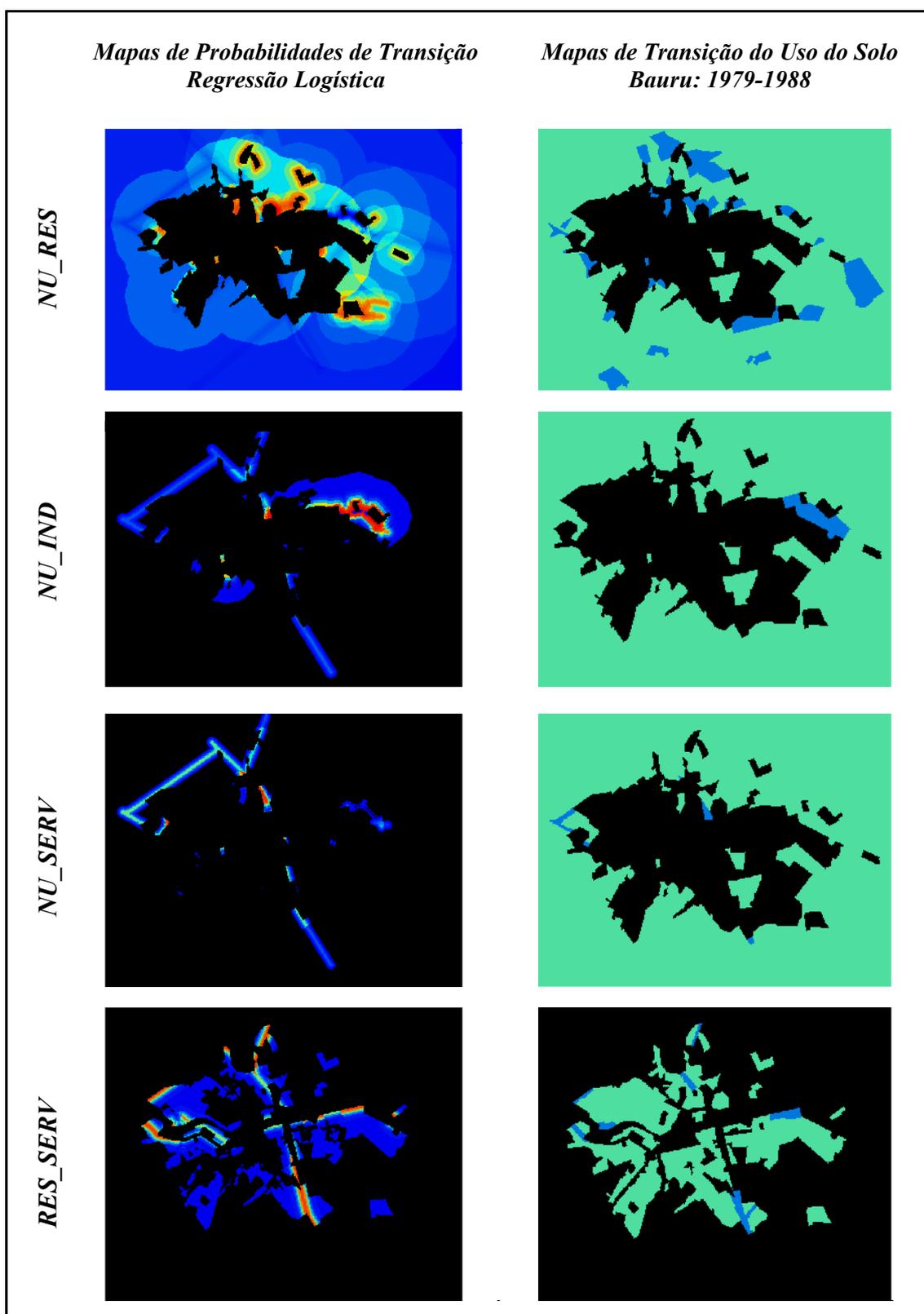


FIGURA 6.18a – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru.

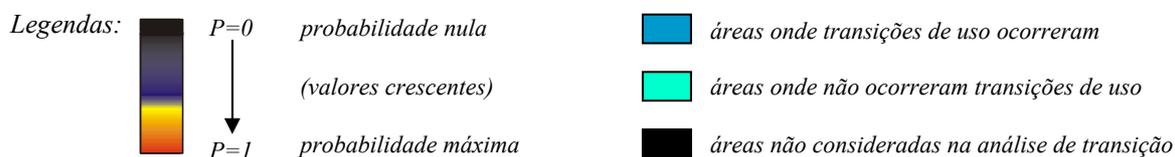
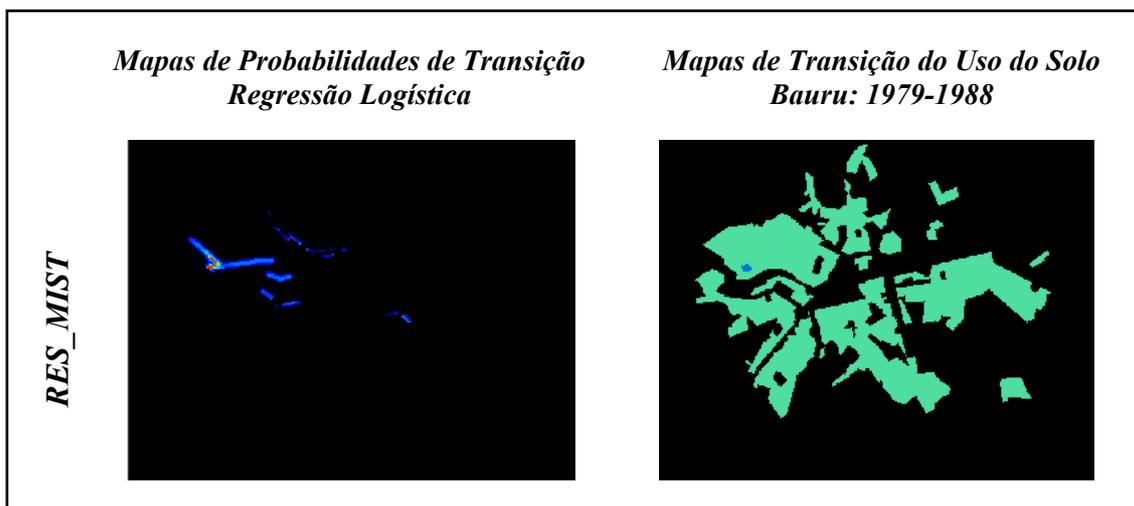


FIGURA 6.18b – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru..

Os três melhores resultados de simulação produzidos para o período 1979-1988 são apresentados na FIGURA 6.19. Os parâmetros internos do DINAMICA associados com essas simulações ótimas são vistos na TABELA 6.15, cujos testes de validação estatística para janelas 3x3, 5x5 e 9x9, e $k = 0,5$ estão listados na TABELA 6.19.

TABELA 6.19 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições obtidas pelo método de regressão logística para Bauru: 1979-1988.

<i>Simulações</i>	<i>Qualidade do Ajuste (“Goodness-of-Fit” - F)</i>
S_1	$F = 0,905172$
S_2	$F = 0,907539$
S_3	$F = 0,907868$

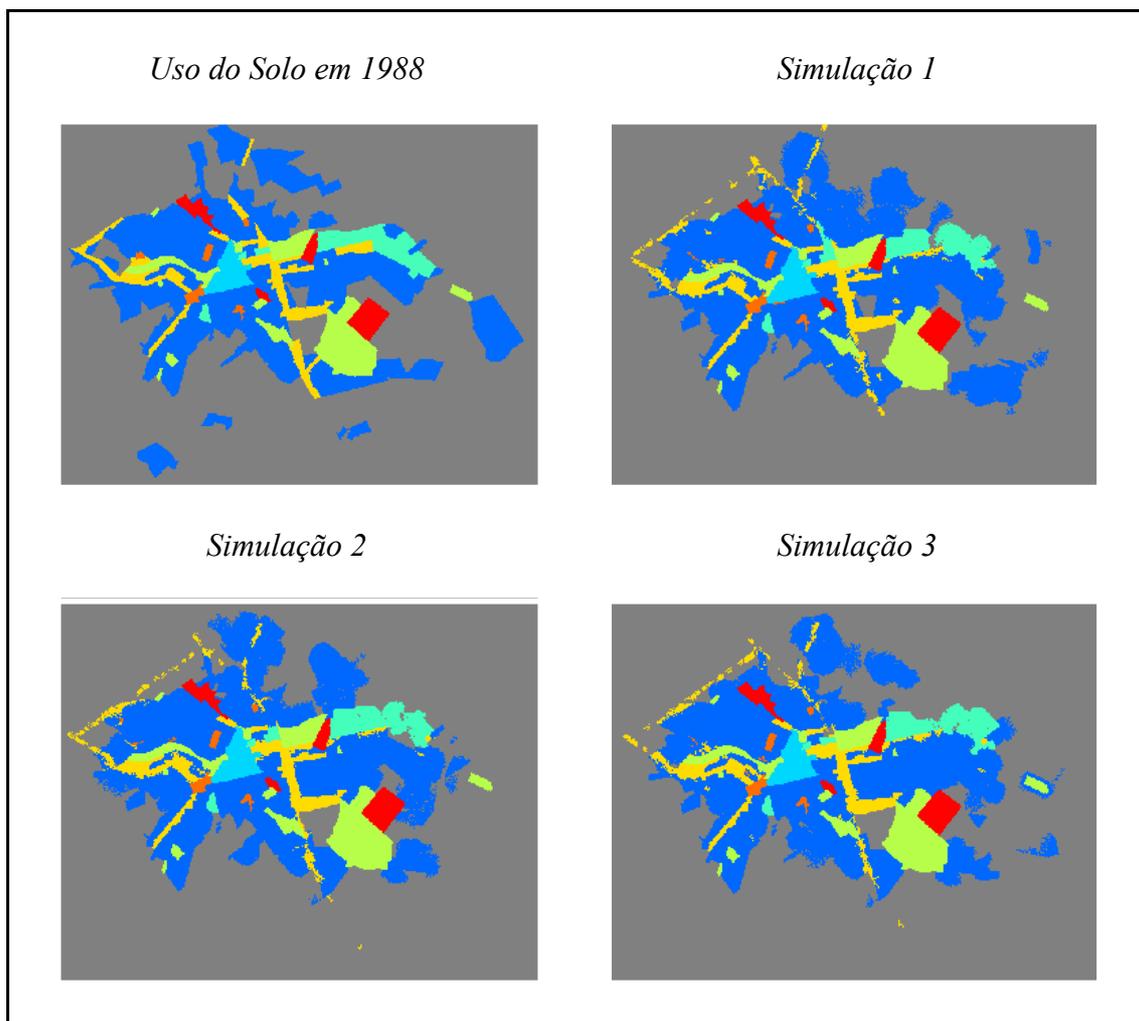


FIGURA 6.19 – Melhores simulações produzidas pelo método de regressão logística comparadas com o uso do solo real em Bauru - 1988.

6.1.3 Período de Simulação: 1988 – 2000

De acordo com o exposto na Seção 6.1.2, a população de Bauru no tempo inicial deste período de simulação era de 236.740 habitantes, dos quais 232.005 pessoas eram

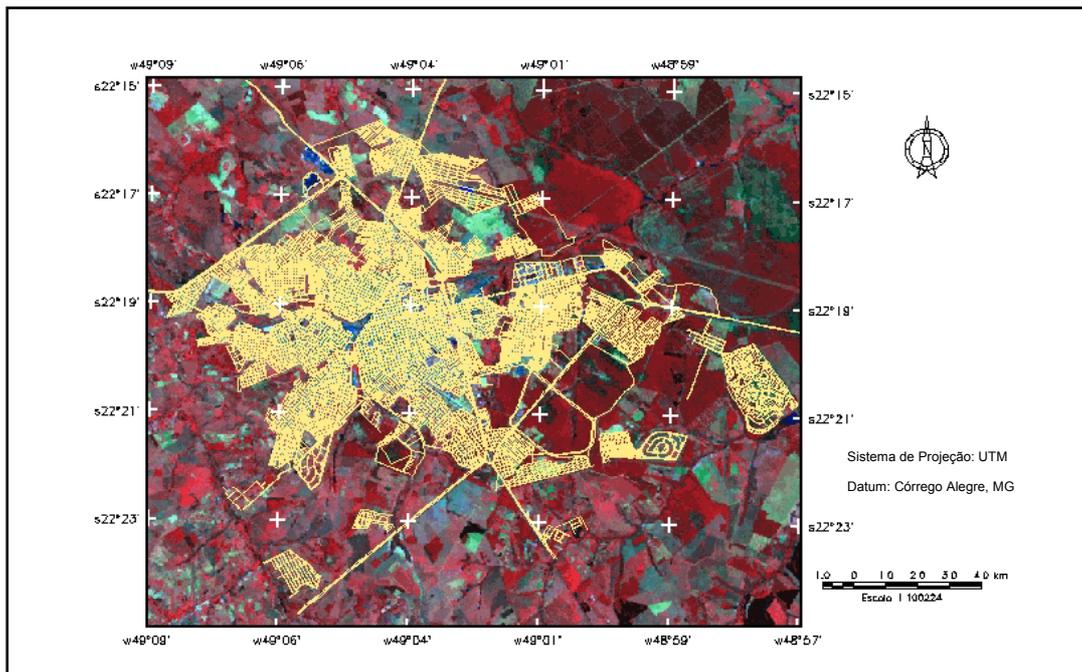


FIGURA 6.20 – Imagem TM – 5 de Bauru e mapa oficial da cidade em 1988.
 FONTE: INPE (1988) e SEPLAN (1988a).

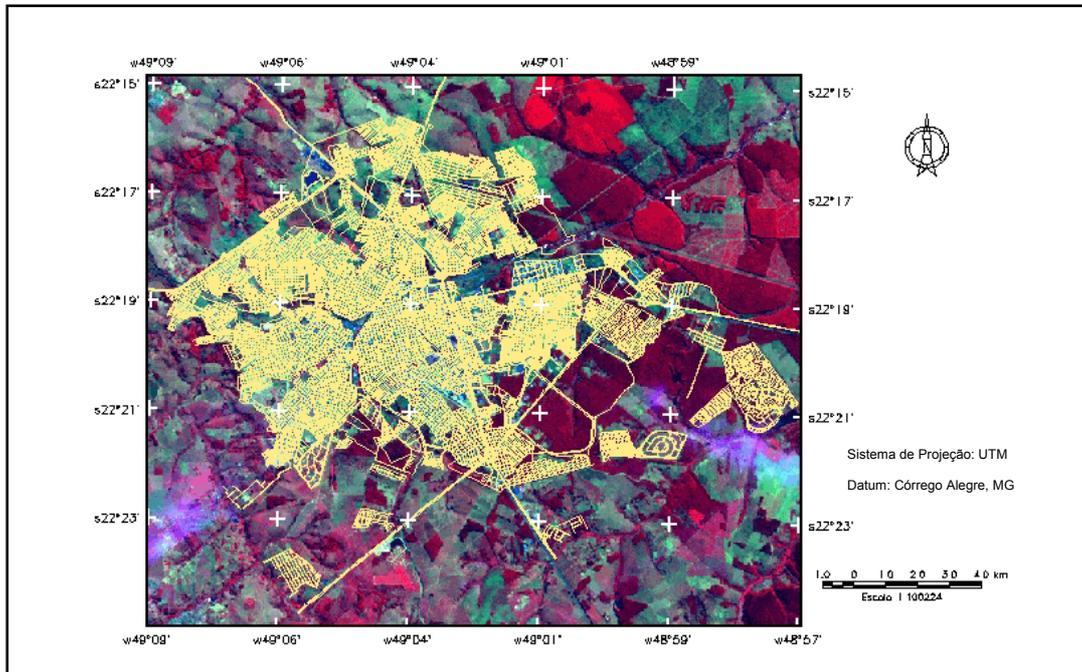


FIGURA 6.21 – Imagem TM – 5 de Bauru e mapa oficial da cidade em 2000.
 FONTE: INPE (2000) e DAE (2000).

habitantes urbanos. Em 2000, a população total subiu para 316.064, dos quais 310.442 habitantes moravam em áreas urbanas (IBGE, 2000). A taxa de crescimento populacional para este período é ligeiramente inferior do que o período de simulação precedente, ficando em torno de 1,34%. Os impactos desse crescimento populacional na extensão da área urbana podem ser vistos nas FIGURAS 6.20 e 6.21, que apresentam os mapas da cidade para os instantes inicial e final da simulação.

Os mapas de uso do solo inicial e final usados no período de simulação 1988 – 2000 (FIGURA 6.22) foram elaborados com base nos dois mapas oficiais da cidade anteriormente mostrados, em procedimentos de generalização aplicados aos mapas de uso do solo de 1988 (SEPLAN, 1988a) e 2000 (DAE, 2000), assim como nas imagens de satélite digitais de Bauru em 1988 e 2000 (INPE, 1988, 2000).

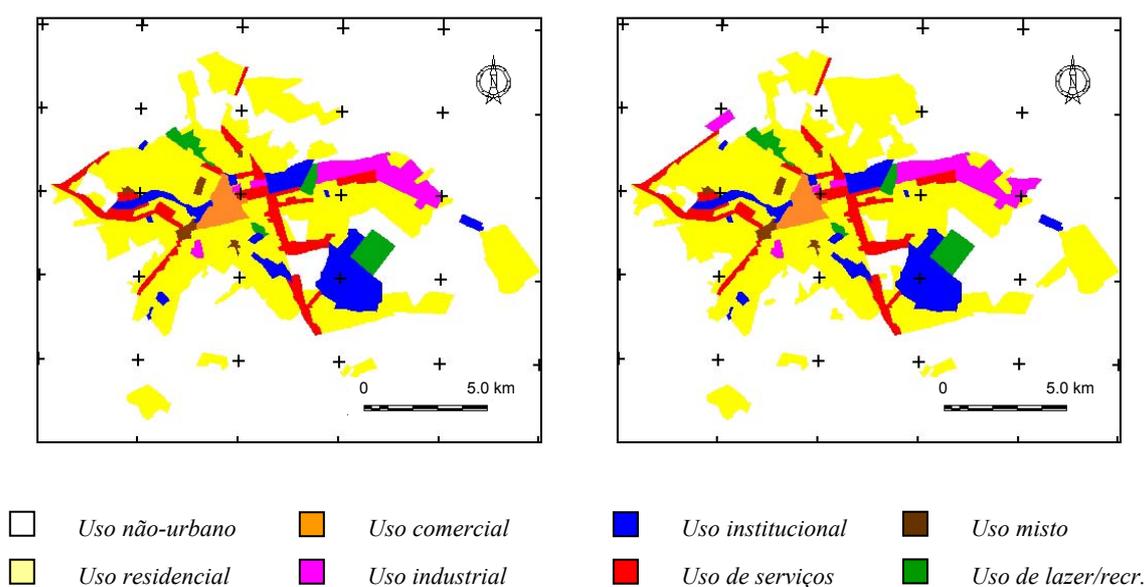


FIGURA 6.22 – Mapa de uso do solo de Bauru em 1988 (esquerda) e 2000 (direita).

Uma operação de tabulação cruzada foi feita entre ambos os mapas de uso do solo (FIGURA 6.23) de forma a gerar percentuais de transição para os diferentes tipos de mudanças de uso do solo existentes (TABELAS 6.20 e 6.21).

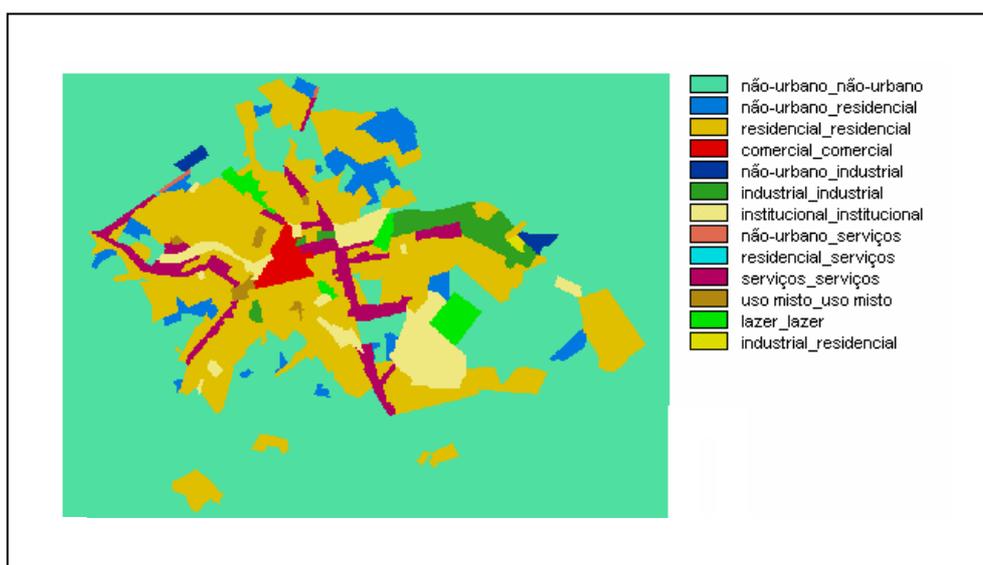


FIGURA 6.23 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso de Bauru: 1988-2000.

TABELA 6.20 – Transições de uso do solo existentes em Bauru: 1988-2000.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>TRANSIÇÃO DE USO DO SOLO</i>
<i>NU_RES</i>	<i>Não-urbano para residencial</i>
<i>NU_IND</i>	<i>Não-urbano para industrial</i>
<i>NU_SERV</i>	<i>Não-urbano para serviços</i>
<i>RES_SERV</i>	<i>Residencial para serviços</i>
<i>IND_RES</i>	<i>Industrial para residencial</i>

TABELA 6.21 – Matriz de probabilidades globais de transição para Bauru: 1988-2000.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Comm.</i>	<i>Industr.</i>	<i>Instit.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-urbano</i>	0,9615	0,0333	0	0,0043	0	0,0009	0	0
<i>Resid.</i>	0	0,9997	0	0	0	0,0003	0	0
<i>Com.</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Industr.</i>	0	0,0438	0	1	0	0	0	0
<i>Instit.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Para o período de simulação 1988–2000, sete variáveis foram selecionadas (SEPLAN, 1988a, 1988b), a maior parte das quais são apresentadas na FIGURA 6.24.

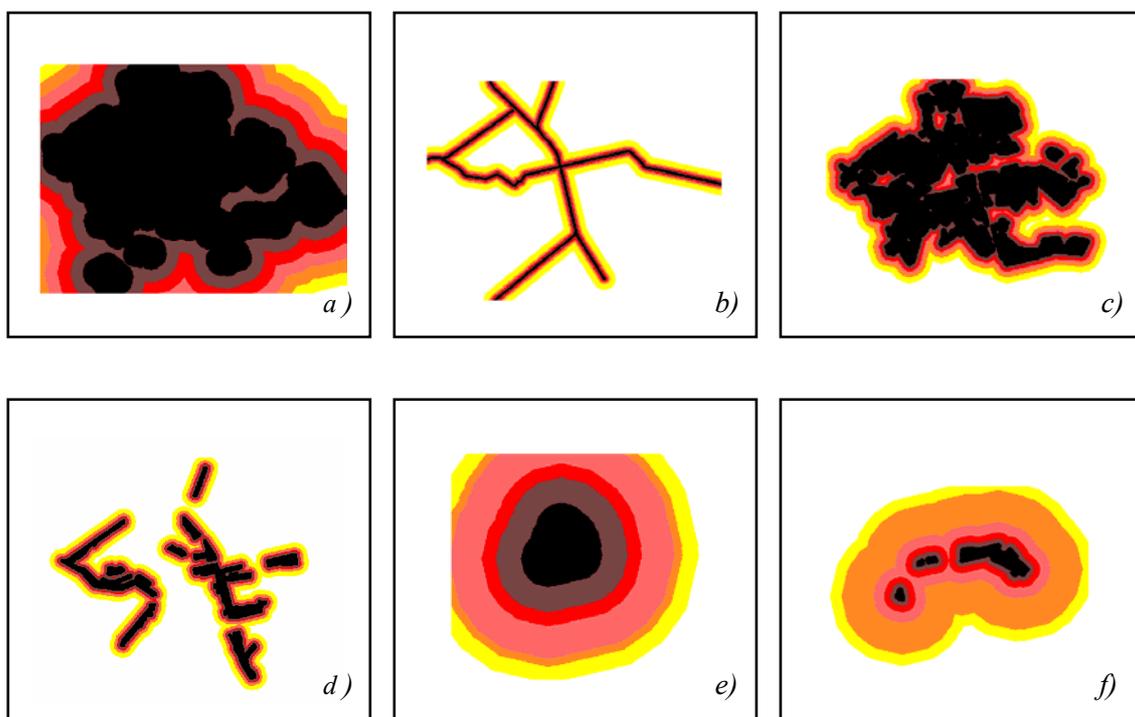


FIGURA 6.24 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições em Bauru durante o período 1988 – 2000: a) distâncias a zonas residenciais; b) distâncias aos eixos de serviços e comércio; c) distâncias às áreas residenciais pertencentes à mancha urbana principal; d) distâncias aos corredores de serviços; e) distâncias à zona comercial central; f) distâncias a zonas industriais.

A TABELA 6.22 mostra as notações utilizadas para cada mapa de variável empregado neste experimento de simulação; a TABELA 6.23 indica qual variável foi selecionada para explicar cada uma das cinco transições existentes; a TABELA 6.24 apresenta os valores obtidos para o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U) para os pares de variáveis usados para explicar o mesmo tipo de transição do uso do

solo; e finalmente, a TABELA 6.25 apresenta os valores para os pesos positivos de evidência.

TABELA 6.22 – Variáveis independentes das transições de uso em Bauru: 1988-2000.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>VARIÁVEIS DE MUDANÇAS DE USO FÍSICAS OU SÓCIO-ECONÔMICAS</i>
<i>dist_ind</i>	<i>Distâncias a zonas industriais.</i>
<i>dist_res</i>	<i>Distâncias a zonas residenciais.</i>
<i>dist_com</i>	<i>Distâncias à zona comercial central.</i>
<i>pp_res</i>	<i>Distâncias às áreas residenciais pertencentes à mancha urbana principal.</i>
<i>dist_serv</i>	<i>Distâncias aos corredores de serviços.</i>
<i>serv_eix</i>	<i>Distâncias aos eixos de serviços e comércio.</i>
<i>exist_est</i>	<i>Distância às principais vias existentes.</i>

TABELA 6.23 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Bauru: 1988-2000..

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>NU_RES</i>	<i>NU_IND</i>	<i>NU_SERV</i>	<i>RES_SERV</i>	<i>IND_RES</i>
<i>dist_ind</i>		♦			
<i>dist_res</i>	♦				
<i>dist_com</i>	♦	♦	♦		♦
<i>pp_res</i>		♦	♦		
<i>dist_serv</i>				♦	
<i>serv_eix</i>		♦	♦	♦	♦
<i>exist_est</i>	♦				

Da mesma forma que nos períodos precedentes, como nenhum dos valores de associação superou o limiar de 0,50 simultaneamente para ambos os índices, nenhuma das variáveis preliminarmente selecionadas para a modelagem foram descartadas da análise.

TABELA 6.24 – Associações entre variáveis independentes - Bauru: 1988-2000.

<i>VARIÁVEL A</i>	<i>VARIÁVEL B</i>	<i>ÍNDICE DE CRAMER</i> <i>(V_{A,B})</i>	<i>INCERTEZA</i> <i>(U_{A,B})</i>
<i>dist_ind</i>	<i>serv_eix</i>	0,1324	0,0381
	<i>dist_com</i>	0,3007	0,1730
<i>serv_eix</i>	<i>pp_res</i>	0,1442	0,0485
	<i>dist_serv</i>	0,2504	0,1512
<i>dist_res</i>	<i>dist_com</i>	0,2954	0,1920
	<i>exist_est</i>	0,3733	0,2022
<i>pp_res</i>	<i>dist_ind</i>	0,2638	0,1593
	<i>dist_com</i>	0,3554	0,2651
<i>dist_com</i>	<i>serv_eix</i>	0,1426	0,0462
<i>exist_est</i>	<i>dist_com</i>	0,3072	0,1763

TABELA 6.25 – Valores de W^+ para as variáveis independentes - Bauru: 1988–2000.

<i>Transição de Uso</i>	<i>Variável</i>	<i>Pesos Positivos de Evidência W⁺</i>						
		1	2	3	4	5	6	7
<i>NU_RES</i>	<i>dist_com</i> ¹	3,0315	1,8660	1,4883	0,0488	0	0	-1,5975
	<i>dist_res</i> ²	1,0269	-3,0001	0	0	0	0	0
	<i>exist_est</i> ³	0,2788	0,0470	0,0618	0,5859	0	0	0
<i>NU_IND</i>	<i>dist_com</i> ¹	0	-1,6787	1,9652	0	-1,0938	1,2762	-3,5038
	<i>dist_ind</i> ⁴	3,9186	3,4248	2,0878	-4,0570	0	1,1740	0
	<i>serv_eix</i> ⁵	1,5034	1,6862	1,8472	1,9530	2,1609	1,4820	-4,2138
	<i>pp_res</i> ⁶	-0,1651	0,4635	1,1896	1,2176	1,5354	1,1978	0
<i>NU_SERV</i>	<i>dist_com</i> ¹	0	0	2,4844	-0,1735	0	0	0
	<i>serv_eix</i> ⁵	3,6826	2,6842	0	0	0	0	0
	<i>pp_res</i> ⁶	1,4228	1,6990	1,7045	1,1503	-1,0949	-2,0000	-2,0000
<i>RES_SERV</i>	<i>serv_eix</i> ⁵	3,4313	2,8969	0	0	0	0	0
	<i>dist_serv</i> ⁷	2,2674	1,5067	1,0902	0	0	0	0
<i>IND_RES</i>	<i>dist_com</i> ¹	0	0	0	0	2,1914	-0,7973	0
	<i>serv_eix</i> ⁵	0,3286	0,5856	0,5630	0,4506	0,2105	-3,4915	0

Nota: Faixas de distâncias em metros

¹ 1: 0 -5500; 2: 5500-11000; 3: 11000-14000; 4: 14000-19750; 5: 19750-22750; 6: 22750-26250; 7: >26250

² 1: 0 -2700; 2: 2700-5400; 3: 5400-8100; 4: 8100-10800; 5: 10800-13500; 6: 13500-16200; 7: >16200

³ 1: 0 -2500; 2: 2500-5000; 3: 5000-7500; 4: 7500-11150; 5: 11150-15000; 6: 15000-20000; 7: >20000

⁴ 1: 0 -500; 2: 500-1500; 3: 1500-3000; 4: 3000-5500; 5: 5500-13000; 6: 13000-15700; 7: >15700

⁵ 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1250; 6: 1250-2500; 7: > 2500

⁶ 1: 0 -500; 2: 500-1000; 3: 1000-1500; 4: 1500-2000; 5: 2000-2700; 6: 2700-3850; 7: > 3850

⁷ 1: 0 -250; 2: 250-550; 3: 550-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1250; 6: 1250-2000; 7: > 2000

Os mapas de probabilidades de transição, gerados pelo DINAMICA com base nos valores dos pesos positivos de evidência (W^+), juntamente com os respectivos mapas de transição de uso são vistos nas FIGURAS 6.25 a e 6.25b.

Os argumentos empregados para explicar as transições “nu_res” e “nu_serv” no período 1967-1979 (Seção 6.1.1) também são válidos para justificar essas mesmas transições no presente período. Apenas diferenças menores dizem respeito aos requisitos para as transições “nu_ind” e “res_serv”.

A expansão da zona industrial (“nu_ind”) no setor nordeste de Bauru ainda demanda a proximidade dessas áreas ao uso industrial previamente existente e a disponibilidade de acesso rodoviário. Mas de 1988 a 2000, um novo setor industrial foi efetivamente criado na porção noroeste da cidade, requerendo proximidade aos centros de fornecimento de mão-de-obra (áreas residenciais) e também uma localização não muito distante da zona comercial central da cidade, uma vez que áreas industriais dependem das atividades comerciais para suporte logístico.

A transição “residencial para uso de serviços (res_serv)” ocorre em ritmo moderado de 1988 a 2000, basicamente como uma extensão de corredores de serviços previamente estabelecidos. Neste sentido, este tipo de mudança de uso do solo irá requerer proximidade a áreas de serviços previamente existentes e uma proximidade estratégica em relação aos eixos de serviços N-S / E-O de Bauru.

E finalmente, a transição “industrial para uso residencial (ind_res)” supõe boas condições de acessibilidade e uma localização dentro de uma distância razoável da zona comercial central, em vista da necessidade dos moradores de se transportarem para as áreas centrais por motivos de trabalho ou abastecimento.

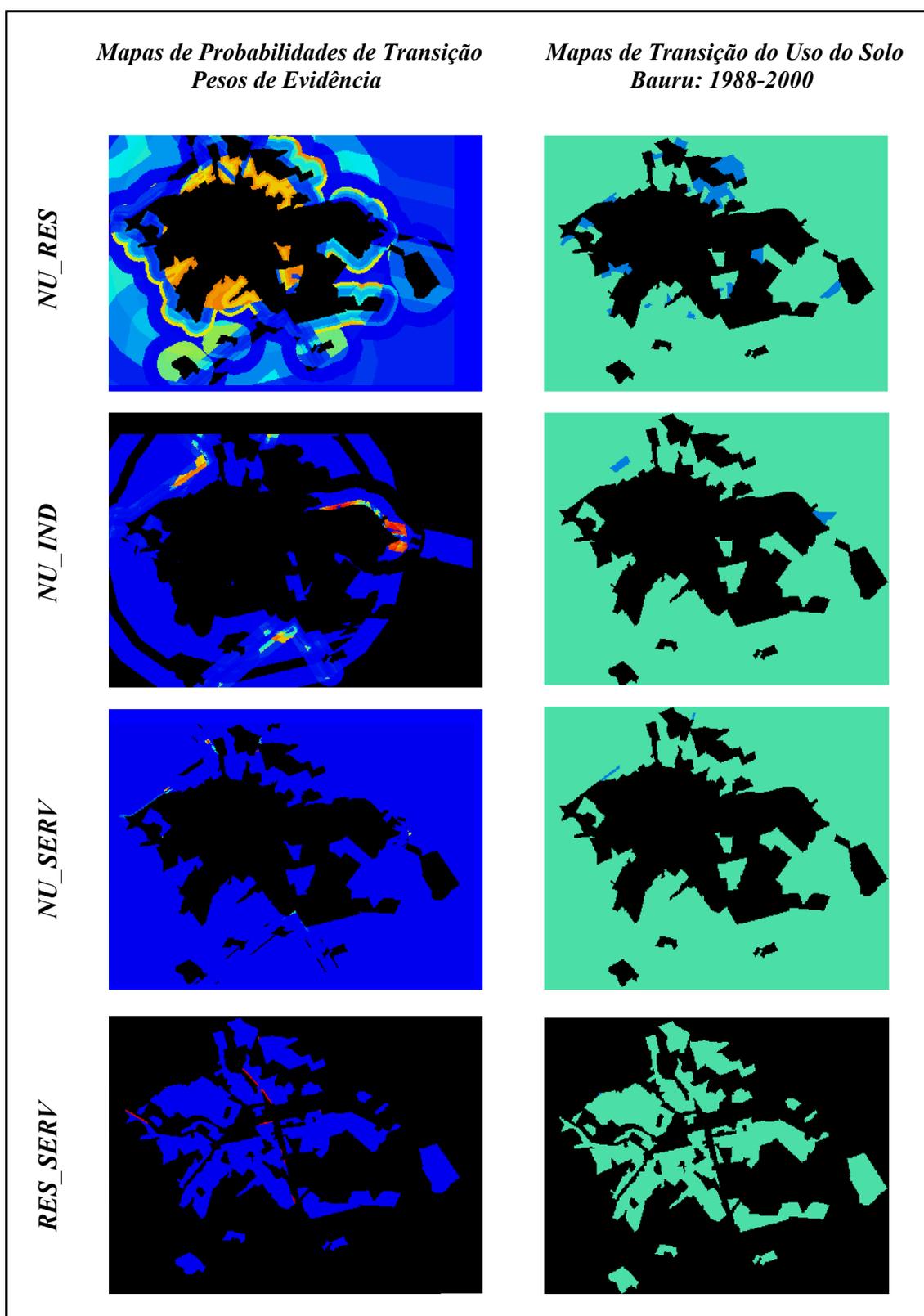


FIGURA 6.25a – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru..

