



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MODELAGEM DE DINÂMICAS ESPACIAIS COM AUTÔMATOS CELULARES

Evaldinolia Gilbertoni Moreira Pinto

Monografia de Qualificação em Computação Aplicada

INPE
São José dos Campos
2005

RESUMO

A introdução de novas ferramentas de análise espacial tem potencializado o estudo de fenômenos naturais de dimensão espaço-temporal, tais como escoamento de água da chuva, dispersão de sementes, crescimento populacional, fenômenos urbanos, entre outros. Os autômatos celulares (AC) vêm sendo utilizados com sucesso para avaliar a evolução desses fenômenos dinâmicos. Por possuir uma forte componente espacial os AC podem ser acoplados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aumentando a complexidade destes sistemas de modo a torná-los mais realistas, sendo muito utilizados no estudo de ambientes urbanos, considerados como sistemas complexos. Neste trabalho, apresentaremos as aplicações e tendências no uso da tecnologia dos autômatos celulares para modelagem da dinâmica espacial, com particular enfoque para a modelagem da dinâmica urbana.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| RESUMO | ii |
| SUMÁRIO | iii |
| LISTA DE FIGURAS | iv |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS | v |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL | 3 |
| 2.1 Modelos | 5 |
| 2.2 O Processo de Modelagem Dinâmica Espacial | 7 |
| 2.3 Autômatos Celulares na Modelagem Dinâmica de Processos Urbanos..... | 8 |
| 2.3.1 Autômatos Celulares..... | 8 |
| 2.3.2 Modelos Urbanos Computacionais | 11 |
| 2.3.2.1 Exemplos de Modelos Urbanos baseado em AC | 14 |
| 3 AMBIENTES COMPUTACIONAIS PARA MODELAGEM DA DINÂMICA URBANA..... | 19 |
| 3.1 DINAMICA..... | 19 |
| 3.2 REPAST | 21 |
| 3.3 TerraME..... | 24 |
| 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 26 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 28 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 – Generalizações para modelagem dinâmica em SIG (Couclelis 1997)..... | 4 |
| FIGURA 2.2 - Estruturas temporais (Worboys et al. 2004) | 4 |
| FIGURA 2.3 – Exemplo de AC (Câmara et al. 1996) | 9 |
| FIGURA 2.4 - Autômato de estado finito [Adaptado de (Torrens 2000)] | 10 |
| FIGURA 2.5 – Uso de AC com agentes [Adaptado de (Torrens 2003)] | 13 |
| FIGURA 2.6 - Um CA aninhado como uma composição de ambientes celulares (Carneiro et al. 2005)..... | 14 |
| FIGURA 2.7 - Pólos de atração, possibilidade de localização 1, 2, 3 e 4 (Saurim 2005) | 17 |
| FIGURA 3.1- Interface Gráfica do software DINAMICA (Soares Filho et al. 2003) | 19 |
| FIGURA 3.2 – Arquitetura do software DINAMICA (Godoy 2004)..... | 20 |
| FIGURA 3.3 – Modelo de dados genérico do DINAMICA para aplicações urbanas (Almeida 2003)..... | 21 |
| FIGURA 3.4 – <i>Screenshot</i> do Modelo de Periferização [Adaptado de (Barros 2004b)] | 23 |
| FIGURA 3.5 – Arquitetura do software TerraME (CARNEIRO et al. 2004b)..... | 24 |
| FIGURA 3.6 – Exemplo de ambientes em TerraME | 25 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| AC | - Autômatos Celulares |
| CSR | - Centro de Sensoriamento Remoto |
| DOS | - <i>Disk Operating System</i> |
| GEOMA | - Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental da Amazônia |
| GPM | - <i>Generalized Proximity Matrix</i> |
| GUI | - <i>Graphical User Interface</i> |
| INPE | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| LUA | - <i>The Programming Language Lua</i> |
| LUCC | - <i>Land Use and Cover Change</i> |
| REPAST | - <i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i> |
| SACI | - Simulador do Ambiente de Cidade |
| SIG | - Sistemas de Informações Geográficas |
| SLEUTH | - <i>Slope, Land-use, Exclusion, Urban, Transportation, and Hillshade</i> |
| UFMG | - Universidade Federal de Minas Gerais |
| UFSM | - Universidade Federal de Santa Maria |
| ULBRA | - Universidade Luterana do Brasil |

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos fenômenos geográficos naturais e humanos que se deseja representar no computador tem dimensões espaciais e temporais. Exemplos são: escoamento de água da chuva, planejamento urbano, dispersão de sementes, e crescimento populacional. A representação destes fenômenos na forma de modelos espaciais dinâmicos é uma área de pesquisa emergente em Geoinformação. Para simular este conjunto de fenômenos, é necessário desenvolver técnicas e abstrações que possam tratar apropriadamente suas componentes espacial e temporal (Pedrosa et al. 2002).

A modelagem dinâmica busca transformar as atuais tecnologias de Geoinformação, essencialmente estáticas, em ferramentas capazes de representar processos de dimensões espaço-temporais. “Um ambiente de modelagem dinâmica deve ser capaz de capturar ações à distância e abstrair os componentes discretos e contínuos de um sistema dinâmico. Os componentes discretos são os atributos das células, que sofrem mudanças igualmente discretas em virtude do seu espaço de estados finito; enquanto que os componentes contínuos de um modelo dinâmico são variáveis reais, que são atualizadas a partir de equacionamentos matemáticos” (Pedrosa et al. 2002).

Um dos métodos mais utilizados para modelagem dinâmica de dados espaço-temporais são os autômatos celulares. Autômatos celulares (AC) são ferramentas computacionais espacialmente explícitas, que podem ser utilizadas na modelagem de sistemas preditivos ou de exploração espacial. São capazes de reproduzir a evolução temporal de sistemas, a exemplo de processos de reação-difusão. São particularmente atraentes por dar origem a padrões globais a partir de uma ação local (Batty et al. 1997a). Segundo Couclelis, pode-se considerar os AC como uma metáfora do crescimento urbano (Couclelis 1997). Modelos baseados em AC possuem aplicações nas mais diversas áreas, desde a física teórica e experimental, engenharia, controle de tráfego, disseminação de epidemias e biologia comportamental, dentre

outras (Almeida et al. 2003a). Torrens e O`Sullivan (2001) sugerem temas de pesquisa em Geoinformação com o uso de AC, como: exploração da complexidade espacial; avanços teóricos referentes à dinâmica urbana; aplicação para fins educacionais; desenvolvimento de modelos híbridos e técnicas para validação de modelos especificamente urbanos.

Podemos citar alguns trabalhos recentes de pesquisadores brasileiros que usam AC para modelagem dinâmica: (i) o modelo de simulação espacial DINAMICA aplicado a modelos ambientais (Soares-Filho et al. 2002) e a modelagem urbana (Almeida et al. 2003b; Godoy 2004); (ii) o modelo celular de Barros (2004a, 2004b), dito modelo de periferização, que visa proporcionar um maior entendimento do crescimento das cidades da América Latina, bem como auxiliar as políticas públicas urbanas; (iii) o modelo TerraME que usa uma organização multi-escala, chamada de "autômatos aninhados" (Carneiro et al. 2004a). Para atender estes diversos tipos de aplicações, os AC sofreram modificações e novos componentes e funcionalidades foram introduzidas ao AC convencional.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar aplicações e tendências no uso da tecnologia dos AC para modelagem espacial, com particular enfoque para a modelagem da dinâmica urbana. O Capítulo 2 aborda a modelagem dinâmica de forma geral. O Capítulo 3 apresenta alguns ambientes de modelagem dinâmica de áreas urbanas. Considerações finais referentes ao estudo serão expostas no Capítulo 4.

2 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL

A modelagem dinâmica busca transformar as atuais tecnologias de Geoinformação, essencialmente estáticas, em ferramentas capazes de representar processos do tipo espaço-temporais. Na definição de Burrough, “um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real, em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadoras” (Burrough 1998). Esses sistemas têm sido implementados através de modelos celulares, freqüentemente embutidos em estruturas computacionais baseadas em autômatos celulares.

