

O Efeito de Escala nos Modelos de Simulação baseados em Autómatos Celulares (AC)

Cláudia Viana^(a), Jorge Rocha^(b)

^(a) Instituto de Ciências Sociais (ICS), Universidade de Lisboa (UL), claudia.viana@ics.ulisboa.pt

^(b) Centro de Estudos Geográficos (CEG), Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT), Universidade de Lisboa (UL), jorge.rocha@campus.ul.pt

Resumo

A evolução dos modelos urbanos preditivos que simulam de forma eficaz os padrões espaciais do crescimento urbano deve-se, sobretudo, aos rápidos avanços na informática e na tecnologia geoespacial. Na geografia, a modelação do crescimento urbano é, comumente, realizada através de uma abordagem baseada nos autómatos celulares (AC) aliada a uma estrutura SIG. Este estudo procura conceber uma metodologia de modelação e análise espacial, com abordagem às propriedades emergentes e auto-organizadas, através da definição de parâmetros espaciais e regras de transição, que relacionam o efeito de escala com os processos de crescimento urbano. Deste modo, a variação do efeito de escala foi representada pela configuração da dimensão (3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11) e forma (Rectângulo, Círculo, Anel) da janela de vizinhança e pela dimensão da célula (50m, 100m, 150m, 200m, 250m e 300m), a fim de simular cenários futuros para parte da área de Lisboa e Vale do Tejo.

Palavras chave: Autómatos Celulares; CA-Markov, Efeito de Escala; Simulação Urbana

1. Introdução

O crescimento urbano como resultado da evolução das cidades, de uma perspectiva geral, pode ser adoptado para uma análise espacial, com o propósito de se obter um quadro para o planeamento e tomada de decisão eficaz. As capacidades descritivas e preditivas dos modelos urbanos, devem ser utilizadas como ferramenta para alcançar os múltiplos objectivos de desenvolvimento e preservação exigidos nas metas dos decisores políticos (Rocha, 2012). Como tal, existe uma crescente preocupação pela melhoria da fiabilidade dos modelos de crescimento urbano, por partes dos investigadores, sendo este um requisito fundamental para as políticas de planeamento e crescimento sustentável. Contudo, o que permite a ligação dos padrões e dos processos subjacentes é a definição das regras de transição e dos parâmetros espaciais, que estão totalmente encapsulados na modelação das transições da ocupação do solo (Ménard & Marceau, 2005), e determinam, efectivamente, os resultados espaciais (White & Engelen, 2000). Deste modo, o objectivo primordial deste estudo passa por identificar, num modelo baseado em AC, a influência de variar os parâmetros espaciais que compõem o efeito de escala (dimensão da célula e a configuração da vizinhança) nas transições da ocupação do solo, com base nas regras de transição definidas.

2. Metodologia

Sucintamente, foram aplicadas algumas operações que resultaram: (i) na transformação da informação geográfica com uma estrutura de dados matricial; (ii) na reclassificação das classes de ocupação do solo para “Urbano – 1” e Não Urbano – 2”; (iii) incremento das regras de transição (distância euclidiana, lógica difusa (*fuzzy*) e análise multicritério (AMC); (iv) cálculos matemáticos para obtenção dos modelos preditivos (cadeias de Markov e CA-Markov).

2.1. Pré-Processamento da Informação Geográfica

O modelo construído neste estudo assume uma estrutura espacial matricial, uma vez que este é um estudo com carácter preditivo. Portanto, a escolha desta estrutura prende-se ao facto de ser a melhor que se ajusta às características operacionais dos modelos baseados em autómatos celulares clássicos e dos modelos Markov, uma vez que permite uma distribuição contínua da informação espacial utilizada (Tabela I).

Tabela I – Informação de Suporte

Fonte	Estrutura de Dados	Escala	Ano	Tipo de Informação
Agência Portuguesa do Ambiente	Vectorial	1: 100 000	1990	Carta da Ocupação do Solo (CLC)
			2006	Carta da Ocupação do Solo (CLC)
Navteq		1:10 000		Rede Viária

2.2. Cadeias de Markov – Matrizes de Transição

As cadeias de Markov permitem calcular a indexação temporal, i.e., a quantidade de células (território) que se prevê que transite para um tipo de uso diferente. Este modelo apenas necessita de dois elementos de entrada (dois mapas matriciais). Neste caso de estudo, consideraram-se os mapas CLC reclassificados e definiu-se como intervalo de tempo 16 anos (diferença de tempo entre os dois mapas CLC). Deste modo, a matriz obtida deste processo, corresponde à probabilidade de transição de estados entre as duas classes para ano de 2022, permitindo compreender as dinâmicas espaciais e sinalizar as classes que se modificaram. Especificamente, verificou-se que em todas as dimensões de célula existe sempre uma probabilidade superior a 0,0350% da classe “Não Urbano” transitar para classe “Urbano”, enquanto a transição inversa apresenta uma probabilidade inferior (0,0025%).