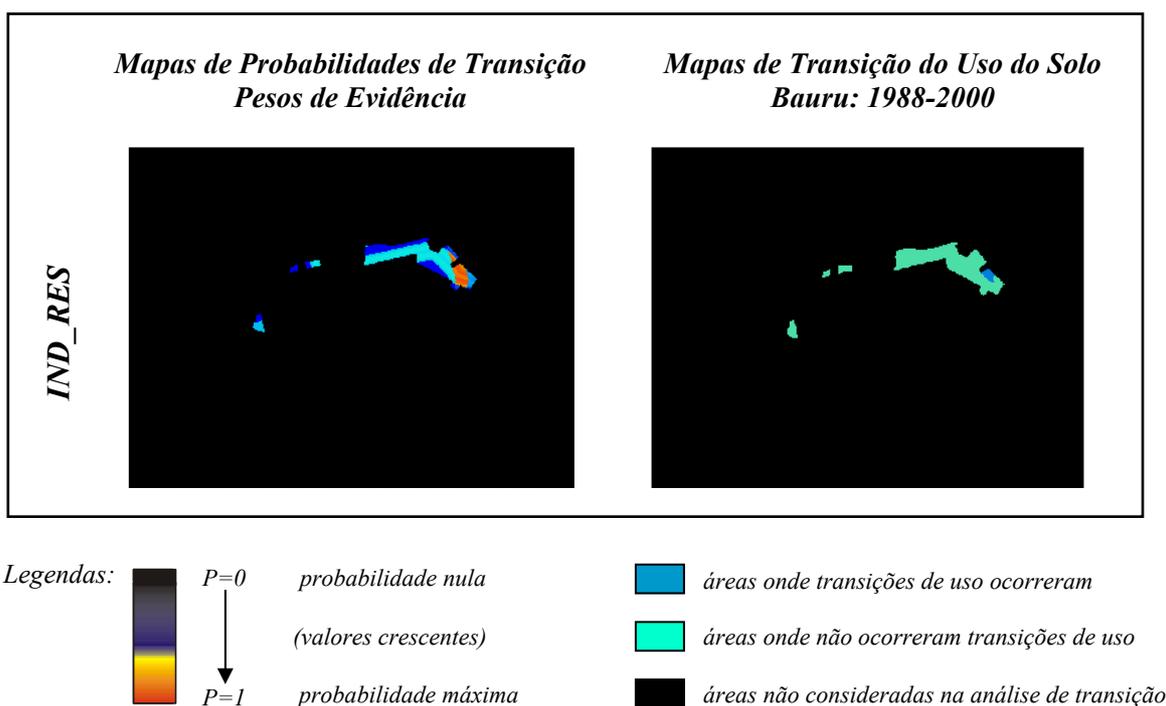


FIGURA 6.25b – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso para Bauru..

Os três melhores resultados de simulação produzidos para o período 1988-2000 são apresentados na FIGURA 6.26. Os parâmetros internos do DINAMICA associados com essas simulações ótimas são vistos na TABELA 6.26, cujos testes de validação estatística para janelas 3x3, 5x5 e 9x9, e $k = 0,5$ estão listados na TABELA 6.27.

TABELA 6.26 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Bauru: 1988–2000.

<i>Transição de Uso do Solo</i>	<i>Tamanho Médio de Manchas</i>	<i>Variância do Tamanho</i>	<i>Proporção do 'Expander'</i>	<i>Proporção do 'Patcher'</i>	<i>Número de Iterações</i>
<i>NU_RES</i>	2000	500	0,60	0,40	300
<i>NU_IND</i>	150	2	0,45	0,55	300
<i>NU_SERV</i>	400	2	1,00	0	300
<i>RES_SERV</i>	40	1	1,00	0	300
<i>IND_RES</i>	100	1	1,00	0	300

TABELA 6.27 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Bauru: 1988–2000.

<i>Simulações</i>	<i>Qualidade do Ajuste (“Goodness-of-Fit” - F)</i>
S_1	$F = 0,954193$
S_2	$F = 0,956617$
S_3	$F = 0,956341$

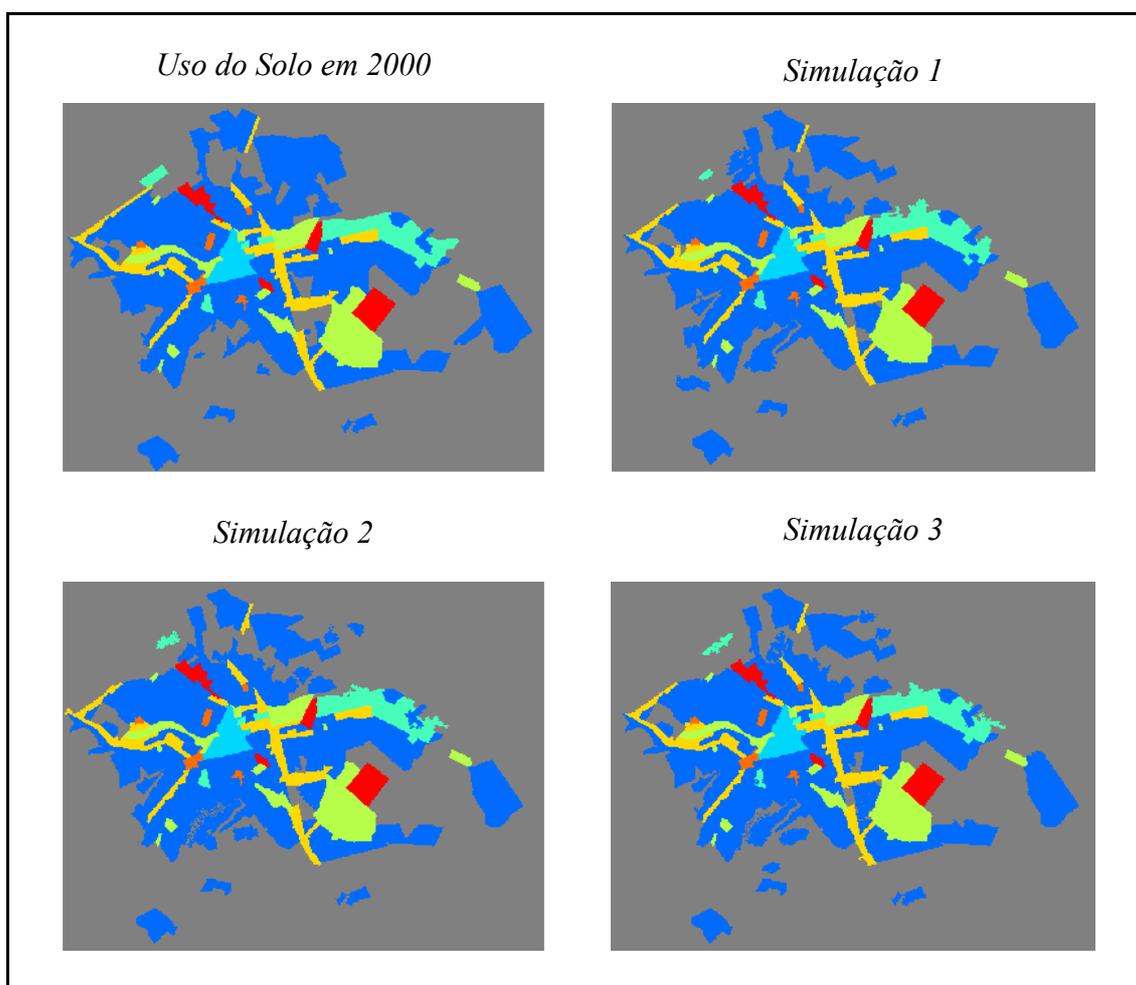


FIGURA 6.26 – Melhores simulações comparadas com o uso do solo em Bauru - 2000.

6.1.4 Simulações Anuais: 1967 – 2000

De acordo com a Equação (5.69), a matriz global de transição pode ser decomposta em probabilidades anuais de transição através de principais componentes. Isto foi feito separadamente para cada período de simulação (TABELAS 6.28, 6.29 e 6.30). As simulações anuais podem ser vistas nas FIGURAS 6.27a, 6.27b, 6.27c, 6.27d e 6.27e.

TABELA 6.28 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Bauru: 1967–1979.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9452 \cdot 10^{-1}$	$2,7672 \cdot 10^{-3}$	0	$1,8591 \cdot 10^{-4}$	$1,7121 \cdot 10^{-3}$	$1,2074 \cdot 10^{-5}$	0	$8,0959 \cdot 10^{-4}$
<i>Residencial</i>	0	$9,9572 \cdot 10^{-1}$	0	0	0	$4,1413 \cdot 10^{-3}$	$1,3996 \cdot 10^{-4}$	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.29 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Bauru: 1979–1988.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9043 \cdot 10^{-1}$	$8,2863 \cdot 10^{-3}$	0	$1,1001 \cdot 10^{-3}$	0	$1,8758 \cdot 10^{-4}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9291 \cdot 10^{-1}$	0	0	0	$6,8296 \cdot 10^{-3}$	$2,5885 \cdot 10^{-4}$	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.30 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Bauru: 1988–2000.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,8414 \cdot 10^{-1}$	$2,5872 \cdot 10^{-3}$	0	$3,4581 \cdot 10^{-4}$	0	$7,1684 \cdot 10^{-5}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9997 \cdot 10^{-1}$	0	0	0	$2,5003 \cdot 10^{-3}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	$3,7187 \cdot 10^{-3}$	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

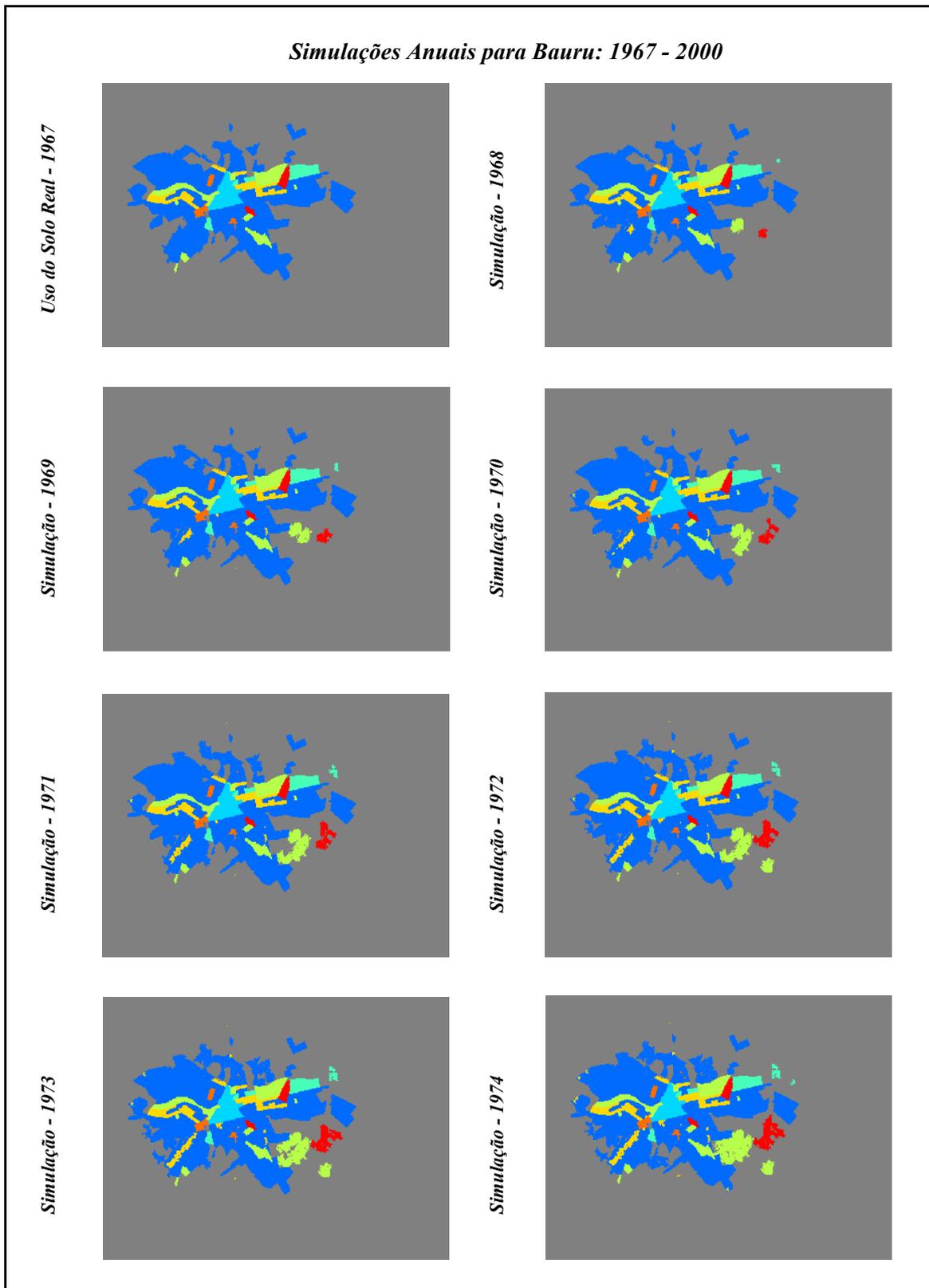


FIGURA 6.27a – Simulações anuais para Bauru: 1967-1974.

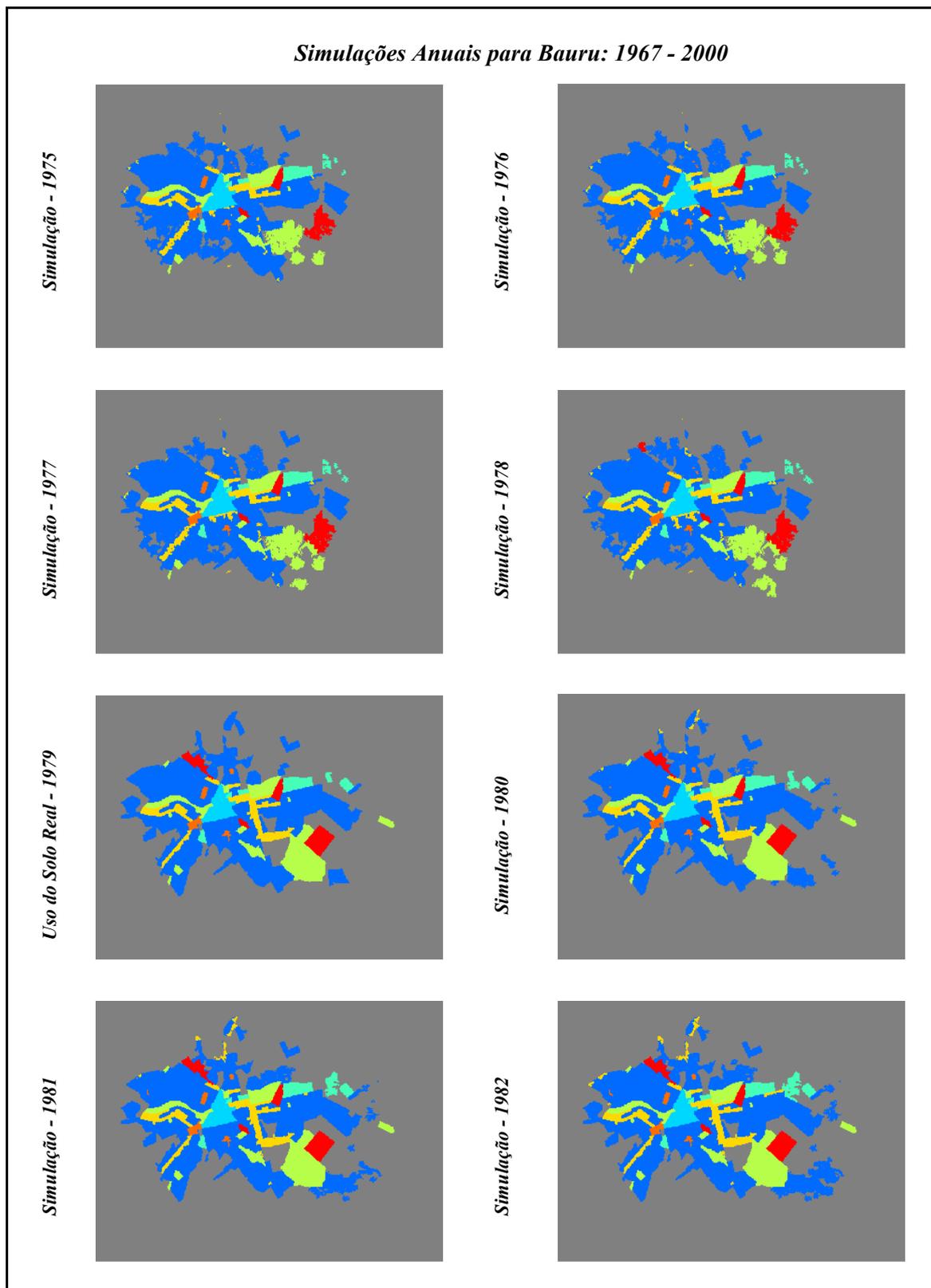


FIGURA 6.27b – Simulações anuais para Bauru: 1975 - 1982.

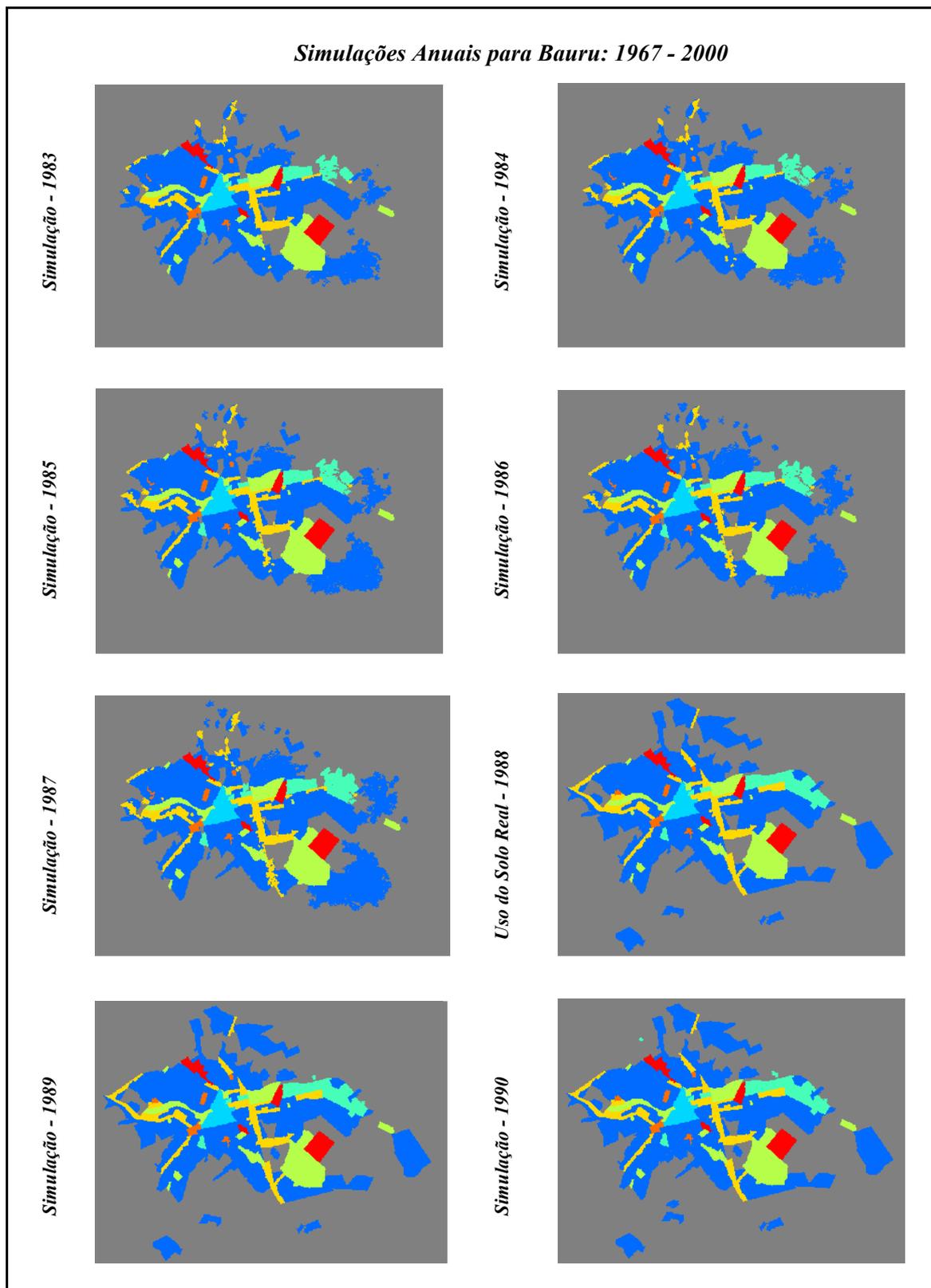


FIGURA 6.27c – Simulações anuais para Bauru: 1983 - 1990.

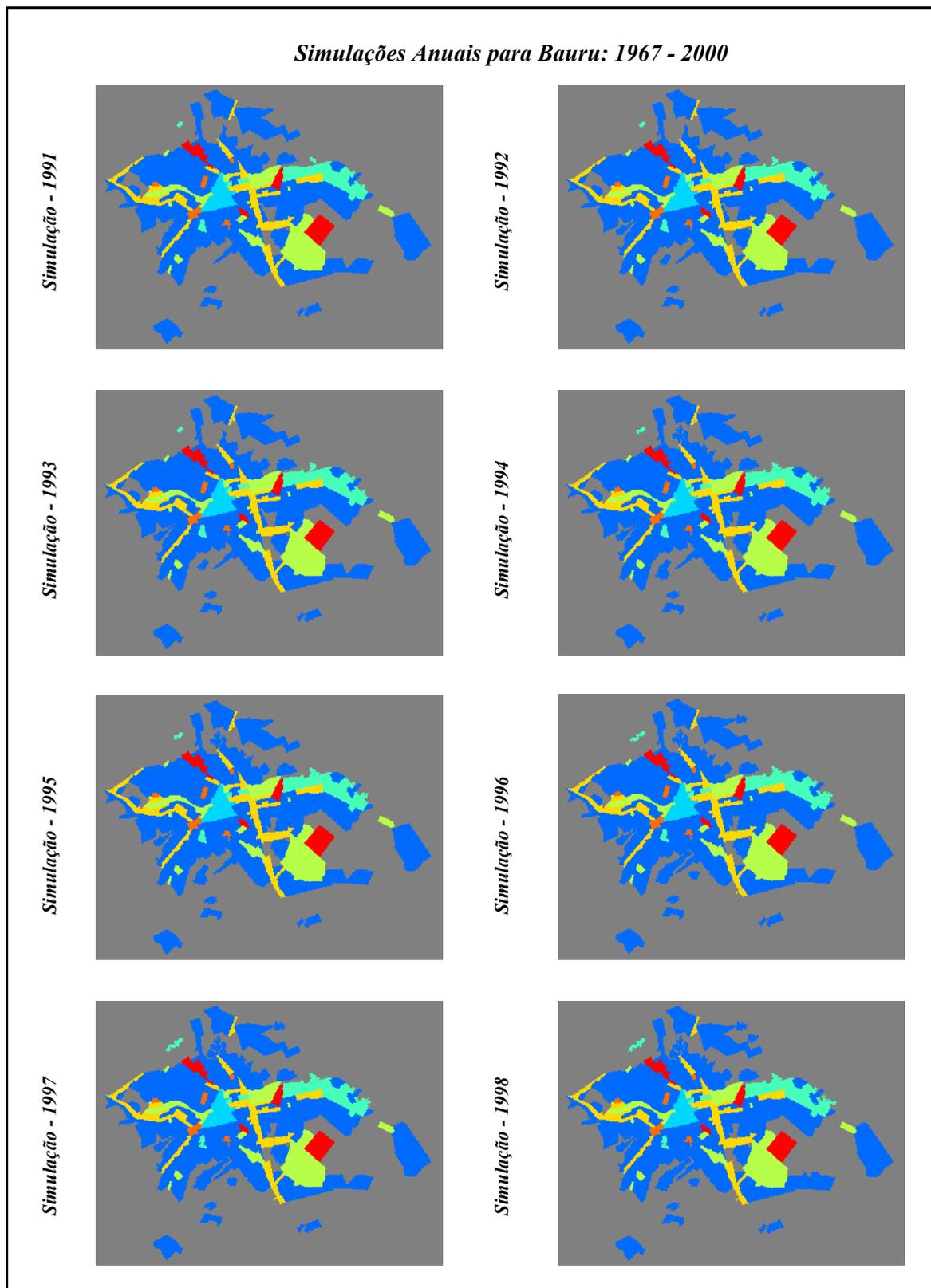


FIGURA 6.27d – Simulações anuais para Bauru: 1991 - 1998.

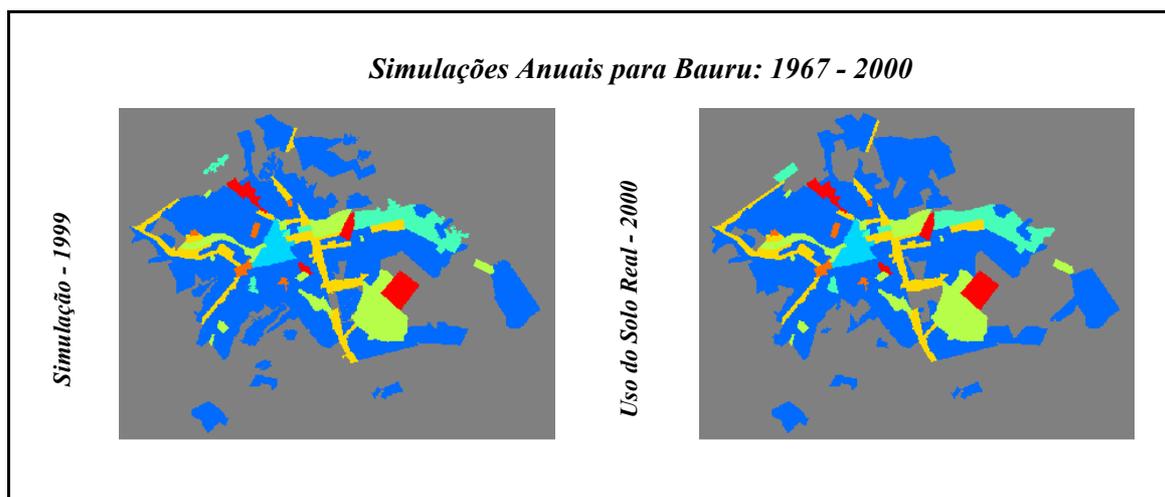


FIGURA 6.27e – Simulações anuais para Bauru: 1999 - 2000.

6.1.5 Prognósticos de Curto Prazo: 2000 – 2004

As mudanças de uso do solo consideradas para prognósticos foram aquelas observadas no último período de simulação (1988-2000), excluindo-se a transição “industrial para uso residencial (ind_res)”, dado que ela não é usual considerando-se toda a série multitemporal. Nas próximas seções, as matrizes de transição, assim como as saídas de simulação para prognósticos estacionários (Markovianos) e não-estacionários de mudanças de uso do solo serão apresentadas.

6.1.5.1 Prognósticos Estacionários

Uma matriz de transição estacionária para o ano de 2004 foi obtida usando-se a cadeia Markoviana (Equação 5.66) com base na matriz de transição global 1988-2000, na qual a probabilidade de transição “ind_res” foi propositalmente ajustada para zero, devido a motivos expostos na seção anterior. Essas probabilidades de transição estacionárias são mostradas na TABELA 6.31.

TABELA 6.31 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Bauru, 2000-2004.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9437*10^{-1}$	$5,3857*10^{-3}$	0	$2,4048*10^{-4}$	0	$1,7599*10^{-10}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9999*10^{-1}$	0	0	0	$5,8664*10^{-11}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.1.5.2 Prognósticos Não-Estacionários

Prognósticos não-estacionários de mudanças de uso foram construídos com a ajuda de modelos de regressão linear relacionando a área de certos usos com dados demográficos e indicadores econômicos, conforme já mencionado na Seção 5.3.2.6, onde os usos de destino de transições do uso do solo foram considerados como a variável dependente.

Para as transições possuindo o mesmo uso de destino, a exemplo de “nu_serv” e “res_serv”, apenas um modelo de regressão linear foi construído, levando à estimativa de uma probabilidade de transição comum. As quotas de transição para serviços originando-se de uso não-urbano e de uso residencial observadas no período de simulação 1988-2000 foram repassadas para a probabilidade de transição comum calculada tanto para o curto quanto para o médio prazo. No caso particular de Bauru, a transição “não-urbano para serviços” responde por 75% do total de transição para o uso de serviços, e os 25% remanescentes correspondem à transição “residencial para serviços”.

Os usos do solo de destino tiveram de ser estimados para os quinquênios em que os dados de população e de desempenho econômico (ver Seção 4.2.2) eram também disponíveis, i.e., para 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995 e 2000. Isto foi possibilitado pelas saídas de simulação geradas através do método de principais componentes (Seção 6.1.4). As saídas de simulação produzidas pelo DINAMICA foram exportadas em formato TIFF, e então importadas para o IDRISI. No IDRISI, as áreas de classes temáticas correspondentes aos usos do solo de interesse foram determinadas. As áreas

desses usos do solo de destino juntamente com os dados demográficos e econômicos usados nos modelos de regressão linear são vistos na TABELA 6.32.

TABELA 6.32 – Áreas de uso de destino, população urbana, PIB total e setorial (US\$):
Bauru - 1970-2000.

<i>Anos</i>	<i>Área Dest.: Residencial (ha)</i>	<i>Área Dest.: Industrial (ha)</i>	<i>Área Dest.: Serviços (ha)</i>	<i>População Urbana</i>	<i>PIB Total (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Rural (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Indust. (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Com. (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Serviços (US\$ 1998)</i>
1970	38.904	1.825	3.147	61.592	526.500,428	24.884,128	124.826,722	136.439,859	376.832,414
1975	41.642	2.064	3.984	110.166	718.986,733	14.959,686	233.091,154	155.342,626	470.935,893
1980	45.476	2.531	5.054	159.926	983.887,317	23.486,596	344.767,749	176.902,442	1.572.421,062
1985	53.808	3.865	6.938	215.153	1.222.203,235	62.325,610	428.632,198	201.542,378	731.245,427
1990	59.651	4.761	8.253	237.954	1.358.236,390	46.922,487	472.677,454	479.003,725	419.780,872
1995	62.657	5.057	8.338	279.407	2.256.520,737	11.292,207	705.164,856	891.184,402	299.490,980
2000	65.627	5.341	8.420	310.442	1.906.359,257	6.512,305	627.732,044	713.024,547	467.496,231

FONTE: Adaptado de IPEA (2001, 2003a, 2003b) e FUNDAÇÃO SEADE (2002).

6.1.5.2.1 Modelo de Regressão Linear “Não-Urbano para Uso Residencial (nu_res)”

Inicialmente, os testes para a verificação de independência das observações (ver Seção 5.3.2.2) referente à variável de saída Y_i (“área de uso residencial – destarea”) mostraram aceitação parcial para a função de autocorrelação e aceitação total para a função de autocorrelação parcial (FIGURA 6.28).

As “extrapolações” na função de autocorrelação são muito moderadas, já que a maior parte das observações se encontram dentro do intervalo de confiança. Comumente, muito poucos eventos pertencentes a uma série temporal são totalmente independentes na realidade. Embora haja poucas observações para Y_i , é razoável supor-se que a área residencial observada para Bauru nos intervalos de cinco anos constituem observações independentes. De qualquer modo, o teste da função de autocorrelação parcial oferece respaldo para considerar-se a evolução da área de uso residencial ao longo dos anos como eventos independentes.

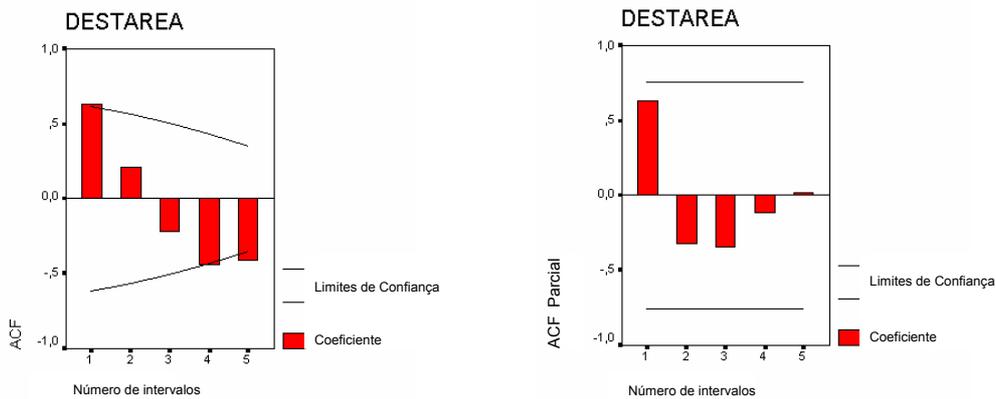


FIGURA 6.28 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso residencial (destarea).

Ainda na análise exploratória, as variáveis independentes “população urbana (popurb)”, “PIB total (pibtot)” e “PIB industrial (pibind)” mostram uma alta correlação com a variável resposta “área de uso residencial (destarea)”. Uma vez que essas três variáveis independentes são altamente correlacionadas entre si (TABELA 6.33), apenas a variável “população urbana” permanece no modelo final de regressão. Os diagramas de espalhamento referentes à matriz de correlação para o modelo “nu_res” são vistos na FIGURA 6.29.

A equação final para este modelo univariado é a seguinte:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$Y = 29.705,243 + 0,116 \cdot popurb \quad , \quad (6.1)$$

cujos R^2 é 0,972, e o p -value do intervalo de confiança de 95% para β_0 e β_1 é 0,000 ($p < 0,05$).

Na análise de variância (ANOVA), a soma de quadrados reflete em que medida Y é divergente de \hat{Y} . Neste sentido, para modelos bem ajustados espera-se que a soma de quadrados da regressão >>> soma residual de quadrados, e assim, que a soma de quadrados da regressão assuma a maior parte da soma total de quadrados (TABELA 6.34).

TABLE 6.33 – Matriz de correlação para o modelo "nu_res": Bauru, 2000–2004.

