



Autômatos celulares no contexto da modelagem dinâmica: desafios da modelagem de espaços urbanos

Cellular automata in the context of dynamic modeling: challenges in modeling urban areas

Vandré Soares Viégas*  , Carla Bernadete Madureira Cruz  , Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza  

Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: carlamad@gmail.com (CBMC); elizabethmfr@gmail.com (EMFRS)

*E-mail para correspondência: v.vegas18@gmail.com

Recebido (Received): 20/01/2021

Aceito (Accepted): 31/05/2021

Resumo: A ciência da resolução de problemas espacialmente dispostos foi sendo modificada a partir de novos paradigmas, conceitos e inovações científicas em curso. A abordagem sistêmica permitiu, especialmente na Geografia, a criação de modelos como ferramentas que podem contribuir de maneira significativa para a compreensão de fenômenos terrestres e auxiliar na tomada de decisão. Modelos podem ser classificados de diversas maneiras e segundo sua abordagem. No campo da modelagem dinâmica há um grande desafio de estruturar modelos capazes de retratar a diversidade de objetos e ações que são modificados no espaço e no tempo, um grande desafio, principalmente em áreas urbanas. Neste sentido, o presente artigo busca construir uma revisão teórico-conceitual destacando a utilização de diferentes abordagens a partir dos desafios e potencialidades encontradas em sua utilização para a modelagem de espaços urbanos. A integração de diferentes interações espaciais e a necessidade de incorporá-las com a dimensão temporal é traduzida na utilização dos autômatos celulares como um procedimento capaz não só de retratar os fenômenos mais fielmente, mas também de associar respostas a curto prazo e prever quais seriam as possíveis trajetórias e resultados de intervenções propostas em cenários do tipo: e se? Analisa-se, desta forma, a utilização de autômatos celulares, sua abordagem histórica e como são incluídos hoje em sistemas de informações geográficas. Iniciativas desta natureza trazem novas perspectivas para os estudos geográficos, auxiliando na compreensão das ações que estão em curso e que poderão gerar os mais diferentes tipos de cenários.

Palavras-chave: Modelos Espaciais Dinâmicos; Modelos de Simulação Espacial; Matriz Celular; SIG.

Abstract: *The science of solving spatially arranged problems has been modified from new scientific paradigms, concepts and innovations in progress. The systemic approach allowed, especially in Geography, the creation of models as tools that can significantly contribute to the understanding of terrestrial phenomena and assist in decision making. Models can be classified in different ways and according to their approach. In the field of dynamic modeling, there is a great challenge to structure models capable of portraying the diversity of objects and actions that are modified in space and time, a great challenge, especially in urban areas. In this sense, this article seeks to build a theoretical-conceptual review highlighting the use of different approaches based on the challenges and potential found in its use for the modeling of urban spaces. The integration of different spatial interactions and the need to incorporate them with the temporal dimension is translated into the use of cellular automata as a procedure capable not only of portraying the phenomena more faithfully, but also of associating short-term responses and predicting what would be the possible trajectories and results of proposed interventions in scenarios such as: what if? In this way, the use of cellular automata is analyzed, their historical approach and how they are included today in geographic information systems. Initiatives of this nature bring new perspectives to geographic studies, helping to understand the actions that are underway and that may generate the most different types of scenarios.*

Keywords: *Dynamic Space Models; Spatial Simulation Models; Cellular Automata; GIS.*

1. Introdução

A concepção mecanicista do funcionamento do planeta Terra ainda está na base da maioria das ciências e continua a exercer uma enorme influência em muitos aspectos da vida contemporânea (CARVALHO, 2019). A resolução de problemas associados a fenômenos terrestres foi sendo modificada de acordo com novas percepções, conceitos e interações metodológicas que variam a cada paradigma científico em curso. O paradigma Newtoniano-Cartesiano influenciou muitas áreas da ciência de acordo com a proposta de abordagens causa-efeito. A norma Newtoniana-Cartesiana parte do princípio que nos sistemas complexos o comportamento do todo pode ser entendido inteiramente a partir das propriedades de suas partes, ou seja, o universo é concebido como um sistema mecânico que consiste em objetos separados, cujas propriedades e interações determinam completamente todos os fenômenos naturais (CAPRA, 1996).

Dentre algumas grandes mudanças de paradigma ocorridas no século XX, com relação a ciências ambientais, uma das mudanças mais relevantes foi a percepção de que os sistemas complexos não podem ser entendidos por análises fragmentadas, mas que sua análise só pode ser concebida de acordo com um contexto mais amplo. Novos conceitos e percepções levaram à compreensão de que muitos dos fenômenos terrestres só poderiam ser analisados em conjunto com seus relacionamentos e atributos, culminando na compreensão sistêmica. Capra (1992) destaca que na *“abordagem sistêmica, as propriedades das partes podem ser entendidas apenas a partir da organização do todo. A análise significa isolar alguma coisa a fim de entendê-la; o pensamento sistêmico significa colocá-la no contexto de um todo mais amplo”*

Kuhn (2007) afirma que um paradigma se baseia nas realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções modelares para uma comunidade de praticantes de uma ciência. A afirmação parte do princípio que as ciências também são construções humanas e, conseqüentemente, também são construções históricas. Tomando a Geografia como cenário, durante as décadas de 1950 e 1960, a disciplina passou por profundas transformações, culminando na chamada Revolução Teorético-Quantitativa. As transformações decorrentes da abordagem Quantitativa e Teorética, segundo Christofletti (1985), ocorreram na tentativa de incluir a Geografia no contexto científico global por meio de um maior rigor na aplicação da metodologia científica, com destaque para o aumento do uso de técnicas estatísticas, de modelos e da abordagem sistêmica.

A construção de mapas cada vez mais precisos, a descrição das paisagens alteradas em um curto espaço de tempo, o destaque de fenômenos até então “invisíveis” devido a limitações tecnológicas, podem ser destacados como alguns dos benefícios decorrentes da aproximação quantitativa. Contudo, as técnicas e modelos desenvolvidos a partir de uma mudança de paradigma, não responderam totalmente às questões dos geógrafos. Conforme destacado por Gomes (2000), a ciência não deve se ocupar apenas em descrever as diferentes paisagens, como um longo inventário de formas regionais, é necessário interpretar essas formas como o resultado de uma dinâmica complexa.

