

# **Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas**

Cláudia Maria de Almeida<sup>1</sup>, Antonio Miguel Vieira Monteiro<sup>2</sup>,  
Gilberto Câmara<sup>2</sup>

*06 de dezembro de 2004*

---

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), Avenida dos Astronautas, 1758 – SERE, 12227-010, São José dos Campos, São Paulo, Brazil; <sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Processamento de Imagens (DPI), Avenida dos Astronautas, 1758 – SERE II, 12227-010, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.

[almeida@ltd.inpe.br](mailto:almeida@ltd.inpe.br), [miguel@dpi.inpe.br](mailto:miguel@dpi.inpe.br), [gilberto@dpi.inpe.br](mailto:gilberto@dpi.inpe.br)}

# **Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas**

## **1. Introdução: Breve Perspectiva Histórica sobre Modelos de Mudanças do Uso do Solo Urbano**

### **1.1 Conceitos e Definições**

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). Seguindo uma abordagem de caráter ecológico-econômico, 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). 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...”. 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.

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.

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 comportamento<sup>1</sup>.

Categorizações mais detalhadas de modelos de uso do solo urbano são propostas por inúmeros outros autores. 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 SIG e modelos baseados na cadeia de Markov.

---

<sup>1</sup> 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.

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.

## **1.2 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. De acordo com este modelo, 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, onde 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).

Ainda 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. Lösch aprimorou a idéia de Christaller, concebendo em 1940 a sua teoria de regiões econômicas. Para ele, os centros podem ser classificados em grupos hierárquicos de acordo com o tipo de serviço e o tamanho do mercado (Perraton e Baxter, 1974).

Em seqüência a 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 metodológico 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 interrelacionamento entre tráfego e uso do solo permitiram a construção de modelos de uso do solo já por volta de 1960 (Batty, 1976).

Muitas são as limitações desses primeiros modelos, e críticas incisivas foram feitas aos mesmos. 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).

### **1.3 Primeiros Modelos Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano**

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 sistema<sup>2</sup> (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 subsequente (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, de 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 em 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 os desenvolvidos por Boyce em 1977, e por Coelho e Williams em 1978.

Dentre os primeiros modelos dinâmicos de ordem linear está o proposto por Czamanski, já em 1965, que aplicou um simples modelo econômico baseado no tempo à região de Baltimore. 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, em 1965, para o Projeto de Planejamento

---

<sup>2</sup> 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.

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 interrelacionamentos 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.

O Modelo Metropolitano Baseado no Tempo (“Time-Oriented Metropolitan Model” - TOMM), desenvolvido por Crecine em 1964 para o Programa de Renovação da Comunidade de Pittsburgh, procurava tornar um simples modelo estático baseado no modelo original de Pittsburgh, criado por Lowry, 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.

Da mesma forma que nos exemplos 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 dinâmicas 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. 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 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, estes modelos permaneceram fundamentalmente não-espaciais, especialmente no sentido de que seus resultados não podiam ser visualizados espacialmente.

#### **1.4 Autômatos Celulares e o Advento de Modelos Dinâmicos Espaciais de Mudanças do Uso do Solo Urbano**

De acordo com o exposto anteriormente, 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'). 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. 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.

CA estiveram de alguma forma implícitos na primeira geração de modelos computacionais nos anos 60 com os experimentos de Chapin e Weiss (1968) executados para a Carolina do Norte, dentre outros. Nos anos 70, Tobler, 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 macroescala espaciais. Um exemplo ilustrativo deste último caso 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 interregionais, 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, que serão novamente utilizadas para computar a demanda residencial. Este modelo destina-se a estimar a demanda para diferentes 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 1).

Progressos teóricos no vasto campo de inteligência artificial (“artificial intelligence” - AI), tais como sistemas especialistas, redes neurais artificiais e computação evolucionária, que se ancora no conceito de algoritmos genéticos, foram recentemente incluídos no escopo de simulações em CA. Conforme exposto por Almeida et al. (2003), métodos recém-incorporados em modelos de CA, como ferramentas de ajuste de padrões por redes neurais (Yeh e Li, 2001) e aprendizagem evolucionária (Papini et al., 1998) têm se revelado como os mais promissores para a próxima geração de modelos urbanos de CA.

