



PROGRAMA

SESSÃO 25-A: SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO PARA O DESENVOLVIMENTO

Local: [Colégio dos Jesuítas - Sala 19](#)

Presidente: Cláudio Torres

ID	Título	Orador
1074	A APLICAÇÃO DE SISTEMAS MULTI-AGENTES NO PLANEAMENTO DO TERRITÓRIO	Fernando Fonseca
1121	A INFLUÊNCIA DOS STAKEHOLDERS NO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO EM ENTIDADES LOCAIS SEM FINS LUCRATIVOS – UMA REVISÃO DE LITERATURA	Alexandra Braga

Fonseca, Fernando P.¹; Ramos, Rui A.R.²
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Campus de Gualtar, 4710-057 Braga
PORTUGAL
(1) ffonseka@gmail.com; (2) rui.ramos@civil.uminho.pt

A aplicação de sistemas multi-agentes no planeamento do território

Os territórios são, por definição, sistemas complexos e dinâmicos. Estas características resultam da interacção de um conjunto alargado de actores e de variáveis, nomeadamente de factores comportamentais e subjectivos, de que resultam fenómenos não lineares e imprevisíveis. Para fazer face a estes novos desafios, têm sido desenvolvidas várias ferramentas de apoio à decisão no domínio do planeamento e da gestão do território, como os sistemas multi-agentes (SMA).

A utilização dos SMA no planeamento do território está associada ao desenvolvimento de modelos complexos de simulação da realidade. Através da simulação, os SMA procuram analisar os impactos e efectuar previsões sobre a evolução futura a partir da inter-relação dos vários actores (agentes) do território, integrados num sistema operacional. A incorporação das dimensões comportamental e temporal na modelação constituem dois dos principais elementos diferenciadores dos SMA.

O objectivo do artigo, que constitui parte de um projecto de investigação mais vasto que está a ser desenvolvido pelos autores, pretende efectuar um enquadramento teórico da aplicação dos SMA ao território. Em termos específicos, procurar-se-á demonstrar as vantagens dos SMA em relação às técnicas mais *convencionais* de planeamento, apresentar as características dos SMA, descrever as arquitecturas de agentes existentes e efectuar uma revisão dos vários modelos aplicados ao território, nomeadamente em relação à simulação do uso do solo e dos transportes.

Palavras-chave: Agentes; Sistemas multi-agentes; Modelos planeamento; Planeamento do território

1. Introdução

Os territórios e, em especial, as cidades, são espaços geográficos complexos, constituídos por uma componente física que serve de suporte a um conjunto de actividades económicas, sociais, culturais, ambientais e perceptivas. Neste contexto, Ferreira (2005) refere que o território é *a entidade suporte, de integração e de síntese, de toda a actividade humana, com particular realce para as actividades produtivas, o habitat, os recursos naturais e ambientais, as identidades, bem como os agentes desse processo*. Assim, a complexidade geográfica do território confere ao planeamento e aos modelos de localização uma enorme importância no processo de tomada de decisão. Manson (2007) refere que a complexidade geográfica do território está a colocar novos desafios metodológicos e conceptuais ao planeamento, essencialmente ao nível dos modelos de avaliação. A avaliação no planeamento funciona como um mecanismo de aprendizagem sobre os contextos incertos e complexos do território. No contexto do *planning by learning*, Faludi (2000) sublinha que o planeamento não se deve reduzir a uma mera produção de documentos técnicos, mas deve sustentar-se num processo de aprendizagem mútua, que articule os diversos actores de um território.

Por seu turno, Moore (2002) realça que o planeamento não pode desligar-se do contexto social e relacional do território, independentemente da escala a que se esteja a trabalhar. Para este autor, as principais dificuldades do planeamento do território estão relacionadas com a existência de: (i) múltiplas escalas espaciais, temporais e organizacionais; (ii) várias entidades, movidas por percepções e por interesses (económicos, sociais, políticos, etc.) diferentes; (iii) diversos objectivos relativos ao cumprimento de metas pré-estabelecidas (económicas, ambientais, etc.); (iv) vários sectores de actividades, onde os procedimentos legais e burocráticos não são convergentes (economia, cultura, paisagismo, ambiente, etc.). No caso das cidades, a complexidade geográfica do território é ainda maior devido à elevada pressão exercida por um conjunto de actividades (sobretudo ao nível da edificação e das acessibilidades) e à existência de um elevado número de actores que se posicionam com interesses por vezes contraditórios, dificultando e introduzindo entropia no processo de planeamento. A segregação social e espacial do território, a perda de competitividade, a degradação da qualidade de vida da população e a perda de sustentabilidade constituem algumas das consequências que resultam da complexidade em gerir os fenómenos urbanos.

A evolução tecnológica que se tem verificado ao longo das últimas duas décadas, em especial das TIC's, tem promovido o desenvolvimento de modelos

espaciais, em torno dos quais se tem procurado melhorar o processo de tomada de decisão dos planeadores do território. A partir da sua investigação, Matos (2006) concluiu que estes modelos se baseiam em quatro etapas interligadas: (i) a definição do modelo conceptual, onde se estipula os indicadores a utilizar; (ii) a selecção de uma aplicação informática, que contribui para a construção do modelo; (iii) as fontes de dados que vão alimentar o modelo (económicos, sociais, ambientais, etc.); (iv) e, por último, os mecanismos de interactividade, através dos quais se obtém os *outputs* dos modelos e se torna possível a sua interpretação. Em oposição às ferramentas de análise e de tratamento da informação convencionais (como os Sistemas de Informação Geográfica), tem-se vindo a impor um conjunto de técnicas de simulação e de modelação dinâmica dos fenómenos urbanos que alguns autores designam por *técnicas emergentes* (Ramos & Silva, 2002; Silva *et al.*, 2004) ou por modelos de *geosimulação* (Torrens, 2003). Os autómatos celulares e os SMA são duas das principais ferramentas de modelação que se enquadram nesta tipologia, tendo a particularidade de estarem direccionadas para o planeamento do território e dos transportes (Tabak *et al.*, 2004; Hamman *et al.*, 2007; Schumacher *et al.*, 2008). Para Saarloos *et al.* (2004) ou Ligmann-Zielinska & Jankowski (2005), a utilização destas ferramentas oferece oportunidades para melhorar o processo de tomada de decisão no planeamento, tendo em consideração a multiplicidade de variáveis existentes no território.

Neste contexto, o objectivo do artigo consiste em fazer uma análise exploratória centrada na utilização dos sistemas multiagentes no planeamento do território, que faz parte de um projecto de investigação mais lato que está a ser desenvolvido pelos autores. O artigo encontra-se dividido em duas partes fundamentais. Na primeira faz-se uma digressão pela noção de sistemas multiagentes, pelas suas origens e pelas vantagens e dificuldades que apresentam ao nível do planeamento do território. Na segunda, pretende-se dar um enfoque mais prático à revisão dos conhecimentos, apresentando diversos modelos baseados em SMA que foram desenvolvidos ao nível do planeamento urbano e dos transportes. Por último, apresentam-se algumas considerações finais sobre a temática em apreço.

2. Os sistemas multiagentes

2.1. Noção, origens e características fundamentais dos SMA

Os SMA constituem uma ferramenta de simulação computacional que tem vindo a ser crescentemente utilizada em diversas áreas científicas. O desenvolvimento dos

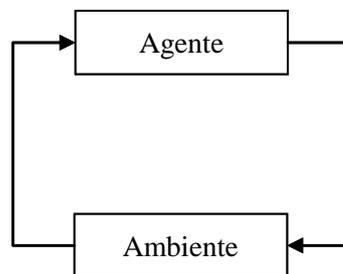
SMA ocorreu ao longo da década de 1990 e as suas origens radicam na designada inteligência artificial distribuída (Sawer, 2003; Pereira, 2004), cujo principal objectivo consiste na resolução de um problema através da sua decomposição em problemas mais pequenos e menos complexos. A utilização dos sistemas de inteligência artificial distribuída permite a vários processos autónomos (os agentes) realizar actos de inteligência global através do processamento colaborativo da informação (Moulin & Chaib-Draa, 1996). Este princípio é similar aos benefícios resultantes de ter um grupo numeroso de especialistas a resolver problemas muito extensos, que seria mais difícil de tratar por apenas uma pessoa. De acordo com Pereira (2004), a inteligência artificial distribuída divide-se em duas sub-áreas: a resolução distribuída de problemas e os SMA. O princípio da resolução distribuída de problemas procura subdividir um problema num conjunto de módulos ou de nodos cooperativos que compartilhem conhecimento sobre o problema e sobre como chegar à solução. Por seu turno, os SMA estão mais direccionados para modelar o comportamento de um conjunto de entidades – os agentes. Estes agentes apresentam um conjunto de atributos e interagem entre si no processo de modelação. É da forma e dos comportamentos resultantes da interacção entre os agentes que se extraem conclusões que podem ser usadas para a resolução dos problemas. Ou seja, este ramo da inteligência artificial distribuída estuda o comportamento inteligente numa sociedade de agentes autónomos, procurando coordenar os conhecimentos e determinar planos para a resolução dos problemas.

Ao longo da década de 1990, os SMA tornaram-se progressivamente uma ferramenta de simulação cada vez mais utilizada, de que resultou uma extensa produção científica nas mais diversas áreas, desde as ciências económicas às sociais, passando pelas naturais e tecnológicas. Esta evolução também não pode desligar-se dos avanços verificados no domínio da informática, que permitiu tratar computacionalmente problemas mais complexos e a uma maior velocidade (Sawyer, 2003).

