

Título do capítulo	CAPÍTULO 5 – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS À TOMADA DE DECISÃO PÚBLICA
Autores(as)	Bernardo Alves Furtado Antonio Lassance
DOI	http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-032-5/capitulo5

Título do livro	POLÍTICAS PÚBLICAS E USOS DE EVIDÊNCIAS NO BRASIL: CONCEITOS, MÉTODOS, CONTEXTOS E PRÁTICAS
Organizadores(as)	Natália Massaco Koga Pedro Lucas de Moura Palotti Janine Mello Maurício Mota Saboya Pinheiro
Volume	-
Série	-
Cidade	Brasília
Editora	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)
Ano	2022
Edição	1ª
ISBN	978-65-5635-032-5
DOI	http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-032-5

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea 2022

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos). Acesse: <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério da Economia.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS À TOMADA DE DECISÃO PÚBLICA

Bernardo Alves Furtado¹

Antonio Lassance²

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar algumas das inúmeras possibilidades da utilização de simulações computacionais em apoio à tomada de decisão de políticas públicas. Em assuntos complexos, multicausais, submetidos ao crivo simultâneo de várias arenas decisórias e expostas à diversidade de pontos de vista e a confrontos intensos, não raro de cunho ideológico, simulações desse tipo podem ajudar os contendores a visualizar os impactos de suas escolhas e a reagir aos efeitos que elas podem acarretar. De forma prática, um gestor pode testar alternativas de políticas habitacionais, por exemplo, e observar se uma política de subsídio ao aluguel ou de compra e repasse de imóveis resulta em maior ou menor desigualdade, ao mesmo tempo que gera impactos na produção e no consumo. A cobertura da modelagem e da simulação poderia indicar, ainda, se um montante de investimento fixo traria melhores resultados se investidos na melhoria da qualidade da educação ou na política habitacional.

Adicionalmente, para além da capacidade de simulações de sistematizarem a racionalidade de planejamento e sua capacidade de anteciper efeitos de políticas públicas, métodos computacionais adicionais atuam em conjunto para que os resultados das políticas sejam mais bem detalhados, factíveis e permitam aos interlocutores compreender efeitos e participar do processo decisório, antes que as decisões sejam tomadas. Fundamentalmente, observam-se os resultados antes de implementar, de olhos cerrados, políticas públicas.

Gestores da coisa pública, técnicos da burocracia e representantes do povo – os políticos – realizam diagnósticos, identificam problemas, melhorias, necessidades sob sua jurisdição, priorizam e atuam para minimizar entraves e otimizar soluções.

1. Técnico de planejamento e pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura (Diset) do Ipea. *E-mail*: <bernardo.furtado@ipea.gov.br>.

2. Técnico de planejamento e pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia (Diest) do Ipea. *E-mail*: <antonio.lassance@ipea.gov.br>.

Isso em tese. Na prática, a sequência de identificação, priorização e ação – melhor ainda quando seguida de avaliação – é, de forma permanente, complexificada pelos acontecimentos e pela “realidade”. No entanto, a verificação do acerto ou desacerto das decisões só ocorre, de fato, *a posteriori*. Ou seja, usualmente, nem o gestor nem a comunidade conhecem com clareza suficiente os resultados de políticas públicas. O gestor inicia a construção de um projeto habitacional, por exemplo, sem antecipar se os futuros moradores conseguirão empregos acessíveis ou escolas para seus filhos.

Adicionalmente, ainda que a política formulada inclua resultados futuros previstos, não é usual comparar os efeitos de uma política específica, como a construção de um posto de saúde, com outras alternativas, como a reforma de uma escola. Simulações computacionais permitem não só antever resultados de políticas antes que o investimento seja realizado, como também comparar, a partir de indicadores, políticas distintas entre si.

Na prática, quando não há sistematização específica do desenho da política e de seus efeitos, interferem no curso “ótimo”, previsto e metrificado, os jogos de interesse e poder, a comunicação, a falta dela ou sua interpretação, a adequação do diagnóstico e do prognóstico para a situação concreta e, fundamentalmente, a alteração desses elementos no tempo e no espaço. A sociedade – como nexos e principal interessada nos efeitos da ação pública –, bem como seus componentes, é mutável, se adapta, evolui (ou retrocede), responde de forma ativa às propostas, à implementação das propostas e a eventuais resultados das propostas.

Simular cenários futuros é algo cada vez mais factível de ser feito, de forma muito variada e adaptada a diferentes tipos de problemas. As técnicas que podem ser empregadas, entretanto, não têm o condão de transformar questões complexas em assuntos simples. Eles continuarão a ser problemas multifacetados, mal estruturados, multivariados e sujeitos a fatores imponderáveis, entre eles, comportamentos erráticos e estratégias de atores que tentam surpreender adversários. O que as simulações proporcionam não é, portanto, abolir as incertezas, mas reduzir seu espectro e transformá-las em um leque de possibilidades que possam ser minimamente aferidas e antecipadas.

Portanto, as oportunidades abertas com as simulações não têm a pretensão de encarar problemas complexos como se fossem simples e de transformar a incerteza em uma questão banal e passível de ganhar feições exatas. Ao contrário, há que se considerar que o futuro é visualizado por meio de probabilidades e cenários possíveis, alternativas, ponderações e decisões cujas consequências exigirão monitoramento, adaptação, negociação, enfim, política, na melhor acepção da palavra.

De fato, essa descrição imbricada de elementos sintetizam a interação e a dinâmica típicas de sistemas complexos. Pode-se dizer que a sociedade (Tessone, 2015), as cidades (Bettencourt, 2015), o sistema econômico (Dawid, 2015), a burocracia, os processos

e sistemas de apoio à decisão (Allison, 1971; Neustadt e May, 1986; Bekman e Neto, 2009; Berger, 2013) são todos sistemas complexos. As ciências sociais que os estudam buscam, justamente, entender tal complexidade e dar tratamento às incertezas que os cercam, ou, de outra forma, sistematizar em fluxos, quantidades, probabilidades, trajetórias e resultados das alternativas e intervenções realizadas por gestores públicos.

Sistemas complexos começaram a ser conceituados, compreendidos e descritos como tais, de forma paulatina, a partir da metade do século XX (Furtado e Sakowski, 2014). São sistemas que contêm partes múltiplas e descentralizadas que interagem entre si, que não estão necessariamente em equilíbrio, cuja interação promove propriedades emergentes do sistema (inovações) e que podem não ser plenamente deduzíveis a partir da estratégia mais cartesiana de análise individual de seus componentes (Anderson, 1972).

Sistemas complexos se adaptam, aprendem, evoluem e entram em crise, como se fossem eles próprios organismos vivos. Os atores emprestam muitos de seus atributos quando, no processo de interação, reagem, se retroalimentam e demonstram resiliência (Simon, 1959), erram, ganham, perdem e aprendem.

A tomada de decisão e a manutenção (ou não) da decisão tomada – especialmente para as questões de políticas públicas – situam-se nesse contexto de características complexas. Ainda mais quando se somam aspectos de criticidade, urgência, dimensão (amplitude do problema a um grande público-alvo), multicausalidade, multiplicidade político-institucional das arenas decisórias e limitações de prazo de implementação (por exemplo, a um mandato dos dirigentes ou a trocas de comando de pastas encarregadas de coordenar as soluções).

Em suma, tanto o processo de tomada de decisão quanto a política em si e seu contexto podem ser considerados como sistemas complexos, compostos pelos agentes promotores e os beneficiários da política (ou os que foram excluídos por ela), que interagem entre si, de forma não simétrica; e cuja interação pode resultar em alterações na política, ou desvios na sua observância, que geram efeitos de retroalimentação, que podem resultar em efeitos, novamente, não ótimos, por exemplo.

A constatação de que políticas públicas são sistemas complexos (Mueller, 2015) não significa um convite à inação. De forma alguma. Significa que o processo em si deve ser abordado incorporando sua complexidade, e não simplificando essa tarefa a partir de sua repartição em compartimentos menores e estanques.

O que se buscará expor, doravante, é que há um repertório de métodos e metodologias que, em conjunto com a compreensão do fenômeno, podem contribuir – de forma marcadamente significativa – na condução do processo na direção de resultados socialmente mais benéficos, com base em decisões melhor informadas, inclusive em relação a opções que signifiquem algo diferente ao jogo de soma zero.

Ações que buscam não apenas atingir um objetivo unilateralmente, descuidando da reação dos demais atores, mas estimulando o comportamento cooperativo, na linha do que se convencionou chamar de *soft power* (Nye, 1990; Wilson III, 2008), ou, mais recentemente, conforme a teoria do *nudge* (“empurrão”) (Saghai, 2013), podem ser algumas das simulações possíveis em busca de denominadores comuns a uma multiplicidade de atores normalmente contrapostos.

