



# Simulação do Ambiente da Cidade

**Maurício Polidori** – UFRGS, PPGECO e UFPel, FAUrb – [mcp@ufpel.tche.br](mailto:mcp@ufpel.tche.br)

## Resumo

Crescimento espacial tem sido um dos importantes fenômenos observados nas cidades contemporâneas, sendo a identificação de processos e padrões, de suas causas e consequências, um desafio para a ciência. Nesse caminho, este trabalho apresenta a síntese de um modelo de crescimento urbano dedicado a realizar simulações, incluindo de modo integrado fatores urbanos e ambientais e promovendo simultaneidade entre crescimento externo e interno a um espaço urbano preexistente. O espaço da cidade e entornos não urbanizados são representados e modelados em ambiente computacional, mediante reedição dos modelos de centralidade e de potencial (Krafta, 1994 e 1999), com apoio em recursos de grafos, autômato celular, SIG e geocomputação. O modelo trabalha com modos de crescimento axial, polar e difuso, podendo simular cenários ambientais, urbanos e institucionais.

Palavras-chave: simulação; crescimento urbano; morfologia urbana.

## 1 Introdução

O processo de crescimento urbano é de difícil apreensão pela elevada quantidade de fatores presentes na cidade e na paisagem que integra, pelas suas interinfluências e diferentes escalas, pelo grande tamanho da cidade e pela ocorrência de mudança no curto e no longo prazo (O'sullivan, 1999; Batty e Longley, 1994; Allen, 1997, respectivamente). Para enfrentar essas dificuldades, um caminho é o de reproduzir a cidade e a paisagem artificialmente, construindo um modelo e realizando simulações, de modo a auxiliar na construção daquelas explicações referidas anteriormente. Para isso, este trabalho se encaminha para a vertente da modelagem urbana (Reif, 1973; Batty, 1976 e 1998), juntando conceitos derivados da ciência do espaço, modelos urbanos, teoria de sistemas, ecologia de paisagem, bem como instrumentação propiciada por SIG – sistema de informações geográficas, geocomputação, teoria dos grafos e dinâmica celular autômata (Dillion, 1983; Naveh e Lieberman, 1994; Câmara, 2001; Burrough, 1988; O'Sullivan e Torrens, 2000, respectivamente), cujas especificidades disciplinares contribuem para o arranjo necessário aqui.

Estudos sobre morfologia urbana têm conseguido demonstrar possibilidades de apreender e analisar a estrutura espacial da cidade, utilizando modelos configuracionais, com diversos estudos sobre centralidade espacial, dinâmica espacial urbana e crescentes abordagens sobre potencial de desenvolvimento intra-urbano (resumos de trabalhos podem ser acessados em <http://www.ufrgs.br/propur>). Nesse caminho, este trabalho propõe uma alternativa de modelagem dinâmica, identificada a partir do modelo de Potencial (Krafta, 1999), integrando crescimento intra-urbano e externo às áreas já urbanizadas, incluindo variáveis urbanas e ambientais num ambiente de SIG e produzindo um modelo com articulação de técnicas de grafos e de CA – autômato celular.

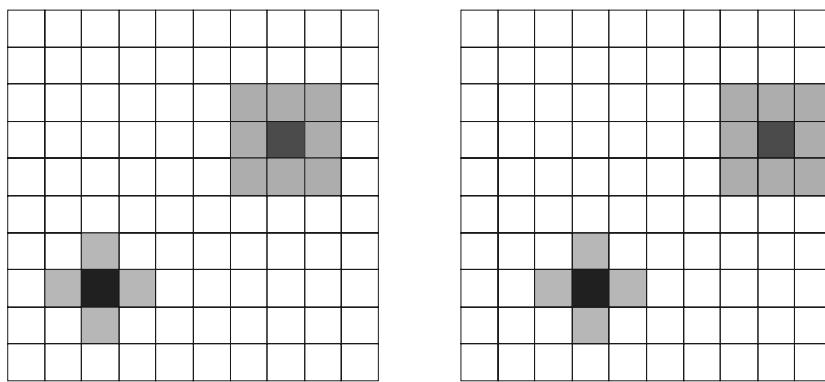
Estudos de ecologia de paisagem têm avançado na tentativa de incluir o sistema humano e a cidade, realizando movimentos científicos e práticos em conjugação com trabalhos de larga abrangência (Palang, Mander e Naveh, 2000), mas com dificuldades para ingressar na problemática urbana. Avaliações de adequação e análises difusas (*fuzzi*) têm-se preocupado com a incorporação de novas áreas à dinâmica urbana e com o uso do solo decorrente, seguidamente com preocupações de preservação da natureza, porém sem facilidade em capturar os interesses imobiliários reinantes na cidade (Ribeiro, 1996). Por seu turno, sistemas especialistas (*expert systems*, como está em Kalogirou, 2002) podem reproduzir a ação dos produtores do espaço urbano, porém muitas vezes apresentando excessiva tendência de cima-para-baixo (*top-down*, ibdem), o que dificulta a representação de múltiplos produtores do espaço (O'Sullivan, 2000).

## 2 Grafos, CA, SIG e Geocomputação

Segundo Sánchez (1998), a teoria de grafos provém da topologia, a qual se dedica a estudar relações entre pontos, linhas e superfícies, a partir de suas conexões. Um grafo pode ser considerado como um conjunto finito de “ $v$ ” elementos ou vértices, conectados por “ $\tau$ ” arestas ou arcos. Diversas medidas podem ser tomadas de um grafo (como conectividade, acessibilidade ou sinuosidade), tendo-se tornado importante recurso para o estudo de redes, tanto naturais como antrópicas (ibdem). Propriedades diversas dos grafos têm sido utilizadas para auxiliar na resolução de problemas urbanos com representação possível através de redes, como é o caso de da montagem de árvores de caminhos mínimos (*minimal spanning tree* ou busca de caminhos, como está em Mariani, 2001), estudos de

sintaxe espacial (Hillier, 1998) e de morfologia urbana (Teklemburg, Timmermans e Borges, 1997).

