

# Simulando a dinâmica da segregação urbana: dos autômatos celulares aos modelos baseados em agentes

Simulating urban segregation dynamics: from cellular automata to agent based models

**Mauro Normando Macêdo Barros Filho**

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.  
mbarrosfilho@gmail.com

## ABSTRACT

As a consequence of the emergence of models based on the notions of disequilibrium and uncertainty, cities have been seen as intrinsically complex nonlinear systems subject to sociospatial changes that occur, simultaneously, in many scales. The present paper analyzes three models to simulate urban segregation dynamics. Schelling's model shows how can emerge unexpected highly segregated global patterns from local preferences to live close to each other. Epstein and Axtell's model reveals its pedagogic role through the manipulation of specific parameters. Portugali's model emphasizes the cognition and learning capabilities of agents to recognize patterns and change their behaviour accordingly.

**KEYWORDS:** Segregação Urbana; Modelos de Simulação; Autômatos Celulares; Modelos Baseados em Agentes.

453

## Introdução

A partir da década de 1960, os avanços da informática, das geotecnologias e a proliferação de dados sobre o ambiente urbano, como censos demográficos e imagens de satélite, permitiram o desenvolvimento de métodos mais eficientes de manipulação, representação e análise de dados socioespaciais. Ao mesmo tempo, surgiu uma série de novos conhecimentos construídos de modo independente por diversas disciplinas, os quais ofereceram um novo modo de compreender as cidades. A combinação desses novos conhecimentos e recursos computacionais fez surgir modelos de simulação, baseados em noções de desequilíbrio e de incerteza, passando as cidades a ser percebidas como sistemas não lineares e intrinsecamente complexos. Embora possam parecer estáveis, quando observadas em escalas mais finas, as cidades tornam-se mais voláteis, diversas, e revelam dinâmicas muito intensas, passando a ser melhor compreendidas como sistemas longe do equilíbrio, cujos padrões socioespaciais estão sujeitos a mudanças contínuas (BARROS FILHO, 2009). Dentro desse contexto, o presente artigo analisa três modelos de simulação que vêm sendo desenvolvidos, a partir da década de 1970, para explorar a dinâmica da segregação

urbana. O modelo de Thomas Schelling constitui uma das primeiras aplicações de autômatos celulares em estudos urbanos, demonstrando como, a partir de certas preferências locais de indivíduos em morar próximos de outros, podem emergir inesperados padrões espaciais globais altamente segregados. O modelo de Joshua Epstein e Robert Axtell está baseado em agentes e revela o papel pedagógico da simulação urbana por meio de um conjunto de experimentos realizados para investigar as mudanças de comportamento em uma sociedade a partir da manipulação de parâmetros específicos. O modelo de Juval Portugali enfatiza a capacidade de cognição e aprendizagem dos agentes que atuam na produção do espaço urbano em reconhecer padrões e mudar o seu comportamento em função dos mesmos.

## Os autômatos celulares de Schelling

Em 1971, o economista norte-americano Thomas Schelling publicou o artigo "Modelos Dinâmicos de Segregação" no qual propõe um modelo bastante simples para explicar como os residentes brancos são completamente contrários a viver em uma vizinhança integrada com outras raças. O modelo simula um jogo utilizando moedas de 1 e de 10 centavos sobre

um tabuleiro de xadrez. Inicialmente, as moedas são aleatoriamente distribuídas nas quadrículas do tabuleiro, deixando algumas quadrículas vazias. A regra do jogo é bastante simples: se mais da metade das moedas que fazem vizinhança (moedas localizadas em quadrículas adjacentes) a uma moeda de 1 centavo for de 10 centavos, essa moeda é removida para uma quadrícula vazia no tabuleiro, escolhida arbitrariamente. Se nessa nova localização também predominarem moedas vizinhas de 10 centavos, essa moeda também será removida para uma nova localização, até que consiga encontrar uma quadrícula em que predominem moedas vizinhas de 1 centavo. Essa mesma regra é aplicada às moedas de 10 centavos. O jogo termina quando todas as moedas não precisam mais mudar de posição. Após diversos movimentos nas moedas, Schelling percebe que começam a surgir agrupamentos estáveis de moedas de 1 centavo e de moedas de 10 centavos, ou seja, emergem padrões significativos no tabuleiro, antes não previstos. Assim, as pequenas preferências locais individuais de cada moeda, chamadas pelo economista de micromotivos, definidas pela sua tolerância em ficar próxima de moedas de outro tipo, acabam por gerar notáveis padrões em níveis superiores ou macrocomportamentos inesperados e imprevisíveis.