2.2. Dos agentes aos SMA

No âmbito da inteligência artificial, tal como refere Pereira (2004), não existe uma definição universalmente aceite e clara de *agente*. Não obstante, existem alguns princípios consensuais, tais como a capacidade sensorial dos agentes sobre o ambiente envolvente, a capacidade de interagir e de reagir sobre o mesmo ambiente e a autonomia e as *capacidades sociais* que lhes permitem interagir com outros agentes.

Para Bithell *et al.* (2008), os modelos baseados em agentes inspiram-se em aspectos relacionados com o comportamento de sistemas vivos através da atribuição de um conjunto de regras lógicas a esses agentes. O processo de simulação faz com que os agentes interajam entre si e com o ambiente, de que resultam comportamentos globais e tendências, que podem ser visualizadas através de previsões e de cenários de evolução futura. Do mesmo modo, Rabino & Girotti (2004) referem que no estudo dos fenómenos sociais ou naturais são facilmente identificados os comportamentos de grupos, que resultam da articulação existente entre os vários elementos e destes com o meio envolvente. Um modelo baseado em SMA é, então, constituído por vários elementos (os agentes) e por um ambiente (Figura 1). Os vários agentes (daí a designação de multiagentes) são elementos fundamentais do sistema que actuam entre si e com o meio onde estão inseridos, podendo eventualmente alterar o seu comportamento com base nos conhecimentos e na aprendizagem que têm. Deste modo, o conceito de SMA está associado à existência de um conjunto organizado de agentes.



Fonte: Adaptado de Wooldridge (2001).

Figura 1: Os elementos fundamentais de um SMA

Os agentes podem ser definidos como entidades computacionais que estão localizadas num determinado ambiente, tendo a capacidade de desenvolver acções autónomas, de forma a atingir determinados objectivos, através de comportamentos flexíveis (Wooldridge, 2009). Em sentido semelhante, Ferber & Gasser (1991) argumentam que um agente é uma entidade capaz de agir sobre si mesma e sobre o seu ambiente, que pode dispor de uma representação do ambiente, que pode comunicar com outros agentes, sendo o seu comportamento uma consequência das suas percepções, do seu conhecimento e das interacções realizadas. Em função das suas características e das regras estipuladas para a modelação, os agentes são capazes de se adaptar e de interagir entre eles e com o ambiente em que estão inseridos.

2.3. Características e tipologias dos agentes

Os agentes apresentam uma grande heterogeneidade em termos de características, que variam em função dos objectivos pretendidos com a simulação. Não obstante, os agentes apresentam algumas especificidades que podem ser sistematizadas. Para Wooldridge (2009), os agentes distinguem-se por duas características principais: pela capacidade de interagir com os outros agentes e com o ambiente e pela capacidade decisória. As interacções entre os agentes podem basear-se sob múltiplas formas, em função dos objectivos da simulação e das ferramentas utilizadas, podendo estar em jogo desde relações antagónicas até situações de cooperação entre os agentes. A comunicação entre os agentes pode processar-se sob diversas formas e através de linguagens específicas. A capacidade decisória está associada à capacidade que os agentes têm de tomar decisões sem intervenção humana directa. De uma forma semelhante, Nwana (1996) refere que a autonomia, a cooperação e a aprendizagem constituem três denominadores comuns à maior parte dos agentes utilizados em modelação. Por seu turno, Wooldridge & Jennings (1995) referem que os agentes, em função das características que apresentam, podem ser entendidos num *sentido fraco* (na perspectiva de um agente computacional) ou num *sentido forte* (sendo entendido como uma entidade cognitiva, capaz de gerar percepções e emoções, por exemplo). Deste modo os agentes distinguem-se em função da:

(i) Autonomia: os agentes são autónomos na medida em que operam sem uma intervenção directa de nenhum controlador ou supervisor humano (Nwana, 1996). Os agentes têm controlo sobre as suas próprias acções e sobre o seu estado interno e dispõem de uma racionalidade que lhes permite ter uma noção dos objectivos e das acções necessárias para os atingir.

(ii) Cooperação: a cooperação é a razão de ser de um grande número de agentes utilizados em sistemas de modelação (Nwana, 1996). Para cooperarem entre si, os agentes têm que possuir capacidades sociais, para que possam interagir com os restantes agentes.

(iii) Reactividade: em oposição à cooperação, alguns agentes caracterizam-se por reagir aos estímulos que recebem. Através da capacidade sensorial, estes agentes têm a percepção do que ocorre no ambiente e de responder em tempo útil aos estímulos e às mudanças que detectam.

(iv) Pró-actividade: os agentes têm objectivos a cumprir e, por isso, acabam por desenvolver iniciativas próprias no que respeita à resolução de problemas específicos,

seja através da cooperação, seja da reacção. Esta característica está relacionada com a autonomia e com a capacidade decisória dos agentes.

(v) Aprendizagem: alguns agentes têm a capacidade de adquirir conhecimentos e de modificar os seus comportamentos com base em experiências anteriores. Como refere Nwana (1996), um agente para ser inteligente deve ter capacidade de aprendizagem, que se manifesta no modo como um agente interage e reage com os demais agentes e com o ambiente e na forma como melhora essa capacidade ao longo do tempo.

Verifica-se, portanto, que o conceito de agente é entendido e é utilizado sob múltiplas formas, facto que resulta da flexibilidade, dos vários domínios e dos diferentes objectivos em que se utilizam agentes em processos de modelação, não sendo por isso possível encontrar um agente com todos os atributos mencionados, tal como refere Pereira (2004). Esta mesma noção é partilhada por Valbuena *et al.* (2008) quando referem que os agentes podem apresentar diversas especificidades, uma vez que tanto podem representar interesses individuais como colectivos, podem ser mais ou menos heterogéneos no que se refere às suas características e são dinâmicos na medida em que podem aprender e adaptar-se a situações diferentes. É devido a esta multiplicidade de características que Nwana (1996) refere que os agentes estão subjacentes a um espaço verdadeiramente multidimensional, que dificulta a sistematização dos diversos atributos de agentes em tipologias bem definidas.

As características dos agentes e a forma como estão organizados determinam as tipologias dos agentes. Há diversas tipologias de agentes mas, de acordo com vários autores (Cavezzali & Rabino, 2003; Sawyer, 2003, Ferber *et al.*, 2004; Bithell *et al.*, 2008) há duas categorias que se destacam por serem as mais utilizadas: os agentes cognitivos e os agentes reactivos. De acordo com Sawyer (2003), os agentes cognitivos evoluíram a partir dos trabalhos realizados no domínio da Inteligência Artificial Distribuída, ao passo que os reactivos procedem das pesquisas realizadas em torno da *artificial life (Alife)*.

Os agentes cognitivos são movidos por objectivos, tendo capacidades de entendimento para atingir esses objectivos. Por essa razão, estes agentes são também conhecidos por *agentes intencionais* ou *deliberativos* (Sawyer, 2003) e enquadram-se na descrita tipologia de *agentes fortes* proposta por Wooldridge & Jennings (1995). Os agentes cognitivos caracterizam-se por possuir crenças em relação ao ambiente em que estão inseridos e conhecimentos em relação aos planos e à forma como as suas acções poderão afectar o ambiente e os restantes agentes. Desta forma, os agentes cognitivos

acabam por desenvolver comportamentos mais complexos. Pereira (2004) refere que os agentes cognitivos mantêm uma representação interna do ambiente que os rodeia através de um estado mental explícito que pode ser alterado através do raciocínio simbólico. Os agentes cognitivos comunicam entre si através de linguagens de comunicação de agentes, em cuja produção se destacam duas indústrias de softwares: a FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) e a KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*).

Ao contrário destes, os agentes reactivos estão desprovidos de qualquer informação do ambiente em que estão inseridos e dos restantes agentes envolvidos. Os agentes reactivos não são concebidos para executar planos específicos. Pelo contrário, os agentes reactivos são movidos por simples regras de acção, agindo de acordo com a percepção que têm do ambiente que os rodeia, através de um conjunto de regras de percepção/reacção. De acordo com Sawyer (2003), os agentes reactivos são por vezes designados agentes comportamentais, pelo facto de responderem directamente a estímulos provocados pelo ambiente e que são captados pela capacidade sensorial dos agentes. A conversão da percepção numa acção não envolve um processo de deliberação interna, pelo que a mesma percepção por parte de um agente reactivo pode desencadear acções diferentes (Bithell *et al.*, 2008). Deste modo, nos agentes reactivos não existe uma especificação *a priori* do comportamento que os agentes irão ter durante o processo de modelação. Alguns jogos ou a robótica constituem dois exemplos de mecanismos que recorrem a agentes reactivos e que funcionam por estímulos externos. Por outro lado, os agentes reactivos destacam-se por serem relativamente simples e por interagirem com os restantes agentes através de formas básicas, exigindo linguagens e modelos com arquitecturas apropriadas.

2.4. Arquitecturas de agentes

A arquitectura de agentes é um aspecto que está relacionado com as características e com as tipologias dos agentes e que se refere ao modo de organização dos agentes dentro do sistema e à forma como se processam as suas relações. O tipo de arquitectura descreve a forma como os agentes estão dispostos num conjunto de módulos que interagem entre si para atingir um determinado objectivo. Um dos aspectos que ajuda a distinguir as tipologias de arquitecturas é a forma como um modelo decompõe o problema através de determinadas tarefas (Wooldrige & Jennings, 1995). Assim, a escolha de uma determinada arquitectura está muito dependente dos objectivos

pretendidos e com o tipo de agentes envolvidos no sistema, pese embora não existirem arquitecturas *melhores do que outras*, tal como Knapik & Johnson (1998) referem.