De fato, uma vez compreendidos os conceitos e indicada a abordagem de sistemas complexos para atuar em sintonia, há vasta gama de métodos que podem contribuir com o exercício de observar o funcionamento do sistema, compreender seus mecanismos, estudar alternativas, realizar experimentos controlados – *in silico* (*em ambiente computacional*) – antes que recursos vultosos e ações danosas sejam, atabalhoadamente, executados.

Com esse contexto de abordagem de sistemas complexos e seus métodos aplicados à análise da decisão em políticas públicas, este texto, preliminarmente, indica como testes, experimentos, simulações e confrontações de hipóteses podem ser realizados antes que tais políticas públicas sejam implementadas.

Um dos argumentos essenciais é o de que modelos computacionais são pouco custosos e podem ser utilizados como ferramentas de *forward-looking* (*prognósticos*) ao se implementar políticas públicas, ao se tomarem decisões de envergadura e com externalidades públicas sensíveis ou mesmo críticas. Deve-se ressaltar que a apresentação de uma grande variedade de opções de simulações possíveis, no espaço de um único capítulo, torna factível tão somente a indicação sumária de que tais métodos existem e se aplicam a determinadas questões. Não é possível, dada a limitação dessa escolha, demonstrar, em detalhes, de que modo cada um deles funciona. A proposta aqui apresentada é mais um convite ao admirável público do que propriamente a descrição detalhada do programa de cada espetáculo.

Para além desta introdução, a seção 2 discorre brevemente sobre a utilização de experimentos em ciências sociais e de como já há vasto campo de estudos e análises que orientam como proceder, descrever e raciocinar, considerando a abordagem de sistemas complexos. Em seguida, são apresentados sumariamente alguns métodos computacionais disponíveis, as vantagens e limitações de cada um, advogando o princípio fundamental de que múltiplos métodos informam melhor a tomada de decisões de políticas públicas, com ênfase na conceituação e aplicação de modelagem baseada em agentes (ABM). Apresentam-se, então, várias referências de aplicações de modelos computacionais a problemas de políticas públicas (seção 3). A seção 4 lista outros métodos computacionais que podem ser usados em conjunto, de forma complementar ou comparativa como apoio à tomada de decisão. A seção 5 vincula a utilização de métodos computacionais à tomada de decisão política e é seguida das considerações finais.

2 MÉTODOS, CIÊNCIAS SOCIAIS E POLÍTICAS

Antes de mais nada, ressalte-se: múltiplos métodos informam melhor a tomada de decisões (Page, 2018). Page é muito feliz quando advoga que não há um método melhor que outro, mas sim que a coletânea de múltiplos métodos, analisando o mesmo fenômeno, pode contribuir de maneira aditiva à compreensão mais completa³ dos processos. Essa concepção é mais relevante para fenômenos mais complexos, multicausais, com múltiplos agentes heterogêneos, que interagem de forma assimétrica e assíncrona com variadas intensidades. Assim, este capítulo não pressupõe métodos computacionais, exclusivamente, mas sim adicionalmente, complementarmente. Simulações computacionais contribuem não exatamente para prescrever decisões incontestáveis, mas para reduzir a incerteza que cerca a formulação de alternativas e a escolha de decisões que sejam o mais sustentável possível no longo prazo.

Nossa segunda ressalva é justamente quanto à construção de prognósticos. Muitos métodos se voltam quase exclusivamente a observar o passado. Embora não haja problema algum nessa escolha, a construção específica de tomada de decisões em relação à coisa pública necessita também de métodos que contribuam para o olhar adiante.

De fato e historicamente, para o caso brasileiro, em especial, o processo de planejamento, enquanto prática, se deteve muito na construção de belíssimos diagnósticos (Maricato, 1997). No entanto, é necessário também que se reservem recursos, engajamento, pessoal, *momentum* – para o prognóstico, a implantação, a avaliação e o espaço dos ajustes, da adaptação.

Tradicionalmente, as ciências utilizaram-se de métodos indutivos e argumentativos – a palavra, a retórica, o discurso –, que constroem padrões, narrativas, explicações, do singular para o geral. Abarcaram também processos dedutivos, preferencialmente com linguagem matemática formalizada, na qual, a partir de pressupostos, novamente, constroem-se explicações, aplicáveis para casos gerais – que se encaixam no conjunto de hipóteses necessárias.⁴

Neste capítulo, enfatizaremos modelos computacionais que podem contribuir com processos indutivos e dedutivos e, possivelmente, uma terceira via alternativa: a algorítmica. Rob Axelrod (1997) sugere que simulações seriam uma forma adicional de se realizar ciência. Parte-se de regras explícitas, conhecidas ou hipotéticas, de forma dedutiva. Porém, em vez de depreender teoremas a partir do regramento inicial, geram-se dados, relatórios, informações, que são avaliados de forma indutiva, podendo ser, inclusive, comparados a dados reais.

3. Ou, do inglês, *comprehensive*, abrangente, em português.

4. As famosas “curvas bem-comportadas”.

A proposta algorítmica é, portanto, iniciada a partir de hipóteses da experiência, da literatura, descritas ou observadas, e simula mecanismos encapsulados em modelos. Esses modelos são descritos em algoritmos, equações, texto, código – e produzem resultados. Esses resultados confrontados com a realidade empírica podem ser validados, contestados, analisados e aperfeiçoados continuamente para servir de apoio à decisão, a partir de sua retroalimentação (*feedback*).

Essa proposta adicional de método científico se torna relevante em um momento, especialmente a partir da década de 1970, no qual há profusão de dados e capacidade de processamento como nunca vistos. Embora a complexidade de experimentos computacionais nunca tenha sido impedimento *per se* para o avanço da ciência,⁵ a facilidade, o acesso a metodologias e a ubiquidade, tanto das informações quanto da capacidade de processá-las, impactaram o uso de modelagem computacional de forma exponencial.

Finalmente, vale ressaltar que as ciências sociais, em especial, e a prática de proposição, monitoramento e avaliação de políticas públicas enfrentam a dificuldade adicional – em relação às ciências exatas, em geral – pela dificuldade de realização de experimentos, seja pelo custo, sejam pelas dificuldades éticas, seja pela impossibilidade de se reverterem danos possíveis gerados a partir dos testes.

Na busca por contornar essa dificuldade prática, cientistas e gestores públicos buscam agregar alternativas, na lógica de múltiplos modelos e ferramentas. Armam-se de fundamentação teórica, estudos de caso, análises comportamentais e *surveys* (*questionários*), pesquisas diretas a partir de entrevistas ou observações *in loco*. Todavia, há espaço para subjetividade que pode, por vezes, impactar a avaliação isenta e interferir nos resultados. Há exemplos claros de percepção social de usuários muito positiva, com avaliações técnicas bem menos benevolentes.⁶

Adicionalmente, como todo método ou teoria, é passível de críticas. Regras explícitas, comunicação clara e transparente, fundamentação teórica e técnica são recomendáveis. E, nesse caso, modelos computacionais têm a vantagem adicional de serem mais facilmente, embora nem sempre, reproduzíveis. Está muito disseminada, entre cientistas e pesquisadores, a necessidade de se promover acessibilidade a dados e métodos, com documentação completa que permita a reprodução dos resultados. Busca-se, com isso, garantir que os resultados sejam testados, avaliados, validados. É importante que os resultados não sejam ocasionais e espúrios, mas que reflitam padrões e comportamentos que possam ser, assim, aplicados em espectros distintos.

5. Haldane e Turrel (2018) ilustram o exercício feito por Enrico Fermi no início do século XX, à mão, para simular o comportamento de neutros individualmente feito de forma mecânica, uma vez que a solução analítica da equação era impraticável.

6. Veja, a título de exemplo, a avaliação oficial do Programa Minha Casa Minha Vida e a avaliação do conjunto de técnicos e pesquisadores.

2.1 Modelagem baseada em agentes (ABM)

A modelagem baseada em agentes é uma abordagem descrita como *bottom-up*, ou seja, de baixo para cima, porque enfatiza os menores elementos atuantes de um sistema e, a partir das relações entre as menores partes, elabora a compreensão do fenômeno. Esses elementos são, usualmente, agentes, no sentido de que agem, tomam decisões – iniciativas e cursos de ação –, escolhem, a partir aspectos objetivos – incentivos, restrições, sanções e informações disponíveis – e subjetivos – percepções. A partir, portanto, das interações entre agentes heterogêneos e desses com o ambiente, os resultados globais emergem.

A título de comparação, abordagens tradicionais na economia neoclássica utilizam-se do paradigma *top-down*, de cima para baixo. Assim, a teoria determina os comportamentos esperados, tidos como ótimos, e, a partir da construção teórica, calculam-se os equilíbrios. Das equações em equilíbrio derivam-se os comportamentos dos agentes e as possíveis trajetórias, a partir de alterações exógenas no equilíbrio.