## **2. Aplicação a um Caso Prático: Simulação e Prognóstico de Mudanças do Uso do Solo Urbano em Bauru – SP, através de Modelagem por Autômatos Celulares (CA)**

### **2.1 Área de Estudo**

Bauru é considerada como o maior ponto de entrocamento 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 XIX. Quatro rodovias interregionais 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.

Por apresentar uma estrutura urbana altamente diversificada, pode-se inferir que a cidade vivenciou processos urbanizatórios acentuadamente rápidos. Bauru juntamente com a maior parte das cidades do oeste paulista foram as 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 2), vazios urbanos dispersos em meio à aglomeração principal como resultado de ações especulativas, e loteamentos periféricos de baixa renda. Este boom urbanizatório é relatado no seu último plano diretor, de 1996, 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.

Segundo a Fundação Seade (1992), 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, caracterizando-se esta cidade como pólo de desenvolvimento regional eminentemente terciário.

## **2.2 Modelagem para Simulação de Mudanças do Uso do Solo: 1967-2000**

Ao se trabalhar com modelagem de transições de uso do solo urbano visando à geração de prognósticos, é necessário, a princípio, o conhecimento aprofundado dos condicionantes ou “variáveis direcionadoras” de mudanças de uso no decorrer de uma série multitemporal suficientemente longa. Essas variáveis concernem aspectos de infra-estrutura e sócio-econômicos da cidade em análise. Para Bauru, o período de modelagem para simulação estendeu-se de 1967 a 2000, compreendendo trinta e três anos, nos quais a população urbana da cidade sofreu um incremento de aproximadamente 500%, passando de 61.592 para 310.442 habitantes. O entendimento adquirido acerca das variáveis e padrões espaciais de mudanças de uso deve, portanto, embasar a parametrização dos modelos de prognóstico, que constituem o objetivo último desta categoria de modelagem.

### **2.2.1 Análise Exploratória e Seleção de Variáveis**

A análise exploratória consiste em uma etapa inicial da modelagem, onde uma série de procedimentos é executada visando a avaliar a característica das variáveis direcionadoras, de modo a permitir a escolha do menor e, ao mesmo tempo, melhor conjunto de variáveis para explicar um determinado tipo de transição (p. ex. de uso não-urbano para uso residencial). A análise exploratória bem como todas as demais etapas do processo de modelagem são executadas por períodos de simulação consecutivos. No caso de Bauru, esses períodos foram delimitados de acordo com a existência de mapas oficiais de uso do solo para a cidade. Como esses mapas foram lançados apenas em 1967, 1979, 1988 e 2000, a modelagem baseou-se em três períodos de simulação: 1967-1979; 1979-1988 e 1988-2000.

A princípio, a escolha de variáveis baseou-se em um procedimento heurístico, onde mapas de variáveis foram sobrepostos ao mapa de uso de solo final do período em questão (FIGURA 3), de modo a identificar as variáveis que de fato contribuíam para explicar determinados tipos de mudanças de uso do solo. Além disso, para se evitar a redundância nos dados de entrada, isto é, selecionarem-se variáveis com elevado grau de associação ou dependência espacial, as variáveis foram submetidas a testes estatísticos, como o Cramer's e o Índice de Incerteza de Informação Conjunta ("Joint Information Uncertainty"), cujo limiar de corte foi fixado em 0,5 (Bonham-Carter, 1994). Quando este limiar for ultrapassado, uma das variáveis da dupla submetida ao teste tem que ser descartada. Em geral, exclui-se aquela que menos contribui para explicar a transição considerada.