Ao longo do tempo foram desenvolvidas diversas arquitecturas de agentes, mas há três tipologias dominantes e que são representativas da maior parte dos sistemas: a arquitectura deliberativa, a arquitectura reactiva e a arquitectura híbrida.

A arquitectura deliberativa: segue a abordagem clássica da inteligência artificial, onde os agentes interagem com reduzida autonomia (Figura 2). Um agente deliberativo possui um modelo simbólico do ambiente e as suas decisões são tomadas com base em raciocínio lógico. Como refere Costa (1999), a arquitectura deliberativa interpreta os agentes como fazendo parte de um sistema baseado no conhecimento. Nestes modelos é necessário dotar os agentes de um sistema de planificação que determinará que passos devem ser dados para atingir os seus objectivos.



Fonte: Pereira, 2004.

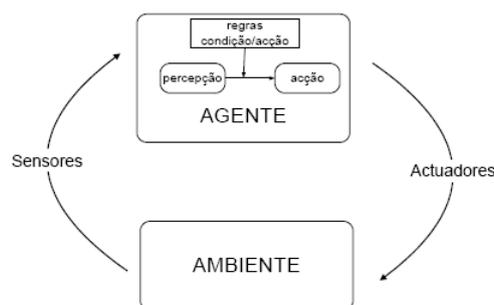
Figura 2: Modelo de arquitectura deliberativa

De acordo com Molina *et al.* (2005), um dos primeiros passos a considerar na construção de um sistema deliberativo consiste em fazer uma descrição simbólica adequada do problema. Seguidamente, essa descrição deverá ser integrada no agente, para que este possa raciocinar e atingir as metas num período de tempo pré-estabelecido (a questão do tempo é importante porque os algoritmos da planificação nem sempre respondem em tempo útil às solicitações do sistema). Assim e não obstante a ideia atractiva de colocar os agentes a interagir através de raciocínio lógico, há alguns problemas que se colocam à arquitectura deliberativa, nomeadamente a dificuldade em traduzir o complexo mundo real em descrições simbólicas e a dificuldade em obter agentes capazes de lidar com esses problemas em tempo útil.

A arquitectura deliberativa revela-se particularmente adequada para implementar agentes intencionais, ou seja, os agentes que são capazes de produzir planos a partir das

suas *crenças e intenções*. Por essa razão e tal como referem Molina *et al.* (2005), este tipo de arquitectura é também designado por arquitectura deliberativa BDI (*Belief, Desire, Intention*). A arquitectura BDI é uma das que mais tem sido utilizada (Rao & Georgeff, 1998; Molina *et al.*, 2005) pelo facto de incorporar um modelo de representação do raciocínio humano, um número considerável de implementações e uma semântica lógica, abstracta e de fácil compreensão. A arquitectura deliberativa BDI foi desenvolvida para proporcionar soluções em ambientes dinâmicos ou incertos, onde os agentes apenas têm uma visão parcial do problema (o acesso à informação é limitado) no contexto de um número limitado de recursos. As crenças, os desejos, as intenções e os planos são uma parte fundamental do estado destes sistemas.

Na arquitectura reactiva os diversos problemas associados à representação simbólica do conhecimento conduziram ao estudo de modelos mais efectivos de representação do conhecimento. Em oposição à deliberativa, a arquitectura reactiva (Figura 3) não utiliza nenhum modelo simbólico do ambiente nem recorre a nenhum raciocínio lógico complexo. A arquitectura reactiva baseia-se no princípio de que um agente pode desenvolver inteligência a partir de interações com o ambiente, não precisando de um modelo pré-estabelecido. Nesta categoria, os agentes reagem aos estímulos, definindo assim os comportamentos. De acordo com Molina *et al.* (2005), a maior parte das aplicações das arquitecturas reactivas centraram-se no desenvolvimento de controladores de robótica. Com efeito, os robots podem considerar-se agentes reais (não software) que operam num ambiente em mudança. É justamente a necessidade de actuar num ambiente com estas características que dificultam a adopção de arquitecturas deliberativas, uma vez que a necessidade de redefinição dos planos a uma realidade em mudança dificulta a obtenção de respostas eficientes por parte deste tipo de arquitectura.

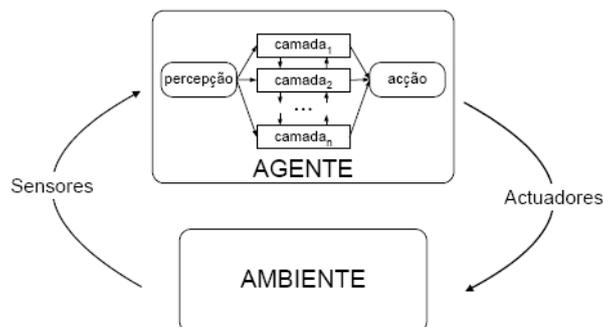


Fonte: Pereira, 2004.

Figura 3: Modelo de arquitectura reactiva

A arquitectura híbrida (Figura 4) procura conciliar as principais vantagens das categorias deliberativas e reactivas, superando algumas das debilidades da arquitectura deliberativa (dificuldade em resolver com rapidez e eficácia os problemas complexos) e da reactiva (são redutores ao apenas reagirem por estímulos). Numa arquitectura híbrida, a construção do modelo processa-se através de dois sub-sistemas: um deliberativo, que utiliza um modelo simbólico e que produz planos e outro reactivo, centrado em reagir a estímulos que ocorram no ambiente e que não requeiram um mecanismo de raciocínio complexo. Como referem Molina *et al.* (2005), a natureza destas arquitecturas são propícias a uma estruturação por camadas, que pode ser: (i) vertical quando apenas uma camada tem acesso aos sensores e actuadores; (ii) horizontal quando todas as camadas têm acesso aos sensores e actuadores. As camadas encontram-se hierarquicamente organizadas com a informação sobre o meio em diferentes níveis de abstracção. A maioria das arquitecturas híbridas encontra-se estruturada em três níveis:

- Nível reactivo: corresponde ao nível mais baixo. Neste nível são tomadas as decisões em relação aos estímulos recebidos do ambiente em tempo real.
- Nível do conhecimento: corresponde a um nível intermédio, onde se procede ao conhecimento que o agente tem do ambiente, normalmente com a ajuda de uma representação simbólica do mesmo.
- Nível social: é a camada de nível superior. É neste nível que se processam os aspectos sociais do ambiente, incluindo tanto a informação de outros agentes, como os desejos, as intenções, etc. Assim, o comportamento global do agente é definido pela interacção entre estes três níveis, alternando entre as diversas arquitecturas.



Fonte: Adaptado de Molina *et al.* (2005).

Figura 4: Modelo de arquitectura híbrida

3. A utilização dos sistemas multiagentes no planeamento do território

3.1. As motivações da aplicação dos SMA no planeamento do território

Os SMA têm actualmente um vasto espectro de aplicações, com o objectivo de tornar mais eficientes e de resolver determinados problemas de sistemas reais mais ou menos complexos. Para Rabino & Girotti (2004), um sistema complexo é aquele ao qual são adicionadas dimensões comportamentais e subjectivas, de que resultam efeitos não lineares (imprevisíveis). A complexidade de um sistema traduz-se, assim, num conjunto de relações que não são evidentes nem traduzíveis do ponto de vista físico ou matemático, mas que são determinantes nas relações e nos comportamentos das entidades e das características dos próprios sistemas.

Os territórios e, em particular as cidades, são considerados sistemas complexos, devido ao conjunto de vários elementos que constituem a cidade e que regulam o seu contínuo crescimento. Neste sentido, Batty (2008) refere que as cidades constituem sistemas complexos por excelência, que se encontram distantes de uma situação de equilíbrio e que, em consequência, requerem uma atenção especial para se poderem manter com níveis de sustentabilidade adequados. Healey (2007) associa mais a questão da complexidade ao planeamento urbano. Actualmente, as cidades não podem ser descritas como unidades bem definidas e delimitadas, pois a interacção de múltiplos actores em escalas e em redes diversas gera um grau de incerteza e de complexidade de difícil análise pelos métodos tradicionais. Por isso, ao longo das últimas décadas, os planeadores do território têm estudado e divulgado o grande número de discontinuidades que há nestes sistemas, associados à dificuldade de previsão e aos comportamentos imprevistos que têm lugar sobre o território, de que resultam fenómenos de não-linearidade e de auto-organização. E, por outro lado, têm desenvolvido ferramentas de planeamento e de apoio à decisão mais robustas, que permitem otimizar as medidas num cenário de maior complexidade.

