

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS**

JULIANA FIGUEIRA FREITAS

**MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NAS CIÊNCIAS SOCIAIS E RELAÇÕES
INTERNACIONAIS**

Porto Alegre

2016

JULIANA FIGUEIRA FREITAS

**MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NAS CIÊNCIAS SOCIAIS E RELAÇÕES
INTERNACIONAIS**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Relações Internacionais da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Relações Internacionais.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Chaves Cepik.

Porto Alegre

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Figueira Freitas, Juliana
MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NAS CIÊNCIAS SOCIAIS E
RELAÇÕES INTERNACIONAIS / Juliana Figueira Freitas.
-- 2016.
62 f.

Orientador: Marco Aurélio Chaves Cepik.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade
de Ciências Econômicas, Curso de Relações
Internacionais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. simulação computacional. 2. modelagem baseada em
agentes. 3. Relações Internacionais. 4. Ciências
Sociais. I. Aurélio Chaves Cepik, Marco, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

JULIANA FIGUEIRA FREITAS

**MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NAS CIÊNCIAS SOCIAIS E RELAÇÕES
INTERNACIONAIS**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Relações Internacionais da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Relações Internacionais.

Aprovado em: Porto Alegre, 15 de dezembro de 2016.

Prof. Dr. Marco Aurélio Chaves Cepik – Orientador
UFRGS

Prof. Dr. Érico Esteves Duarte
UFRGS

Prof. Dr. José Miguel Quedi Martins
UFRGS

À Doralice Robaina e Eli Moraes (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

À República Federativa do Brasil, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos professores e técnicos administrativos, por proporcionarem um ensino público gratuito e de qualidade. Em especial, agradeço ao professor Marco Cepik, que tem contribuído para o meu crescimento pessoal desde os primeiros anos de faculdade, quando passei a atuar como bolsista no Centro de Estudos Internacionais sobre Governo (CEGOV), e que também me deu um apoio imensurável no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à sua equipe de pesquisa pelos comentários e revisões.

Aos colegas do CEGOV – em especial ao Celente – que dividem comigo desde 2013 muito mais que a rotina de trabalho, mas momentos de descontração e experiências de vida valiosas. Este trabalho não seria possível sem o apoio e compreensão de vocês.

Aos colegas de apartamento – Karina, Rafa, Carol Scherer, Carol Ascal, Laisa e Camila –, que me acolheram e apoiaram na transição que é aprender a viver longe da família. Ficam marcadas as lições sobre administração financeira da vida e sobre viver em coletividade, cuidando e respeitando o outro.

Agradeço aos meus pais, Isabel e Giovani, e ao meu irmão, Junior, cujas instruções e apoio emocional e financeiro foram indispensáveis na minha caminhada.

Por fim, agradeço à Karla por tudo o que a palavra é insuficiente em expressar.

For every complex problem, there is a solution that is simple, neat and wrong.

H. L. Mencken

Einstein had, for the first time connected new and measurable consequences to statistical physics. That might sound like a largely technical achievement, but on the contrary, it represented the triumph of a great principle: that much of the order we perceive in nature belies an invisible underlying disorder and hence can be understood only through the rules of randomness.

Leonard Mlodinow

RESUMO

A pergunta de pesquisa desta monografia é a seguinte: como a Modelagem Baseada em Agentes (ABM) tem sido aplicada na investigação de problemas no campo de estudo das Ciências Sociais e Relações Internacionais? Trabalha-se com duas hipóteses: primeira indica que a aplicação de ABMs aos campos de estudo selecionados é caracterizada pela multiplicidade de técnicas de modelagem, pela imprecisão quanto à comunicação de premissas e modelo lógico da simulação, bem como da documentação desta; segunda, por sua vez, indica que, nesses campos de estudo, utilizam-se ABMs predominantemente generativos. O objetivo deste trabalho é fornecer um guia de referências bibliográficas e de procedimentos, viabilizando o conhecimento e condução de aplicações. Esta produção justifica-se pela necessidade de apresentar esta abordagem aos acadêmicos brasileiros, tendo em vista a crescente utilização de computadores e tecnologias da informação na pesquisa social. No primeiro capítulo, é fornecida uma visão geral de conceitos e tipos de simulação computacional. No segundo, passa-se ao objeto do trabalho, no qual são apresentados os elementos de um ABM e alguns exemplos de aplicação. No terceiro capítulo, são recomendadas estratégias e plataformas para modelagem. Conclui-se com uma análise acerca da bibliografia utilizada, destacando limitantes e apontando sugestões para a consolidação da abordagem enquanto ferramenta de pesquisa nos campos de estudos das Ciências Sociais e Relações Internacionais.