		DESTAREA	POPURB	PIBTOT	PIBRURAL	PIBIND	PIBCOM	PIBSERV
DESTAREA	Pearson Correlation	1	,986**	,931**	-,042	,955**	,879**	-,295
	Sig. (2-tailed)	,	,000	,002	,928	,001	,009	,521
	N	7	7	7	7	7	7	7
POPURB	Pearson Correlation	,986**	1	,935**	-,063	,970**	,848*	-,165
	Sig. (2-tailed)	,000	,	,002	,893	,000	,016	,724
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBTOT	Pearson Correlation	,931**	,935**	1	-,254	,989**	,957**	-,271
	Sig. (2-tailed)	,002	,002	,	,583	,000	,001	,557
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBRURAL	Pearson Correlation	-,042	-,063	-,254	1	-,168	-,409	,132
	Sig. (2-tailed)	,928	,893	,583	,	,718	,363	,778
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBIND	Pearson Correlation	,955**	,970**	,989**	-,168	1	,917**	-,192
	Sig. (2-tailed)	,001	,000	,000	,718	,	,004	,680
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBCOM	Pearson Correlation	,879**	,848*	,957**	-,409	,917**	1	-,438
	Sig. (2-tailed)	,009	,016	,001	,363	,004	,	,326
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBSERV	Pearson Correlation	-,295	-,165	-,271	,132	-,192	-,438	1
	Sig. (2-tailed)	,521	,724	,557	,778	,680	,326	,
	N	7	7	7	7	7	7	7

** .Correlação é significativa no nível 0,01 (2 caudas)

* .Correlação é significativa no nível 0,05 (2 caudas)

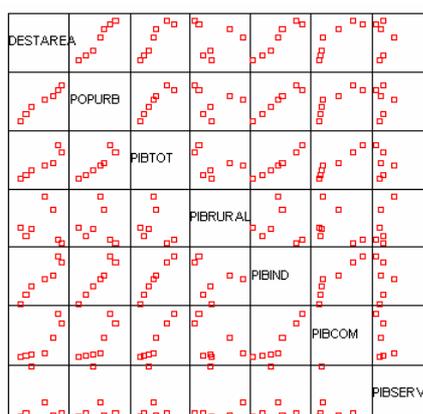


FIGURA 6.29 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo “nu_res”: Bauru, 2000-2004.

TABELA 6.34 – Análise de variância para o modelo “nu_res”: Bauru, 2000-2004.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6,61E+08	1	661245024,7	172,565	,000 ^a
	Residual	19159342	5	3831868,441		
	Total	6,80E+08	6			

- a. Preditores: (Constante), POPURB
- b. Variável Dependente: DESTAREA

Em relação à análise de resíduos, quando o modelo está satisfatoriamente ajustado, os resíduos padronizados (ver Seção 5.3.2.5) e os resíduos “estudentados” (ajustados a uma distribuição “t”) devem estar no intervalo $[-2,+2]$. Para o presente modelo, esses valores são $-1,442$; $+1,164$ e $-1,583$; $+1,493$ respectivamente para os resíduos padronizados e studentados. Gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (“popurb”) e versus o valor predito ajustado \hat{Y}_i são vistos na FIGURA 6.30. Conforme a Seção 5.3.2.5, esses gráficos não devem apresentar padrão de correlação algum.

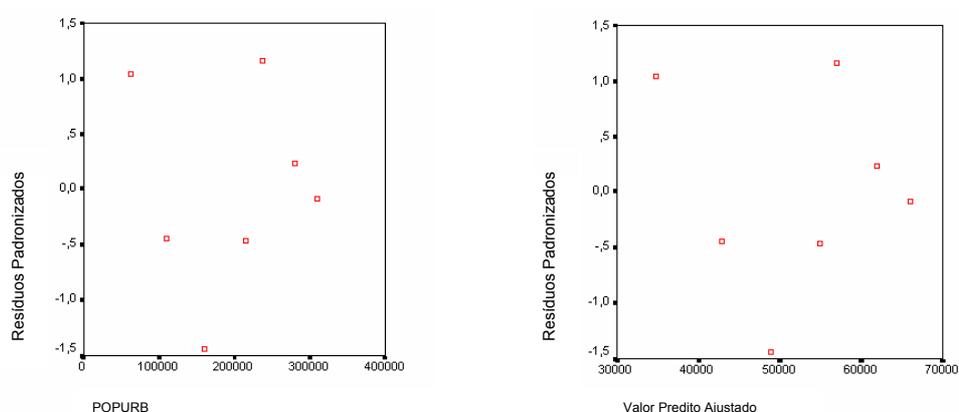


FIGURA 6.30 – Análise de resíduos para o modelo “nu_res”: Bauru, 2000-2004.

6.1.5.2.2 Modelo de Regressão Linear “Não-Urbano para Uso Industrial (nu_ind)”

Da mesma forma que no modelo “nu_res”, os testes para verificação de independência das observações referentes à variável de saída Y_i (“área de uso industrial – destarea”) mostraram aceitação parcial para a função de autocorrelação e aceitação total para a função de autocorrelação parcial (FIGURA 6.31). As observações relativas à área de uso industrial ao longo do tempo foram julgadas como eventos independentes pelas mesmas razões expostas na Seção 6.1.5.2.1.

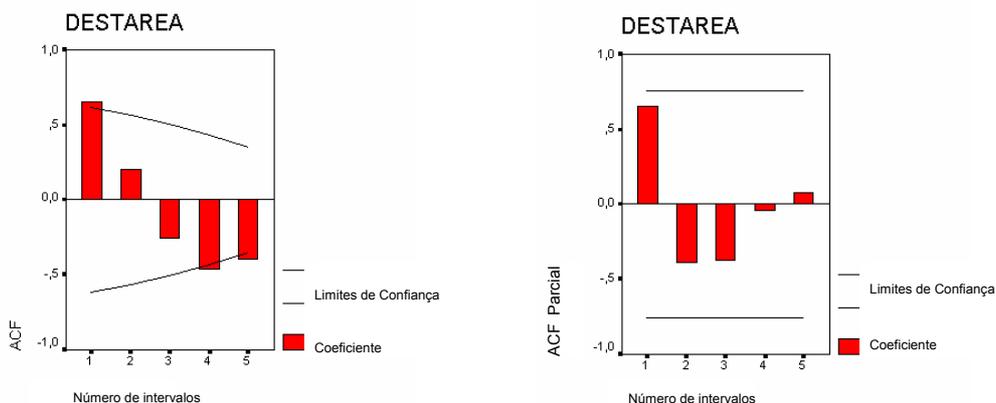


FIGURA 6.31 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso industrial (destarea).

As variáveis independentes “população urbana (popurb)”, “PIB total (pibtot)” e “PIB industrial (pibind)” mostram uma alta correlação com a variável resposta “área de uso industrial (destarea)”. Uma vez que essas três variáveis independentes são altamente correlacionadas entre si (TABELA 6.35), apenas a variável “PIB industrial” permanece no modelo final de regressão. Embora esta correlação com a variável resposta não seja a maior, ela foi considerada a que melhor explica o aumento na área de uso industrial da cidade nas últimas três décadas. Os diagramas de espalhamento referentes à matriz de correlação para o modelo “nu_ind” são apresentados na FIGURA 6.32.

A equação final para este modelo univariado é a seguinte:

$$Y = \beta_1 X$$

$$Y = 0,008343 \cdot pibind \quad , \quad (6.2)$$

cujos R^2 é 0,979, e o p -value do intervalo de confiança de 95% para β_1 é 0,000 ($p < 0,05$). Dado que β_0 não passou no teste de significância, ele foi excluído do modelo.

Na análise de variância (ANOVA), a soma de quadrados reflete em que medida Y é divergente de \hat{Y} . Neste sentido, para modelos bem ajustados, espera-se que a soma de quadrados da regressão >>> soma residual de quadrados, e assim, que a soma de quadrados da regressão responda pela maioria da soma total de quadrados (TABELA 6.36).

TABELA 6.35 – Matriz de correlação para o modelo “nu_ind”: Bauru, 2000-2004.

		DESTAREA	POPURB	PIBTOT	PIBRURAL	PIBIND	PIBCOM	PIBSERV
DESTAREA	Pearson Correlation	1	,974**	,921**	,000	,943**	,873*	-,329
	Sig. (2-tailed)	,	,000	,003	1,000	,001	,010	,471
	N	7	7	7	7	7	7	7
POPURB	Pearson Correlation	,974**	1	,935**	-,063	,970**	,848*	-,165
	Sig. (2-tailed)	,000	,	,002	,893	,000	,016	,724
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBTOT	Pearson Correlation	,921**	,935**	1	-,254	,989**	,957**	-,271
	Sig. (2-tailed)	,003	,002	,	,583	,000	,001	,557
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBRURAL	Pearson Correlation	-,000	-,063	-,254	1	-,168	-,409	,132
	Sig. (2-tailed)	1,000	,893	,583	,	,718	,363	,778
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBIND	Pearson Correlation	,943**	,970**	,989**	-,168	1	,917**	-,192
	Sig. (2-tailed)	,001	,000	,000	,718	,	,004	,680
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBCOM	Pearson Correlation	,873*	,848*	,957**	-,409	,917**	1	-,438
	Sig. (2-tailed)	,010	,016	,001	,363	,004	,	,326
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBSERV	Pearson Correlation	-,329	-,165	-,271	,132	-,192	-,438	1
	Sig. (2-tailed)	,471	,724	,557	,778	,680	,326	,
	N	7	7	7	7	7	7	7

** .Correlação é significativa no nível 0,01 (2 caudas)

* .Correlação é significativa no nível 0,05 (2 caudas)

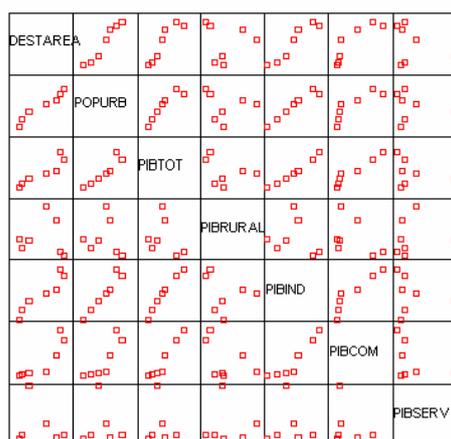


FIGURA 6.32 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo “nu_ind”: Bauru, 2000-2004.

TABELA 6.36 – Análise de variância para o modelo “nu_ind”: Bauru, 2000-2004.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	11764114	1	11764113,87	40,506	,001 ^a
	Residual	1452139	5	290427,798		
	Total	13216253	6			

- a. Preditores: (Constante), PIBIND
- b. Variável Dependente: DESTAREA

Em relação à análise de resíduos, quando o modelo está satisfatoriamente ajustado, os resíduos padronizados (ver Seção 5.3.2.5) e os resíduos “estudentados” (ajustados a uma distribuição “t”) devem estar no intervalo $[-2,+2]$. Para o presente modelo, esses valores são $-1,366$; $+1,353$ e $-1,675$; $+1,467$ respectivamente para os resíduos padronizados e studentados. Gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (“pibind”) e versus o valor predito ajustado \hat{Y}_i são vistos na FIGURA 6.33. Conforme a Seção 5.3.2.5, esses gráficos não devem apresentar padrão de correlação algum.

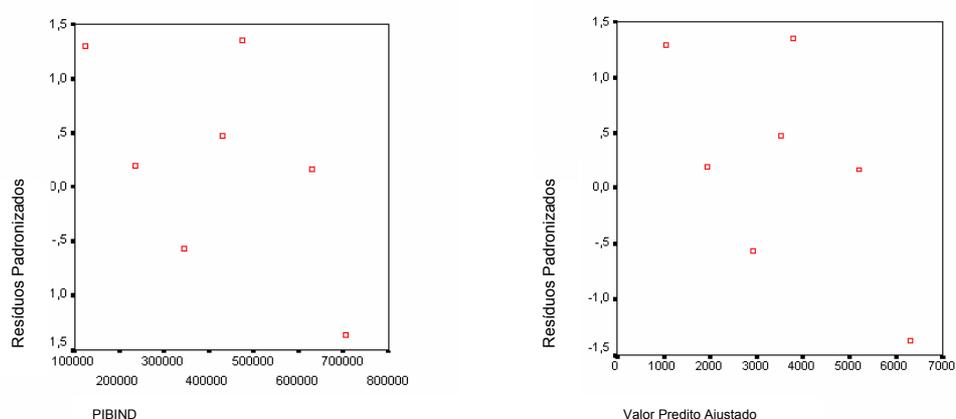


FIGURA 6.33 – Análise de resíduos para o modelo “nu_ind”: Bauru, 2000-2004.

6.1.5.2.3 Modelo de Regressão Linear “Não-Urbano/Residencial para Uso de Serviços (nu/res_serv)”

Da mesma forma que nos modelos “nu_res” e “nu_ind”, os testes para verificação de independência das observações referentes à variável de saída Y_i (“área de uso de serviços – destarea”) mostraram aceitação parcial para a função de autocorrelação e aceitação total para a função de autocorrelação parcial (FIGURA 6.34). As observações relativas à área de uso de serviços ao longo do tempo foram consideradas como eventos independentes pelas mesmas razões expostas na Seção 6.1.5.2.1.

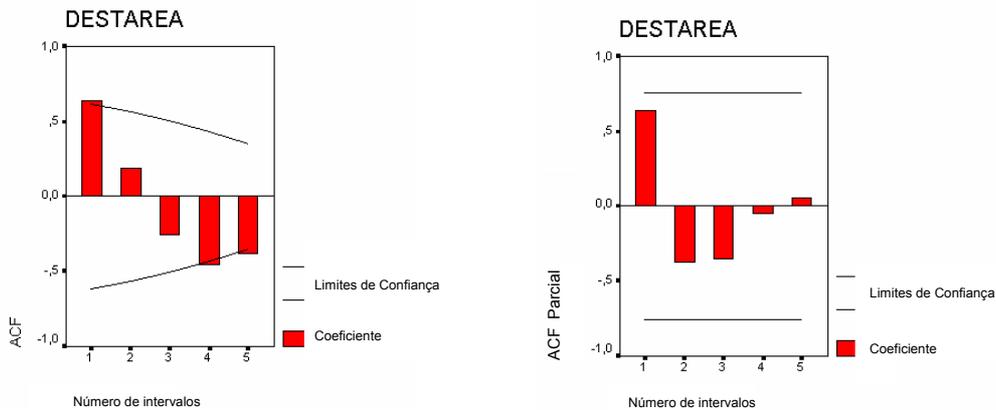


FIGURE 6.34 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso de serviços (destarea).

Da mesma forma que nos modelos lineares precedentes, as variáveis independentes “população urbana (popurb)”, “PIB total (pibtot)” e “PIB industrial (pibind)” mostram uma alta correlação com a variável resposta “área de uso de serviços (destarea)”. Dado que essas três variáveis independentes são altamente correlacionadas entre si (TABELA 6.37), apenas a variável “população urbana” permanece no modelo final de regressão. Os diagramas de espalhamento referentes à matriz de correlação para o modelo “nu/res_serv” são apresentados na FIGURA 6.35.

A equação final para este modelo univariado é a seguinte:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$Y = 1.590,457 + 0,02401 \cdot popurb \quad , \quad (6.3)$$

cujo R^2 é 0,948, e o p -value do intervalo de confiança de 95% para β_0 é 0,031 e para β_1 é 0,000 ($p < 0,05$).

Na análise de variância (ANOVA), a soma de quadrados reflete em que medida \hat{Y} é divergente de Y . Neste sentido, para modelos bem ajustados, espera-se que a soma de quadrados da regressão >>> soma residual de quadrados, e assim, que a soma de quadrados da regressão responda pela maioria da soma total de quadrados (TABELA 6.38).

TABELA 6.37 – Matriz de correlação para o modelo “nu/res_serv”: Bauru, 2000-2004.

		DESTAREA	POPURB	PIBTOT	PIBRURAL	PIBIND	PIBCOM	PIBSERV
DESTAREA	Pearson Correlation	1	,974**	,899**	,092	,940**	,823*	-,233
	Sig. (2-tailed)		,000	,006	,844	,002	,023	,615
	N	7	7	7	7	7	7	7
POPURB	Pearson Correlation	,974**	1	,935**	-,063	,970**	,848*	-,165
	Sig. (2-tailed)	,000		,002	,893	,000	,016	,724
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBTOT	Pearson Correlation	,899**	,935**	1	-,254	,989**	,957**	-,271
	Sig. (2-tailed)	,006	,002		,583	,000	,001	,557
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBRURAL	Pearson Correlation	,092	-,063	-,254	1	-,168	-,409	,132
	Sig. (2-tailed)	,844	,893	,583		,718	,363	,778
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBIND	Pearson Correlation	,940**	,970**	,989**	-,168	1	,917**	-,192
	Sig. (2-tailed)	,002	,000	,000	,718		,004	,680
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBCOM	Pearson Correlation	,823*	,848*	,957**	-,409	,917**	1	-,438
	Sig. (2-tailed)	,023	,016	,001	,363	,004		,326
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBSERV	Pearson Correlation	-,233	-,165	-,271	,132	-,192	-,438	1
	Sig. (2-tailed)	,615	,724	,557	,778	,680	,326	
	N	7	7	7	7	7	7	7

** .Correlação é significativa no nível 0,01 (2 caudas)

* .Correlação é significativa no nível 0,05 (2

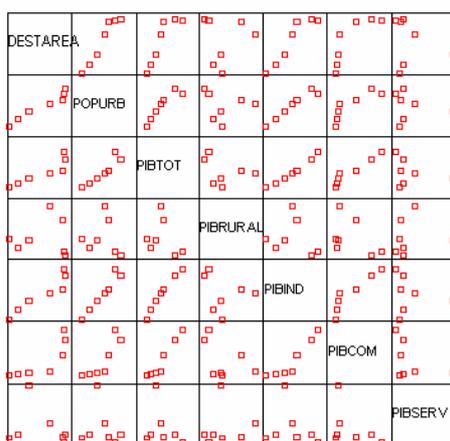


FIGURA 6.35 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo “nu/res_serv”: Bauru, 2000-2004.

TABELA 6.38 – Análise de variância para o modelo “nu/res_serv”: Bauru, 2000-2004.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	28190577	1	28190577,19	91,758	,000 ^a
	Residual	1536136	5	307227,134		
	Total	29726713	6			

- a. Preditores: (Constante), POPURB
 b. Variável Dependente: DESTAREA

Quanto à análise de resíduos, quando o modelo está satisfatoriamente ajustado, os resíduos padronizados (ver Seção 5.3.2.5) e os resíduos “estudentados” (ajustados a uma distribuição “t”) devem estar no intervalo $[-2,+2]$. Para o presente modelo, esses valores são $-1,124$; $+1,714$ e $-1,462$; $+1,891$ respectivamente para os resíduos padronizados e studentados. Gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (“popurb”) e versus o valor predito ajustado \hat{Y}_t são vistos na FIGURA 6.36. Conforme a Seção 5.3.2.5, esses gráficos não devem apresentar padrão de correlação algum.

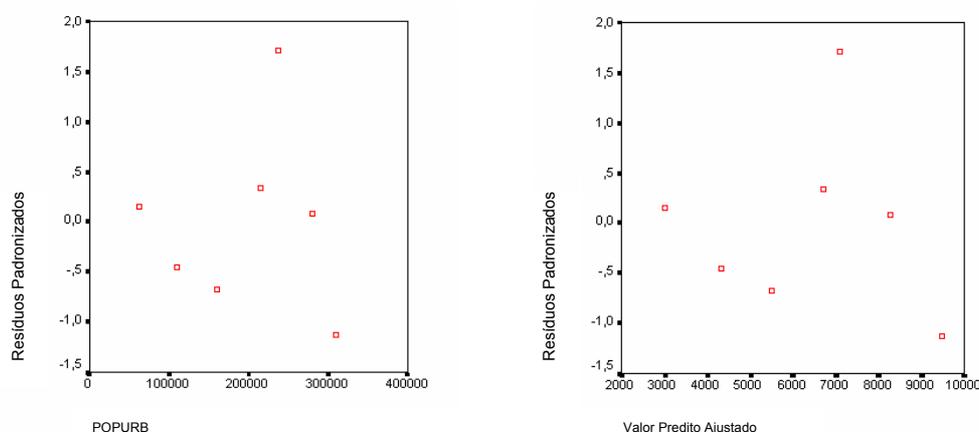


FIGURA 6.36 – Análise de resíduos para o modelo “nu/res_serv”: Bauru, 2000-2004.

Projeções heurísticas foram feitas para os valores das variáveis independentes com base nas suas tendências passadas. De acordo com o que foi exposto na Seção 5.6, a análise de séries temporais deveria ter sido empregada para este fim. Como este método de análise requer um mínimo de trinta observações, e como os PIBs municipais totais e setoriais de Bauru nas últimas três décadas não estavam disponíveis à época que esta pesquisa foi concluída, esta técnica estatística não pôde ser adotada.

Dois tipos de cenários não-estacionários para prognósticos de mudanças do uso do solo foram formulados: um otimista e um pessimista, com respectivamente super e subestimações da variável independente, como já definido na Seção 5.3.3. No primeiro caso, o valor de X referente à população urbana foi de 346.934 habitantes para os modelos “nu_res” e “nu/res_serv”; e US\$ 676.495,266 referente ao PIB industrial para o

modelo “nu_ind”. No cenário pessimista, X assumiu os valores de 325.369 habitantes para os modelos “nu_res” e “nu/res_serv”; e US\$ 650.964,881 relativo ao PIB industrial para o modelo “nu_ind”. Usando esses valores de X , probabilidades de transição foram calculadas para ambos cenários no curto prazo (TABELAS 6.39 e 6.40), empregando as equações de conversão apresentadas na Seção 5.3.2.6.

TABELA 6.39 – Matriz de probabilidades de transição otimistas para Bauru: 2000-2004.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,8830 \cdot 10^{-1}$	$1,0726 \cdot 10^{-2}$	0	$9,7098 \cdot 10^{-4}$	0	$3,5050 \cdot 10^{-10}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9999 \cdot 10^{-1}$	0	0	0	$1,1683 \cdot 10^{-10}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.40 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas para Bauru: 2000-2004.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9762 \cdot 10^{-1}$	$2,3729 \cdot 10^{-3}$	0	$4,5373 \cdot 10^{-6}$	0	$7,7541 \cdot 10^{-11}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9999 \cdot 10^{-1}$	0	0	0	$2,5847 \cdot 10^{-11}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.1.5.3 Simulações de Prognósticos

Adotando-se os mesmos conjuntos de variáveis independentes do último período de simulação (1988-2000) e seus respectivos pesos de evidência (TABELA 6.25), simulações estacionárias, otimistas e pessimistas foram geradas para Bauru no curto prazo (2004), usando-se respectivamente as TABELAS 6.31, 6.39 e 6.40 para se definir a quantia total de mudanças de uso. Essas simulações são apresentadas na FIGURA 6.37.

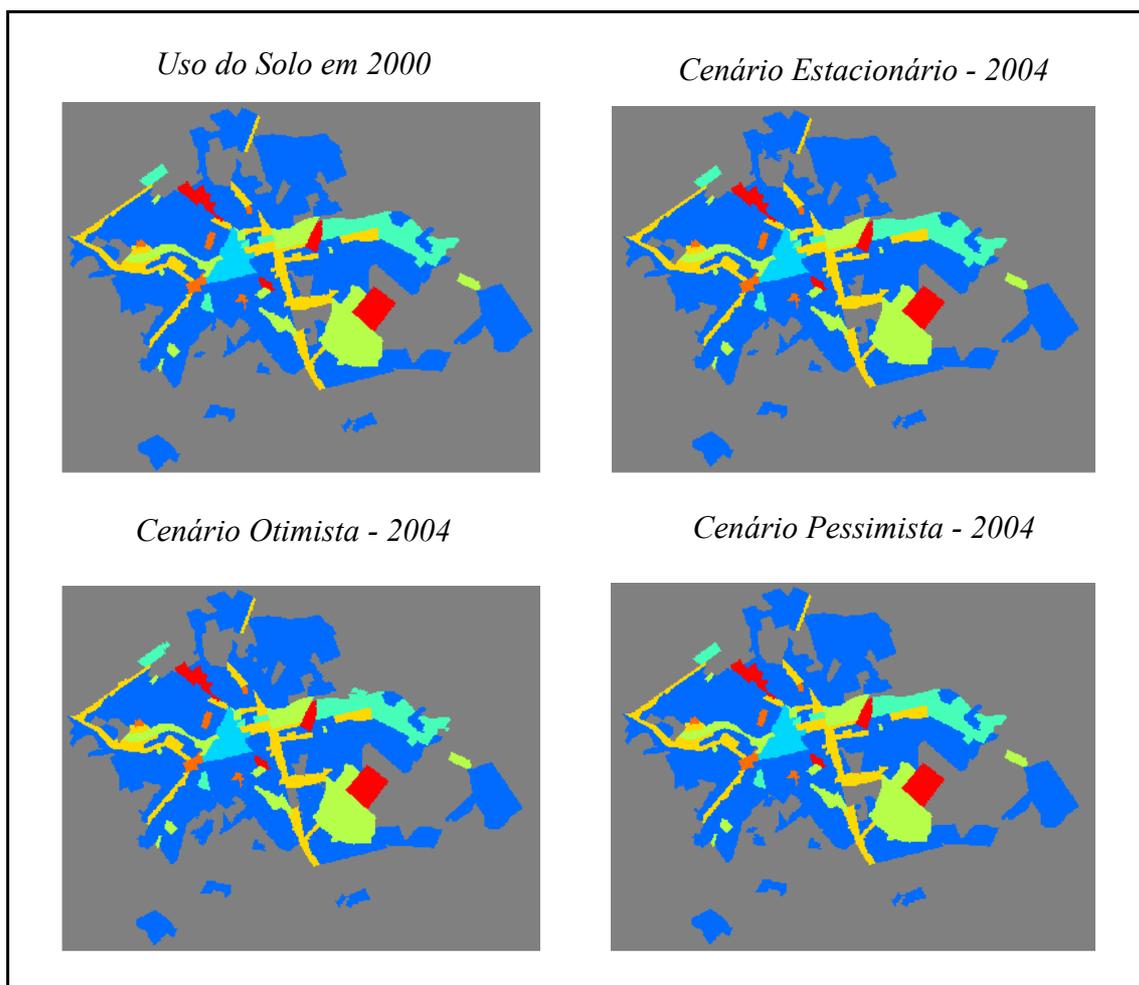


FIGURA 6.37 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2004 comparadas ao uso do solo real em Bauru - 2000.

Observa-se nas simulações de prognóstico acima que a expansão das áreas de serviços é ínfima. Isto não implica que não haverá crescimento econômico do setor de serviços no curto prazo, mas simplesmente que as áreas que abrigam o uso de serviços se submeterão a processos de adensamento.

As principais áreas onde surgem novos loteamentos residenciais estão localizadas nos setores norte e sul de Bauru, próximos aos eixos N-S de serviços e comércio. Este

padrão de expansão concorda com as tendências observadas em um mapa oficial recente da cidade de Bauru, publicado em 2003 (DAE, 2003).

Conforme já explicado na Seção 5.3.3, apenas suaves variações foram introduzidas nas projeções dos dados de população e econômicos. Isto é devido ao fato de que, em vista da tendência de continuidade administrativa demonstrada pelo atual governo federal, assim como das taxas de crescimento populacional continuamente decrescentes, espera-se que os cenários demográficos e macroeconômicos do Brasil nos últimos anos reproduzam-se na presente década.

6.1.6 Prognósticos de Médio Prazo: 2000 – 2007

6.1.6.1 Prognósticos Estacionários

Uma matriz de transição estacionária para o ano 2007 foi obtida usando-se a cadeia de Markov (Equação 5.66) com base na matriz de transição global 1988-2000, na qual a transição “ind_res” foi propositalmente ajustada para zero. Essas probabilidades de transição estacionárias são mostradas na TABELA 6.41.

TABELA 6.41 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Bauru, 2000-2007.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9034 \cdot 10^{-1}$	$9,2448 \cdot 10^{-3}$	0	$4,1278 \cdot 10^{-4}$	0	$3,0210 \cdot 10^{-10}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9999 \cdot 10^{-1}$	0	0	0	$1,0070 \cdot 10^{-10}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.1.6.2 Prognósticos Não-Estacionários

Os mesmos modelos de regressão linear usados para as predições de curto prazo foram usados para os prognósticos de médio prazo. Para o cenário otimista, o valor de X referente à população urbana foi de 350.119 habitantes para os modelos “nu_res” e “nu/res_serv”; e US\$ 694.833,993 relativo ao PIB industrial para o modelo “nu_ind” .

No cenário pessimista, X assumiu os valores de 322.877 habitantes para os modelos “nu_res” e “nu/res_serv”; e US\$ 651.084,742 concernente ao PIB industrial para o modelo “nu_ind”. Usando-se esses valores de X , probabilidades de transição foram calculadas para ambos cenários no médio prazo (TABELAS 6.42 e 6.43), empregando as equações de conversão apresentadas na Seção 5.3.2.6.

TABELA 6.42 – Matriz de probabilidades de transição otimistas para Bauru: 2000-2007.

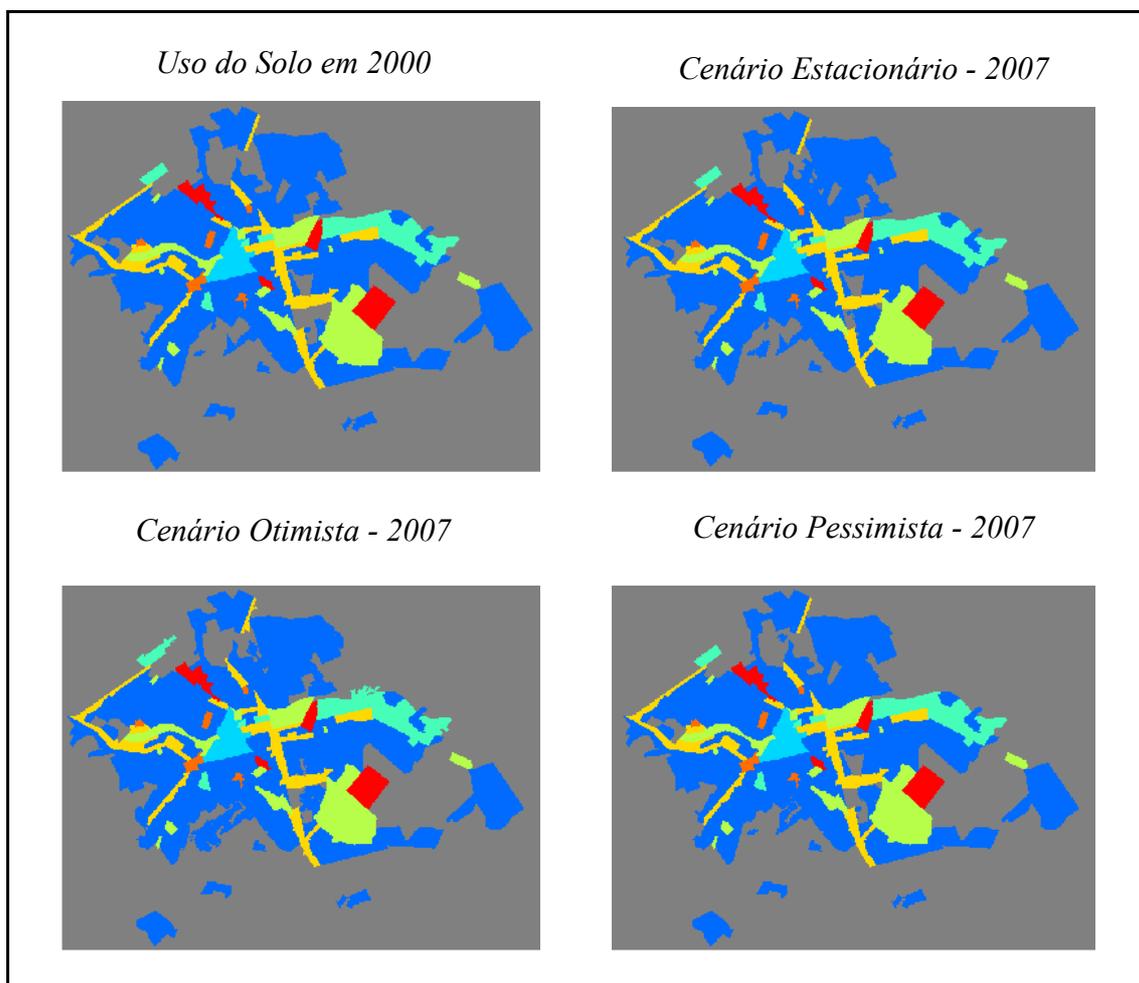
<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,7992*10^{-1}$	$1,8412*10^{-2}$	0	$1,6667*10^{-3}$	0	$6,0165*10^{-10}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9999*10^{-1}$	0	0	0	$2,0055*10^{-10}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.43 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas para Bauru: 2000-2007.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Institucional</i>	<i>Serviços</i>	<i>Uso Misto</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9592*10^{-1}$	$4,0732*10^{-3}$	0	$7,7884*10^{-6}$	0	$1,3310*10^{-10}$	0	0
<i>Residencial</i>	0	$9,9999*10^{-1}$	0	0	0	$4,4367*10^{-11}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Uso Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.1.6.3 Simulações de Prognósticos

Adotando-se os mesmos conjuntos de variáveis independentes do último período de simulação (1988-2000) e seus respectivos pesos de evidência (TABELA 6.25), simulações estacionárias, otimistas e pessimistas foram geradas para Bauru no curto prazo (2004), usando-se respectivamente as TABELAS 6.41, 6.42 e 6.43 para se definir a quantia total de mudanças de uso. Essas simulações são apresentadas na FIGURA 6.38.



Uso não-urbano
 Uso comercial
 Uso institucional
 Uso misto
 Uso residencial
 Uso industrial
 Uso de serviços
 Uso de lazer/recr.

FIGURA 6.38 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2007 comparadas ao uso do solo real em Bauru - 2000.

As simulações de prognóstico para o médio prazo indicam uma consolidação dos padrões de expansão residencial observados no mapa oficial da cidade de 2003 (DAE, 2003), no qual novas áreas residenciais estão localizadas nos setores norte e sul de Bauru, próximas aos eixos N-S de serviços e comércio.

6.2 Piracicaba

Conforme já mencionado na Seção 3.4.2.2, Piracicaba se distinguiu como um importante pólo produtor de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, e reúne grandes complexos de agroindústria sucro-alcooleira. A cidade também abriga um parque industrial diversificado, com indústrias de grande porte e segmentos de ponta.

A estrutura urbana de Piracicaba é comparativamente menos fragmentada que a de Bauru. A cidade deposita grande enfoque no rio, que é um marco para a vida social dos seus habitantes. A zona comercial central ladeia as áreas verdes estabelecidas ao longo das margens do rio Piracicaba, assim como as grandes áreas de faculdades e campi universitários nas porções norte e nordeste da cidade.

Em oposição ao padrão concentrado de desenvolvimento industrial de Bauru, os distritos industriais em Piracicaba são dispersos na mancha urbana. Os eixos de serviços, por sua vez, apresentam um padrão aproximadamente rádio-concêntrico, originando-se a partir da zona comercial central. Com a expansão da cidade para além das margens do Piracicaba, núcleos comerciais foram criados em ambos os lados do rio.

Nas próximas seções, os resultados das simulações de mudanças de uso do solo ao longo da série de 1962 a 1999 serão apresentados, seguidos das simulações de prognósticos geradas para o curto e médio prazo, respectivamente 2004 e 2007.

6.2.1 Período de Simulação: 1962 - 1985

Não há dados oficiais sobre a população de Piracicaba em 1962. Conforme anteriormente mencionado na Seção 6.1.1, o primeiro censo demográfico no Brasil foi feito em 1970 (IBGE, 1971), e a população total deste município à época era de 76.439 habitantes, dos quais 73.153 habitantes moravam em áreas urbanas. Nas estimativas de população conduzidas para o ano de 1985 (IBGE, 1987), a população total de Piracicaba se elevou a 252.079 pessoas, das quais 198.407 eram habitantes urbanos.