O jogo simulado por Schelling pode ser facilmente associado ao processo de segregação urbana que acontece no mundo real. Para isso, basta que o tabuleiro de xadrez seja compreendido como o espaço urbano, onde cada quadrícula do tabuleiro representa uma casa ou um lote. As moedas, por sua vez, podem representar indivíduos pertencentes a dois diferentes grupos sociais: as moedas de 1 centavo, por exemplo, podem ser associadas aos indivíduos do grupo de baixa renda, e as moedas de 10 centavos, aos indivíduos do grupo de alta renda. Nesse contexto, as regras do jogo de Schelling representam ações ou comportamentos de cada morador de uma cidade que, em razão de seus diferentes preconceitos (gênero, idade, etnia, língua, religião, dentre outros), terminam por separá-lo fisicamente de outros indivíduos reconhecidos como diferentes dele mesmo. Esses comportamentos locais acabam gerando padrões globais que tendem a reforçar a percepção de diferença entre os grupos sociais, contribuindo para a formação de crenças negativas e antagonicas sobre os mesmos.

Schelling demonstra, portanto, por meio de um processo dinâmico explicitamente espacial, como, em uma cidade formada por indivíduos pertencentes a diferentes grupos sociais, podem emergir persistentes padrões de segregação espacial. Os padrões complexos globais resultam de escolhas locais de pessoas que perseguem suas preferências próprias. Assim, ações individuais a partir do nível micro geram efeitos no nível macro.

Um aspecto relevante no modelo de Schelling é que, mesmo as preferências iniciais dos indivíduos por ficarem próximos de alguns poucos vizinhos do mesmo grupo social forem relativamente pequenas, com o tempo começam a emergir, na cidade, padrões de segregação significativos. Tais padrões inesperados podem emergir, mesmo quando os atores, envolvidos no processo, os desconhecem ou não os desejam, ou seja, não são, necessariamente, resultantes de ações coordenadas, antecipadas, intencionadas ou controladas pelos agentes, pois esses estão preocupados exclusivamente com a composição social de sua vizinhança local. Não existe, portanto, um agente central que esteja coordenando a organização dos indivíduos em comunidades homogêneas. O processo é descentralizado e a sua estrutura final é imprevisível, porém apresenta padrões de regularidade globais. Esse modelo constitui uma das primeiras aplicações dos autômatos celulares em estudos urbanos.

### **As sociedades artificiais de Epstein e Axtell**

Apesar de seu pioneirismo diante das limitações computacionais da época, Schelling trata as pessoas como clones ou múltiplas cópias de um mesmo tipo de indivíduo que, apesar de se diferenciarem em cores ou grupos sociais, realizam as mesmas ações, têm a mesma preferência e capacidade de locomoção em todo o ambiente para encontrar sua melhor localização. Uma representação muito diversa, por exemplo, das diferentes condições, entre pobres e ricos, de acesso aos serviços e infraestrutura nas cidades reais. Além disso, todos os indivíduos são muito convictos do que desejam e possuem metas bem claras a ser alcançadas, funcionam como verdadeiros robôs programados para agir de um único modo durante toda a simulação. Na cidade real, entretanto, os padrões socioespaciais intraurbanos não resultam de decisões completamente racionais. São produtos de uma mistura de oportunidade e necessidade, de racionalidade e intuição (BATTEN, 2001, p.84). Outro problema é que o modelo Schelling é um sistema fechado, que ignora completamente sua dependência do ambiente exterior. Não considera, por exemplo, os processos de imigração e emigração que interferem sensivelmente no processo de segregação urbana.