Como está em Torrens (2000), o uso de CA – autômato celular está ligado ao desenvolvimento da computação, da inteligência e da vida artificiais, o que vem sendo divulgado desde os primeiros trabalhos de John von Neumann e Stanislaw Ulam, por volta de 1940, até os mais recentes argumentos de Stephen Wolfram (2002). CAs básicos podem ser considerados como um espaço finito “ $\exists$ ” composto por “ $v$ ” parcelas ou células, organizadas numa trama ou grade “ $\tau$ ”. Essas células mudam de estado automaticamente (por isso o termo autômato), seguindo certas regras de transição, em função dos estados das células vizinhas. As possibilidades de espacialização e de representar processos dinâmicos têm sido utilizadas como auxiliares na resolução de inúmeros problemas ambientais e urbanos, como é o caso do crescimento espacial (Ward, Murray e Phinn, 2000). CAs apresentam vantagens para sua utilização em simulações urbanas, especialmente quando comparados com modelos tradicionais (Batty, 1994), apresentando possibilidades de integrar requisitos de eficiência com equidade, de incorporar espacialidade absoluta (ou Cartesiana) e relativa (ou Leibnitziana), de promover abordagens descentralizadas, de permitir integração com SIG – sistemas de informação geográfica, de integrar forma e função, de trabalhar com atenção ao detalhe, de ser simples, de permitir o ingresso de outras teorias, de permitir adequada visualização e de, principalmente, representar processos dinâmicos (Torrens, 2000:33-41). A figura 1, a seguir, mostra um CA básico; exemplificando vizinhanças de 4 e de 8 células.



*Figura 1: exemplos de dois estados de um CA básico, no tempo  $t$  (esquerda) e no tempo  $t+1$  (direita), com dois tipos de estados (vazio e cheio) e com dois tipos de vizinhança (von Neumann = 4 vizinhos; Moore = 8 vizinhos (adaptado de Torrens, 2000:22).*

SIG – sistemas de informação geográfica trabalham com representações *vector* e *raster*, associando dados tabulares aos espaciais (Câmara, 1996). As entidades espaciais fundamentais do sistema *vector* são os pontos, as linhas, as áreas planas e as superfícies, enquanto que as do sistema *raster* são as células (ibdem). Unificando as duas representações, é possível uma integração entre grafos e CA – autômato celular (figura 2, adiante), com as seguintes características: a) dados tabulares de pontos e células superpostos espacialmente são intercambiados; b) linhas conectando pontos definem um grafo e c) células, pontos e linhas num mesmo sistema possibilitam a integração das representações grafos – CA.

Geocomputação tem sido compreendida como uma prática mais próxima das necessidades de investigação científica, sendo os SIG – sistemas de informação geográfica, mais dedicados às necessidades técnicas e instrumentais que decorrem dos trabalhos científicos. Embora o conceito esteja em desenvolvimento, há concordância que geocomputação está ligada ao “ [...] uso de variadas informações e ferramentas geográfico-espaciais, mediante uma abordagem científica” (Ehlen, Caldwell e Harding, 2002:260).

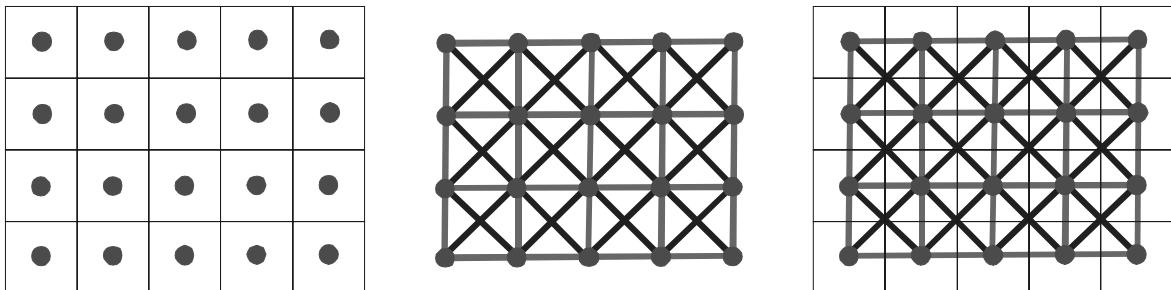


Figura 2: células e pontos superpostos espacialmente (esquerda); grafo (centro); integração das representações grafo – CA (direita).

### 3 Enunciado do modelo

O objetivo central do modelo apresentado aqui é o de simular crescimento espacial interno e externo à cidade preexistente simultaneamente, integrando fatores urbanos e ambientais, através da aplicação dos princípios contidos nos modelos de centralidade e potencial (Krafta, 1994 e 1999), como foi anotado anteriormente. Para isso, é necessário: a) assumir uma base espacial e descrever os atributos ambientais e urbanos que participam das simulações, bem como os fatores institucionais interferentes; b) reescrever e implementar os modelos de centralidade e potencial, adequando-os ao ambiente celular e às demais características deste trabalho; c) implementar dispositivos que permitam

aumentar a capacidade de simulação do modelo (como a geração de problemas ambientais, a conservação ambiental, a revitalização urbana e o aparecimento de vazios urbanos); d) habilitar o modelo a extrair medidas de compacidade e fragmentação; e) integrar o conjunto em ambiente de SIG – sistemas de informação geográfica. As alíneas “a” e “b” são tratadas a seguir, sendo os demais itens encontrados em recente trabalho de Polidori (2002).

### 3.1 Base espacial e tipos básicos de espaços

O modelo assume uma base celular com células quadradas de qualquer tamanho, resolvida como um *grid* bidimensional de um SIG – sistemas de informação geográfica, com características operacionais de um CA – autômato celular. As células podem representar dois tipos básicos de espaços: a) o ambiente não urbanizado (dado por biótopos natural e rural), cujas células são do tipo A (de ambiente); ou b) o ambiente urbanizado (dado pelo biótopo urbano; pode ser desde um vazio urbano até áreas de alta densidade), cujas células são do tipo U (de urbano). Esses tipos de espaços são determinados pelo estado de uma célula num tempo específico, podendo ser chamados de dimensões fenotípicas; os atributos que codificam as características de cada célula podem, por seu turno, ser chamados de dimensões genotípicas (Steadman, 1983; Hillier e Hanson, 1984); sendo assim, uma combinação de determinados atributos (ou um genótipo) implica num determinada apresentação espacial (ou fenótipo), o que permite admitir que espaços urbanos contenham atributos não urbanos e vice-versa. As figuras 3 e 4, a seguir, mostram um retalho de imagem de satélite com resolução de 15 metros, com um grid quadrado de 200 metros e o resultado da extração de células urbanas e ambientais.