As Ciências da Terra reconhecem modelos como ferramentas poderosas que podem contribuir significativamente para a compreensão do comportamento de um sistema e para auxiliar na tomada de decisões e políticas que afetam nosso planeta e sociedade, em escalas que variam do local ao global (GOMEZ & JONES III, 2010). Um modelo pode ser definido como uma estrutura simplificada do funcionamento de um aspecto do mundo real (CHORLEY, 1967). Contudo, por ser uma estrutura simplificada, modelos são construídos para retratar fenômenos em escalas específicas, destacando somente suas características fundamentais.

Uma vez que tais representações não são retratos espelhados, este tipo de construção pode ser modificado à medida que o pesquisador procura, dentro de seus objetivos, por perguntas críticas, como “Porquê”; “Quando”; “Onde”; “E se?”. O mundo real é essencialmente dinâmico e suas conexões acontecem em diferentes escalas, de espaço e tempo. Um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais dinâmicos (PEDROSA; CÂMARA, 2002).

Conforme mencionado por Liu (2009), na Geografia os termos modelo e modelagem receberam interpretações muito amplas na década de 1960. Em Hagget e Chorley (1967) modelos podem ser entendidos como uma teoria, uma lei, hipótese ou ideia estruturada, uma relação, um mapa, um gráfico, ou hardware organizado para fins experimentais. Liu (2009) cita ainda que essa definição ampla de modelo foi restringida pelos geógrafos físicos a *“qualquer regra que gere saída de entradas, ou em outras palavras qualquer dispositivo ou mecanismo que gere uma previsão”* (HAINES-YOUNG; PETECH, 1986), excluindo-se modelos da categoria de leis ou hipóteses, permitindo a análise crítica de teorias que vão além da visão hipotética e se estendem para os demais campos da disciplina geográfica. Afinal, se a partir de tais análises é possível questionar, por que modelar?

A modelagem pode ser aplicada por várias razões. Longley *et. al.*, (2013) apontam dois argumentos interessantes para enriquecer o debate: “primeiro, um modelo pode ser construído para apoiar uma decisão no qual o usuário busca uma solução espacial como apoio a uma decisão. Segundo, um modelo pode ser concebido para permitir que o usuário faça experiências em uma réplica do mundo ao invés de fazê-lo na realidade”. O cerne do debate se dá pelo entendimento de que nem todas as relações espaço-temporais dos fenômenos são aparentes no mundo real. Considerando que a “finalidade de qualquer modelo é simplificar a realidade” (BATTY, 1976), a utilização destas representações se mostra útil quando os experimentos aplicados na realidade não podem ser concebidos por uma questão de custos e limitações referentes às regras ambientais, leis, ou quando a escala geográfica de análise é grande o suficiente para limitar qualquer tipo de ação prática. Experimentos incorporam a noção de cenários “o que ocorre se?” ou alternativas de políticas que podem ser conectadas a um modelo, de forma a avaliar seus resultados (LONGLEY *et al.*, 2013). Contudo, vários cenários podem ser gerados ou possibilitados por diferentes tipos de modelos disponíveis.

Desta maneira, o trabalho objetiva construir uma revisão teórico-conceitual no contexto da modelagem dinâmica, destacando a utilização de autômatos celulares a partir dos desafios e potencialidades encontradas em sua utilização para a modelagem de espaços urbanos.

2. Classificações de modelos espaciais

Modelos podem ser classificados de diversas maneiras segundo diferentes abordagens. Cientistas divergem quanto às tipologias de classificação, devido, principalmente, às abordagens escolhidas pelos seus objetos de estudo (LIU, 2009). Contudo, mesmo havendo diferenças quanto aos nomes, há aproximações no que se refere ao objetivo ou às classes de tipologia definidas por tais autores, tendo-se certa concordância quanto a diferenciação estática ou dinâmica dos modelos. Em primeira análise, Longley *et al.*, (2013) apontam que abordagens estáticas se referem a um único ponto no tempo, se baseiam na busca por anomalias que levam a novas hipóteses. Como um exemplo de modelo estático pode-se considerar a Equação Universal de Perda de Solos (*Universal Soil Loss Equation - USLE*), onde o cálculo é feito a partir do produto entre a erosividade da chuva, fator de erodibilidade do solo, fator topográfico, cobertura do solo e práticas de manejo. A USLE é particularmente útil como um indicativo de mudanças do solo. Na modelagem estática são desconsiderados os ciclos de ocorrência, ou passos temporais. Indicadores, como perda de vegetação e de vulnerabilidade também podem ser considerados como modelos estáticos. Também vale destacar outros tipos de modelos estáticos que não são necessariamente contidos em ambiente digital, tais como o Modelo dos Lugares Centrais de Christaller, e aqueles utilizados para predição de cenários econômicos.

Por outro lado, modelos também podem considerar a dinâmica de fenômenos terrestres em abordagens mais amplas. Modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo (PEDROSA; CÂMARA, 2002). Liu (2009) propõe uma divisão de tipos de modelos baseados no grau de simplificação e abstração. No livro “*Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata*” Liu (2009) preconiza a subdivisão de modelos em escala, conceituais e matemáticos. O grau mais simples de abstração ocorre quando a realidade é alterada apenas em termos de escala. Modelos em escala podem ser entendidos como uma miniaturização da realidade, como em maquetes projetadas por arquitetos ou engenheiros, ou até mesmo mapeamentos táteis que são úteis para o ensino de crianças como forma lúdica de compreensão de aspectos naturais, como o relevo.

Em um maior nível de abstração tem-se os modelos conceituais focados nas relações entre diferentes componentes da realidade. O resultado deste tipo de modelagem pode ser dado em forma de diagrama ou verbalmente (Liu, 2009). Esta categoria de modelo pode ser utilizada para compreender fenômenos que não estão necessariamente claros a priori, mas que suscitam dúvidas do pesquisador, como a relação entre alterações de uso da terra e a renda local. Liu (2009) acrescenta que os modelos no nível mais alto de abstração são os modelos matemáticos, sendo esta a categoria mais usada. Contudo, como destacado anteriormente, modelos matemáticos também podem ser divididos segundo diferentes subclasses. Liu (op.cit) ainda resume algumas das principais classificações que aparecem com maior frequência com relação ao objeto de estudo na modelagem urbana, tendo como base as proposições de Robinson (1998); Robinson (1998); Batty (1976); Kilbridge *et al.*, (1970); Haggett e Chorley (1967). As tipologias de modelos matemáticos são apresentadas pela **Tabela 1**.