Embora utilizem construção conceitual distinta, há autores (Sasaki e Box, 2003) que demonstram que os resultados – a compreensão do fenômeno e sua contribuição para a tomada de decisões – podem, em vários casos, ser exatamente os mesmos.

A ABM pode ser conceituada como a análise de um fenômeno a partir do desenho das ações de suas mínimas partes constituintes e das interações entre as partes e o ambiente. Essa definição é formal, computável⁷ e determinística, ainda que contenha elementos estocásticos. É possível realizar inúmeras interações e obter exatamente o mesmo resultado, para várias casas decimais, em todas as simulações.

$$A_{t+1} = f(A_t, E_t). \quad (1)$$

$$E_{t+1} = g(A_t, E_t). \quad (2)$$

Além de formal e computável, a ABM pode ser inspecionável. Isto é, para além da descrição algorítmica, as linhas do código de programação podem ser verificadas e validadas. Aliás, a recomendação padrão de boas práticas entre a comunidade científica ABM é que o código esteja sempre disponível (Edmonds *et al.*, 2019; Grimm *et al.*, 2020).

A grande vantagem da ABM é que seus resultados não dependem de resolução analítica das equações. Dadas as regras de comportamento, descritos os estados dos agentes e do ambiente, é possível apenas deixá-los interagir e observar o resultado. Nesse sentido, não é necessário impor restrições matemáticas, tais como que a “curva seja bem-comportada”, convexa, ou que a segunda derivada seja positiva, por exemplo.

7. A equação informa que o estado dos agentes (A) em $t+1$ é função do estado dos agentes e do ambiente (E) em t . O ambiente, por sua vez, em $t+1$, é função também do estado dos agentes e do ambiente em t (Epstein e Axtell, 1996).

Por seu turno, é necessário que a teoria ou as observações permitam estabelecer qual é o leque de condutas possíveis dos agentes. Como se processa a transformação entre estados? Qual o comportamento dos agentes?⁸

Essa tarefa de descrição do comportamento dos agentes não é trivial e é marcadamente distinta da abordagem tradicional. Em economia, por exemplo, ponderemos as ações das firmas no caso neoclássico. As firmas conhecem o mercado e o comportamento dos consumidores. Todas maximizam lucro e utilidade e, portanto, a firma sabe identificar quais são: i) os salários a pagar; ii) os empregados a contratar; e iii) os preços a cobrar. Na abordagem ABM (e na prática cotidiana), as firmas não conhecem todos os agentes e não sabem a intensidade da demanda. Com isso, fica mais difícil estimar qual preço maximiza lucro. Não se consegue prever exatamente se a produção corrente será suficiente para a demanda ou se é necessário contratar ou despedir.

Com isso, recorre-se à literatura. Blinder (1994) descreve uma pesquisa com firmas reais e lista os procedimentos utilizados para a tomada de decisão sobre preços. Seppacher (2012) investiga como firmas decidem sobre salários. Vários modelos sugerem que as firmas observam o próprio inventário ao tomar decisões sobre contratações (Furtado, 2018a; Gaffeo *et al.*, 2008; Lengnick, 2013). Essas práticas já são usuais para ABM em economia e estão descritas e justificadas no capítulo de Dawid e Gatti (2018).

A ABM – entendida como simulação artificial de um fenômeno em meio computacional – traz ainda outras vantagens, para além da tratabilidade analítica:

- incorpora informações espaciais, com refinamento e granularidade permitidos hoje por programas de informações geográficas (GIS);
- incorpora a heterogeneidade de perfil e o comportamento dos agentes, sendo que a tomada de decisão – sobre compra ou sobre emprego, por exemplo – pode ser feita a partir das informações e condicionantes locais (no espaço e no tempo);
- incorpora comportamentos não lineares, crises, inovação, ou seja, fatores exógenos que normalmente são excluídos dos modelos tradicionais, mas que, em geral, têm peso determinante sobre os fenômenos (razão pela qual muitos modelos são incapazes de incorporar o peso de crises e grandes inovações a seus prognósticos);
- permite, e isso é fundamental, a realização de experimentos em situações que empiricamente não seriam possíveis, especialmente para o caso das ciências sociais e humanas;

8. De todo modo, há ABM que busca exatamente avançar na contribuição teórica e simular regras hipotéticas, observando se, como resultado, o sistema se comporta como observado empiricamente.

- é flexível. A escala de detalhes da modelagem depende da intenção e do propósito do modelador (Edmonds *et al.*, 2019); e
- é pouco custosa financeiramente e em termos de gasto de tempo, se comparado com uma pesquisa de campo ou *survey*, por exemplo, ao mesmo tempo que permite a prototipagem de eventos e cenários provendo resultados em termos probabilísticos.

Uma das grandes desvantagens da ABM, a nosso ver, é a flexibilidade. Esta abordagem é tão simples e relativamente tão rápida que a proliferação de modelos alternativos é significativa. Com isso, há dificuldades para se identificarem padrões de modelagem e realizar avanços científicos a partir de trabalhos anteriores. Essa crítica recebeu a atenção de vários teóricos que estabeleceram o Protocolo ODD, com recomendações para a descrição e compreensão dos modelos, de modo a torná-los comparáveis (Edmonds *et al.*, 2019; Galán *et al.*, 2009; Grimm *et al.*, 2006; 2010; 2014; 2020; Grimm e Railsback, 2012).

2.2 Propósitos para a ABM

Edmonds *et al.* (2019) listam vários propósitos para ABM. Embora a ideia seja vincular um modelo ao seu propósito, qual seja, o modelo é tão bom quanto consiga responder ao seu propósito, os autores listam sete propósitos distintos que podem ser investigados via ABM. Em uma descrição livremente organizada do mais específico para o mais geral, do que demanda mais detalhes e dados ao mais abstrato, os autores listam três propósitos explicitamente empíricos: previsão, explicação e descrição.

O modelo que pressupõe realizar previsões deve antecipar de forma confiável padrões, dados e informações que não estão disponíveis (Edmonds *et al.*, 2019). Confiável, nesse caso, significa que há alguma medida de acurácia que garanta utilidade ao modelo, ao mesmo tempo que o código esteja disponível (para averiguação) e que testes tenham sido realizados e relatados.

Um segundo propósito de ABM seria a capacidade de explicação. Compreender “por que” algum fenômeno ocorre. Ainda que ele não possa ser previsto, é possível descrever, *a posteriori*, as razões subjacentes para sua ocorrência. Edmonds *et al.* (2019, p. 6) descrevem a explicação como “uma sequência causal do desenho inicial para os efeitos decorrentes por meio de mecanismos embutidos em uma simulação”.⁹

O terceiro propósito empírico é o descritivo. Nesse caso, os modeladores buscam representar aspectos do fenômeno que são relevantes. No âmbito de sentido de modelo em si, trata-se de identificar e representar o cerne, o relevante, ao

9. Tradução livre do original, em inglês: “a possible causal chain from a set-up to its consequences in terms of mechanisms in a simulation”.

mesmo tempo que se excluem detalhes e irrelevâncias. Os autores lembram que a descrição deve ter como referência e embasamento listas de evidências, observações, documentos, experiências e dados que suportem a modelagem realizada.

Edmonds *et al.* (2019) listam outros quatro propósitos.

- 1) Exposição teórica – modelos que permitem avaliar hipóteses e comportamentos, dado um conjunto de mecanismos. Assim como na análise matemática, a partir de pressupostos e seu desenvolvimento, é possível construir hipóteses e verificá-las, com os resultados válidos para o conjunto de conjecturas utilizadas.
- 2) Ilustração – qual seja, o fato de prover concretude para um conjunto de mecanismos e ideias que compõem uma estrutura. Sobre o modelo estabelecido, é possível realizar inspeções, críticas, comunicar, discutir, experimentar e realizar alterações e testes, de forma aditiva e modular.
- 3) Analogia – que seria a capacidade de utilizar conceitos e mecanismos de um contexto em outro. Ou utilizar-se de conhecimentos mais aprofundados em determinada área e usar a mesma moldura para guiar o raciocínio em área distinta. Nesse sentido, a modelagem pode ser uma ferramenta poderosa de comunicação, de suporte para a construção do raciocínio. A contribuição, nesse caso, é a produção de novas compreensões, indicações de direções para aprofundamento, por exemplo.
- 4) Aprendizado social – finalmente, um último propósito sugerido por Edmonds *et al.* (2019) é que a ABM sirva como uma ferramenta estruturada que permita, de forma mais concreta e sistemática que o usual, a discussão sobre os mecanismos de um sistema. Dessa forma, espera-se, reduzem-se os desentendimentos e essa discussão pode ser mais bem orientada e especificada. Esse modo é utilizado especialmente quando a base da construção é o conhecimento tácito de especialistas.