Os primeiros estudos de modelagem dinâmica utilizaram organizações espaciais regulares e hipóteses de homogeneidade e uniformidade, mas, para modelar processos dinâmicos com níveis de realismo é necessário dispor de modelos flexíveis de organização e propriedades do espaço geográfico (Pedrosa e Câmara, 2002). É preciso abrir mão de hipóteses convenientes, como homogeneidade e uniformidade do espaço geográfico. Para Couclelis (1997), é preciso modelar o espaço de forma heterogênea, tanto em termos de suas propriedades, quanto de sua estrutura. Segundo ela, os conceitos de vizinhanças precisam ser variáveis no espaço; as funções de transição podem ser diferentes para diferentes localidades; a representação do tempo deve prever intervalos variáveis; e o sistema deve ser aberto para comportar influências externas. A Figura 2.1 exibe algumas generalidades dos AC para modelagem dinâmica em Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

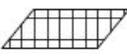
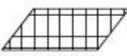
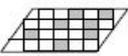
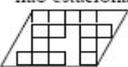
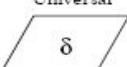
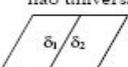
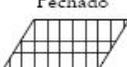
| | | | |
|---------------------|--------------|--|--|
| Espaço | Estrutura | Regular  | irregular  |
| | Propriedades | Uniforme  | não uniforme  |
| Vizinhança | | Estacionária  | não estacionária  |
| Função de Transição | | Universal δ  | não universal δ_1, δ_2  |
| Tempo | | Regularidade -----> | irregularidade -----> |
| Sistema | | Fechado  | aberto  |

FIGURA 2.1 – Generalizações para modelagem dinâmica em SIG (Couclelis 1997)

Um outro importante elemento para representações em SIG é o tempo. O tempo pode ser representado através de diferentes estruturas, definidas, principalmente, com base em três aspectos: ordem, variação e granularidade (Figura 2.2). Associada ao conceito de variação temporal discreta, existe o conceito de *chronons*, a menor duração de tempo suportada por um sistema, podendo variar em diferentes aplicações (Edelweiss et al. 1994).

| Ordem no tempo | | Varição Temporal | Granularidade |
|----------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| linear | → | discreto → → → | instante ● |
| ramificado | → ↗ ↘ | contínuo → | intervalo → |
| cíclico | → ↙ ← ↘ → | | período → → → |

FIGURA 2.2 - Estruturas temporais (Worboys et al. 2004)

A granularidade temporal de um sistema está diretamente relacionada com a duração de um *chronon*. As diferentes granularidades de um sistema

temporal conduzem à definição de instante e intervalo de tempo. Em relação à variação temporal, existem duas possibilidades: a contínua, usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão; e a discreta usada quando o tempo é medido em certos pontos ou intervalos, podendo a variação ser descontínua entre estes pontos. Já a ordem temporal refere-se à forma como o tempo flui (Pedrosa et al. 2002).

2.1 Modelos

Um modelo é uma representação simplificada e abstrata de um fenômeno ou situação concreta, baseado em uma descrição formal de objetos, relações e processos, que permite com a variação de seus parâmetros, simular os efeitos de alterações em tal fenômeno (Ferreira 2004). Os modelos são tipologizados de várias formas, em função das próprias ideologias inerentes a cada autor, área de conhecimento, ou ainda, segundo objetivos específicos. Isto significa que, considerando-se forma e expressão, os modelos podem ser agrupados ou classificados em uma série interminável de tipos (Sayão 2001). Neste trabalho, adotamos a tipologia de (Briassoulis 2000) que considera que os modelos podem ser agrupados em duas categorias principais, considerando a existência ou a ausência de uma teoria formal: modelos teóricos e modelos empíricos.

Os modelos teóricos são aqueles cujas equações que definem o comportamento do fenômeno são estabelecidas "a priori", com base em alguma teoria (Almeida 2003). Geralmente, são construídos para servir como ferramentas explanatórias e, desta maneira, os resultados gerados são, com freqüência, generalizáveis para uma vasta gama de aplicações. Os modelos empíricos ajustam-se a dados descritivos coletados sobre o fenômeno, para esboçar conclusões "a posteriori", por isso, tais conclusões são usualmente específicas para o caso em estudo (Almeida 2003). Eles não se preocupam em explicar o fenômeno ou a sua causa, baseiam-se principalmente na inferência, a partir dos dados, das leis que regem o fenômeno (Carneiro 2003). Esses modelos costumam supor que os processos de mudança são estacionários,

enquanto que os modelos teóricos podem ser desenvolvidos para lidar com fenômenos não estacionários. Alguns modelos são ditos híbridos, por utilizarem ambas as abordagens (Almeida 2003). Os modelos empíricos mais conhecidos são as cadeias de Markov, os modelos logísticos de difusão e os modelos de regressão.

Para Wegener, um modelo pode ser definido como: espacial e espaço-temporal. É dito espacial quando o objeto de investigação do modelo é bidimensional (espaço, atributo) e espaço-temporal quando o objeto de investigação é tridimensional (espaço, tempo, atributo) (Wegener 2001). Ainda segundo Wegener, um modelo pode ser classificado segundo suas características como estático e dinâmico. No modelo estático, todas as variáveis de estado têm sempre o mesmo rótulo, isto é, somente um ponto no tempo é considerado, e são usualmente associados com a noção de estado constante ou de equilíbrio. Um modelo é dinâmico quando possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo e se os seus estados dependem de estados anteriores.

Os modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo. Para Lambin, o modelo espacial dinâmico de um fenômeno deve responder às seguintes questões (Lambin 1994):

- Quais variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno, e quais são os processos ecológicos e sócio-econômicos existentes por trás do fenômeno?
- Como o processo evolui?
- Onde ocorrem os fenômenos?

Pode-se identificar que um modelo deve responder às seguintes questões clássicas "Por quê", "Quando" e "Onde". Um modelo que responde a estas questões é capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial (Pedrosa 2003).

2.2 O Processo de Modelagem da Dinâmica Espacial

O processo de modelagem de fenômenos espaciais envolve as fases de construção da base de dados, construção do modelo, parametrização do modelo e calibração, verificação e validação do modelo (Carneiro 2003).

- **Construção da base de dados:** esta etapa implica na aquisição e conversão de uma série temporal de dados espaciais para o estabelecimento de uma base de dados. Estes dados permitem validar o modelo e explicar o processo de mudança que devem ser armazenados em escalas e formatos adequados.
- **Construção do Modelo:** é nesta etapa que as abordagens teórica e metodológica que influenciarão o modelo são selecionadas e utilizadas na definição das entidades que participarão do modelo e das regras que regem a sua dinâmica.
- **Parametrização do Modelo:** consiste, essencialmente, (i) na definição do estado inicial para a execução do modelo, que é determinado pela escolha do tempo "t", a partir do qual seus estados deverão evoluir; (ii) na definição da resolução espacial a ser utilizada (ou de várias resoluções), e (iii) na extensão da área de estudo a ser considerada (ou das várias extensões).
- **Calibração, Verificação e Validação do Modelo:** nesta fase, devem ser determinadas as variáveis que realmente possuem uma relação causa/efeito com o processo de mudança. Por exemplo, determinar se as variáveis disponibilidade de água e proximidade a estradas realmente explicam o processo de mudança do uso do solo. Após a escolha das variáveis relevantes, o modelo precisa ser calibrado através do seu ajuste aos dados disponíveis sobre a realidade. O modelo também precisa ser verificado para assegurar que sua programação e seu funcionamento estão corretos. Também é necessário que o modelo

seja submetido a uma validação estrutural e uma validação do seu resultado. Isto é, uma verificação de quão perfeitamente o modelo implementado em software representa o modelo conceitual e uma verificação da qualidade com que o resultado do modelo caracteriza o sistema em estudo.

- **Execução e Visualização do Modelo e Análise de Relatórios:** nesta fase, os modelos dos processos são colocados em execução sobre o espaço de células de maneira iterativa, gerando relatórios e dados espaço-temporais que registram a dinâmica do modelo para uma posterior análise.
- **Projeção de Cenários:** nesta etapa, são construídos cenários que permitem ao modelador verificar o impacto de algumas hipóteses por ele formuladas sobre o fenômeno modelado. Nos autômatos celulares, estas hipóteses são representadas na forma de restrições, isto é, regras definidas sobre os estados das células que têm o poder de impedir ou forçar uma determinada regra de transição.

O processo de modelagem não precisa envolver todas as fases descritas acima e tampouco possui uma seqüência preestabelecida para isto, podendo algumas fases ser realizada de forma concorrente (Carneiro 2003).

2.3 Autômatos Celulares na Modelagem Dinâmica de Processos Urbanos

2.3.1 Autômatos Celulares

A teoria de autômatos celulares foi introduzida inicialmente por John von Neumann, tendo o conceito se popularizado três décadas mais tarde com o trabalho "The Game of Life" de John Horton Conway (Câmara et al. 1996). Neste jogo, o espaço celular é composto de uma grade quadrada regular bidimensional, onde a vizinhança das células consiste de seus oito vizinhos imediatos. O próximo estado da célula é função do seu estado e dos estados

anteriores de sua vizinhança. De forma mais geral, um autômato celular pode ser definido como um sistema dinâmico determinístico, que consiste de um campo matricial, onde cada célula assume valores discretos. A vizinhança é definida como sendo a própria célula e suas células adjacentes. Em AC, padrões globais complexos emergem da aplicação de regras locais (Batty et al. 1997a).