Tabela 1: Diferentes classificações de modelos (Adaptado de Liu, 2009)

Critério de Classificação	Tipos de Modelos	Explicação dos Critérios de Classificação
Modelos de Base Teórica	Modelos Baseados em Teorias	Modelos são derivados diretamente de uma teoria como uma homologação da teoria.
	Modelos “ <i>Theory-Laden</i> ”	Os fenômenos do mundo real são abstraídos de formas simbólicas e estão relacionados estruturalmente em um modelo, para criar uma nova teoria.
Questões importantes sendo modeladas	Modelos Parciais	Os modelos lidam com apenas uma parte do sistema que está sendo modelado ou um subsistema da realidade.
	Modelos Gerais	Modelos que tentam lidar com dois ou mais subsistemas da realidade que está sendo modelada.
Características descritivas ou normativas	Modelos Descritivos	Os modelos descritivos lidam com alguma descrição estilística da realidade.
	Modelos Normativos	Os modelos normativos lidam com o que se espera que ocorra nas condições estabelecidas.
A forma como os modelos lidam com o tempo	Modelos Estáticos	Modelos que se concentram nas características estruturais de equilíbrio
	Modelos Dinâmicos	Modelos concentrados em processos e funções através do tempo.
A natureza preditiva dos modelos	Modelos Determinísticos	Os modelos são baseados na noção de previsão exata, que é produzida por leis naturais e físicas.
	Modelos Estocásticos	Eles também são chamados de modelos probabilísticos, que envolvem o uso de probabilidades e produzem uma gama de resultados possíveis, em vez de uma única previsão.
Procedimento de solução de modelos	Modelos Analítico	Os procedimentos de solução analítica são diretos e não envolvem nenhuma forma de iteração
	Modelos de Simulação	As soluções nesses modelos são alcançadas gradualmente em etapas.

Novaes (1981) propõe que modelos podem ser classificados como: modelos descritivos, exploratórios, operacionais e preditivos. Modelos descritivos descrevem apenas o entendimento do funcionamento de um sistema, modelos exploratórios envolvem a análise paramétrica de vários estados, por meio de variações nos elementos dos sistemas e nos seus relacionamentos, sem interferências externas. Já os modelos operacionais possibilitam a inferência do modelador o qual pode introduzir fatores exógenos nos componentes do sistema e nos seus relacionamentos, de modo a alterar seu comportamento. Por fim, modelos preditivos fazem parte de uma categoria própria de modelos exploratórios que envolvem a variável tempo, compreendendo a projeção temporal dos elementos que se deseja analisar, seja retratando o presente ou predizendo o futuro. Além disso, o modelo deve ter respostas para indicar as variáveis ambientais e culturais, os processos ecológicos e socioeconômicos que contribuem e caracterizam a ocorrência de determinado fenômeno, também precisam explicar sua evolução e espacializa-lo (LAMBIN, 1994)

Já Pedrosa e Câmara (2002), entendem as subdivisões de tipos de modelos a partir da constituição de três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Dependendo do objetivo do modelo, é possível destacar algum destes elementos em detrimento dos demais. Na visão de Pedrosa e Câmara (2002), modelos podem ser classificados como empíricos e de sistemas.

Modelos empíricos se baseiam na continuidade futura de processos observados no passado focando no relacionamento entre as variáveis contidas no modelo. Modelos empíricos possuem três componentes chaves: uma configuração inicial, uma função de mudança e uma configuração de saída (PEDROSA; CÂMARA, 2002). O *input* (configuração de entrada) do modelo pode ser proveniente de séries históricas de

alguma mudança de uso da terra, enquanto as funções de mudanças são dadas por meio de equações que incluem a variável tempo. Modelos empíricos são classificados como determinísticos e podem ser estocásticos ou, em outras palavras, aqueles que utilizam variáveis aleatórias. Cadeias de Markov, modelos logísticos e de difusão, podem ser considerados como exemplos de modelos empíricos. Entre as vantagens da utilização destes modelos, pode-se considerar a simplicidade operacional matemática associada e não necessitar de uma grande base de dados históricos. Já as limitações incluem restrições quanto à dimensão espacial (Onde), a não concepção das causas do fenômeno e considerar os processos como estacionários, os que não se alteram com o tempo (Cadeias de Markov).

Já os modelos de sistemas buscam descrever o sistema como um todo, ou seja, tentam representar as interações entre todos os componentes contidos (PEDROSA; CÂMARA, 2002). Diferente dos modelos empíricos, a abstração sistêmica é eficiente quanto a abordagem espacial, com foco especial em técnicas de análise das relações de vizinhanças e possibilidade de utilização de dados em diferentes escalas, sendo utilizados especialmente em modelos de simulação. Modelos de sistemas podem ser diferenciados em duas classes gerais: Simulação de Ecossistemas e Simulação Dinâmica Espacial (PEDROSA; CÂMARA, 2002).

Modelos de ecossistemas são projetados para imitar o comportamento de um sistema e são baseados na composição de ecossistemas complexos em um número de equações diferenciais (PEDROSA; CÂMARA; 2002 LAMBIN, 1994). Modelos ecossistêmicos exigem integração entre os elementos ou variáveis e podem considerar a variável temporal, sendo adequados para representar processos não estacionários, mas também há limitações quanto ao aspecto espacial, pois tratam o espaço como uma entidade homogênea (LAMBIN, 1994).