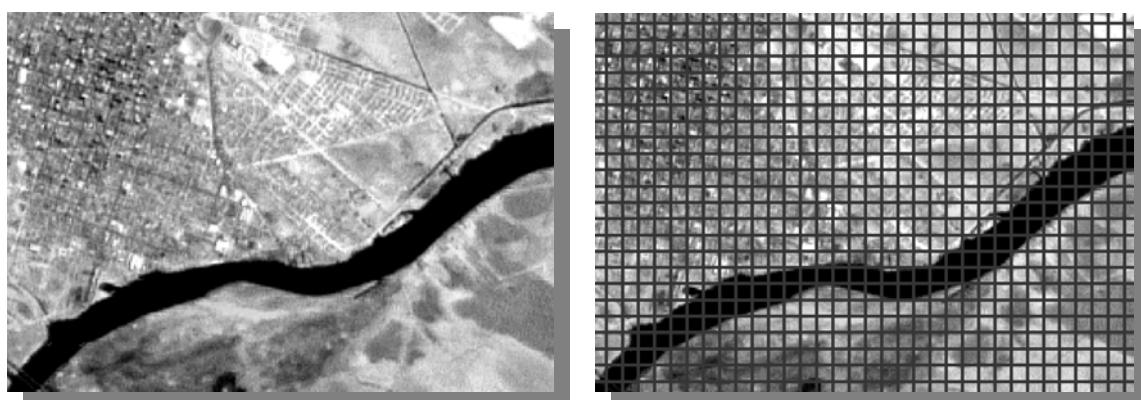


Figura 3: retalho de imagem de satélite com resolução de 15 m (esquerda) e com superposição de um grid quadrado de 200 metros (direita); imagem de Pelotas, RS; Landsat 7 ETM+, de 02/2000.

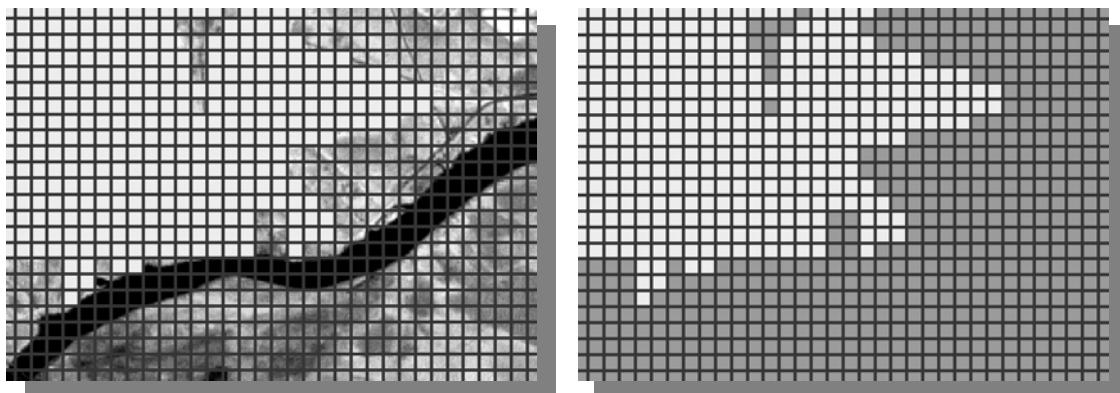


Figura 4: exemplo de células urbanas (em cinza claro, à esquerda) e de células ambientais (em cinza escuro, à direita), com um grid de 200 m; imagem de Pelotas, RS; Landsat 7 ETM+, de 02/2000.

### 3.2 Descrição ambiental

O modelo descreve o ambiente não urbanizado pelos seus atributos ambientais (AtribA), que se vinculam a cada célula, possuindo a possibilidade de apresentar duas características iniciais: a) oferecer resistência à urbanização, pelo que são denominados de resistência ambiental ou simplesmente ResistA; ou b) oferecer atração à urbanização, possuindo assim a capacidade de gerar tensões espaciais, pelo que são denominados de carregamento ambiental ou simplesmente CarregA.

De um modo mais específico, esses atributos são de seis tipos: 1) atributos ambientais que oferecem resistência suficiente para impedir sua transformação pela urbanização, não dispondo de capacidade de gerar tensões espaciais (a água do mar, por exemplo); são chamados de atributos *freezing-resistentes*; 2) atributos ambientais que também oferecem resistência para impedir a transformação das células por urbanização, porém dispondo de capacidade de gerar tensão espacial, sob determinadas condições, normalmente dada por proximidade de outra área urbanizada (uma praia, por exemplo, que não pode ser urbanizada, porém atrai ocupação); são chamados de atributos *freezing-atratores*; 3) atributos ambientais que oferecem alguma resistência à urbanização, porém não a impedem, como nos casos anteriores; esses atributos, uma vez modificados ou superados pela urbanização, são removidos do sistema (um banhado ou uma mata nativa, por exemplo); são chamados de *resistentes-instáveis*; 4) atributos ambientais que oferecem resistência à urbanização, como no caso anterior, porém não são removidos do sistema, exigindo esforços permanentes para sua superação, reeditados a cada transformação (a

declividade, por exemplo); são chamados de atributos resistentes-estáveis; 5) atributos ambientais que implicam em alguma atração à urbanização, a qual é ativada por uma determinada circunstância, normalmente dada pela distância; se a circunstância não aparece, o efeito também não aparece (é o caso de áreas com vista para um vale, com paisagem privilegiada ou similar); esses atributos, desde que próximos de áreas urbanizadas, são capazes de gerar tensões e de provocar desenvolvimento urbano, porém desaparecem com a realização da urbanização; são chamados então de atratores-instáveis; 6) atributos ambientais semelhantes ao tipo anterior, isto é, capazes de atrair crescimento urbano sob determinadas circunstâncias, porém não são sujeitos a remoção no processo de urbanização (como é o caso de uma rampa com orientação solar ideal); esses atributos geram tensões permanentes, sendo chamados de atratores-estáveis.

Esses atributos ambientais podem ter qualquer valor (positivo), recebendo na célula um valor absoluto (a intensidade com que ocorre) e no sistema um valor relativo (peso ambiental do atributo). O valor relativo ou peso ambiental do atributo pode estar associado a tabelas temáticas, como por exemplo: a) relação do atributo com padrões de segurança em áreas de conservação, onde núcleos, corredores, e passagens podem ser considerados (Yu, 1996); b) valores de transformidade associada, onde se beneficia o tema da energia (Ortega, 2001); c) adequabilidade geral para urbanização, onde podem ser mediados interesses de mudança e conservação (Spellberg, 1994). A implementação desses valores relativos permite diferentes graus de reconhecimento e valoração de unidades ambientais, cuja eficácia conservacionista e demais efeitos sobre o sistema urbano podem ser experimentados e testados.

