

MÉTODOS DE COMPLEXIDADE APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES¹

Dick Ettema²

1 INTRODUÇÃO: SISTEMAS DE TRANSPORTES COMO SISTEMAS COMPLEXOS

Nas últimas décadas, as teorias da complexidade vêm apresentando um interesse crescente nas áreas científicas e de políticas públicas (Cilliers, 2001), de economia (Brian Arthur, 2007), de planejamento urbano (Batty, 2007; Bettencourt, 2014) e de transportes (Frazier e Kockelman, 2004). É importante notar que as cidades – nas quais os sistemas de transporte são parte constituinte – são cada vez mais consideradas como sistemas complexos (Bettencourt, 2014). A complexidade das cidades é definida por Bettencourt (2014) em cinco características: *i*) heterogeneidade; *ii*) interconectividade; *iii*) escala; *iv*) causalidade circular; e *v*) desenvolvimento. Se a heterogeneidade e a interconectividade referem-se a agentes individuais e a suas interações (*op.cit.*), o desenvolvimento e a causalidade circular concernem aos processos que ocorrem nas cidades, os quais se materializam, frequentemente, em níveis mais agregados, tais como os padrões de uso do solo, o crescimento econômico e os congestionamentos. Uma importante noção da complexidade das cidades pode ser notada quando o desenvolvimento ocorre como resultado das ações entre agentes em diversos domínios, fazendo com que o desenvolvimento urbano seja produto de interligados processos sociais, econômicos, tecnológicos e ecológicos.

De um modo mais formal, Manson (2001) menciona a noção relevante de complexidade agregada. Tal noção implica que o estado de um sistema, em um certo momento, é o produto do comportamento de elementos individuais (agentes) do sistema. O comportamento dos agentes é guiado por certas regras e por interações mútuas, mas estes não estão cientes do comportamento dos demais agentes deste sistema. Contudo, efeitos de retroalimentação (*feedback*) existem, no sentido de que os agentes podem individualmente responder ao estado agregado do sistema. A agregação de comportamentos individuais leva a produtos emergentes no nível do sistema agregado, os quais podem ser fortemente não lineares. De modo similar, forças externas ao sistema podem acionar uma cadeia

1. Traduzido por Cleandro Krause.

2. Utrecht University.

de respostas em nível individual, levando a uma mudança para um novo estado no nível do sistema (dissipação), por meio de uma série de efeitos de retroalimentação. A Revolução Industrial, deflagrada pela utilização de novas tecnologias, é um exemplo típico deste fenômeno. A esse respeito, é importante ressaltar a noção de que um sistema complexo não existe de modo isolado; pelo contrário, ele existe em um ambiente que exerce forças e que influencia o sistema complexo. Assim, uma decisão importante refere-se à maneira de como definir os limites do sistema, e se essas influências devem ser consideradas como externas ou parte do sistema em si.

Do que foi supracitado, entende-se que os sistemas de transporte têm propriedades de sistemas complexos. Eles contam com múltiplos agentes, incluindo os usuários do sistema (pedestres, ciclistas, passageiros de transportes coletivos, motoristas e passageiros de automóveis), que tomam decisões sobre se, quando, onde e qual modo de transporte se deve utilizar. Da agregação desses comportamentos, emergem características agregadas do sistema, tais como carregamentos de tráfego e níveis de congestionamento nas vias, bem como níveis de utilização ou ocupação dos sistemas de transporte público.³ Os usuários, ao tomar decisões, respondem ao estado do sistema, podendo responder a níveis de congestionamento, mudando frequência de viagens, destinos, modos de transporte e horários das viagens. Por sua vez, as autoridades e os provedores de serviços também podem ser considerados agentes em um sistema de transportes complexo; isto porque decidem sobre a construção de infraestruturas e a provisão de serviços de transporte, respondendo, ao menos parcialmente, ao carregamento do tráfego e à ocupação dos veículos do transporte público. Ainda, em resposta a novas tecnologias, o sistema de transporte pode tornar-se dissipativo. Por exemplo, a produção de automóveis em linha de montagem e a subsequente motorização em massa levaram a uma mudança radical na divisão modal e na extensão das viagens em vários países (Van Wee, 2014). Este exemplo também ilustra a necessidade de definir apropriadamente os limites do sistema, uma vez que a motorização de massa não só causou, mas também foi estimulada pelo processo de expansão urbana. Isto sugere que um sistema de transporte pode ser delimitado de modo estendido, incluindo o desenvolvimento urbano, as decisões de localização residencial e os agentes imobiliários. Ao mesmo tempo, nota-se que desenvolvimentos na sociedade, na economia e na tecnologia, que emergem fora do campo dos transportes, podem exercer influência significativa no uso dos sistemas de transporte. Por exemplo, estilos de vida urbanos podem tornar-se mais aceitos entre adultos jovens, colocando menor ênfase no uso do automóvel e no carro enquanto símbolo de *status* (Frändberg e Vilhelmson, 2014). As novas tecnologias de informação e comunicação (TICs) também podem propiciar novas formas de organizar as viagens, viabilizando a implementação de plataformas

3. *Patronage levels of public transport systems*, no original.

flexíveis, em internet móvel, para o compartilhamento de carros (*car sharing*) (Hansen *et al.*, 2010). Adicionalmente, o desenvolvimento econômico e sua manifestação especial – na forma da localização dos empregos – têm grande impacto na demanda (no tempo e no espaço) de viagens para trabalho e negócios, ainda que seja, inerentemente, de difícil previsão (Dawid, 2015). Por fim, mudanças nos hábitos de trabalho, combinadas com o aumento no uso de tecnologias de informação e comunicação, podem moderar os efeitos do desenvolvimento econômico nesses movimentos pendulares (Alexander, Ettema e Dijst, 2010; Aguilera, 2014).

Tradicionalmente, o planejamento de transportes buscou acomodar as demandas de viagens individuais, de modo a facilitar que fossem atingidos objetivos individuais, sociais e econômicos. As condições principais são, geralmente, garantir um nível mínimo de acessibilidade para todos e evitar congestionamentos, riscos à segurança e poluição que ameace a saúde. Tipicamente, tal planejamento seguiu abordagens de engenharia baseadas no princípio de que a demanda por viagens pode ser determinada (e prevista) a partir da distribuição da população, dos empregos e dos equipamentos. Neste sentido, os modelos de tráfego aplicados consideram a emergência de congestionamentos como uma agregação de decisões individuais sobre viagens. Contudo, a gama de efeitos complexos em um sistema de transportes e usos do solo é potencialmente muito maior, podendo englobar aspectos como poluição e saúde, mercados residenciais, efeitos de equidade e de exclusão, além de questões de sustentabilidade. Reconhecendo tal complexidade, os modelos de tráfego tradicionais foram estendidos, resultando em modelos de interações entre usos do solo e transportes (Luti, sigla em inglês para *land use transport interaction models*), que utilizam representações de indivíduos (baseadas em agentes), famílias, moradias e firmas. Se, por um lado, esses modelos podem levar em conta uma maior gama de interações e de efeitos de *feedback*, por outro, tal acréscimo de opções traz o custo de aumentar não só a necessidade de dados, mas também a incerteza sobre a validade dos resultados. Pode-se, também, apresentar críticas quanto à medida na qual os fatores mais importantes para as mudanças no comportamento de mobilidade⁴ conseguem ser bem representados em modelos de tráfego ou modelos Luti baseados em agentes. Algumas questões cruciais que se colocam são: qual valor deveria ser dado aos modelos de transporte existentes no contexto da complexidade das cidades e dos sistemas de transportes? Como esses modelos podem ser aplicados de modo a explorar os efeitos de processos complexos, tanto internos como externos ao âmbito dos transportes, sobre os sistemas de transportes?

O objetivo deste capítulo é, portanto, proporcionar um panorama geral dos modelos de simulação de tráfego e transportes, bem como de suas opções

4. Entre os fatores mais importantes para as mudanças no comportamento de mobilidade, podem-se elencar o crescimento econômico, as mudanças em normas sociais e nos modelos de negócios das empresas de transporte etc.

em descrever efeitos complexos de políticas públicas ou tendências autônomas, e, também, discutir implicações para formuladores dessas políticas. O capítulo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 discute as características principais dos métodos de complexidade no planejamento de transportes. A seção 3 aborda aspectos de implementação relativos a esses métodos. A seção 4 apresenta implicações para os sistemas de transportes seguidas, na seção 5, de implicações para as cidades e a sociedade. Já a seção 6 traz a discussão de avanços recentes no desenvolvimento de sistemas complexos para os transportes.