Em meados da década de 1990, Joshua M. Epstein e Robert Axtell, cientistas sociais do Instituto Brookings em Washington, D.C., aperfeiçoam o modelo de Schelling, incluindo variações nas características de cada indivíduo e nas ações capazes de ser por eles realizadas, tornando-os heterogêneos e dinâmicos. Cada indivíduo passa a possuir habilidades específicas que os diferenciam dos demais. Além disso, não são somente capazes de se mover no espaço celular, mas também de realizar diversas outras atividades, como buscar comida, procurar parceiros, procriar, negociar

bens, migrar, morrer e deixar heranças. Epstein e Axtell (1996) simulam a evolução de uma sociedade artificial, complexa, não linear e desequilibrada, em que os indivíduos são representados por agentes que co-evoluem com o ambiente. Os agentes ocupam um ambiente, uma fração do total de células de uma matriz bidimensional, onde existem duas regiões ricas, em uma fonte renovável chamada pelos autores de “açúcar”. O modelo, chamado de Sugarscape, retrata uma sociedade selvagem, de acumulação capitalista, em uma constante luta pela sobrevivência, que reproduz a distribuição extremamente desigual da riqueza, assim como acontece na realidade com as sociedades humanas, em que poucos indivíduos possuem maior capacidade para obter riqueza, enquanto grande parte da população vive em relativa pobreza. Cada agente nasce com determinada taxa metabólica de açúcar e com certa acuidade visual para detectar esse alimento. Eles se movem de célula em célula de acordo com uma regra bastante simples: observar o mais distante que sua visão permitir um local desocupado com grande quantidade de açúcar, ir até esse local e ingerir o alimento. À medida que é consumido, o açúcar é reproduzido em uma taxa de intensidade predeterminada. Cada vez que um agente se move, ele perde certa quantidade de açúcar em função da sua taxa metabólica, também predefinida, e morre quando não consegue obter a quantidade suficiente de açúcar para exercer suas atividades.

Uma vez definidas essas regras básicas, o modelo começa a funcionar. Inicialmente, os agentes são distribuídos aleatoriamente no ambiente. Em poucos instantes, eles passam a se concentrar nas duas regiões de açúcar. Agentes com uma maior acuidade visual e uma menor taxa metabólica conseguem capturar uma maior quantidade de açúcar, vivendo um período de tempo maior. Outros, com baixa taxa metabólica e menor capacidade de visão, não conseguem visualizar suficientemente longe os locais com maior quantidade de açúcar e administram sua subsistência, obtendo apenas o suficiente para sobreviver nos piores locais com açúcar. Gradualmente, os pesquisadores começam a adicionar novos parâmetros aos agentes e ao ambiente do modelo original para examinar diversos fatores sociais que podem interferir no desenvolvimento de sua sociedade artificial, como crescimento populacional, migração, fome, epidemias, trocas comerciais, guerras, dentre outros.

Epstein e Axtell (1996) revelam a importância do papel pedagógico na modelagem urbana. Os simuladores podem ser comparados a “contadores de histórias” (BATTY; TORRENS, 2001), estão mais interessados em demonstrar como dinâmicas ricas podem ser geradas a partir de regras simples do que a tirar conclusões incertas. Desse modo, o papel mais fundamental é comunicar ideias, estimular debates e discussões, gerar

cenários que auxiliem na visualização e na identificação das estratégias, na tomada de decisões, dentro de um limite de soluções possíveis. A simulação torna-se o principal objetivo e pode ser entendida como um laboratório virtual para explorar os efeitos resultantes de condições inicialmente impostas. As experiências realizadas nesse laboratório geram resultados diversos ou diferentes versões de futuros possíveis, a partir de pequenas variações dos parâmetros iniciais. Apenas variando o parâmetro de média de esperança de vida, por exemplo, podem ocorrer oscilações populacionais e rápidos crescimentos demográficos. Microdinâmicas são suficientes de gerar eventos catastróficos. Portanto, modelos baseados em agentes não são preditivos, mas ferramentas exploratórias de sistemas complexos.