## 2.2.2 Parametrização do Modelo

Modelos de simulação de mudanças de uso do solo urbano são, via de regra, construídos com base em métodos empíricos. No estudo de caso aqui apresentado, adotou-se o método de "pesos de evidência", que é baseado no Teorema de Bayes ou Teorema da Probabilidade Condicional, que consiste em razões entre áreas de ocorrência de determinadas variáveis em relação a áreas de existência dos fenômenos estudados (transições de uso do solo). Assim, para cada célula da área de estudo, a probabilidade de ocorrência de uma determinada transição face à ocorrência prévia de determinadas variáveis é dada por:

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

onde  $P_{x,y}$  corresponde à probabilidade de uma célula de coordenadas  $x,y$  para sofrer uma transição de uso do solo qualquer  $R$  (p. ex. de não-urbano para residencial);  $S_{1-n}$  corresponde a  $n$  variáveis direcionadoras (ou evidências);  $O \{R\}$  refere-se a *odds* de  $R$ , que é a razão entre a probabilidade de ocorrência de  $R$  ( $P\{R\}$ ) e a probabilidade complementar

$(P\{\bar{R}\})$ ; e  $W^+$  diz respeito ao peso positivo de evidência, que é fornecido pelo método estatístico de pesos de evidência (Bonham-Carter, 1994), e indica a atração, ou correlação positiva, entre determinada evidência e uma dada transição de uso do solo.

### **2.2.3 Calibração do Modelo**

Da mesma forma que para a análise exploratória, procedimentos heurísticos foram empregados para o ajuste ou calibração do modelo. Análises visuais comparativas foram executadas, para cada tipo de mudança de uso do solo, considerando-se resultados preliminares de simulação, mapas de transição do uso e de probabilidades de transição, bem como a sobreposição de mapas de variáveis ao mapa real de uso do solo em formato vetorial. Estas análises objetivam separar aquelas variáveis que estão efetivamente contribuindo para explicar as respectivas transições de uso daquelas que constituem apenas ruído, e foram utilizadas tanto para a seleção das variáveis no modelo, como para a definição dos valores dos parâmetros internos do programa de simulação - DINAMICA<sup>3</sup>.

### **2.2.4 Simulação e Resultados**

Diversas simulações foram executadas no DINAMICA, e os melhores resultados para cada período de simulação são apresentados na FIGURA 4. Com base no processo de calibração, constata-se que o surgimento de novas áreas residenciais depende da existência prévia deste tipo de loteamentos nas adjacências, uma vez que isto implica a possibilidade de se estender rede de infra-estrutura 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.

No caso da transição de áreas não-urbanas para uso industrial, há dois grandes condicionantes: a proximidade ao uso industrial previamente existente e a facilidade de acesso rodoviário. Isto se explica pelo fato de que no processo de produção industrial, o produto final de certas indústrias se constitui no insumo para outras, gerando a necessidade

---

<sup>3</sup> O DINAMICA é um programa de simulação de dinâmicas da paisagem baseado em autômatos celulares, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (<http://www.csr.ufmg.br>). O programa foi escrito em linguagem C++ orientada a objetos, e sua versão atual roda em sistema Windows © 32 bits .

de racionalização e otimização dos custos pela proximidade entre indústrias relacionadas em uma mesma cadeia produtiva. Ademais, terrenos no entorno de áreas industriais tendem a se desvalorizar para outros usos, tornando-se competitivos para o uso industrial.

Em relação à conversão para o uso de serviços, três grandes fatores são preponderantes: a proximidade à concentração de estabelecimentos comerciais, a proximidade à classe de uso residencial e, por fim, a localização estratégica em relação ao eixo N-S / E-O de serviços de Bauru. Neste caso, o primeiro fator representa o mercado fornecedor (e em alguns casos, também consumidor); o segundo, o mercado consumidor por excelência; e o terceiro, a facilidade de acesso para ambos mercados afeitos a serviços.

Torna-se evidente que as transições de uso encontram-se em conformidade com teorias econômicas urbanas, fundamentadas no conceito de maximização de utilidade, onde 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. É válido mencionar que o ambiente natural (solo, vegetação, relevo, áreas de conservação) não foi considerado como um determinante decisivo para mudanças de uso do solo, visto que o sítio físico de Bauru é relativamente plano, com elevações suaves, e não apresenta nenhuma condição excepcional quanto a restrições de solo, vegetação e áreas de conservação.

