

# INTEGRANDO AUTÔMATOS CELULARES E A MEDIDA DE ACESSIBILIDADE EM SIMULAÇÕES DE CRESCIMENTO URBANO

**Marcus Vinicius Pereira Saraiva<sup>1</sup>; Christiano Piccioni Toralles<sup>1</sup>; Maurício Couto Polidori<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PROGRAU – FAUrb - UFPel – [marcus.saraiva@gmail.com](mailto:marcus.saraiva@gmail.com); [kicotoralles@gmail.com](mailto:kicotoralles@gmail.com)

<sup>2</sup>FAUrb - UFPel – [mauricio.polidori@terra.com.br](mailto:mauricio.polidori@terra.com.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Modelos de simulação dedicados a questões do ambiente urbano e do ambiente natural têm estado tradicionalmente separados, com descritores, métodos e resultados que ignoram as interinfluências de um ambiente sobre o outro (ALBERTI, 1999). Um dos caminhos na tentativa de integração pode ser buscado através da medida de acessibilidade, a qual tem se mostrado eficaz na análise tanto do espaço urbanizado quanto da paisagem natural, com semelhanças teóricas e metodológicas que permitem conceber um modelo de crescimento urbano unificado, considerando conjuntamente os ambientes urbano e natural.

Este trabalho está proposto para avançar no conhecimento dos processos envolvidos no fenômeno do crescimento urbano, considerando conjuntamente aspectos sócio-espaciais e o ambiente natural preexistente, explorando o tema através do uso de modelagem urbana, utilizando técnicas de Autômatos Celulares (ou CA, Cellular Automata)<sup>1</sup> para simulação dinâmica de crescimento urbano e abordagem baseada em teoria de sistemas e ciências da complexidade.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. A medida de acessibilidade celular

A medida de acessibilidade pode ser considerada tanto do ponto de vista dos fluxos existentes quanto da própria estrutura do espaço, sendo tradicionalmente calculada utilizando recursos de grafos. Para este trabalho, buscando aproveitar as características dinâmicas dos modelos baseados em CA, está proposta a definição de uma medida de acessibilidade celular, representada na forma de grid. Para tanto, é necessário integrar um ambiente raster com um ambiente de grafo, sobrepondo as duas técnicas. O processo consiste em considerar cada célula do grid como o vértice de um grafo, conectado por arestas à suas oito células vizinhas imediatas (POLIDORI, 2004).

Integrado a esse método está o conceito de Resistência Mínima Acumulada – RMA (WU e HOOPS, 2007), utilizada em estudos de ecologia de paisagem para representar resistências ao deslocamento entre diferentes áreas da paisagem. Nesse caso, o espaço intermediário às relações de interação entre as células do sistema funciona como um campo de resistências que têm de ser superadas antes de permitir o crescimento urbano. Assim, cada célula assume determinada

---

<sup>1</sup> CA podem ser definidos, segundo White et al. (1997), como sistemas espaciais e dinâmicos simples, onde o estado de cada célula depende do estado das células vizinhas no tempo anterior e de um conjunto definido de regras de transição. São compostos por cinco elementos básicos: o grid celular, o estado, a vizinhança, as regras de transição e o tempo.

resistência, de acordo com os atributos definidos na configuração inicial do modelo, e esse valor de resistência é considerado no momento do cálculo do caminho preferencial entre os pares de células.

Assim, a interação entre as células para o cálculo da acessibilidade celular, no modelo, se dá da seguinte forma: a) são consideradas células de origem todas as células do grid, tanto as naturais como as urbanas; b) células de destino são todas as células urbanas do grid, consideradas como atração à urbanização; c) a comunicação entre cada par de células se dá pelo caminho mínimo entre elas, considerando as resistências impostas pelo espaço. A partir disso, a Acessibilidade Celular pode ser definida como a propriedade de cada célula do grid de estar mais próxima das células urbanas. Matematicamente, a acessibilidade celular é definida conforme a

$$AC_i = \sum_{(j \neq i) \in N} \frac{1}{d_{ij}}$$

Equação 1, a seguir:

$$AC_i = \sum_{(j \neq i) \in N} \frac{1}{d_{ij}}$$

Equação 1, onde se lê: a acessibilidade celular da célula  $i$  é igual ao somatório do inverso das distâncias entre as células  $i$  e  $j$ , para toda célula  $j$ , diferente de  $i$ , que pertence ao grupo das células urbanas do grid.