3 APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS E MODELAGEM BASEADA EM AGENTES

No intuito de ilustrar aplicações reais de computação e ABM, esta seção lista vários modelos disponíveis para análise de políticas e detalha três com maior profundidade.

Descrições sobre o processo de construção de ABM podem ser encontradas de forma mais geral em Wilensky e Rand (2015) e com ênfase em economia em Hamil e Gilbert (2016) e Terna (2015). Macroeconomistas, em especial, encontrarão detalhes em Dawid e Gatti (2018), enquanto cientistas sociais podem consultar Helbing (2012) e Edmonds e Meyer (2017). Geógrafos devem referir-se ao conjunto de textos organizados por Heppenstall *et al.* (2012). Cientistas sociais podem se interessar pelos textos de Colander e Kupers (2014) e Geyer e Cairney (2015).

Existe, ainda, toda uma tradição de publicações em várias áreas das ciências naturais e exatas, com especial atenção nas áreas de epidemiologia, ecologia e comunicação e cognição.

3.1 Aplicações às políticas urbanas e regionais: PolicySpace2

No âmbito do Ipea, desenvolvemos uma plataforma de modelagem de código aberto que se utiliza de dados empíricos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e permite análises que vinculam aspectos econômicos, fiscais e municipais, metropolitanos. Denominado PolicySpace2 – PS2¹⁰ (Furtado, 2021) – como evolução do PolicySpace (Furtado, 2018a; 2018b).

PolicySpace2 é uma simulação artificial calibrada para municípios urbanos de 46 regiões metropolitanas (RMs) brasileiras que simula produção, demografia, mercados de trabalho, de bens e serviços, imobiliário, de crédito, com coleta de impostos – com *proxies* para Imposto de Renda da Pessoa Física (IRPF), Imposto de Renda da Pessoa Jurídica (IRPJ), Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Imposto de Transmissão de Bens Imóveis (ITBI), Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) – e distribuição municipal, de 2010 a 2020. Os agentes do modelo são trabalhadores, famílias, firmas, firmas de construção civil, municípios, e o detalhamento de dados é intraurbano, no nível das áreas de ponderação do IBGE.

A partir da decisão individual e do local dos agentes (firmas decidindo sobre preços e salários, por exemplo, enquanto trabalhadores decidem sobre ofertas de emprego e locais de consumo) e da interação deles com o ambiente local (determinante para a composição de preços no mercado imobiliário), a dinâmica econômica endógena se estabelece e permite vislumbrar efeitos de políticas que incorporam as reações dos agentes nos momentos subsequentes.

A figura 1 ilustra, de forma genérica, aplicações de ABM e também é adequada para ilustrar o caso do PS2 (Furtado, 2021, p. 2). Na fase de modelagem, os dados que caracterizam os agentes são organizados de forma a refletir o *status quo* do fenômeno a ser simulado. Para o caso do PS2, a fase de dados corresponde às informações de famílias por áreas de ponderação do IBGE, com dados do Censo Demográfico 2010, que incluem a composição da família (número de membros), idades correspondentes, anos de estudo, mortalidade, fertilidade, localização de empresas, delimitação municipal, número de habitantes, juros de empréstimos imobiliários, dentre outras informações.

A fase de literatura reflete os consensos da comunidade científica que investiga o fenômeno e contém detalhes sobre como os agentes interagem. No caso do PS2, essa fase se deu pela descrição dos mercados de bens e serviços, do mercado

10. Disponível em: <github.com/bafurtado/policyspace2>.

imobiliário, do processo produtivo das empresas e da forma como o financiamento imobiliário ocorre, por exemplo. É essa fase que dá suporte ao pesquisador para definir as regras que estabelecem as interações. Possivelmente, também é nesse momento que técnicos, políticos e comunidade podem atuar para garantir que os processos de interação estão modelados de forma que capture os aspectos centrais do fenômeno, tais como realmente ocorrem.

Uma vez concluído o modelo, parte essencial é a verificação do código. Neste momento, as instruções computacionais são conferidas para garantir que o modo como o computador processa o modelo está de acordo com o entendimento dos pesquisadores sobre como o modelo deve operar. A validação se refere à compatibilidade entre os resultados gerados pela simulação e os padrões observados ou conhecidos do fenômeno. No caso do PS2, por exemplo, o código foi verificado a partir da conferência cuidadosa por parte dos pesquisadores, para além da produção de vários testes, indicadores e gráficos que refletissem exatamente como os processos embutidos na codificação do modelo estavam operando. No total, mais de 6 mil simulações foram realizadas. A validação referiu-se à capacidade do PS2 de reproduzir padrões espaciais similares dos preços dos imóveis, da concentração de empregos e da desigualdade observada, entre outros.

Finalmente, quando o modelo está verificado e modelado e é capaz de reproduzir padrões observados, realiza-se o contraste entre o caso-padrão, chamado de linha de base, e a simulação com alternativas de políticas. Os resultados observados entre as alternativas são comparados e é possível antecipar qual política apresentou melhores resultados, de acordo com os indicadores escolhidos. No caso do PS2, testaram-se algumas políticas de habitação (aquisição e distribuição de imóveis, pagamento de aluguel e distribuição de auxílio monetário). O resultado sugere que o auxílio monetário – na prática, menores aportes para número maior de famílias – gera resultados socialmente mais benéficos, com aumento de produção e redução da desigualdade.

FIGURA 1

Ilustração do processo de simulação para o caso do PolicySpace2

Elaboração dos autores.

3.2 Aplicações a políticas de grande envergadura

Furtado, Fuentes e Tessone (2019) listam três estudos de grande envergadura que se utilizam de sistemas complexos e abordagem de ABM para análises de políticas públicas. O primeiro, denominado de “sistema de sistemas”, é operado por um consórcio de sete universidades do Reino Unido, que, em conjunto com a autoridade nacional em infraestrutura, desenvolveu o modelo National Infrastructure Model (Nismod). O Nismod busca incorporar os efeitos cruzados entre os sistemas de infraestrutura, de modo a capturar possíveis vulnerabilidades e construir um sistema mais confiável, resistente a múltiplas e inesperadas pressões.

O segundo estudo é o denominado “Keynes encontra Schumpeter” (KS), desenvolvido por Dosi, Fagiolo, Roventini e outros da Scuola Superiore Sant’Anna. Dentre a profusa publicação do grupo, os autores listam onze análises de políticas, incluindo inovação nas firmas, oportunidades tecnológicas, antitruste, entre outras (Dosi *et al.*, 2013; 2015; Dosi, Fagiolo e Roventini, 2010).

O terceiro é o conjunto de estudos originalmente denominados UrbanSim (Waddell, 2011), que evoluiu para um sistema proprietário em uma plataforma 3D denominado Urban Canvas. Os agentes do modelo incluem famílias, indivíduos e firmas, focando especialmente na integração entre sistemas de transportes, decisões das famílias, parcelamento do solo e construção de propriedades. Há aplicações para Óregon, Estados Unidos (Waddell, 2002), e outras localidades (Waddell *et al.*, 2007; Waddell, Wang e Charlton, 2007; Waddell, Wang e Liu, 2008).

3.3 Aplicações aos serviços

SPREE é um modelo genérico de ABM que investiga a transição de mercados baseados em produtos para mercados baseados em serviços (Van der Veen, Kisjes e Nikolic, 2017). Basicamente, o modelo enfatiza o processo de transformação da firma que deixa de vender o produto em si e passa a oferecer a função que o produto exerce. Um dos casos analisados, por exemplo, é a substituição da venda da bicicleta por um sistema de alugueis de bicicletas.

O fenômeno descrito envolve a tomada de decisão da firma a partir da evolução das escolhas dos consumidores e de suas preferências, de forma integrada e com retroalimentação. Ao mesmo tempo em que aumenta o tamanho do mercado de um determinado produto, aumentam as chances de o consumidor testar uma nova tecnologia.

O modelo SPREE é aplicado a três estudos de caso tematicamente bastante distantes. Para além do serviço de empréstimo de bicicletas, Van der Veen, Kisjes e Nikolic (2017) investigam um processo de proteção a plantações e um sistema doméstico de economia de água.

No intuito de garantir a aplicação a contextos diferentes, os autores fazem uma descrição da ontologia do modelo, buscando coerência entre os conceitos e as interações. É feita uma clara separação entre agentes e objetos, sendo agentes atores ativos e objetos conceitos (abstratos) presentes no modelo. Há dois tipos de bens finais: ferramentas – que são objetos físicos, portanto, transferíveis e estocáveis; e serviços (prestados pelas firmas), os quais indicam que uma função (de deslocamento, por exemplo) foi oferecida.