### 3.3 Descrição urbana

O modelo descreve a urbanização pelos seus atributos urbanos (AtribU), que se vinculam a cada célula, apresentando duas características iniciais: a) gerar tensões espaciais, pelo que são chamados de carregamento urbano ou simplesmente CarregU; b) dificultar a geração de tensões espaciais, pelo que são chamados de resistências urbanas, ou simplesmente ResistU.

De um modo mais específico, esses atributos são de seis tipos: 1) atributos urbanos que permitem que as células mudem com o tempo, além de gerar tensões de crescimento (áreas comuns da cidade, ocupadas por habitação, comércio, serviços, indústria,

equipamentos etc); a mudança pode tanto gerar desenvolvimento urbano como gerar problemas ambientais; são chamados de atributos urbanos mutantes; 2) atributos urbanos que permitem que as células mudem e gerem tensões, tal como as anteriores, porém têm a possibilidade de crescimento mais limitada que as outras (como área de interesse para a preservação, áreas de risco por excesso de densidade etc); esse limite pode ser: a) um percentual do caso anterior (isto é, um valor relativo) ou b) pode ser um valor dedicado ao caso específico, conforme o conhecimento disponível (isto é, um valor absoluto); esses são chamados de mutantes-especiais; 3) atributos urbanos que geram resistência ao crescimento da cidade, porém não impedem a mudança, pela qual podem ser removidos (como é o caso de áreas com deficiência de infra-estrutura ou equipamentos urbanos); esses atributos são chamados de resistentes-instáveis; 4) atributos urbanos que geram resistência ao crescimento da cidade sem impedir mudanças, como no caso anterior, porém sem poder ser removidos pelo processo de crescimento e exigindo repetição dos esforços de urbanização a cada mudança (como no caso de poluição sonora, por exemplo); esses atributos são chamados de resistentes-estáveis; 5) atributos urbanos que impedem a dinâmica de crescimento das células; além disso, não geram tensões de crescimento, o que pode ser considerado como uma função de repulsa ou resistência (como no caso de um “lixão”, por exemplo); esses atributos são chamados *freezing*-resistentes; 6) atributos urbanos que também impedem o crescimento das células, porém geram tensões de crescimento (áreas tombadas, por exemplo); esse atributos são chamados *freezing*-atratores.

Tal como no caso de AtribA, os AtribU podem ter qualquer valor (positivo), recebendo na célula um valor absoluto (a intensidade com que ocorre) e no sistema um valor relativo (peso urbano do atributo). O valor relativo ou peso urbano do atributo pode estar associado a diversos fatores, como por exemplo: a) fatores funcionais; b) hierarquias viárias (no caso de vias); c) expectativas de geração de externalidades; d) a importância cultural; em todos os casos, deve ser buscada a explicitação de capacidades de atração ou repulsa de crescimento urbano. A implementação desses valores relativos permite diferentes graus de reconhecimento e valoração de subsistemas urbanos, cuja influência no conjunto pode ser experimentada e testada, de modo semelhante ao sugerido para os atributos ambientais.

### **3.4 Fatores institucionais**

O modelo permite construir cenários pela especificação de fatores institucionais e pela imputação de parâmetros, cujas características influenciam os resultados das simulações de crescimento. Os fatores institucionais (FatorI) operam do mesmo modo que os atributos urbanos e ambientais enunciados anteriormente, diferenciando-se pelas suas origem e especificações. Os FatorI podem ter origem em políticas ou projetos institucionais, bem como podem representar circunstâncias sob as quais o operador do modelo tem interesse de realizar simulações; as especificações podem representar políticas fiscais e extra-fiscais, regimes urbanos, planos e programas em geral, podendo também replicar atributos ambientais ou urbanos.

Tal como nos demais casos, os fatores institucionais (FatorI) ficam vinculados a cada célula e possuem a possibilidade de apresentar duas características iniciais: a) oferecer resistência à urbanização, pelo que são denominados de resistência institucional ou simplesmente ResistI; ou b) oferecer atração à urbanização, possuindo assim a capacidade de gerar tensões espaciais, pelo que são denominados de carregamento institucional ou simplesmente CarregI.

### **3.5 Implementação dos modelos de centralidade e potencial**

Uma vez imputados os AtribA e os AtribU iniciais, assumidos seus pesos e os valores dos parâmetros internos do modelo, realiza-se a etapa de processamento preliminar, encarregada de gerar os valores de ResistA, CarregA, ResistU, CarregU, ResistI e CarregI, os quais ficam vinculados a cada célula do sistema.

É assumido então que entre cada par de células que possui algum carregamento desenvolve-se uma tensão, como nos modelos de Acessibilidade, Centralidade e Desempenho (Krafta, 1994; Polidori, Krafta e Granero, 2001). Essa tensão é calculada através do produto do carregamento total de cada célula pelo carregamento total de cada uma das outras que lhe são acessíveis, de modo semelhante ao que ocorre em modelos de interação espacial (Wilson, 1985; Torrens, 2000a), porém sem limitações referentes a origem e destino. Esse produto é distribuído às células do sistema, por três modos: A) para aquelas células que estão no caminho preferencial entre o par de células que participam da

interação; B) para aquelas células que estão na vizinhança de cada célula geradora da interação; C) para células dispersas no sistema, escolhidas por suas características tipo-morfológicas.