2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MÉTODOS DE COMPLEXIDADE PARA PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES EXISTENTES

Nas últimas décadas, várias ferramentas de suporte ao planejamento foram desenvolvidas devido à complexidade dos sistemas de transportes, como descrito anteriormente. Essas ferramentas operam em diferentes escalas e consideram os distintos limites dos sistemas. Tais ferramentas serão discutidas a seguir, com crescente escala espacial e complexidade.

- 1) Modelos de simulação de tráfego.
- 2) Modelos de previsão de demanda de viagens.
- 3) Modelos Luti.

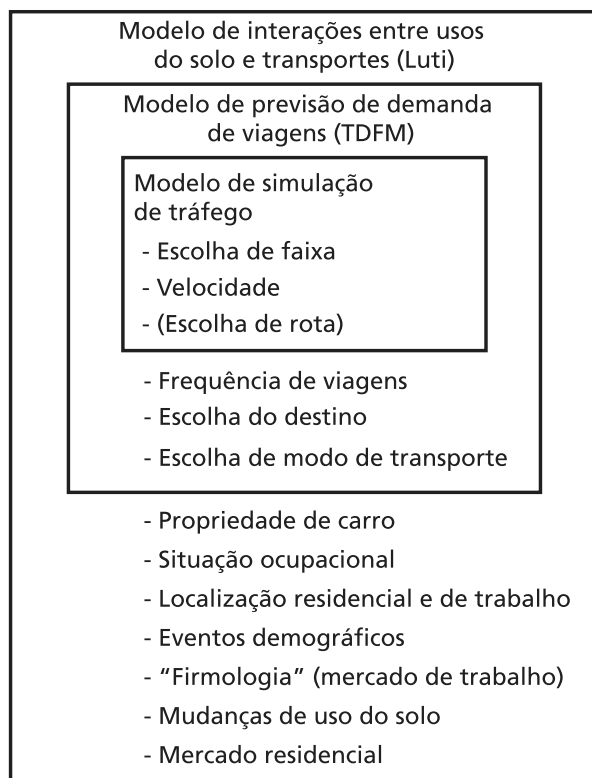
Pode-se conceber tais modelos como se estivessem embutidos um no outro, uma vez que um crescente número de decisões de agentes estaria sendo representado (figura 1). Como os modelos Luti, obviamente, abrigam a mais ampla gama de respostas, eles também consideram a maior variedade de efeitos complexos e emergentes, incluindo, especialmente, interações entre sistemas de transportes, de um lado, e mercados residenciais e de trabalho, frota de veículos, sistema energético e usos do solo, de outro. Desse modo, uma ênfase relativamente forte é colocada na discussão dos modelos Luti ao longo do capítulo.

2.1 Modelos de simulação de tráfego

Os modelos de simulação de tráfego (Barceló *et al.*, 2005; Rieser *et al.*, 2007) descrevem como os veículos, individualmente, se deslocam de uma certa origem para um certo destino em uma rede viária. Os modelos mais recentes incluem uma representação de cada veículo, equipada com um conjunto de regras de “comportamento”, tais como a escolha de velocidade e faixa de rolamento, em resposta à presença de outros veículos na via, escolha e ajuste da rota até o destino etc. Além disso, são atribuídos origens e destinos para cada veículo. Normalmente, tais modelos presumem que o número de viagens entre origens e destinos, assim como os horários de partida, já esteja definido *a priori*. Além dos veículos, os modelos

podem incluir representações de equipamentos como semáforos, que também podem responder de modo dinâmico aos veículos (simulados) na via.

FIGURA 1
Um sistema aninhado de modelos de transporte



Elaboração do autor.

Os modelos de simulação de tráfego geralmente mostram características emergentes (carregamento de tráfego e velocidade por *link*) que resultam do comportamento individual dos veículos. Ainda que estas características também possam ser obtidas de algoritmos agregados que definam as relações entre carregamentos de tráfego e velocidades, estes modelos fazem isso com muito mais detalhes e, também, podem esmiuçar efeitos de rede, tais como filas de veículos bloqueando cruzamentos a montante etc. Modelos recentes são capazes de simular fluxos de tráfego baseados na representação individual de veículos em áreas urbanas extensas. Rieser *et al.* (2007) descrevem uma aplicação baseada na representação individual de veículos para toda a Suíça. Contudo, uma limitação importante dos modelos de simulação de tráfego é que decisões, tais como geração de viagens, escolha de destinos, modo de transporte e horário de partida, são exógenas, supondo que os indivíduos não respondam a congestionamentos nessas dimensões. Isso pode levar a uma superestimação de congestionamentos e tempos de deslocamento, uma vez que, na realidade, os indivíduos considerariam essas opções, de modo a evitar tempos excessivos de viagem.

2.2 Modelos de previsão de demanda de viagens

Além dos modelos de simulação de tráfego, os modelos de previsão de demanda de viagens (TDFMs, sigla em inglês para *travel demand forecasting models*) também descrevem geração de viagens e escolhas de destino, bem como modo e horário de partida (McNally, 2008; Yai, 1989). A versão tradicional dos TDFMs compreende modelos de quatro estágios que modelam os quatro aspectos de cada viagem – geração, destino, modo e rota – subsequentemente e de modo independente um do outro. Motivos diferentes para as viagens (deslocamentos casa-trabalho e casa-estudo, negócios e outros) também são modelados de forma independente. Isso resulta em uma matriz origem-destino de viagens que é, geralmente, um *input* dos modelos de simulação de tráfego. Os TDFMs (Algers, 1995; Jovicic e Hansen, 2003) incluem um conjunto de modelos de escolha discreta que descrevem os comportamentos supracitados, em função de características pessoais e de características do sistema de transporte, tais como tempos e custos de viagem. Esses modelos são aplicados a uma representação da população em um sistema de zonas de tráfego, o que pode ser feito de distintas formas. Tradicionalmente, os modelos de frequência de viagens, destinos e modos são aplicados a um número de tipos de famílias e pessoas em cada zona, resultando em distribuições de probabilidades. Dados os números de cada tipo de famílias em cada zona, isto resulta em uma distribuição geral de viagens por destino e por modo. Mais recentemente, modelos baseados em agentes foram desenvolvidos com representação individual de viajantes e definidos por zona residencial e características socioeconômicas – tal como o modelo Ramblas (Veldhuisen *et al.*, 2000). Cada agente, frequência de viagem, destino e modo de transporte são determinados individualmente. Uma representação baseada em agentes das viagens traz a vantagem de maior flexibilidade e ligação mais simples a módulos que preveem aspectos, tais como, realocação residencial, mudança de emprego etc. (conferir também a subseção 2.3.).

Os modelos TDFM podem ser considerados como métodos de complexidade no sentido de que as distribuições agregadas de viagem emergem de decisões (semi)individuais de frequência de viagem, escolha de destino e modo de transporte. Além disso, os modelos TDFM incluem efeitos de *feedback*, no sentido de que decisões individuais são afetadas por resultados no nível do sistema, ainda que os últimos se limitem a mudanças de tempo de viagem causadas por congestionamentos. Do mesmo modo que modelos de simulação de tráfego, os modelos TDFM geralmente tendem a desenvolver situações de equilíbrio, uma vez que os efeitos de *feedback* têm um efeito de mitigação: os congestionamentos levam a uma escolha por diferentes destinos, modos e tempos de viagem, o que, por sua vez, conduz a menores níveis de congestionamentos.

Os limites dos sistemas são traçados envolvendo a população atual e suas localizações residenciais, presumindo-se que suas regras de comportamento, bem como aspectos como a propriedade de veículos (taxa de motorização), sejam invariantes; sistemas de transportes e infraestruturas também são supostos como constantes. Como resultado, forças externas – tais como mudanças de tecnologia, de mercados residenciais e de trabalho, as quais podem levar a regras e padrões de comportamento radicalmente diferentes – não são muito bem representadas nesses modelos.