2.3. Aplicação das Regras de Transição

Assumindo o critério de proximidade, que procura encontrar relacionamentos espaciais nos objectos através da distância, recorreu-se ao cálculo da distância euclidiana para a determinação de superfícies contínuas que

representam a proximidade entre os pontos amostrais, permitindo espelhar a distribuição espacial da ocupação do solo (Rocha, 2012).

Para minimizar os problemas decorrentes do uso de unidades e dispersões distintas entre os dados de informação de entrada, procedeu-se à normalização do factor distância. Considerando que não existe uma fronteira linear, mas sim, uma mudança contínua de uma fronteira de classes, submeteu-se desta forma a uma classificação, consoante o comportamento da curva de probabilidades, escalonando os dados para que se enquadrem numa restrita faixa de valores. Com efeito, recorreu-se à lógica difusa, pois este método permite representar processos analógicos num padrão digital (Rocha, 2012). Neste caso, considerou-se a função sigmoïdal, uma vez que os dados de entrada são contínuos, modificando-se a sua orientação entre o crescente e o decrescente.

Para a simulação da evolução do crescimento urbano, é necessário ponderar a informação geográfica, de forma a hierarquizar a importância de cada uma. Deste modo, utilizou-se a combinação linear ponderada (*Weighted Linear Combination* - WLC), através da atribuição de ponderações a cada factor. Para a distância ao urbano e não urbano atribuiu-se uma ponderação de 0,75 e para a distância à rede viária atribuiu-se uma ponderação de 0,25, segundo os valores apurados por Rocha (2012). A incorporação dos dados através da WLC consistiu na multiplicação do mapa da distância ao urbano de cada ano, para cada dimensão de célula, por 0,75 e a sua soma com o mapa da distância à rede viária (com a respectiva dimensão de célula) multiplicado por 0,25 $(((CLC90_dist_fuzzy*0.75) + (redev_dist_fuzzy *0.25)))$.

2.4. Processo de Simulação

O modelo CA-Markov permite conjugar a capacidade preditiva dos processos de Markov com a dependência de vizinhança dos AC, para replicarem a escala espacial, na criação de cenários futuros. Com efeito, em primeiro lugar, avaliou-se a resposta da expressão algorítmica nas transições da ocupação do solo para a variação de escala, representada pelos elementos do efeito de escala assumidos neste estudo. Os efeitos de vizinhança são baseados na premissa de que a composição das células vizinhas (i.e., janela de vizinhança) têm efeito na tendência de uma célula central mudar de classe. Partindo da variação dos parâmetros espaciais destes modelos, os resultados preditivos serão diferentes, mostrando a complexidade do sistema analisado, oriundo das inúmeras alternativas de combinação entre os parâmetros espaciais (Figura 1).




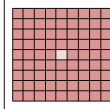
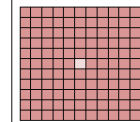



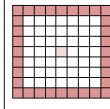
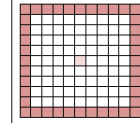



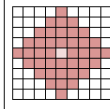
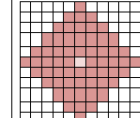
Dimensão	3 x 3	5 x 5	7 x 7	9 x 9	11 x 11
Rectângulo					
Anel					
Círculo					

Figura 1 – Configuração da Vizinhança

3. Análise dos resultados

Foi efectuada uma análise de concordância, que consistiu na classificação cruzada entre o cenário de vizinhança mais comumente utilizado - Rectangular de 9 células (idêntico à vizinhança de Moore), com os restantes cenários. Esta análise demonstrou que, com a generalização da dimensão da célula, se verifica uma diminuição gradual dos valores da diferença, indicando que o aumento das diferenças é consequência do aumento da janela numa dimensão de célula regular do que numa dimensão mais elevada. Deste modo, pode-se inferir que a generalização, i.e., aumento da célula, atenua o efeito do aumento da janela da vizinhança (Figura 2).