Esses modos ou tipos de distribuição podem ser resumidos nos seguintes: A) distribuição axial; B) distribuição polar e C) distribuição difusa. A distribuição axial é dedicada a capturar as rotas preferenciais de ligação entre as células do sistema, estando associada ao sistema de circulação urbana; é dividida em dois subgrupos: A1) referente às células do caminho preferencial propriamente dito; A2) referente a células encontradas na vizinhança do caminho preferencial, ou num *buffer* do caminho preferencial. No caso de A1, a rotina de caminhos preferenciais é resolvida considerando uma heurística de desvios mínimos associada à técnica de *minimal spanning tree*, considerando ainda atritos internos de cada célula (ou impedância, como no caso de modelos anteriores (Polidori, Krafta e Granero, 2001). No caso de distribuição tipo A2, trata-se de aproveitar os resultados obtidos para o tipo A1 e computar um entorno às células escolhidas anteriormente, de modo a representar uma certa área de influência do caminho preferencial. A distribuição polar evidencia diferenciações espaciais na escala mais local, no entorno imediato da função urbana geradora de tensões; pode ser dividida em subgrupos, organizados por áreas de abrangência diferentes, decorrentes das diferentes capacidades de atração concedidas a cada célula, através de seu carregamento. A distribuição difusa pretende capturar aspectos com maior imprevisibilidade locacional no tecido urbano, porém especificável segundo dois padrões: padrão C1) referente à promoção imobiliária formal e padrão C2) referente aos processos de autopromoção imobiliária e promoção imobiliária informal. O padrão C1 é típico dos espaços utilizados por classes econômicas superiores e médias-superiores, sendo a probabilidade de ocorrência diretamente proporcional à localização privilegiada a às características da vizinhança (o que eleva o custo do solo); essa probabilidade maior de uma célula ser escolhida aleatoriamente é diretamente proporcional à centralidade celular (CentCel) máxima e à resistência mínima de cada célula, sendo o fator qualidade de localização prioritário em relação ao fator preço. O padrão C2 é típico dos espaços utilizados por classes econômicas inferiores e médias-inferiores, incluindo a formação das chamadas periferias urbanas, sendo a probabilidade de ocorrência diretamente proporcional ao baixo custo do solo; essa probabilidade é diretamente proporcional à centralidade celular (CentCel) mínima e à resistência máxima de cada célula, sendo o fator preço prioritário em relação ao fator localização.

O somatório de valores imputados como ResistA e ResistU, submetidos a uma função ( $f$ ), operam como impedância urbana e como impedância ambiental (ImpedA e ImpedU); essa função ( $f$ ) tem o papel de descomprimir ou converter os valores constantes como resistências, confinados entre zero e 1 (um) por normalização anterior; essa descompressão permite um uso simples da impedância, que pode ser implementada como um fator matemático de ResistA e de ResistU.

Para as distribuições que usam áreas de abrangência, é preciso definir seus *buffers*: a) *buffer* de caminho preferencial e b) *buffer* de célula isolada; esses buffers podem ser topológicos ou geométricos, comportando-se como uma vizinhança de CA; um banco de dados pode ser associado aos *buffers*, fazendo com que eles variem de acordo com as tensões (para os caminhos) ou de acordo com o carregamento (para as células).

O desenho a seguir exemplifica as distribuições de tensões espaciais referidas anteriormente.

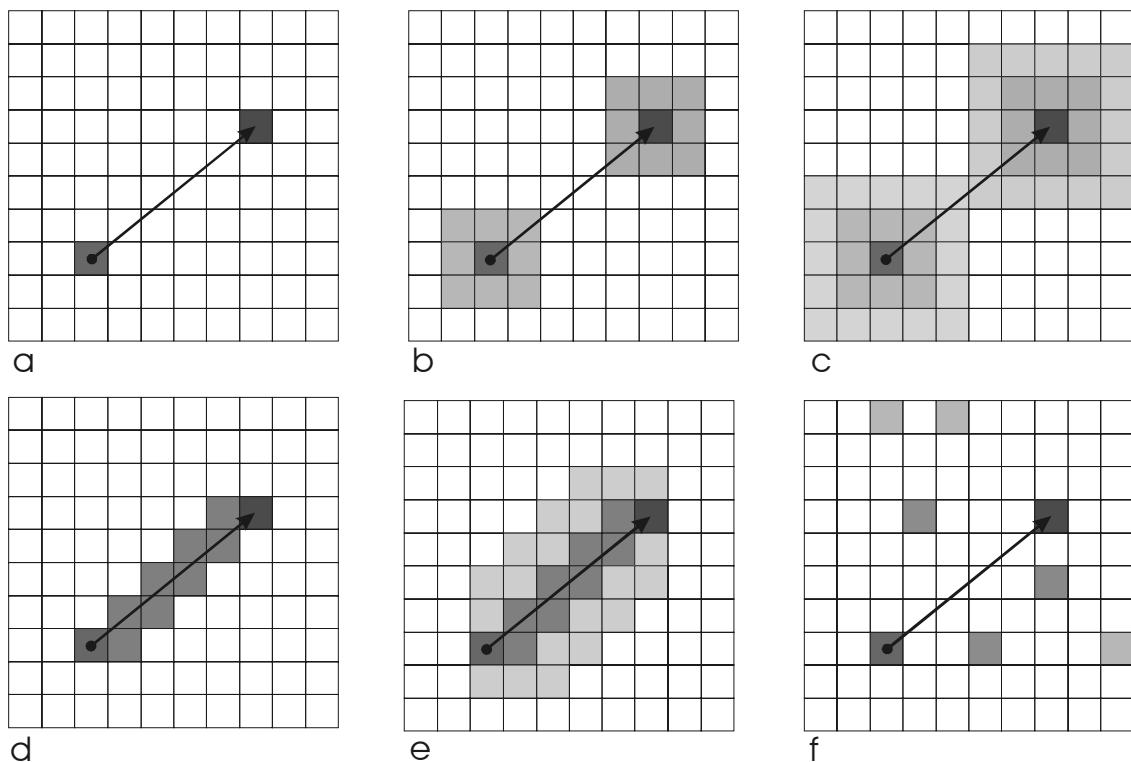


Figura 5: diagramas em formato de CA – autômato celular, representado: a) tensão gerada entre duas células; b) células incluídas na distribuição de tensões do tipo polar, com vizinhança de raio igual a uma célula; c) mesmo caso anterior, com vizinhança de raio igual a duas células; d) células incluídas na distribuição axial de caminho preferencial; e) células incluídas na distribuição axial de buffer de caminho preferencial, com raio igual a uma célula; f) hipótese de células incluídas na distribuição difusa.