Nas últimas décadas, há uma tendência ativa em direção à substituição gradual dos modelos TDFM tradicionais de quarto estágio pelos chamados modelos de demanda de viagens baseados em atividades⁵ (Ettema e Timmermans, 1997; Arentze *et al.*, 2000; Bowman e Ben-Akiva, 2000). Sem entrar em uma discussão detalhada dos aspectos técnicos dos modelos baseados em atividades, pode-se dizer que o mais importante princípio subjacente a esses modelos é derivado da participação em atividades, significando que, para entender as viagens, o padrão total de atividades deve ser levado em consideração. Isso traz várias consequências. Em primeiro lugar, as decisões sobre realizar uma viagem podem ser relacionadas às decisões sobre realizar outra viagem. O aspecto mais óbvio refere-se ao momento de cada viagem, que depende de um ordenamento de atividades. Contudo, as escolhas de destinos para várias atividades também podem ser interdependentes, por exemplo, se as viagens para compras dependerem da localização do trabalho. Outra dimensão (da maior parte) dos modelos baseados em atividades é que as decisões sobre viagens são tomadas no nível da família. Isto implica a alocação de certas atividades (por exemplo, viagens para compras ou viagens para levar alguém) a membros específicos da família e, também, a decisão de quem utilizará os veículos da família. Em comparação com os modelos de quatro estágios, os baseados em atividades evidentemente incluem uma gama maior de modelos estatísticos, tais como os de encadeamento de viagens, os de agendamento de atividades e os de uso do tempo.⁶ Em consequência, os modelos baseados em atividades são mais aptos a representar alguns efeitos emergentes, nos casos em que políticas públicas em um âmbito apresentam implicações em outro âmbito. Por exemplo, modelos baseados em agentes têm o potencial de prever efeitos de mudanças em regimes temporais (turnos escolares ou de trabalho) sobre os momentos das respectivas viagens, ou o efeito do trabalho feminino sobre o comportamento de compras masculino, ou ainda o efeito de decisões sobre os locais de compras sobre o movimento pendular.

5. *Activity-based travel demand models*, no original.

6. No original, *trip chaining models, activity-scheduling models and time use and duration models*.

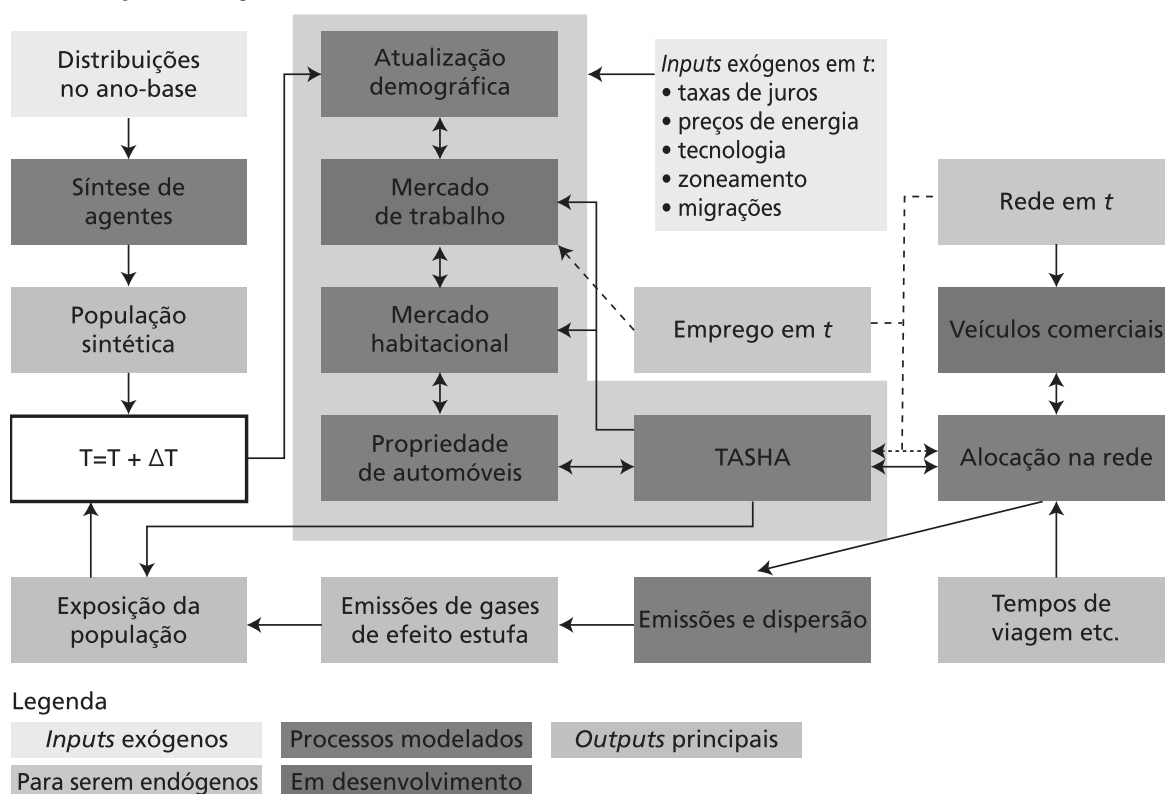
2.3 Modelos Luti

Os modelos Luti (Wegener, 2013) incluem uma representação do comportamento de mobilidade por meio de um modelo TDFM, mas tal representação está “implantada” no modelo Luti, interagindo com uma representação da distribuição espacial de pessoas, empregos e atividades econômicas. Basicamente, estes modelos descrevem processos demográficos das famílias (taxas de natalidade e mortalidade, formação e dissolução de famílias), decisões de localização (residência, emprego e mudanças no tipo de trabalho) e decisões de propriedade de veículos, assim como processos econômicos (desenvolvimento de oferta de empregos em diferentes localizações, variações de preços da terra e desenvolvimento urbano). Esses processos são influenciados pelos tempos de viagem e pelos níveis de acessibilidade descritos por um modelo TDFM “implantado”. Na maioria dos casos, os desenvolvimentos dos mercados econômicos e residenciais são representados por modelos econômicos *input-output*; recentemente, sistemas de simulação baseados em agentes – tais como o Urban Simulation (UrbanSim) (Borning Waddell e Förster, 2008), o The Integrated Land Use, Transportation, Environment (Ilute) (Chingcuanco e Miller, 2012) e o Integrated Land-Use Modelling and Transportation System Simulation (Ilumass) (Strauch *et al.*, 2005) – foram desenvolvidos.

Como exemplo de um modelo Luti baseado em agentes, a estrutura do sistema Ilute está apresentada na figura 2. O Ilute (Chingcuanco e Miller, 2012) inclui uma representação das famílias – constituídas por pessoas – definida por idade, gênero, escolaridade, ocupação e posse de automóvel. Adicionalmente, há representações individualizadas das moradias (definidas por tipo, tamanho, localização e valor de venda ou aluguel), das firmas que oferecem empregos (especificando-se níveis de experiência e conhecimento) e de proprietários e empreendedores que tomam decisões sobre desenvolvimento imobiliário e mudanças no uso do solo. Um pacote de modelos é implementado para descrever o comportamento de pessoas e famílias, o que, geralmente, implica alguma forma de interação com outros tipos de agentes. Um modelo baseado em atividades (Tasha, sigla em inglês de *travell/activity scheduler for household agents*) está incluído, descrevendo atividades e decisões de viagens das famílias e das pessoas (subseção 2.2). Um modelo de simulação demográfica descreve o envelhecimento das pessoas ano a ano e eventos como falecimentos, nascimentos, casamentos, bem como formação e dissolução de famílias. Dada a estrutura baseada em agentes, isto implica a existência de um “mercado” de solteiros e de um mecanismo de aproximação de parceiros. Para descrever decisões de localização e realocização, um módulo de simulação do mercado habitacional acompanha a vacância e a ocupação de moradias, assim como a combinação de unidades vagas e de famílias que estão buscando outra moradia. É importante notar que esse mecanismo de combinações implica um sistema de atribuição

de preços que responde à oferta e à demanda por moradias de diferentes tipos em variadas áreas. De modo semelhante, outro módulo descreve o desenvolvimento de firmas e de empregos como função de tendências econômicas maiores (Harmon, 2014), combinando indivíduos com certo nível de habilidade e experiência a empregos e seus requisitos. O Ilute – assim como outros modelos Luti baseados em agentes, tais como UrbanSim – está constituído de forma modular, permitindo relacionar-se, de modo relativamente simples, com outros modelos dedicados. Por exemplo, o Ilute foi associado a modelos de emissões, de modo a prever a exposição de indivíduos a poluentes durante seus padrões de atividades diárias, bem como a modelos de consumo domiciliar de energia, de maneira a prever o consumo urbano de energia.