### **2.2.5 Validação do Modelo**

Para se avaliar o desempenho da modelagem, utilizou-se um método de ajuste por múltiplas resoluções concebido por Constanza (1989), onde, ao invés de se verificar a correspondência de uso do solo entre uma imagem real e sua respectiva simulação de modo pixel-a-pixel, empregam-se janelas de pixels de tamanhos variados, relaxando a rigidez de correspondência entre realidade e simulações. Para o primeiro período de simulação (1967-1979), o índice de ajuste variou de 0,941 a 0,944; para o segundo período (1979-1988), de 0,896 a 0,903, e finalmente para o terceiro (1988-2000), de 0,954 a 0,957.

## **2.3 Modelagem para Prognóstico de Mudanças do Uso do Solo: 2007**

Com o conhecimento adquirido através das experimentações de simulação conduzidas para uma série multitemporal longa, inicia-se o processo de modelagem de prognósticos, que se ancora sobre cenários variados. Para fins de simplificação, este estudo considera apenas três tipos de cenários: um estacionário, onde são mantidas as tendências de transição observadas no período de simulação mais recente; um otimista, que superestima essas tendências; e um pessimista, onde se subestimam as tendências do último período.

Em modelos de simulação de mudanças do uso do solo, há dois tipos de probabilidade de transição: uma global, que estima a quantidade de mudança para toda a área de estudo, sem influência das variáveis direcionadoras; e uma local, calculada para cada célula em função dessas variáveis. Na confecção dos cenários, apenas a probabilidade global é recalculada, permanecendo os valores da local. No caso de cenários estacionários, emprega-se a cadeia de Markov, que é um modelo matemático destinado a descrever um certo tipo de processo, que se move em uma seqüência de passos e através de um conjunto de estados.

Para os cenários não-estacionários, utilizaram-se modelos de regressão linear univariados, onde a área de um determinado tipo de uso em 2007 (variável dependente) é explicada a partir de um indicador demográfico ou econômico (variável independente), como população urbana ou PIB industrial municipal. A partir de super ou subestimações desses indicadores, estimaram-se as probabilidades de transição para os cenários otimista e pessimista, respectivamente. Os resultados dos diferentes cenários de modelagem para prognóstico referentes ao ano de 2007 estão indicados na FIGURA 5.

Cabe salientar que os cenários apontam tanto para a continuidade de nucleação de loteamentos residenciais periféricos, que encarecem a extensão da rede de infra-estrutura por subutilização da mesma, como para o avanço da mancha urbana em direção a sudoeste, onde se encontra o manancial de abastecimento da cidade. Dessa forma, as atuais ações e políticas públicas urbanas devem, desde já, contemplar instrumentos eficazes para a contenção dessas modalidades de expansão urbana.

### **3. Considerações Finais e Perspectivas Futuras**

#### **3.1 Vantagens e Potencialidades dos Modelos Urbanos Baseados em Autômatos Celulares (CA)**

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.

Embora modelos urbanos dinâmicos 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 os envolvidos em modelagem urbana, promovendo 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.”

### **3.2 Aplicabilidade de Modelos Dinâmicos Espaciais em Estudos de Mudanças do Uso do Solo Urbano**

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.

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, 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 a curto e médio prazo.

E como palavras finais, Batty (1976) expõe 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 da 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

- ALMEIDA, C. M. et al. “Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation”. *Computers, Environment and Urban Systems*, New York, v. 27, n. 5, p. 481-509, Sept. 2003.
- BATTY, M. *Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1976.

- BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. "Urban systems as cellular automata". *Environment and Planning B*, v.24, n.2, p.159-164, March 1997.
- BONHAM-CARTER, G. F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. New York: Pergamon, 1994.
- BRIASSOULIS, H. *Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches*. Tese (Doutorado). University of Aegean, Lesvos, Grécia, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acessado em 28/10/02.
- CHADWICK, G. *Una vision sistematica del planeamiento*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1973.
- CHAPIN Jr., F. S.; WEISS, S. F. "A probabilistic model for residential growth". *Transportation Research*, v.2, p.375-390, 1968.
- CONSTANZA, R. "Model goodness of fit: a multiple resolution procedure". *Ecological Modelling*, v.47, p.199-215, Sept. 1989.
- ECHENIQUE, M. *Models: a discussion*. Cambridge, UK: University of Cambridge, 1968. (Land Use and Built Form Studies, WP 6).
- FAO/IIASA. *Agro-ecological assessments for national planning: the example of Kenya*. Rome: FAO, 1993. (FAO Soils Bul, n. 67).
- FUNDAÇÃO SEADE. *São Paulo no limiar do século XXI - Cenários da urbanização paulista*. São Paulo: Fundação Seade, 1992. v. 5.
- HOOVER, E. M.; GIARRATANI, F. *An introduction to regional economics*. New York: Alfred K., 1984.
- MERLIN, P. *Méthodes quantitatives et espace urbain*. Paris: Masson et Cie Éditeurs, 1973.
- NOVAES, A. G. *Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.
- PAPINI, L. et al. "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*. 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.
- TOBLER, W. "Cellular geography". In: GALE, S.; OLSSON, G. (Ed.). *Philosophy in geography*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1979. p 379-386.
- 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.
- WEGENER, M.; GNAD, F.; VANNAHME, M. "The time scale of urban change". In: HUTCHINSON, B.; BATTY, M. (Ed.). *Advances in urban systems modelling*. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.
- 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 Coordinating Unit, 1998.
- WOLFRAM, S. "Statistical mechanics of cellular automata". *Review of modern physics*, v. 55, p.601-643, 1983.
- YEH, A. G.; Li, X. "Calibration of Cellular Automata by Using Neural Networks for the Simulation of Complex Urban Systems". *Environment and Planning A*, v.33, p.1445-1462.

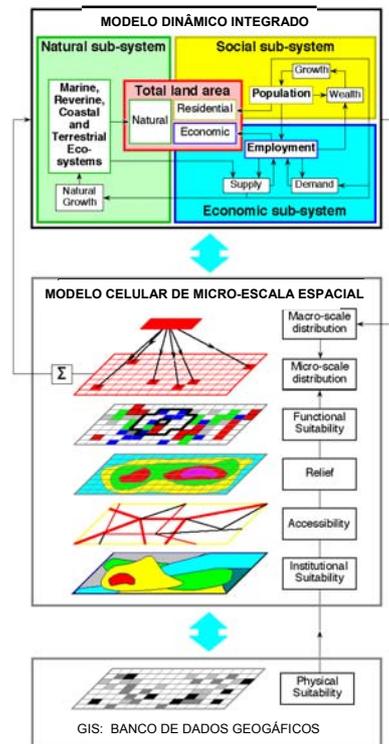


FIGURA 1 – Um modelo de CA integrando micro e macroescalas espaciais.  
 FONTE: WHITE et al. (1997, p. 237).