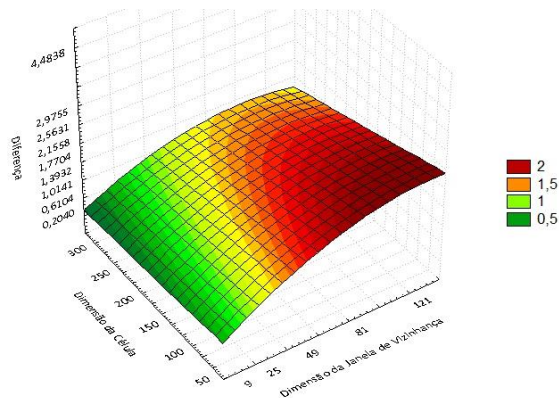


Figura 2 – Diferença da variação dos parâmetros espaciais

A Figura 3 demonstra que diferentes formas de janela de vizinhança resultam em resultados distintos, espelhando a sensibilidade dos resultados da simulação à variação dos parâmetros espaciais. A forma de vizinhança em Anel apresenta um comportamento mais imprevisível do que as restantes formas.

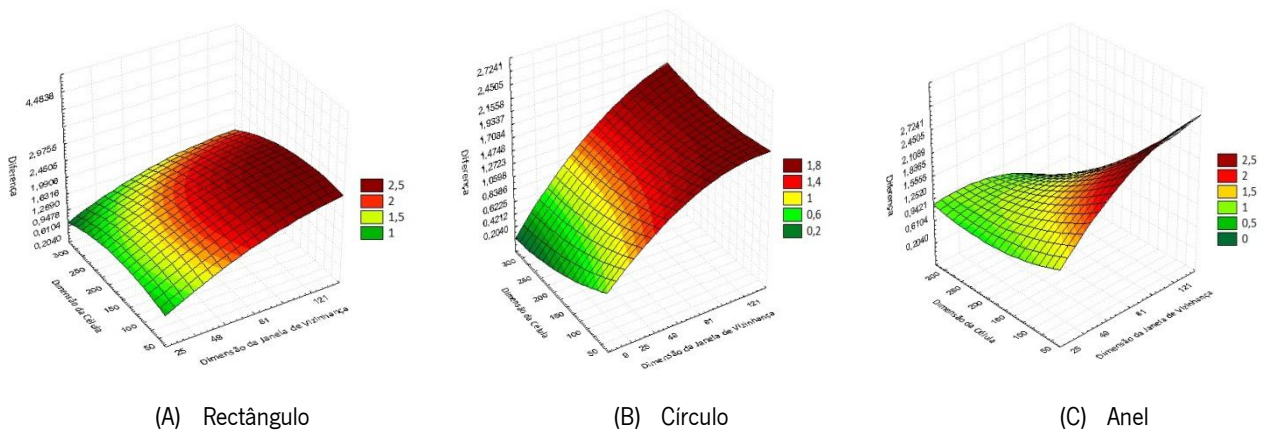


Figura 3 – Diferença da variação dos parâmetros espaciais

O factor de enriquecimento (F) foi a medida utilizada para definir a abundância de um tipo de ocupação do solo na vizinhança da célula central. Este foi representado pela expressão logarítmica, onde valores entre 0 e 1 indicam que a ocorrência média do tipo de ocupação do solo foi inferior à presente na vizinhança e, valores acima de 1 indicam um enriquecimento da vizinhança com efeitos atractivos de sentidos opostos. A figura 4, apresenta a média do factor de enriquecimento $I(\bar{F}_{l,k,d})$ em função da dimensão da janela de vizinhança apenas para a forma em círculo, uma vez que, esta forma apresentou resultados mais homogéneos, em relação às restantes (como White e Engelen, 2000, também observaram no seu estudo). Estes resultados são explicados pela tendência da janela em círculo concentrar-se na faixa da influência dos agentes causadores das mudanças da ocupação do solo. Neste caso de estudo, procurou-se perceber até que ponto utilizar o mapa simulado com a configuração de vizinhança mais comumente utilizada (rectangular de 9 células) como entrada, pode afectar a precisão da simulação das transições, em relação ao mapa original (CLC 2006). Observa-se que, regra geral, o mapa original é sempre mais rico, apontando para a homogeneização da área durante o processo de simulação, o qual preenche preferencialmente as áreas vazias intra-urbanas e os espaços adjacentes à área urbana. Com o aumento da dimensão da célula, os valores passaram de repulsão para atracção, comprovando que a dimensão da célula tem impactos individuais na expressão logarítmica das transições da ocupação do solo e que uma resolução mais fina melhora a precisão. A janela de vizinhança tende a tornar-se menos expressiva com a generalização da sua dimensão, espelhando a influência das regras de transição que foram consideradas neste estudo. Assim, uma janela de vizinhança com dimensão reduzida conduzirá a regras de transição impróprias e, conseqüentemente, a transições erradas. A solução passa por generalizar a dimensão da célula pelo menos até 100 metros e com um limite de 200 metros, pois foi neste limiar que se verificou que as classes têm efeitos repulsivos. Ultrapassar este limiar resultou em valores acima de 1, significando que as classes têm efeitos atractivos opostos, que não são, necessariamente, repulsivos.