O enunciado matemático para o cálculo da tensão gerada por um par de células é o seguinte:

$$T_{ij} = (CarregA_i + CarregU_i + CarregI_i) \cdot (CarregA_j + CarregU_j + CarregI_j)$$

*Equação 1*

onde se lê:

*a tensão entre as células i e j é igual ao produto da soma dos carregamentos ambiental, urbano e institucional da célula i pela soma dos carregamentos ambiental, urbano e institucional da célula j*

ou simplesmente:

$$T_{ij} = P_i \cdot Q_j$$

*Equação 2*

onde:

$$P_i = CarregA_i + CarregU_i + CarregI_i$$

*Equação 3*

e:

$$Q_j = CarregA_j + CarregU_j + CarregI_j$$

*Equação 4*

sendo:

$T_{ij}$  : tensão entre as células i e j

$CarregA_i$  : carregamento ambiental da célula i

$CarregU_i$  : carregamento urbano da célula i

$CarregI_i$  : carregamento institucional da célula i

$CarregA_j$  : carregamento ambiental da célula j

$CarregU_j$  : carregamento urbano da célula j

$CarregI_j$  : carregamento institucional da célula j

$P_i$  : peso da célula i

$Q_j$  : peso da célula j

A distribuição das tensões nos modos referidos anteriormente pode ser enunciada pelas equações a seguir.

$$T_{ij} = \frac{A1_{ij}}{x} = \frac{A2_{ij}}{y} = \frac{B_{ij}}{z} = \frac{C1_{ij}}{w} = \frac{C2_{ij}}{k}$$

*Equação 5*

onde se lê:

*tensão entre as células i e j é igual a cada tipo de distribuição dividido pelo seu grau de participação no sistema*

onde:

$$x + y + z + w + k = 1$$

*Equação 6*

sendo:

$T_{ij}$  : tensão entre as células i e j

$A1_{ij}$  : distribuição do tipo A1 (axial de caminho preferencial)

$A2_{ij}$  : distribuição do tipo A2 (axial de buffer de caminho preferencial)

$B_{ij}$  : distribuição do tipo B (polar)

$C1_{ij}$  : distribuição do tipo C1 (difusa)

$C2_{ij}$  : distribuição do tipo C2 (difusa)

$x, y, z, w, k$  = quantidades relativas distribuições tipo axial, axial de buffer, polar de buffer, difusa de vizinhança com alta CentCel anterior e difusa de vizinhança de baixa CentCel anterior, respectivamente

Tensões podem ser geradas incluindo todas as células com todas as outras (que têm AtribU, AtribA ou AtribI que gerem tensões) ou mediante raios (que podem ser topológicos ou geométricos); as distribuições podem ser desligadas (usando graus de participação (coeficientes) que tendem a zero), testando hipóteses e viabilizando especulações. São então acumuladas as parcelas de tensões recebidas pelas células, conforme frações alocadas através dos diversos tipos de distribuição, cujo resultado final acumulado é chamado de CentCel (Centralidade Celular).

São obtidos resultados absolutos para cada célula, cujos valores são normalizados de zero a 1; esses valores, de modo bruto ou organizados por classes, representam destacado resultado intermediário, cuja apresentação temática já é um importante descritor do fenômeno urbano.

CentCel pode ser enunciada matematicamente, como está a seguir:

$$\text{CentCel}_{iI} = x.A1 + y.A2 + z.B + w.C1 + k.C2 \quad \boxed{\text{Equação 7}}$$

onde se lê:

centralidade celular da célula  $i$  na interação  $I$  é igual à soma ponderada dos tipos de distribuição de tensões  $A1, A2, B, C1$  e  $C2$

ou:

$$\text{CentCel}_{iI} = \{x.(P.Q) . (\text{pref } c_{pq})^{-1}\} + \{y.(P.Q) . [\Delta_{\text{buffer}}(\text{pref } c_{pq})]^{-1}\} + \{z.(P.Q) . [\Delta_{\text{buffer}}(\text{Cel}_{pq})]^{-1}\} + \{w.(P.Q) . [n^o \text{ random}_w]^{-1}\} + \{k.(P.Q) . [n^o \text{ random}_k]^{-1}\} \quad \boxed{\text{Equação 8}}$$

onde se lê:

centralidade celular da célula  $i$  na interação  $I$  é igual à parcela  $x$  do produto dos carregamentos das células  $p$  e  $q$  multiplicado pelo inverso do número de células do caminho preferencial entre as células  $p$  e  $q$   
mais

a parcela  $y$  do produto dos carregamentos das células  $p$  e  $q$  multiplicado pelo inverso do número de células do buffer do caminho preferencial entre as células  $p$  e  $q$   
mais

a parcela  $z$  do produto dos carregamentos das células  $p$  e  $q$  multiplicado pelo inverso do número de células do buffer das células  $p$  e  $q$   
mais

a parcela  $k$  do produto dos carregamentos das células  $p$  e  $q$  multiplicado pelo inverso do número de células escolhidas de modo difuso  
mais

a parcela  $w$  do produto dos carregamentos das células  $p$  e  $q$  multiplicado pelo inverso do número de células escolhidas de modo difuso

sendo:

$\text{CentCel}_{ii}$  = centralidade celular da célula  $i$  na interação  $I$

$A1, A2, B, C1$  e  $C2$ : distribuições de tensões tipo axial, axial de buffer, polar de buffer, difusa de vizinhança com alta CentCel anterior e difusa de vizinhança de baixa CentCel anterior, respectivamente

$x, y, z, w, k$  = quantidades relativas distribuições tipo axial, axial de buffer, polar de buffer, difusa de vizinhança com alta CentCel anterior e difusa de vizinhança de baixa CentCel anterior, respectivamente

$P$  e  $Q$  : carregamentos das células  $p$  e  $q$

$p$  e  $q$  : células que realizam interação espacial

$\text{pref } c_{pq}$  : células que integram o caminho preferencial entre  $p$  e  $q$

$\Delta_{\text{buffer}}(\text{pref } d_{pq})$  : células que integram o buffer do caminho preferencial entre  $p$  e  $q$

$\Delta_{\text{buffer}}(\text{Cel}_{pq})$  : células que integram o buffer das células  $p$  e  $q$

$n^o \text{ random}_w$  : número de células escolhidas de modo difuso para a distribuição vinculada à  $w$

$n^o \text{ random}_k$  : número de células escolhidas de modo difuso para a distribuição vinculada à  $k$

Seqüencialmente, é assumida a premissa de que o crescimento urbano se dá prioritariamente em locais como maiores possibilidades de renda, a qual é auferida mediante a melhor localização, pelo menor custo de aquisição, com maior possibilidade de construção; o lugar onde se dá o crescimento urbano, bem como sua intensidade, são então calculados pelo seu potencial de crescimento celular (PoteCel). O potencial de crescimento celular (PoteCel) é a diferença entre a máxima CentCel da vizinhança e a CentCel de cada célula, o que pode implicar em crescimento interno ou externo às células urbanas preexistentes. Deste modo, resultam com maior potencial aquelas células que apresentarem menor CentCel própria, combinada com maior CentCel na vizinhança; o valor do potencial de crescimento celular (PoteCel) é sempre entre zero e 1 (um).