FIGURA 2
Representação do sistema de modelos Ilute



Fonte: Chingcuanco e Miller (2012).

Fica claro que os modelos Luti também podem ser considerados como sistemas complexos. Eles representam a maior gama de reações potenciais a mudanças na economia, na demografia e no sistema de instituições, não apenas por indivíduos e famílias, mas também por agentes econômicos, empreendedores e formuladores de políticas públicas. As famílias podem, por exemplo, decidir pela realocação, mudar de empregos, ou comprar/vender veículos em resposta a mudanças de acessibilidade. Do mesmo modo, as modificações na localização de empregos, que resultam de mudanças de acessibilidade, podem

ser representadas, assim como mudanças nos preços das moradias ou no desenvolvimento urbano. Como resultado, os modelos Luti baseados em agentes, por um lado, apresentam menos chances de desenvolver estados de equilíbrio que sejam relativamente semelhantes ao estado inicial; por outro, têm mais chances de representar transições para estados fundamentalmente diferentes. Tendo em vista que os modelos Luti descrevem o desenvolvimento urbano, as decisões de propriedade de veículos e o comportamento de mobilidade, tais modelos também são capazes de descrever processos – relacionados e que se reforçam – de crescente taxa de motorização e de espraiamento urbano (*sprawl*).

Outra característica importante dos modelos Luti baseados em agentes é seu caráter dinâmico. O fato destes modelos simularem mudanças no desenvolvimento urbano, na demografia, nas localizações residenciais e de empregos, bem como nos padrões de viagens ao longo dos anos, implica que as decisões dos agentes no ano $t+1$ são condicionais às características agregadas do sistema (tempos de viagem, preços, oferta de moradias e de empregos etc.) no ano t , as quais, por sua vez, são acumuladas a partir das decisões individuais dos agentes. Tal abordagem dinâmica permite modelar a dimensão temporal das respostas às políticas públicas. Verificou-se, por exemplo, que as respostas à realocação de escritórios, em termos de escolha de modo de transporte, têm um retardo de até cinco anos, uma vez que uma resposta comportamental pode necessitar de mudanças na organização das famílias, na propriedade de carros ou na realocação residencial. Enquanto os modelos de equilíbrio tradicional teriam previsto mudanças imediatas para um novo equilíbrio, os modelos dinâmicos baseados em agentes são mais aptos a descrever os processos graduais que levam a um resultado final.

3 QUESTÕES DE IMPLEMENTAÇÃO

O desenvolvimento de modelos de simulação de tráfego, TDFMs e Luti pode ser dividido em dois grandes componentes:

- 1) Desenvolvimento de uma representação das estruturas e dos agentes relevantes.
- 2) Desenvolvimento de uma representação das regras de comportamento dos agentes, de suas interações mútuas e de efeitos relevantes de *feedback*.

Uma vez desenvolvido o modelo, é necessário calibrá-lo, de modo a verificar se os resultados são gerados com um grau razoável de confiabilidade. Finalmente, é necessário desenvolver cenários para a aplicação, de modo a se avaliar políticas públicas alternativas. Esses estágios serão discutidos a seguir.

3.1 Representação de estruturas e agentes

As estruturas a serem representadas dependem do tipo de modelo. No caso dos modelos de simulação de tráfego, a estrutura inclui uma representação da rede viária, não só em termos de nós viários e outros *links*, mas também no tocante às características destes *links*, tais como velocidade e leiaute (por exemplo, largura). Tais dados, em muitos casos, estão disponíveis nos órgãos de planejamento em formato digital. A depender da especificação, a estrutura também pode incluir equipamentos de sinalização como semáforos. O *software* que gerencia os equipamentos de sinalização, atualmente, pode ser conectado diretamente a sensores físicos, bem como a um *software* de simulação de tráfego. Além disso, as zonas de origem e as de destino são definidas, assim como o número de veículos que trafegam pela rede entre essas zonas. Dependendo da escala da aplicação (desde uma única trajetória até uma região inteira), matrizes OD podem ser derivadas de contagens de tráfego ou de algum modelo TDFM existente. Os agentes principais são, portanto, os veículos, cujos condutores são equipados com regras de comportamento (subseção 3.2).

Nos modelos TDFM, a estrutura inclui uma representação da área, dividida em zonas de tráfego – as quais incluem populações específicas –, produzindo um certo número de viagens com vários motivos. Ainda, é necessária uma representação de tempos de viagem por vários modos de transporte em diferentes momentos do dia. Para o transporte público, esses tempos são derivados de tabelas de horários existentes (e possivelmente ajustadas, de modo a representar cenários). Para veículos privados, as informações provêm de tempos de viagem calculados em uma rede (por exemplo, aqueles utilizados em modelos de simulação de tráfego). Se necessário, os tempos podem ser ajustados com base em resultados de simulações de tráfego, de modo a levar em conta os efeitos de congestionamentos sobre os tempos de viagem.

Com base em uma representação da área de estudo em zonas, para os modelos Luti baseados em agentes, as estruturas adicionais são necessárias. Geralmente, essas estruturas incluem não apenas famílias e indivíduos com sua situação de ocupação, propriedade de veículos e renda, mas também representações do mercado residencial e da economia (firmas e empregos) em cada zona. Os modelos baseados em agentes requerem uma população de famílias vistas individualmente e com todas as características relevantes especificadas no nível das pessoas. Contudo, esses dados raramente estão disponíveis em registros oficiais. A abordagem mais comum, assim, é usar populações sintéticas (Zhu e Ferreira, 2014). Ao sintetizar populações, um conjunto de indivíduos com características específicas é gerado, de modo que as distribuições agregadas de idade, gênero, escolaridade etc. sejam equivalentes às distribuições reais. O método mais usado para gerar populações sintéticas é o ajuste

proporcional iterativo,⁷ o qual pode ser aplicado a famílias/pessoas, bem como a unidades habitacionais. Essencialmente, esta abordagem pode ser usada para firmas; porém, dado que o número de firmas por zona é muito menor, pode haver dificuldades. Assim, o Ilute e o UrbanSim modelam o mercado de trabalho como uma população de empregos ao invés de uma população de firmas que oferecem empregos. De modo similar, e ainda que o desenvolvimento urbano e a mudança de uso do solo resultem de decisões tomadas por agentes como os formuladores de políticas públicas – os empreendedores imobiliários, por exemplo –, tais decisões são muito menos frequentes e de natureza mais complexa que, por exemplo, as decisões de realocação das famílias e as decisões individuais sobre qual modo de transporte utilizar. Assim, lida-se geralmente com esses processos de modo mais estilizado. Para cada zona ou lote, a abordagem mais comum é modelar a probabilidade de mudança para outro tipo de uso do solo. Várias abordagens estatísticas (versões de modelos de escolha discreta) foram utilizadas para tal (Zöllig Renner e Axhausen, 2013; Shen *et al.*, 2014; Bhat *et al.*, 2014).

3.2 Desenvolvimento de regras de comportamento e efeitos de *feedback*

Em modelos de simulação de tráfego, os condutores dos veículos são equipados com regras relativas à escolha de velocidade, faixa de rolamento e percurso. Estas regras podem ser derivadas de experimentos em que condutores são observados em simuladores, mas são mais comumente escolhidas por quem faz a modelagem, baseadas em sua experiência prévia sobre como chegar a um resultado realista. O *feedback* é modelado automaticamente, dado que os veículos respondem à posição e à velocidade de outros veículos na rede.