Um exemplo de AC bidimensional é apresentado na Figura 2.3. Cada célula tem dois estados (branco e preto), e a vizinhança local das células é definida por duas células adjacentes. As regras de transição especificam o estado de uma célula no tempo $t + \Delta t$, que é igual ao estado dos seus vizinhos no tempo t , se seus vizinhos têm o mesmo estado; caso contrário, o seu estado permanece o mesmo.

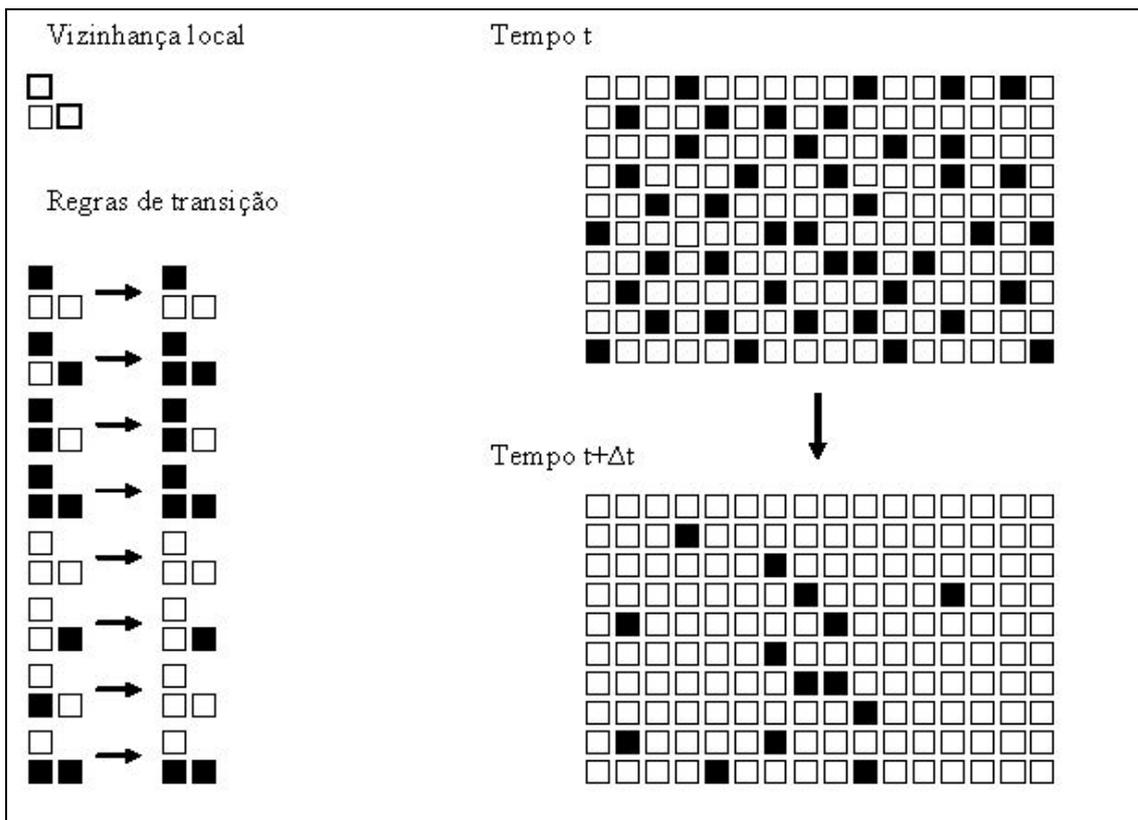


FIGURA 2.3 – Exemplo de AC (Câmara et al. 1996)

Para Batty, "autômatos celulares são objetos existentes no tempo e espaço, cujas características (estados) alteram-se discretamente e uniformemente em função

dos estados dos objetos de sua vizinhança imediata". Ainda segundo Batty, os AC possuem 4 princípios: (Batty 2000)

- Células são objetos em um espaço dimensional qualquer, mas manifestando alguma adjacência ou proximidade com outro, se eles estão relacionados de maneira local prescrita por um modelo;
- Cada célula pode escolher um só estado por vez, de um conjunto de estados que definem os atributos do sistema;
- O estado de qualquer célula depende dos estados e configurações de outras células em sua vizinhança, sendo esta o conjunto de células imediatamente adjacente ou que está "próximo" à célula em questão, onde "próximo" é definido de alguma maneira precisa;
- As regras de transição direcionam alterações de estado em cada célula, como uma função do que existe ou está ocorrendo na vizinhança da célula.

O espaço celular pode ter várias formas de vizinhanças, como pode ser observada na Figura 2.5 a vizinhança de Moore, com suas 8 células adjacentes e a vizinhança de von Neumann, com 4 células adjacente.

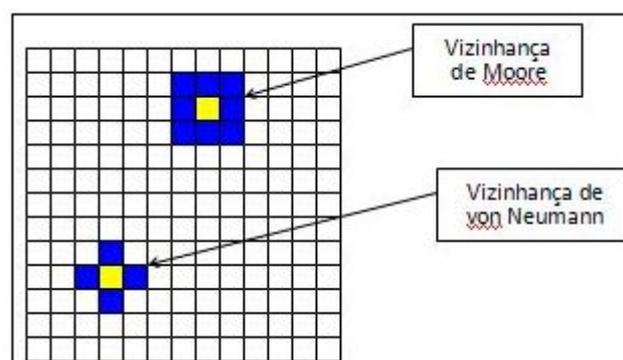


FIGURA 2.4 - Autômato de estado finito [Adaptado de (Torrens 2000)]

2.3.2 Modelos Urbanos Computacionais

Vários modelos computacionais, tais como autômatos celulares e arquiteturas baseadas em agente, têm sido usados para o desenvolvimento e avaliação de modelos dinâmicos urbanos e de paisagem, como será descrito a seguir.

De acordo com Batty (2000), os autômatos celulares foram inicialmente utilizados para modelagem computacional no início dos anos 60 de forma implícita, por Chapin na Carolina do Norte (1968) para modelar processos de uso da terra, utilizando modelos celulares, nos quais mudanças de estado eram previstas em função de uma variedade de fatores intervenientes em cada célula. De igual forma, AC estiveram implicitamente presentes nas simulações celulares propostas por Lathrop e Hamburg (1965) para o desenvolvimento do oeste do Estado de Nova York. Nos anos 70, Waldo Tobler propôs modelos celulares para simular o desenvolvimento de Detroit, começando a explorar formalmente a maneira na qual os autômatos celulares poderiam ser aplicados a sistemas geográficos (Batty 2000). Nos anos 80, Couclelis, influenciada por Tobler, começa a explorar os AC na dinâmica espacial de forma pedagógica, demonstrando como padrões globais emergem de ações locais, e propõe extensões aos AC, para que estes possam ser aplicados a sistemas geográficos reais (ver Capítulo 2).

Nos anos 90, os modelos urbanos baseados em AC, passaram a incorporar dimensões ambientais, sócio-econômicas e políticas, com articulação analítica de fatores de micro e macro-escala espaciais (Phipps et al. 1997; White et al. 1997a; White et al. 1997b). Ressalta-se também as seguintes aplicações urbanas de AC: intra-migração e segregação social (Portugali et al. 1997), otimização de localização comercial (Benati 1997), expansão do sistema viário (Batty et al. 1997b), crescimento urbano (Clarke et al. 1997) etc.

Adaptação e experimentação com AC em modelagem urbana estão sendo produtivas e inovadoras. As dimensões e estrutura das árvores de AC e a faixa dos estados das células têm sido ampliados. A vizinhança tem sofrido variações consideráveis para acomodar a ação de distância para além dos

limites da abordagem estacionária. Assim, as tradicionais vizinhanças de Moore e von Neumann do AC convencional passam a ceder lugar a matriz genérica de proximidade (GPM¹ - *Generalized Proximity Matrix*) (O'Sullivan 2001; Aguiar et al. 2003) e as regras de transição foram generalizadas para incluir restrições econômicas e demográficas na modelagem de mudança de cobertura do solo (White et al. 1997b). Ainda quanto a regras de transição, combinações de expansões por células-semente, possibilitam a incorporação de processos de difusão (Soares-Filho et al. 2002). As modificações têm sido extensas, às vezes chegando a ter pouca semelhança com o modelo de AC convencional, o que leva alguns autores a questionarem se os atuais AC para modelagem urbana constituem-se em um AC propriamente dito ou se estes modelos são simplesmente modelos celulares de sistemas urbanos (Torrens et al. 2001) (Barros 2004a).