A pergunta de pesquisa que o modelo busca responder é o potencial impacto da política de oferecer serviços em “desacoplamento absoluto”¹¹ – que é conceituado como a *redução de recursos naturais ao mesmo tempo que se observa crescimento econômico*. Os autores justificam a utilização de ABM porque consideram que é a metodologia que permite incluir, de forma simultânea, heterogeneidade, interações e relacionamentos entre as partes e comportamento singular para cada um dos atores. Com isso, incorporam preferências não racionais, por exemplo, quando o consumidor opta por um bem ligeiramente mais caro, porém com maior sustentabilidade ambiental.

Van der Veen, Kisjes e Nikolic (2017) listam as contribuições do SPREE. De acordo com os autores, o processo de decisão ocorre de forma interativa entre vendedores e compradores. O modelo inclui modelos de negócios baseados em produtos ou baseados em serviços. A modelagem inclui ainda mudanças de grande magnitude, tanto no consumo quanto na produção. O mecanismo de decisões sobre preços envolve pesquisa de mercado “sofisticada” por parte das firmas. E a parametrização dos atributos dos participantes do mercado é muito flexível.

Por fim, vale ressaltar a ênfase dos autores de SPREE no formato descritivo, chamado de “narrativo” por Dahlstrom (2014), para além da descrição lógica-científica feita em material suplementar. Como dizem Van Dam, Nikolic e Lukszo (2012), a ABM formaliza “qual agente faz o que com quem, quando”.¹²

3.4 Aplicações variadas

A título de ilustração, concluímos esta seção com uma demonstração de aplicações de ABM nas mais variadas áreas. Student, Amelung e Lamers (2016) utilizam ABM para explorar um sistema autorregulatório de turismo na Antártica. A International Association of Antarctica Tour Operators (IAATO), associação baseada em tratado internacional – portanto, sem meios formais de coerção, senão o consenso –, identifica quatro desafios para o turismo na região: i) o envolvimento da operadora (cada uma do total de sete que participam da IAATO); ii) o crescimento do turismo; iii)

11. No original, em inglês, *absolute decoupling*.

12. No original: “the behaviour of each of the agents can be captured in a story which explains *which agent does what and with whom and when*” (Van Dam, Nikolic e Lukszo, 2012, p. 88, grifo no original).

a diversificação de operações de cada operadora; e iv) a ocorrência de acidentes. O propósito do modelo era emular o comportamento de cada operadora por meio de regras simples, sendo o sucesso medido pela adequação do modelo ao universo dos membros participantes e a identificação de alcance em relação a atividades conjuntas adequada e benéfica.

Outro exemplo de aplicação de ABM no gerenciamento de práticas foi aplicado no Quênia e em Gana (Bellaubi e Pahl-Wostl, 2017). Os autores modelam a dinâmica institucional e as inter-relações entre a sociedade e o ambiente, com vistas a explorar como práticas de corrupção e gerenciamento afetam a *performance*. Os agentes se envolvem em vários jogos que refletem diferentes dilemas sociais, de forma que os benefícios (*payoffs*) sejam definidos com base em transparência, participação e custos sociais.

De volta à discussão política, Silvia e Krause (2016) investigam quatro políticas distintas para a promoção de veículos elétricos. De especial relevância, esse tipo de exercício permite iluminar trajetórias de investimentos para políticas públicas, antecipando magnitude de custos e resultados. As políticas testadas incluíram: i) redução de preços, via subsídios; ii) expansão do sistema de abastecimento elétrico; iii) aumento do número de veículos com baterias elétricas; e iv) uma combinação das anteriores. Veja que esse modelo descreve as características específicas de um fenômeno sem a intenção de replicar uma situação específica. É uma composição qualitativa similar à observada. Ademais, o foco da análise é na reação, na resposta do consumidor à proposta de políticas públicas.

Instituições de países desenvolvidos, como bancos (Bank of England, Federal Reserve Bank, Bank of Spain); organismos multilaterais (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE, União Europeia); e instituições de pesquisa (Massachusetts Institute of Technology – MIT, University of Michigan, Turing Institute, Irish Auditing and Accounting Supervisory Authority – IAASA, University of Oxford, entre muitas outras), já fazem uso de ABM para investigação cotidiana (Furtado, Fuentes e Tessone, 2019).¹³

Finalmente, o campo de aplicações em outras ciências é bastante amplo, incluindo desde o comportamento de células e seus efeitos para câncer colorretal (Ingham-Dempster, Walker e Corfe, 2017) até o consumo de bebidas (Scott *et al.*, 2016), que serve como suporte à tomada de decisão a partir da modelagem de padrões de consumo e agressão, e de tabaco (Luke *et al.*, 2017), que busca identificar a efetividade de mecanismos de controle de tabaco por meio da densidade permitida de revendedores.

13. Para interessados, recomendamos, em especial, os artigos publicados no *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Disponível em: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk>>.

4 MÉTODOS COMPUTACIONAIS ADICIONAIS

4.1 *Big data*, estatística e econometria

Três fenômenos simultâneos facilitaram a utilização (e a produção) de dados em maior quantidade e detalhamento. Em primeiro lugar, a rede de computadores, a internet, iniciando seu processo de acessibilidade a partir de meados da década de 1990, fez com que a comunicação (por *e-mail*, inicialmente) se tornasse mais ágil. Com isso, um pedido de documentos ou informação de Brasília a uma biblioteca no Rio de Janeiro, por exemplo, deixou de levar vários dias (ou uma ligação interurbana), para ocorrer em questão de horas. Em segundo lugar, a digitalização de processos – por exemplo, a mesma comunicação com a biblioteca – passa a ter seu conteúdo registrado e, portanto, sujeito a contabilidade, pesquisa, armazenamento, comparação e análise. Especialmente nesse quesito, ressalta-se a relevância da informação espacial, antes muito restrita a mapas e cartas de difícil cópia e consulta. Por último, de forma crescente, uma série de empresas mundiais surgiram e foram dando forma e agilidade à conexão entre pontos da rede mundial, simultaneamente, de forma que os usuários se acostumaram com as tecnologias e os custos financeiros se diluíram.

Mais recentemente, juntaram-se ao processo as redes sociais e a ampliação do acesso móvel à internet, catalisando efeitos e gerando mais dados. Uma revisão dos processos e das tecnologias envolvidas quando o volume de dados é gigantesco pode ser encontrada em Oussous *et al.* (2018).

A disponibilidade de dados, o poder computacional e os programas de computação acessíveis alavancaram desenvolvimentos de análise multivariada (Mingoti, 2005) e processos estatísticos, por exemplo, a regressão, conhecida entre os economistas como econometria (Greene, 2008; Wooldridge, 2003). A econometria utiliza grandes bases de dados para derivar parâmetros econômicos que informam modelos econômicos, tal como em Groom e Maddison Pr. (2019). Todavia, há exemplos – como no caso do mercado imobiliário – em que a volatilidade é de tal magnitude que exercícios baseados em dados pretéritos não são capazes de capturar a excessiva volatilidade e heterogeneidade intrínseca (Glaeser e Nathanson, 2015).

Kydland e Prescott (1996) argumentam que a econometria pode ser considerada, de maneira ampla, como um experimento computacional que permite identificar quantitativamente implicações teóricas. Os autores detalham, inclusive, os passos necessários para se montar um experimento computacional. Segundo eles: i) elabore uma questão; ii) use uma teoria testada (e aprovada); iii) construa um modelo econômico – cujo nível de detalhamento pode variar; iv) calibre o modelo econômico, de modo que “replique o mundo tão próximo quanto possível em um

número limitado, mas bem especificado, de dimensões” (Kydlund e Prescott, 1996, p. 74);¹⁴ e v) rode o experimento.

Avanços recentes em econometria tentam incorporar modelos causais – inferência causal – com origem na epidemiologia (Robins, Hernan e Brumback, 2000) e ciências computacionais (Pearl, Glymour e Jewell, 2016), por meio de grafos acíclicos dirigidos (DAGs¹⁵).

4.2 Aprendizado de máquinas

O aprendizado de máquinas (ML)¹⁶ – colocado de forma rápida – se utiliza de métodos da matemática, da estatística, da análise multivariada e da econometria e os combina com grande capacidade de dados e de processamento, com foco quase exclusivo em previsão (Hastie, Tibshirani e Friedman, 2009; James *et al.*, 2015; Tan, Steinbach e Kumar, 2006). Abandona, em certa medida, a construção teórica e a busca por explicações da econometria para contribuir com resultados mais eficientes, do ponto de vista de previsibilidade. É mais flexível, já que é solucionado numericamente (e não analiticamente). Com isso, traz possibilidades mais amplas de utilização de modelos não lineares e polinomiais, que se ajustam mais facilmente aos dados disponíveis.