Nos modelos TDFM, as regras de comportamento compreendem escolhas sobre: *i*) realizar uma viagem com um motivo específico; *ii*) o horário de partida da viagem; *iii*) o destino; e *iv*) o modo de transporte. Geralmente, essas escolhas são modeladas com modelos de escolha discreta econométricos, que descrevem as escolhas como um resultado das características das alternativas de escolha. A versão tradicional desses modelos era o modelo multinomial logit (MNL), o qual tinha, contudo, a propriedade indesejável de que a quota das probabilidades de escolha de duas alternativas independe da presença de uma terceira alternativa – o que é conhecido como problema do ônibus vermelho/ônibus azul.⁸ O fato dessa propriedade ser indesejável reside em que se espera que as alternativas que tenham mais características em comum (por exemplo, ônibus e bonde) sejam substitutas, frente a uma alternativa com mais diferenças (por exemplo, carro). Além disso, escolhas de viagens em dimensões diferentes são, tradicionalmente, supostas como

7. *Iterative proportional fitting*, no original.

8. *Red bus/blue bus problem*, no original.

independentes uma da outra (por exemplo, descritas por modelos MNL separados), ainda que, na realidade, elas possam relacionar-se. Por exemplo, o modo de transportes pode depender da escolha do destino, e vice-versa. Para conseguir dar conta desses efeitos de substituição e de interdependência, as especificações de modelos mais avançadas foram desenvolvidas, tais como os modelos logit *nested* (Ben-Akiva e Lerman, 1985) e os modelos logit mistos (Hess e Polak, 2006). Além disso, nos contextos de escolhas espaciais, os modelos MNL têm falhas na consideração da autocorrelação espacial, o que levou ao desenvolvimento de modelos de escolha de valor extremo generalizado (*generalized extreme value* – GEV) alternativos (Bekhor e Prashker, 2008).

Os parâmetros dos modelos de escolha devem ser estimados com base em escolhas observadas. Essas podem ser as efetivamente feitas, registradas em *surveys* ou diários de viagens (preferência revelada), e, também, as escolhas feitas sob condições hipotéticas, obtidas em *surveys* (preferência declarada). O mecanismo de *feedback* principal é a resposta aos congestionamentos por parte de quem viaja, o que é representado ajustando-se o tempo de viagem dos veículos aos congestionamentos, seguindo-se a alocação de tráfego, que, por sua vez, influenciará a escolha de fazer a viagem, o destino, o horário de partida e o modo, a depender do tempo do coeficiente do tempo de viagem.

Os modelos Luti baseados em agentes incluem modelos adicionais para o comportamento das famílias (propriedade de carro, localização e tipo residencial, bem como tipo de ocupação/emprego) que são, geralmente, baseados também em modelos de escolha discreta. Neste caso, são comumente calcados em escolhas observadas, o que é obtido por *surveys*. Também se supõe que o mercado residencial e o desenvolvimento econômico sigam regras específicas. Uma discussão detalhada da calibragem desses modelos vai além do escopo deste capítulo, de modo que se recomenda ao leitor que busque Chingcuanco e Miller (2012), Strauch *et al.* (2005), Borning, Waddell e Forster (2008) e Ettema *et al.* (2007).

3.3 Desenvolvimento de cenários

Os modelos complexos de tráfego e de viagens são utilizados para fazer previsões sobre os resultados de intervenções ou sobre o que se supõe do futuro. As previsões geralmente tratam dos carregamentos de tráfego em vias ou dos níveis de utilização do transporte público. Usualmente, o objetivo não é tanto fazer previsões de resultados exatos, e sim obter *insights* sobre as diferenças entre alternativas de política pública distintas. De qualquer modo, usar um modelo de tráfego ou de transporte requer que as estruturas e os agentes sejam especificados para uma situação futura. É comum que a infraestrutura e os serviços de transportes sejam especificados de acordo com as intervenções cujos efeitos se desejam prever. Contudo, outros *inputs*, tais como a população por zona, o desenvolvimento de firmas, os empregos e as áreas residenciais,

também precisam ser especificados. Para tanto, os responsáveis pela modelagem dependem, geralmente, de previsões externas obtidas de modelos demográficos e econômicos, assim como de planos que especifiquem o desenvolvimento almejado de áreas residenciais e comerciais nos anos vindouros. Para horizontes de previsão crescentes, é útil compor diferentes cenários, por exemplo, de desenvolvimento econômico, de modo a testar os resultados sob diferentes circunstâncias externas.

Na prática, cenários de previsão de demanda de viagens são frequentemente baseados em extrapolações de tendências demográficas e econômicas vigentes. Por exemplo, Arentze *et al.* (2008) previram as implicações para os transportes de uma população em processo de envelhecimento, com base em extrapolações da participação da força de trabalho e em parâmetros de comportamento. Esses exercícios geralmente têm o objetivo de prever um resultado aproximado, como uma mudança relativamente marginal da situação vigente ou de um cenário de linha de base. Contudo, tratando-se das cidades – de seus sistemas de transportes e de usos do solo – como sistemas complexos, sugere-se que as interações entre os vários componentes dos sistemas e os agentes poderiam levar a resultados inesperados, que difeririam fundamentalmente de simples extrapolações. Exemplos dessas interações incluem os efeitos das TICs nas viagens pessoais e de entrega de mercadorias que, dependendo do contexto, podem substituir, modificar ou estimular estas viagens (Mokhtarian, 2009). Os modelos TDFM e Luti não são muito adequados para representar tais interações, de modo que seu uso, para explorar esses cenários, exigiria a formulação de premissas adicionais que deveriam ser incluídas na estrutura dos modelos. De maneira similar, Cervero (2006) aponta que os modelos TDFM convencionais não são muito apropriados para capturar os efeitos de estratégias de uso do solo em escalas de vizinhança, defendendo o uso de extensões dedicadas aos modelos tradicionais que representem as interações entre as características das vizinhanças e o comportamento de mobilidade.

4 BENEFÍCIOS DA MODELAGEM PARA OS SISTEMAS DE TRANSPORTES

Os transportadores e os fornecedores de infraestrutura podem se beneficiar de simulações de tráfego e dos modelos TDFM e Luti de várias maneiras. Basicamente, esses modelos permitem *insights* sobre os efeitos de variáveis operacionais como preços, velocidades e frequências em diferentes cenários, o que permite aos provedores investirem da forma mais eficiente em infraestruturas e serviços de transporte. A eficiência pode ser definida tanto em um sentido puramente econômico, como para a sociedade em seu conjunto. Em sentido econômico, os modelos podem prever quantas pessoas utilizarão um serviço (por exemplo, uma linha de ônibus ou uma rodovia pedagiada) e quais serão as receitas obtidas. Assim, a lucratividade dos investimentos poderá ser estimada *a priori*. Em um sentido social, os benefícios dos investimentos poderão ser avaliados. Por exemplo, os efeitos de uma nova infraestrutura ou de um novo serviço poderão ser medidos, na forma

de mudanças em frequências de viagens, usos de diferentes modos de transporte e, conseqüentemente, modificações em níveis de congestionamento e tempos de viagem. Tanto os ganhos em tempo de viagem quanto a acomodação da chamada demanda latente são considerados benefícios sociais frequentemente quantificados em valores monetários, por meio de métodos de disposição a pagar. Isto permite que as autoridades comparem os investimentos com as benfeitorias à sociedade, em análises de custo-benefício.

Outro benefício dos modelos de tráfego e de transportes é a possibilidade de explorar comportamentos de mobilidade, carregamentos de tráfego e congestionamentos sob diferentes cenários de longo prazo – por exemplo, dados diferentes sobre cenários demográficos e socioeconômicos. Os modelos podem indicar em que medida um sistema de transporte pode dar suficiente acessibilidade, de modo que os cidadãos tenham suas necessidades atendidas; e, também, podem indicar se o sistema tem sustentabilidade econômica em cenários de mudança de renda, transição demográfica e desenvolvimento urbano.

5 MODELAGEM DE IMPACTOS PARA A CIDADE E PARA A SOCIEDADE

Na seção precedente, foi discutida a avaliação de resultados para os sistemas de transportes; nesta, será mostrado que os modelos de tráfego e de transportes também podem ser usados para avaliar o impacto das políticas públicas e de mudanças isoladas (*autonomous developments*) sobre questões urbanas e da sociedade, vistas de modo mais amplo.