Neste contexto, o planeamento é a actividade que procura racionalizar o uso e as formas de ocupação do mesmo através de um conjunto de normas e de regulações. À medida que os territórios e as cidades se têm tornado mais complexos, o planeamento do uso do solo tem-se tornado também numa actividade mais exigente devido à interferência de vários factores, tais como os actores, as especificidades de cada território e os processos autónomos (Ligtenberg *et al.*, 2004). Os actores, considerados a nível individual e colectivo, são entidades que têm uma acção directa no planeamento do uso do solo, a partir das suas intenções e dos seus interesses. As especificidades do

território condicionam os diversos tipos de ocupações que lhe podem ser dadas, podendo ser mais ou menos restritivos para um determinado uso. Para além disso, há que contar com os processos autónomos, que correspondem aos factores que podem alterar a natureza (e assim o tipo de ocupação) do solo, como os factores naturais (erosão, inundação, etc.). Os planos e as demais regulamentações completam o conjunto de factores que condicionam a forma como se processa a ocupação do uso do solo. A combinação de todos estes factores faz com que o planeamento do uso do solo seja um processo complexo (onde é difícil destringir as relações causais entre os vários agentes) e seja um processo não linear e dependente da actuação combinada dos vários agentes.

Deste modo, e num contexto em que a complexidade territorial é cada vez maior, a utilização de ferramentas potentes é essencial para apoiar o processo de tomada de decisão. Tal como referem Joshi *et al.* (2006), a utilização de modelos e o recurso à simulação permite aos planeadores do território analisar e simular cenários futuros baseados no conhecimento que se passa a ter dos comportamentos dos actores, das suas interacções e do papel que promovem na alteração do uso do solo. Com efeito e ao nível do planeamento do território, o conceito de simulação deve ser entendido como uma actividade de modelação que procura analisar os impactos e efectuar previsões sobre a evolução futura a partir da inter-relação das várias componentes do território integradas num sistema operacional (Briassoulis, 2000).

O recurso aos SMA no planeamento do território e do planeamento urbano em particular está, então, associado ao desenvolvimento de modelos mais robustos que permitem responder às novas solicitações dos territórios e das cidades. O recurso aos SMA permite não só entender o território como um sistema complexo, como disponibiliza ferramentas mais adequadas para a sua gestão, passando de uma perspectiva *top down*, para um tipo de planeamento mais relacional, que envolve os diversos actores no processo, permitindo obter melhores resultados ainda que à custa da complexificação dos processos (Healey, 2007).

Os SMA têm vindo a ter uma utilização crescente no domínio de várias ciências ligadas ao planeamento do território, nomeadamente ao nível da Geografia, da Sociologia, da Engenharia, do Urbanismo e da Gestão Ambiental, através do desenvolvimento de modelos baseados em agentes. Actualmente, existe um grande número de modelos de simulação territorial baseados em agentes. Batty (2009) descreve os modelos como simplificações da realidade, como a abstracção teórica de um sistema, através dos quais os princípios teóricos são testados e analisados. Os modelos são

aplicados invariavelmente através de sistemas computacionais, onde os computadores funcionam como laboratórios, onde decorre a experimentação dos fenómenos. Os modelos territoriais podem, então, ser definidos como simulações computacionais utilizadas para testar teorias relacionadas com a localização espacial e a interacção entre os usos do solo e as actividades relacionadas. Além disso, os modelos também permitem avaliar, através de uma interface digital, as consequências que as políticas urbanas poderão ter no desenvolvimento futuro dos territórios e das cidades. No caso das cidades, os modelos representam e analisam funções e processos que geram estruturas urbanas espaciais em termos de uso do solo, da distribuição da população, do emprego e dos transportes, estando integrados num programa computacional, que permite testar as teorias locativas e projectar o desenvolvimento futuro.

3.2. Os modelos de planeamento do território

Ao longo das últimas cinco décadas foram desenvolvidos diversos modelos que procuram fundamentalmente representar e analisar as dinâmicas ao nível da ocupação do solo e da deslocação das pessoas nas cidades. Há diversos estudos que fazem uma retrospectiva mais ou menos detalhada das características e dos modelos que foram colocados em prática (Wegener, 1994; Southworth, 1995; Timmermans, 2003; Hunt *et al.*, 2005; Iacono *et al.*, 2008). De uma forma geral, considera-se a existência de três gerações de modelos: os modelos gravíticos, os modelos do uso do solo/ transportes e os modelos de microsimulação, onde se incluem os modelos baseados em agentes.

Os modelos gravíticos foram desenvolvidos durante a década de 1960 e inspiram-se directamente no modelo de Lowry (1964), que foi considerado o primeiro sistema operacional de análise da ocupação do solo urbano (Southworth, 1995; Iacono *et al.*, 2008). Estes primeiros modelos apresentaram um conjunto de inovações metodológicas, como os métodos de maximização e os elementos estocásticos, que permitiram construir modelos de interacção baseados na agregação espacial (Timmermans, 2003). Estes modelos são chamados *gravíticos* por analogia à teoria da gravidade de Newton, nomeadamente no que respeita à distribuição do padrão de viagens geradas que, por sua vez, era obtido através de regressões lineares (Iacono *et al.*, 2008).

A segunda geração de modelos foi desenvolvida a partir da década de 1970 e, sobretudo, durante a década de 1980. Estes modelos baseiam-se no princípio das escolhas discretas e da maximização da utilidade e caracterizam-se por integrarem na

modelação duas componentes inter-relacionadas: o uso do solo e os transportes. Os modelos combinados de uso do solo e dos transportes são modelos de interacção espacial, que concebem a cidade como um sistema constituído por várias interacções agregadas numa condição de equilíbrio. Este sistema equilibrado é traduzido por um conjunto de equações matemáticas que permitem, por exemplo, prever as deslocações entre as áreas residenciais e os locais de trabalho. O objectivo do modelo de transportes é a previsão da procura (de transportes) e a sua adequação à oferta existente, enquanto o modelo de uso do solo analisa a distribuição espacial do emprego, das áreas residenciais, comerciais e das demais actividades que possam influenciar a localização das pessoas no território. Esta informação é utilizada no modelo de transportes na produção de deslocações. Os custos de deslocação, que resultam de uma situação de equilíbrio entre a oferta e a procura de transportes, são revertidos no padrão de localização das actividades económicas e das áreas residenciais. Assim, a interacção uso do solo/transportes permite determinar o modo como os transportes afectam a ocupação e o uso do solo o que, por sua vez, se repercute na localização das actividades e na geração de tráfego. Em comparação com os de primeira geração, estes modelos são mais complexos e dinâmicos.

A terceira geração de modelos emergiu a partir de meados da década de 1990 e distingue-se pela utilização de técnicas de microsimulação e pelo facto de os modelos serem mais complexos e dinâmicos (Timmermans, 2003). Alguns autores, como Torrens (2003) apelidam estes modelos de *modelos de geosimulação*. Os autómatos celulares e os SMA são as duas tipologias de modelação mais utilizadas nesta terceira geração. O ponto de partida destes modelos é o pressuposto de que as dinâmicas observadas ao nível do território resultam da acção individualizada de cada um dos agentes envolvidos. Nos autómatos celulares, o território é representado por uma grelha de células, que têm atributos específicos e que estão sujeitas a regras determinadas pelo sistema. Nestes sistemas, a troca de informações ou de dados espaciais entre as células está confinada às células vizinhas. Pelas suas características, os autómatos celulares são muito adequados para representar o território e as infra-estruturas (Torrens, 2003) e para analisar a *clusterização* de actividades (Macy & Willer, 2002). Os SMA vão mais longe nesta análise ao associar as regras directamente aos indivíduos ou às células e não ao sistema no seu conjunto. Cada indivíduo é modelado de acordo com o seu comportamento, o que faz dos modelos baseados em agentes uma poderosa ferramenta para simular as opções individualizadas. Os agentes diferem dos autómatos celulares

pela sua mobilidade espacial, facto que leva Torrens (2003) a afirmar que os SMA podem ser classificados como *autómatos celulares móveis*. Na verdade, os SMA apresentam as mesmas vantagens que os autómatos celulares, mas têm uma capacidade adicional ao nível do detalhe, da flexibilidade, das dinâmicas territoriais, da aplicabilidade e da representação comportamental (Torrens, 2003). Por isso, os SMA são mais adequados para representar entidades móveis nos meios urbanos, como pessoas e veículos. É de referir que alguns modelos, como o UrbanSim e o SprawlSim associam e procuram tirar partido das vantagens de ambas técnicas de geosimulação, representando o território através de uma malha de células com determinadas características, sobre as quais se deslocam e interagem os agentes. Acci (2006) apelida estes modelos de *modelos de microsimulação dinâmica*.

Em comparação com as gerações anteriores, os modelos de microsimulação e, em particular os modelos baseados em agentes, apresentam um conjunto de evoluções. A concepção dos modelos passa a envolver um espectro mais alargado de domínios científicos, com destaque para as ciências da computação. Ao nível das entidades espaciais, enquanto os modelos anteriores trabalhavam com unidades espaciais agregadas, os modelos de geosimulação utilizam objectos espaciais individualizados e não modificáveis (edifícios, lotes, pessoas, etc.). Ao nível das interacções há também diferenças assinaláveis. Enquanto os modelos das gerações anteriores pugnam pelos fluxos (de pessoas, veículos, de informações, etc.) entre unidades espaciais agregadas, os modelos de terceira geração baseiam-se nas interacções comportamentais entre os agentes, que podem assumir diversas formas (fluxos, difusão, dispersão, efeito da distância nas relações, etc.). É a partir do conjunto das interacções dos agentes à escala micro que emergem os padrões comportamentais ao nível macro. A questão do tempo tem também uma abordagem diferente. Enquanto a maior parte dos modelos anteriores são essencialmente estáticos, os modelos de geosimulação são bastante mais dinâmicos, representando alguns deles as interacções quase em tempo real, como é o caso de alguns modelos de tráfego. Por último, há também diferenças de fundo no que respeita aos objectivos pretendidos com a simulação. Nos modelos de geosimulação, o foco está na reconsideração dos próprios objectivos da simulação. A questão da previsão dá lugar a uma maior preocupação com a construção de cenários, que passam a ser ferramentas auxiliares no processo de tomada de decisão. Os novos modelos são mais prospectivos do que de previsão.