Talvez a grande questão de ML seja exatamente conseguir distinguir entre o ajuste que se quer aos dados e a capacidade desse ajuste de ser adequado para novos dados desconhecidos. Dada uma base de dados, o algoritmo escolhido busca ajustar o comportamento observado aos dados. Para utilizar o aprendizado em uma nova base de dados e realizar previsões confiáveis, o treinamento precisa ser transferível à nova base de dados. Se o ajuste feito ao longo do treinamento é muito preciso, ele só será eficaz na mesma base de dados, mas perde capacidade de generalização para bases que diferem da utilizada no treinamento.

Na prática, essa calibragem de ajuste – que consiga capturar a essência de uma base de dados, mas não a tal ponto que permita previsões apenas para a base conhecida – é, muitas vezes, feita de forma recorrente e automática, computacionalmente, de modo que resultados ótimos – de previsão – sejam alcançados.

Essa calibragem usualmente é feita alterando-se vários parâmetros internos do modelo e se utilizando de algoritmos distintos. Entre as técnicas mais comuns, vale citar: i) árvores de decisão, que depois evoluíram para “florestas aleatórias”; ii) máquinas de suporte vetorial, baseadas em análise multivariada; e iii) redes neurais, cujos resultados recentes têm sido promissores.

14. Tradução livre do original em inglês: “it mimics the world as closely as possible along a limited, but clearly specified, number of dimensions”.

15. Do original em inglês: *Directed Acyclic Graph*.

16. *Machine Learning*, em inglês.

4.3 Redes

A grande contribuição de redes, estudos de redes e até “ciência de redes” para a análise de fenômenos e mecanismos é a compreensão de que redes trazem conceitos de estrutura para análise, caminhos e conexões entre agentes (ou instituições, por exemplo) que são facilmente representados matematicamente (Clauset, Moore e Newman, 2008; Newman, 2010; Newman, Barabási e Watts, 2006). A melhor definição de redes é um conjunto de nós ou nódulos e conexões (*vertices* e *edges*, em inglês) que estão conectados. Essa estrutura subjacente pode contribuir na análise de conexões entre pessoas (todas partes de uma seita, por exemplo) ou de terminais de computador ligados a uma central.

O interessante é que, dada sua descrição matemática – por meio de uma matriz de adjacências, por exemplo –, várias medidas e definições contribuem com a descrição e a compreensão da rede. A noção de redes oferece suporte ao raciocínio de como ocorrem as interações e as conexões entre partes (agentes) de um sistema.

De forma ilustrativa, pense em um modelo espacial que localiza os agentes. A rede pode tornar a análise mais detalhada, especificando quais pontos estão efetivamente interligados por vias transitáveis. É possível, com isso, dar mais concretude à análise abstrata inicial.

4.4 DSGE

Equilíbrio Geral Estocástico e Dinâmico (DSGE, do inglês *Dynamic Stochastic General Equilibrium*) refere-se ao método computacional preferencial para análise macroeconômica, com vistas à compreensão de ciclos econômicos e crescimento econômico, inserido na classe de Ciclos Reais de Negócios (Kydland e Prescott, 1982). Baseados no equilíbrio geral walrasiano, DSGEs descrevem a economia por meio de agentes representativos que operam em mercados competitivamente perfeitos. Estabelecido o modelo, é possível inserir choques exógenos e observar o comportamento econômico resultante.

O DSGE básico inclui: i) mercados perfeitos e competitivos; ii) ajuste de preços instantâneo; iii) expectativas racionais; iv) informação perfeita; e v) firmas tomadoras de preços, bem como famílias que vivem indefinidamente.

Várias críticas foram realizadas em relação aos modelos DSGE, o que acabou resultando em ajustes e melhorias no processo, com incorporação paulatina, por exemplo, de agentes heterogêneos, mercados imperfeitos, preços com ajuste lento e até comportamento subótimo. Há críticas ferrenhas aos modelos DSGE, de ordem teórica, procedural e empírica (Fagiolo e Roventini, 2017), ao mesmo tempo em que também há defensores que argumentam que modelos novo-keynesianos também seriam insuficientes (Chari, Kehoe e Mcgrattan, 2009).

5 DISCUSSÃO

Uma das mais importantes possibilidades de aplicação da ABM é poder incidir sobre a montagem e o refinamento de sistemas de apoio à decisão em políticas públicas.

Decisões de Estado de alta complexidade, tomadas sobre questões de grande envergadura, rodeadas por fatores críticos, sensíveis a impactos prolongados no longo prazo e premidas pela urgência e incerteza, exigem altos custos ao processo de construção das decisões (Lassance, 2021).

Para tornar esse tipo de problema melhor conhecido e manuseável pelos dirigentes, as organizações públicas buscam apoio interno ou externo para que as circunstâncias e a formulação de alternativas sejam antecedidas por processos de apoio à decisão.

Isso permite que o problema possa ser esmiuçado em parte menores, mas interligadas. São recolhidas informações – de dados quantitativos a percepções e suposições prospectivas – e oferecidas recomendações mais consistentes, com alguma simulação de prós e contras.

Tradicionalmente, dirigentes valem-se de apoio técnico especializado externo e de assessoria própria para contar com o devido o apoio à decisão. Conforme lembra Lassance (2021, p. 52):

a existência ou inexistência prévia de estruturas montadas tornam o apoio à decisão mais estruturado, profissionalizado e especializado ou, ao contrário, os dirigentes terão que se valer de processos precários, mais amadorísticos, genéricos, menos capazes de oferecer recomendações igualmente mais estruturadas sobre grandes problemas.

O uso de ABM permitiria pelo menos três avanços significativos. Primeiro, o de dar tratamento técnico especializado capaz de simular impactos das decisões com maior precisão. Não necessariamente em relação a todo e quaisquer aspectos, mas àqueles que estejam afetados por maior incerteza e que possam contar com recortes de objeto e especificações capazes de oferecer simulações minimamente bem parametrizadas.

A segunda vantagem seria reservar à assessoria o papel mais estratégico e analítico de suporte. Muitas decisões exigem informações de natureza qualitativa, sondagens de bastidores, tratamento de problemas conforme casos similares já ocorridos, entre outros aspectos. Em problemas de natureza política, a relação entre as dimensões – qualitativa e quantitativa; objetiva e subjetiva; entre a lógica da reiteração (dos jogos com estratégias repetitivas) e a opção de surpreender o adversário e provocar mudanças de rumo – precisa ser harmoniosa. O uso da ABM, de modo criterioso e parcimonioso, cumpre o papel de proporcionar um convite a que diferentes tradições de pesquisa se unam em torno da solução de problemas complexos.

A terceira vantagem seria a utilização do modelo ou protótipo que simule o desdobramento de resultados de políticas como um meio de comunicar, visualizar, alterar e adaptar o próprio desenho da política. A discussão deixa de ser completamente abstrata e pode ser testada, avaliada em tempo real e com a presença das partes, dos atores e de seus representantes. Um parâmetro de entendimento comum pode ser alterado e os dois ou mais resultados visualizados em conjunto podem estabelecer com mais clareza as diferenças de cada decisão tomada.

A ideia, bastante sintonizada com a recomendação de Goertz e Mahoney (2012), é permitir a construção de pontes ou vasos comunicantes entre dois tipos de abordagens marcadas, em geral, por dissonâncias e desconfianças, sobretudo pelo desconhecimento mútuo.

A rigor, a ABM é uma das alternativas possíveis para que estruturas de assessoria encarregadas de apoio à decisão possam dedicar-se a questões “macro”, de dimensões agregadas e de caráter mais estratégico, podendo transferir o aprofundamento em questões de natureza “micro” a esses sistemas de apoio à decisão permanentes ou *ad hoc* (a depender da variação de questões que surjam e representem novidades), especializados em refinar e processar informações em maior escala.

Assim, formas sistemáticas (reiteradas), ao longo do tempo, e sistematizadas, enquanto fluxos de entrada de insumos (informações), processamento e saída de resultados mais específicos, podem ser submetidas a tratamento prévio de especificação e refinamento, robustecendo a fase de formulação e análise de riscos (prós e contras), amparando, clarificando e simplificando, justificada e transparentemente, as alternativas submetidas à tomada de decisão.

Atualmente, sistemas de apoio à decisão são cada vez mais compreendidos e montados como ferramentas customizadas, minuciosamente conectadas a “sensores”, alguns deles baseados em inteligência artificial, que captam, recolhem e armazenam informações úteis para serem, em seguida, modeladas e processadas. Cada vez mais, essas tarefas são realizadas por meio de sistemas informatizados, automatizando rotinas de varreduras de dados e processamento de informações. Portanto, sistemas de apoio à decisão (SADs) são criados e se revelam úteis quando são ferramentas práticas conectadas a processos de apoio à decisão, que, por sua vez, interpretam e organizam os insumos dos SADs como ponderações de alternativas a serem consideradas nos processos de tomada de decisão (Lassance, 2021, p. 42).