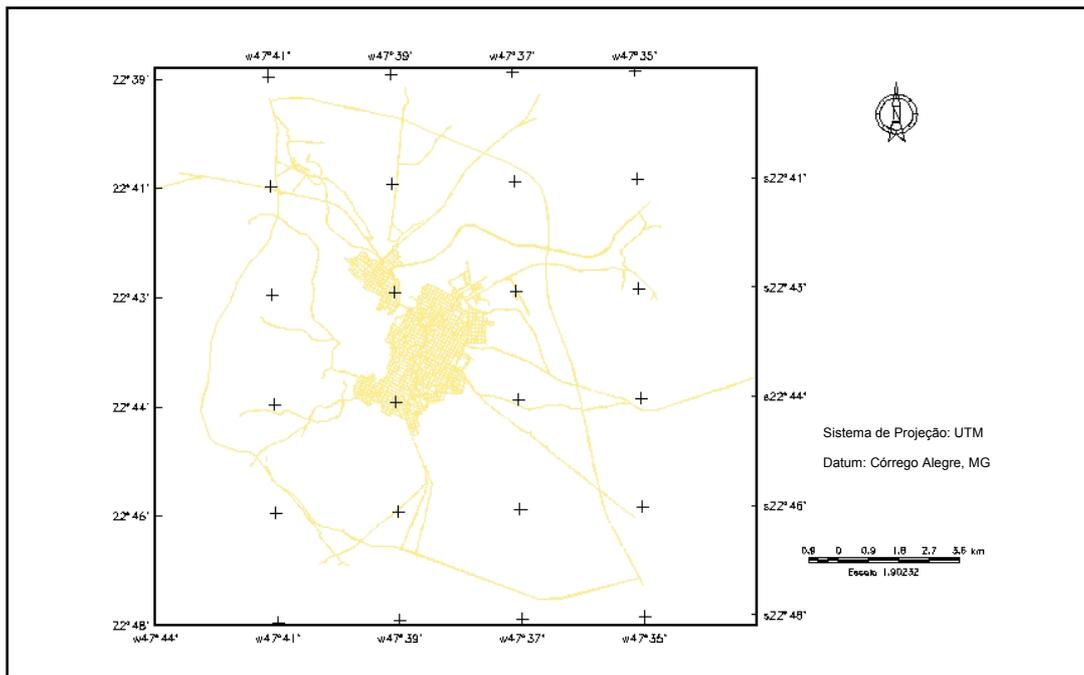


FIGURA 6.39 – Mapa oficial da cidade de Piracicaba em 1962 (mapa reconstituído).
 FONTE: LSN-ESALQ-USP (2003) e SEMUPLAN (1985).

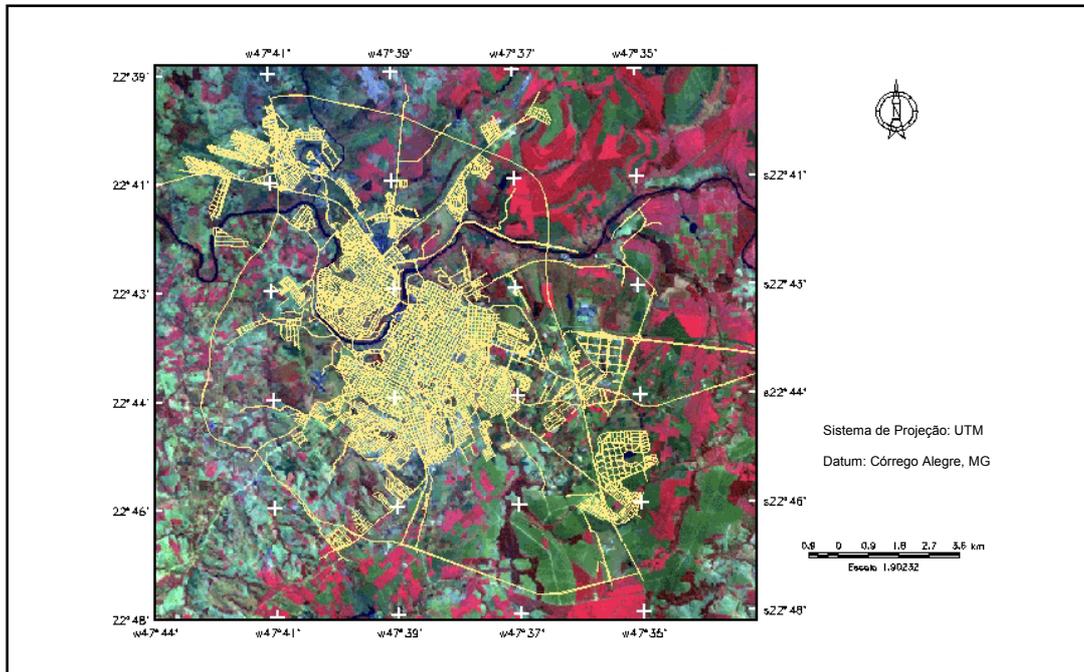


FIGURA 6.40 – Imagem TM – 5 de Piracicaba e mapa oficial da cidade em 1985.
 FONTE: INPE (1985) e SEMUPLAN (1985).

Os impactos deste crescimento populacional na extensão da área urbana podem ser vistos nas FIGURAS 6.39 e 6.40, que apresentam os mapas oficiais da cidade nos instantes inicial e final do período de simulação.

Os mapas de uso do solo inicial e final usados no período de simulação 1962 – 1985 (FIGURA 6.41) foram elaborados com base nos dois mapas oficiais da cidade anteriormente mostrados, em procedimentos de generalização aplicados à lei de zoneamento de 1964 e ao mapa de uso do solo de 1985 (SEMUPLAN, 1985), assim como na imagem de satélite digital de Piracicaba em 1985 (INPE, 1985).

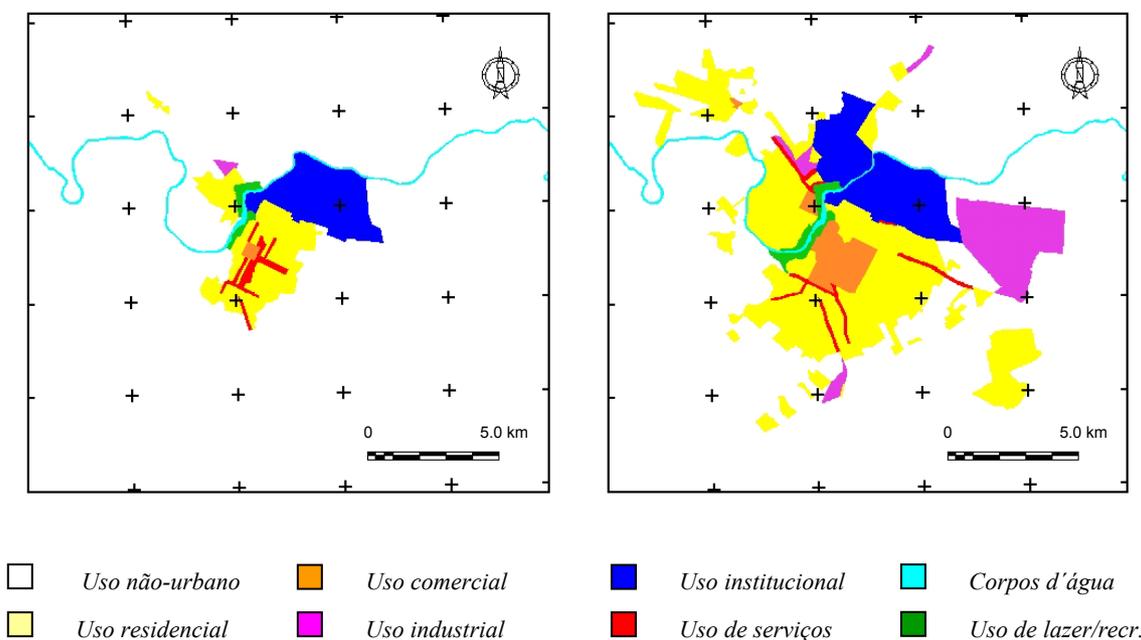


FIGURA 6.41 – Mapa de uso do solo de Piracicaba em 1962 (esquerda) e 1985 (direita).

Uma operação de tabulação cruzada foi feita entre ambos os mapas de uso do solo (FIGURA 6.42) de forma a gerar percentuais de transição para os diferentes tipos de mudanças de uso do solo existentes (TABELAS 6.44 e 6.45).

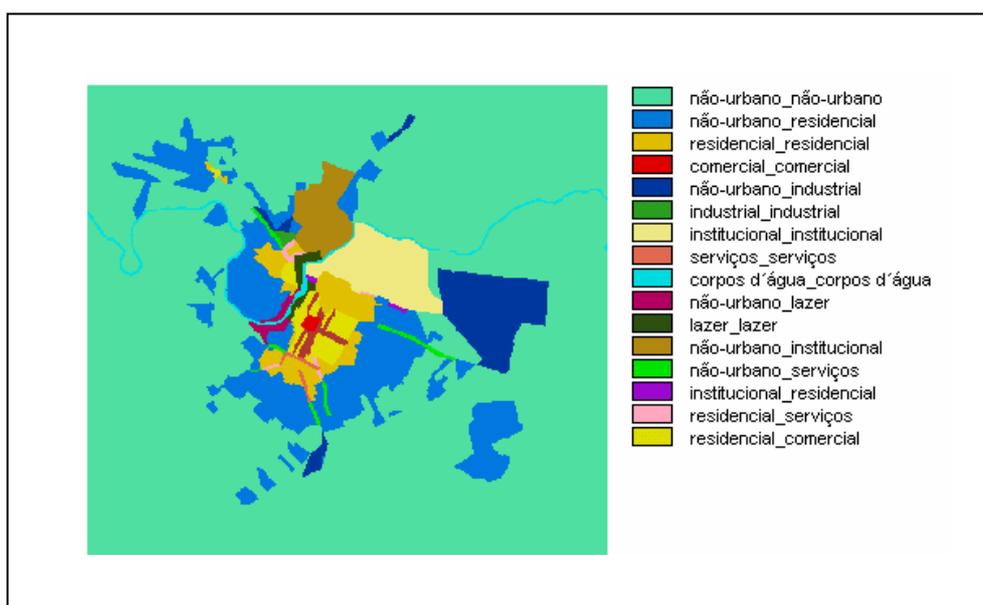


FIGURA 6.42 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso do solo de Piracicaba: 1962-1985.

TABELA 6.44 – Transições de uso do solo existentes em Piracicaba: 1962-1985.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>TRANSIÇÃO DE USO DO SOLO</i>
<i>NU_RES</i>	<i>Não-urbano para residencial</i>
<i>NU_IND</i>	<i>Não-urbano para industrial</i>
<i>NU_INST</i>	<i>Não-urbano para institucional</i>
<i>NU_SERV</i>	<i>Não-urbano para serviços</i>
<i>NU_LAZ</i>	<i>Não-urbano para lazer/recreação</i>
<i>RES_COM</i>	<i>Residencial para comercial</i>
<i>RES_SERV</i>	<i>Residencial para serviços</i>
<i>SERV_COM</i>	<i>Serviços para comercial</i>
<i>INST_RES</i>	<i>Institucional para residencial</i>

TABELA 6.45 – Matriz de probabilidades globais de transição para Piracicaba: 1962-1985.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Com.</i>	<i>Industr.</i>	<i>Instit.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-urbano</i>	0,8332	0,1103	0	0,0341	0,0163	0,0035	0	0,0026
<i>Resid.</i>	0	0,6439	0,3122	0	0	0,0439	0	0
<i>Com.</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Industr.</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Instit.</i>	0	0,0252	0	0	0,9745	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0,7505	0	0	0,2495	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Para o período de simulação 1962–1985, onze variáveis foram selecionadas (LSN-ESALQ-USP, 2003; SEMUPLAN, 1985), algumas das quais são apresentadas na FIGURA 6.43. As notações utilizadas para cada mapa de variável empregado neste experimento de simulação estão indicadas na TABELA 6.46.

TABELA 6.46 – Variáveis independentes das transições de uso em Piracicaba: 1962-1985.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>VARIÁVEIS DE MUDANÇAS DE USO FÍSICAS OU SÓCIO-ECONÔMICAS</i>
<i>dist_rios</i>	<i>Distâncias a rios.</i>
<i>dist_com</i>	<i>Distâncias à zona comercial principal.</i>
<i>dist_ind</i>	<i>Distâncias à zona industrial.</i>
<i>dist_inst</i>	<i>Distâncias a zonas institucionais.</i>
<i>dist_res</i>	<i>Distâncias a zonas residenciais.</i>
<i>dist_laz</i>	<i>Distâncias a zonas de lazer/recreação.</i>
<i>pp_est</i>	<i>Distâncias a ppis. estradas interurbanas de terra e pavimentadas.</i>
<i>urb_ext</i>	<i>Distâncias às principais vias urbanas e suas extensões.</i>
<i>int_est</i>	<i>Distâncias a estradas que interconectam loteam. resid. isolados.</i>
<i>eoper_est</i>	<i>Distâncias a estradas periféricas e-o.</i>
<i>trv_est</i>	<i>Distâncias a estradas interurbanas transversais (so-ne).</i>

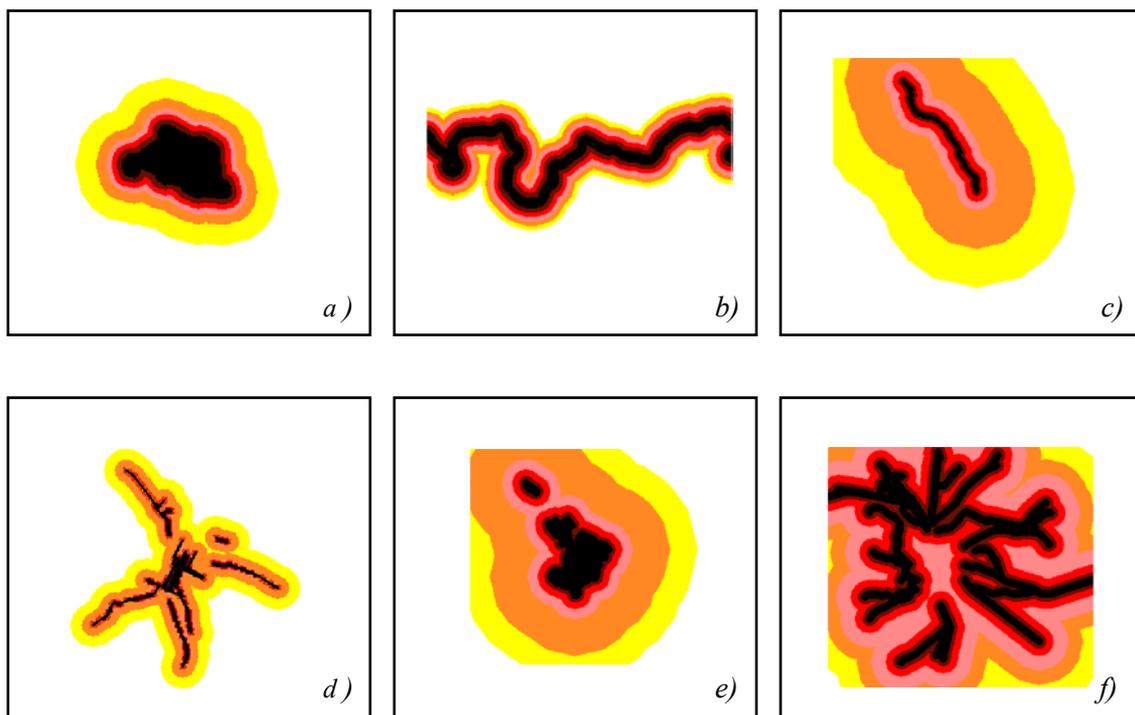


FIGURA 6.43 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Piracicaba durante o período 1962 – 1985: a) distâncias a zonas institucionais; b) distâncias a rios; c) distâncias a estradas que interconectam loteamentos residenciais isolados; d) distâncias às vias urbanas e suas extensões; e) distâncias a zonas residenciais; f) distâncias a estradas interurbanas de terra e pavimentadas.

A TABELA 6.47 indica qual variável foi selecionada para explicar cada uma das nove transições existentes; a TABELA 6.48 apresenta os valores obtidos para o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U) para os pares de variáveis usados para explicar o mesmo tipo de transição do uso do solo; e finalmente, a TABELA 6.49 apresenta os valores para os pesos positivos de evidência.

TABELA 6.47 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Piracicaba: 1962-1985.

NOTAÇÃO	NU_	NU_	NU_	NU_	NU_	RES_	RES_	SERV_	INST_
	RES	IND	INST	SERV	LAZ	COM	SERV	COM	RES
<i>dist_rios</i>					♦				
<i>dist_com</i>		♦		♦		♦	♦	♦	♦
<i>dist_ind</i>			♦						
<i>dist_inst</i>		♦	♦						
<i>dist_res</i>	♦			♦	♦				♦
<i>dist_laz</i>					♦				♦
<i>pp_est</i>	♦								
<i>urb_ext</i>				♦			♦		
<i>int_est</i>						♦			
<i>eoper_est</i>		♦							
<i>trv_est</i>			♦						

TABELA 6.48 – Associações entre variáveis independentes -Piracicaba: 1962-1985.

VARIÁVEL A	VARIÁVEL B	ÍNDICE DE CRAMER ($V_{A,B}$)	INCERTEZA ($U_{A,B}$)
<i>dist_rios</i>	<i>dist_laz</i>	0,2071	0,1219
	<i>dist_res</i>	0,1367	0,0387
<i>dist_com</i>	<i>dist_inst</i>	0,2513	0,1630
	<i>dist_laz</i>	0,2967	0,1619
	<i>dist_res</i>	0,5375	0,4524
	<i>eoper_est</i>	0,2152	0,1007
	<i>urb_ext</i>	0,3185	0,2243
	<i>int_est</i>	0,2708	0,1791
<i>dist_ind</i>	<i>trv_est</i>	0,1650	0,0920
<i>dist_inst</i>	<i>eoper_est</i>	0,2343	0,1470
	<i>dist_ind</i>	0,1969	0,1279
	<i>trv_est</i>	0,1440	0,0611
<i>dist_res</i>	<i>dist_laz</i>	0,2588	0,1208
	<i>pp_est</i>	0,2962	0,1607
	<i>urb_ext</i>	0,3229	0,2029

Como nenhum dos valores de associação superou o limiar de 0,50 simultaneamente para ambos os índices, nenhuma das variáveis preliminarmente selecionadas para a modelagem foram descartadas da análise.

TABELA 6.49 – Valores de W^+ para as variáveis independentes - Piracicaba:
1962–1985.

Transição de Uso	Variável	Pesos Positivos de Evidência W^+						
		1	2	3	4	5	6	7
NU_RES	<i>dist_res</i> ¹	3,5372	2,8824	2,4818	1,2739	-0,7771	-0,7661	0
	<i>pp_est</i> ²	0,9624	0,7108	0,3230	-0,8406	0	0	0
NU_IND	<i>dist_com</i> ³	0	0	0	0	-0,3359	0,6469	-4,1709
	<i>dist_inst</i> ⁴	1,0527	1,7593	1,8492	1,7601	1,6944	1,6070	-0,9707
	<i>eoper_est</i> ²	0,4117	0,7181	1,1100	1,8514	1,9465	-0,6499	-2,0727
NU_INST	<i>dist_inst</i> ⁴	2,3179	2,5599	2,5427	2,3438	2,2362	1,5974	0
	<i>dist_ind</i> ⁵	2,5498	3,3498	3,8420	3,7771	3,4886	2,0421	0
	<i>trv_est</i> ⁶	1,7467	1,6864	1,9748	1,6190	1,7839	1,2866	-6,5520
NU_SERV	<i>dist_res</i> ¹	2,5528	2,5745	1,5656	0,6994	-0,6624	0	0
	<i>dist_com</i> ³	0	0	2,0271	2,2408	1,2789	-2,0861	0
	<i>urb_ext</i> ⁷	5,7160	1,9544	0,0494	0,5500	-0,0357	0	0
NU_LAZ	<i>dist_res</i> ¹	2,4515	3,0108	2,2754	-1,4958	0	0	0
	<i>dist_rios</i> ⁸	3,0856	0,9169	-0,4063	0	0	0	0
	<i>dist_laz</i> ⁸	5,6992	4,8919	3,4233	3,5253	3,4364	1,2944	0
RES_COM	<i>dist_com</i> ³	2,6250	1,4373	-0,8688	0	0	0,6390	0
	<i>int_est</i> ⁹	0,2626	0,4668	-0,1211	-0,2062	0,2615	0	0
RES_SERV	<i>dist_com</i> ³	0	-1,3292	-0,2857	1,5782	0	0	0
	<i>urb_ext</i> ⁷	3,2240	-0,2676	-2,8540	0	0	0	0
SERV_COM	<i>dist_com</i> ³	0	0	-2,9027	0	0	0	0
IND_RES	<i>dist_res</i> ¹	1,3750	1,1637	0,2279	0	0	0	0
	<i>dist_com</i> ³	0	0	1,3783	0,2638	-2,1116	0	0
	<i>dist_laz</i> ⁸	3,1220	-1,1165	0	0	0	0	-0,3929

Nota: Faixas de distâncias em metros

¹ 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-1000; 4: 1000-1750; 5: 1750-4500; 6: 4500-6500; 7: >6500

² 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-1000; 4: 1000-2000; 5: 2000-3000; 6: 3000-4500; 7: >4500

³ 1: 0 -500; 2: 500-1000; 3: 1000-2000; 4: 2000-3000; 5: 3000-4500; 6: 4500-8000; 7: >8000

⁴ 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1500; 6: 1500-2500; 7: >2500

⁵ 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1500; 6: 1500-3000; 7: > 3000

⁶ 1: 0 -50; 2: 50-100; 3: 100-150; 4: 150-200; 5: 200-500; 6: 500-1500; 7: > 1500

⁷ 1: 0 -50; 2: 50-100; 3: 100-150; 4: 150-200; 5: 200-500; 6: 500-1000; 7: > 1000

⁸ 1: 0 -250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1250; 6: 1250-1500; 7: > 1500

⁹ 1: 0 -100; 2: 100-250; 3: 250-550; 4: 550-1000; 5: 1000-3000; 6: 3000-5000; 7: > 5000

Considerando-se o processo de calibração executado para este experimento, tornou-se claro que a probabilidade de certas áreas não-urbanas na cidade de Piracicaba para abrigar loteamentos residenciais (transição “nu_res”) depende fortemente da existência prévia deste tipo de loteamentos nas circunvizinhanças, uma vez que isto implica a possibilidade de se estender rede de infra-estrutura eventualmente existente nas imediações. Essa transição também depende da disponibilidade de acesso a essas áreas.

Quanto à transição de “áreas não-urbanas para uso industrial (nu_ind)”, há três grandes determinantes. Primeiro, áreas industriais demandam a proximidade de áreas institucionais, já que estas últimas estão localizadas em áreas mais distantes, e portanto, mais baratas. Segundo, embora novos loteamentos industriais ocorram em áreas mais periféricas, eles preferem localizar-se não tão distantes de agrupamentos centrais de atividades comerciais, as quais concedem apoio logístico aos distritos industriais. E por fim, áreas industriais requerem boas condições de acessibilidade, em vista da crescente necessidade de entrada de matérias-primas e escoamento da produção.

Com relação à implementação de grandes áreas institucionais (“nu_inst”), nota-se que elas surgem próximas a áreas industriais, em vista da necessidade de terrenos amplos e baratos para a sua expansão. Elas também se localizam próximas a estradas periféricas e áreas institucionais previamente existentes, uma vez que elas crescem como extensões de áreas institucionais já estabelecidas.

Quanto à transição de “áreas não-urbanas para uso de serviços (nu_serv)”, três grandes fatores são cruciais: a proximidade dessas áreas a zonas comerciais, sua imediação a áreas de uso residencial, e por fim, sua localização estratégica em relação às principais vias urbanas de Piracicaba. O primeiro fator responde pelo mercado de fornecedores (e em alguns casos, também mercado de consumidores) de serviços; o segundo fator representa o mercado de consumidores propriamente dito; e o terceiro e último fator corresponde à acessibilidade para ambos mercados relacionados ao uso de serviços.

A criação de zonas de lazer e recreação (“nu_laz”), por sua vez, ocorre adjacente a zonas de mesmo tipo já existentes, uma vez que essas zonas são comumente criadas como extensões de áreas previamente estabelecidas para o mesmo fim. Essas zonas são

criadas ao longo de margens baixas dos rios, uma vez que essas áreas são inundáveis, e assim, impróprias para abrigar outros usos urbanos.

Zonas de lazer e recreação, da mesma forma, são estrategicamente localizadas em relação à sua área de influência, i.e., próximas às áreas residenciais, que são justamente aquelas que abrigam maiores densidades populacionais.

A transição “residencial para uso de serviços (res_serv)” supõe boas condições de acessibilidade e uma localização não tão distante do mercado de fornecedores (e em alguns casos, também mercado de consumidores), representado pela área comercial central.

A conversão de “uso residencial em zonas comerciais (res_com)” demonstrou que loteamentos residenciais mais distantes tendem a desenvolver núcleos comerciais próprios, que geralmente ocorrem ao longo de vias de maior importância hierárquica, como forma de assegurar tanto visibilidade estratégica quanto boas condições de acessibilidade. Além disso, loteamentos residenciais localizados muito próximos à área comercial central são suscetíveis a cederem espaço ao uso comercial.

Em relação à mudança de uso de serviços para uso comercial, a mesma pode ser explicada pelo fato de que os eixos de serviços estabelecidos muito próximos à área comercial central tendem a ser “engolidos” por esta última.

E finalmente, o último tipo de transição concerne a transformação de áreas institucionais em zonas residenciais. Esta conversão diz respeito a áreas institucionais localizadas nas imediações de loteamentos residenciais, as quais são valorizadas pela sua proximidade a áreas de lazer e comerciais.

Os mapas de probabilidades de transição, gerados pelo DINAMICA com base nos valores dos pesos positivos de evidência (W^+), juntamente com os respectivos mapas de transição de uso são vistos nas FIGURAS 6.44 a, 6.44b e 6.44c.

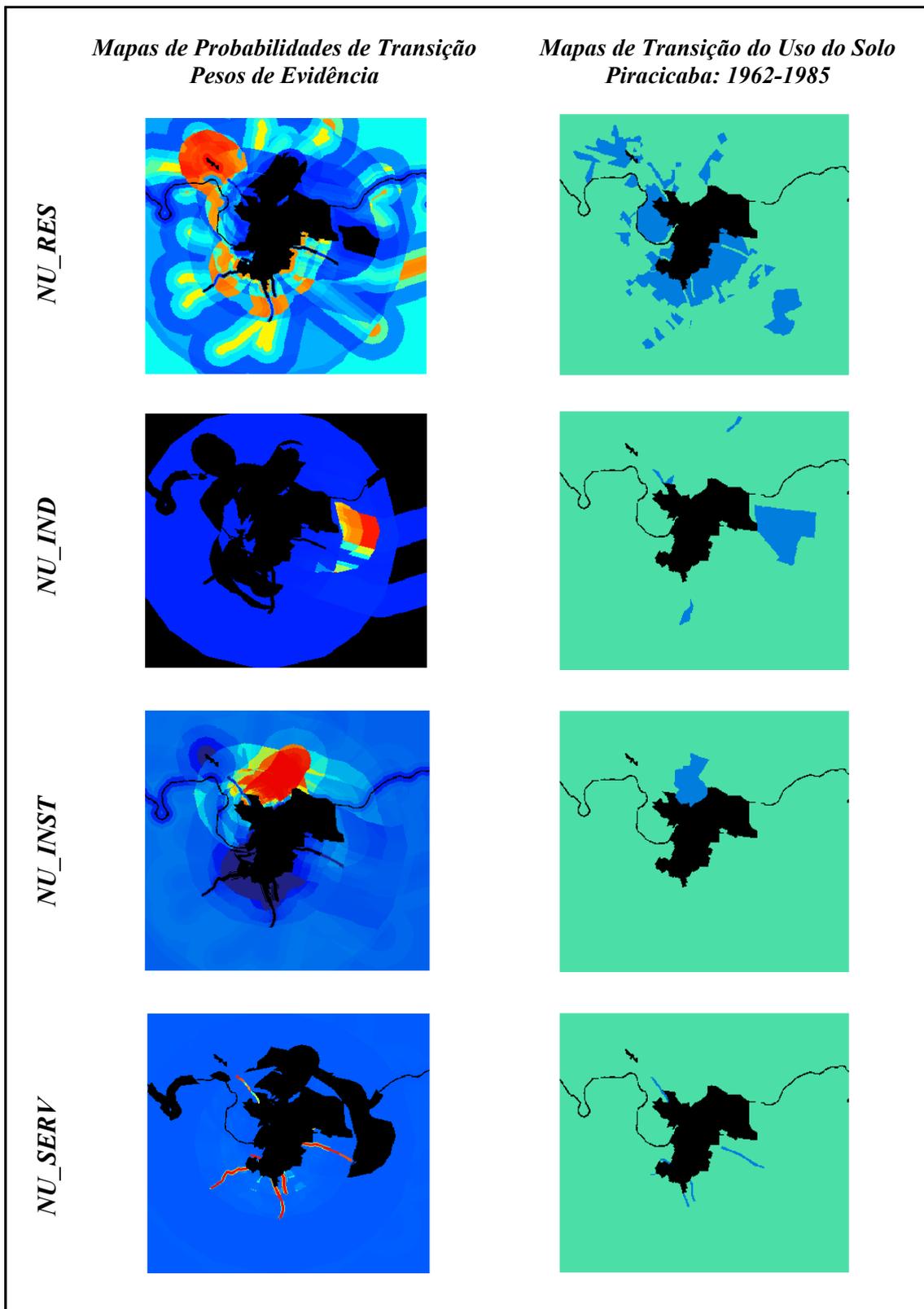


FIGURA 6.44a – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso - Piracicaba.

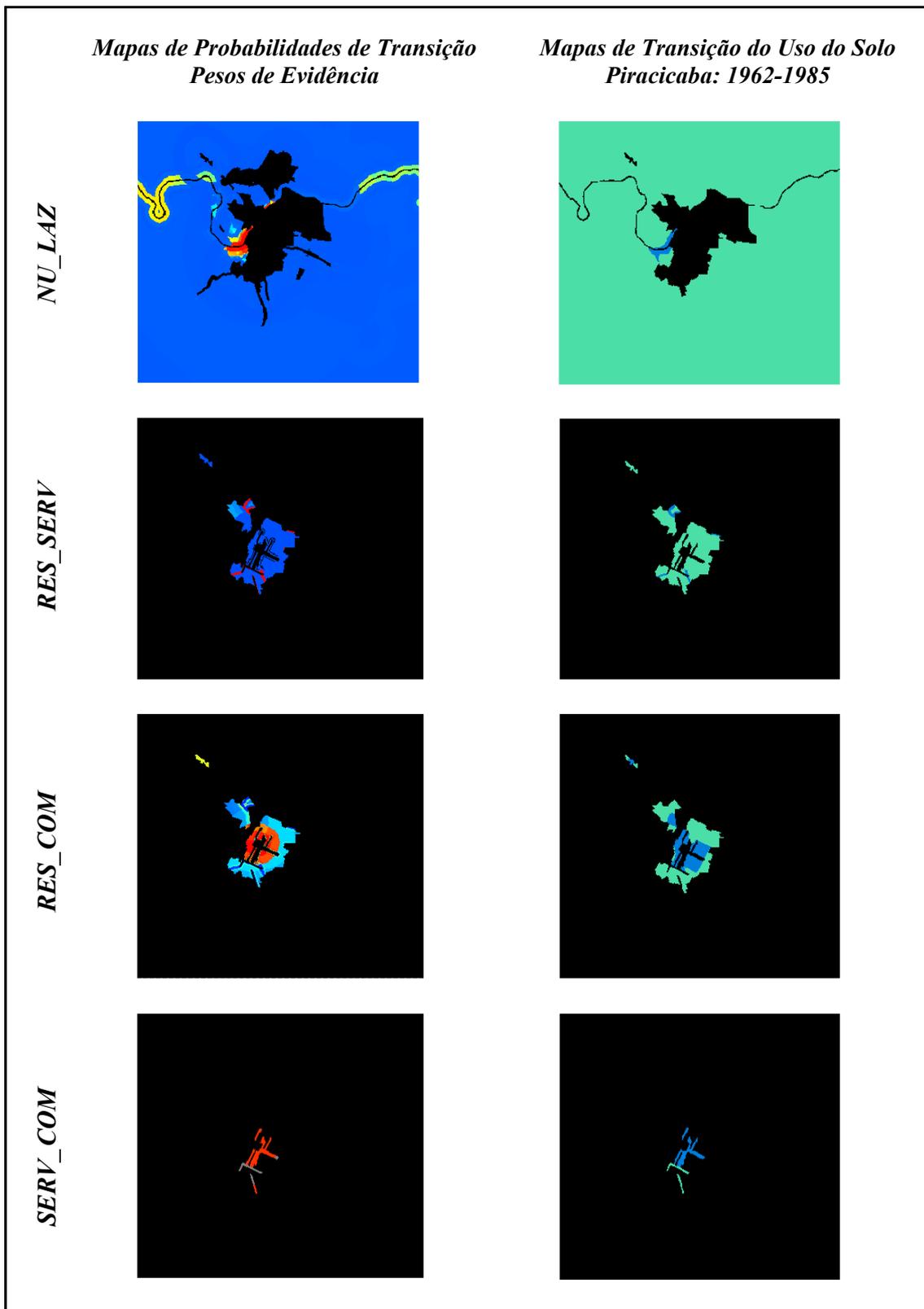


FIGURA 6.44b – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso - Piracicaba.

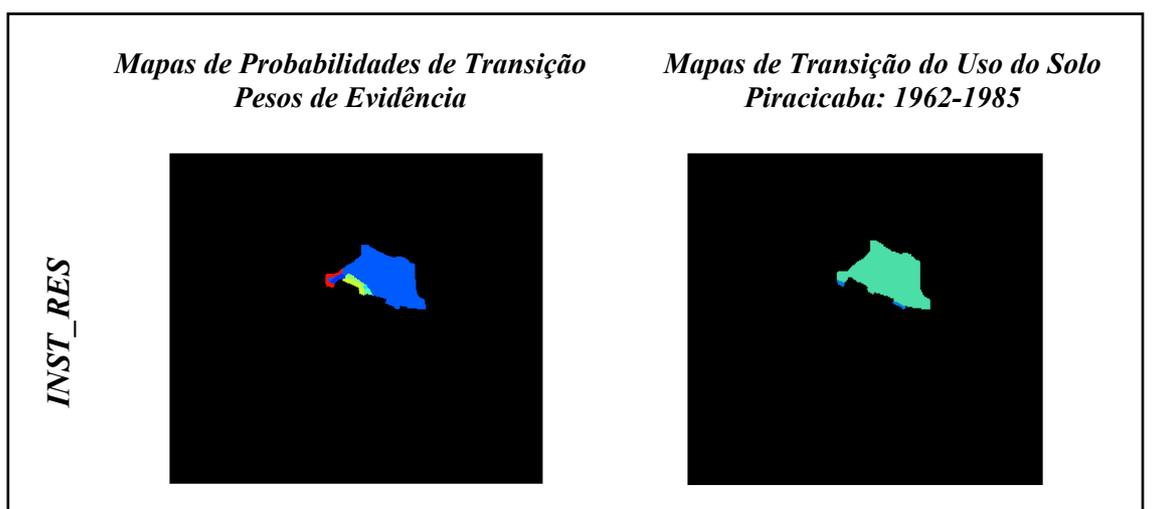


FIGURA 6.44c – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso - Piracicaba.