Para efeito de cálculo, o valor obtido para  $AC_i$  é normalizado entre zero e 1, para compatibilização com a escala de valores utilizada na representação das resistências naturais.

## 2.2. O modelo de crescimento urbano

O procedimento inicial está feito considerando a associação entre alta acessibilidade e baixa resistência à urbanização, ou seja, aliando vantagens locais associadas à possibilidade de lucro com economia de recursos necessários à conversão do solo. O primeiro passo para implementar o procedimento é o cálculo do potencial de crescimento para cada célula, dado pela seguinte equação:

$$Potencial_i = (ACrel_i - Resistencia_i) + 1$$

Equação 2, onde se lê: o potencial de crescimento da célula  $i$  é igual à diferença entre a acessibilidade celular relativa e a resistência à urbanização da célula  $i$ , mais 1.

O potencial de crescimento é a grandeza que define matematicamente o processo descrito anteriormente. Assim, células de maior potencial de crescimento são as células que possuem maiores vantagens locais, representadas pela acessibilidade em relação ao centro urbano, e menor custo de conversão do solo, representado pelas menores resistências à urbanização.

O segundo passo consiste na inserção de um componente aleatório no processo, de modo a capturar parte das incertezas presentes no processo de crescimento urbano. Em um sistema absolutamente racional, as células de maior potencial seriam as primeiras a serem convertidas em espaço urbanizado a cada iteração. Uma forma inicial de superar essa lógica determinística é a inserção de um fator aleatório, cuja atuação está demonstrada na equação 4, a seguir:

$$Probabilidade_i = (Potencial_i \times \alpha) + (Random \times \beta)$$

Equação 3, onde se lê: a probabilidade de crescimento da célula  $i$  é igual ao produto do potencial de crescimento da célula  $i$  e do coeficiente  $\alpha$  (alfa), multiplicado pelo produto de um valor gerado aleatoriamente e do coeficiente  $\beta$  (beta).

Dessa última equação resulta a medida de probabilidade de crescimento celular, incluindo um fator aleatório com o objetivo de inserir uma dose de “desequilíbrio” no sistema, minimizando a influência da lógica totalmente determinística. A influência do potencial e do fator aleatório é calibrada pelo operador do modelo através dos coeficientes  $\alpha$  (alfa) e  $\beta$  (beta), respectivamente, sendo ambos os coeficientes definidos como números reais variando entre zero e 1. O último parâmetro definido pelo usuário do modelo é a taxa de crescimento por iteração, que fixa a o percentual de células a serem convertidas por iteração.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Experimentos foram delineados em diferentes ambientes abstratos compostos por grids celulares de 30 x 30 células e taxa de crescimento urbano fixada em 10% por iteração. O espaço urbano, no modelo, não considera diferenças relativas à intensidade da urbanização, ou seja, todas as células urbanas são consideradas como tendo igual capacidade de influenciar o processo de crescimento urbano.

#### SIM.1 – Fundo sem diferenciação, núcleo urbano isolado

taxa de crescimento = 10% por iteração;  $\alpha = 1$ ;  $\beta = 0$ .

No primeiro ambiente abstrato testado, as resistências naturais são representadas por um grid de valor constante igual a 1, abstraindo sua influência da simulação. O núcleo urbano inicial é indicado por um agrupamento de 16 células localizadas no centro do grid. Em um fundo sem diferenciação espacial e com o padrão de crescimento definido apenas pela lógica racional da vantagem locacional, o núcleo urbano original se desenvolve de maneira concêntrica (Figura 1), de forma semelhante aos primeiros modelos locacionais de Von Thünen e Christaller (Carr, 1997).