Em primeiro lugar, os modelos de tráfego e de transportes podem ser usados para avaliar mudanças na acessibilidade – devido a modificações nos níveis de congestionamento. Por exemplo, ao planejar a expansão urbana em certo setor, os modelos de transportes podem indicar os volumes de viagens esperados e, também, a acessibilidade dos novos moradores a serviços específicos. Essas mudanças na acessibilidade podem ser relacionadas ao acesso a determinados serviços, para grupos específicos, tais como a acessibilidade a serviços de saúde para grupos não motorizados ou vulneráveis (Nemet e Bailey, 2000). Assim, por um lado, questões sociais mais específicas podem ser contempladas, incluindo considerações sobre equidade. Por outro lado, a acessibilidade é relevante para os provedores dos serviços, de modo a determinar sua área de atendimento e o potencial de mercado. Por exemplo, o comércio varejista pode usar medidas de acessibilidade para estabelecer o número de consumidores em potencial; as firmas, por sua vez, podem estar interessadas na acessibilidade a trabalhadores qualificados, dentro de um certo tempo de viagem. Assim, os modelos de tráfego e de transporte podem ser utilizados para avaliar se uma região manter-se-á economicamente viável e atrativa para as firmas, do ponto de vista do transporte.⁹

9. Ver, entre outros autores, Wheaton (2004), que realizou um esforço de modelagem mais estilizado.

Em segundo lugar, os modelos de tráfego e transporte preveem fluxos de tráfego que, por sua vez, trazem efeitos negativos, como poluição e ruído locais. As previsões servem, assim, para calcular concentrações de poluentes e volumes de ruído, de modo a se poder avaliar as consequências da sua exposição e para a saúde pública. Ao relacionar esses resultados à concentração espacial de diferentes segmentos da população, por exemplo, podem ser determinadas as ameaças à saúde de grupos vulneráveis (conferir, entre outros, Pearce, Kingman e Zawar Reza, 2006). Hatzopoulou, Miller e Santos (2007) integraram um modelo de viagens baseado em atividades (Tasha) a modelos de emissões, de modo a obter quantificações dinâmicas e detalhadas de emissões geradas por tráfego, localização e hora do dia. Além disso, os autores confrontaram essas emissões com as localizações das pessoas, de acordo com seus padrões de atividade simulados, em vez de suas localizações residenciais, de modo a obter uma estimativa mais realista do impacto das emissões.

Por fim, como os modelos de tráfego e de transporte preveem as viagens conforme vários modos de transporte, também é possível utilizá-los para avaliar em que medida as pessoas usarão modos de transporte ativos, tais como a caminhada e a bicicleta. Dada a preocupação mundial com o sobrepeso e a obesidade, o transporte ativo é cada vez mais tido como uma forma importante de combater esses efeitos, como foi indicado em numerosos estudos (Saelens e Handy, 2008; Boarnet *et al.*; 2011; Van Wee, 2014). Avaliar os efeitos de intervenções de uso do solo e de transporte sobre o transporte ativo é, portanto, um benefício importante dos modelos de transporte.

Isso se aplica, de modo geral, às políticas públicas que buscam comportamentos de mobilidade mais sustentáveis. Enquanto uma mudança de modos de transporte menos sustentáveis (carro) para mais sustentáveis (transporte público, bicicleta e caminhada) pode ser efetivada por meios econômicos (Bonsall e Willumsen, 2014). As políticas de uso do solo são tidas cada vez mais como um caminho promissor para práticas de mobilidade mais sustentáveis (Van Wee e Handy, 2014). Dado que os modelos de tráfego e os TDFMs descrevem comportamentos de escolha do modo de transporte baseados na distribuição espacial das moradias das pessoas e seus destinos em potencial, eles podem ser valiosos para avaliar políticas de uso do solo que tenham como objetivo uma mudança para modos mais sustentáveis.

Como discutido anteriormente, os modelos Luti ampliam o conjunto de respostas, em comparação com os modelos TDFM, uma vez que permitem apontar como resultados certas mudanças na propriedade de veículos, localização residencial e mudança de emprego. Isso é relevante, uma vez que foi verificado que as respostas das pessoas e das famílias consideram uma variedade de estratégias

que facilitam um padrão de mobilidade desejado e que respondem a mudanças em condições pessoais (Oakil *et al.*, 2014; Cao e Mokhtarian, 2005). Além disso, os modelos Luti permitem investigar as interações com outros mercados, tais como o residencial, o imobiliário em geral, o de trabalho e a economia regional, os quais podem responder a mudanças no contexto dos transportes, assim como influenciá-lo. A literatura apresenta alguns exemplos do valor agregado dos modelos Luti.

Erdogan *et al.* (2013) utilizaram um modelo Luti para mostrar como as mudanças nos preços dos combustíveis têm efeitos diretos não apenas sobre a frequência de viagens e as escolhas de modo e destino, mas também sobre escolhas de mais longo prazo, como as localizações residenciais e de trabalho. Por meio dos mercados imobiliário e de habitação, preços mais altos dos combustíveis podem mesmo levar a maiores densidades urbanas.

Contudo, as políticas de infraestrutura também podem ter efeitos indiretos por meio de seus impactos sobre as decisões locacionais de famílias e firmas. Guerra (2014) descreve um estudo empírico da extensão do metrô (linha B) na Cidade do México. O autor relata que a extensão do metrô atraiu um número significativo de novos passageiros que não usavam o automóvel anteriormente. Houve efeitos no uso do solo sob a forma de densificação do comércio ao redor das novas estações do metrô. Mais uma vez, os modelos Luti mostraram-se uma ferramenta promissora para avaliar tanto o transporte como os efeitos sobre o uso do solo.

Outro tópico muito relevante é o efeito de níveis de renda crescentes, em países em desenvolvimento, levando a forte crescimento na propriedade de veículos, em países como Colômbia (Gómez-Gélvez e Obando, 2013), China (Cervero e Day, 2014) e Brasil. É notável que os efeitos variem conforme o contexto. Enquanto Gómez-Gélvez e Obando (2013) mostram que a propriedade de automóveis em Bogotá cresceu principalmente como resultado de um crescimento no número de famílias, no contexto chinês o que cresceu substancialmente foi o número de carros por família, levando a um crescimento dos subúrbios e do espraiamento urbano. Cervero e Day (2014) concluem que o desenvolvimento urbano orientado pelo transporte público (TOD)¹⁰ pode contribuir para, ao menos, mitigar o crescimento massivo de uso e propriedade de automóveis na China. Contudo, quantificar o efeito de TOD exige modelar, conjuntamente, os efeitos da propriedade de carros pelas famílias e das decisões de localização, assim como sua mobilidade quotidiana, uma vez que os congestionamentos podem ter um impacto significativo nessas decisões. Para tanto, os modelos Luti podem mostrar-se uma ferramenta útil no sentido de avaliar os efeitos conjuntos desse tipo de desenvolvimento urbano.

10. Sigla em inglês de *transit oriented development*.

6 INOVAÇÕES E DESAFIOS DA MODELAGEM DE TRANSPORTES

Os modelos complexos de transportes passaram por várias inovações nas últimas décadas, a maior parte das quais se inclui em uma tendência de crescente complexidade – em termos de mais interações e *feedback* entre elementos dos sistemas – e maior detalhamento, que se reforçam mutuamente.

Os modelos de simulação de tráfego se beneficiaram de avanços de capacidade computacional e de organização de dados, de modo que se tornaram cada vez mais capazes de modelar regiões maiores e, no caso da Suíça, até um país inteiro (Meister *et al.*, 2010).

Nos modelos TDFM, observam-se duas tendências importantes: primeiramente, uma passagem do modelo tradicional de quatro estágios – no qual as viagens eram modeladas independentemente umas das outras – para modelos baseados em atividades, nos quais as viagens fazem parte dos padrões de atividades. Isso tem uma implicação importante, no sentido de que o agendamento das viagens se torna mais realista e o seu momento pode ser previsto com mais precisão. Modelos baseados em atividades recentes, como o Tasha, foram estendidos, criando-se agendas de atividades não só no nível dos indivíduos, mas também para as famílias, o que implica que as interações destas podem ser modeladas com mais confiabilidade. Uma segunda tendência aponta para a plena microssimulação individual, em vez de se produzir distribuições para segmentos específicos de população por zona. Esta tendência é facilitada pela crescente capacidade de computação e armazenagem de dados.