O cálculo do potencial celular como enunciado acima, em função de sua relação com a vizinhança (e não com todo o sistema) opera como uma inovação em relação ao modelo original proposto por Krafta (1994 e 1999), aproximando a operação do funcionamento típico dos modelos baseados em CA – autômato celular. Isso equivale a reconhecer: a) que os agentes urbanos envolvidos no processo de produção espacial tomam decisões com conhecimento parcial do sistema, ao invés de instruídos por uma leitura total e completa e/ou então que: b) a busca de locais para novos empreendimentos é influenciada de modo determinante pelo entorno, em cujos limites se realiza a busca por vantagens locacionais.

O Potecel opera no sistema como uma espécie de “esforço de urbanização”, podendo representar modificações tanto no espaço já urbanizado como no ainda não urbanizado, bem como incidir no espaço público ou privado; ocasiona prioritariamente a diminuição das resistências (primeiro as ResistA, depois as ResistU) e, uma vez superadas as resistências, causa o aumento do carregamento (CarregU); o CarregA não é alterado pelo Potecel; o resultado dessa operação implica no crescimento celular (CresciCel), gerando novos resultados a cada tempo ( $t$ ), ( $t+1$ ), ( $t+2$ ), até ( $t+n$ ). Em cada iteração, o número de células que atinge crescimento deve ser parametrizado por um valor  $\rho$  ( $r_0$ ), que é um percentual de células que poderão crescer, variando de zero a 100% das que têm algum potencial; esse parâmetro implica em diferentes velocidades de crescimento, sendo esperado que para diferentes velocidades ocorram crescimentos morfologicamente diferentes.

Potencial de crescimento celular (PoteCel) e crescimento celular (CresciCel) podem então ser enunciados matematicamente, como está a seguir:

$$PoteCel_i = [(CentCel_{Max\Delta buffer\ i}) - (CentCel_i)]^\lambda$$

*Equação 9*

onde se lê:

*potencial de crescimento celular da célula i é igual à centralidade celular máxima do buffer da célula i menos a centralidade celular da célula i, elevado ao coeficiente  $\lambda$  (lambda)*

sendo:

*PoteCel<sub>i</sub> = potencial de crescimento celular da célula i*

*CentCel<sub>Max\Delta buffer\ i</sub> = centralidade celular máxima do buffer da célula i*

*CentCel<sub>i</sub> = centralidade celular da célula i*

*$\lambda$  (lambda) : coeficiente de descompressão de PoteCel*

A equação do crescimento celular (CresciCel) varia de acordo com o genótipo de cada célula, havendo quatro possibilidades, a saber:

*se ResistA ≠ zero, então*

$$CresciCel_i = ResistA_i - PoteCel_i$$

*Equação 12*

*se ResistU ≠ zero, então*

$$CresciCel_i = ResistU_i - PoteCel_i$$

*Equação 11*

*se ResistA + ResistU = zero, então*

$$CresciCel_i = CarregU_i + PoteCel_i$$

*Equação 10*

*se CarregU > Limiar, então*

$$CresciCel_i = CarregU_i - PoteCel_i$$

*Equação 13*

onde se lê, na Equação 12: crescimento celular da célula i é igual à resistência celular da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i

onde se lê, na Equação 13: crescimento celular da célula i é igual à resistência urbana da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i

onde se lê, na Equação 14: crescimento celular da célula i é igual ao carregamento urbano da célula i mais o potencial de crescimento celular da célula i

onde se lê, na Equação 15: crescimento celular da célula i é igual ao carregamento urbano da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i

sendo:

*CresciCel<sub>i</sub> : crescimento celular da célula i*

*ResistA<sub>i</sub> : resistência ambiental da célula i*

*ResistU<sub>i</sub> : resistência urbana da célula i*

*CarregU<sub>i</sub> : carregamento urbano da célula i*

*PoteCel<sub>i</sub> : potencial de crescimento celular da célula i*

Com relação a CarregU, pode ser assumido que ocorre uma depreciação dos bens construídos, num tempo proporcional a sua expectativa de vida útil; sendo assim, a cada iteração do modelo (que corresponde ao passar do tempo), os valores de CarregU preexistentes estarão menores; para isso, um parâmetro  $\mu$  (mi) de desvalorização imobiliária deve ser introduzido. Com relação a ResistA, pode ser dito que os atributos que a compõem evoluem, com mudança de área ocupada (variação de intensidade do atributo na célula); para isso, um parâmetro  $\theta$  (teta) pode ser introduzido, simulando mudança nas resistências ambientais. As operações entre as células são realizadas através da técnica de álgebra de mapas, em ambiente de SIG; isso permite a construção de mapas temáticos referentes a cada estado do sistema, como visualizações do processo de crescimento.

## 4 Considerações finais

O modelo apresenta possibilidades de enfrentar importantes questões sobre a cidade e seu ambiente, as quais podem ser resumidas pelos seguintes itens:

- integração urbano-ambiental: o modelo trata integradamente aspectos urbanos e ambientais, o que pode melhorar na compreensão da cidade e das transformações que ocorrem no espaço interagente;
- expansão e renovação integradas: o crescimento urbano do tipo expansão (novos loteamentos) é tratado de modo conjunto com a densificação de áreas já urbanizadas (novas edificações), de modo independente de especificações exógenas;
- formato dinâmico: interessado em desvendar crescimento urbano, o modelo assume formato dinâmico, o que o aproxima do que de fato parece ocorrer no espaço natural e modificado;
- variedade escalar: o modelo apresenta recursos para trabalhar simultaneamente as escalas local e global, capturando processos e implementando rotinas apoiadas em teoria de grafos e em CA – autômato celular;
- ambientação em SIG – sistema de informações geográficas e recursos de geocomputação: o modelo se associa às vantagens dos SIG atuais, facilitando o ingresso de informações, processamentos nativos e visualização de resultados; a concepção do projeto

nos paradigmas de geocomputação melhora suas possibilidades de sucesso como evento científico;

- interatividade com o usuário: as variáveis a utilizar são fixadas ou escolhidas pelo usuário do modelo, o que permite ajustes ao caso e à quantidade de informações disponíveis;
- calibração: os diversos parâmetros do modelo oferecem possibilidade de calibragem para diferentes interesses ou realidades;
- disponibilidade teórica: o modelo permite a realização de estudos teóricos, especulações, descoberta de padrões e emergências sobre a forma da cidade, podendo auxiliar em trabalhos de urbanismo e de ecologia, podendo inclusive instrumentalizar idéias para a sustentabilidade;
- disponibilidade prática: o modelo permite também estudos práticos para o planejamento urbano e para a ecologia urbana, podendo estar ativo como auxiliar em sistemas de suporte à decisão.