Modelos de Simulação Dinâmica Espacial se baseiam na heterogeneidade espacial da paisagem. Entre diferentes abordagens, destaque-se a representação do espaço como uma matriz de células associadas a aplicação de equações matemáticas aplicadas a cada uma das células da matriz, simultaneamente (PEDROSA; CÂMARA, 2002). A representação da simulação dinâmica espacial em formato de matriz pode ser denominada como modelo celular. São particularmente úteis quando associadas a dados matriciais (*raster*) provenientes de sensoriamento remoto, à medida que esta representação imagética também é considerada uma matriz. Em um processo de simulação, é modelada a dinâmica de um sistema, reproduzindo-se, em ambiente computacional, a complexidade de seus mecanismos que operam através de processos de trocas de materiais, energias, informação entre os componentes ou elementos do sistema (SOARES-FILHO *et al.*, 2007). Cada célula do modelo é analisada de acordo com o escopo de suas células vizinhas, associadas a um conjunto de regras de transição que podem indicar ou não possíveis mudanças.

Lévy (1998), Soares-Filho (2007) destacam que, dentre os gêneros aportados pela cibercultura, a simulação ocupa um lugar central, constituindo um importante dispositivo heurístico, que só se tornou viável graças ao recente desenvolvimento científico, tanto na computação como em termos de modelagem de sistemas. Ao possibilitar a extração de características mais fiéis dos territórios geográficos, os modelos de simulação favorecem a concepção de cenários que sequer foram cogitados nas intervenções ambientais. Tais situações podem ser esclarecidas à medida que modelos de simulação auxiliam o entendimento de mecanismos causais dos fenômenos, e de que maneiras os fatores circundantes atuam para sua ampliação, decréscimo ou alterações de dinâmicas. São, portanto, um meio científico para o teste de hipóteses.

3. Autômatos celulares e a modelagem urbana

De acordo com as tipologias expostas anteriormente, é possível notar uma gama de modelos que não objetivam a operação sobre uma dimensão espacial. Como destacado, modelos podem ser utilizados segundo diferentes focos e abordagens. O espaço urbano, especialmente, surge como um campo de estudo muito relacionado com modelos espaciais dinâmicos. Por se tratar de um espaço fragmentado, associado a diversas formas, funções e estruturas, a atividade antrópica em si mostra-se bastante complexa de ser modelada, principalmente por estar associada a relações espaço-temporais bastante profundas, que nem sempre são visualizáveis. A modelagem atua pela capacidade de revelar os padrões ocultos dos fenômenos terrestres.

A Ciência da Geoinformação, por se tratar de um campo interdisciplinar, tem colaborado com a compreensão de certas dinâmicas de modo que é possível traçar previsões. Ao mudar o paradigma de “*Space First*” (onde os estudos consideravam o espaço como fator preponderante em oposição a outros fatores) para “*Time First*” (maior importância a variável temporal), novas compreensões foram sendo adaptadas. As componentes ambientais, além de seu contexto espacial ou resposta espectral em uma imagem de sensoriamento remoto, também possuem uma assinatura que é a sua própria dinâmica. Isso significa dizer que a agricultura apresenta uma dinâmica diferente da floresta, que por sua vez possui dinâmica diferente do urbano. Na agricultura, o arroz, o café, a cana, a soja e o milho possuem dinâmicas próprias. Na floresta,

espécies diferentes também possuem dinâmicas singulares. Com o ambiente urbano não seria diferente, diferentes estruturas possuem diferentes dinâmicas.

Atualmente, a quantidade de dados, informações e conexões de pessoas, conhecimentos ou tecnologias, compõem um cenário onde a observação das transformações ocorre de maneira muito rápida, em que a tomada de decisão se dá de forma quase instantânea. Tendo em vista a necessidade de integrar o espacial e o temporal, busca-se por maneiras capazes não só de retratar os fenômenos mais fielmente, mas também associar respostas a curto prazo e prever quais seriam as possíveis trajetórias e resultados de intervenções propostas. Em Couclelis (1997), tais questões são chamadas de “*What If?*” ou “*E Se?*”.

O desafio percebido, principalmente nas primeiras gerações de modelos dinâmicos, foi a integração de diferentes interações espaciais e a necessidade de incorporá-las com a dimensão temporal. Além da composição espacial e temporal, é necessário atribuir uma visualização espacial dos resultados, de modo que possa alterar os inputs de um sistema e verificar suas respostas mediante a inserção ou exclusão de variáveis. Efetivos avanços na representação espacial de modelos urbanos ocorreu apenas no final dos anos 80, quando modelos de autômatos celulares (*Cellular Automata - CA*) começaram a ser utilizados em larga escala (ALMEIDA, 2003).

A representação espacial de modelos urbanos por CA teve seus avanços na década de 80, especialmente porque pesquisadores na área da computação mostraram que a não linearidade do processo iterativo de CA leva a padrões fractais regulares, ou seja, a padrões espaciais ordenados que geram geometrias semelhantes em diferentes escalas (SANTÉ *et al.*, 2010). Tais estruturas fractais, derivadas de fenômenos complexos, são características de desenvolvimentos urbanos (BATTY, 1991, BATTY; LONGLEY, 1994, LONGLEY; MESEV, 2000). CA são fundamentados na Teoria do Caos, que trata de fenômenos que podem ter seu comportamento ou trajetória completamente modificados pela inserção ou retirada de variáveis referentes às suas condições iniciais. O modelo celular simula os processos de desenvolvimento de um fenômeno no espaço e no tempo, que podem ser usados para testar a criação de cenários “*What If?*”, especialmente no desenvolvimento urbano. De acordo com a Tabela 1, os CA se encaixam na categoria de modelos baseados em teoria. São também modelos gerais quanto à relevância das questões modeladas. Descritivos e normativos por natureza, dinâmicos ao longo do tempo, por meio do processo de simulação (LIU, 2009). Na visão de Novaes (1981) são Modelos Exploratórios Preditivos e em Pedrosa e Câmara (2002), considerados como Modelos de Simulação de Dinâmica Espacial.

A aplicação de CA na análise ambiental, não nasce necessariamente da Ciência Geográfica, mas é adaptada e aprimorada por ela. Baseando-se nos primórdios da computação, os autômatos celulares nascem da concepção de cientistas como John von Neumann, que utilizou o primeiro conceito de célula automatizada em algoritmos que deveriam se auto-reproduzir dentro de um espaço celular. O conceito evoluiu de tal forma que em 1970 o matemático John Holton Conway criou o “*Game of Life*”, que pode ser compreendido como um autômato celular que simulava alterações do status de uma célula, dentro de um espaço composto de uma grade regular bidimensional.