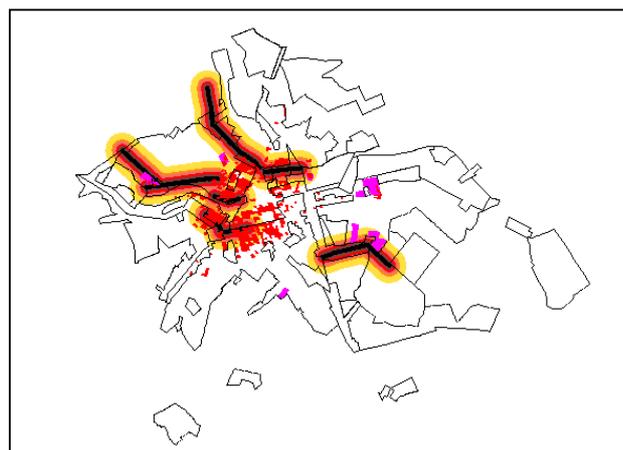
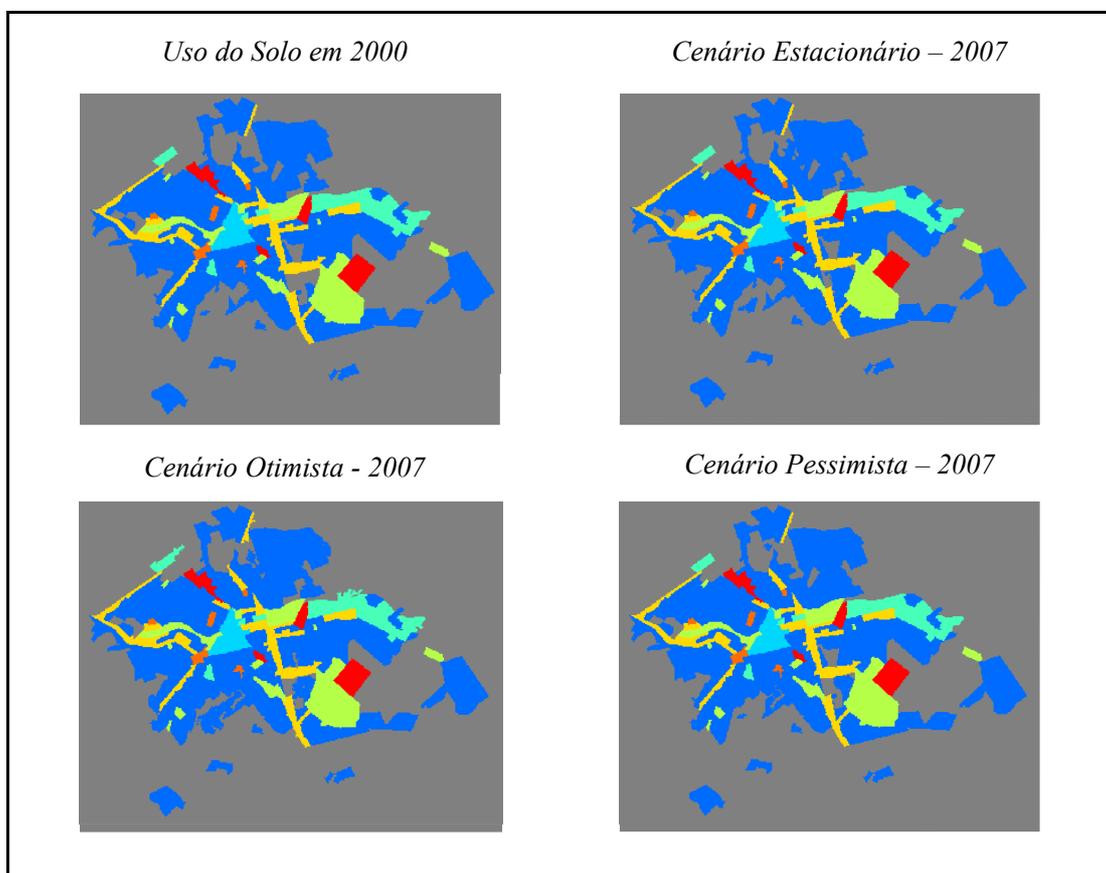


FIGURA 3 – Imagem ilustrativa mostrando a análise visual para identificação de variáveis determinantes da transição de uso residencial para uso misto em Bauru de 1979 a 1988. Os fatiamentos referem-se a distâncias a vias; os polígonos vermelhos à ocupação média-alta; e os polígonos rosa, a conjuntos de habitação popular.



FIGURA 2 – Vista aérea de Bauru com edifícios residenciais.  
 FONTE: ITE-FCEB (1998).



- |                          |                         |                            |                             |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| ■ <i>Uso não-urbano</i>  | ■ <i>Uso comercial</i>  | ■ <i>Uso institucional</i> | ■ <i>Uso misto</i>          |
| ■ <i>Uso residencial</i> | ■ <i>Uso industrial</i> | ■ <i>Uso de serviços</i>   | ■ <i>Uso de lazer/recr.</i> |

FIGURA 5 – Prognósticos estacionário, otimista e pessimista para 2007 e uso do solo em 2000 - Bauru.