Por fim, os modelos complexos de transportes beneficiam-se de dados cada vez mais detalhados, os quais se tornam cada vez mais disponíveis no presente, incluindo dados sobre a infraestrutura de transportes e os usos do solo, com detalhamento até o nível do parcelamento da terra (lote). Combinados à representação individual de agentes (pessoas que realizam as viagens), isto permite uma representação mais detalhada e mais variada de seu comportamento de mobilidade.

Dado o progresso na modelagem de transportes e usos do solo no período recente, pode-se questionar como o “estado da arte” dos modelos de transportes e utilização do solo deveria ser julgado no contexto mais amplo da complexidade das cidades, da qual os sistemas de transporte são uma parte. Uma questão essencial a este respeito é se os transportes deveriam ser considerados um problema simples ou um complexo (Bettencourt, 2014). Um problema simples é aquele que é bem definido em termos de métricas de desempenho e que oferece ações rápidas e diretas para movê-lo em direção ao estado final desejado. Um problema complexo, por sua vez, envolve muito mais interações, causalidades circulares e um vasto espaço de problema, com muitas incertezas (*op.cit.*). Em consequência, saber quais ações podem ser usadas para influenciar o sistema, e qual serão seus efeitos, é muito menos evidente.

O fato é que, tradicionalmente, os planejadores abordaram o planejamento de transportes como um problema simples, supondo que a demanda e o comportamento de mobilidade seguiriam, de modo simples, a organização espacial e as características do sistema de transporte. Por exemplo, as mudanças no tempo ou no custo de viagem levariam a modificações nos volumes de viagem e na distribuição modal, de forma bem definida e esperada. Além disso, os planejadores supuseram que os sistemas de transportes tenderiam a um estado de equilíbrio, em vez de colocarem o foco no desenvolvimento dos sistemas em resposta a forças externas. Em particular, utilizaram um pequeno conjunto de variáveis explanatórias, extrapolando correlações presentes para condições futuras e supondo invariantes as preferências e as necessidades de quem viaja.

É certo que essa abordagem teve muitos méritos ao proporcionar *insights* para o planejamento de infraestruturas em situações concretas. Contudo, ela tem limitações sobre como pensar os sistemas de transportes em um futuro incerto. De fato, a complexidade das sociedades urbanas leva a desdobramentos que fazem as premissas – sobre as quais os modelos de transportes e Luti foram construídos – serem questionadas. Mudanças na composição da população, em parte devido a migrações internacionais, levam a mudanças nas necessidades e nas preferências das pessoas, o que também se aplica à mobilidade. De modo mais geral, normas sociais quanto a estilos de vida sustentáveis e saudáveis podem mudar, com implicações para o uso destes modos de transporte sustentáveis. Processos sociais complexos de opinião e difusão de normas (Tessone, 2014) podem ter um papel importante. Além disso, com o uso de plataformas móveis de TICs, a organização de serviços de transporte pode ter mudanças fundamentais, levando a iniciativas de baixo para cima, tais como programas de compartilhamento de carros e caronas (Hansen *et al.*, 2010). Neste caso, as interações sociais também estimulam a difusão e a adoção desses sistemas. A maior difusão de ferramentas e serviços móveis de TICs pode não só mudar a organização do trabalho e da esfera privada, mas também levar a mudanças nas maneiras como se percebe o tempo de viagem e em como são tomadas as decisões de viagens (Lyons, Jain e Holly, 2007). Por fim, o desenvolvimento de veículos elétricos e automatizados poderá transformar radicalmente o modo como se escolhe viajar e usar o tempo de viagem e, também, mudar as decisões sobre ter, compartilhar ou alugar um veículo (Pendyala, 2014). Contudo, e reiterando, a velocidade e a extensão na qual esses novos sistemas serão difundidos resultam de processos sociais e econômicos complexos. Cada um dos supracitados poderá ter um impacto significativo ou muito grande na mobilidade futura. Porém, os modelos de transportes e Luti existentes não são equipados para lidar com eles, uma vez que os modelos estão baseados na extrapolação da organização presente dos sistemas, bem como em necessidades e preferências vigentes.

A questão, portanto, trata de quais ferramentas os planejadores de transportes poderão usar para explorar e antecipar esses futuros incertos. A primeira opção seria os modelos Luti baseados em agentes, aplicados a análises específicas de sensibilidade. Em vez de tentar prever o resultado exato, pode-se buscar encontrar conjuntos de parâmetros e *inputs* que levem a mudanças radicais nos transportes e nos usos do solo; em outras palavras, que conduzam a um resultado dissipativo. Dados esses conjuntos dissipativos, o próximo passo compreenderia uma análise exploratória de como essas mudanças nas preferências e nas variáveis de *input* podem ocorrer. Por exemplo, um baixo valor de tempo de viagem para usuários de carros poderia ser trazido pelo lançamento de veículos automáticos, que permitissem atividades de trabalho ou de lazer durante os deslocamentos. Em outro exemplo, custos extremos de transportes poderiam ser relacionados à escassez de combustíveis fósseis. Tais análises poderiam dar *insights* aos planejadores, no que se refere a quais fatores seriam mais prováveis de levar a grandes mudanças nos sistemas de usos da terra e transportes. Uma segunda opção para explorar futuros incertos seria estudar, especificamente, a difusão de novas tecnologias e formas de organização, tais como os esquemas de compartilhamento de veículos, ou os carros elétricos. Usando modelos de difusão de mercados (Shaheen e Cohen, 2007; Janssen e Jager, 2002), as chances de esses desenvolvimentos se tornarem correntes, e de serem estimulados por políticas públicas, poderão ser estudadas. Do mesmo modo, estudar e modelar a difusão de uma mudança de atitudes (Tessone, 2014; Nowak, Szamrej e Latané, 1990) poderá aumentar a compreensão de como estilos de vida sustentáveis e saudáveis se espalham em certos segmentos da população.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA, A. Business travel and sustainability. *In*: GARLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 199-214.
- ALEXANDER, B.; ETTEMA, D.; DIJST, M. Fragmentation of work activity as a multi-dimensional construct and its association with ICT, employment and sociodemographic characteristics. **Journal of Transport Geography**, v.18, p. 55-64, 2010.
- ALGERS, S. *et al.* **Stockholm model system (SIMS)**: application. *In*: WORLD CONFERENCE OF TRANSPORTATION RESEARCH, 7. Sydney: WCTRS, 1995.
- ARENTZE, T. A.; TIMMERMANS, H. J. P. A learning-based transportation oriented simulation system. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 38, n. 7, p. 613-633, 2004.

ARENTZE, T. *et al.* More gray hair – but for whom? Scenario-based simulations of elderly activity travel patterns in 2020. **Transportation**, v. 35, n. 5, p. 613-627, 2008.

BARCELÓ, J. *et al.* Microscopic traffic simulation: a tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 41, n. 2-3, p. 173-203, 2005.

BATTY, M. **Cities and complexity**: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. Cambridge: The MIT Press, 2007.

BEKHOR, S.; PRASHKER, J. GEV-based destination choice models that account for unobserved similarities among alternatives. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 42, n. 3, p. 243-262, Mar. 2008.

BEN-AKIVA, M. E.; LERMAN, S. R. **Discrete choice analysis**: theory and application to travel demand. Cambridge: The MIT Press, 1985.

BETTENCOURT, L. Cities as complex systems. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLLI, M. H. (eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2014 (no prelo).

BHAT, C. R. *et al.* **A new spatial multiple discrete-continuous model for land use change analysis**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 93. Washington: TRB, 2014.

BOARNET, M. G. *et al.* The street level built environment and physical activity and walking: results of a predictive validity study for the Irvine Minnesota Inventory. **Environment and Behavior**, v. 43, n. 6, p. 735-775, Jan. 2011.