Conforme explicado por Almeida (2003), ainda na década de 70, Tobler (1970), com direta influência da Geografia quantitativa, propôs modelos celulares para o desenvolvimento de Detroit, posteriormente em 1974 o pesquisador começa a explorar a forma pela qual AC poderiam ser aplicados a sistemas geográficos, o que resulta no artigo “*Cellular Geography*” (TOBLER, 1979). Provavelmente influenciados pela obra de Tobler (1979), é na década de 1980 que CA ganha suporte teórico mais aprofundado e começam a ser utilizados para investigação de questões urbanas, influenciados também pelo desenvolvimento da computação gráfica, teoria da complexidade, caos, fractais e afins (BATTY *et al.*, 1997).

Couclelis (1985) foi uma das primeiras pesquisadoras a apresentar um modelo hipotético baseado em CA voltado para áreas urbanas. O objetivo por trás da utilização destes modelos era encontrar possíveis correlações que permitissem explicar as regras que favoreceram a transição de um estado não urbano para urbanizado. Este é um método particularmente interessante para a análise de áreas urbanas, a medida que essa conversão de uso da terra depende de diversos fatores a citar: declividade, rotas de transporte, zoneamento, unidades de conservação, proximidade com corpos hídricos. Fazendo um paralelo com o *Game of Life*, quanto mais urbanizado for o contexto de vizinhança de um conjunto de células, provavelmente, haverá maior chance de transição de uma área não urbanizada para urbanizada.

Um dos resultados teóricos mais relevantes obtidos na década de 1980 é a investigação da mecânica por trás dos conceitos, que permitiram a incorporação de CA em diversas outras disciplinas como a Biologia, a Matemática e a Computação. Stephen Wolfram (1982) elabora o conceito que hoje é o mais citado em estudos que utilizam o método de AC, ao contribuir que autômatos celulares são idealizações matemáticas de sistemas físicos, no qual espaço e tempo são discretos, consiste de uma grade regular uniforme (pixel no

sensoriamento remoto), com uma variável discreta em cada localidade, as variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente, baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto predefinido de “regras locais” (WOLFRAM, 1983).

Modelos de simulação espacial baseados em autômatos celulares têm se tornado populares, especialmente nos últimos 15 anos, sendo acoplados em diferentes softwares de Sistemas de Informações Geográficas a citar: DINAMICA EGO, IDRISI, *Land Transformation Model* (LTM). Simulador do Ambiente da Cidade (SACI) entre outros utilizados como plugins em diversos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O avanço no uso dos CA e sua convergência com SIG tem permitido aos especialistas desenvolver estudos preditivos em diversas áreas e fenômenos, como espalhamento de fogo (HARGROVE *et al.*, 2000), epidemias (Sirakoulis *et al.*, 2000), dinâmica florestal na bacia Amazônia (SOARES-FILHO, 2001), crescimento urbano e mudanças de uso e cobertura do solo (SOARES-FILHO *et al.*, 2002, Almeida *et al.*, 2003, CLARKE; GAYDOS, 1998).

4. O desafio da aplicação de CA em ambiente SIG

Martin (1996) e Bonham-Carter (1996) associam a rápida evolução dos SIG ao crescimento massivo do interesse do manejo da informação geográfica por métodos computacionais (Menezes e Fernandes, 2013). A atividade dos SIG se tornou explicitamente mais intensa na década de 1990 sobretudo devido ao desenvolvimento computacional, com o progresso de sistemas e estudos bastante consolidados. Considerando o volume de dados geoespaciais disponíveis, principalmente o conjunto relativo aos dados de observação da Terra, o potencial de análise e elaboração de modelos preditivos se amplia. Por outro lado, os problemas têm demandado soluções mais complexas, tanto pela abrangência espacial quanto em profundidade temporal. Lidar com fenômenos geográficos que contam com diferentes variáveis, nem sempre observáveis *in loco*, exige a adoção de modelos integrativos. O suporte computacional dado aos SIG tem contribuído em áreas de Inteligência Artificial, Redes Neurais e Autômatos Celulares (BURROUGH; FRANK, 1996; OPENSHAW, 1997).

Liu (2009) destaca que alguns modelos de CA foram desenvolvidos em softwares customizados, fora do ambiente SIG, embora a maioria fosse vagamente acoplada para manipulação e visualização de dados. No geral, os modelos desenvolvidos eram projetados para atender necessidades que não eram necessariamente geográficas. Fatores como o espaço, vizinhança, flexibilidade e interatividade que hoje são notados na integração com SIG, não eram considerados antes das aproximações com a ciência geográfica, isso porque no que Couclelis (1985) denominou como “convenção de fundo”, o conjunto de regras matemáticas rígidas nas primeiras gerações de CA limitavam a capacidade de simular fenômenos geográficos de forma realista.

Os componentes básicos, clássicos ou “convenções” dos CA incluem espaço celular, célula, vizinhança, etapas de tempo e regras de transição (YEH *et al.*, 2021). Formalmente, o conceito de CA envolve a subdivisão do espaço em grades retangulares cuja unidade espacial básica são quadrados uniformes, com vizinhança igual para todas as células e regras de transição simplificadas, enquanto o tempo era aquele necessário para que uma célula pudesse assumir dois estados: viva ou morta, baseando-se na concepção de Conway em *Game of Life*. Embora a abordagem de *Game of Life* seja o autômato celular mais citado, e o que representa a abordagem clássica, é também a perspectiva que tem menor propósito e capacidade de representar fenômenos do mundo real. A não adequação para análises reais se dá em duas frentes. Couclelis (1997) lembra que em primeiro lugar, existem células que são objetos em qualquer espaço dimensional, mas que devem manifestar alguma adjacência ou proximidade uma das outras se quiserem se relacionar da maneira prevista no modelo. A autora pontua, em segundo lugar, que na abordagem clássica a célula só pode possuir estados binários por vez, no *Game of Life*: vivo ou morto. As regras de transição clássicas atuam em função da vizinhança adjacente, ou seja, propõe mudanças locais, sem ação ou diferenciação conforme se aumentam as distâncias.