Palavras-chave: simulação computacional; modelagem baseada em agentes; Relações Internacionais; Ciências Sociais.

ABSTRACT

The research's main question is: how has Agent-Based Modelling (ABM) been applied in the investigation of research questions on the field of Social Sciences and International Relations? The first hypothesis specifies that ABM application to the selected research fields is characterized by the multiplicity of modelling techniques, by the nebulous communication of assumptions and logic model, and by the scarce documentation. The second hypothesis is that ABM has been primarily used for the generative purpose. The main objective is to offer a reference and applications guide to newcomers. The justification for this work lies on the presentation of this approach to Brazilian academics, due to the increasing use of computers and information technologies in the social research. The first chapter offers a holistic vision about concepts and computer simulation types. The second presents ABM's main elements alongside with some application examples. The third, modelling strategies and platforms are presented. In closing remarks, the literature is revised in order to point out thresholds. Besides that, suggestions are made towards consolidation of the approach as a Social Sciences and International Relations research tool.

Keywords: computer simulation, agent-based model; International Relations; Social Sciences.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Intersecções de áreas que formam ABSS.....	27
Figura 2 – Operacionalização de um ABM.....	30
Figura 3 – Sugarscape: representação anterior à execução da simulação	32
Figura 4 – Sugarscape: representação após a execução da simulação	32
Figura 5 – Modelo de Segregação: representação anterior à execução da simulação	33
Figura 6 – Modelo de Segregação: representação após a execução da simulação	34
Figura 7 – Geosim: processo de consolidação estatal	35
Figura 8 – Interface Gráfica NetLogo	43
Figura 9 - Interface Gráfica Swarm.....	44
Figura 10 - Interface Gráfica Repast	45
Figura 11 - Interface Gráfica MASON.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propósitos da Simulação.....	20
Quadro 2 – Variedades de Simulação	21
Quadro 3 – Simulações em Ciências Sociais.....	23
Quadro 4 – Simulações em Relações Internacionais.....	25
Quadro 5 – Comparação entre os Softwares	47

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABM	–	<i>Agent-Based Model</i> / Modelo Baseada em Agentes
ABS	–	<i>Agent-Based Simulation</i> / Simulação Baseada em Agentes
ABSS	–	<i>Agent-Based Social Simulation</i> / Simulação Social Baseada em Agentes
BDI	–	<i>Belief–Desire–Intention</i> / Crença-Desejo-Intenção
COOL	–	<i>Classroom Object Oriented Language</i>
CS	–	<i>Computer Simulation</i> / Simulação Computacional
CSS	–	<i>Computer Social Simulation</i> / Simulação Computacional Social
CT	–	<i>Complexity Theory</i> / Teoria da Complexidade
DAI	–	<i>Distributed Artificial Intelligence</i> / Inteligência Artificial Distribuída
DTA	–	<i>Defence Technology Agency</i> / Agência de Tecnologia de Defesa
GIS/SIG	–	<i>Geographical Information System</i> / Sistema de Informação Geográfica
GPU	–	<i>General Public License</i> / Licença Geral Pública
IDE	–	<i>Integrated Development Environment</i> / Ambiente de Desenvolvimento Integrado
MANA	–	<i>Map Aware Non-uniform Automata</i>
MASON	–	<i>Multi-Agent Simulator of Neighborhoods</i>
JASSS		<i>Journal of Artificial Societies and Social Simulation</i> / Revista de Sociedades Artificiais e Simulação Social
Repast	–	<i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i>
UML	–	<i>Unified Modeling Language</i> / Linguagem de Modelagem Unificada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	19
2.1	Ciências Sociais	22
2.2	Relações Internacionais.....	23
3	MODELAGEM BASEADA EM AGENTES.....	26
3.1	Ciências Sociais	31
3.2	Relações Internacionais.....	34
4	RECOMENDAÇÕES PARA USO DE ABM	37
4.1	Estratégias de Modelagem	38
4.1.1	Modelagem Orientada a Agentes.....	38
4.1.3	Modelagem Orientada a Organização.....	40
4.1.4	Modelagem Orientada ao Ambiente	40
4.2	Plataformas de Modelagem	42
4.2.1	NetLogo	43
4.2.2	Swarm	44
4.2.3	Recursive Porous Agent Simulation Toolkit (Repast).....	45
4.2.4	MASON (Multi-Agent Simulator of Neighborhoods).....	46
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – LISTA DE PLATAFORMAS PARA ABM	56
	ANEXO A – PROGRAMAÇÃO MODELO DE SEGREGAÇÃO (NETLOGO).....	58
	ANEXO B – PROGRAMAÇÃO MODELO SUGARSCAPE (NETLOGO).....	59