A expansão dos modelos de microsimulação ao longo das últimas duas décadas (após 1990) deve-se, na opinião de Torrens (2003) e de Batty (2009), a quatro motivos principais. Em primeiro lugar, o seu desenvolvimento está associado ao maior volume de dados sobre o território e à maior desagregação espacial com que a informação é recolhida, numa lógica de uma gestão mais eficiente do território. Em segundo, o contínuo progresso informático permitiu não só desenvolver sistemas computacionais com maior capacidade para analisar a complexidade destes dados, como o surgimento de novas linguagens de programação, que favoreceram a modelação do comportamento dos agentes. Um terceiro motivo relaciona-se com a questão da complexidade dos problemas e da necessidade da sua resolução numa perspectiva *bottom up*. A complexidade dos processos territoriais passou a exigir ferramentas de análise mais fina, que vão à escala individualizada de cada agente. E, em quarto lugar, pela necessidade de desenvolver modelos mais realistas dos sistemas urbanos, o que passa pela incorporação e modelação de um elevado número de agentes.

3.3. Exemplos de modelos baseados em agentes

O objectivo da presente Subsecção é o de realizar uma breve revisão de alguns dos modelos mais representativos baseados em agentes que foram desenvolvidos no âmbito do planeamento do território (Quadro 1).

Quadro 1: Modelos de microsimulação baseados em agentes mais representativos

Modelo	Designação	Referências
UrbanSim	Urban Simulation	Waddell, 2002
ILUTE	Integrated Land Use, Transportation, Environment	Miller <i>et al.</i> , 2004
RAMBLAS	Regional plAnning Model Based on the micro-simULation of daily Activity patternS	Veldhuisen <i>et al.</i> 2000
ILUMASS	Integrated Land-Use Modelling and Transportation System Simulation	Moeckel <i>et al.</i> , 2002
SIMAC	SIMulation ACcessibility	Bellomo & Occelli, 2004
TURISTI	-	Rabino & Girotti, 2004
WILSON	-	Rabino & Girotti, 2004
OBEUS	Object-Based Environment for Urban Simulations	Benenson <i>et al.</i> , 2001
PUMA	Predicting Urbanisation with Multi-Agents	Ettema <i>et al.</i> , 2005
ALMA	Agent-based Land MArket	Filatova <i>et al.</i> , 2007
SimPop	-	Sanders, 2006
SprawlSim	-	Torrens, 2001

Não é pretensão, nem seria viável, desenvolver aqui uma abordagem minuciosa dos diversos modelos construídos e dos estudos levados a cabo nas mais diversas partes do globo. Como existem modelos com diferentes níveis de operacionalidade e de desenvolvimento, a abordagem centrar-se-á nos modelos operacionais, i.e., naqueles que

foram formulados, calibrados e aplicados a algum território em concreto. Por uma questão de síntese, optou-se também por restringir a análise aos modelos relacionados especificamente com o uso do solo. De seguida exploram-se as principais características dos modelos mais referenciados na literatura.

De referir que o desenvolvimento de um modelo de simulação pode conseguir-se através do recurso a plataformas de simulação, que disponibilizam uma base para a implementação e visualização dos agentes, permitindo que os modeladores se focalizem mais em questões de investigação, do que no estudo das ferramentas necessárias para executar a simulação e em programação (Castle & Crooks, 2006). Existem vários formatos que incluem desde plataformas *open source* (Swarm, Mason, Repast), *freeware/shareware* (StarLogo, NetLogo, Obeus) assim como plataformas que são comercializadas por empresas (AgentSheets e o AnyLogic).

3.3.1. O modelo UrbanSim

O UrbanSim (www.urbansim.org) foi inicialmente concebido como um modelo à escala metropolitana, para gerir o crescimento destas áreas, nomeadamente no que respeita às interações entre o uso do solo e os transportes (Waddell, 2002). O modelo foi desenvolvido pela equipa liderada por Paul Waddell, tendo sido calibrado para a cidade de Eugene-Springfield (Oregon, EUA). Mais tarde, o modelo viria a ser aplicado a diversas cidades daquele país (Honolulu, Salt Lake City, Seattle, Utah, entre outras), passando também a ser utilizado em diversos países (Holanda, França, Suíça) de tal forma que é um dos modelos que mais estudos e aplicações tem suscitado ao longo dos últimos anos (Joshi *et al.*, 2006; Cavari, 2007; Batty, 2009). Ao longo do tempo, o modelo sofreu também diversas evoluções: da simulação do mercado de solos, evoluiu para um modelo de previsão da localização de actividades, tendo-lhe sido acrescentado mais recentemente uma extensão de análise ambiental (Iacono *et al.*, 2008).

O UrbanSim é considerado um modelo de transição entre os modelos de segunda geração e os modelos de microsimulação baseados em agentes (Iacono *et al.*, 2008). Os incrementos sofridos ao longo do tempo têm transformado o UrbanSim num modelo de microsimulação dinâmica, uma vez que trabalha com dados espaciais muito desagregados (Waddell *et al.*, 2003). Para Joshi *et al.* (2006), o UrbanSim enquadra-se mesmo nos modelos baseados em agentes, pois modela autonomamente os comportamentos de vários agentes, como residentes, trabalhadores e promotores imobiliários. O UrbanSim constitui um dos exemplos que funciona num ambiente típico

dos autómatos celulares, i.e., os agentes operam sobre uma grelha regular de células. A grelha tem associada uma base de dados com informações relativas ao solo (tipo de uso, tamanho do lote, número de edifícios, etc.).

Os principais agentes modelados são os residentes, os empresários, os promotores e os órgãos governamentais (Waddell, 1998). O objectivo do modelo consiste em simular o comportamento destes agentes no processo de escolha de localização residencial e em simular as interações que há entre eles. De entre estes agentes, os residentes e os empresários têm a capacidade de mudar de localização e de escolher o novo local de instalação; os promotores decidem em que parcelas de terreno poderão surgir novas edificações e as características das construções; e, por sua vez, estes agentes interagem e são influenciados pelos órgãos governamentais, nomeadamente pelas políticas de ocupação do solo que definem. O funcionamento do UrbanSim baseia-se em vários submodelos (demográficos, económicos, de acessibilidade, etc.), que interagem entre si a partir de uma base de dados comum. Cada um destes submodelos tem objectivos específicos. Por exemplo, o submodelo demográfico analisa as flutuações populacionais, com a consequente perda ou aumento da procura residencial; o submodelo de acessibilidade analisa os diferentes níveis de acessibilidade da cidade através de veículo próprio. O UrbanSim recorre a uma técnica estatística específica (regressão multinomial logística), para efectuar a localização de novos residentes (e daqueles que pretendem mudar de residência) e dos empregos (Timmermans, 2003). O princípio de funcionamento do modelo baseia-se na disponibilidade para pagar manifestada pelos diversos agentes envolvidos, que pretendem mudar de localização. Neste processo, os compradores procuram a aquisição dos edifícios ao menor preço possível, enquanto os vendedores e os promotores procuram maximizar os lucros. Assim, o UrbanSim opera num cenário dinâmico de desequilíbrio do mercado de solos, que sofre alterações ao longo do tempo. As variáveis utilizadas na localização de residentes incluem atributos dos edifícios associados à grelha (preço, densidade e idade), as características das áreas adjacentes (densidade edificação, usos existentes, etc.) e a acessibilidade ao emprego. A localização do emprego inclui variáveis idênticas, com excepção do acesso da população (mão-de-obra).

3.3.2. O modelo ILUTE

O ILUTE é um modelo que foi concebido por uma equipa liderada por Eric Miller (Universidade de Toronto). O ILUTE é um modelo de microsimulação do uso do solo e dos transportes (Moeckel *et al.*, 2002; Devisch *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2004), sendo mesmo considerado por Iacono *et al.* (2008) como um dos modelos de microsimulação mais completos. O ILUTE foi inicialmente concebido para Toronto.

O objectivo do modelo consiste em simular a evolução de uma área urbana e a influência dos transportes nesse crescimento para um horizonte temporal de 10 a 20 anos (Miller *et al.*, 2004). Trata-se portanto de um modelo de microsimulação integrado, que inclui várias componentes: a evolução da área edificada, a evolução do crescimento efectivo da população, a simulação das localizações das áreas residenciais e empresariais, a simulação da actividade económica do território (que gera fluxos de pessoas e de bens/serviços). O modelo começa por simular a evolução da população urbana e das actividades económicas, para depois simular as deslocações dos residentes e dos fluxos de bens e de serviços, tendo em conta o modo de transporte, o percurso efectuado e a hora do dia. Depois, o modelo simula o desempenho das infra-estruturas e dos meios de transporte para as deslocações das pessoas/bens e, por último, as emissões de poluentes libertadas pelos transportes e pelas actividades económicas urbanas.