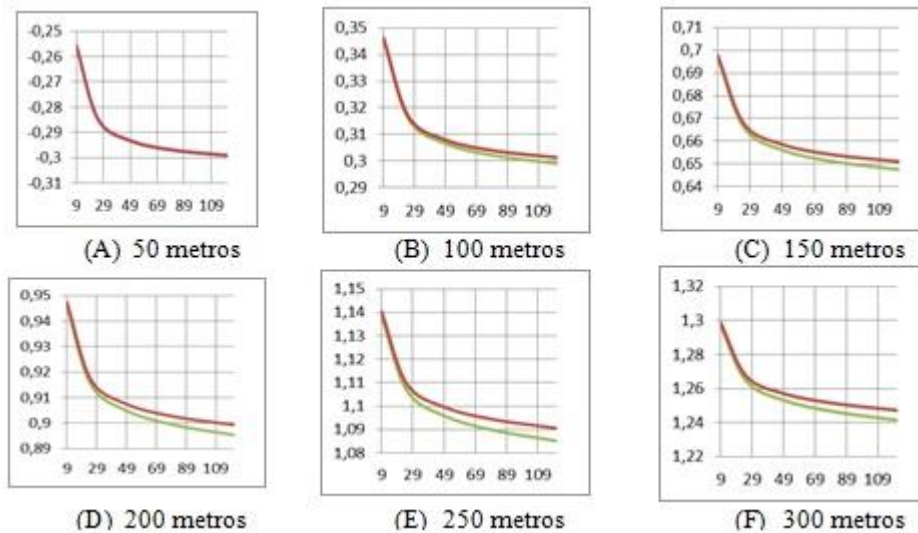


Figura 4 – Factor de enriquecimento de acordo com a dimensão da célula e da janela de vizinhança

4. Conclusões

Este estudo preliminar do processo da expansão urbana, demonstrou que este é um fenómeno complexo influenciado por diferentes factores. O modelo CA-Markov é uma robusta e desafiante ferramenta, que correctamente explorada, consegue identificar semelhantes padrões e ordens dos sistemas urbanos. Com efeito, este modelo impôs uma dependência espacial, comprovando que a variação da escala influencia *a posteriori* a capacidade preditiva da simulação. A combinação de uma dimensão de célula e janela de vizinhança reduzidas levam a incoerências nas transições, que podem ser explicadas pelo facto de os diferentes tipos de ocupação do solo tenderem a agrupar-se em função da correlação espacial positiva, indicando que a escolha de uma dimensão depende das características da paisagem e do tamanho dos padrões das diferentes ocupações do solo. Os resultados do factor de enriquecimento demonstraram a influência que as regras de transição podem ter nestes modelos preditivos, denotando-se a importância de procurar ser minucioso na selecção dos agentes que influenciam a morfologia urbana, para poder considerar as regras de transição e os parâmetros espaciais correctos.

5. Bibliografia

- Ménard, A., & Marceau, D. J. (2005). Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environment and Planning B – Planning & Design*, 32(5), 693–714.
- Rocha, J. (2012). *Sistemas Complexos, Modelação e Geosimulação da Evolução de Padrões de Uso e Ocupação do Solo*. Dissertação de Doutoramento em Geografia. Lisboa: Universidade de Lisboa.
- White, R., & Engelen, G. (2000). High resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 383-440.