Levando em conta que o fenômeno da urbanização conta com diferentes graus de diferenciação, multiplicidade de estados de ocorrência em múltiplas escalas e regras de transição complexas, as exigências clássicas tiveram de ser adaptadas nos SIG, aumentando a potencialidade do uso de CA. A adaptação à simulação urbana exige a compreensão que o urbano é um sistema aberto de muitas multiplicidades e, portanto, era necessário introduzir maior complexidade nos modelos. Para tanto, Couclelis (1997), Santé *et al.*, (2010) listam algumas das modificações mais comuns das lógicas de modelagem adotadas nos SIG atuais, que incluem:

- a) **Espaço celular irregular:** Tendo em vista a regularidade do espaço celular da abordagem de Conway, dispostas em células quadradas, alguns autores propõem a utilização de células com outros formatos

geométricos como polígonos de Voronoi. As matrizes podem ser bidimensionais, como mapas de uso e cobertura da terra, ou podem ser tridimensionais, permitindo representar o crescimento vertical urbano.

- b) Espaço celular não uniforme:** Nas regras clássicas, o espaço celular é homogêneo, com células idênticas modificadas exclusivamente pelo estado das células vizinhas. A adaptação que é hoje utilizada na maioria dos SIG considera que mudanças no uso do solo, dependem de uma miríade de fatores tais como: o relevo, declividade, proximidades e distanciamentos com corpos hídricos, rodovias, núcleos urbanos. Ou seja, o espaço deixa de ser uniforme, tão quanto o entendimento das alterações também muda. Nesse sentido, a abordagem que autômatos celulares devem ser exclusivamente utilizados para modelar fenômenos urbanos muda, favorecendo análises florestais e paisagísticas, por exemplo.
- c) Vizinhança Estendida:** No CA padrão, a vizinhança é isotrópica e homogênea para cada célula (Wu 2002; Xie 1996) e consiste em diferentes tipos de vizinhança, como a de Moore (8 células ao redor de uma central) ou de von Neumann (quatro células ortogonais ao redor de uma célula central). Em aplicações urbanas, uma vizinhança estendida é adotada para considerar o efeito de vizinhança de entidades geográficas (White e Engelen 2000). Em SIG, os dados de variáveis podem ser trabalhados por meio de mapas de distância euclidiana das variáveis a serem trabalhadas.
- d) Vizinhança não estacionária:** Em modelos atuais, cada célula recebe um determinado “peso”, ou seja, uma probabilidade de alteração do seu estado. Geralmente, as variáveis são categorizadas em conjunto com teoremas estatísticos, como o Bayesiano. Nessa modificação, podem ser introduzidas variáveis explicativas que auxiliam na elaboração de regras de transição mais complexas.
- e) Regras de transição não estacionárias e complexas:** As regras de transição dos CA clássicos são estáticas, no entanto, os processos que governam as mudanças no uso da terra podem variar no tempo e no espaço (Santé et. al, 2010). Essa alteração permite que sejam inseridas variáveis estáticas e dinâmicas do modelo, ou seja, variáveis naturais ou construídas que serão atualizadas (dinâmicas) ou não (estáticas) a cada passo temporal da modelagem. A complexidade se dá porque, no formato clássico, se considera apenas os estados atuais das células e daquelas em sua vizinhança. Contudo, o ambiente urbano é um sistema aberto, alterando e sendo alterado pelas transições ao seu redor, ou seja, consideram fatores externos. Com isso as regras podem ser flexibilizadas para diversos outros usos do solo.

O principal desafio superado pela flexibilização do modelo padrão, foi que as primeiras gerações de CA eram essencialmente voltadas para fins matemáticos e biológicos, enquanto a abordagem SIG passou a fornecer uma base para aplicações de simulações reais. Na literatura, (SOARES-FILHO *et al.* 2007, COUCLELIS, 1997, ALMEIDA, 2003) há certo debate quanto aos resultados significativos da abordagem de CA em diferentes SIG por conta de maiores graus de direcionamento de cada pesquisa. Ou seja, a escolha das regras flexibilizadas ou clássicas, tão quanto o SIG envolto na pesquisa, variam de acordo com o objetivo, complexidade e tema do estudo.

Santé *et al.* (2010) apontam que, especialmente quando se trata da modelagem urbana, um modelo bastante difundido é o SLEUTH, desenvolvido por Clarke *et al.* (1997) para simular a dinâmica urbana em São Francisco, que foi ampliado para outros continentes, posteriormente. Mais recentemente, surgiu o DINAMICA EGO (SOARES-FILHO *et al.*, 2002), software bastante robusto, originalmente projetado por pesquisadores brasileiros para simulação de processos de desmatamento que foi posteriormente aplicado a processos urbanos (ALMEIDA, 2003). O GeoSOS também fornece uma variedade de modelos de CA (como redes neurais – CA, regressão logística – CA e árvores de decisão – CA) desenvolvidos para fornecer todas as funções de simulação, previsão, otimização e exibição de uma variedade de padrões geográficos e processos dinâmicos como mudanças no uso da terra, evolução urbana e zoneamento (YEH *et al.*, 2021). Pode-se afirmar que hoje os CA se encontram como parte essencial de uma grande quantidade de SIG, ou mesmo podem estar associados em formato de plugin, como no caso do amplamente conhecido Arcgis. No todo, o que se altera são as lógicas envolvidas no processo de modelagem, o que também é interessante para o usuário a medida que pode-se escolher diferentes abordagens, com resultados também diferenciados. Para tanto, a utilização atual de SIG pode ser agrupada segundo diferentes tipos.

Resumidamente, existem diferentes regras e características relevantes dos modelos de CA que permitem a modelagem urbana em SIG. Santé *et al.*, (2010) separam 6 tipos de regras. As regras do tipo I são aquelas mais clássicas, com certa ortodoxia que posteriormente evoluiu para o tipo II, que considera a probabilidade de alteração que cada célula tem para um dado uso do solo. As probabilidades levam a incorporação de regras de transição do tipo III, baseadas na forma urbana e na reprodução de padrões espaciais, obtidos através de recursos probabilísticos. Regras do tipo IV tratam das abordagens conjuntas, ou seja, que utilizam outros métodos acoplados com CA, que podem ser métodos de inteligência artificial para aprendizagem, ou técnicas mescladas como o CA-MARKOV no IDRISI, que adota um modelo híbrido para alocar o uso da

terra. Por fim, regras do tipo V são baseadas na lógica *fuzzy*, procurando se aproximar da abordagem humana num processo de definição de regras de simulação.