Segundo Carneiro et al (2005), todas essas extensões aos AC compartilham de uma limitação: a aplicação de um único conjunto de regras, sendo que o processo de decisão humana envolve respostas locais diferenciadas para os desafios globais. Para suprir essa limitação, isto é, capturar respostas diferentes, alguns pesquisadores propuseram o uso de modelos baseados em agentes² para a modelagem de paisagem e dinâmica urbana (Parker et al. 2002). Modelos baseados em agentes permitem conjuntos de regras diferentes (cada regra representa um tipo diferente de agente) para simular o comportamento do sistema. Foram usados modelos baseados em agente para compreensão da escala local dos processos de mudança do uso da terra em Altamira, Pará, o Brasil (Lim et al. 2002); para o entendimento do crescimento das cidades da América Latina (Barros, 2004a, 2004b); e para modelagem da participação de cobertura da terra nas montanhas do norte do Vietnã

¹ É uma extensão da matriz de pesos de espaço, onde os pesos são computados levando em consideração as relações espaciais absolutas (como distância Euclidiana ou adjacência) e as relações espaciais relativas (como conexão de rede).

² "Chama-se agente uma entidade real ou abstrata que é capaz de agir sobre ela mesma e sobre seu ambiente, que dispõe de uma representação parcial deste ambiente, que, em um universo multiagente, pode comunicar-se com outros agentes, e cujo comportamento é consequência de suas observações, de seu conhecimento e das interações com outros agentes." (Bittencourt 2001)

(Casttela et al. 2005). A Figura 2.5 ilustra de forma simplificada o uso de AC com agentes.

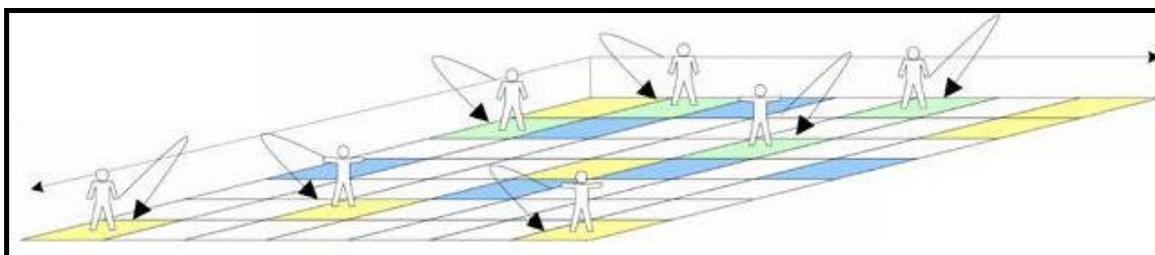


FIGURA 2.5 – Uso de AC com agentes [Adaptado de (Torrens 2003)]

Os atuais modelos baseados em agentes ainda não suprem um aspecto crucial da dinâmica humana e de paisagem, que são as mudanças dependentes de escalas. Isto é, olhando-se para uma paisagem ou uma cidade em escalas diferentes, fenômenos diferentes serão revelados. As relações de causa e efeito que controlam a dinâmica de paisagem em uma escala menor serão diferentes daqueles atuantes em uma escala maior (Kok et al. 2001). Além disso, os modelos baseados em agentes que usam uma única escala não podem representar o comportamento de dependência de escala. Para superar esta limitação, propôs-se o uso de AC multi-escala (Wolfram 1986), ou então, a extensão do AC em camadas (Straatman et al. 2001). Uma arquitetura de AC estendida em camadas permite a combinação de modelos que operam em resoluções de espaço diferentes. Um exemplo dado por Straatman et al (2001), incorpora um modelo ecológico detalhado dentro de um modelo de bacia hidrográfica muito maior. Porém, o modelo de AC estendido em camadas requer uma decisão sobre a estratificação de espaço, onde cada célula é dependente de uma célula-pai que por sua vez controla várias células-filhas. Este arranjo restringe a generalidade do sistema, já que os processos diferentes são restringidos para se ajustar à estrutura de espaço hierárquico. Em um AC estendido em camadas, "a estrutura de espaço vem antes dos processos de espaço" (Carneiro et al. 2005). Para superar as limitações de modelos baseados em agente e dos AC estendidos em camadas, Carneiro (2005) propôs um novo tipo de AC: autômatos celulares aninhados (*Nested Cellular Automata*). A idéia de um AC aninhado é permitir embutir espaços

celulares em outros espaços celulares. As construções de AC em blocos aninhados são chamadas de ambientes celulares (ou ambientes). Um ambiente está composto de um espaço celular e de uma ou mais máquinas de estados que operam neste espaço. Os ambientes podem ser aninhados, como mostrado na Figura 2.6.

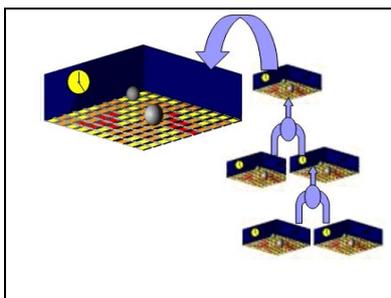


FIGURA 2.6 - Um CA aninhado como uma composição de ambientes celulares (Carneiro et al. 2005)

O conceito de ambientes aninhados é apropriado para análise multi-escalar, pois permite associar cada processo à escala de espaço apropriada. Cada processo é representado por seu próprio conjunto de regras, associado a um ambiente cujo espaço celular tem resolução espacial adequada e um conjunto de atributos de célula. Esta flexibilidade permite que processos diferentes operem na mesma paisagem, com escala de espaço diferente. Em um AC aninhado, “processos espaciais vêm antes das estruturas espaciais” (Carneiro et al. 2005). Além disso, os processos podem se comunicar por meio de mensagem. O modelo de AC aninhado foi implementado como parte do ambiente TerraME, que será apresentado no Capítulo 3.

2.3.2.1 Exemplos de Modelos Urbanos baseado em AC

O modelo DINAMICA foi aplicado para fins urbanos por Almeida et al (2003a) e por Godoy (2004). Trata-se de um modelo de simulação de mudanças na paisagem (natural/antrópico/urbana) baseado na estimativa de transições do uso/cobertura do solo. Este modelo foi proposto por Soares-Filho et al. (2002) para modelagem de mudança de uso da terra na Amazônia. É baseado em AC com vizinhança de Moore, implementado através de algoritmos de alocação

empírica de uso do solo. Para tanto, utiliza métodos probabilísticos fundamentados na teoria de Bayes e na abordagem de “pesos de evidência” (Almeida 2003). Vários fatores sócio-econômicos e infra-estruturais podem ser combinados utilizando a abordagem de “pesos de evidência”.

Barros propõe um modelo exploratório baseado em agentes, chamado de Modelo de Periferização. Este modelo proporciona um maior entendimento do crescimento das cidades da América Latina, para auxiliar as políticas públicas destas cidades (Barros, 2004a, 2004b). Este modelo é um exemplo do que podemos chamar de modelos celulares. O Modelo de Periferização é formado por quatro módulos:

- *Módulo de Periferização* tem como objetivo investigar a dinâmica de formação e continuidade do padrão de centro-periferia e segue uma lógica econômica. Este módulo possui as seguintes características: reproduz o processo de expulsão e expansão, simulando o processo de localização residencial de três grupos econômicos distintos: alta renda, média renda e baixa renda; assume que apesar das diferenças econômicas, todos os agentes têm as mesmas preferências locacionais, ou seja, todos querem se localizar nas melhores áreas da cidade, que nas cidades latino-americanas são as áreas de alta renda; o fenômeno de periferização é estudado independentemente da escala espacial e então, o tamanho da célula pode não corresponder à escala de um único lote; a paisagem é representada por uma grade de células vazias, excluindo as sementes iniciais, que estão ocupadas por agentes de alta-renda. Os agentes são representados por cores: alta-renda por vermelho, média-renda por amarelo, e baixa-renda pela cor azul. Todos os agentes têm as mesmas preferências, mas restrições diferentes.
- *Módulo de assentamentos espontâneos* - simula o processo de formação e consolidação³ de assentamentos espontâneos como parte da dinâmica de crescimento urbano das cidades latino-americanas.

³ Processo no qual os assentamentos espontâneos são melhorados, e com o passar do tempo se transformam em favelas consolidadas (assentamentos mais difíceis de expulsar).

- *Módulo de processos intra-urbanos* - estuda a natureza dos processos intracidade e examina como estas dinâmicas produzem em padrões globais espaciais de residências. Neste módulo, a autora faz uma tentativa de reproduzir alguns dos principais processos dinâmicos nas cidades: decadência do centro, movimento das elites para as bordas da cidade, filtragem e gentrificação.
- Módulo de barreiras espaciais - introduz barreiras espaciais ao modelo de simulação, como por exemplo: corpos de água, áreas com altas declividades, ou qualquer outra área onde a urbanização é impossível.