No processo de modelação da forma como evoluem as áreas residenciais e empresariais, os autores assumem que a não-linearidade do comportamento dos actores constitui um primeiro princípio da microsimulação. Assim, os primeiros agentes a serem simulados no ILUTE são os indivíduos, os residentes e os negócios existentes, exercendo cada um deles um conjunto de acções com implicações directas na evolução do território. Para atingir estes objectivos, é dado um enfoque particular à dimensão individual, i.e., quando um residente decide mudar de residência ou quando uma empresa cria postos de trabalho, estão a gerar disponibilidades de mercado, criando uma oferta disponível para novas entidades. Estas ofertas são consideradas pela ordem de chegada e o ritmo a que são preenchidas depende da performance do mercado. Além disso, o modelo considera o factor preço que os residentes estarão dispostos a pagar para adquirir um novo alojamento, como resultado da oferta de mercado. A introdução deste elemento permite determinar os preços médios do mercado em função dos atributos da localização.

De acordo com Miller *et al.* (2004), a representação espacial da cidade é feita com base em vários elementos: (i) edifícios; (ii) solo (definido por parcelas de terreno); (iii) zonas (representações espaciais do território relativamente consolidadas, como as

zonas estatísticas dos recenseamentos); (iv) grelhas de células (representam de uma forma mais eficiente e a uma escala mais fina o território); (v) os residentes e as empresas não ocupam apenas uma categoria de solo, mas efectivamente ocupam uma dada área de implantação, que permite falar em rácios e pode ser determinante para esses tipos de ocupação. Verifica-se que há, assim, uma hierarquia dos elementos espaciais, pois os edifícios estão localizados sobre o solo, que por sua vez está dividido em zonas, parcelas ou numa grelha de células com diferentes níveis de ocupação.

No contexto dos modelos de micro-simulação, o ILUTE é um projecto ambicioso. Como refere Timmermans (2003), o ILUTE procura desenvolver um modelo das actividades desenvolvidas pelos indivíduos e dos padrões de deslocações efectuadas, o que exige um trabalho adicional de programação. Ao contrário de outros modelos que fazem simulações diárias, o ILUTE faz várias simulações para cada dia.

3.3.2. O modelo RAMBLAS

O RAMBLAS constitui um outro exemplo de um modelo de microsimulação (Miller *et al.*, 2004; Iacono *et al.*, 2008). Como outros modelos (ILUTE, ILUMASS, etc.), o RAMBLAS também resulta de trabalhos académicos, tendo sido desenvolvido na Universidade Tecnológica de Eindhoven (Veldhuisen *et al.*, 2000).

O RAMBLAS é um modelo de planeamento regional concebido para a região de Eindhoven que se baseia na microsimulação do padrão diário da deslocação da população. Este padrão funciona como a base a partir da qual é feita a previsão da distribuição espacial da procura de transporte e de serviços na cidade (Ballas *et al.*, 2005). O objectivo do modelo consiste em determinar as consequências que as decisões relacionadas com o uso do solo, com as políticas de construção de edifícios e de infra-estruturas viárias têm na distribuição das áreas residenciais e empresariais e nas deslocações. Além disso, os autores do modelo (Veldhuisen *et al.*, 2000) procuram demonstrar como se pode generalizar os padrões de actividade de um território com base num sistema de previsões da procura de transportes e do tempo gasto nas deslocações. Para tal, os autores recorreram a procedimentos de previsão e de cálculo simples (por exemplo não considerando os preços).

De acordo com Timmermans (2003), as etapas iniciais da modelação consistem na distribuição dos vários tipos de agregados familiares pelas diferentes categorias residenciais existentes em cada zona e na distribuição das residências e dos usos do solo por zonas. Estas constituem as variáveis externas da simulação. Os agregados são

classificados em função de várias características (a dimensão e a idade e o género dos seus elementos). Os atributos espaciais do território, ou seja, o uso do solo, o stock imobiliário e o sistema de estradas) são tratados como variáveis que podem ser manipuladas no processo de planeamento (o planeamento do sistema de estradas também é dependente das decisões tomadas pelas autoridades competentes). A distribuição espacial das actividades e das deslocações é tratada como uma variável dependente. Deste modo, o modelo permite prever as consequências que eventuais medidas possam ter nestas variáveis e avaliar a eficácia dessas mesmas decisões.

O objectivo da microsimulação é o de procurar dar resposta a um conjunto de questões sobre a evolução das actividades no território: onde, quando e por quanto tempo vão ter lugar, que modos de transporte vão envolver e que percursos serão utilizados. Os primeiros passos no processo de microsimulação envolvem a identificação do segmento populacional a que pertence cada indivíduo da área em estudo (são considerados 24 segmentos com base no género, na idade, emprego, etc.) e a consideração do tipo de actividades que desenvolvem e o modo de transporte utilizado (são considerados sete tipos de actividades, como trabalho, escola, compras, etc.). A escolha do modo de transporte é derivada a partir de cada uma das deslocações entre a área residencial e o local da actividade. Com base nestes procedimentos, a microsimulação permite obter uma agenda das actividades ao nível individual. O próximo passo na modelação consiste em implementar esta agenda no espaço e no tempo. Para concretizar este objectivo, o modelo assume um conjunto de pressupostos em relação às actividades. Por exemplo, no caso do emprego, o modelo assume que o tempo das deslocações diárias constitui o tempo que os trabalhadores estão dispostos a gastar nas deslocações pendulares em função do modo de transporte envolvido. No modelo, a zona de emprego é representada através do número total de empregos disponíveis e é delimitada pelos tempos máximos de deslocação que os trabalhadores estão dispostos a percorrer. Para as restantes categorias, o modelo baseia-se em outros pressupostos. Depois de estabelecidos os pares das deslocações (origem/destino), o passo seguinte consiste na microsimulação dos fluxos de tráfego. Como o tempo da deslocação depende da situação de tráfego, a velocidade de deslocação na rede é calculada através de um método específico (o *speed-flow*). Os resultados da microsimulação de tráfego servem para prever as alterações do uso do solo e nas dinâmicas de construção imobiliária e de construção de estradas.

4.4.3.3. O modelo ILUMASS

O ILUMASS é um modelo que foi desenvolvido na Alemanha e que foi inicialmente aplicado à cidade de Dortmund (Moeckel *et al.*, 2002). Trata-se de um modelo integrado do tráfego rodoviário urbano, que incorpora as transformações do uso do solo e a respectiva alteração na procura de transportes. O ILUMASS é também um modelo de microsimulação baseado em agentes (Devich *et al.*, 2004; Sanders, 2006).

Tal como o ILUTE, este é um modelo integrado que combina o uso do solo, os transportes e o ambiente. Através deste modelo, Moeckel *et al.* (2002) procuraram representar as interacções entre os padrões de actividade/mobilidade urbana e simular diversas interacções (localização residencial e empresarial, alteração do uso do solo, comportamentos de mobilidade) e os impactos ambientais decorrentes da utilização dos transportes urbanos (ruído e poluição atmosférica). O modelo encontra-se estruturado num conjunto de 25 módulos, onde cada um deles corresponde a componentes diferentes, mas que se encontram interligadas. Os módulos estão relacionados com as infra-estruturas de transportes, edifícios, empresas, localização, veículos, actividades, transportes e ambiente. Sanders (2006) refere que a dimensão temporal no ILUMASS é variável, indo desde períodos superiores a um ano (as infra-estruturas de transportes e os edifícios, por exemplo, onde o processo de mudança é mais lento) até ao diurno (as deslocações diárias das pessoas ou a emissão de poluentes, por exemplo). Cada um dos módulos reflecte um processo de escolha e de decisão por parte dos indivíduos. Nos módulos mais simplificados, as alterações são efectuadas segundo uma transição de um estado para outro de acordo com uma certa probabilidade (por exemplo, a mudança do estado civil de uma pessoa). Noutros casos, o processo de escolha individual resulta da interacção de vários módulos. Por exemplo, a decisão da escolha residencial obedece a um conjunto de factores, como a localização, as características do edifício, o preço, etc. Os módulos estão ligados a modelos através dos quais se determina o padrão diário das actividades exercidas, assim como das deslocações e do transporte de mercadorias.

4.4.3.4. O modelo OBEUS

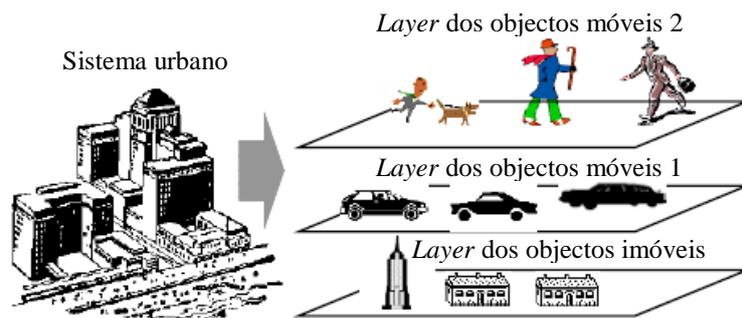
O OBEUS é um modelo que foi formulado na Universidade de Telavive pela equipa liderada por Itzhak Benenson (Benenson *et al.*, 2001, 2005).

Uma das principais inovações deste modelo reside na tentativa de modelar simultaneamente as relações espaciais entre as componentes infra-estruturais e humanas da cidade, que são respectivamente designadas pelos autores por objectos ou *agentes*

imóveis e *móveis*. Em termos mais específicos, os autores procuram atingir essencialmente três objectivos com o modelo:

- processar simultaneamente os agentes móveis e imóveis da cidade;
- analisar as relações espaciais existentes entre os vários agentes da cidade;
- disponibilizar uma ferramenta de modelação que permita representar as mudanças operadas nos objectos infra-estruturais da cidade, analisar as migrações e as adaptações dos agentes sociais e avaliar o surgimento/desaparecimento dos objectos urbanos.