BONSALL, P.; WILLUMSEN, L. Pricing methods to influence car use. *In*: GÄRLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014.

BORNING, A.; WADDELL, P.; FÖRSTER, R. UrbanSim: using simulation to inform public deliberation and decision-making. **Digital Government**, v. 17, p. 439-464, 2008.

BOWMAN, J. L.; BEN-AKIVA, M. E. Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 35, n. 1, p. 1-28, 2000.

BRIAN ARTHUR, W. Complexity and the economy. **Science**, v. 284, p.107-109, Apr. 1999.

CAO, X.; MOKHTARIAN, P. L. How do individuals adapt their personal travel? A conceptual exploration of the consideration of travel-related strategies. **Transport Policy**, v. 12, n. 3, p. 199-206, 2005.

CERVERO, R. Alternative approaches to modeling the travel-demand impacts of smart growth. **Journal of the American Planning Association**, Chicago, v. 72, n. 3, p. 285-295, 2006.

CERVERO, R.; DAY, J. Suburbanization and transit-oriented development in China. **Transport Policy**, v. 15, n. 5, p. 315-323, 2008.

CHINGCUANCO, F.; MILLER, E. J. A microsimulation model of urban energy use: modelling residential space heating demand in ILUTE. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 36, n. 2, p. 186-194, 2012.

CILLIERS, P. Boundaries, hierarchies and networks in complex systems. **International Journal of Innovation Management**, v. 5, n. 2, p. 135-147, 2001.

DAWID, H. Modeling the economy as a complex system. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLI, M. H. (Eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2015.

ERDOGAN, S. *et al.* **What to expect in 2030: the impacts of fuel price and fuel economy on land use and transportation**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

ETTEMA, D. *et al.* PUMA: multi-agent modelling of urban systems. *In*: KOOMEN, E. *et al.* (Eds.). **Modelling land-use change**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 237-258.

ETTEMA, D. F.; TIMMERMANS, H. J. P. Theories and models of activity patterns. *In*: _____. (Eds.). **Activity-based approaches to travel analysis**. Bradford: Emerald, 1997. p. 1-36.

FRÄNDBERG, L.; VILHELMSON, B. Spatial, generational and gendered trends and trend-breaks in mobility. *In*: GARLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 199-214.

FRAZIER, C.; KOCKELMAN, K. M. Chaos theory and transportation systems: an instructive example. **Transportation Research Record**, n. 1897, p. 9-17, Jan. 2004.

GUERRA, E. **Mexico City's suburban land use and transit connection: the effects of the Line B Metro expansion**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 93. Washington: TRB, 2014.

GÓMEZ-GÉLVEZ, J. A.; OBANDO, C. **Modeling car ownership in urban areas of developing countries: a case study of Bogotá, Colombia**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

HANSEN, E. G. *et al.* A community-based toolkit for designing ride-sharing services: the case of a virtual network of ride access points in Germany. **International Journal of Innovation and Sustainable Development**, v. 5, n. 1, p. 80-99, 2010.

HATZOPOULOU, M.; MILLER, E. J. ; SANTOS, B. Integrating vehicle emission modeling with activity-based travel demand modeling: a case study of the greater Toronto area (GTA). **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2011, n. 2011, p. 29-39, 2007.

HARMON, A. **A microsimulated industrial and occupation-based labour market model for use in the Integrated Land Use, Transportation, Environment (Ilute) Modelling System**. Toronto: University of Toronto, 2013.

HESS, S.; TRAIN, K. E.; POLAK, J. W. On the use of a Modified Latin Hypercube Sampling (MLHS) method in the estimation of a Mixed Logit Model for vehicle choice. **Transportation Research**, v. 40, n. 2, p. 147, 2006.

JANSSSEN, M. A.; JAGER, W. Stimulating diffusion of green products: co-evolution between firms and consumers. **Journal of Evolutionary Economics**, v. 12, n. 3, p. 283-306, 2002.

JOVICIC, G.; HANSEN, C. O. A passenger travel demand model for Copenhagen. **Transportation Research Part A: policy and practice**, v. 37, n. 4, p. 333-349, 2003.

LYONS, G.; JAIN, J.; HOLLEY, D. The use of travel time by rail passengers in Great Britain. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 41, n. 1, p. 107-120, 2007.

MANSON, S. M. Simplifying complexity: a review of complexity theory. **Geoforum**, v. 32, n. 3, p. 405-414, 2001.

MCNALLY, M. G. **The Four Step Model**. Davis: Center for Activity Systems Analysis, 2008.

MEISTER, K. *et al.* **Large-scale agent-based travel demand optimization applied to Switzerland, including mode choice**. In: WORLD CONFERENCE ON TRANSPORTATION RESEARCH, 12. Lisbon: WCTRS, July 2010.

MOKHTARIAN, P. L. If telecommunication is such a good substitute for travel, why does congestion continue to get worse? **Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research**, v. 1, n. 1, p. 1-17, 2009.

NEMET, G. F.; BAILEY, A. J. Distance and health care utilization among the rural elderly. **Social Science and Medicine**, v. 50, n. 9, p. 1197-1208, 2000.

NOWAK, A.; SZAMREJ, J.; LATANÉ, B. From private attitude to public opinion: a dynamic theory of social impact. **Psychological Review**, v. 97, n. 3, p. 362-376, 1990.

OAKIL, A. Y. *et al.* Changing household car ownership level and life cycle events: an action in anticipation or an action on occurrence. **Transportation**, v. 41, n. 4, p. 889-904, 2013.

PEARCE, J.; KINGHAM, S.; ZAWAR-REZA, P. Every breath you take? Environmental justice and air pollution in Christchurch, New Zealand. **Environment and Planning A**, v. 38, n. 5, p. 919-938, 2006.

PENDYALA, R. Next generation infrastructure implications of autonomous vehicles and transport automation. *In*: CAMPBELL, P.; PEREZ, P. (Eds.). **Infrastructure for a better future: a forum for vision, leadership and action**. Wollongong: University of Wollongong, 2014.

RIESER, M. *et al.* Agent-oriented coupling of activity-based demand generation with multiagent traffic simulation. **Transportation Research Record**, Washington, n. 2021, p. 10-17, 2007.

SAELENS, B. E.; HANDY, S. L. Built environment correlates of walking: a review. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 40, n. 7, p. 550-566, 2008.

SHAHEEN S. A.; COHEN, A. P. Growth in worldwide carsharing an international comparison. **Transportation Research Record**, n. 1992, p. 81-89, 2007.

SHEN, Y.; MARTÍNEZ, L. M.; ABREU E SILVA, J. **A cellular agent-based approach incorporating spatial discrete choice methods**: a simulation of future land-use impacts of high-speed rail on Aveiro, Portugal. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

STRAUCH, D. *et al.* Linking transport and land use planning: the microscopic dynamic simulation model ILUMASS. *In*: ATKINSON, P. M. *et al.* (Eds.). **Geodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 295-311.

TESSONE, C. J. The complex nature of social systems. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLLI, M. H. (Eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2014. No prelo.

VAN WEE, B. The unsustainability of car use. *In*: GÄRLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014.

VAN WEE, B.; HANDY, S. Do future land-use policies increase sustainable travel? *In*: GÄRLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014.

VELDHUISEN, K. J.; TIMMERMANS, H. J. P.; KAPOEN, L. L. Simulating the effects of urban development on activity-travel patterns: an application of Ramblas to the Randstad North Wing. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, n. 4, p. 567-580, 2005.

WEGENER, M. The future of mobility in cities: challenges for urban modelling. **Transport Policy**, v. 29, p. 275-282, 2013.

WHEATON, W. C. Commuting, congestion, and employment dispersal in cities with mixed land use. **Journal of Urban Economics**, v. 55, p. 417-438, 2004.

YAI, T. Disaggregate behavioural models and their applications in Japan. **Transportation Research Part A: General**, v. 23, n. 1, p. 45-51, 1989.

ZHU, Y.; FERREIRA, J. **Synthetic population generation at disaggregated spatial scales for land use and transport microsimulation**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

ZÖLLIG RENNER, C.; AXHAUSEN, K. W. **Comparing estimation results of land use development models using different databases available in Switzerland**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