Krafta et al. (2005), em seu trabalho intitulado “Cidade, essa Emergência⁴ Estruturada”, apresentam um modelo conceitual baseado em AC para sistemas urbanos. Nele, é dada ênfase à configuração espacial da forma urbana, isto é, a inclusão de unidades como fronteiras políticas ou administrativas, distritos ou zonas de ocupação territorial, setores censitários e acidentes geográficos, que influenciam na tomada de decisão dos agentes. O processo a que se propõem representar é de produção e consumo do espaço urbano, finalizados por agentes especializados (em produção e em consumo), dotados de poder assimétrico (econômico e normativo) e capacidades próprias de planejar e desenvolver estratégias de implementação de planos particulares. Os agentes deverão então ter conhecimento pelo menos parcial da estrutura espacial urbana em que agem, e seus prováveis efeitos sobre o comportamento dos demais agentes, e usar esse conhecimento para manejá-la em seu benefício.

No estudo do crescimento urbano simulado para Santa Maria-RS, Eduardo Saurim apresenta o modelo SACI⁵ (Simulador do Ambiente de Cidade). Segundo Saurim, o simulador SACI possibilita estudar a evolução urbana, o mapeamento dos efeitos de políticas de planejamento urbano, a exploração de processos como gentrificação e dispersão urbana (*urban sprawl*) e a

⁴ Emergência é o processo de formação de padrões complexos a partir de regras simples. Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Emergence>

⁵ Desenvolvido por Maurício Couto Polidori e implementado por Juliano Chaves Granero.

influência de pólos de atração de crescimento nos sistemas urbanos. Os vetores de crescimento e os condicionamentos urbanos, naturais e institucionais, identificados para a cidade de Santa Maria foram transcritos para o modelo em forma de *grids* temáticos. O objetivo deste simulador é verificar o papel dos pólos atratores de crescimento urbano (UFSM, estação rodoviária, campus da ULBRA e dois shopping centers). A partir desse estudo, algumas hipóteses de crescimento foram apresentadas e serão testadas, tendo como foco os pólos atratores de crescimento. Algumas possibilidades de simulações propostas foram: 1- Cenário com atratores de grande intensidade instalados em localizações de grande interesse imobiliário; 2 - Cenário com atratores de grande intensidade instalados em áreas remotas da cidade; 3 - Cenário com uma série de atratores de baixa intensidade espalhados aleatoriamente pela cidade; 4 – Cenário com dois grandes atratores situados em extremos opostos da cidade e 5 – Cenário de crescimento sem a presença da UFSM (Figura 2.7).

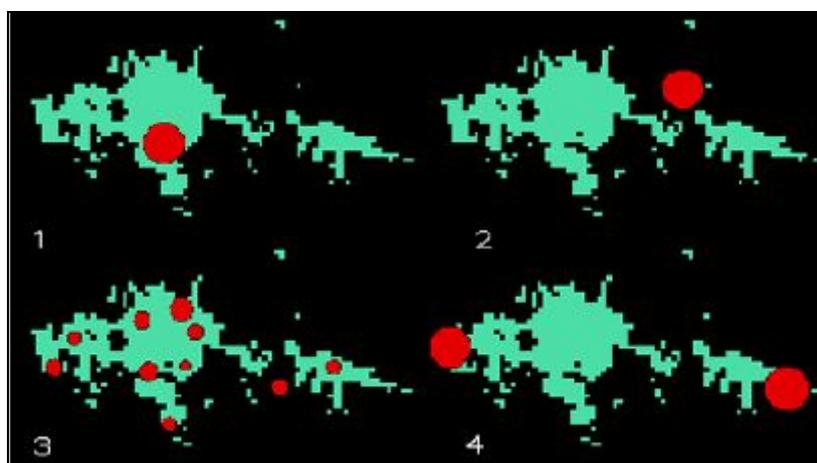


FIGURA 2.7 - Pólos de atração, possibilidade de localização 1, 2, 3 e 4 (Saurim 2005)

Estudos empíricos consolidam o uso dos AC na modelagem de fenômenos urbanos específicos, como por exemplos, pode-se citar: a análise estatística dos dados de uso do solo na área metropolitana de Tokyo, realizada por Arai e Akiyama. Esta análise propiciou uma importante confirmação empírica de que os estados das células da vizinhança do solo têm influência nas células centrais (Arai et al. 2004). Citam-se também os trabalhos de Goldstein et al.

(2004), que investiga uma aplicação dos autômatos celulares urbanos SLEUTH, baseados nos mapas do crescimento urbano de Santa Bárbara, Califórnia, no período de 1929-2001, e de Liu, que examina o impacto do grau de dinâmica temporal no comportamento de um modelo de crescimento urbano, baseado em autômatos celulares probabilísticos (Liu et al. 2004).

No Capítulo a seguir, alguns ambientes que podem ser utilizados para modelagem da dinâmica urbana são apresentados.

3 AMBIENTES COMPUTACIONAIS PARA MODELAGEM DA DINÂMICA URBANA

Um ambiente de modelagem dinâmica deve ser capaz de capturar ações à distância e abstrair os componentes discretos e contínuos de um sistema dinâmico. Os componentes discretos são os atributos das células que sofrem mudanças igualmente discretas, em virtude do seu espaço de estados finito, enquanto que os componentes contínuos de um modelo dinâmico são variáveis reais, que são atualizadas a partir de equacionamentos matemáticos (Pedrosa et al. 2002). Mantendo esse conceito em mente, alguns ambientes serão apresentados a seguir, visando sua utilização em modelagem da dinâmica urbana.

3.1 DINAMICA

O DINAMICA (Figura 3.1) é um *freeware* desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR – UFMG) (Soares Filho et al. 2003). Pode ser aplicado a vários fenômenos espaciais, como desflorestamento (Soares-Filho et al. 2002) e dinâmica urbana (Almeida 2003; Godoy 2004).

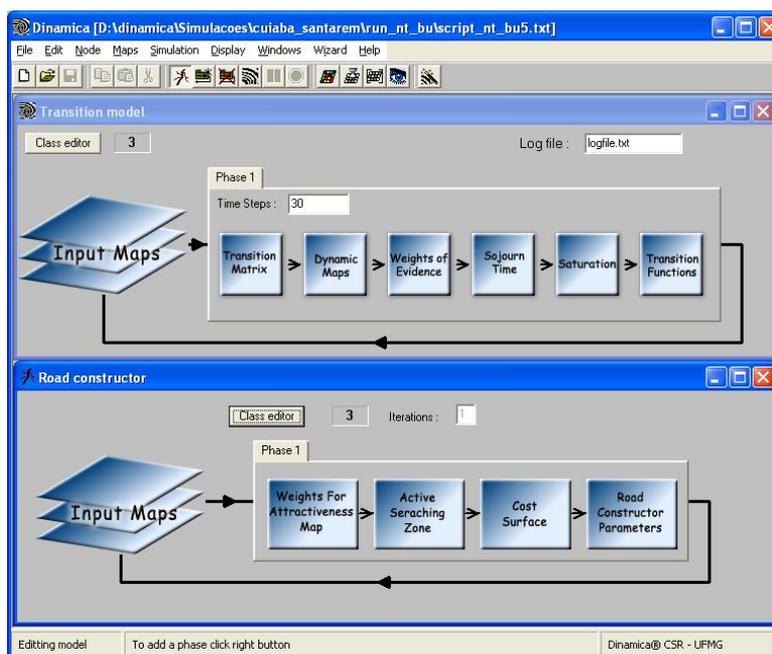


FIGURA 3.1- Interface Gráfica do software DINAMICA (Soares Filho et al. 2003)

O DINAMICA é um simulador espacial baseado em autômatos celulares. Como entrada, ele recebe os mapas de uso/cobertura do solo inicial e final (caso existente) e um conjunto de variáveis cartográficas, estáticas e dinâmicas. Estas variáveis são combinadas através da definição de seus pesos de evidência, para gerar os mapas de probabilidade de transição. Os mapas de saída são mapas de uso/cobertura final (paisagem), mapas de probabilidades de transição e mapas das variáveis dinâmicas atualizados. Seu modelo de transição pode ser acoplado a um módulo construtor de estradas e um gerador de cenários (Figura 3.2).