## Os agentes cognitivos de Portugali

Um aspecto importante a ser considerado na formulação de modelos é a capacidade de aprendizagem dos agentes. Com o tempo, os agentes podem fazer evoluir sua capacidade de reconhecimento de padrões emergentes. Quando isso ocorre, os padrões começam a afetar as ações dos indivíduos, resultando em um movimento em sentido contrário: de cima para baixo. A partir desse momento, as ações dos agentes passam a não depender apenas de suas escolhas pessoais locais, mas também em função de suas habilidades em reconhecer e se adaptar aos padrões existentes.

Portugali (1997) faz experimentações usando modelos de Agentes Livres em Espaço Celular (), os quais incorporam na sua estrutura propriedades de auto-organização e de teoria social para simular e investigar diferentes tipos de cidades. A resolução desses modelos está no nível dos lotes, das casas e dos indivíduos, e cada modelo é construído a partir do prévio, tornando-se cada vez mais sofisticado.

No modelo mais simples, os agentes são representados pelos estados de células, e suas características, pelas regras de transição, caracterizando-se como um exemplo típico de autômatos celulares. Nos modelos subsequentes, os agentes são caracterizados por um conjunto de atributos individuais (grupo étnico, status econômico, identidade cultural, atitude perante outros grupos, dentre outros). Estes modelos são compostos de dois submodelos: um chamado de infraestrutura, que descreve a estrutura física da cidade, e outro chamado de superestrutura, que descreve o comportamento espacial dos agentes na cidade.

Os agentes reagem aos estímulos de outros agentes e do ambiente e, ao mesmo tempo, representam “entidades cognitivas livres”, porque possuem capacidade evolutiva de aprendizado e agem intencionalmente de acordo com suas histórias pessoais, memórias, sentimentos e percepções (mapas cognitivos) da cidade. Cada um tem a habilidade de construir uma representação particular

da cidade no nível local da sua vizinhança e no nível global da cidade como um todo, se comportando de acordo com as informações obtidas nesses dois níveis.

Um atributo de um agente livre pode ser alterado pela sua interação com outros agentes, criando novos tipos de agentes. Cada agente possui uma identidade cultural, um código genético que o descreve como uma unidade multidimensional e qualitativa (PORTUGALI; BENENSON, 1997). A mudança da identidade cultural de um agente só altera um dígito de seu código, fazendo surgir novos tipos de agentes, aumentando, assim, a diversidade sociocultural da cidade. Desse modo, agentes localizados entre áreas urbanas ocupadas por dois grupos sociais distintos, por exemplo, tendem a mudar sua identidade cultural, por receber a influência das identidades de ambos os grupos, passando a ter uma nova identidade, diferente dos mesmos.

A mudança dos atributos e do comportamento de um agente resulta de uma "dissonância cognitiva" (FESTINGER, 1956 apud PORTUGALI, 1997), que representa um estado de oposição, tensão ou inconsistência entre suas intenções e comportamentos, fazendo com que o mesmo adquira novos valores ou modifique seus próprios valores de modo a minimizar essa dissonância.

A dissonância cognitiva do agente ocorre em função da dinâmica e evolução da cidade, e é apreendida pela sua habilidade de assimilação da informação obtida em diferentes níveis da estrutura auto-organizativa da cidade. As informações em nível local estão relacionadas com a diferença entre a identidade do agente e a identidade de seus vizinhos. As informações em nível global são determinadas pelo nível de segregação residencial do grupo social de que o agente faz parte (PORTUGALI; BENENSON, 1997).

Informações global e local influenciam os atributos e o comportamento do agente, fazendo com que o mesmo decida continuar a ocupar uma casa, mudar de localização residencial, imigrar para a cidade ou emigrar da mesma quando as condições são insatisfatórias. Alta dissonância cognitiva local força o agente a mudar sua identidade, e alto nível de segregação força-o a preservá-la. Assim, a identidade de um agente pode ser mudada quando a tendência local para mudar a identidade excede a tendência global para preservá-la (Ibidem, 1997).