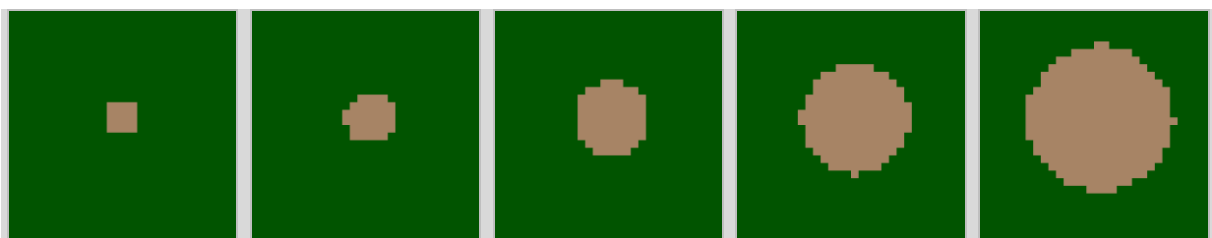


Figura 1 - resultados da SIM.1, com morfologia urbana de padrão concêntrico, com células urbanas em marrom sobrepostas às células naturais em verde.

#### SIM.2 – Fundo estruturado, núcleo urbano isolado, crescimento semi-probabilístico

taxa de crescimento = 10% por iteração;  $\alpha = 0,5$ ;  $\beta = 1$ .

Este cenário propõe uma matriz ambiental de morfologia mais estruturada, de modo a representar, mesmo que de forma abstrata, a presença de áreas mais favoráveis à urbanização junto a áreas de maior resistência ambiental. O núcleo urbano inicial permanece o mesmo, consistindo de um agrupamento de 16 células localizadas no centro do grid.

Com a representação do ambiente natural de forma mais estruturada, é possível verificar com maior clareza a interação entre a cidade e o ambiente no modelo (Figura 2). Nesta simulação, a morfologia do ambiente influencia ativamente na forma da cidade. É possível identificar um forte vetor de

crescimento em direção à nordeste, agindo desde as iterações iniciais. A cidade só muda a direção do crescimento ao se aproximar da borda e encontrar resistências maiores, passando o desenvolvimento a ocorrer em direção ao noroeste. Esses dois eixos de crescimento localizam-se sobre áreas de menor resistência natural.

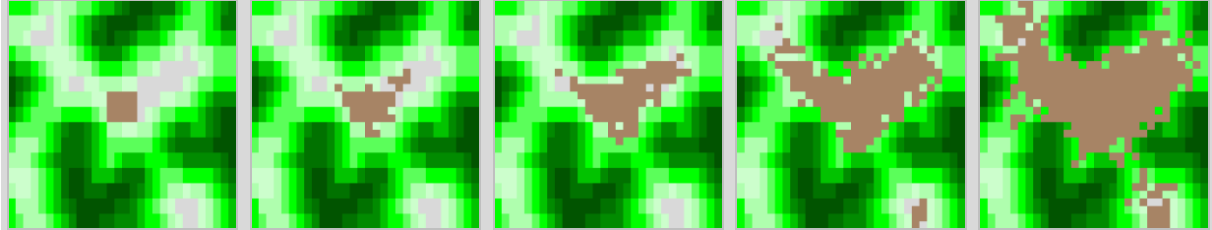


Figura 2 - Resultados da SIM.2, com morfologia urbana de padrão axial fragmentado nas bordas, com células urbanas em marrom, sobrepostas às células naturais em tons de verde.

#### 4. CONCLUSÕES

Os estudos iniciais demonstram a viabilidade da utilização da medida de acessibilidade em ambiente de autômatos celulares, auxiliando na captura das dinâmicas morfológicas nas relações entre a cidade e o ambiente natural. O modelo demonstrou boa resposta aos condicionantes ambientais apresentados como atributos de entrada das simulações, com destaque para a captura dos modos de crescimento urbano concêntrico e axial.

Por outro lado, o modelo ainda possui poucas possibilidades de parametrização, limitando as possíveis aplicações práticas. A forte tendência a gerar concentração urbana pode ser associada à prevalência de fatores globais (representados pelo componente de grafo e a medida de acessibilidade) sobre fatores locais (representados pelo componente de autômato celular). Nesse caso, a inserção do fator semi-probabilístico é uma forma de atenuar esse efeito e favorecer a formação de padrões difusos de urbanização.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, M. et al. **Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for studying urban ecosystems**. *BioScience*, 53, n. 12, Dezembro 2003. 1169-1179.

CARR, M. **New patterns: process and change in human geography**. Cheltenham: Nelson Thornes, 1997. 525 p.

POLIDORI, M. C. **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**. Tese de Doutorado UFRGS PPGECO. [S.l.], p. 352. 2004.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. **The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics**. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, n. 3, 1997. 323-343.

WU, J.; HOOBS, R. **Key topics in Landscape Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 297 p.