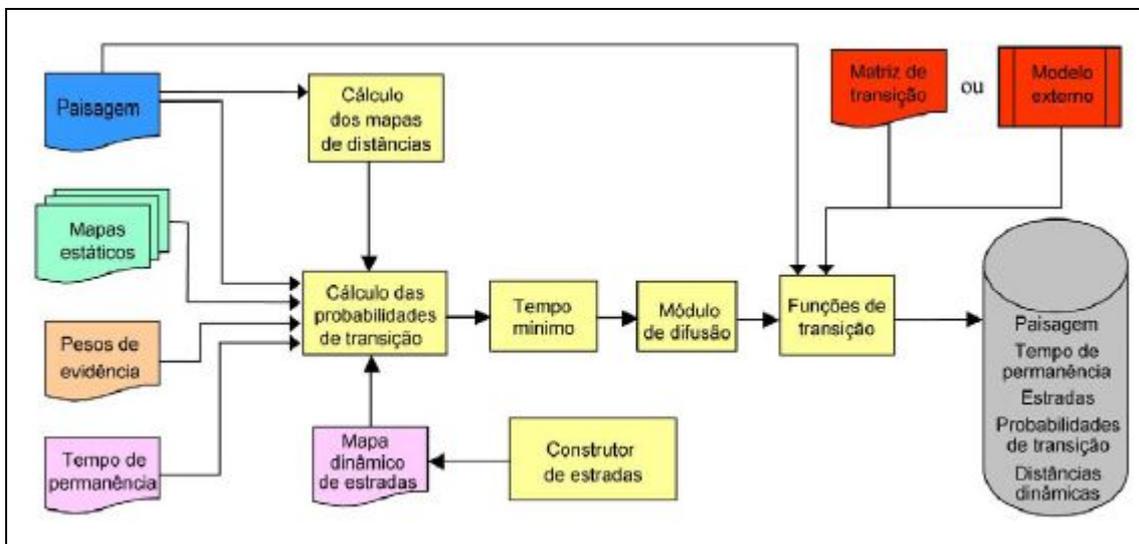


FIGURA 3.2 – Arquitetura do software DINAMICA (Godoy 2004)

O núcleo do DINAMICA é composto por dois processos de transição a função expansora (*Expander*) e a função formadora de manchas (*Patcher*) e um módulo de difusão. O primeiro processo se dedica à expansão ou contração de prévias manchas de uma certa classe, já o segundo, se encarrega de formar novas manchas. Para cada transição, deve ser definida a porcentagem de transições executada pela função de *expander* em relação a *patcher*. 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*. O módulo de difusão leva um processo de difusão de *i* para *j* a migrar para novas áreas em função de uma saturação

assintótica das células j dentro de uma vizinhança especificada.

Para aplicações urbanas (Almeida 2003), um modelo genérico foi utilizado (Figura 3.3). Os parâmetros do DINAMICA incluem especificamente: a) um arquivo contendo os valores dos pesos positivos de evidência ($W+$) ou os parâmetros (β_0, β_i) dos modelos de regressão logística⁶, 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 *expand*' e 'função *patcher*'), também considerando-se cada transição; e, e) o número total de iterações⁷.

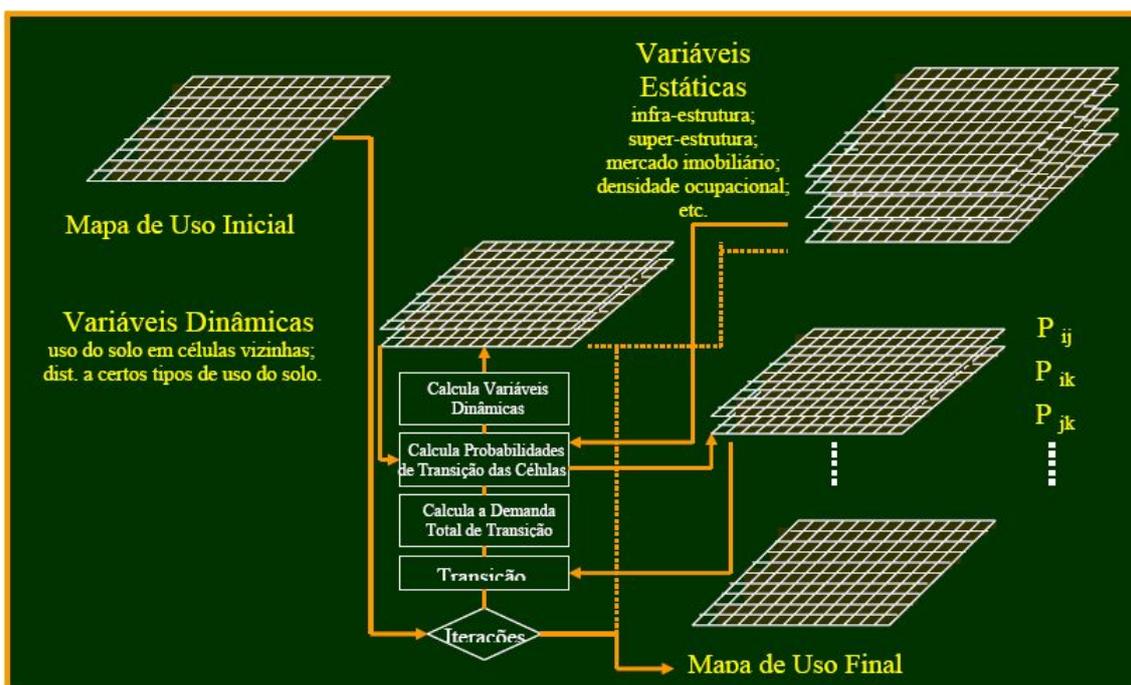


FIGURA 3.3 – Modelo de dados genérico do DINAMICA para aplicações urbanas (Almeida 2003).

3.2 REPAST

A arquitetura REPAST (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*) provê um conjunto de biblioteca para modelagem/simulação baseada em agentes

⁶ O método de regressão logística está implementado apenas na versão do DINAMICA adaptado para simulação urbana (versão DOS não disponível).

⁷ O número de interações especificado pelo usuário encontra-se disponível também, apenas na versão do DINAMICA DOS.

desenvolvido pela *University of Chicago's Social Science Research Computing* (RePast 2003). REPAST está disponível nas plataformas Windows, Mac OS, e Linux. Os modelos neste ambiente podem ser desenvolvidos nas linguagens Java, C #, C++, Basic.Net Visual, Prolog, dentre outras.

REPAST provê uma biblioteca de classes JAVA para criar, executar, exibir e colecionar dados para uma simulação baseada em agentes. Programas de simulação que usam bibliotecas tipicamente REPAST têm pelo menos duas classes: classe modelo e classe de agente. A classe de agente descreve o comportamento e as características (estados, capacidades) dos agentes e é em grande parte uma simulação específica. A classe de modelo e de controle são respectivamente, as representações e a parte de infra-estrutura da simulação em REPAST.

Algumas das características do REPAST são: dar ao usuário completa flexibilidade para que especifique as propriedades e comportamentos dos agentes; incluir um *scheduler* de eventos discretos concorrentes que apóia operações de eventos discretos seqüencial e paralelos; possuir o método Monte Carlo automatizado; prover uma gama de ambientes de agentes bidimensionais e de visualizações; permitir aos usuários acessar dinamicamente e modificar as propriedades dos agentes, equações de comportamento dos agentes, e propriedades do modelo em tempo de execução; incluir uma biblioteca para algoritmos genéticos, redes neurais, geração de números aleatórios, e matemática especializada; incluir integração de modelagem de sistemas dinâmicos; dar suporte à integração com Sistemas de Informações Geográficas. O ponto forte do REPAST é fornecer toda a interface para o modelo, o que permite que o cientista se concentre nas partes da modelagem que realmente lhe interessam, que são o funcionamento geral do modelo e o comportamento dos agentes e ambiente. Além disso, ele permite diversos tipos de espaço, incluindo redes e diversos tipos de *grid*, o que dá total liberdade para o programador, permitindo que o programa seja utilizado para os mais diversos tipos de simulação. O espaço pode conter um ou múltiplos objetos por célula. Para mais informação, veja

REPAST documentação em <http://REPAST.sourceforge.net>. Como exemplo, pode-se citar o modelo de periferação desenvolvido por Barros, citado na secção 2.2.2.1 (ver Figura 3.4). A Interface Gráfica do Usuário (GUI - *Graphical User Interface*) do modelo de simulação provido pelo REPAST compõe-se de três janelas: barra de ferramenta do REPAST; a janela de exibição do modelo; e as janelas de configuração do modelo, que é subdividida em aba de parâmetros, aba de ações de customização e aba de ações do REPAST. A janela de exibição provê atualizações dinâmicas dos estados atuais da simulação a uma frequência definida pelo modelador e permite observar o comportamento do modelo principal, onde os estados das células são dinamicamente atualizados e rerepresentados em novas cores, refletindo o seu novo estado de ocupação.