Com isso o desafio da aplicação de CA em ambiente SIG foi, antes de tudo, agregar um método matemático encontrado na Teoria dos Jogos para a análise geográfica. Ao deparar com um método promissor, os primeiros pesquisadores na área se viram tentados a elaborar conceitos e associações geográficas com um método que poderia parecer complexo ou desinteressante, afinal, era só um jogo. Ao vencer o desafio que se impunha, o que se atingiu foi justamente o grande ponto forte dos modelos baseados em CA: a capacidade de integrar as dimensões espaciais e temporais em um único modelo urbano. A aptidão desenvolvida para se modificar as regras clássicas também foi catalisadora para o avanço que se percebe atualmente. Da baixa disponibilidade de softwares a diversidade de métodos para calibração e validação de modelos CA, o que se obteve foi um método de grande afinidade com os SIG. Seja pela aproximação com imagens *Raster*, ou a essência de se lidar com dados de diferentes tipos, CA são hoje uma ferramenta imprescindível para se modelar o fenômeno urbano.

5. Considerações finais

Um dos grandes adventos da ciência moderna foi a percepção da complexidade. Entre as diversas mudanças paradigmáticas ocorridas ao longo do desenvolvimento humano, aquela trazida pela abordagem computacional revolucionou a ciência geográfica. Pela abordagem sistêmica, que culmina na revolução Teorético-Quantitativa, a matemática se torna mais presente dentro da geografia e a metodologia científica se torna mais rigorosa. Fenômenos que eram analisados de maneira estritamente qualitativa passaram a ter descrições estatísticas mais profundas, como resultado de uma dinâmica complexa.

Os modelos nascidos das técnicas desenvolvidas a partir da aproximação computacional trouxeram grandes benefícios. Seja por apoiar decisões governamentais ou por prever impactos que estão por vir, a modelagem se tornou uma ferramenta imprescindível para o entendimento de espaços urbanos. Contudo, por se tratar da análise de um fenômeno tão complexo e diverso, a categorização de diferentes modelos urbanos também possui diversas interpretações, seja pela nomenclatura ou por diferenças nos objetivos. A razão de se considerar diferentes proposições para se classificar modelos urbanos se deve ao fato que isolar o conceito é uma forma de simplificação do processo, limitando a capacidade que um modelo tem para atender diversos objetivos de uma pesquisa. Portanto, é importante considerar que, pelas categorias levantadas, muitos dos critérios de classificação possuem aproximações entre si, podendo ter abordagens mistas, ou seja, podem utilizar dois ou mais categorias de modelos acoplados para a análise urbana. O próprio conceito de área urbana, como complexo, distinto e fragmentado (CORREIA, 1989) exprime um sentido associado a um fenômeno de difícil análise, que não pode ser restrito a um único olhar.

Contudo, o grande desafio encontrado nas abordagens urbanas é que em sua maioria, ou os modelos têm uma dificuldade de abranger a dimensão espacial ou são estáticos e não representam o fator temporal adequadamente. As restrições espaciais e os processos estacionários sempre foram uma dificuldade para a análise urbana num contexto geográfico, principalmente porque o conceito de espaço é central na geografia. Já o tempo não pode estar alheio quando se deseja analisar o desenvolvimento urbano, uma vez que a temporalidade pode ser o fator chave para se entender processos profundos, como alterações socioespaciais e mudanças no uso e cobertura da terra. E é justamente no fator de mudança de uso da terra que os modelos urbanos encontram mais dificuldades. Por se tratar de um conjunto diverso de parcelas de uso, o urbano demanda por técnicas que sejam antes de tudo, simples, dinâmicas e projetivas, para entender possibilidades de simular cenários. As simulações, hoje tão em voga, não eram possíveis de serem realizadas de maneira precisa e direta nas primeiras gerações de modelos uma vez que esta capacidade só poderia estar associada com ambientes computacionais e considerando espaço e tempo,

E foi na Teoria dos Jogos que pesquisadores encontraram uma solução viável. A automação celular nascida pelo entendimento de John H. Conway avançou vertiginosamente desde que foi abordada no início da década de 1970. De uma abordagem simples e puramente matemática, geógrafos como W. Tobler (1970) notaram uma grande potencialidade para se modelar fenômenos físicos. A partir de então, uma série de “relaxamentos” das regras clássicas foram propostas, culminando na inserção das ferramentas de CA em SIG. E é pela adequação com sistemas geográficos que os autômatos tem se tornado tão importantes para solucionar questões complexas. Há diversas razões pela abordagem de autômatos celulares. A principal delas é a simplicidade. Muitos modelos urbanos atuais não são capazes de retratar fielmente o fator espacial, ou mesmo reduzem a importância da questão temporal. Não é o caso dos CA. A grande oferta em softwares gratuitos, facilmente configuráveis e utilizáveis tem democratizado o uso dessa ferramenta. A flexibilização das regras clássicas foi um desafio importante, já que agora os pesquisadores têm focado especialmente na

parte de calibração e validação dos dados. Ou seja, preocupa-se muito mais na resposta final e precisa do modelo, do que com regras complexas que poderiam inviabilizar seu uso. Acrescenta-se o suporte a questões “*O que acontece se?*” que são particularmente úteis no planejamento ambiental e permitem diversos testes para afinar a acurácia do modelo final. Na modelagem dinâmica por CA, pode-se considerar uma afinidade bastante grande entre a teoria dos modelos celulares com as próprias imagens *raster* (matriciais) de sensoriamento remoto, além da convergência com o próprio conceito urbano clássico, a partir de sua multiplicidade, fragmentação e possíveis estados de mudança. Por fim, cabe destacar suas próprias particularidades operacionais quando comparados a outros modelos, por permitir a inserção da variável tempo em uma abordagem espacial e ter como *output* (saída) um arquivo do mesmo formato daqueles que serviram como input. Fatores como a capacidade de lidar com diferentes resoluções de imagens, e com variáveis também multiescalares, transformam os CA em um método relevante para estudos urbanos.