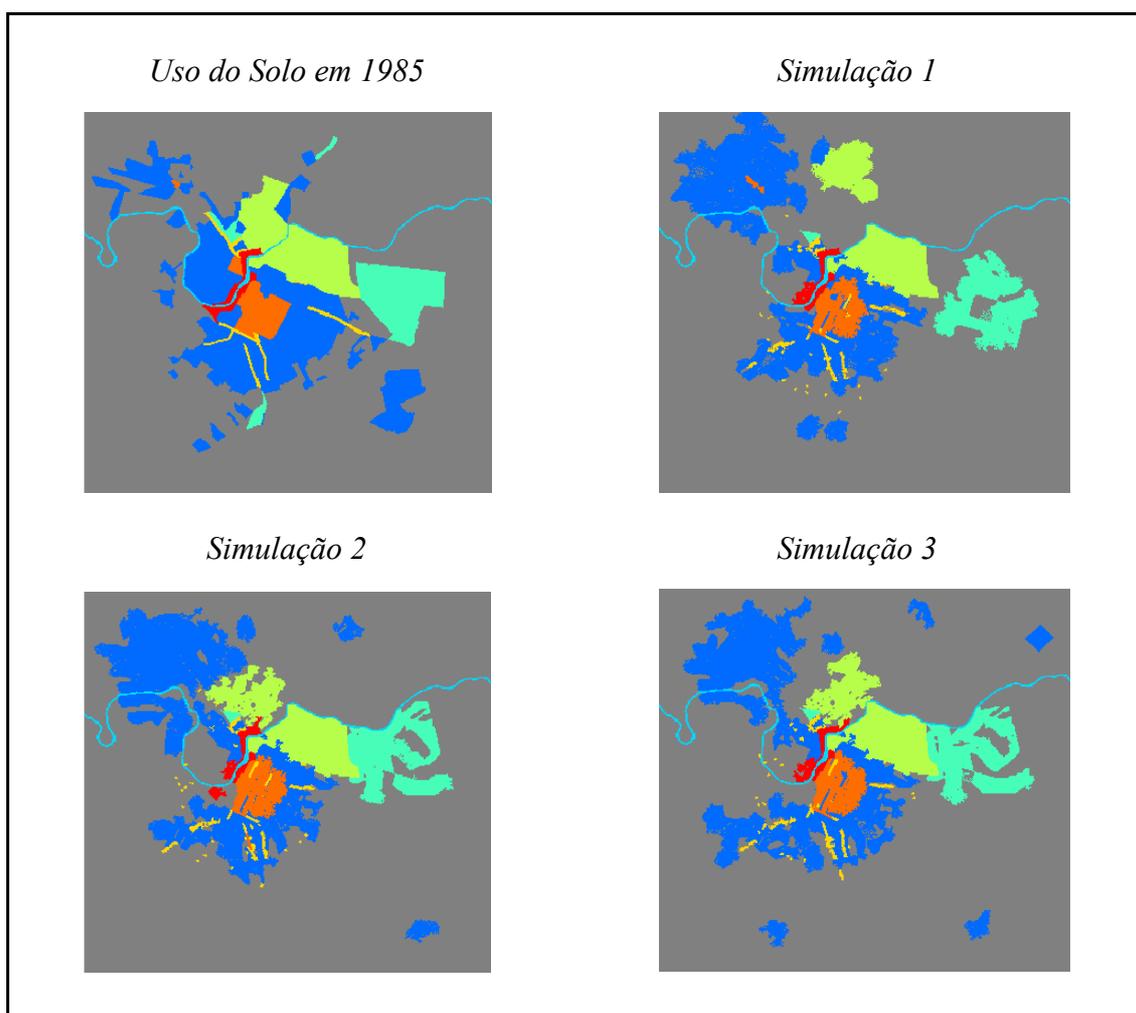
Os três melhores resultados de simulação produzidos para o período 1962-1985 são apresentados na FIGURA 6.45. Os parâmetros internos do DINAMICA associados com essas simulações ótimas são vistos na TABELA 6.50, cujos testes de validação estatística para janelas 3x3, 5x5 e 9x9, e $k = 0,5$ estão listados na TABELA 6.51.

TABELA 6.50 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Piracicaba: 1962–1985.

<i>Transição de Uso do Solo</i>	<i>Tamanho Médio de Manchas</i>	<i>Variância do Tamanho</i>	<i>Proporção do 'Expander'</i>	<i>Proporção do 'Patcher'</i>	<i>Número de Iterações</i>
<i>NU_RES</i>	300	30	0,85	0,15	300
<i>NU_IND</i>	1500	1	0,10	0,90	300
<i>NU_INST</i>	2000	1	0	1,00	300
<i>NU_SERV</i>	5	0	0,05	0,95	300
<i>NU_LAZ</i>	100	1	0,15	0,85	300
<i>RES_COM</i>	300	10	0,20	0,80	300
<i>RES_SERV</i>	8	0	0,05	0,95	300
<i>SERV_COM</i>	100	1	0,65	0,35	300
<i>INST_RES</i>	20	1	0,50	0,50	300

TABELA 6.51 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Piracicaba: 1962-1985.

<i>Simulações</i>	<i>Qualidade do Ajuste (“Goodness-of-Fit” - F)</i>
S_1	$F = 0,842271$
S_2	$F = 0,834702$
S_3	$F = 0,840050$



Uso não-urbano
 Uso comercial
 Uso institucional
 Corpos d’água
 Uso residencial
 Uso industrial
 Uso de serviços
 Uso de lazer/recr.

FIGURA 6.45 – Melhores simulações comparadas com o uso do solo em Piracicaba - 1985.

6.2.2 Período de Simulação: 1985 - 1999

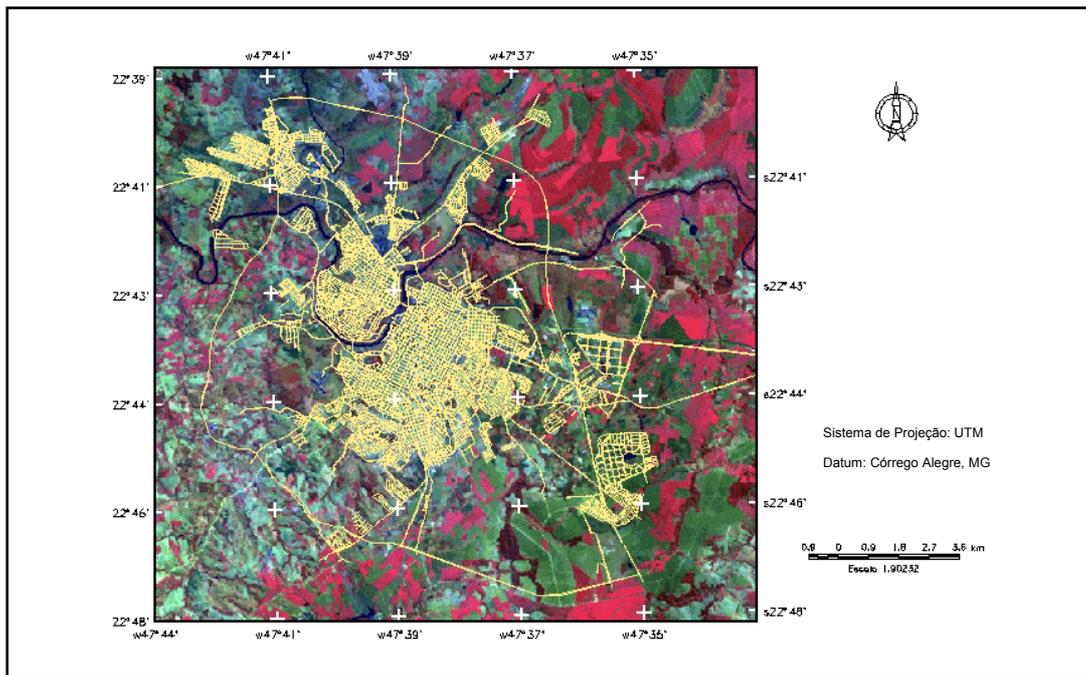


FIGURA 6.46 – Imagem TM – 5 de Piracicaba e mapa oficial da cidade em 1985.
 FONTE: INPE (1985) e SEMUPLAN (1985).

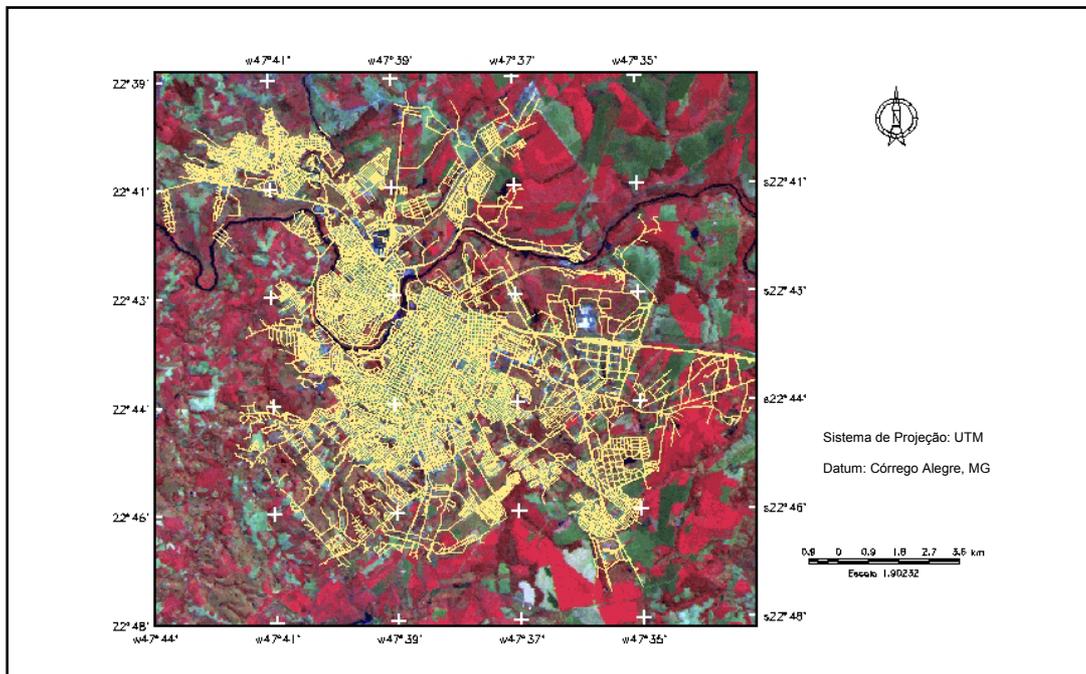


FIGURA 6.47 – Imagem TM – 5 de Piracicaba e mapa oficial da cidade em 1999.
 FONTE: INPE (1999) e SEMUPLAN (1999).

Conforme exposto na Seção 6.2.1, a população de Piracicaba no instante inicial deste período de simulação era de 252.079 habitantes, dos quais 198.407 pessoas eram habitantes urbanos. Em 1999, a população total somava 319.104 habitantes, dos quais 309.531 habitantes moravam em áreas urbanas (IBGE, 1999). A taxa de crescimento populacional para este período é de cerca de 1,56%. Os efeitos desse crescimento populacional na extensão da área urbana podem ser vistos nas FIGURAS 6.46 e 6.47, que apresentam os mapas oficiais da cidade nos instantes inicial e final da simulação.

Os mapas de uso do solo inicial e final usados no período de simulação 1985 – 1999 (FIGURA 6.48) foram elaborados com base nos dois mapas oficiais da cidade anteriormente mostrados, em procedimentos de generalização aplicados aos mapas de uso do solo de 1985 e 1999 (SEMUPLAN, 1985, 1999), assim como nas imagens de satélite digitais de Piracicaba em 1985 e 1999 (INPE, 1985, 1999).

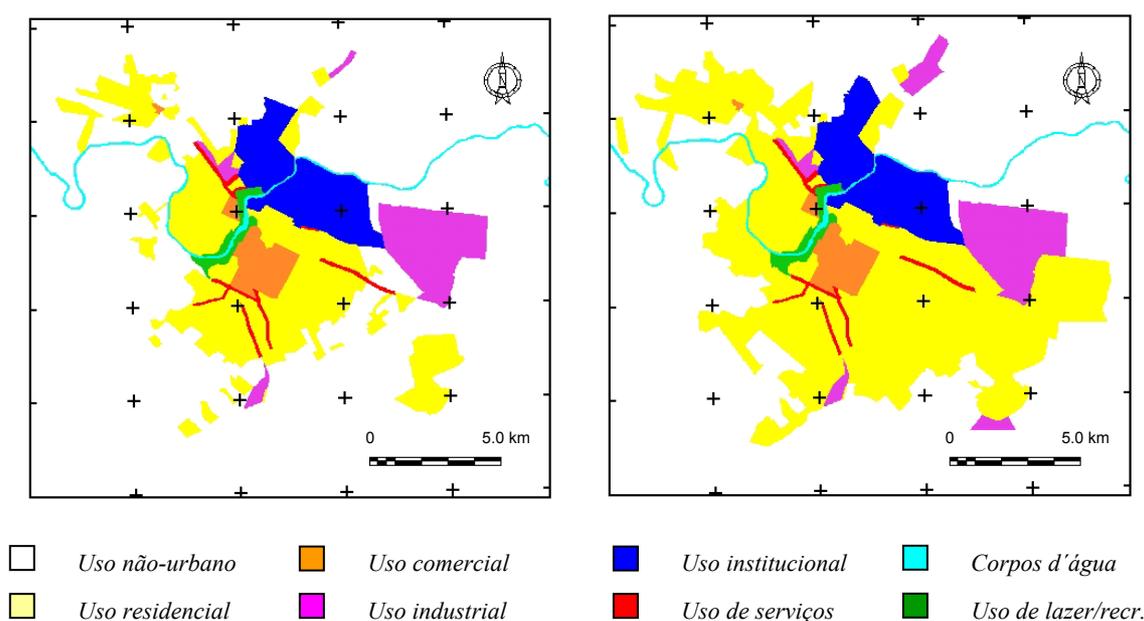


FIGURA 6.48 – Mapa de uso do solo de Piracicaba em 1985 (esquerda) e 1999 (direita).

Uma operação de tabulação cruzada foi feita entre ambos os mapas de uso do solo (FIGURA 6.49) de forma a gerar percentuais de transição para os diferentes tipos de mudanças de uso do solo existentes (TABELAS 6.52 e 6.53).

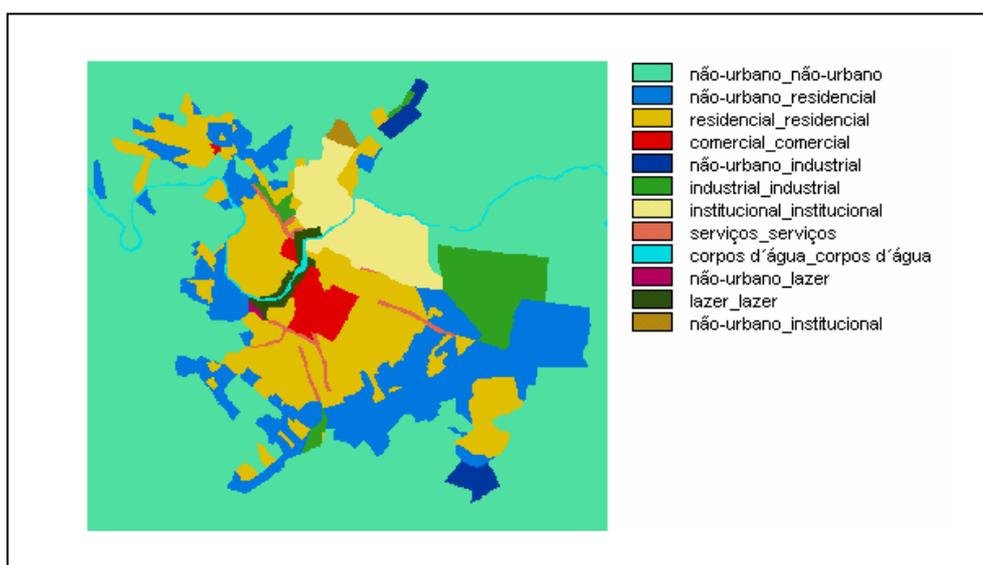


FIGURA 6.49 – Mapa de tabulação cruzada entre os mapas de uso do solo de Piracicaba: 1985-1999.

TABELA 6.52 – Transições de uso do solo existentes em Piracicaba: 1985–1999.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>TRANSIÇÃO DE USO DO SOLO</i>
<i>NU_RES</i>	<i>Não-urbano para residencial</i>
<i>NU_IND</i>	<i>Não-urbano para industrial</i>
<i>NU_INST</i>	<i>Não-urbano para institucional</i>
<i>NU_LEIS</i>	<i>Não-urbano para lazer/recreação</i>

TABELA 6.53 – Matriz de probabilidades globais de transição para Piracicaba: 1985–1999.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Com.</i>	<i>Industr.</i>	<i>Instít.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-urbano</i>	<i>0,8353</i>	<i>0,1501</i>	<i>0</i>	<i>0,0113</i>	<i>0,0028</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,0005</i>
<i>Resid.</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Com.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Industr.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Instít.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Serviços</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Rios</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>
<i>Laz./Recr.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>

Para o período de simulação 1985–1999, oito variáveis foram selecionadas (SEMUPLAN, 1999), algumas delas estão apresentadas na FIGURA 6.50 abaixo.

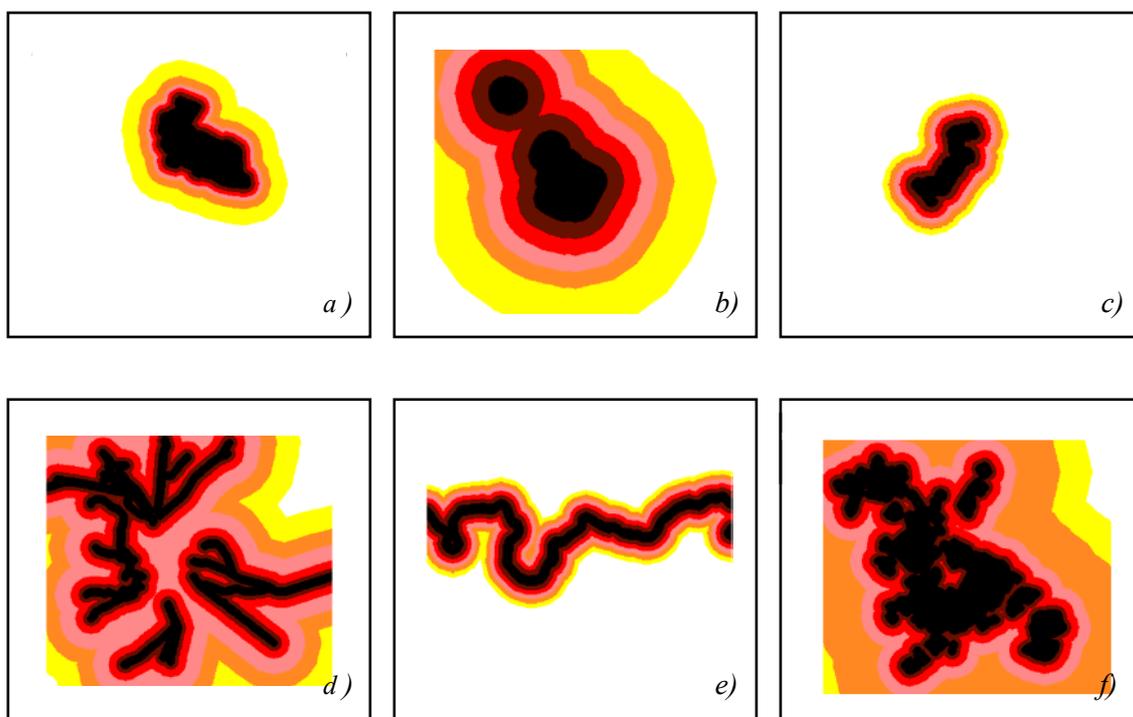


FIGURA 6.50 – Variáveis independentes usadas para explicar as transições de uso em Piracicaba durante o período de simulação 1985 – 1999: a) distâncias a zonas institucionais; b) distâncias a zonas comerciais; c) distâncias a zonas de lazer e recreação; d) distâncias às principais estradas urbanas e interurbanas de terra e pavimentadas; e) distâncias a rios; f) distâncias a zonas residenciais.

A TABELA 6.54 mostra as notações utilizadas para cada mapa de variável empregado neste experimento de simulação; a TABELA 6.55 indica qual variável foi selecionada para explicar cada uma das cinco transições existentes; a TABELA 6.56 apresenta os valores obtidos para o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U) para os pares de variáveis usadas para explicar o mesmo tipo de transição do uso do

solo; e finalmente, a TABELA 6.57 apresenta os valores para os pesos positivos de evidência.

TABELA 6.54– Variáveis independentes das transições de uso em Piracicaba: 1962-1985.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>VARIÁVEIS DE MUDANÇAS DE USO FÍSICAS OU SÓCIO-ECONÔMICAS</i>
<i>dist_rios</i>	<i>Distâncias a rios.</i>
<i>dist_com</i>	<i>Distâncias a zonas comerciais.</i>
<i>dist_ind</i>	<i>Distâncias a zonas industriais de pequeno porte.</i>
<i>dist_inst</i>	<i>Distâncias a zonas institucionais.</i>
<i>dist_res</i>	<i>Distâncias a zonas residenciais.</i>
<i>dist_laz</i>	<i>Distâncias a zonas de lazer/recreação.</i>
<i>int_est</i>	<i>Distâncias às principais estradas interurbanas.</i>
<i>pp_est</i>	<i>Distâncias às ppis. estradas urbanas e interurb. de terra e pavimentadas.</i>

TABELA 6.55 – Seleção de variáveis para as transições de uso em Piracicaba: 1985-1999.

<i>NOTAÇÃO</i>	<i>NU_RES</i>	<i>NU_IND</i>	<i>NU_INST</i>	<i>NU_LAZ</i>
<i>dist_rios</i>				♦
<i>dist_com</i>		♦		
<i>dist_ind</i>		♦		
<i>dist_inst</i>			♦	
<i>dist_res</i>	♦	♦		♦
<i>dist_laz</i>				♦
<i>int_est</i>		♦	♦	
<i>pp_est</i>	♦			

Da mesma forma que no primeiro período de simulação, como nenhum dos valores de associação superou o limiar de 0,50 simultaneamente para ambos os índices, nenhuma das variáveis preliminarmente selecionadas para a modelagem foram descartadas da análise.

TABELA 6.56 – Associações entre variáveis independentes -Piracicaba: 1985-1999.

<i>VARIÁVEL A</i>	<i>VARIÁVEL B</i>	<i>ÍNDICE DE CRAMER</i> <i>(V_{A,B})</i>	<i>INCERTEZA</i> <i>(U_{A,B})</i>
<i>dist_res</i>	<i>dist_rios</i>	0,1120	0,0252
	<i>dist_com</i>	0,3955	0,2690
	<i>dist_laz</i>	0,1445	0,0674
	<i>dist_ind</i>	0,1518	0,0492
	<i>pp_est</i>	0,3141	0,1715
	<i>int_est</i>	0,2458	0,1025
<i>dist_com</i>	<i>dist_ind</i>	0,1743	0,0537
	<i>int_est</i>	0,1139	0,0243
<i>int_est</i>	<i>dist_ind</i>	0,3339	0,1764
	<i>dist_inst</i>	0,1808	0,0870
<i>dist_laz</i>	<i>dist_rios</i>	0,2328	0,1368

TABELA 6.57 – Valores de W^+ para as variáveis independentes - Piracicaba: 1985–1999.

<i>Transição de Uso</i>	<i>Variável</i>	<i>Pesos Positivos de Evidência W⁺</i>						
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>NU_RES</i>	<i>dist_res¹</i>	2,1009	1,3378	0,2675	-0,7339	-1,3935	0	0
	<i>pp_est²</i>	1,2736	0,9527	0,4770	-0,8162	-3,7650	0	0
<i>NU_IND</i>	<i>dist_com³</i>	0	0	0	0	-1,5333	1,0890	-2,8871
	<i>dist_ind⁴</i>	2,8956	0	0	0	0	0,8313	0
	<i>dist_res¹</i>	-0,5849	0,5347	1,1667	0,7213	0	0	0
<i>NU_INST</i>	<i>int_est⁵</i>	2,2310	0,9677	0,5135	0,9252	0	0	0
	<i>dist_inst⁶</i>	4,0903	3,5881	3,0078	-0,4728	0	0	0
	<i>int_est⁵</i>	1,2368	1,7747	1,7116	0	0	0	0
<i>NU_LAZ</i>	<i>dist_rios⁷</i>	1,2483	2,8570	1,2788	0	0	0	0
	<i>dist_res¹</i>	2,2379	0,0639	0	0	0	0	0
	<i>dist_laz⁷</i>	7,9451	4,0632	0	0	0	0	0

Nota: Faixas de distâncias em metros

¹ 1: 0-250; 2: 250-500; 3: 500-1000; 4: 1000-1750; 5: 1750-4500; 6: 4500-6500; 7: > 6500

² 1: 0-250; 2: 250-500; 3: 500-1000; 4: 1000-2000; 5: 2000-3000; 6: 3000-4500; 7: > 4500

³ 1: 0-1000; 2: 1000-2000; 3: 2000-3000; 4: 3000-4000; 5: 4000-5000; 6: 5000-7500; 7: >7500

⁴ 1: 0-750; 2: 750-1500; 3: 1500-2500; 4: 2500-3500; 5: 3500-4500; 6: 4500-6500; 7: >6500

⁵ 1: 0-250; 2: 250-750; 3: 750-1250; 4: 1250-2250; 5: 2250-3250; 6: 3250-4250; 7: > 4250

⁶ 1: 0-250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1500; 6: 1500-2500; 7: > 2500

⁷ 1: 0-250; 2: 250-500; 3: 500-750; 4: 750-1000; 5: 1000-1250; 6: 1250-1500; 7: > 1500

Da mesma forma que no período precedente (1962-1985), a transição de “áreas não-urbanas para uso residencial (nu_res)” depende fortemente da existência prévia deste tipo de uso nas circunvizinhanças, uma vez que isto implica a possibilidade de se estender rede de infra-estrutura eventualmente existente nas imediações. Essa transição também depende da disponibilidade de acesso a essas áreas.

Igualmente, a implementação de grandes áreas institucionais (“nu_inst”) ocorre próxima a estradas periféricas e a áreas desta categoria previamente existentes, uma vez que elas crescem como extensões de zonas institucionais já estabelecidas.

A expansão de distritos industriais requer a proximidade a zonas industriais previamente existentes e a disponibilidade de acesso viário. Esta transição também supõe a proximidade aos centros fornecedores de mão-de-obra (áreas residenciais periféricas), bem como uma localização não tão distante de zonas comerciais, uma vez que as áreas industriais dependem de atividades comerciais para apoio logístico. E finalmente, os argumentos usados no período de simulação anterior para explicar a conversão de áreas de uso não-urbano em zonas de lazer e recreação também são válidos para o presente período de simulação.

Os mapas de probabilidades de transição, gerados pelo DINAMICA com base nos valores dos pesos positivos de evidência (W^+), juntamente com os respectivos mapas de transição do uso do solo são vistos na FIGURA 6.51.

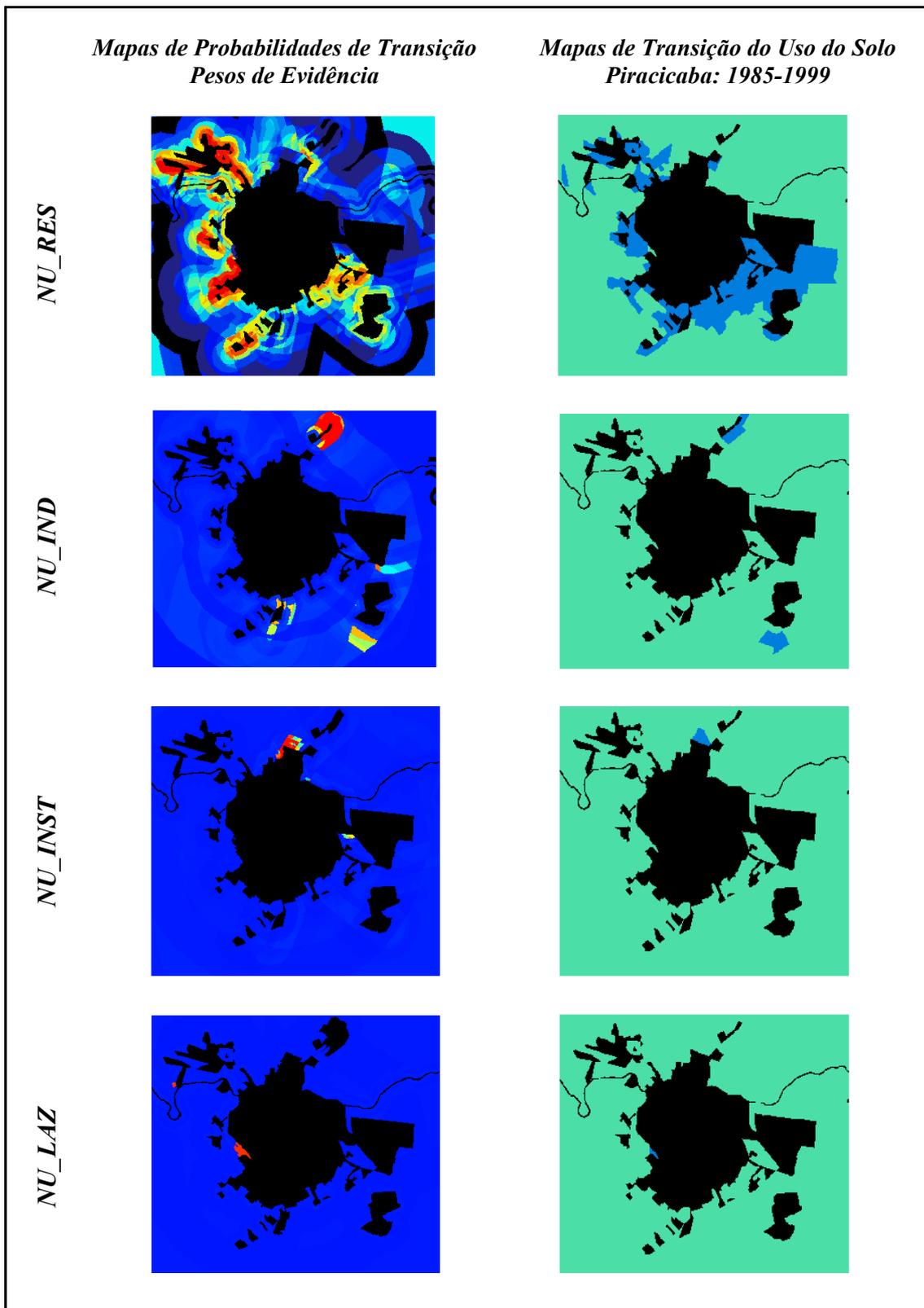


FIGURA 6.51 – Mapas de probabilidade de transição e de mudanças de uso - Piracicaba.



Os três melhores resultados de simulação produzidos para o período 1985-1999 são apresentados na FIGURA 6.52. Os parâmetros internos do DINAMICA associados com essas simulações ótimas são vistos na TABELA 6.58, cujos testes de validação estatística para janelas 3x3, 5x5 e 9x9, e $k = 0,5$ estão listados na TABELA 6.59.

TABELA 6.58 – Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de transições de uso do solo em Piracicaba: 1985–1999.

<i>Transição de Uso do Solo</i>	<i>Tamanho Médio de Manchas</i>	<i>Variância do Tamanho</i>	<i>Proporção do 'Expander'</i>	<i>Proporção do 'Patcher'</i>	<i>Número de Iterações</i>
<i>NU_RES</i>	300	30	0,85	0,15	10
<i>NU_IND</i>	150	1	0,45	0,55	10
<i>NU_INST</i>	75	1	1,00	0	10
<i>NU_LAZ</i>	20	0	1,00	0	10

TABELA 6.59 – Testes de ajuste para as melhores simulações de transições de uso em Piracicaba: 1985-1999.

<i>Simulações</i>	<i>Qualidade do Ajuste ("Goodness-of-Fit" - F)</i>
S_1	$F = 0,862682$
S_2	$F = 0,864872$
S_3	$F = 0,864644$

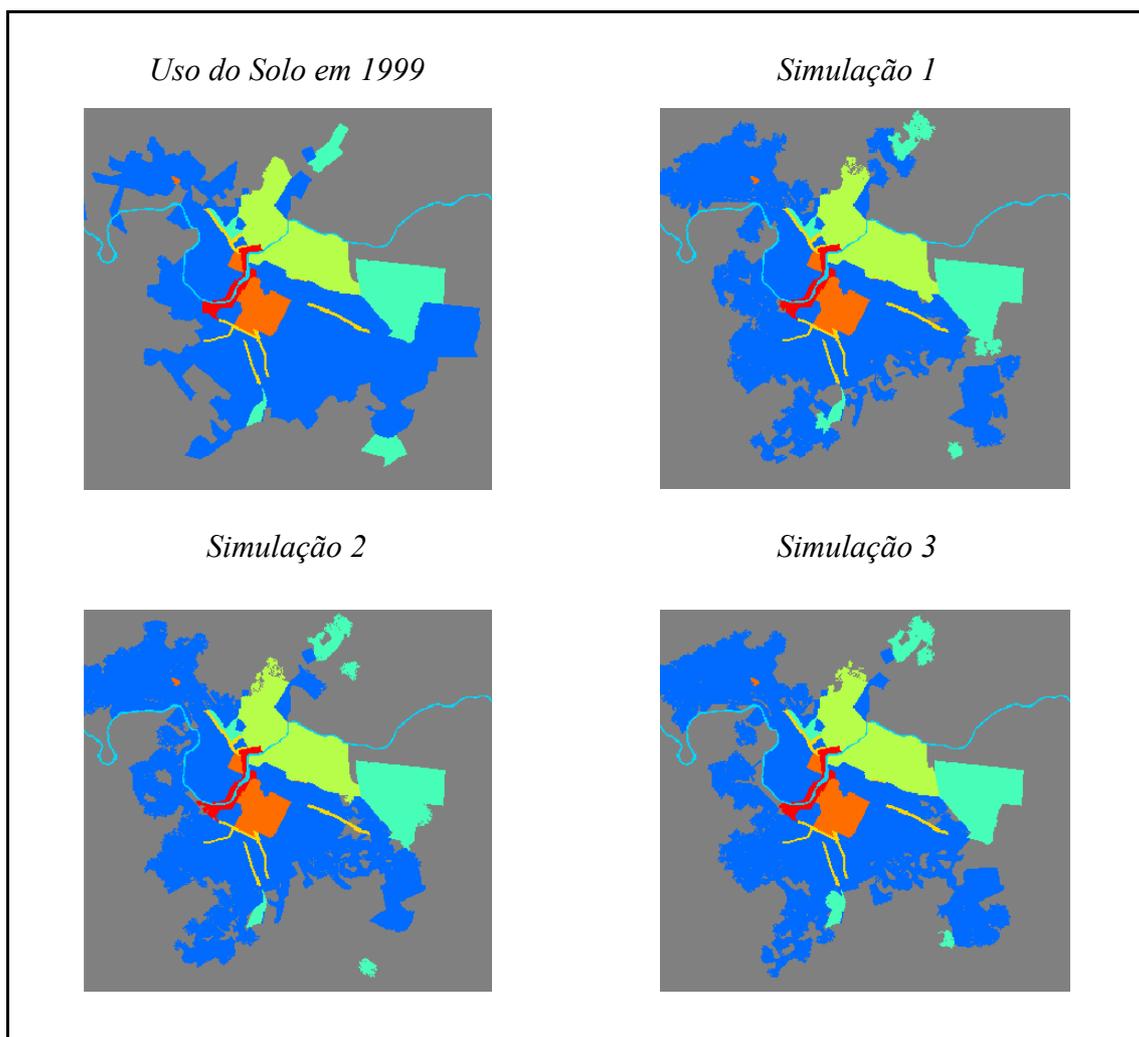


FIGURA 6.52 – Melhores simulações comparadas com o uso do solo em Piracicaba - 1999.