## 5 Referências bibliográficas

- ALLEN, Peter (1997). **Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 275 p.
- BATTY, Michael (1976). **Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions**. Cambridge: Cambridge University Press, UK. 369 p.
- \_\_\_\_ (1994). **A chronicle of scientific planning: the Anglo-American modeling experience**. Journal of the American Planning Association v. 60 (1). p. 7-16.
- \_\_\_\_ (1998). **Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata**. Environment and Planning A, v. 30. p. 1943-1967.
- BATTY, Michael; LONGLEY, Paul (1994). **Fractal cities – A geometry of form and function**. San Diego: Academic Press. 394 p.
- BURROUGH, Peter A. (1998). **Geocomputation: a primer**. London: John Wiley & Sons Ltd. 30p.
- CÂMARA, Gilberto (2001). **Análise espacial de dados geográficos: uma visão introdutória**. São José dos Campos: Inpe. 47p. [disponível em <http://dpi.inpe.br/gilberto> ]
- CÂMARA, Gilberto et al. (1996). **Anatomia de sistemas de informação geográfica – Geoprocessamento – Introdução**. Campinas: Instituto de Computação - Unicamp.
- DILLION JR., John A. (1983). **Foundations of general systems theory**. Louisville: Intersystems Publications. p. 1-13 e p. 133-152.
- EHLEN, Judy; CALDWELL, Douglas; HARDING, Stephen (2002). **GeoComputation: what is it ?** Computers, Environment and Urban Systems v.26. p. 257-265. [ [disponível em: www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- HILLIER, Bill; HANSON, Juliene (1984). **The social logic of space**. Cambridge: Cambridge University Press.

- HILLIER, Bill (1998). **The common language of space: a way of looking at the social, economic and environmental functioning of cities on a common basis**. London: UCL/Bartlett School of Graduate Studies. 23 p. [ disponível em <http://spacessyntax.com/publications/commonlang.html> ]
- KALOGIROU, S. (2002). **Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation**. Computers, Environment and Urban Systems v. 26. p. 89-112. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/compenvurbssys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbssys) ]
- KRAFTA, Romulo (1994). **Modelling Intraurban configurational development**. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 21. London: Pion. p. 67-82.
- \_\_\_\_ (1999). Spatial self-organization and the production of the city. Urbana 24. Caracas: IFA/LUZ. p. 49-62.
- MARIANI, Antonio Carlos (2001). **Teoria dos Grafos**. UFSC/CTC/INE. [disponível em [www.inf.ufsc.br/grafos/livro.html](http://www.inf.ufsc.br/grafos/livro.html) ]
- NAVEH, Zev; LIEBERMAN, Arthur (1994). **Landscape ecology – Theory and Application**. 2nd ed. New York: Springer-Verlag. 360 p.
- O'SULLIVAN, David (1999). **Exploring the structure of space: towards geo-computational theory**. Fourth International Conference on Geocomputation. Fredericksburg: Mary Washington College. 18 p.
- \_\_\_\_ (2000). **Agent based models and individualism: is the world agent based ?** Environment and Planning A, v. 32. London: Pion. p. 1409-1425.
- O'SULLIVAN, David; TORRENS, Paul M. (2000). **Cellular models of urban systems**. London: Casa. [disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk> ]
- ORTEGA, M. (2001). **Curso de H. T. Odum sobre ecossistemas e políticas públicas**. [disponível em <http://www.unicamp.br/fea/ortega/homepage.htm> ]
- PALANG, Hannes; MANDER, Ülo; NAVEH, Zev (2000). **Holistic landscape ecology in action**. Landscape and urban planning v. 50. p. 1-6. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/landurbplan](http://www.elsevier.com/locate/landurbplan) ]
- POLIDORI, Mauricio; KRAFTA, Romulo; GRANERO, Juliano (2001). **Medidas Urbanas**. Pelotas: UFPel.
- POLIDORI, Maurício Couto (2002). **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre o futuro da cidade**. Projeto de doutorado em ecologia. UFRGS: PPGEKO. 92 p.
- REIF, Benjamin (1973). **Modelos en la Planificación de Ciudades y Regiones**. Versão castelhana por Alfredo Carda y Santiago Tellez . Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local, 1978. 422 p.
- RIBEIRO, Luiz César de Queiroz (1996). Incorporação imobiliária: dinâmica e impasses. In: RIBEIRO, Luiz César de Queiroz; AZEVEDO, Sérgio: **A crise da moradia nas grandes cidades: da questão da habitação à reforma urbana**. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ. p. 105-118.
- SÁNCHEZ, Darío C. (1998). **Teoría de grafos aplicada a redes naturales y antrópicas**. In: MATTEUCCI, Silvia Diana e BUZAI, Gustavo D. (Ed.). Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires. p. 321-345.
- SPELLBERG, Ian F. (1994). **Evaluation and assessment for conservation**. New York: Chapman and Hall Inc. 259 p.
- STEADMAN, J. P.(1983). **Architectural Morphology**. London: Pion. 276 p.
- TEKLEMBURG, Jan; TIMMERMANS, Harry; BORGES, Aloys (1997): Design tools in a integrated CAD-GIS environment: space syntax as an example. In: TIMMERMANS, Harry (Ed). **Decision support systems in urban planning**. London: E & FN Spon. p. 261-276.
- TORRENS, Paul M. (2000). **How land-use-transportation models work..** London: Casa, UCL. 75 p. [disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) ]
- \_\_\_\_\_. (2000a). **How land-use-transportation models work..** London: Casa, UCL. 75 p. [disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) ]
- WARD, D.P.; MURRAY, A.T.; PHINN, S.R. (2000). **A stochastically constrained cellular model of urban growth**. Computers, Environment and Urban Systems v. 24. p. 539-558. [disponível em [www.elsevier.com/locate/compenvurbssys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbssys) ]

WILSON. A.J. (1985). **Mathematical Methods in Human Geography and Planning**. Great Britain: John Wiley & Publishers. 404 p.

\_\_\_\_\_ (2002): **A new kind of science**. London: Stephen Wolfram Publications. 1197 p. [ disponível em <http://www.stephenwolfram.com/publications/books/> ]

YU, Kongjian (1996). **Security patterns and surface model in landscape ecological planning**.

\* \* \*