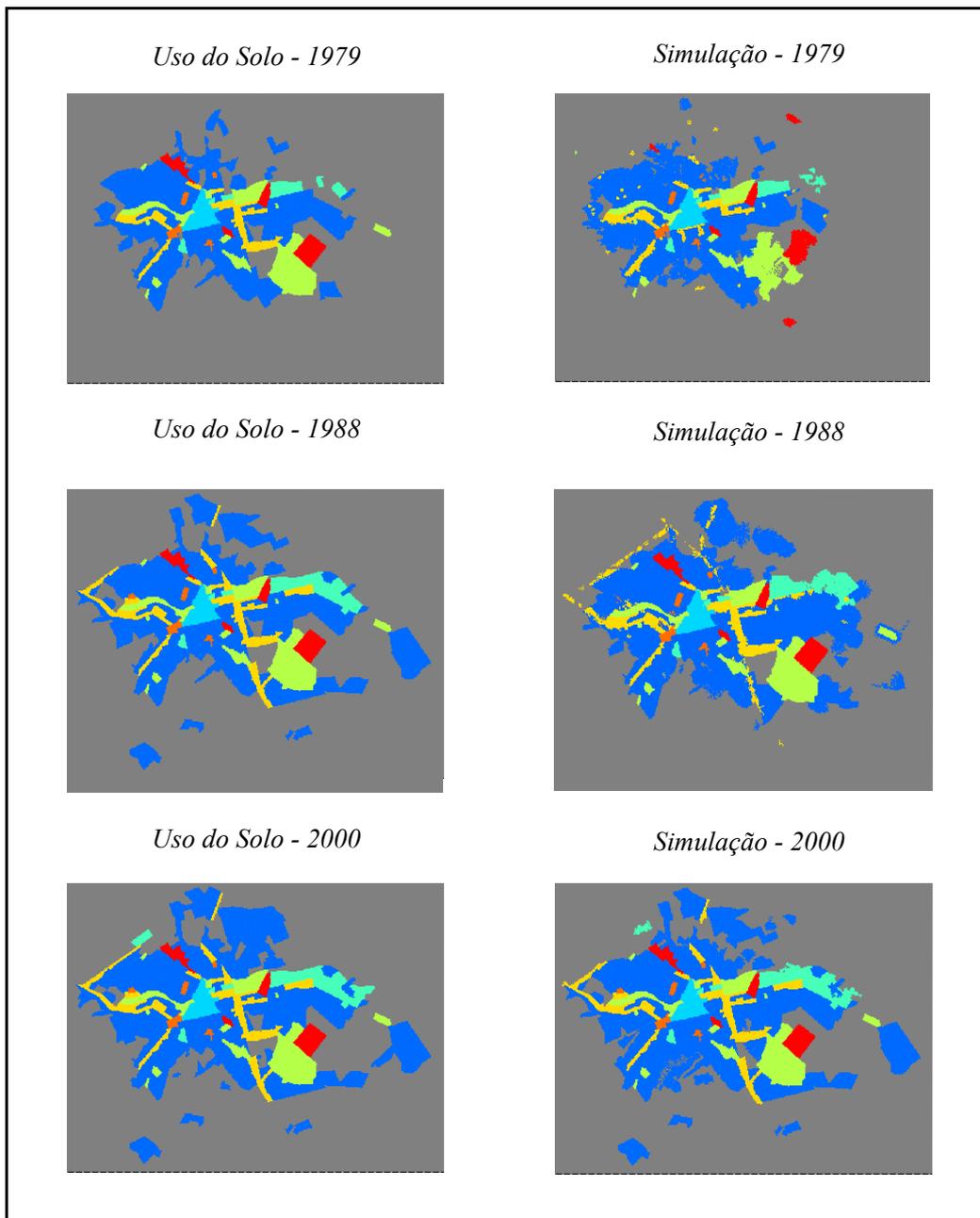


FIGURA 4 – Uso do solo real e respectivas simulações em Bauru para os anos de 1979, 1988 e 2000.