6.2.3 Simulações Anuais: 1962 – 1999

De acordo com a Equação (5.69), a matriz global de transição pode ser decomposta em probabilidades anuais de transição através de principais componentes. Isto foi feito separadamente para cada período de simulação (TABELAS 6.60 e 6.61). As simulações anuais podem ser vistas nas FIGURAS 6.53a, 6.53b, 6.53c, 6.53d e 6.53e.

TABELA 6.60 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Piracicaba: 1962–1985.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9210 \cdot 10^{-1}$	$6,4258 \cdot 10^{-3}$	0	$1,6166 \cdot 10^{-3}$	$7,8241 \cdot 10^{-4}$	$4,2635 \cdot 10^{-5}$	0	$1,2184 \cdot 10^{-4}$
<i>Residencial</i>	0	$9,8105 \cdot 10^{-1}$	$1,4547 \cdot 10^{-2}$	0	0	$4,4082 \cdot 10^{-3}$	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	$1,3608 \cdot 10^{-3}$	0	0	$9,9889 \cdot 10^{-1}$	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	$5,8574 \cdot 10^{-2}$	0	0	$9,4143 \cdot 10^{-1}$	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.61 – Matriz de probabilidades de transição anuais para Piracicaba: 1985–1999.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,8723 \cdot 10^{-1}$	$1,1639 \cdot 10^{-2}$	0	$8,7816 \cdot 10^{-4}$	$2,1349 \cdot 10^{-4}$	0	0	$4,2532 \cdot 10^{-5}$
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

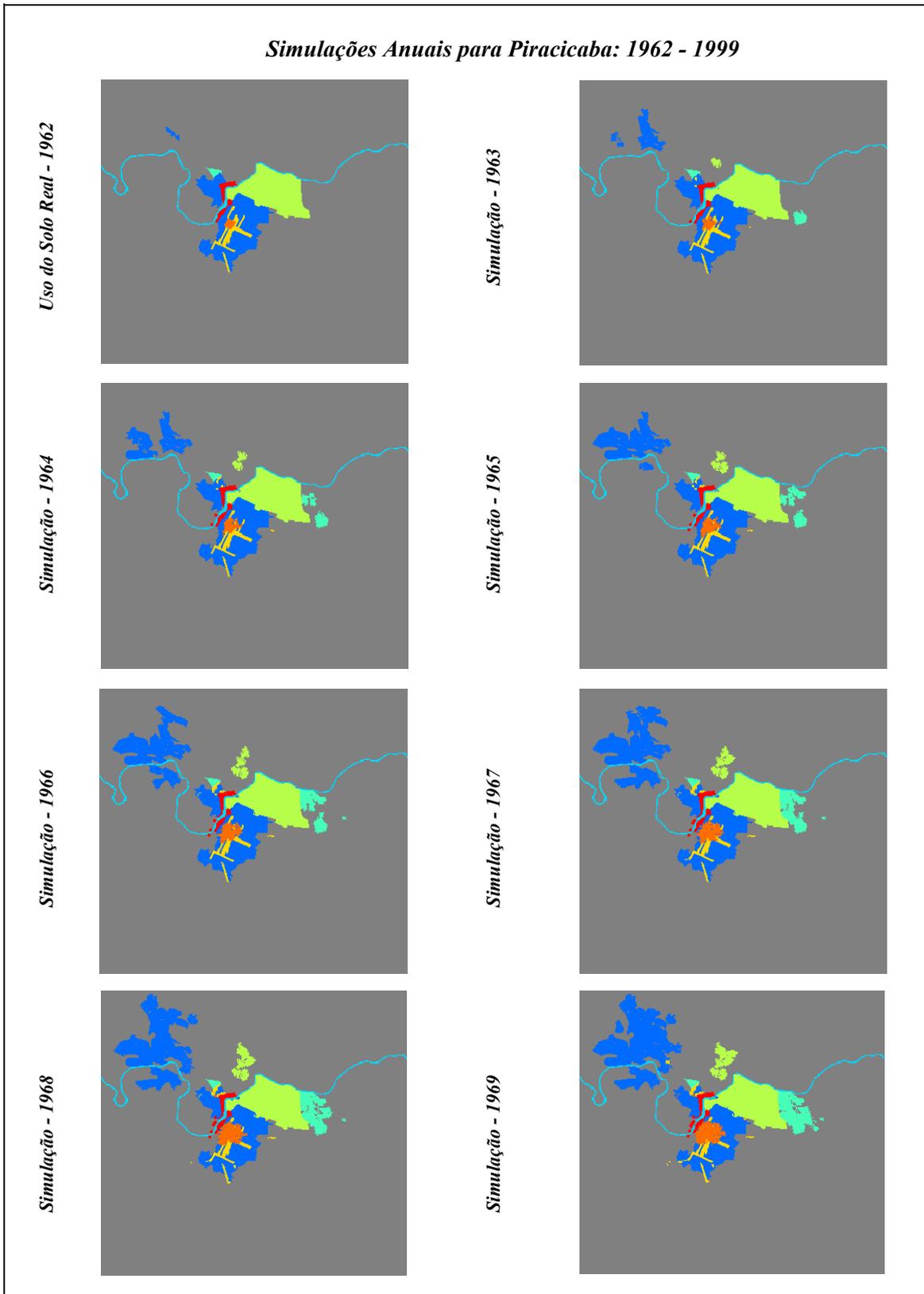
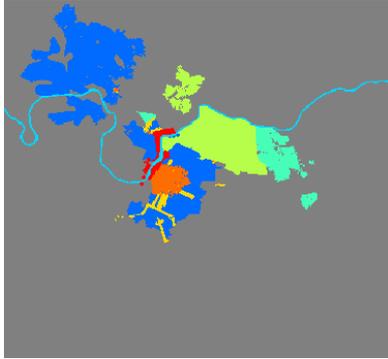


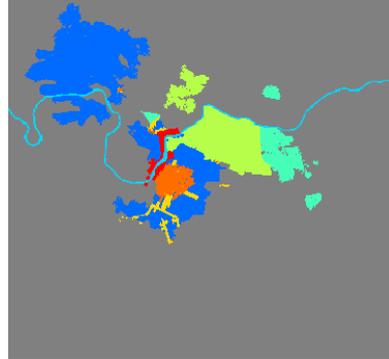
FIGURA 6.53a – Simulações anuais para Piracicaba: 1962 - 1969.

Simulações Anuais para Piracicaba: 1962 - 1999

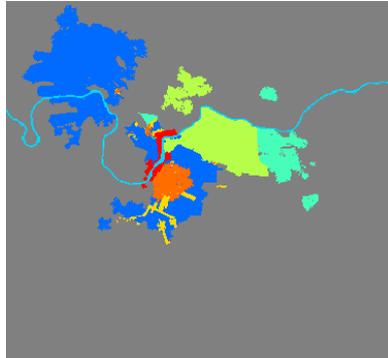
Simulação - 1970



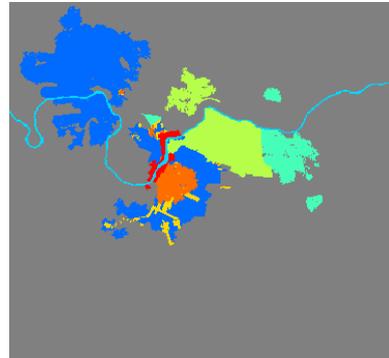
Simulação - 1971



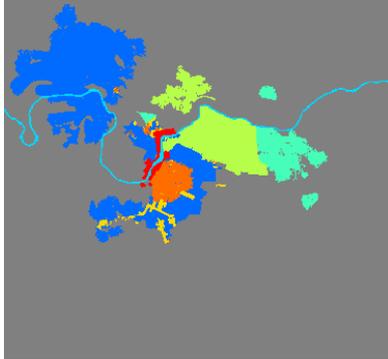
Simulação - 1972



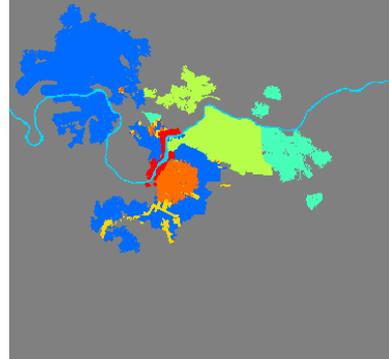
Simulação - 1973



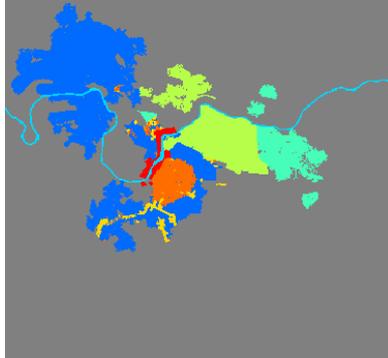
Simulação - 1974



Simulação - 1975



Simulação - 1976



Simulação - 1977

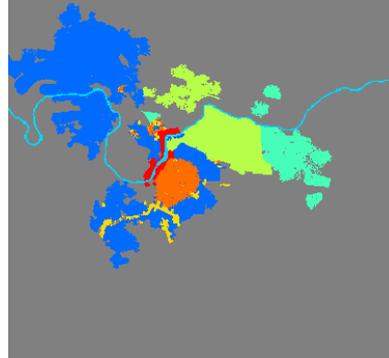


FIGURA 6.53b – Simulações anuais para Piracicaba: 1970 - 1977.

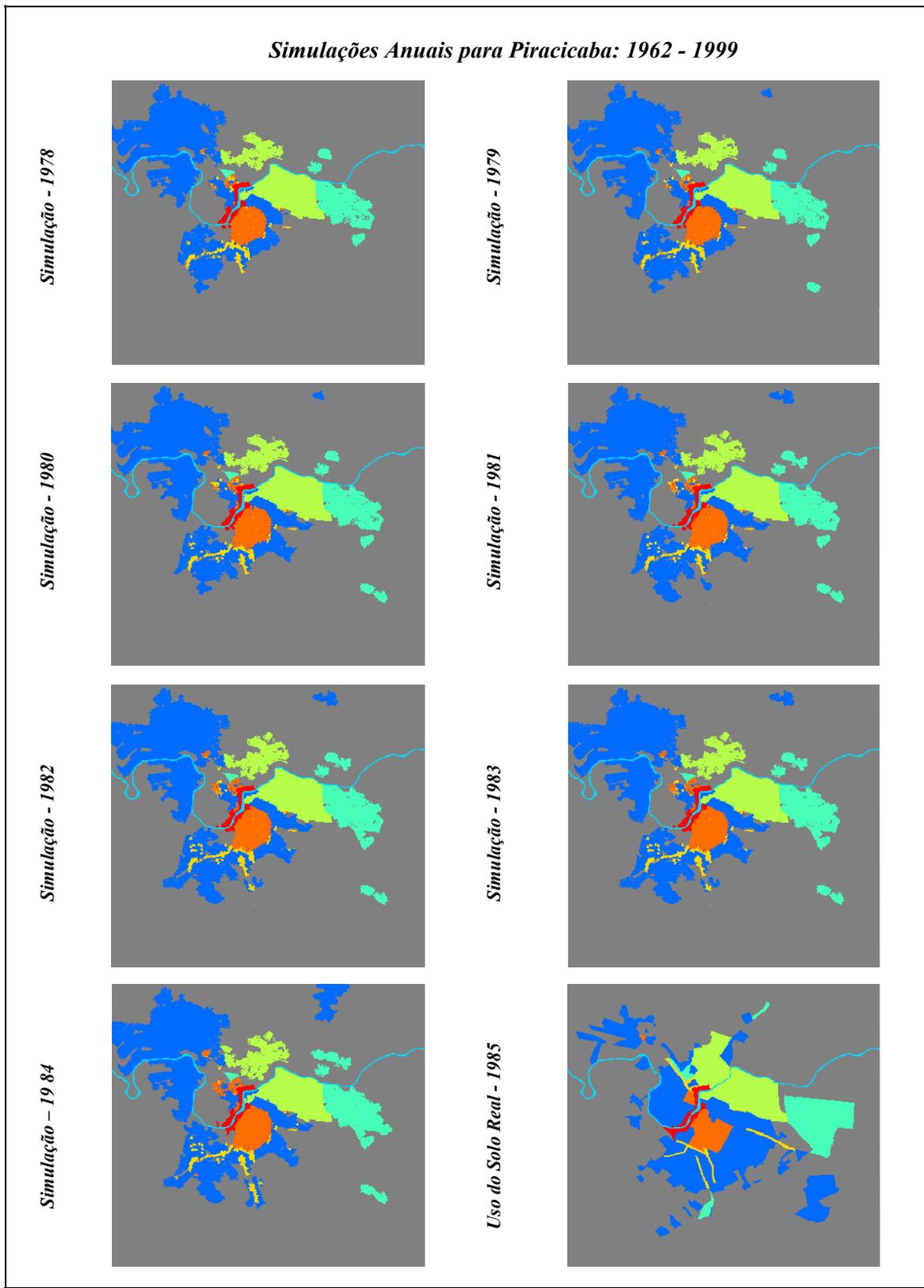
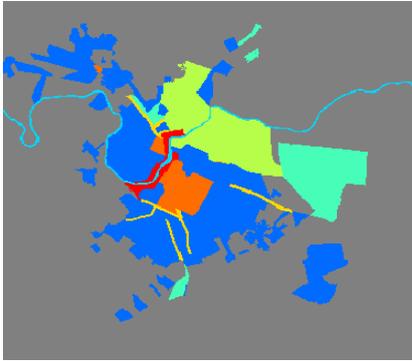


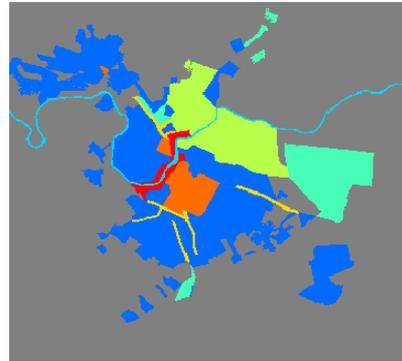
FIGURA 6.27c – Simulações anuais para Piracicaba: 1983 - 1990.

Simulações Anuais para Piracicaba: 1962 - 1999

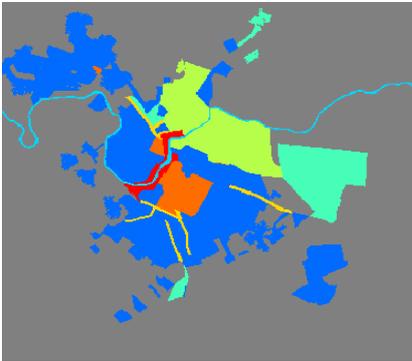
Simulação - 1986



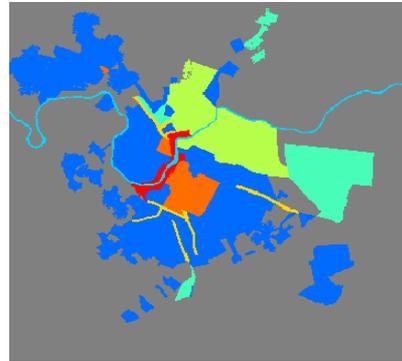
Simulação - 1987



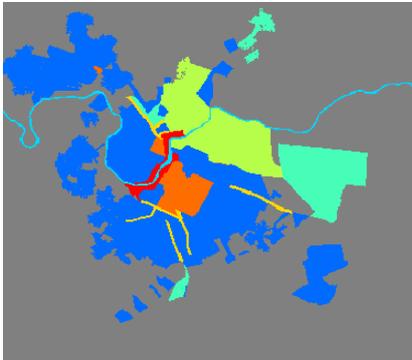
Simulação - 1988



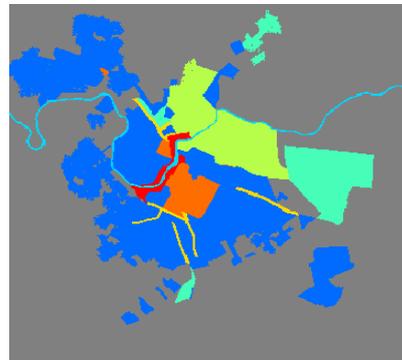
Simulação - 1989



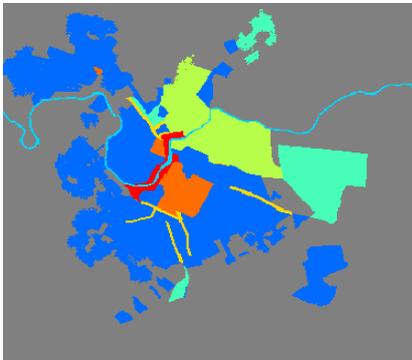
Simulação - 1990



Simulação - 1991



Simulação - 1992



Simulação - 1993

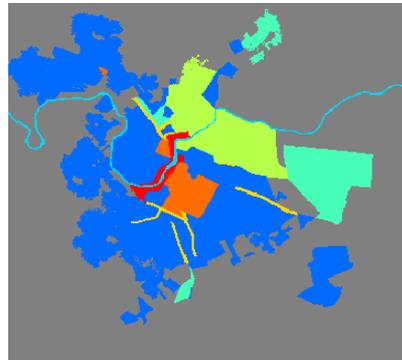
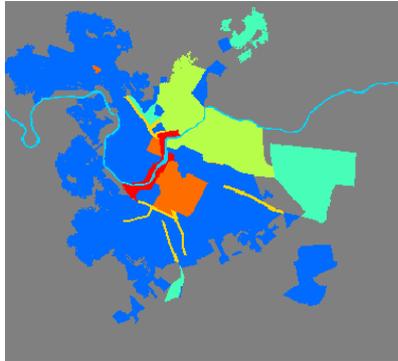


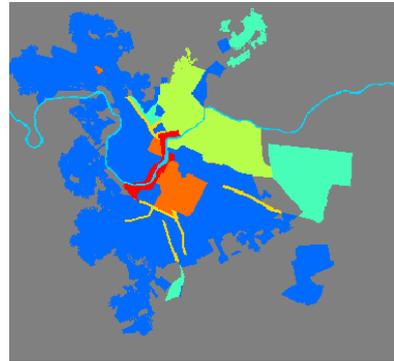
FIGURA 6.53d – Simulações anuais para Piracicaba: 1986 - 1993.

Simulações Anuais para Piracicaba: 1962 - 1999

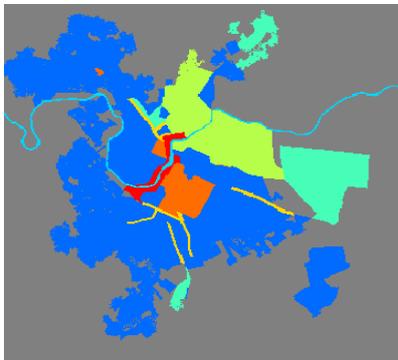
Simulação - 1994



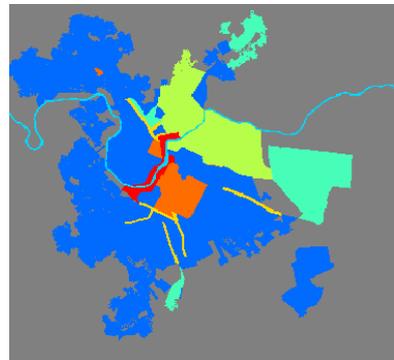
Simulação - 1995



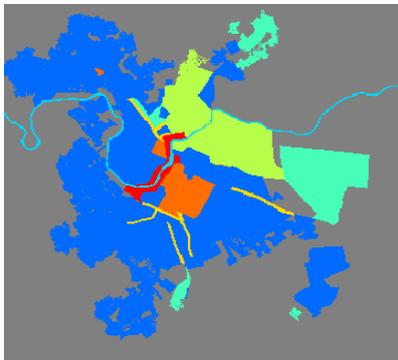
Simulação - 1996



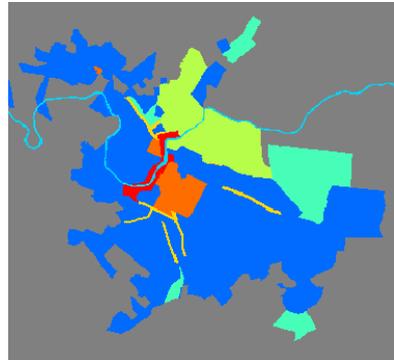
Simulação - 1997



Simulação - 1998



Uso do Solo Real - 1999



- | | | | |
|--|---|--|---|
|  <i>Uso não-urbano</i> |  <i>Uso comercial</i> |  <i>Uso institucional</i> |  <i>Corpos d'água</i> |
|  <i>Uso residencial</i> |  <i>Uso industrial</i> |  <i>Uso de serviços</i> |  <i>Uso de lazer/recr.</i> |

FIGURA 6.53e – Simulações anuais para Piracicaba: 1994 - 1999.

6.2.4 Prognósticos de Curto Prazo: 2000 – 2004

As transições de uso consideradas para prognósticos foram aquelas observadas no último período de simulação (1985-1999), excluindo-se as transições “não-urbano para institucional (nu_inst)” e “não-urbano para lazer (nu_laz)”, uma vez que elas foram tidas como estabilizadas, e portanto, não ocorrentes em anos subseqüentes. Nas próximas seções, as matrizes de transição assim como as simulações de prognósticos estacionários e não-estacionários de mudanças de uso do solo serão apresentadas.

6.2.4.1 Prognósticos Estacionários

Uma matriz de transição estacionária para o ano de 2004 foi obtida usando-se a cadeia de Markov (Equação 5.66) com base na matriz de transição global 1985-1999, na qual as transições “nu_inst” e “nu_laz” foram propositalmente ajustadas para zero. Essas probabilidades de transição estacionárias são vistas na TABELA 6.62.

TABELA 6.62 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Piracicaba, 2000-2004.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9367*10^{-1}$	$4,4801*10^{-3}$	0	$1,8538*10^{-3}$	0	0	0	0
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.2.4.2 Prognósticos Não-Estacionários

Prognósticos não-estacionários de mudanças de uso foram construídos com a ajuda de modelos de regressão linear relacionando a área de certos usos com dados demográficos e indicadores econômicos, conforme já mencionado na Seção 5.3.2.6, onde os usos de destino de transições do uso do solo foram considerados como a variável dependente.

Assim como no caso de Bauru, os usos do solo de destino tiveram de ser estimados para os quinquênios em que os dados de população e de desempenho econômico (ver Seção 4.2.2) eram também disponíveis, i.e., para 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995 e 2000. Isto foi possibilitado pelas saídas de simulação geradas através do método de principais componentes (Seção 6.2.3). As saídas de simulação produzidas pelo DINAMICA foram exportadas em formato TIFF, e então importadas para o IDRISI. No IDRISI, as áreas de classes temáticas correspondentes aos usos do solo de interesse foram determinadas. As áreas desses usos do solo de destino juntamente com os dados demográficos e econômicos usados nos modelos de regressão linear são vistos na TABELA 6.63.

TABELA 6.63 – Áreas de uso de destino, população urbana, PIB total e setorial (US\$): Piracicaba – 1970-2000.

<i>Anos</i>	<i>Área Dest.: Residencial (ha)</i>	<i>Área Dest.: Industrial (ha)</i>	<i>População Urbana</i>	<i>PIB Total (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Rural (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Indust. (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Com. (US\$ 1998)</i>	<i>PIB Serviços (US\$ 1998)</i>
1970	8.579	1.487	73.153	666.029,934	60.056,683	314.733,774	95.101,568	291.239,467
1975	11.329	2.304	115.960	1.312.284,818	39.437,798	853.930,964	121.743,828	418.916,047
1980	13.912	3.086	158.708	2.126.207,943	66.581,222	1.307.157,079	147.927,333	752.469,633
1985	14.714	3.906	198.407	1.704.037,322	68.131,878	1.075.191,585	128.818,571	560.713,867
1990	19.982	4.297	218.590	2.424.143,275	96.842,165	1.615.544,478	289.475,481	432.548,144
1995	24.923	4.662	236.687	3.251.245,119	24.907,799	2.108.284,969	491.681,220	277.346,390
2000	28.667	4.958	317.374	3.335.315,985	17.102,944	2.170.367,463	494.371,845	492.749,832

FONTE: Adaptado de IPEA (2001, 2003a, 2003b) e FUNDAÇÃO SEADE (2002).

6.2.4.2.1 Modelo de Regressão Linear “Não-Urbano para Uso Residencial (nu_res)”

Da mesma forma que nos modelos de regressão linear de Bauru, os testes para verificação de independência das observações referentes à variável de saída Y_i (“área de uso residencial em Piracicaba – destarea”) mostraram aceitação parcial para a função de autocorrelação e aceitação total para a função de autocorrelação parcial (FIGURA 6.54). As observações relativas à área de uso residencial ao longo do tempo foram consideradas como eventos independentes pelas mesmas razões expostas na Seção 6.1.5.2.1.

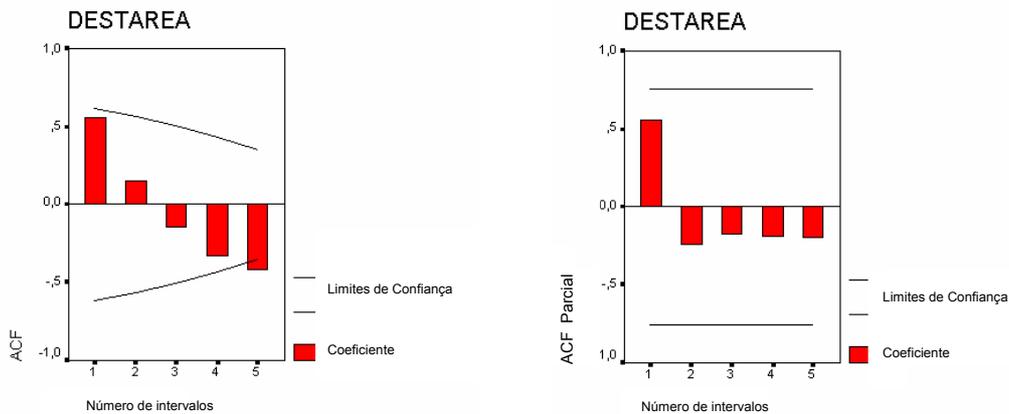


FIGURA 6.54 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso residencial (destarea).

Ainda na análise exploratória, as variáveis independentes “população urbana (popurb)”, “PIB total (pibtot)”, “PIB industrial (pibind)” e “PIB comercial (pibcom)” mostram uma alta correlação com a variável resposta “área de uso residencial (destarea)”. Uma vez que essas quatro variáveis independentes são altamente correlacionadas entre si (TABELA 6.64), apenas a variável “PIB total” permanece no modelo final de regressão. Os diagramas de espalhamento referentes à matriz de correlação para o modelo “nu_res” são vistos na FIGURA 6.55.

A equação final para este modelo univariado é a seguinte:

$$Y = \beta_1 X$$

$$Y = 0,008081 \cdot pibtot \quad , \quad (6.4)$$

cujo R^2 é 0,989, e o p -value do intervalo de confiança de 95% para β_1 é 0,000 ($p < 0,05$). Dado que β_0 não passou no teste de significância, ele foi excluído do modelo.

Na análise de variância (ANOVA), a soma de quadrados reflete em que medida Y é divergente de \hat{Y} . Neste sentido, para modelos bem ajustados, espera-se que a soma de quadrados da regressão >>> soma residual de quadrados, e assim, que a soma de quadrados da regressão responda pela maioria da soma total de quadrados (TABELA 6.65).

TABELA 6.64 – Matriz de correlação para o modelo "nu_res": Piracicaba, 2000-2004.

		DESTAREA	POPURB	PIBTOT	PIBRURAL	PIBIND	PIBCOM	PIBSERV
DESTAREA	Pearson Correlation	1	,959**	,965**	-,465	,966**	,968**	-,087
	Sig. (2-tailed)	.	,001	,000	,293	,000	,000	,853
	N	7	7	7	7	7	7	7
POPURB	Pearson Correlation	,959**	1	,926**	-,351	,930**	,859*	,117
	Sig. (2-tailed)	,001	.	,003	,440	,002	,013	,803
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBTOT	Pearson Correlation	,965**	,926**	1	-,412	,998**	,928**	,066
	Sig. (2-tailed)	,000	,003	.	,358	,000	,003	,889
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBRURAL	Pearson Correlation	-,465	-,351	-,412	1	-,396	-,559	,278
	Sig. (2-tailed)	,293	,440	,358	.	,380	,192	,546
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBIND	Pearson Correlation	,966**	,930**	,998**	-,396	1	,925**	,054
	Sig. (2-tailed)	,000	,002	,000	,380	.	,003	,908
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBCOM	Pearson Correlation	,968**	,859*	,928**	-,559	,925**	1	-,277
	Sig. (2-tailed)	,000	,013	,003	,192	,003	.	,547
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBSERV	Pearson Correlation	-,087	,117	,066	,278	,054	-,277	1
	Sig. (2-tailed)	,853	,803	,889	,546	,908	,547	.
	N	7	7	7	7	7	7	7

** .Correlação é significativa no nível 0,01 (2 caudas)

* .Correlação é significativa no nível 0,05 (2 caudas)

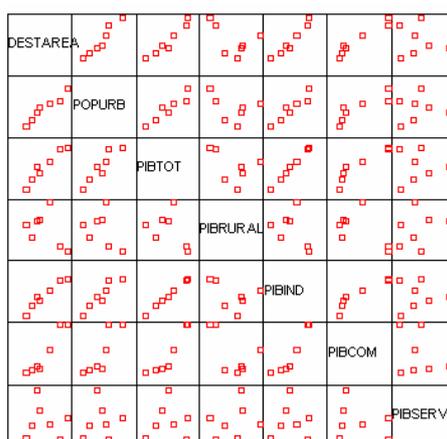


FIGURA 6.55 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo “nu_res”: Piracicaba, 2000-2004.

TABELA 6.65 – Análise de variância para o modelo “nu_res”: Piracicaba, 2000-2004.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3,02E+08	1	302045078,1	68,038	,000 ^a
	Residual	22196909	5	4439381,863		
	Total	3,24E+08	6			

- a. Preditores: (Constante), PIBTOT
- b. Variável Dependente: DESTAREA

Em relação à análise de resíduos, quando o modelo está satisfatoriamente ajustado, os resíduos padronizados (ver Seção 5.3.2.5) e os resíduos “estudentados” (ajustados a uma distribuição “t”) devem estar no intervalo $[-2,+2]$. Para o presente modelo, esses valores são $-1,535$; $+1,500$ e $-1,638$; $+1,509$ respectivamente para os resíduos padronizados e studentados. Gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (“pibtot”) e versus o valor predito ajustado \hat{Y}_i são vistos na FIGURA 6.56. Conforme a Seção 5.3.2.5, esses gráficos não devem apresentar padrão de correlação algum.

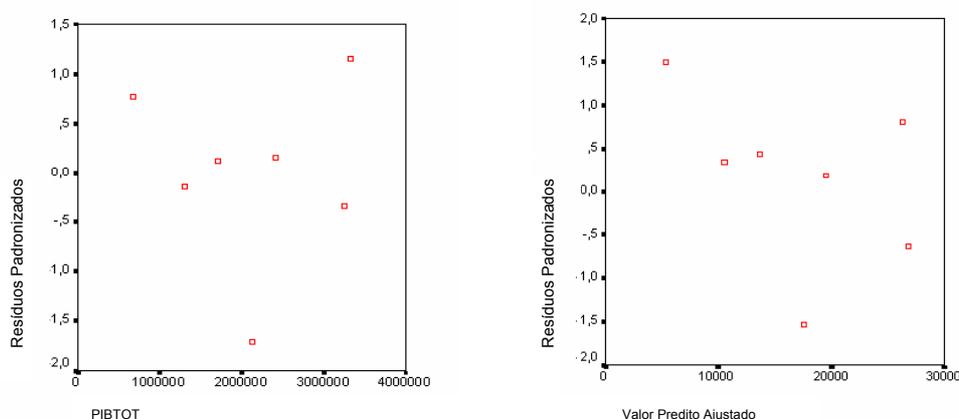


FIGURA 6.56 – Análise de resíduos para o modelo “nu_res”: Piracicaba, 2000-2004.

6.2.4.2.2 Modelo de Regressão Linear “Não-Urbano para Uso Industrial (nu_ind)”

Do mesmo modo que no modelo “nu_res”, os testes para verificação de independência das observações referentes à variável de saída Y_i (“área de uso industrial em Piracicaba – destarea”) mostraram aceitação parcial para a função de autocorrelação e aceitação total para a função de autocorrelação parcial (FIGURA 6.57). As observações relativas à área de uso industrial ao longo do tempo foram consideradas como eventos independentes pelas mesmas razões expostas na Seção 6.1.5.2.1.

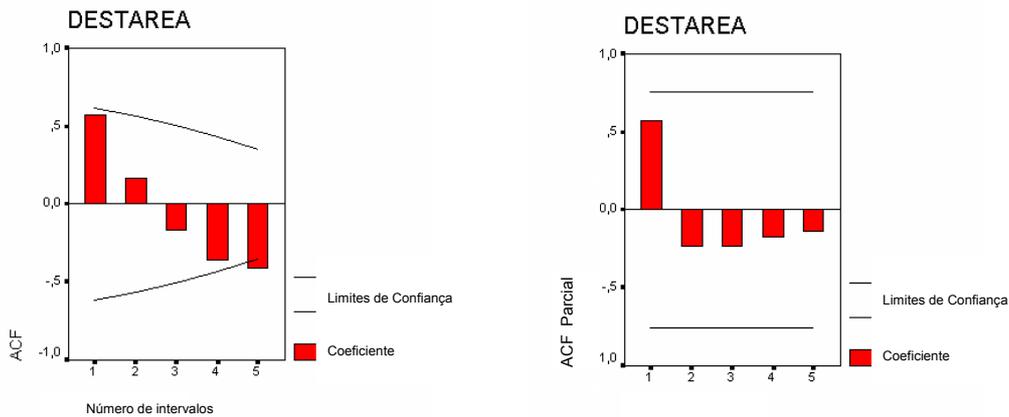


FIGURA 6.57 – Testes de ACF e ACF parcial para a área de uso industrial (destarea).

As variáveis independentes “população urbana (popurb)”, “PIB total (pibtot)” e “PIB industrial (pibind)” mostram uma alta correlação com a variável resposta “área de uso industrial (destarea)”. Uma vez que essas três variáveis independentes são altamente correlacionadas entre si (TABELA 6.66), apenas a variável “PIB industrial” permanece no modelo final de regressão. Embora esta correlação com a variável resposta não seja a maior, ela foi considerada a que melhor explica o aumento na área de uso industrial da cidade nas últimas três décadas. Os diagramas de espalhamento referentes à matriz de correlação para o modelo “nu_ind” são apresentados na FIGURA 6.58.

A equação final para este modelo univariado é a seguinte:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$Y = 1.105,895 + 0,001795 \cdot pibind \quad , \quad (6.5)$$

cujos R^2 é 0,882, e o *p-value* do intervalo de confiança de 95% para β_0 é 0,053 e para β_1 é 0,002 ($p < 0,05$).

Na análise de variância (ANOVA), a soma de quadrados reflete em que medida Y é divergente de \hat{Y} . Neste sentido, para modelos bem ajustados, espera-se que a soma de quadrados da regressão >>> soma residual de quadrados, e assim, que a soma de quadrados da regressão responda pela maioria da soma total de quadrados (TABELA 6.67).

TABELA 6.66 – Matriz de correlação para o modelo “nu_ind”: Piracicaba, 2000-2004.