O OBEUS é um modelo dinâmico, com um tipo de arquitectura que integra funcionalidades dos SIG, dos autómatos celulares e dos SMA. Com efeito, o modelo faz uma representação do sistema urbano através de um conjunto de três camadas (*layers*) representadas num SIG e que incluem (Figura 5): os objectos fixos, os objectos móveis (inanimados, como os veículos) e os objectos móveis sociais (residentes, peões, etc.). A presença de funcionalidades dos autómatos celulares afere-se pela existência de uma grelha espacial de células, através das quais são realizadas várias simulações, como a representação das relações de vizinhança ou a representação dos domínios. A abordagem dos objectos feita pelo modelo adopta directamente um SMA sobre a matriz celular em que o espaço está dividido.



Fonte: Portugali, 2000.

Figura 5: As componentes do sistema urbano no OBEUS

No OBEUS, a representação do meio urbano baseia-se numa estrutura que é constituída por três componentes fundamentais: os *objectos*, as *relações* e os *domínios*. Estas componentes são designadas por classes abstractas, estando organizadas hierarquicamente. Os objectos urbanos podem ser fixos ou móveis. Enquanto os objectos fixos (edifícios, estradas, etc.) são aqueles que uma vez implantados não alteram a sua localização, os móveis (veículos, firmas, residentes, peões, etc.) podem deslocar-se pela cidade.

A representação do sistema urbano requer que se conheçam as relações entre os objectos urbanos, das quais resultam as dinâmicas urbanas. O OBEUS recorre ao *Modelo de Relacionamento de Entidades*, que se baseia num conjunto de pressupostos teóricos que regulam as relações entre os objectos. Assim, o modelo assume que as relações entre os objectos fixos são inalteráveis ao longo do tempo depois de estabelecidas. Em segundo lugar, o modelo não permite um relacionamento directo entre dois objectos móveis, que só se podem relacionar com os objectos fixos. Em terceiro lugar, numa relação entre um objecto imóvel e um móvel, este último é considerado o líder, sendo responsável pela criação e pela actualização da relação. Para além destas restrições, o OBEUS impõe as regras de relacionamento nos casos das relações espaciais entre objectos nas tipologias de um-para-um (1:1), de um-para-muitos (1:M) e de muitos-para-muitos (M:M).

O conceito de domínio corresponde a unidades espaciais onde a maior parte dos objectos têm atributos específicos e satisfazem um determinado critério, representando tipicamente áreas populacionais correspondentes a diferentes estratos socioeconómicos. O critério para definir uma área residencial rica poderá ser o preço (por exemplo, se o preço da maior parte dos apartamentos num edifício for superior a X€ por m²). Este conceito é usado na análise espacial para representar os efeitos que os domínios podem ter sobre as áreas adjacentes (no citado exemplo das áreas residenciais ricas, a possibilidade dos preços subirem nos terrenos/ edifícios contíguos é alta).

O OBEUS tem sido utilizado para desenvolver uma série de modelos espacialmente explícitos, como por exemplo na simulação da distribuição de etnias numa área residencial de Telavive (Benenson *et al.*, 2005).

5. Conclusões

A complexidade das dinâmicas urbanas está associada a dois motivos principais. Por um lado, ao crescimento físico e demográfico das cidades e ao consequente aumento do número de entidades que interagem entre si e com o próprio espaço urbano; e, por outro, à dificuldade crescente que os métodos considerados convencionais de planeamento têm em lidar com a incerteza e com a imprevisibilidade que resultam dessas interacções. Por esta razão, ao longo dos últimos anos, tem-se assistido ao desenvolvimento de várias ferramentas de apoio à decisão, que procuram incorporar a dimensão individual e a interacção entre as entidades no planeamento das cidades. Esta noção enquadra-se também numa perspectiva *bottom up* de concepção dos problemas,

uma vez que as tendências globais são consideradas como resultantes das acções e dos relacionamentos mantidos entre as diversas entidades ao nível individual.

Para dar resposta a estas novas solicitações, as designadas *técnicas emergentes* têm tido uma crescente utilização no quadro da avaliação dos impactos decorrentes de determinadas opções ou, simplesmente, na construção de cenários de desenvolvimento futuro. De entre essas técnicas, os SMA têm-se destacado por apresentarem um conjunto de características que estão particularmente bem vocacionadas para a representação das dinâmicas urbanas. Para além de poderem ser parametrizados com informações específicas em função dos objectivos da simulação, os modelos de SMA incorporam agentes móveis, que representam os agentes reais que se deslocam nas cidades, como as pessoas (residentes, trabalhadores, turistas, etc.) ou os veículos. Para além desta especificidade, os modelos baseados em agentes têm a vantagem de poderem ser acoplados a outras técnicas de modelação, nomeadamente aos autómatos celulares. Neste caso, o território é representado por uma grelha de células com informações concretas (usos existentes, características dos edifícios ou dos lotes, etc.), sobre o qual interagem e se deslocam os agentes. Adicionalmente, estes modelos podem ser articulados com outras técnicas de análise de informação geográfica, como os SIG, seja para aceder a informações, seja para a obtenção de *outputs*.

Em relação a outras ferramentas convencionais, os modelos baseados em agentes caracterizam-se por serem mais dinâmicos e por representarem os fenómenos a partir do nível micro: são dinâmicos porque simulam o comportamento individual dos agentes, de que resultam as tendências colectivas, mas também por terem em consideração a dimensão dinâmica do tempo (não se remetem a um único momento do tempo); e são micro pelo facto de considerarem os vários agentes ao nível individual.

Os modelos baseados em agentes são utilizados para simular a evolução de fenómenos nos mais variados domínios e em várias escalas que vão desde o nível micro (à escala de um edifício) até ao nível macro (à escala de uma região). As simulações de tráfego, transportes, ambiente, situações emergência, saúde constituem alguns dos campos onde têm sido utilizados modelos baseados em agentes. No caso específico do planeamento do território, procurou-se apresentar alguns exemplos de modelos que tiveram uma aplicação prática. O objectivo foi o de apresentar as variáveis que podem ser simuladas e os procedimentos que a sua construção envolve. Verifica-se que os modelos de microsimulação estão muito focalizados na análise da ocupação do uso do solo e nas variáveis que estão implicadas com a sua transformação. Nestes modelos há

sempre duas componentes principais: os transportes, de que depende a mobilidade e a localização dos vários agentes (residentes, trabalhadores, empresas, etc.) e dos vários agentes que operam ao nível da transformação do uso do solo, de que resulta a relação entre a oferta e a procura. A programação que está subjacente ao funcionamento e à arquitectura destes modelos é relativamente complexa e obriga a vários testes de validação e de calibração dos modelos. Esta é, sem dúvida, uma das dificuldades principais que está inerente aos modelos baseados em agentes, que não têm uma estrutura de funcionamento e uma forma de utilização tão *amigável* quanto a de outras ferramentas, como os SIG. É por esta razão que, muitos dos modelos apresentados, foram desenvolvidos em centros de investigação universitários, por equipas multidisciplinares, tendo sofrido ao longo do tempo sucessivos incrementos.

No caso de Portugal existem alguns estudos relacionados com SMA (como o de Pereira, 2004) mas, até ao momento, ainda não foi possível identificar modelos baseados em agentes formulados especificamente para o planeamento do território. Esperamos, por isso, em futuras publicações aquilatar esta apreciação, assim como dar conhecimento dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do desenvolvimento de um modelo baseado em agentes para a rede urbana conhecida por *Quadrilátero Urbano*.

Referências bibliográficas

- Acci, L. (2006) “Modelli di simulazione e complessità urbana”. In *XXVII Conferenza Italiana di Scienze Regionali*, 12-14 ottobre, Pisa.
- Ballas, D., Clarke, P., Wiemers, E., (2005) “Building a dynamic spatial microsimulation model for Ireland”. In *Population, Space and Place*, N.º11, pp. 157-172.
- Batty, M. (2008) "The Size, Scale, and Shape of Cities". In *Science*, Vol. 319, N.º 5864, pp.769-771.
- Bellomo, M., Occelli, S. (2004) “Experimenting a multi-agent model: the SIMAC model”. In *Contributo di Ricerca*, N.º184 Istituto Ricerche Economico Sociali del Piemonte, Torino.
- Benenson, I., Aronovich, S., Noam, S. (2001) *OBEUS: Object-Based Environment for Urban Simulations*, University of Tel-Aviv.
- Benenson, I., Aronovich, S., Noam, S. (2005) “Let’s talk objects: generic methodology for urban high-resolution simulation”. In *Computers, Environment and Urban Systems*, N.º29, pp.425-453.
- Bithell, M., Brasington, J., Richards, K. (2008) “Discrete-element, individual-based and agent-based models: Tools for interdisciplinary enquiry in geography?” *Geoforum*, N.º39, 625–642.
- Briassoulis, H. (2000) “Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches”. In Loveridge, S. (ed.), *The Web Book of Regional Science*, West Virginia University, Morgantown.