Desta forma, são diversas as possibilidades. Gestores, políticos e o público em geral podem se beneficiar de análises focadas em abordagem dinâmica. Ao utilizar uma abordagem temporal que observa o passado como um fator que deixou marcas impressas no presente, a modelagem dinâmica por autômatos celulares nos permite perguntar quais ações que estão em curso nesse momento e que poderão gerar os mais diferentes tipos de cenários em um futuro que só depende das escolhas do tempo atual.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, C. M. de. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP)**, Brasil. 2003. 351f. Tese Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

BATTY, M. 1976. *Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

BATTY, M. *Generating urban forms from diffusive growth* Environ. Plann. A, 23 (4) (1991), pp. 511-544

BATTY, M; LONGLEY. P.A. *Fractal Cities* Academic Press, London (1994)

BONHAM-CARTER, G. F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. 2.ed. Kindlington: Pergamon Press, 1996. 400 p.

BURROUGH, P. and A. FRANK (ed.). *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. London, Taylor; Francis, 1996.

CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. Tradução: Newton Roberval Eicheberg. Editora CULTRIX. São Paulo, 1996.

CARVALHO, G. **Cenários Futuros para Cidades Inteligentes**. 1ª ed. São Paulo – Trilha de Treinamentos e Consultoria, 193p. 2019.

CHRISTOFOLETTI, A. **As perspectivas dos estudos geográficos**. In: CHRISTOFOLETTI, A. (Ed.). *Perspectivas da Geografia*. São Paulo: Difel, 1985.

CLARKE, K.C.; GAYDOS, L.J.; *Loose-coupling a cellular automaton model andGIS : long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore* int.j. geographical information science,1998, vol.12, no.7. 699-714.clarklabs. org, 2012.

CLARKE, K.C. S. HOPPEN, L. GAYDOS *A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay* área Environ. Plann. B: Plann. Design, 24 (1997), pp. 247-261.

COUCLELIS, H. *Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics*. data.International Journal of Remote Sensing, v. 10 n. 06, pp. 989-1003. (1985)

COUCLELIS, H. (1997). “*From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation*.” Environment and Planning B: Planning and Design 24.

- CORRÊA, R. L. **O espaço urbano**. São Paulo: Editora Ática, 1989.
- GOMES, P.C.C. CASTRO, I.E., CORRÊA, R.L. **Geografia: Conceitos e Temas**. Rio de Janeiro, Ed. Bertrand Brasil, 2000. 352 p.
- GOMEZ B.; JONES III, J.P. (2010) *Research Methods in geography*. ISBN 97814051-070-5.
- HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. *Models, paradigms and the new Geography*. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). *Models in Geography*. Londres: Methuen e Co., 1967. p. 19-41.
- HAINES-YOUNG, R. H. AND PETCH, J. H. 1986. **Physical geography: its nature and methods**. London: Harper & Row.
- HARGROVE W.W. *et al.*, 2000. *Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes*. Ecological Modelling. (135): 243-263.
- INKPEN, R. **Science, Philosophy and Physical Geography**. 2005.
- KILBRIDGE, M. D., O'BLOCK, R. P. AND TEPLITZ, P. V. *Urban Analysis*. Boston: 1970. Harvard
- KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 1978.
- LAMBIN, E. F. *Modeling Deforestation Processes - A Review*, Trees series B: Research Report (1994). European Commission, Luxembourg.
- LÉVY, P. 1998, *Cyberculture*. Odile Jacob, France.
- LIU, Y. *Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009. 204p.
- LONGLEY, P. A. GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. RHIND.D.W., **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 560p.
- LONGLEY. P.A MESEV, V. *On the measurement and generalisation of urban form* Environ. Planning A. A (2000) volume 32, pages 473-488. DOI:10.1068/a3224
- MARTIN, D. *Geographic information systems: socioeconomic applications*. 2. Ed. London: Routledge, 1996. 210 p.
- MENEZES, P. M. L.; FERNANDES, M. C. **Roteiro de Cartografia**. São Paulo: Oficina de textos, 2013
- NOVAES, A. G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.
- PEDROSA, B.M.; CÂMARA, G. **Modelagem dinâmica e geoprocessamento**. In: FULKS, S.D.; CARVALHO.M. S; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V., eds. (2002) *Análise Espacial de dados geográficos*. INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ROBINSON, G. M. 1998. *Methods and techniques in human geography*. New York: John Wiley.
- SIRAKOULIS, G.C.; KARAFYLLIDIS, I.; THAINAILAKIS, A. 2000. *A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation*. Ecological Modelling (133): 209-223
- SANTÉ I, et al., (2010) *Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: a review and analysis*. Landsc Urban Plan 96(2):108–122
- SOARES-FILHO et. al. *DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier*. Elsevier – ecological modelling 154 (2002) 217 – 235.

SOARES-FILHO, B. S., CERQUEIRA, G. C., ARAÚJO, W. L., AND VOLL, E. “**Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular.**” *Megadiversidade* 3 (2007): 74-86.

SOARES-FILHO, B.S.; ASSUNÇÃO, R.M. PANTUZZO, A. 2001. *Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian Colonization frontier.* *BioScience*, (51): 1 039-1 046

TOBLER, W. *Cellular geography.* In: *Philosophy in geography.* Dordrecht: D. Reidel University. v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.

WOLFRAM, S. “*Statistical mechanics of cellular automata*”. *Review of modern physics*, v. 55, p.601-643, 1983.

WU, F. *Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural–urban land conversions* *Int. J. Geogr. Inform. Sci.*, 16 (8) (2002), pp. 795-818.

WHITE, R. G. ENGELN *Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity* *Geogr. Syst.*, 1 (1994), pp. 237-253.

XIE, Y. *A generalized model for cellular urban dynamics* *Geogr. Anal.*, 28 (1996), pp. 350-373.

YEH, A.G.O. *et al.*, *Cellular Automata Modeling for Urban and Regional Planning. In: Urban Informatics.* BATTY, M. GOODCHILD, M.F.SHI, W. editors. Springer. 2021



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual (CC BY-NC-SA)*.