1 INTRODUÇÃO

A Terceira Revolução Industrial ou Revolução Científico-Tecnológica introduziu inovações no modo de produção e modelos de negócios, na maneira que o Estado promove políticas públicas e, entre outros aspectos, na maneira pela qual se conduzem pesquisas científicas (CEPIK e CANABARRO, 2014; GILBERT e TROITZSCH, 2005; MARTINS, 2008). Destaca-se, nesse contexto, o desenvolvimento de melhores técnicas para tratar problemas matematicamente, bem como a introdução de procedimentos que fazem uso da computação.

Nesta monografia, apresenta-se uma face dessas novas técnicas: o uso de Simulação Computacional (CS, no seu acrônimo em inglês, que significa *Computer Simulation*) nos campos de estudo das Ciências Sociais e Relações Internacionais. Ao analisar com maior detalhamento o próprio campo da computação, observa-se o incremento da capacidade de processamento de grandes quantidades de informações, aliada à possibilidade de armazená-las em dispositivos eletrônicos. Estes, por sua vez, têm a faculdade de interligar diferentes bancos de dados e formar canais de comunicação acessíveis via tais dispositivos (CANABARRO, 2014).

Isso é possível graças ao desenvolvimento da computação de grande porte (marcada pela utilização de transistores e circuitos integrados, computadores de alta capacidade de processamento e linguagens de programação lineares e estruturadas), aliado aos incrementos resultantes da Era Digital. Esta é marcada pela introdução da microcomputação, interface gráfica, Internet e linguagens de programação orientadas a objeto. A partir dessas inovações, foi viável, por exemplo, a aplicação da computação no processo de formulação, implementação e monitoramento e avaliação de políticas públicas (CEPIK e CANABARRO, 2014).

Na academia, esses avanços permitiram o aprimoramento de técnicas já utilizadas. Um exemplo desse impacto é a melhora do trato matemático, aliado ao incremento na capacidade de processamento dos computadores, permitindo que uma quantidade maior de cálculos possa ser realizada simultaneamente e em menos tempo (CANABARRO, 2014). Foram, assim, implementadas novas abordagens, como a Simulação Computacional, objeto deste trabalho. Pretende-se apresentar os principais conceitos utilizados, assim como a evolução e aplicações da abordagem de Simulação Computacional aos campos de estudo das Ciências Sociais e Relações Internacionais. Dá-se ênfase ao tipo específico de simulação chamado Modelagem Baseada em Agentes (ABM, da sigla em inglês *Agent-Based Model*).

A abordagem teórica que deu origem à ABM foi a Teoria da Complexidade (CT, no seu acrônimo em inglês *Complexity Theory*). Esta reúne conceitos provenientes das áreas de estudo das Ciências Biológicas, Computacionais e Sociais. Trata-se de uma abordagem transdisciplinar, que analisa objetos de estudo de comportamento dinâmico e não-linear, numerosas interações entre as partes e capacidade de aprender, evoluir e de se adaptar ao longo do tempo. Como resultado, é possível observar propriedades que emergem dessas interações (FURTADO, SAKOWSKI, e TÓVOLI, 2015). Ou seja, em vez de focar na estrutura, busca-se principalmente observar o processo e os resultados provenientes dele (CEDERMAN, 1997).