		DESTAREA	POPURB	PIBTOT	PIBRURAL	PIBIND	PIBCOM	PIBSERV
DESTAREA	Pearson Correlation	1	,965**	,930**	-,221	,939**	,831*	,097
	Sig. (2-tailed)	,	,000	,002	,633	,002	,021	,837
	N	7	7	7	7	7	7	7
POPURB	Pearson Correlation	,965**	1	,926**	-,351	,930**	,859*	,117
	Sig. (2-tailed)	,000	,	,003	,440	,002	,013	,803
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBTOT	Pearson Correlation	,930**	,926**	1	-,412	,998**	,928**	,066
	Sig. (2-tailed)	,002	,003	,	,358	,000	,003	,889
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBRURAL	Pearson Correlation	-,221	-,351	-,412	1	-,396	-,559	,278
	Sig. (2-tailed)	,633	,440	,358	,	,380	,192	,546
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBIND	Pearson Correlation	,939**	,930**	,998**	-,396	1	,925**	,054
	Sig. (2-tailed)	,002	,002	,000	,380	,	,003	,908
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBCOM	Pearson Correlation	,831*	,859*	,928**	-,559	,925**	1	-,277
	Sig. (2-tailed)	,021	,013	,003	,192	,003	,	,547
	N	7	7	7	7	7	7	7
PIBSERV	Pearson Correlation	,097	,117	,066	,278	,054	-,277	1
	Sig. (2-tailed)	,837	,803	,889	,546	,908	,547	,
	N	7	7	7	7	7	7	7

** . Correlação é significante no nível 0,01 (2 caudas)

* . Correlação é significante no nível 0,05 (2 caudas)

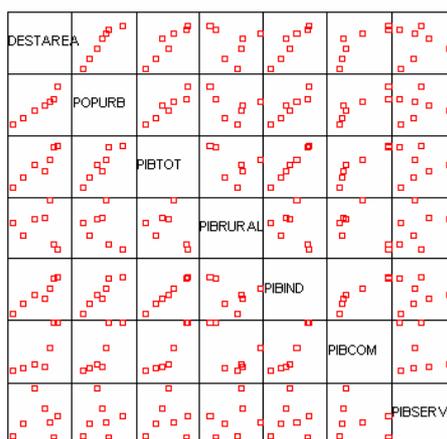


FIGURA 6.58 – Diagramas de espalhamento para a matriz de correlação do modelo “nu_ind”: Piracicaba, 2000-2004.

TABELA 6.67 – Análise de variância para o modelo “nu_ind”: Piracicaba, 2000-2004.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	8748416	1	8748415,915	37,199	,002 ^a
	Residual	1175904	5	235180,760		
	Total	9924320	6			

- a. Preditores: (Constante), PIBIND
 b. Variável Dependente: DESTAREA

Quanto à análise de resíduos, quando o modelo está satisfatoriamente ajustado, os resíduos padronizados (ver Seção 5.3.2.5) e os resíduos “estudentados” (ajustados a uma distribuição “t”) devem estar no intervalo $[-2,+2]$. Para o presente modelo, esses valores são $-0,757$; $+1,793$ e $-0,817$; $+1,969$ respectivamente para os resíduos padronizados e studentados. Gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (“pibind”) e versus o valor predito ajustado \hat{Y}_i são vistos na FIGURA 6.59. Conforme a Seção 5.3.2.5, esses gráficos não devem apresentar padrão de correlação algum.

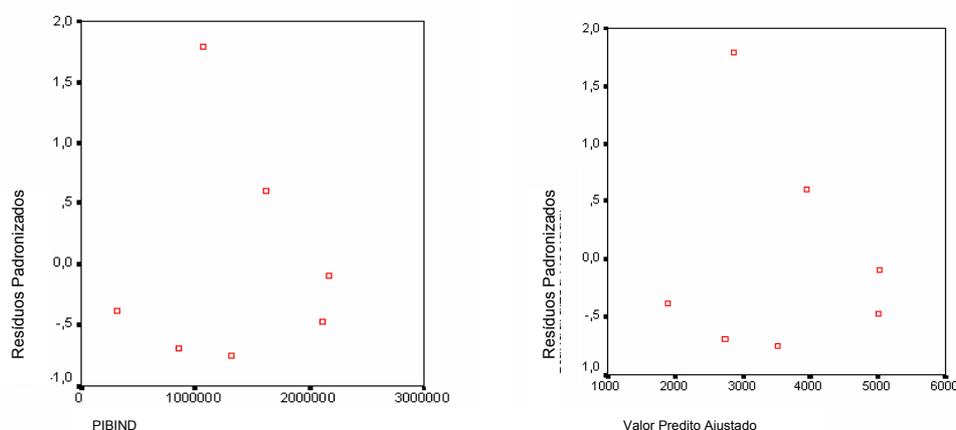


FIGURA 6.59 – Análise de resíduos para o modelo “nu_ind”: Piracicaba, 2000-2004.

Da mesma forma que Bauru, projeções heurísticas foram feitas para os valores das variáveis independentes relativas a indicadores econômicos de Piracicaba com base em suas tendências passadas.

Dois tipos de cenários não-estacionários para prognósticos de mudanças do uso do solo foram formulados: um otimista e um pessimista, com respectivamente super e subestimações da variável independente, como já definido na Seção 5.3.3. No primeiro caso, o valor de X referente ao PIB total foi de US\$ 3.623.190,199 para o modelo “nu_res” e US\$ 2.320.949,861 referente ao PIB industrial para o modelo “nu_ind”. No cenário pessimista, X assumiu os valores de US\$ 3.574.805,098 concernente ao PIB total para o modelo “nu_res” e US\$ 2.210.211,052 relativo ao PIB industrial para o modelo “nu_ind”. Usando esses valores de X , probabilidades de transição foram

calculadas para ambos cenários no curto prazo (TABELAS 6.68 e 6.69), empregando as equações de conversão apresentadas na Seção 5.3.2.6.

TABELA 6.68 – Matriz de probabilidades de transição otimistas: Piracicaba, 2000-2004.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,8808 \cdot 10^{-1}$	$7,8788 \cdot 10^{-3}$	0	$4,0443 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.69 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas: Piracicaba, 2000-2004.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,9567 \cdot 10^{-1}$	$2,8451 \cdot 10^{-3}$	0	$1,4805 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.2.4.3 Simulações de Prognósticos

Adotando-se os mesmos conjuntos de variáveis independentes do último período de simulação (1985-1999) e seus respectivos pesos de evidência (TABELA 6.57), simulações estacionárias, otimistas e pessimistas foram geradas para Bauru no curto prazo (2004), usando-se respectivamente as TABELAS 6.62, 6.68 e 6.69 para se definir a quantia total de mudanças de uso do solo. Essas simulações são apresentadas na FIGURA 6.60.

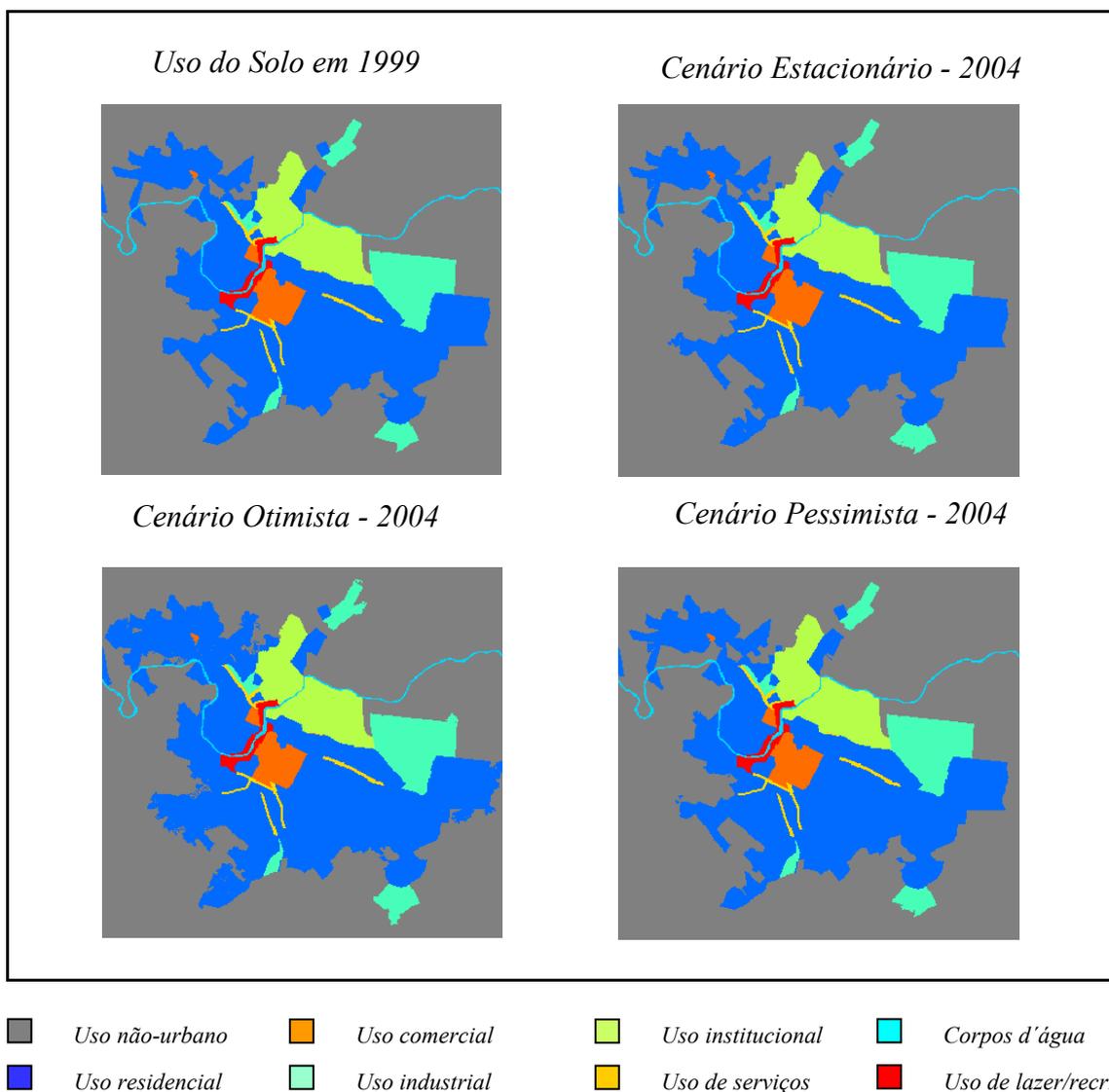


FIGURA 6.60 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2004 comparadas ao uso do solo real em Piracicaba - 1999.

Observa-se nas simulações de prognóstico acima que não há aumento na área de uso para serviços. Isto não implica que não haverá crescimento econômico do setor de serviços no curto prazo, mas simplesmente que as áreas que abrigam o uso de serviços se submeterão a processos de adensamento.

As principais áreas onde novos loteamentos residenciais surgem estão localizadas nos setores norte e oeste de Piracicaba, ao passo que o aumento na área industrial ocorre

sobretudo no distrito sul. Este padrão de expansão concorda com as tendências observadas em um mapa recente de Piracicaba, feito em 2003 (SEMUPLAN, 2003).

Conforme já explicado nas Seções 5.3.3 e 6.1.5.3, apenas suaves variações foram introduzidas nas projeções dos dados de população e econômicos. Isto é devido ao fato de que, em vista da tendência de continuidade administrativa demonstrada pelo atual governo federal, assim como das taxas de crescimento populacional continuamente decrescentes, espera-se que os cenários demográficos e macroeconômicos do Brasil nos últimos anos reproduzam-se na presente década.

6.2.5 Prognósticos de Médio Prazo: 2000 – 2007

6.2.5.1 Prognósticos Estacionários

Uma matriz de transição estacionária para o ano de 2007 foi obtida usando-se a cadeia de Markov (Equação 5.66) com base na matriz de transição global 1985-1999, na qual as transições “nu_inst” e “nu_laz” foram propositalmente ajustadas para zero. Essas probabilidades de transição estacionárias são vistas na TABELA 6.70.

TABELA 6.70 – Matriz de probabilidades de transição estacionárias: Piracicaba, 2000-2007.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,7237*10^{-1}$	$2,4872*10^{-2}$	0	$2,7550*10^{-3}$	0	0	0	0
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.2.5.2 Prognósticos Não-Estacionários

Os mesmos modelos de regressão linear usados para as predições de curto prazo foram usados para os prognósticos de médio prazo. Para o cenário otimista, o valor de X

referente ao PIB total foi de US\$ 3.824.481,866 para o modelo “nu_res” e US\$ 2.426.242,340 relativo ao PIB industrial para o modelo “nu_ind” . No cenário pessimista, X assumiu os valores de US\$ 3.751.365,720 para o modelo “nu_res” e US\$ 2.238.071,080 concernente ao PIB industrial para o modelo “nu_ind”. Usando-se esses valores de X , probabilidades de transição foram calculadas para ambos cenários no médio prazo (TABELAS 6.71 e 6.72), empregando as equações da Seção 5.3.2.6.

TABELA 6.71 – Matriz de probabilidades de transição otimistas: Piracicaba, 2000-2007.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,6471*10^{-1}$	$2,8824*10^{-2}$	0	$6,4708*10^{-3}$	0	0	0	0
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

TABELA 6.72 – Matriz de probabilidades de transição pessimistas: Piracicaba, 2000-2007.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urbano</i>	<i>Residencial</i>	<i>Comercial</i>	<i>Industrial</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Rios</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urbano</i>	$9,7666*10^{-1}$	$2,1216*10^{-2}$	0	$2,1242*10^{-3}$	0	0	0	0
<i>Residencial</i>	0	1,00	0	0	0	0	0	0
<i>Comercial</i>	0	0	1,00	0	0	0	0	0
<i>Industrial</i>	0	0	0	1,00	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1,00	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1,00	0	0
<i>Rios</i>	0	0	0	0	0	0	1,00	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1,00

6.2.5.3 Simulações de Prognósticos

Adotando-se os mesmos conjuntos de variáveis independentes do último período de simulação (1985-1999) e seus respectivos pesos de evidência (TABELA 6.57), simulações estacionárias, otimistas e pessimistas foram geradas para Piracicaba no

médio prazo (2004), usando-se respectivamente as TABELAS 6.70, 6.71 e 6.72 para se definir a quantia total de mudanças de uso. Essas simulações são apresentadas na FIGURA 6.61.

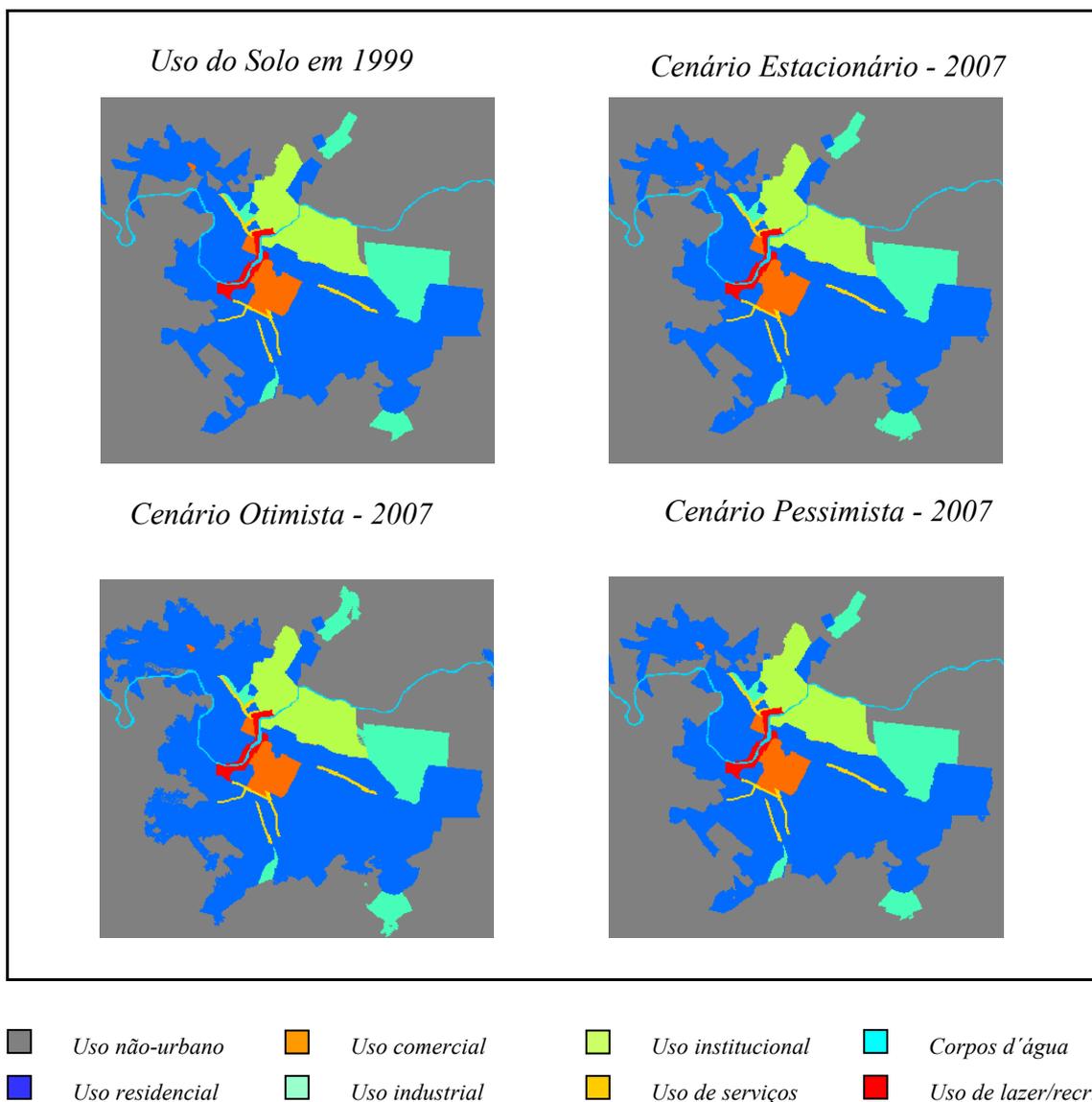


FIGURA 6.61 – Simulações estacionária, otimista e pessimista para 2007 comparadas ao uso do solo real em Piracicaba - 1999.

6.3 Conclusões

Para ambas as cidades em análise, as forças direcionadoras de mudanças de uso do solo permaneceram praticamente constantes ao longo das séries multitemporais, com pequenas variações de um período de simulação para outro. Com base nos resultados de simulação produzidos, foi possível inferir que novos loteamentos residenciais tendem a ocorrer nas vizinhanças de loteamentos deste tipo já existentes e em áreas com boas condições de acessibilidade. Zonas industriais, por sua vez, expandem-se no entorno de distritos industriais já estabelecidos e/ou próximas às principais vias. Corredores de serviços usualmente surgem ao longo de vias principais e próximos às áreas residenciais e comerciais. Zonas institucionais seguem a mesma lógica de crescimento de zonas industriais, e não raro localizam-se próximas a essas últimas, em vista da necessidade de terrenos amplos e baratos para a sua expansão.

Com relação às zonas de uso misto, as mesmas requerem boas condições de acessibilidade assim como a existência de densidades populacionais mais elevadas, o que assegura um mercado de consumidores viável, e portanto, sustentabilidade econômica. E finalmente, zonas de lazer e recreação ocorrem igualmente em regiões com boa acessibilidade, mas também próximas às áreas residenciais e comumente ao longo de margens baixas dos rios, uma vez que essas áreas são inundáveis, e assim, impróprias para abrigar outros usos urbanos.

Torna-se evidente que as transições de uso assentem com teorias econômicas urbanas, fundamentadas no conceito de maximização de utilidade (Black e Henderson, 1999; Medda et al. 1999; Papageorgiou e Pines, 2001; Zhou e Vertinsky, 2001), em que há uma busca contínua por localizações ótimas, capazes de assegurar:

- preços imobiliários competitivos;
- boas condições de acessibilidade;
- racionalização dos custos de transporte, e
- uma localização estratégica quanto a mercados fornecedores e consumidores.

Em ambos estudos de caso, Bauru e Piracicaba, o ambiente natural (solo, vegetação, relevo, áreas de conservação) não foi considerado como um determinante decisivo para mudanças de uso do solo. Em outras palavras, características naturais do ambiente físico, excluindo-se o rio de Piracicaba na cidade de Piracicaba, não foram vistas como impedimentos ao crescimento urbano em um nível mais generalizado. Os sítios físicos das cidades são relativamente planos, com elevações suaves, e não apresentam nenhuma condição excepcional quanto a restrições de solo, vegetação e áreas de conservação.

Embora o presente trabalho não aborde experimentos de simulação baseados em agentes, toda a informação referente ao comportamento de atores sociais e configuradores da forma urbana está implicitamente agregada nas variáveis de entrada dos modelos. Isto quer dizer que as preferências e opções adotadas pelos administradores locais, bem como por proprietários, empreendedores e incorporadores imobiliários nos processos de tomada de decisão afetando a estrutura urbana são refletidas na forma como os fatores infra-estruturais e sócio-econômicos guiam as mudanças de uso do solo urbano.

Conforme mencionado previamente na Seção 5.6, as simulações fornecidas pelos métodos de pesos de evidência e regressão logística apresentaram resultados comparativamente similares (Seção 6.1.2). Em todo caso, deve-se dar preferência de aplicação ao método de pesos de evidência em face da sua transparência e simplicidade operacional, que juntas contribuem para uma calibração do modelo mais rápida e consistente.

Considerando-se os resultados de simulação produzidos para ambas cidades, observa-se que em períodos de simulação mais longos, o desempenho da modelagem é reduzido. Isto é devido ao fato de que um número maior de transições ocorre nesse meio tempo, e mesmo para tipos idênticos de transição do uso do solo, as forças direcionadoras de mudanças sofrem suaves alterações ao longo do tempo, às quais os períodos de simulação mais longos não podem fazer frente.

Em relação aos cenários de prognósticos, pode-se afirmar que os estacionários superestimam as tendências atuais de mudanças de uso do solo. Isto pode ser atribuído

ao fato de que ambas cidades testemunharam acentuados declínios nas taxas de crescimento urbano na presente década, e as probabilidades de transição para o curto e médio prazos (respectivamente 2004 e 2007) foram estabelecidas com base nas tendências de crescimento experienciadas no final dos anos 80 e durante os anos 90, quando os experimentos relativos aos últimos períodos de simulação foram conduzidos.

É válido reiterar aqui que, como forma de se conceber predições otimistas e pessimistas realísticas, apenas suaves alterações foram introduzidas nas projeções de dados de população e econômicos destinados a parametrizar os prognósticos não-estacionários de mudanças de uso do solo. Isto pode ser justificado pelo fato de que os cenários demográficos e macroeconômicos do Brasil nos últimos anos são plausíveis de se reproduzirem na década atual, em face das taxas de crescimento populacional continuamente decrescentes assim como da tendência de continuidade administrativa demonstrada pelo atual governo federal.

E finalmente, algumas considerações com relação aos algoritmos de transição do DINAMICA são dignas de nota. As mudanças de áreas não-urbanas para uso residencial representaram a categoria de transição de uso do solo de maior desafio nos experimentos de modelagem desta pesquisa. Os motivos para as dificuldades de reprodução das suas formas já foram mencionados na Seção 6.1.1, mas deve-se salientar aqui que 65% deste tipo de transição ocorre através do algoritmo *expander*. Uma limitação evidente deste algoritmo, a qual está sendo presentemente solucionada pela equipe do CSR-UFMG, reside no fato de que, após a seleção aleatória de uma célula-mente para transição, todas as células vizinhas à mesma sofrem transições, independentemente dos seus valores de probabilidade de transição, o que dificulta a reprodução de processos de ocupação e transformação do uso do solo urbano em situações reais (Almeida et al. 2003).

Um outro limite inerente aos algoritmos de transição refere-se ao ordenamento seqüencial de mudanças de uso. Por exemplo, supondo-se que uma certa célula não-urbana apresente uma probabilidade de transição para o uso industrial de 0,95, e de 0,89 para o uso residencial. No caso de a transição “não-urbano para uso residencial” ser

ajustada para execução em primeiro lugar, esta célula será convertida em uso residencial, muito embora sua adequabilidade para abrigar o uso industrial seja maior. Dispositivos para superar esta limitação devem ser elaborados. Demais refinamentos para se melhorar o desempenho de tais algoritmos, como a incorporação de parâmetros fractais nas funções de transição, assim como a possibilidade de se definir o tamanho médio e variância de manchas separadamente para cada algoritmo (*expander* e *patcher*) devem ser igualmente previstos.

Apesar de todas as dificuldades técnicas e metodológicas supramencionadas, os experimentos de simulação de mudanças de uso do solo executados para Bauru e Piracicaba provaram ser consistentes tanto em termos de testes de qualidade do ajuste (“goodness-of-fit”) quanto em termos de aderência à lógica das teorias econômicas de crescimento e desenvolvimento urbano. Isto confirma a primeira hipótese de pesquisa.

Os dados de entrada – mapas digitais, imagens de sensoriamento remoto e fotos aéreas digitais – usados nos experimentos de modelagem foram capazes de fornecer informação sobre as variáveis espaciais determinantes das mudanças de uso do solo nas cidades em análise, o que confirma a segunda hipótese. O emprego dos métodos de pesos de evidência e regressão logística para se determinar a contribuição relativa dessas variáveis para as transições de uso do solo observadas nas duas cidades, bem como os mapas de probabilidades de transição daí originados confirmam a terceira e quarta hipóteses. A eficácia comparativa desses métodos foi apresentada na Seção 5.6.

E por fim, o conhecimento sobre as tendências de transição adquirido com os experimentos de simulação conduzidos para longas séries multitemporais (de aproximadamente trinta e cinco anos) foi crucial para a concepção de cenários de prognósticos de mudanças de uso do solo. A adoção da cadeia de Markov para se gerar cenários estacionários, e de modelos de regressão linear para se desenvolver cenários não-estacionários de transições futuras de uso do solo validam a quinta e sexta hipóteses.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

7.1 Lidando com Modelos Dinâmicos Espaciais

É inquestionável o avanço produzido pela incorporação da representação espacial nos modelos de mudanças de uso do solo, assim como pela evolução de modelos estáticos em dinâmicos (ver Seção 2.2.3), particularmente com respeito a modelos de mudanças de uso do solo urbano.

A partir da elementar primeira geração de modelos urbanos, experimentos neste âmbito passaram a progressivamente adicionar a dimensão espaço-temporal de uma maneira sábia e consistente. Os primeiros modelos espaciais não podiam ter os seus resultados visualizados espacialmente, e o aspecto espacial era abordado sob a forma de unidades espaciais (zonas, distritos censitários, etc.) destinadas ao processamento de informação numérica (Batty, 1971, 1976; Allen et al. 1981, 1986). A evolução de modelos estáticos para dinâmicos não foi um processo imediato, e modelos estáticos (Clark, 1951; Alonso, 1960; Lowry, 1964) primeiro deram lugar a modelos recursivos (Butler, 1969), estáticos comparativos (Perraton e Baxter, 1974) e quase-dinâmicos (Boyce, 1977; Coelho e Williams, 1978; Leonardi, 1981) antes de se converterem em modelos totalmente dinâmicos (Beaumont et al. 1981; Wegener et al. 1986).

Efetivos avanços na representação espacial de modelos urbanos ocorreram apenas no final dos anos 80, quando modelos de autômatos celulares (CA) começaram a ser extensivamente utilizados (Coclelis, 1985, 1987; Deadman et al. 1993; Batty e Xie, 1997; Benati, 1997; Clarke et al. 1998; Papini et al. 1998; White et al. 1998; Portugali et al. 1999; White e Engelen, 2000). Os Sistemas de Informações Geográficas (GIS), cujos dados matriciais podem ser facilmente associados com modelos de CA, ofereceram novas possibilidades em modelagem espacial, incluindo ferramentas de análise espacial de dados.

O emprego do método de estatística espacial de pesos de evidência para se parametrizar os experimentos de simulação de mudanças do uso do solo urbano desta pesquisa não teria sido possível sem o auxílio de GIS, crucial para se gerar as tabelas de contingência derivadas das operações de tabulação cruzada (Bonham-Carter, 1994). De igual forma, o pré-processamento dos mapas de variáveis de entrada, como mapas de distâncias, estimador de densidade de pontos Kernel e outros procedimentos foram realizados usando-se GIS. Até mesmo a técnica estatística de regressão logística, que não é a princípio um método espacial, pôde ser aplicada com sucesso nos experimentos de simulação devido às facilidades disponíveis no ambiente de GIS.

Apesar de todos os avanços acima mencionados representados pelo advento de modelos de CA e pelas facilidades resultantes de seu acoplamento com GIS, não se pode negar as limitações e deficiências implícitas nas atuais implementações tradicionais de CA. Elas concernem sobretudo as premissas de discretização do espaço e do tempo, como regularidade espacial, estacionariedade de vizinhança e universalidade das funções de transição. Demais limitações devem ser também mencionadas, como o seqüenciamento artificial imposto aos diferentes tipos de transição de uso (quando de fato eles ocorrem simultaneamente na realidade), as generalizações aplicadas aos mapas de uso para torná-los computacionalmente tratáveis, e enfim, os atuais padrões de processamento computacional que afetam diretamente a resolução espacial de modelos de CA. Muitos dos esforços para superar essas restrições ainda são de natureza teórica (Seção 2.3.2.1).

Contudo, modelos dinâmicos espaciais, dos quais CA constituem um dos melhores representantes, ainda são um meio promissor para se tornar as saídas de simulações de mudanças de uso do solo comunicáveis e transparentes a políticos, planejadores e tomadores de decisão em particular, bem como ao público leigo de forma geral.

7.2 Recentes Avanços e Potenciais Rumos para Modelos de Mudanças do Uso do Solo Urbano

Conforme já exposto na Seção 2.3.2.2, sucessivos refinamentos foram introduzidos nos modelos urbanos de CA na última década, derivados principalmente de avanços correlatos nas áreas de Inteligência Artificial e sistemas complexos. Exemplos neste

sentido são os trabalhos baseados em ferramentas contemporâneas de ajuste de padrões, tais como redes neurais (Wu, 1998; Xia e Yeh, 2000) e aprendizagem evolucionária (Papini et al. 1998). Ainda nesta linha de pesquisa, estudos lidando com tópicos em complexidade como caos, fractais e criticalidade auto-organizável são dignos de menção (Couclelis, 1988; Batty e Longley, 1991; White e Engelen, 1993; Batty e Longley, 1994; Portugali et al. 1997; Portugali et al. 1999; Sobreira e Gomes, 2001; Batty, 2003).

Conforme previamente exposto na Seção 2.3.2.1, a modelagem urbana baseada em CA caminha em direção a um relaxamento das suposições existentes em autômatos celulares convencionais. Neste sentido, ao invés de células homogêneas, o espaço poderia ser subdividido em estruturas irregulares (polígonos) representando assim mais realisticamente divisões políticas ou administrativas, como distritos censitários, municípios, zonas de origem-destino, etc. As vizinhanças poderiam variar em vista da funcionalidade a elas associadas, e as funções de transição poderiam ser aplicadas seletivamente, considerando-se o seu efetivo contexto de influência. Para Couclelis (1997), passos de tempo variáveis poderiam ser usados para se ajustarem a algum calendário pré-determinado, como variações sazonais na taxa de crescimento de um certo tipo de uso do solo.

Uma nova tendência em modelos urbanos de CA concerne a mudança de enfoque de assuntos relacionados à expansão da estrutura urbana para transformações mais sutis ocorrentes nas estruturas intra-urbanas, como processos de adensamento (Rabino, 2002; Yeh e Li, 2002). Isto representa uma tentativa de modeladores e planejadores para lidar com questões mais prementes no ambiente urbano. De fato, há uma tendência corrente de declínio nas taxas de crescimento de cidades em praticamente todo o mundo, e o crescimento urbano está prestes a se tornar um jogo de soma zero (Prud'Homme, 1989).

O crescimento urbano está consideravelmente decaindo em países desenvolvidos, mas este declínio também tem sido sentido em muitos países em desenvolvimento. As implicações desta mudança são inúmeras e certamente afetarão a dinâmica de mercados imobiliários, e conseqüentemente, a natureza de políticas urbanas. De acordo com

Prud'Homme (1989), a competição entre cidades será provavelmente realçada, e “cada área urbana terá que lutar para reter pessoas e empregos, e ser inovadora e atrativa para a consecução deste objetivo”. Para ele, mesmo nos países em desenvolvimento, o gerenciamento de áreas urbanas, em oposição ao planejamento, irá crescer em importância, e a escassez de recursos levará os formuladores de políticas públicas a procurar por respostas flexíveis, de baixo custo, inovadoras, alternativas e temporárias para os problemas impostos pelo crescimento urbano.

7.3 Principais Contribuições desta Pesquisa

As inovações tecnológicas assim como o avanço científico de forma geral ocorrem de maneira gradual, passo a passo. Nesse sentido, as contribuições individuais freqüentemente passam a ser não mais estruturais e sim conjunturais, as quais a longo prazo, somando avanços, produzirão incrementos significativos ao corpo teórico e tecnológico da ciência.

Assim, pode-se dizer que a idéia original de autômatos celulares (CA) foi inovadora, porém sua aplicação em modelagem de fenômenos urbanos representa tão somente uma contribuição conjuntural, uma vez que apenas se importou um recurso teórico e sua contraparte tecnológica que já se encontravam disponíveis em outro ramo do conhecimento científico.

No universo de modelagem de CA, existe uma espécie de biblioteca de recursos científico-tecnológicos; alguns originariamente concebidos para CA, outros não. As recentes contribuições dentro do âmbito de modelos urbanos de CA dizem respeito basicamente a novas formas na montagem de aparatos desses tais recursos no processo de modelagem. Por exemplo, teoria de conjuntos nebulosos ou lógica *fuzzy*, AHP, redes neurais e aprendizagem evolucionária constituem abordagens teóricas e metodológicas inovadoras, procedentes na sua maior parte das Ciências da Computação, e todas foram recentemente incorporadas em modelos de CA que lidam com tópicos urbanos (Wu, 1996, 1998; Xia e Yeh, 2000; Papini et al. 1998).

Seguindo esta lógica, esta pesquisa está principalmente voltada à exploração das dinâmicas de uso do solo em duas cidades reais de médio porte, empregando dois métodos estatísticos empíricos diferenciados para a estimativa das probabilidades de transição das células: pesos de evidência e regressão logística. Considerando o fato de que os modelos operam com uma categorização detalhada de usos do solo urbano (oito categorias de uso foram levadas em consideração para os experimentos de simulação), este trabalho visa abrir novos rumos metodológicos para futuras investigações em linhas de pesquisa afins.

Experimentos de simulação de mudanças de uso do solo urbano lidando com cidades reais e diversos tipos de usos do solo foram conduzidos por White e Engelen (1997, 2000) e White et al. (1998), mas a sua parametrização é baseada em métodos multivariados de regressão linear. Enquanto que seus prognósticos são gerados a partir de técnicas exploratórias (destinadas a responder perguntas “*what if?*”), os prognósticos da presente pesquisa são baseados em modelos de regressão linear calibrados através de longas séries multitemporais. Experimentos similares de simulação lidando com cidades reais e vários usos do solo também foram executados por Papini et al. (1998), mas de forma diversa dos métodos empregados nesta pesquisa, suas regras de transição são definidas com base em algoritmos de aprendizagem evolucionária e lógica Booleana.

Em suma, o presente trabalho propõe-se a fornecer diretrizes metodológicas para futuras investigações científicas que lidem com experimentos de modelagem empíricos, aplicados a estudos de caso reais, nos quais uma categorização detalhada de usos do solo for adotada.