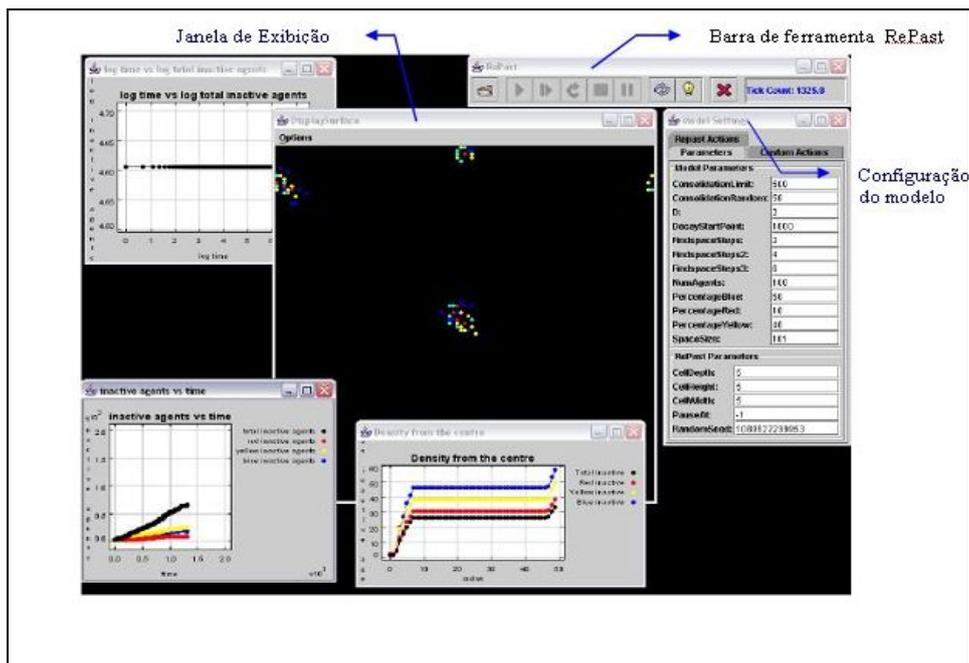


FIGURA 3.4 – Screenshot do Modelo de Periferação [Adaptado de (Barros 2004b)]

O REPAST também provê gráficos, histogramas e janelas de diagrama, que são opcionais e/ou devem ser fixados pelo modelador na janela de ações do REPAST ou via código. Vários gráficos podem ser vistos na Figura 3.4. Embora o REPAST tenha meios para produzir gráfico no GUI, o grupo de desenvolvimento informa que ainda não possui robustez estatística e que os gráficos deveriam ser usados apenas como guias.

3.3 TerraME

TerraME é um ambiente de modelagem de domínio público utilizado para a construção de modelos espaciais dinâmicos. Sua arquitetura suporta a construção de modelos espaciais dinâmicos, empíricos e teóricos, contínuos ou discretos, multi-escalar e pode ser aplicado a diferentes domínios de conhecimento. É baseado em um modelo de autômatos celulares aninhados (Carneiro et al. 2005). O objetivo da TerraME é fornecer suporte computacional necessário as áreas de pesquisa da rede GEOMA (Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental da Amazônia): física ambiental, áreas alagadas, biodiversidade, LUCC (*Land Use and Cover Change*), dinâmica populacional e clima. Seu principal requisito é modelar e simular a diversidade espaço-temporal da região amazônica em termos de: atores, processos, velocidade de mudanças e relações de conectividade (Carneiro et al. 2004a). O TerraME permite a construção de modelos com comportamentos heterogêneos no espaço e no tempo, espaços não-isotrópicos e multi-escalar. Permite ainda a construção de modelos complexos e integrados, utilizando modelos aninhados, onde os agentes podem se comunicar. A arquitetura da TerraME é fortemente acoplada com a biblioteca TerraLib (Câmara et al. 2000) (Figura 3.5).

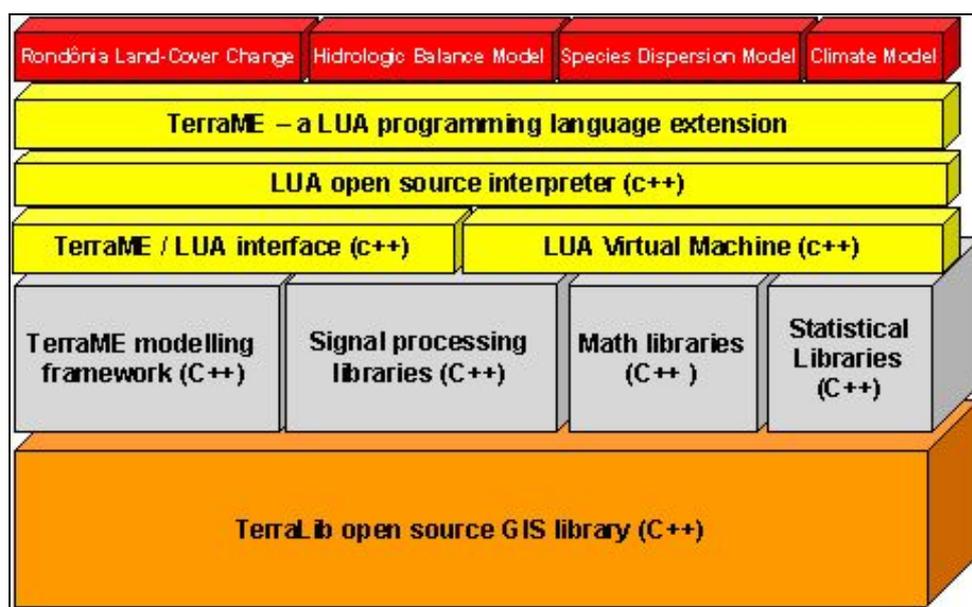


FIGURA 3.5 – Arquitetura do software TerraME (CARNEIRO et al. 2004b)

A estrutura espacial em TerraME é heterogênea e se baseia no conceito de “ambientes”. Os ambientes podem possuir vários agentes comunicantes que agem sobre o espaço de forma não sincronizada, permitindo a simulação de comportamentos discretos e contínuos. Os ambientes podem ser construídos pela composição de outros ambientes, isto é, eles podem ser aninhados permitindo a modelagem multi-escala, importante característica para aplicações complexas, como por exemplo, o modelo da Amazônia (Figura 3.6). Os modelos são implementados na linguagem de programação de alto nível TerraME, que é uma extensão de LUA (Ierusalimschy et al. 1996).

```
model MyModel
initTime "18/02/2004 14h 27m:32s 054"
chronon "00/01/0000 00h 0m:00s 000"
{
  environment "Amazonia"
  host "localhost"
  db "c:/banco/demo.mdb"
  user ""
  pass ""
  {
    environment "AmazOriental"
    host "localhost"
    db "c:/banco/demo.mdb"
    user ""
    pass ""
    environment "AmazOccidental"
    host "localhost"
    db "c:/banco/demo.mdb"
    user ""
    pass ""
    {
      ...
    }
    ...
  }
  ...
}
```

FIGURA 3.6 – Exemplo de ambientes em TerraME

Um ambiente em TerraME possui 3 tipos de sub-modelos: (i) o modelo espacial, que é formado pelo espaço celular; o mapa celular; e uma matriz genérica de proximidade; (ii) o modelo comportamental, formado pelos agentes; e (iii) o modelo temporal, destinado a simular eventos discretos aninhados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, apresentou-se um panorama dos autômatos celulares e à sua aplicação na modelagem da dinâmica urbana. Como mostram as referências da literatura, os autômatos celulares são muito utilizados na Geoinformação para modelar fenômenos de natureza variada. Servem como instrumento para apoiar a tomada de decisão em implicações espaciais.

A experiência no uso de AC para modelagem urbana mostrou limitações no modelo tradicional para representação de fenômenos complexos. Tais limitações culminaram em propostas de extensões ao modelo de autômato celular tradicional, ao integrar fatores ambientais e sócio-econômicos para representar a dinâmica espacial mais elaborada. Outra consequência é o surgimento de propostas que sugerem a utilização conjunta da tecnologia de AC com outras tecnologias, de forma a garantir uma melhor representação destes fenômenos. Como por exemplo, os “Autômatos Celulares Aninhados” que são uma extensão dos autômatos celulares para suprir a necessidade de uma melhor representação dos elementos contínuos e discretos em um sistema dinâmico. Esses autômatos celulares possuem modelo computacional similar aos autômatos finitos. Dentro do exposto, percebe-se existem novas abordagens de AC para dinâmica urbana, que se constituem em temas de pesquisa.