Maria Misoczky (2003, p. 8) apresenta a CT como um “[...]movimento transdisciplinar que tentaria restabelecer a unidade no estudo da natureza e dos seres humanos, que se teria perdido com a divisão compartimentada decorrente do cartesianismo.” Acrescentando que “por se manterem em uma situação entre ordem e desordem, esses sistemas só podem ser analisados por meio de simulações computacionais.” (MISOCZKY, 2003, p. 8).

A complexidade das relações entre o todo e as partes, o uno e o diverso é discutida por Morin (1999, p.261). Segundo ele,

"O todo é mais que a soma das partes (princípio bem explícito e, aliás, intuitivamente reconhecido em todos os níveis macroscópicos), visto que em seu nível surgem não só uma macrounidade, mas também emergências, que são qualidades/propriedades novas. O todo é menos do que a soma das partes (porque elas, sob o efeito das coações resultantes da organização do todo, perdem ou vêem inibirem-se algumas das suas qualidades ou propriedades). O todo é mais do que o todo, porque o todo enquanto todo retroage sobre as partes, que, por sua vez, retroagem sobre o todo (por outras palavras, o todo é mais do que uma realidade global, é um dinamismo organizacional."

Pode-se analisar o sistema internacional como um exemplo de sistema complexo, em que a anarquia global é um dos resultantes da interação entre os agentes, que são os Estados nacionais, os quais competem pela obtenção de poder e garantia de segurança. Tanto regularidades quanto irregularidades podem ser resultado da localização geográfica e da estrutura dos componentes do sistema. Além disso, o sistema internacional também pode ser visto como uma rede complexa, em que os Estados possuem memória, ou seja, o seu comportamento é influenciado pelo passado e condicionado pelo presente (PARAVANTIS, 2015; PEPINSKI, 2005).

Cabe mencionar que, a partir de uma perspectiva histórica, entre as décadas de 1930 e 1950 matemáticos e físicos, entre outros cientistas, construíram uma forte argumentação contra o paradigma iluminista. Este tinha como premissas a crença na racionalidade e em uma ordem

física fundamental. Utilizavam-se padrões lineares para demonstrar elevados níveis de ordem e previsibilidade. Defendia-se que todos os fenômenos físicos se transformariam de maneira gradual e seguindo trajetórias previsíveis (KAVALSKI, 2007).

A Era Industrial, que veio logo depois, parecia confirmar a habilidade humana para não apenas compreender, mas também para manipular e controlar a natureza. Nesse contexto, o paradigma da racionalidade instrumental¹ se tornou bastante utilizado, sobrepondo-se a outras abordagens. No entanto, durante o século XX, o desenvolvimento da Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica expandiu os horizontes da época, marcados pelo paradigma Iluminista.

Essas inovações analíticas demonstraram que, enquanto alguns fenômenos são previsíveis, outros são probabilísticos (GEYER, 2003). Esse pensamento chega às Ciências Sociais, questionando a ideia de controle e manipulação da natureza. Ressalta-se, então a existência de fluxos não-lineares e produção de resultados não determinísticos. Começou-se a aplicar a Teoria da Complexidade nas Ciências Sociais logo em seguida a sua origem nas ciências exatas (KAVALSKI, 2007). Um exemplo emblemático foi o modelo criado pelo economista Thomas Schelling (1971)² para simular a segregação racial nos Estados Unidos.

Nas Relações Internacionais, somente após a Guerra Fria observaram-se as primeiras aplicações. Kavalski (2007) aponta a emergência de um quinto debate nas Relações Internacionais. Este, seria consequência do emprego da teoria da complexidade a esta área de estudo. O autor critica os padrões de causalidade lineares que permeiam as abordagens teóricas de maior hegemonia nas RIs, creditando a isso à baixa capacidade preditiva dessas teorias. O autor chama atenção para aplicações da complexidade nas RI, indicando a formação do que chama Relações Internacionais Complexas (*Complex International Relations*)³.

De maneira contrária, Paravantis (2015) defende que o emprego da teoria da complexidade não pode ser entendido como um novo paradigma nas Relações Internacionais. Na sua visão, a teoria da complexidade não desafia ou tenta modificar (ou até mesmo suprimir) as teorias já utilizadas neste campo de estudos – como o realismo, o construtivismo ou o idealismo. Outrossim, a abordagem teórica da complexidade pode ser bastante útil como ferramenta para proporcionar um melhor entendimento de fenômenos conhecidos no campo.