Os SADs são mecanismos importantes, mas não podem ser vistos como uma nova panaceia. Eles são limitados a questões que realmente possam ser melhor especificadas, em suas variáveis, e parametrizadas. Para que sejam úteis, exigem um amparo de processos de apoio à decisão que realmente confiem aos SADs tarefas bem definidas. Do contrário, toda a sofisticação possível de ser utilizada com o uso de ABM ficará desconectada de um ciclo decisório, que deveria levar

essas simulações como parte das alternativas dispostas em mesa, e não como meros exercícios de geração de famílias de cenários sem a possibilidade de serem devidamente digeridos como insumo pelos dirigentes.

Para além da utilização de ABM em contextos de políticas públicas, a abordagem de sistemas complexos, vista de maneira mais ampla, contribui com o argumento que questiona a rigidez e a certeza esperada pela burocracia.

Não há, de fato, alternativa simples que não seja prever, por meio legal, os efeitos, o modo, os resultados, os custos e as entregas de uma determinada proposta de política pública. Entretanto, qualquer política que estabeleça efeitos pressupõe, de forma peremptória, que se conheçam os mecanismos, que todo o sistema, desde a publicação da lei – qual seja: a implementação, a liberação de recursos, a reação dos beneficiários, a reação dos não beneficiários, a magnitude dos resultados e a capacidade da política de alterar elementos do sistema – seja conhecido. E isso não é verdade para uma grande parte das políticas (Mueller, 2015).

Como já ilustrado, é possível que essas previsões e essa compreensão do fenômeno sejam mais completas, por exemplo, na engenharia de tráfego.¹⁷ Claramente, todavia, não há consenso científico explícito de que reduzir taxas de juros gera inflação, por exemplo. Ainda que se concorde com a relação entre taxas básicas de juros da economia e inflação, seus modos de transmissão e, mais relevante, sua magnitude são desconhecidas.

Essas constatações não implicam a imediata inação dos dirigentes e de suas burocracias. De maneira alguma. Todavia, seria interessante se as certezas fossem abandonadas e se as metas fossem probabilísticas, com intervalos plausíveis de variação e orientadas a momentos bem mais curtos no tempo.

Nesse sentido, especificamente, a ABM pode contribuir com a produção de: i) melhor compreensão de mecanismos que afetam sistemas e fenômenos; e ii) indicativos sobre a magnitude e a probabilidade de efeitos resultantes após a interação de múltiplos fatores, agentes e mudanças de ambiente. Sugere-se, portanto, entendimentos mais amplos (embora não menos precisos) de prováveis desdobramentos de implementação de políticas, a partir da melhor compreensão dos mecanismos, sua descrição e exercícios de geração de efeitos quantificáveis.

17. Exceto, talvez, pela criticidade do ponto de densidade que desemboca em congestionamentos. Também se excluem aspectos mais gerais de mobilidade urbana e distribuição de redes de transportes, tais como preferências dos usuários na escala metropolitana, por exemplo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo caracteriza as políticas públicas essencialmente como sistemas complexos que, como tal, exigem cuidados adicionais na sua compreensão e em possíveis propostas de intervenção. Sistemas complexos envolvem a interação, a ação e a reação de agentes heterogêneos no tempo e no espaço, não necessariamente de forma coordenada ou hierárquica, mas que possuem informações localizadas ou restritas, imperfeitas, e que, em conjunto, como sistema, se modificam, se adaptam, não necessariamente da mesma forma e sempre. Em especial, sistemas complexos se distinguem de problemas complicados que possuem várias fases, mas cujos resultados são conhecidos, as interações descritas e o comando é seguido, literalmente, da entrada à saída.

Métodos computacionais, adicionalmente, podem ser muito úteis para lidar com panoramas múltiplos, detalhados, imbricados. Especialmente, o texto apresenta em mais detalhes a ABM, seus propósitos, vantagens e múltiplas aplicações.

A vantagem primordial para aplicação em políticas públicas parece ser a de fornecer um ambiente formal (computacional, determinístico, equações, código) sobre o qual vários *stakeholders* (*partes interessadas*) podem se debruçar e esmiuçar, questionar, validar, comunicar compreensões distintas de como o processo se desenvolve. É rápido e barato para servir de protótipo concreto e ambiente de comunicação para a análise de possíveis efeitos esperados de implementação de determinada política pública.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, G. T. **Essence of decision**. Boston: Brown & Co., 1971.
- ANDERSON, P. W. More is different. **Science**, v. 177, n. 4.047, p. 393-396, 4 Aug. 1972.
- AXELROD, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. *In*: CONTE, D. R.; HEGSELMANN, P. D. R.; TERNA, P. D. P. (Eds.). **Simulating social phenomena**. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin: Springer, 1997. p. 21-40.
- BEKMAN, O. R.; NETO, P. L. O. C. **Análise estatística da decisão**. São Paulo: Blucher, 2009.
- BELLAUBI, F.; PAHL-WOSTL, C. Corruption risks, management practices, and performance in water service delivery in Kenya and Ghana: an agent-based model. **Ecology and Society**, v. 22, n. 2, 18 abr. 2017.
- BERGER, J. **Statistical decision theory: foundations, concepts, and methods**. New York: Springer Science & Business Media, 2013.

BETTENCOURT, L. M. A. Cities as complex systems. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLI, M. H. (Eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2015. p. 217-238.

BLINDER, A. S. On sticky prices: academic theories meet the real world. *In*: MANKIW, N. G. (Ed.). **Monetary policy**. Chicago: The University of Chicago Press, 1994. p. 117-154.

CHARI, V.; KEHOE, P. J.; MCGRATTAN, E. R. New Keynesian Models: not yet useful for policy analysis. **American Economic Journal: Macroeconomics**, v. 1, n. 1, p. 242-266, 2009.

CLAUSET, A.; MOORE, C.; NEWMAN, M. E. Hierarchical structure and the prediction of missing links in networks. **Nature**, v. 453, n. 7.191, p. 98-101, 2008.

COLANDER, D.; KUPERS, R. **Complexity and the art of public policy: solving society's problems from the bottom up**. Princeton: Princeton University Press, 2014.

DAHLSTROM, M. F. Using narratives and storytelling to communicate science with nonexpert audiences. **PNAS**, v. 111, n. 4, p. 13.614-13.620, 2014.

DAWID, H. Modeling the economy as a complex system. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P.; TÓVOLI, M. H. **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2015. p. 169-190.

DAWID, H.; GATTI, D. D. Agent-Based Macroeconomics. *In*: HOMMES; C.; LEBARON, B. **Handbook on Computational Economics**. [S.l.]: Elsevier, 2018. v. 4.

DOSI, G. *et al.* Income distribution, credit and fiscal policies in an agent-based Keynesian model. **Journal of economic dynamics and control**, v. 37, n. 8, p. 1.598-1.625, 2013.

DOSI, G. *et al.* Fiscal and monetary policies in complex evolving economies. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 52, p. 166-189, Mar. 2015.

DOSI, G.; FAGIOLO, G.; ROVENTINI, A. Schumpeter meeting Keynes: a policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. **Journal of economic dynamics and control**, v. 34, n. 9, p. 1.748-1.767, 2010.

EDMONDS, B. *et al.* Different Modelling Purposes. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation, The**, v. 22, n. 3, p. 6, June 2019.

EDMONDS, B.; MEYER, R. **Simulating social complexity: a handbook**. Gewerbesrasse: Springer Nature, 2017.

EPSTEIN, J. M.; AXTELL, R. **Growing artificial societies: social science from the bottom up**. Cambridge: Brookings/MIT Press, 1996.

FAGIOLO, G.; ROVENTINI, A. Macroeconomic policy in DSGE and agent-based models redux: new developments and challenges ahead. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 20, n. 1, 2017.

FURTADO, B. A. PolicySpace: a modeling platform. **Journal on Policy and Complex Systems**, v. 4, n. 2, p. 17-30, 2018a.

_____. **PolicySpace**: modelagem baseada em agentes. Brasília: Ipea, 2018b.

_____. **PolicySpace2**: modeling markets and endogenous housing policies. [S.l.]: Cornell University, 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/3oVqYvi>>.

FURTADO, B. A.; FUENTES, M. A.; TESSONE, C. J. Policy Modeling and Applications: state-of-the-art and perspectives. **Hindawi Complexity**, Feb. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3q0eYbb>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M. **Complexidade**: uma revisão dos clássicos. Brasília: Ipea, 2014. (Texto para Discussão, n. 2019).