Dentro dos ambientes de modelagem para dinâmica urbana revisados, o TerraME, apesar de não possuir ainda uma interface de fácil uso através da sua estrutura, permite um fácil desenvolvimento do modelo integrado. Isto porque as construções de modelos espaciais dinâmicos são organizadas hierarquicamente de forma simples, o que possibilita a incorporação de partições espaciais geográficas diferentes. Um exemplo disto é o caso de atores específicos e processos que agem no espaço geográfico em diferentes escalas espaciais e resoluções temporais. Além disto, este ambiente de modelagem é fortemente acoplado a um SIG, o que é desejável para representar fenômenos espaciais. Devido aos recursos possibilitados pelo

TerraME, objetiva-se futuramente a condução de experimentações neste ambiente, com enfoque particular para a modelagem de processos urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, A. P. D., G. Câmara e R. C. M. Souza (2003). Modeling Spatial Relations by Generalized Proximity Matrices. GeolInfo 2003 - V Brazilian Symposium on Geoinformatics, Campos do Jordao.
- Almeida, C. (2003). Modelagem Espacial Dinâmica como Ferramenta de Planejamento: Simulação de Mudanças de Uso do Solo em Bauru e Piracicaba (SP). São José dos Campos, INPE.
- Almeida, C. M., A. M. V. Monteiro, G. Câmara, et al. (2003a). Simulating Urban Land Use Change through CA-based Modeling an Logistic Regression. XI SBSR, Belo Horizonte.
- Almeida, C. M. d., A. M. V. Monteiro, G. Camara, et al. (2003b). "Empiricism and Stochastics in Cellular Automaton Modeling of Urban Land Use Dynamics." Computers, Environment and Urban Systems 27(5): 481-509.
- Arai, T. e Akiyama (2004). "Empirical analysis for estimating land use transition potential functions—case in the Tokyo metropolitan region." Computer, Environment and Urban Systems 28: 65-84.
- Barros, J. (2004a). "Simulating Urban Dynamics in Latin American Cities." CASA working paper.
- Barros, J. (2004b). Urban Growth in Latin American Cities: Exploring urban dynamics though agent-based simulatation. London, London.
- Batty, M. (2000). GeoComputation Using Cellular Automata. GeoComputation. S. Openshaw e R. J. Abrahart. London, Taylor&Francis: 95-126.
- Batty, M., H. Couclelis e M. Eichen (1997a). "Urban systems as cellular automata." Enviroment and Planning B. 24(2): 159-164.
- Batty, M. e Y. Xie (1997b). "Possible urban automata." Enviroment and Planning B 24: 175-192.
- Benati, S. (1997). "Cellular automaton for the simulation of competitive location." Enviroment and Planning B 24: 205-218.
- Bittencourt, G. (2001). Inteligência artificial: ferramentas e teorias. Florianópolis, Editora UFSC.
- Briassoulis, H. (2000). Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. Morgantown, WV, Regional Research Institute, West

Virginia University.

- Burrough, P. (1998). *Dynamic Modelling and Geocomputation. Geocomputation: A Primer*. P. Longley, S. Brooks, R. McDonnell e B. Macmillan. New York, John Wiley.
- Câmara, A. S., F. Ferreira e P. Castro (1996). *Spatial simulation modelling. Spatial Analytical Perspectives on GIS*. M. Fischer, H. J. Scholten e D. Unwin. London, Taylor&Francis: 201-212.
- Câmara, G., R. Souza, B. Pedrosa, et al. (2000). *TerraLib: Technology in Support of GIS Innovation*. II Brazilian Symposium on Geoinformatics, GeoInfo2000, São Paulo.
- Carneiro, T. (2003) "Engenharia de *Software* aplicada à construção de modelos espaciais dinâmicos." **Volume**, DOI: www.dpi.inpe.br/~tiago/qualificacao.pdf
- Carneiro, T. G., A. P. Aguiar, M. I. Escada, et al. (2004a). *A Modelling Environment for non-isotropic and non-homogeneous spatial dynamic models development*. International Workshop on Integrated assessment of the land system: The future of land use, Amsterdam, Wageningen University.
- CARNEIRO, T. G., A. P. AGUIAR, M. I. ESCADA, et al. (2004b). TerraME – Um ambiente para o desenvolvimento de modelos espaciais dinâmicos não-homogêneos e não-isotrópicos INPE.
- Carneiro, T. G. d. S., A. P. Aguiar, M. I. Escada, et al. (2005). *Nested Cellular Automata: A Foundation for Building Multifunctional Rural and Urban Dynamic Models*.
- Casttela, J., T. N. Trung e S. Boissau (2005). "Participatory simulations of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model; a role-playing game, and a geographic information system." *Ecology and Society* 10.
- Clarke, K., S. Hoppen e L. Gaydos (1997). "A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area." *Environment and Planning B: Planning and Design* 24: 247-261.
- Couclelis, H. (1997). "From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation." *Environment and Planning B: Planning and Design* 24: 165-174.
- Edelweiss, N. e J. P. M. Oliveira (1994). *Modelagem de Aspectos Temporais de Sistemas de Informação*. UFPE-DI, Recife.
- Ferreira, A. B. d. H. **Novo Dicionário Eletrônico Aurélio**. Editora Positivo

- Informática Ltda, 2004.
- Godoy, M. M. G. (2004). Modelagem da Dinâmica de Ocupação do Solo no Bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil. Departamento de Geografia. Belo Horizonte, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. **Mestrado**: 84.
- Ierusalimschy, R., L. H. Figueiredo e W. Celes (1996). "Lua-an extensible extension language." Software: Practice & Experience **26**(6): 635-652.
- Kok, K. e A. Veldkamp (2001). "Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America." Agriculture, Ecosystems and Environment **85**: 205-22.
- Lambin, E. F. (1994). Modeling Deforestation Processes - A Review. Trees series B: Research Report. Luxembourg, European Commission.
- Lim, K., P. J. Deadman, E. Moran, et al. (2002). Agent-Based Simulations of Household Decision Making and Land Use Change near Altamira, Brazil. New York, Oxford University Press.
- Liu, X. H. e C. Andersson (2004). "Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling." Computers, Environment and Urban Systems **28**: 107-124.
- O'Sullivan, D. (2001). "Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model." Environment and Planning B: Planning and Design **28**: 687-705.
- Parker, D., T. Berger, S. Manson, et al. (2002). Agent-Based Models of Land-Use /Land-Cover Change. Report and Review of an International Workshop. Irvine, California, USA, LUCC Project.
- Pedrosa, B. e G. Câmara (2002). Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento. Geomática: Fundamentos e Aplicações. M. Meirelles e G. Câmara. Brasília, EMBRAPA.
- Pedrosa, M. B. (2003). Ambiente Computacional para Modelagem Dinâmica Espacial. São José dos Campos, INPE: 70.
- Phipps, M. e A. Langlois (1997). "Spatial dynamics, cellular automato, and parallel processing computers." Environment and Planning B: Planning and Design **24**: 193-204.
- Portugali, J., I. Benenson e Omer (1997). "Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city." Environment and Planning B **24**: 263-285.
- RePast. **REcursive Porous Agent Simulation Toolkit**. Chicago: University

- Chicago, 2003. <http://repast.sourceforge.net>.
- Saurim, E. (2005). Crescimento urbano simulado para Santa Maria-RS. XI Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional - ANPUR, Salvador - Bahia.
- Sayão, L. F. (2001). "Modelos teóricos em ciência da informação abstração e método científico." Ci. Inf. **30**: 82-91.
- Soares-Filho, B., G. Cerqueira e C. Pennachin (2002). "DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier." Ecological Modelling **154**(3): 217 – 235.
- Soares Filho, B. S., H. O. Rodrigues, W. L. Araújo, et al. **DINAMICA Project**. 2003. <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>.
- Straatman, B., A. Hagen e e. al (2001). The Use of Cellular Automato for Spatial Modelling and Decision Support in Coastal Zones and Estuaria, Maastricht, The Netherlands, MATRIKS Maastricht Technological Research Institute for Knowledge and Systems, Maastricht University.
- Torrens, P. M. (2000). "How Cellular Models of Urban Systems Work." CASA working paper **28**.
- Torrens, P. M. (2003). Automata-based models of urban systems. Advanced Spatial Analysis: The CASA book of GIS. P. A. L. a. M. Batty. London, ESRI: 464.
- Torrens, P. M. e D. O'Sullivan (2001). "Cellular automato and urban simulation: where do we go from here?" Environment and Planning B: Planning and Design **28**: 163-168.
- Wegener, M. (2001). "New spatial planning models." JAG **3**(3): 224-237.
- White, R. e G. Engelen (1997a). "Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling." Environment and Planning B: Planning and Design **24**: 235-246.
- White, R., G. Engelen e I. Uljee (1997b). "The Use of Constrained Cellular Automata for High-resolution Modelling of Urban Land Use Dynamics." Environment and Planning B: Planning and Design **24**: 323-343.
- Wolfram, S. (1986). "Approaches to Complexity Engineering." Physica D **22**: 385-399.
- Worboys, M. F. e M. Duckham (2004). GIS - A Computing Perspective (2nd edition). Boca Raton, CRC Press.