Os resultados obtidos nesses modelos revelam a emergência de padrões sociais estáveis coexistindo com outros que se mantêm instáveis. A cidade tende a ficar cada vez mais segregada, mas seus padrões socioculturais não se estabilizam, ou seja, a estrutura intraurbana evolui para um estado de auto-organização crítica, com a permanência de diversas áreas socioculturais instáveis que, ao mesmo tempo,

preservam a sua diversidade cultural e sua habilidade para mudanças. A estrutura intraurbana que persiste é uma mistura, em diferentes níveis, de áreas socioculturais homogêneas, ocupadas por indivíduos com certa identidade sociocultural, e áreas com populações heterogêneas. Os grupos socioculturais existentes e sua evolução dependem da situação emergente, e seus padrões espaciais são muito diversos e não podem ser antecipados.

## Considerações Finais

Os três modelos apresentados representam avanços significativos na compreensão da segregação urbana. Esses modelos assumem que os padrões socioespaciais são complexos, dinâmicos, incertos, instáveis e dependentes das condições inicialmente estabelecidas. Diversos resultados são possíveis de ser obtidos e, por esse motivo, esses modelos são menos orientados para fazer julgamentos e previsões, sendo mais caracterizados como ferramentas de exploração do espaço urbano, com vista à construção de ideias sobre a cidade. Permitem estudar como a interação entre os agentes e desses com o ambiente faz emergir padrões emergentes que não podem ser deduzidos simplesmente pela agregação das propriedades dos agentes. Os modelos mais recentes desenvolvem agentes capazes de reconhecer padrões existentes e mudar as suas características e o seu comportamento em função desses padrões.

Apesar dos avanços, modelos baseados em autômatos celulares e em agentes ainda apresentam certas limitações. A regularidade do ambiente onde atuam os agentes é uma das maiores restrições para a aplicabilidade desses modelos a áreas urbanas reais. O ambiente é, geralmente, um espaço celular quadrado, bidimensional, plano, com fronteiras rígidas e bem definidas. Não existem obstáculos, elevações e depressões nesse ambiente, nem os agentes interagem com um número diversificado de vizinhos (HAYES, 1999). Além disso, muitos modelos acabam perdendo o vínculo com a ideia de emergência, quando se tenta transformar essa ferramenta heurística em algo estritamente operacional (SOBREIRA, 2002). O excesso de calibrações e ajustes pode acabar ditando resultados que a princípio deveriam emergir naturalmente. A simplicidade desses modelos é um de seus grandes trunfos e, se forem encarados como ferramentas estritamente operacionais, acabam distorcendo suas vantagens intrínsecas de revelar fenômenos socioespaciais complexos.

## Referências

BARROS FILHO, M. N. M. . Recife: Editora do autor, 2009.

BATTEN, David F. Complex landscapes of spatial interaction. , Berlin, n.35, p. 81-111, 2001.

BATTY, M.; TORRENS, P. Modeling complexity: the limits to prediction. In: , Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, London, n.36, 2001. Disponível em: <http://www.casa.ucl.ac.uk/working\_papers/paper36.pdf >. Acesso em: 16 ago. 2006.

EPSTEIN, J.; AXTELL, R. : social science from the bottom up. London: MIT Press, 1996.

HAYES, Brian. E Pluribus Unum. , New Haven (US), v. 87, n. 1, p. 10-14, jan./fev. 1999.

PORTUGALI, J. . Berlin: Springer-Verlag, 1997.

PORTUGALI, J.; BENENSON, I. Individuals cultural code and residential self-organization in the city space. In: . 2., 1997, Nova Zelândia. Anais... Nova Zelândia: University of Otago, 1997.

SCHELLING, T. C. Dynamic models of segregation. In: , London (GB), n. 1, p. 143-186, 1971.

SOBREIRA, F. : complexidade e dinâmica em assentamentos espontâneos. 2002. 216 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Urbano. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2002.