- Cavari, R. (2007) *A multi-agent planning support system for assessing externalities of urban form scenarios: development and application in an Israeli case study*, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- Cavezzali, A., Rabino, G. (2003) "Multi-agent systems and territory: concepts, methods and applications". In *43rd Congress of the European Regional Science Association*, 27-30 August, Jyväskylä.
- Costa, M. (1999) *Uma arquitetura baseada em agentes para suporte ao ensino à distância*, PhD Thesis, UFSC, Florianópolis.
- Devisch, O., Timmermans, H., Arentze, T., Borgers, A. (2004) "Towards a generic multi-agent engine for the simulation of spatial behavioural processes". In Van Leeuwen, J.P. and H. Timmermans (eds.), *Recent Advantages in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp.145-160.
- Ettema, D., Kor, J., Timmermans, H., Bakema, A. (2005) "PUMA: Multi-agent modelling of urban systems". In *45th Congress of the European Regional Science Association*, 23-27 August, Amsterdam.
- Faludi, A. (2000) "The performance of spatial planning". In *Planning Practise and Research*, n.º15 (4), pp.299-318.
- Ferber J., Gasser, L. (1991) "Intelligence artificielle distribuée". In *11th Conference on Expert Systems and their Applications*, Avignon.
- Ferber, J., Gutknecht, O., Michell, F. (2004) "From agents to organizations: an organizational view of multi-agent systems". In Giorgini *et al.* (eds), *Agent-oriented software engineering IV*, Springer-Verlag, pp. 214-230.
- Ferreira, A. (2005) *Gestão estratégica de cidades e regiões*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Filatova, T., Parker, D., Veen, A. (2007) "Agent-based land markets: heterogeneous agents, land prices and urban land use change". In F. Amblard (ed.) *Proceedings of the 4th Conference of the European Social Simulation Association (ESSA'07)*, 10th-14th September, Toulouse, pp.263-275.
- Hamman, Y., Moore, A., Whigham, P. (2007) "The dynamic geometry of geographical vector agents". In *Computers, Environment and Urban Systems*, vol.31, pp.502-519.
- Healey, P. (2007) *Urban complexity and spatial Strategies, towards a relational planning for our times*, Routledge, Oxon.
- Hunt, J., Kriger, D., Miller, E. (2005) "Current operational urban land-use-transport modelling frameworks: a review". In *Transport Reviews*, Vol. 25, N.º3, pp.329-376.
- Iacono, M., Levinson, D., El-Geneidy, A. (2008) "Models of transportation and land use change: a guide to the territory". In *Journal of Planning Literature*, Vol. 22, N.º4, pp.323-340.
- Joshi, H., Guhathakurta, S., Konjevod, G., Crittenden, J., Li, K. (2006) "Simulating the effect of light rail on urban growth in Phoenix: an application of the UrbanSim modelling environment". In *Journal of Urban Technology*, Vol.13, N.º2, pp. 91-111.
- Ligmann-Zielinska, A., Jankowski, P. (2005) "Agent-based models as laboratories for spatially explicit planning policies". In *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.34, pp.316-335.
- Ligtenberg, A., Wachowicz, M., Bregt, A., Beulens, A., Kettenis D. (2004) "A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning". In *Journal of Environmental Management*, n.º72, pp.43-55.
- Lowry, I. (1964) *A Model of Metropolis*, Rand Corporation, Santa Monica.
- Macy, M., Willer, R. (2002) "From factors to actors: computational sociology and agent-based modeling". In *Annual Review of Sociology*, Vol. 28, pp.143-166.

- Manson, S. (2007) "Challenges in evaluating models of geographic complexity". In *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 34, pp.145-260.
- Matos, P. (2006) *As tecnologias de informação geográfica no apoio à avaliação em planeamento territorial, potencialidades e limitações face a desafios*, MSc Thesis, FEUP, Porto.
- Miller, E., Hunt, J., Abraham, J. (2004) "Microsimulating urban systems". In *Computers, Environment and Urban Systems*, N.º 28, pp.9-44.
- Moeckel, R., Schurmann, C., Wegener, M. (2002) "Microsimulation of urban land use". In *42nd European Congress of the Regional Science Association*, 27-31 August, Dortmund.
- Molina, J., Corchado, J., Mestras, J. (2005) "Modelos y arquitecturas de agentes". In Mas, A. (coord.), *Agentes software y sistemas multiagente: conceptos, arquitecturas y aplicaciones*, Prentice Hall, pp.29-64.
- Moore, D. (2002) "GIS in a knowledge domain: bringing GIS to operational integration in spatial planning". In *8th EC-GI & GIS Workshop*, ESDI – A work in progress, Dublin.
- Moulin, B., Chaib-Draa, B. (1996) "An Overview of Distributed Artificial Intelligence". In O'Hare, G. & Jennings, N. (eds.), *Foundations of distributed artificial intelligence*, New York: John Wiley & Sons, pp.3-55.
- Nwana, H. (1996) "Software Agents: An Overview". *Knowledge Engineering Review*, Vol.11, N.º3, pp. 1-42.
- Pereira, I. (2004) *Sistema multi-agente para apoio à negociação em mercados de electricidade* (PhD Tese), UTAD, Vila Real.
- Portugali J. (2000) *Self-organisation and the city*, Berlin, Springer.
- Rabino, G., Girotti, A. (2004) "Ontology of multi-agents processes of spatial decision". In *44th Congress of the European Regional Science Association*, Porto, 25-29 August.
- Ramos, R., Silva, A. (2002) "Oportunidades e Desafios de Técnicas Emergentes para o Planeamento Urbano: o caso dos modelos de cellula automota". In *VII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica, ESIG 2002*, Oeiras, 13 a 15 de Novembro.
- Rao A., Georgeff M. (1998) "Decision procedures of BDI Logics". *Journal of logic and computation*, N.º8(3).
- Saarloos, D., Arentze, T., Borgers, A., Timmermans, H. (2004) "Multi-agent generating alternative plans in local land-use planning". In Van Leeuwen & Timmermans (eds.), *Developments in Design & Decision Support System in Architecture and Urban Planning*, Eindhoven: Eindhoven University of Technology, pp. 95-110.
- Sanders, L. (2006) "Les modèles agent en géographie urbaine". In Amblard F., Phan D. (eds.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société*, pp.151-168.
- Sawyer, R. (2003) "Artificial societies, multiagent systems and the micro-macro link in sociological theory". *Sociological Methods & Research*, Vol.31, N.º3, 325-363.
- Schumacher, M., Grangier, L., Jurca, R. (2008) "Governing environments for agent-based traffic simulations". In HDSEA (ed.), *Multi-agent systems and applications*, 5th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems, CEEMAS, pp. 163-172, Leipzig, 25-27 September.
- Silva, A., Ramos, R., Souza, L., Rodrigues, D., Mendes, J. (2004) "SIG: uma plataforma para a introdução de técnicas emergentes no planeamento urbano, regional e de transportes: uma ferramenta 3D para análise ambiental urbana, avaliação multicritério e redes neurais artificiais". In Silva *et al.* (ed.), *Câmara Brasileira dos Livros*, São Carlos.

- Southworth, F. (1995) *A technical review of urban land use transportation models as tools for evaluating vehicle travel reduction strategies*, Report ORNL-6881, Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- Tabak, V., De Vries, B., Dijkstra, J. (2004) "User behaviour modelling". In Van Leeuwen & Timmermans (eds.), *Developments in Design & Decision Support System in Architecture and Urban Planning*, Eindhoven: Eindhoven University of Technology, pp.141-156.
- Timmermans, H. (2003) "The saga of integrated land use-transport modelling: how many more dreams before we wake up?" In Axhausen, K. (ed.), *Moving through nets: the physical and social dimensions of travel*, Elsevier, Oxford, pp.219-248.
- Torrens, P. (2001) "SprawlSim: modeling sprawling urban growth using automata-based models". In Parker, D. et al. (eds.), *Agent-based models of land-use and land-cover change*, Report and Review of an International Workshop, 4th-7th October, Irvine, pp.72-78.
- Torrens, P. (2003) "Cellular automata and multi-agent systems as planning support tools". In Geertman, S. & Stillwell, J. (eds.) *Planning support systems in practise*, Springer-Verlag, pp.205-222.
- Valbuena, D., Verburg, P., Bregt, A. (2008) "A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research". In *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n.°128, pp.27-36.
- Veldhuisen, K., Timmermans, H., Kapoen, L. (2000) "Ramblas: a regional planning model based on the micro-simulation of daily activity travel patterns". In *Environment and Planning A*, N.°32 (3), pp.427-443.
- Waddell, P. (2002) "UrbanSim: modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning". In *Journal of the American Planning Association*, Vol. 68, N.°3, pp.297-314.
- Waddell, P., Borning, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M., Ulfarsson, G. (2003) "Microsimulation of urban development and location choices: design and implementation of UrbanSim". In *Networks and Spatial Economics*, N.° 3(1), pp. 43-67.
- Waddell, P., Moore, T., Edwards, S. (1998) "Exploiting Parcel-Level GIS for Land Use Modeling". In *ACSE Conference*, May, Portland.
- Wegener, M. (1994) "Operational urban models: state of the art". In *Journal of the American Planning Association*, Vol. 60, N.°1, pp.17-29.
- Wooldridge, M., Jennings, N. (1995) "Intelligent agents: theory and practice". In *The Knowledge Engineering Review*, N.° 10(2), pp.115-152.
- Wooldridge, M. (2001) "Intelligent agents". In Weiss G. (ed.), *Multiagent systems, a modern approach to distributed artificial intelligence*, pp.27-78, Third printing, Massachusetts Institute of Technology.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*, Second Edition, John Wiley & Sons, Torquay.