7.4 Possíveis Aplicações deste Trabalho

Os modelos de dinâmicas do uso do solo urbano demonstram ser úteis para a identificação dos principais vetores de crescimento urbano e de suas tendências gerais de uso do solo, permitindo ao poder público local ordenar e redirecionar (se for o caso) o crescimento urbano, conforme a capacidade de suporte ambiental e a disponibilidade presente e futura de infra e super-estrutura.

Os prognósticos de expansão urbana fornecidos por esses modelos também se prestam a auxiliar gestores locais, como subprefeitos, administradores regionais e secretários municipais a estabelecer metas para investimentos em infra-estrutura e equipamentos sociais, a exemplo do prolongamento de vias públicas, expansão da rede de água e esgoto, criação de novas linhas de ônibus, construção de creches, escolas, hospitais, postos de saúde, etc.

Tomadores de decisão da esfera particular podem igualmente se beneficiar desses dados de modelagem, uma vez que empresas de transporte, telefonia celular e fixa, TV a cabo, provedores de internet e outros, terão subsídios para definir prioridades sobre onde e com que intensidade investir.

A própria sociedade civil organizada, seja através de ONGs, movimentos sociais, associação de moradores de bairros, etc., poderão se valer dos prognósticos, para, através dos meios legítimos, reforçar pressões reivindicatórias por equipamentos infra ou super-estruturais de forma mais fundamentada, uma vez que seus argumentos estarão baseados em tendências realísticas de expansão urbana a curto e médio prazo.

E como palavras finais, Batty (1976) expõe de forma concisa as idéias-chaves subjacentes às aplicações e propostas da modelagem urbana ao afirmar que:

“Há muitas razões para o desenvolvimento de tais modelos: seu papel em auxiliar cientistas a entender os fenômenos urbanos através de análise e experimentação representa um objetivo tradicional da ciência; contudo, a modelagem urbana é igualmente importante ao ajudar planejadores, políticos e a comunidade em geral a prever, prescrever e inventar o futuro urbano (Batty, 1976, p. xx).”

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albin, P. S. **The analysis of complex socioeconomic systems**. Lexington, MA: D. C. Heath, 1975.
- Allen , P. M.; Engelen, G.; Sanglier, M. Towards a general dynamic model of the spatial evolution of urban systems. In: Hutchinson, B.; Batty, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 199-220.
- Allen , P. M.; Sanglier, M; Boon, F. Intra-urban evolution - Part II. In: Kahn, D. ed. **Models of urban settlement and structure as dynamic self-organizing systems**. Washington, D. C.: US Department of Transportation, 1981.
- Almeida, C. M.; Batty, M.; Monteiro, A. M. V.; Câmara, G.; Soares- Filho, B. S.; Cerqueira, G. C.; Pennachin, C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 5, p. 481-509, 2003.
- Alonso, W. A general theory of the urban land market. **Papers and Proceedings of the Regional Science Association**, v. 6, p. 149-158, 1960.
- Bailey, T. C.; Gatrell, A. C. **Interactive spatial data analysis**. Essex, UK: Longman, 1996. 413p.
- Bak, P.; Chen, K.; Creutz, M. Self-organized criticality in the Game of Life. **Nature**, v. 342, p. 780-782, 1989.
- Baker, W. L. A review of models of landscape change. **Landscape Ecology**, v. 2, n. 2, p. 111-133, 1989.
- Batty, M. Modeling cities as dynamic systems. **Nature**, v. 231, p. 425-428, June 1971.
- Batty, M. **Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1976. 381 p.
- Batty, M. GeoComputation using cellular automata. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 5, p. 95-126.
- Batty, M. **The emergence of cities: complexity and urban dynamics**. 2003. Disponível em < http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper64.pdf>. Acessado em 12/07/03.
- Batty, M.; Couclelis, H.; Eichen, M. Urban systems as cellular automata. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 159-164, 1997.
- Batty, M.; Jiang, B.; Thurstain-Goodwin, M. **Local movement: agent-based models of pedestrian flow**. 1998. Disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/local_movement.doc>. Acessado em 03/08/02.
- Batty, M.; Longley, P. Cities as fractals: simulating growth and form. In: Crilly, T.; Earnshaw, R. A.; Jones, H. ed. **Fractals and chaos**. New York: Springer Verlag, 1991. p. 41-69.

- Batty, M.; Longley, P. **Fractal cities: a geometry of form and function**. London: Academic Press, 1994.
- Batty, M.; Xie, Y. Preliminary evidence for a theory of the fractal city. **Environment and Planning A**, v. 28, p. 1745-1762, 1996.
- Batty, M.; Xie, Y. Possible urban automata. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 175-192, 1997.
- Batty, M.; Xie, Y.; Sun, Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.23, p. 205-233, 1999.
- Beaumont, J. R.; Clarke, M.; Wilson, A. G. The dynamics of urban spatial structure: some explanatory results using difference equations and bifurcation theory. **Environment and Planning A**, v. 13, p. 1473-1483, 1981.
- Bell, E. J.; Hinojosa, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Science**, v. 8, p. 13-17, 1977.
- Benati, S. A cellular automaton for the simulation of competitive location. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 205-218, 1997.
- Benenson, I; Torrens, P. M. Object-based modeling of urban phenomena: editorial. **Computers, Environment and Urban Systems**, 2003 (no prelo).
- Benevolo, L. **História da cidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1983. 729 p.
- Berlekamp, E. R.; Conway, J. H.; Guy, R. K. **Winning ways for your mathematical plays**. New York: Academic Press, 1982.
- Bertalanffy, L. von. An outline of general systems theory. **British Journal of the Philosophy of Science**, v. 1, p. 134-165, 1951.
- Black, D.; Henderson, V. A theory of urban growth. **The Journal of Political Economy**, v. 107, n. 2, p. 252-284, 1999.
- Blokland, J.; Hendricks, A. J.; Paelinck, J. H. P. **Elements for the construction of a simple model for a stagnating town**. Amsterdã: Regional Science Association - Dutch Meeting, 1972.
- Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.
- Bowker, D. E.; Davis, R. E.; Myrick, D. L.; Stacy, K.; Jones, W. T. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing**. Hampton: National Aeronautics and Space Administration - NASA, 1985. (NASA Reference Publication, n. 1139).
- Boyce, D. E. **Equilibrium solutions to combined urban residential location, modal choice, and trip assignment models**. Philadelphia: Regional Science Research Institute, 1977. (RSRI Discussion Paper, n. 98).
- Brasil. **Constituição Federal** (CF. Título VII. Cap. II. art. 182. § 1º). 1988. Disponível em <<http://www.senado.gov.br/bdtextual/const88/Con1988br.pdf>>. Acessado em 18/07/03.

Briassoulis, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Lesvos, Greece. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acessado em 28/10/02.

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

Butler, E. W. **Moving behavior and residential choice**. Washington, D.C.: Highway Research Board, 1969. (Report n. 81).

Câmara, G.; Monteiro, A. M. V.; Medeiros, J. S. Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. **Geografia**, v. 28, n.1, p. 83-96, 2003.

Câmara, G.; Souza R.C.M.; Freitas, U. M.; Garrido, J. C. P. SPRING: Integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modelling. **Computers and Graphics**, v.15, n.6, p. 13-22, 1996.

Censo demográfico – São Paulo – 1970. Rio de Janeiro: IBGE, 1971. v. 1. 478 p.

Censo demográfico – Dados distritais – São Paulo – 1980. Rio de Janeiro: IBGE, 1982. v. 1. 611 p.

Censo demográfico – 2000 – Características da população e dos domicílios – Resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. 519p.

Centro de Informática do Campus “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo (CIAGRI-USP). 2003. **Piracicaba**. Disponível em <<http://www.ciagri.usp.br/piracica/pira-p.htm>>. Acessado em 02/08/03.

Centro de Pesquisa e Estudos Urbanísticos – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (CEPEU-FAUUSP). **Plano diretor de Bauru** – cidade de Bauru: rede de água. Bauru: CEPEU-FAUUSP, 1967a. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Centro de Pesquisa e Estudos Urbanísticos – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (CEPEU-FAUUSP). **Plano diretor de Bauru** – cidade de Bauru: usos de solo. Bauru: CEPEU-FAUUSP, 1967b. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Centro de Pesquisa e Estudos Urbanísticos – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (CEPEU-FAUUSP). **Plano diretor de Bauru** – cidade de Bauru: pavimentação. Bauru: CEPEU-FAUUSP, 1967c. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Chadwick, G. **Una vision sistematica del planeamiento**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1973. 283 p.

Chapin Jr., F. S.; Kaiser, E. J. **Urban land use planning**. Urbana: University of Illinois Press, 1979.

- Chapin Jr., F. S.; Weiss, S. F. **Factors influencing land development**. Chapel Hill: Institute for Research in Social Science - University of North Carolina, 1962.
- Chapin Jr., F. S.; Weiss, S. F. A probabilistic model for residential growth. **Transportation Research**, v. 2, p. 375-390, 1968.
- Clark, C. Urban population densities. **Journal of the Royal Statistical Society A**, v. 114, p. 490-496, 1951.
- Clarke, K. C.; Gaydos, L. J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth predictions for San Francisco and Baltimore. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 12, p. 699-714, 1998.
- Clarke, K. C.; Hoppen, S.; Gaydos, L. J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 247-261, 1997.
- Coelho, J. D.; Williams, H. C. W. L. On the design of land use plans through locational surplus maximization. **Papers of the Regional Science Association**, v. 40, p. 71-85, 1978.
- Consórcio Intermunicipal Tietê-Paraná (CITP) and Centro de Estudos e Pesquisas de Administração Municipal (CEPAM). **Tietê-Paraná - Projeto Calha**. São Paulo: Unida Artes Gráficas e Editora Ltda., 1994. 67 p.
- Constanza, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, p. 199-215, 1989.
- Costa, P.; Piasentin, U. **Un modello di simulazione dello sviluppo urbano di Venezia**. Venice: Symposium on Trends in Mathematical Modelling – UNESCO, 1971.
- Couclelis, H. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. **Environment and Planning A**, v. 17, p. 585-596, 1985.
- Couclelis, H. Cellular dynamics: how individual decisions lead to global urban change. **European Journal of Operational Research**, v. 30, p. 347-355, 1987.
- Couclelis, H. Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. **Environment and Planning A**, v. 20, p. 99-109, 1988.
- Couclelis, H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 165-174, 1997.
- Crecine, J. P. **TOMM (Time oriented metropolitan model)**. Pittsburgh: Department of City Planning, 1964. (CRP Technical Bulletin, n. 6).
- Crecine, J. P. **A dynamic model of urban structure**. Santa Monica: RAND Corporation, 1968. (P-3803).
- Czamanski, S. A method of forecasting metropolitan growth by means of distributed lags analysis. **Journal of Regional Science**, v. 6, p. 35-49, 1965.
- D'Alge, J. C. L. Qualidade geométrica de imagens TM do LANDSAT-5. In: **XIII Congresso Brasileiro de Cartografia**. Brasília: SBC, 1987. INPE-8090-PRE/090.

Data ITE – Bauru. Bauru: Instituição Toledo de Ensino – Faculdade de Ciências Econômicas de Bauru (ITE – FCEB), 1998. 205p.

Deadman, P.; Brown, R. D.; Gimblett, P. Modelling rural residential settlement patterns with cellular automata. **Journal of Environmental Management**, v. 37, p. 147-160, 1993.

Departamento de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Bauru (DAE – Bauru). **Comércio.** Bauru: DAE, 1979a. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Departamento de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Bauru (DAE – Bauru). **Conjuntos habitacionais.** Bauru: DAE, 1979b. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Departamento de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Bauru (DAE – Bauru). **Principais vias de acesso.** Bauru: DAE, 1979c. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Departamento de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Bauru (DAE – Bauru). **Rede de água.** Bauru: DAE, 1979d. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Departamento de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Bauru (DAE – Bauru). **Planta geral do município de Bauru - SP.** Bauru: DAE, 2000. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Departamento de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Bauru (DAE – Bauru). **Planta geral do município de Bauru - SP.** Bauru: DAE, 2003. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Departamento de Solos e Nutrição de Plantas – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (LSN – ESALQ-USP). **Digital aerial photos mosaic for the city of Piracicaba – 1962.** Piracicaba: LSN – ESALQ-USP, 2002. Fotos digitais. 23.0 MB. Tiff. Escala 1:100,000.

Diplock, G. Genetic programming: a new approach to spatial model building. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation.** New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 9, p. 219-252.

Easterly, W.; Sewadeh, M. **Global development network growth database.** 2000. Disponível em <<http://www.worldbank.org/research/growth/GDNdata.htm>>. Acessado em 15/07/03.

Echenique, M. **Models:** a discussion. Cambridge, UK: University of Cambridge, 1968. (Land Use and Built Form Studies, WP 6).

Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. (EMPLASA). **Regiões metropolitanas do Brasil.** 2000. Disponível em <http://www.emplasa.sp.gov.br/metropoles/rms_brasil/RM-BRASIL-LEGISLACAO.htm>. Acessado em 02/08/03.

Engelen, G.; White, R.; Uljee, I. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy making. In: Timmermans, H. P. J. ed. **Decision support systems in urban planning**. London: E&FN Spon, 1997. Cap. 8, p. 125-155.

Estimativas da população residente em 1º de julho de 1985, segundo os municípios e a situação político-administrativa. Rio de Janeiro: IBGE, 1987. Válido a partir de 16/03/87.

Estimativas da população residente em 1º de julho de 1990, segundo os municípios e a situação político-administrativa. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

Estimativas das populações residentes em 1º de julho de 1992 a 1º de julho de 1995, segundo as situações político-administrativas vigentes em 1º de julho de 1992 a 1995 e segundo os municípios. Rio de Janeiro: IBGE, 1997. Resolução n. 27. Válido a partir de 27/08/96.

Estimativas da população residente em 1º de julho de 1999, segundo os municípios e a situação político-administrativa. Rio de Janeiro: IBGE, 1999.

Facelli, J. M.; Steward, T. A. P. Markovian chains and the role of history in succession. **Tree**, v.5, n. 1, p. 27-29, 1990.

FAO/IIASA. **Agro-ecological assessments for national planning: the example of Kenya**. Rome: FAO, 1993. (FAO Soils Bul, n. 67).

Fernandes, C. L. L.; Medeiros, C. M.; Mendes, A. G. O elemento regional no processo de planejamento do Brasil - Notas preliminares. In: Cintra, A. O.; Haddad, P. R. ed. **Dilemas do planejamento urbano e regional no Brasil**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1977. Cap. II, p. 51-168.

Ferreira, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

Fischer, M. M.; Abrahart, R. J. Neurocomputing – tools for geographers. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 8, p. 187-217.

Fischer, T. **Gestão contemporânea: cidades estratégicas e organizações locais**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1996. 208 p.

Forrester, J. W. **Urban dynamics**. Cambridge, Mass: MIT Press, 1969.

Forrester, J. W. **World dynamics**. Cambridge, Mass: Wright-Allen Press, 1971.

Fundação Seade. **Hidrovia Tietê-Paraná: um rio de negócios**. 1999. Disponível em <<http://www.seade.gov.br/negocios/snpor01b.html>>. Acessado em 23/09/00.

Fundação Seade. **Bauru: a cidade sem limites e a capital da terra branca**. 2000a. Disponível em <http://www.seade.gov.br/negocios/snpci_05-v2.html>. Acessado em 01/08/03.

Fundação Seade. **Piracicaba: a terra da cachaça boa**. 2000b. Disponível em

<http://www.seade.gov.br/negocios/snpci_23-v2.html>. Acessado em 01/08/03.

Fundação Seade. **Informações dos municípios paulistas:** valor adicionado fiscal total e setorial para Bauru e Piracicaba – 1993 - 2001. 2002. Disponível em

<http://www.seade.gov.br/cgi-bin/lingcv98/spd_01.ksh>. Acessado em 10/06/03.

Fundação Seade. **Informações dos municípios paulistas:** demografia. 2003.

Disponível em <http://www.seade.gov.br/cgi-bin/lingcv98/spd_01.ksh>. Acessado em 10/08/03.

Gardner, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'. **Scientific American**, v. 223, p. 120-123, 1970.

Gong, P.; Howarth, P. J. The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, n. 1, p. 67-76, 1990.

Goodacre, A. K.; Bonham-Carter, G. F.; Agterberg, F. P.; Wright, D. F. A statistical analysis of the spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, v.217, p. 285-305, 1993.

Haack, B.; Bryant, N.; Adams, S. An assessment of Landsat MSS and TM data for urban digital classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 21, p. 201-213, 1987.

Hardoy, J. E.; Mitlin, D.; Satterthwaite, D. **Environmental problems in an urbanizing world:** finding solutions for cities in Africa, Asia and Latin America. London: Earthscan Publications Ltd, 2001. 446 p.

Harris, B. Bridging the gap between theory and practice in urban planning. In: Pack, J. ed. **Proceedings of the Conference on the Use of Models by Planning Agencies**. Philadelphia: University of Pennsylvania, 1975.

Hidrovia Tietê-Paraná: hidrovia do Mercosul – Um rio de negócios. São Paulo: CESP, 1998. 26 p.

Hill, D. M. A growth allocation model for the Boston region. **Journal of the American Institute for Planners**, v. 31, p. 111-120, 1965.

Hoover, E. M.; Giarratani, F. **An introduction to regional economics**. New York: Alfred K., 1984.

Hosmer, D.; Lemeshow, S. Applied logistic regression. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989. 307p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Carta topográfica do Brasil - Piracicaba**. Rio de Janeiro: IBGE, 1969. Um mapa. Sistema de Projeção: UTM. Datum horizontal: Córrego Alegre, MG. Datum vertical: marégrafo Imbituba, SC. Escala 1:50,000. Planta em papel.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Carta topográfica do Brasil - Bauru**. Rio de Janeiro: IBGE, 1973. Um mapa. Sistema de Projeção: UTM. Datum horizontal: Córrego Alegre, MG. Datum vertical: marégrafo Imbituba, SC. Escala 1:50,000. Planta em papel.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Landsat 3 - MSS satellite image – WRS 237/75 – Acquisition date 22-06-79**. São José dos Campos: INPE, 1979. Uma imagem de satélite. SOL: EL28 A2045 BB 190 LL N. Impressa em papel.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Landsat 5 - TM satellite image – WRS 221/75 – Acquisition date 01-10-84**. São José dos Campos: INPE, 1984. Uma imagem de satélite. 384 MB. GeoTiff. DGI-LPE-0271. CD-ROM.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Landsat 5 - TM satellite image – WRS 220/76 – Acquisition date 10-08-85**. São José dos Campos: INPE, 1985. Uma imagem de satélite. 383 MB. GeoTiff. DGI-LPE-0111. CD-ROM.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Landsat 5 - TM satellite image – WRS 221/75 – Acquisition date 29-11-88**. São José dos Campos: INPE, 1988. Uma imagem de satélite. 384 MB. GeoTiff. DGI-LPE-0271. CD-ROM.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Landsat 5 - TM satellite image – WRS 220/76 – Acquisition date 16-07-99**. São José dos Campos: INPE, 1999. Uma imagem de satélite. 235 MB. DAT. CCB-CCT-0002. CD-ROM.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Landsat 5 - TM satellite image – WRS 221/75 – Acquisition date 07-06-00**. São José dos Campos: INPE, 2000. Uma imagem de satélite. 368 MB. GeoTiff. DGI-ERG-0208. CD-ROM.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **PIBs dos municípios brasileiros: 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1996 (US\$ of 1998)**. 2001. Disponível em <<http://www.ipea.gov.br/pub/PIBsMu/pibs.htm>>. Acessado em 10/06/03.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **IPCA – geral (%) a.m. 2003a**. Disponível em <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acessado em 10/06/03.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **PIBs dos municípios brasileiros: 1970, 1975, 1980, 1985 (R\$ of 2000)**. 2003b. Disponível em <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acessado em 10/06/03.

Jensen-Moeller, L. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat TM imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, n.6, p. 899-904, 1990.

Johnston, A. K.; Watters, T. R. Assessing spatial growth of the Washington metropolitan area using thematic mapper data. In: American Congress on Surveying and Mapping and American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **Proceedings**. Baltimore: ACSM - ASPRS, 1996.

Johnston, R. J.; Gregory, D.; Smith, D. M. **The dictionary of human geography**. Oxford: Blackwell, 1994.

Joint Research Centre – European Commission - Institute for Remote Sensing Applications (JRC); European Space Agency – Earthnet Programme Office (ESA-ESRIN). **Modelling Deforestation Processes – a review**. Luxembourg: ECSC-EC-EAEC, 1994. (Trees Series B, Research Report n.1).

- Jones, A.; Clark, J. Driving forces behind European land use change: an overview. In: The user needs for more harmonized land use information at the national and EU level. **Report on the CLAUDE** (Coordinating Land Use and Cover Data Analyses in Europe) **Workshop**. Wageningen: CLAUDE, Concerted Action, EC, 1997. v. DGXII, p. 24-31.
- Lakshmanan, T. R. An approach to the analysis of intra-urban location applied to the Baltimore region. **Economic Geography**, v. 40, p. 348-370, 1964.
- Lakshmanan, T. R. A model for allocating urban activities in a state. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 1, p. 283-295, 1968.
- Lakshmanan, T. R.; Hansen, W. G. A retail market potential model. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 31, p. 134-143, 1965.
- Lathrop, G. T.; Hamburg, J. R. An opportunity-accessibility model allocating regional growth. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 31, p. 95-103, 1965.
- Leonardi, G. A general accessibility and congestion-sensitive multi-activity spatial interaction model. **Papers of the Regional Science Association**, v. 47, p. 3-17, 1981.
- Li, X.; Yeh, A. G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 2, p. 131-152, 2000.
- Liu, H. **Spectral signatures and multi-spectral image interpretation**. 2003. Disponível em <<http://geog.tamu.edu/~liu/courses/g489/note8.pdf>>. Acessado em 10/08/03.
- Lowry, I. S. **A model of metropolis**. Santa Monica: RAND Corporation, 1964. (RM-4035-RC).
- Machado e Silva, A. J. F. **Modelos de correção geométrica para imagens HRV-SPOT**. São José dos Campos. 223p. (INPE-5001-TDL/395). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1989.
- Machado e Silva, A. J. F.; D'Alge, J. C. L. Avaliação da qualidade geométrica das imagens TM-LANDSAT. In: **Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto**. Gramado: SELPER, 1986. INPE-8113-PRE/113.
- McCullagh, P.; Nelder, J. A. **General linear models**. New York: Chapman Hall, 1989. 511 p.
- Mc Loughlin, J. B. **Planification urbaine et regionale**. Paris: Dunod, 1972.
- Medda, F.; Nijkamp, P.; Rietveld, P. Urban industrial relocation: the theory of edge cities. **Environment and Planning B**, v. 26, p.751-761, 1999.
- Merlin, P. **Méthodes quantitatives et espace urbain**. Paris: Masson et Cie Éditeurs, 1973. 190 p.
- Mertens, B.; Lambin, E. Modelling land cover dynamics: integration of fine escala land cover data with landscape attributes. **Journal of Applied Geography**, v. 1, n.1, p. 48-52, 1999.

- Mertens, B.; Sunderlin, W. D.; Ndoye, O.; Lambin, E. Impact of macro-economic change on deforestation in South Cameroon: integration of household survey and remotely-sensed data. **World development**, v. 28, n.6, p. 983-999, 2000.
- Moore, T. Geospatial expert systems. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 6, p. 127-159.
- Neter, J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models**. Georgetown: Irving-Dorsey Ltd., 1974. 842 p.
- Nóbrega, M. **História do rio Tietê**. Belo Horizonte: Editora Itatiaia Ltda., 1981. 245 p.
- Novaes, A. G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981. 290 p.
- Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto – princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1988. 308p.
- Ohtake, R. ed. **O livro do rio Tietê**. São Paulo: CESP, 1991. 167 p.
- O’Sullivan, D. **Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes**. London. 317p. Tese (Doutorado em Geografia) – Centre for Advanced Spatial Analysis of the University College London (CASA-UCL), 2000.
- O’Sullivan, D. Exploring spatial processes dynamics using irregular graph-based cellular automaton models. **Geographical Analysis**, v. 33, p. 1-18, 2001a.
- O’Sullivan, D. Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model. **Environment and Planning B**, v. 28, p. 687-705, 2001b.
- Odum, E. P. **Ecology**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1963.
- Openshaw, S. GeoComputation. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 1, p. 1-31.
- Oppenheim, N. A critical survey of current developments in urban and regional modelling. In: Hutchinson, B.; Batty, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 41-54.
- ORB - The online reference book for medieval studies. **Medieval English towns - Problems of definition**. 2002. Disponível em <<http://www.trytel.com/~tristan/towns/townint2.html>>. Accessed on 17/07/03.
- Paelinck, J. H. P. Dynamic urban growth models. **Papers of the Regional Science Association**, v. 24, p. 25-37, 1970.
- Papageorgiou, Y. Y.; Pines, D. An essay on urban economic theory. **Regional Science and Urban Economics**, v. 31, n. 5, p. 626-630, 2001.
- Papini, L.; Rabino, G. A.; Colonna, A.; Di Stefano, V.; Lombardo, S. (1998) Learning cellular automata in a real world: the case study of the Rome metropolitan area. In Bandini, S.; Serra, R.; Liverani, F. S. ed. Cellular automata: research towards industry. **ACRI’96: Proceedings of the Third Conference on Cellular Automata for Research and Industry**. London: Springer-Verlag, 1998. p. 165-183.

- Perraton, J.; Baxter, R. **Models, evaluations & information systems for planners**. Lancaster: MTP Construction, 1974. 305 p.
- Phipps, M. Dynamical behaviour of cellular automata under constraints of neighbourhood coherence. **Geographical Analysis**, v. 21, p. 197-215, 1989.
- Phipps, M.; Langlois, A. Spatial dynamics, cellular automata and parallel processing computers. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 193-204, 1997.
- Piracicaba (Prefeitura Municipal). **Código de obras do município de Piracicaba** – Lei nº 1.297, de 22 de dezembro de 1964. Piracicaba: Divisão de Obras Particulares e Urbanismo da Prefeitura Municipal, 1965.
- Plano diretor de Bauru 1996**. Bauru: Secretaria Municipal de Planejamento de Bauru (SEPLAN – Bauru), 1997. 200p.
- Plano estadual de recursos hídricos** – Primeiro Plano do Estado de São Paulo – 1990. São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), 1990.
- Pontius Jr., G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 66, n. 8, p. 1011-1016, 2000.
- Pontius Jr., G. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 10, p. 1041-1049, 2002.
- Popper, K. R. **Objective knowledge**. Oxford, UK: Oxford University Press, 1972.
- Porter, H. R.; Henley, E. J. Applications of the Forrester model to Harris County, Texas. In: Chen, K. ed. **Urban dynamics: extensions and reflections**. San Francisco: San Francisco Press Inc., 1972.
- Portugali, J.; Benenson, I.; Omer, I. Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 263-285, 1997.
- Portugali, J.; Benenson, I.; Omer, I. City: the greens and the blues. In: Portugali, J. ed. **Self-organization and the city**. Berlin: Springer Verlag, 1999. Cap. 5.
- Produtividade e ajuste na indústria paulista** – 1986 - 1994. São Paulo: Fundação Seade, 1995. 120p. (Análises & Ensaios).
- Prud'Homme, R. New trends in the cities of the world. In: Knight, R. V.; Gappert, G. ed. **Cities in a global society**. Newbury Park: SAGE Publications, Inc., 1989. Cap. 2, p. 44-57.
- Rabino, G. A. Identification of cellular automata. In: **Workshop on Cellular Automata, Neural Networks and Multi-Agent Systems in Urban Planning**. Milan: Politecnico di Milano, 2002.
- Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis** – An introduction. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 340p.

Ridd, M.K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities.

International Journal of Remote Sensing, v. 16, p. 2165-2186, 1995.

Sanders, L.; Pumain, D.; Mathian, H.; Guérin-Pace, F.; Bura, S. SIMPOP: a multi-agent system for the study of urbanism. **Environment and Planning B**, v. 24, n.2, p. 287-305, 1997.

São Paulo (Estado). **Constituição do Estado de São Paulo** (CE – SP. Cap. II. Seção II. art. 153. § 1º). 1989. Disponível em < http://folio.al.sp.gov.br/cgi-bin/om_isapi.dll?clientID=146938&infobase=constsp.nfo&softpage=Browse_Frame_Pg42>. Acessado em 18/07/03.

São Paulo no limiar do século XXI - Cenários da urbanização paulista. São Paulo: Fundação Seade, 1992. v. 5. 106 p.

Schelhorn, T.; O'Sullivan, D.; Haklay, M.; Thurstain-Goodwin, M. **Streets: an agent-based pedestrian model**. 1999. Disponível em < <http://www.casa.ucl.ac.uk/streets.pdf>>. Acessado em 31/07/02.

Secretaria Municipal de Planejamento de Bauru (SEPLAN - Bauru). **Zoneamento – usos do solo**. Bauru: SEPLAN, 1979a. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Secretaria Municipal de Planejamento de Bauru (SEPLAN - Bauru). **Densidades de ocupação**. Bauru: SEPLAN, 1979b. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Secretaria Municipal de Planejamento de Bauru (SEPLAN - Bauru). **Planta da area urbana e arredores – zoneamento**. Bauru: SEPLAN, 1988a. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Secretaria Municipal de Planejamento de Bauru (SEPLAN - Bauru). **Planta da area urbana e arredores – principais obras viárias existentes e a construir**. Bauru: SEPLAN, 1988b. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Secretaria Municipal de Planejamento de Piracicaba (SEMUPLAN - Piracicaba). **Plano diretor de desenvolvimento de Piracicaba – planta de zoneamento**. Piracicaba: SEMUPLAN, 1985. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Secretaria Municipal de Planejamento de Piracicaba (SEMUPLAN - Piracicaba). **Planta geral do município de Piracicaba**. Piracicaba: SEMUPLAN, 1999. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Secretaria Municipal de Planejamento de Piracicaba (SEMUPLAN - Piracicaba). **Planta geral do município de Piracicaba**. Piracicaba: SEMUPLAN, 2003. Um mapa. Escala 1:20,000. Planta em papel.

Seevers, P. M.; Johnston, D. C.; Feuquay, J. W. Band combinations selection for visual interpretation of thematic mapper data for resource management. In: Technical paper: Racing into tomorrow. American Congress on Surveying and Mapping and American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **Proceedings**. Fall Church, Indianapolis: ACSM - ASPRS, 1985.

- Seidman, D. R. **The construction of an urban growth model**. Philadelphia: Delaware Valley Regional Planning Commission, 1969. (DVRPC Plan - Report n. 1).
- Semoloni, F. An urban and regional model based on cellular automata. **Environment and Planning B**, v. 24, p. 589-612, 1997.
- Serra, G. **Urbanização e centralismo autoritário**. São Paulo: Livraria Nobel - EDUSP, 1991. 172 p.
- Sistema de contas nacionais** – contas regionais do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. (Série Contas Nacionais, n. 6).
- Sistema de contas nacionais** – Brasil – 1999-2001. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 205 p. (Série Contas Nacionais, n. 9).
- Skole, D. L. Data on global land-cover change: Acquisition, assessment, and analysis. In: Meyer, W. B.; Turner, B. L. II. Ed. **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. p. 437-471.
- Soares-Filho, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. São Paulo. 299p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 1998.
- Soares-Filho, B. S.; Assunção, R. M.; Pantuzzo, A. E. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **BioScience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.
- Soares-Filho, B. S.; Cerqueira, G. C.; Pennachin, C. L. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 217-235, 2002.
- Sobreira, F.; Gomes, M. **The geometry of slums: boundaries, packing and diversity**. 2001. Disponível em < <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper30.pdf>>. Acessado em 09/11/01.
- Solberg, R.; Fiskum, S.; Giffen, M. C. Detection of urban areas by interference filtering. In: Remote Sensing for the Nineties, Igarss'90. 10th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Proceedings**. Washington, D.C.: IEEE, 1990. v. II, p. 20-24.
- Takeyama, M. Building spatial models within GIS through geo-algebra. **Transactions in GIS**, v. 2, p. 245-256, 1997.
- Takeyama, M.; Couclelis, H. Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through geo-algebra. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 11, p. 73-91, 1997.
- Thompson, A. **Chaos theory** – definition of chaos explained. 1997. Disponível em <<http://www.galactic-guide.com/articles/8R85.html>>. Acessado em 31/07/03.
- Tobler, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 26, p. 234-240, 1970.
- Tobler, W. Cellular geography. In: **Philosophy in geography**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1979. p. 379-386.

- Torrens, P. M. **Automata-based models of urban systems**. 2003. Disponível em <http://www.geogr.ku.dk/courses/phd/gis-model/Torrens_automata_based_models_of_urban_systems.pdf>. Acessado em 18/05/03.
- Torrens, P. M.; O'Sullivan, D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? editorial. **Environment and Planning B**, v. 28, p. 163-168, 2001.
- Turner, B. L. II; Meyer, B. L. Global land use and land cover change: An overview. In: Meyer, W. B.; Turner, B. L. II. Ed. **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. p. 3-10.
- United Nations. **World urbanization prospects: the 1996 revision database**. New York: United Nations Population Division, 1996.
- United Nations. **World urbanization prospects: the 1998 revision database**. New York: United Nations Population Division, 1998.
- Ward, D. P.; Murray, A. T.; Phinn, S. R. **An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions**. 1999. Disponível em <http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/025/gc_025.htm>. Acessado em 30/10/02.
- Watt, K. E. F. **Principles of environmental science**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1973.
- Wegener, M. New spatial planning models. **Emerging Directions in Urban Planning Research Seminar**. Enschede: ITC, 2000.
- Wegener, M.; Gnad, F.; Vannahme, M. The time escala of urban change. In: Hutchinson, B.; Batty, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.
- Wei, W. W. S. **Time Series Analysis**. California: Attison Wesley Publishing Co., 1990. 478 p.
- White, R.; Engelen, G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns. **Environment and Planning A**, v. 25, p. 1175-199, 1993.
- White, R.; Engelen, G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 235-246, 1997.
- White, R.; Engelen, G. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 24, p. 383-400, 2000.
- White, R.; Engelen, G.; Uljee, I. **Vulnerability assessment of low-lying coastal areas and small islands to climate change and sea level rise – Phase 2: Case study St. Lucia**. Kingston, Jamaica: United Nations Environment Programme: Caribbean Regional Co-ordinating Unit, 1998.

Wikipedia – The Free Encyclopedia. **Economies of agglomeration**. 2003. Disponível em < http://www.wikipedia.org/wiki/Economies_of_agglomeration>. Acessado em 09/08/03.

Wilson, A. G. **Entropy in urban and regional modeling**. London: Pion Press, 1970.

Wilson, A. G. **Catastrophe theory and bifurcations: applications to urban and regional systems**. Berkeley: University of California Press, 1981.

Wingo, L. **Transportation and urban land**. Washington, D. C.: Resources for the Future Inc., 1961.

Wolfram, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of modern physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.

Wolfram, S. Universality and complexity in cellular automata. **Physica**, v. 10D, p. 1-35, 1984.

Wolman, M. G. Criteria for land use. In: McLare, D. J.; Skinner, B. J. ed. **Resources and world development**. New York: John Wiley, 1987. p. 643-657.

Wu, F. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 20, n.6, p. 367-387, 1996.

Wu, F. Simland: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 1, p. 63-82, 1998.

Xia, L.; Yeh, A. G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 14, p. 131-152, 2000.

Xie, Y. A generalized model for cellular urban dynamics. **Geographical Analysis**, v. 28, n. 4, p. 350-373, 1996.

Yeh, A. G.; Li, X. A cellular automata model to simulate development density for urban planning. **Environmental and Planning B**, v. 29, p. 431-450, 2002.

Zhou, D.; Vertinsky, I. Strategic location decisions in a growing market. **Regional Science and Urban Economics**, v. 31, n. 5, p. 523-533, 2001.