GAFFEO, E. *et al.* Adaptive microfoundations for emergent macroeconomics. **Eastern Economic Journal**, v. 34, n. 4, p. 441-463, 2008.

GALÁN, J. M. *et al.* Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 12, n. 1, 31 Jan. 2009.

GEYER, R.; CAIRNEY, P. **Handbook on complexity and public policy**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2015.

GLAESER, E. L.; NATHANSON, C. G. Housing bubbles. *In*: DURANTON, G.; HENDERSON, J. V.; STRANGE, W. C. **Handbook of regional and urban economics**. Amsterdam: Elsevier, 2015. v. 5, p. 701-751.

GOERTZ, G.; MAHONEY, J. **A Tale of two cultures qualitative and quantitative research in the social sciences**. Princeton: Princeton University Press, 2012.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. Hoboken: Pearson/Prentice Hall, 2008.

GRIMM, V. *et al.* A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. **Ecological modelling**, v. 198, n. 1-2, p. 115-126, Sept. 2006.

GRIMM, V. *et al.* The ODD protocol: a review and first update. **Ecological modelling**, v. 221, n. 23, p. 2.760-2.768, Nov. 2010.

GRIMM, V. *et al.* Towards better modelling and decision support: documenting model development, testing, and analysis using Trace. **Ecological modelling**, v. 280, p. 129-139, May 2014.

GRIMM, V. *et al.* The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: a second update to improve clarity, replication, and structural realism. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 23, n. 2, 2020.

GRIMM, V.; RAILSBACK, S. F. Designing, formulating, and communicating agent-based models. In: HEPPENSTALL, A. *et al.* **Agent-based models of geographical systems**. Gewerbesrasse: Springer, 2012. p. 361-377.

GROOM, B.; MADDISON PR., D. New Estimates of the Elasticity of Marginal Utility for the UK. **Environmental and Resource Economics**, v. 72, n. 4, p. 1.155-1.182, Apr. 2019.

HALDANE, A. G.; TURREL, A. E. An interdisciplinary model for macroeconomics. **Oxford Review of Economic Policy**, v. 34, n. 1-2, p. 219-251, 2018.

HAMILL, L.; GILBERT, N. **Agent-Based modelling in economics**. Hoboken: Wiley, 2016.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **Elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction**. 2nd ed. New York: Springer, 2009.

HELBING, D. **Social self-organization: agent-based simulations and experiments to study emergent social behavior**. New York: Springer, 2012.

HEPPENSTALL, A. J. *et al.* **Agent-based models of geographical systems**. Gewerbesrasse: Springer, 2012.

INGHAM-DEMPSTER, T.; WALKER, D. C.; CORFE, B. M. An agent-based model of anoikis in the colon crypt displays novel emergent behaviour consistent with biological observations. **Royal Society Open Science**, v. 4, n. 4, 2017.

JAMES, G. *et al.* **An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R**. New York: Springer, 2015.

KYDLAND, F. E.; PRESCOTT, E. C. Time to Build and Aggregate Fluctuations. **Econometrica**, v. 50, n. 6, p. 1.345-1.370, 1982.

_____. The computational experiment: an econometric tool. **Journal of Economic Perspectives**, v. 10, n. 1, p. 69-85, Mar. 1996.

LASSANCE, A. **O “making of” de uma grande política pública: estratégia, planejamento e apoio à decisão na construção do Plano Marshall**. Brasília: Ipea, 2021. No prelo.

LENGNICK, M. Agent-based macroeconomics: A baseline model. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 86, p. 102-120, 2013.

- LUKE, D. A. *et al.* Tobacco Town: computational modeling of policy options to reduce tobacco retailer density. **American Journal of Public Health**, v. 107, n. 5, p. 740-746, Apr. 2017.
- MARICATO, E. Brasil 2000: qual planejamento urbano. **Cadernos IPPUR**, v. 11, n. 1-2, p. 113-130, 1997.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- MUELLER, B. Sistemas complexos em políticas públicas no Brasil. In: FURTA-DO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLI, M. H. **Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas**. Brasília: Ipea, 2015. p. 291-308.
- NEUSTADT, R. E.; MAY, E. R. **Thinking in time: the uses of history for decision-makers**. New York: Free Press, 1986.
- NEWMAN, M. **Networks: an introduction**. Oxford: Oxford University Press, 2010.
- NEWMAN, M.; BARABÁSI, A.-L.; WATTS, D. J. **The Structure and Dynamics of Networks**. 1st ed. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- NYE, J. S. Soft power. **Foreign policy**, n. 80, p. 153-171, 1990.
- OUSSOUS, A. *et al.* Big data technologies: a survey. **Journal of King Saud University: computer and information sciences**, v. 30, n. 4, p. 431-448, Oct. 2018.
- PAGE, S. E. **The model thinker: what you need to know to make data work for you**. New York: Basic Books, 2018.
- PEARL, J.; GLYMOUR, M.; JEWELL, N. P. **Causal inference in statistics: a primer**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- ROBINS, J. M.; HERNAN, M. A.; BRUMBACK, B. Marginal structural models and causal inference in epidemiology. **Epidemiology**, v. 11, n. 5, p. 550-560, 2000.
- SAGHAI, Y. Salvaging the concept of nudge. **Journal of medical ethics**, v. 39, n. 8, p. 487-493, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/3GMBUBw>>.
- SASAKI, Y.; BOX, P. Agent-Based Verification of Von Thünen's Location Theory. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 6, n. 2, Mar. 2003.
- SCOTT, N. *et al.* SimDrink: an agent-based netlogo model of young, heavy drinkers for conducting alcohol policy experiments. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 19, n. 1, p. 10, 2016.
- SEPPECHER, P. Flexibility of wages and macroeconomic instability in an agent-based computational model with endogenous money. **Macroeconomic Dynamics**, v. 16, n. S2, p. 284-297, 2012.

SILVIA, C.; KRAUSE, R. M. Assessing the impact of policy interventions on the adoption of plug-in electric vehicles: An agent-based model. **Energy Policy**, v. 96, p. 105-118, Sept. 2016.

SIMON, H. A. Theories of decision-making in economics and behavioral science. **The American economic review**, v. 49, n. 3, p. 253-283, 1959.

STUDENT, J.; AMELUNG, B.; LAMERS, M. Towards a tipping point? Exploring the capacity to self-regulate Antarctic tourism using agent-based modelling. **Journal of Sustainable Tourism**, v. 24, n. 3, p. 412-429, Mar. 2016.

TAN, P.-N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. **Introduction to data mining**. Boston: Addison-Wesley, 2006.

TERNA, P. From complexity to agents and their models. *In*: MORINI, M. *et al.* **Agent-based models for the economy: from theories to applications**. London: Palgrave MacMillan, 2015. p. 10-30.

TESSONE, C. A natureza complexa dos sistemas sociais. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLI, M. H. **Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas**. Brasília: Ipea, 2015. p. 157-186.

VAN DAM, K. H.; NIKOLIC, I.; LUKSZO, Z. **Agent-based modelling of socio-technical systems**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. v. 9

VAN DER VEEN, R. A. C.; KISJES, K. H.; NIKOLIC, I. Exploring policy impacts for servicing in product-based markets: A generic agent-based model. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 1-13, Mar. 2017.

WADDELL, P. UrbanSim: modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. **Journal of the American Planning Association**, v. 68, n. 3, p. 297-314, 2002.

WADDELL, P. *et al.* Modeling interdependence in household residence and workplace choices. **Transportation Research Record**, v. 2003, n. 1, p. 84-92, 2007.

WADDELL, P. Integrated land use and transportation planning and modelling: addressing challenges in research and practice. **Transport Reviews**, v. 31, n. 2, p. 209-229, 2011.

WADDELL, P.; WANG, L.; CHARLTON, B. **Integration of a parcel-level land use model and an activity-based travel model**. *In*: WORLD CONFERENCE ON TRANSPORT RESEARCH, 11., 2007, Berkeley, California. **Anais...** Berkeley: TRID, 2007.

WADDELL, P.; WANG, L.; LIU, X. UrbanSim: an evolving planning support system for evolving communities. *In*: BRAIL, R. K. **Planning support systems for cities and regions**. Cambridge: Lincoln Institute for Land Policy, 2008. p. 103-138.

WILENSKY, U.; RAND, W. **An introduction to Agent-Based Modeling**. Cambridge: The MIT Press, 2015.

WILSON III, E. J. Hard power, soft power, smart power. **The annals of the American Academy of Political and Social Science**, v. 616, n. 1, p. 110-124, 2008.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory econometrics: a modern approach**. 2nd ed. Mason: South Western Educational Publishing, 2003.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

NICOLESCU, B. **Transdisciplinarity: theory and practice**. New York: Hampton Press, 2008.