Após essa breve exposição do conceito e origens da Complexidade, passaremos a uma das formas de utilização dessa abordagem: a simulação computacional. Neste trabalho, entende-

¹ Ideia de que a ciência deixa de ser apenas uma maneira de acessar a realidade, para tornar-se uma forma de dominar e explorar a natureza.

² O modelo será retomado na seção 3.1 deste trabalho.

³ Para uma exposição mais detalhada, sugerem-se as seguintes bibliografias para mais sobre o assunto: BEYERCHEN, 1997; CÍNDEA, 2011; GEYER, 2003; SIMON, 1962.

se Simulação como metodologias de criação de representações artificiais do mundo real, com o propósito de entender, manipular e/ou explorar as propriedades desse sistema (PEPINSKI, 2005). A ABM, por sua vez, é um tipo de simulação que foca nos *agentes* e nas propriedades que emergem de suas interações em um ambiente. Nesse sentido, devem-se definir atributos a respeito do comportamento dos agentes e regras para a interação em um ambiente, o qual também é especificado segundo os parâmetros julgados adequados pelo pesquisador. O principal resultado dessa metodologia é a observação de propriedades emergentes da interação dos agentes, diferente de outras metodologias, que buscam identificar relações causais (HEATH, HILL e CIARALLO, 2009).

A ABM teve como ponto de partida simulações de abordagem mais clássica e tradicional. Essa metodologia começou a ganhar popularidade em meados dos anos 1990, e hoje não ainda não é possível dizer que a ABM está consolidada enquanto prática de pesquisa. Bankes (2002) argumenta que o entusiasmo com que a ABM é recebida se deve mais à promessa dos resultados a serem obtidos a partir da sua utilização e aprimoramento do que ao que já foi alcançado por essa metodologia.

Em linhas gerais, procura-se, com este trabalho, responder à seguinte pergunta de pesquisa: como a modelagem baseada em agentes tem sido aplicada nos campos de estudo das Ciências Sociais e Relações Internacionais? Trabalha-se com duas hipóteses. A primeira hipótese indica que a aplicação de ABMs aos campos de estudo selecionados é caracterizada pela multiplicidade de técnicas de modelagem, pela imprecisão quanto à publicação de premissas e modelo lógico da simulação, bem como da documentação desta. A segunda, por sua vez, indica que, nesses campos de estudo, utilizam-se ABMs predominantemente generativos.

O objetivo geral está em conhecer e apresentar o estado da arte do conhecimento produzido sobre simulação computacional, dando ênfase ao que foi publicado sobre ABM no campo de estudo das Ciências Sociais e Relações Internacionais. Como objetivos específicos, pretende-se retratar a inserção e desenvolvimento da modelagem nos campos de estudo selecionados, apresentar de maneira mais detalhada aplicações da metodologia estudada, destacar os desafios que emergem desses corpos de literatura, oferecer ao leitor um guia introdutório sobre os procedimentos adotados na elaboração e validação de um Modelo Baseado em Agentes. Para responder à pergunta de pesquisa, serão seguidas as seguintes etapas:

- a) mapeamento da literatura sobre a epistemologia da simulação computacional e suas aplicações nas Ciências Sociais e nas Relações Internacionais;

- b) com base na revisão narrativa da literatura, apresentação dos principais tipos de modelos computacionais utilizados nas Ciências Sociais e Relações Internacionais, bem como exemplos de aplicações atuais;
- c) mapeamento da produção teórica sobre simulação baseada em agentes e sobre suas aplicações nas Ciências Sociais e Relações Internacionais;
- d) com base na revisão narrativa da literatura, exposição de introdução e evolução do uso de modelos baseados em agentes nas Ciências Sociais e Relações Internacionais;
- e) com base também na revisão narrativa da literatura, demonstração dos procedimentos adotados e plataformas utilizadas para projetar um modelo baseado em agentes;
- f) por fim, retomada do problema de pesquisa e da hipótese de trabalho, a fim de validá-la ou refutá-la, bem como indicação de motivos para o resultado encontrado.

Pretende-se produzir um estudo exploratório não exaustivo do tema, com as finalidades de adquirir conhecimento das metodologias de simulação computacional para produção de estudos futuros, bem como de apresentar ao leitor informações que lhe permitam ter uma visão geral sobre o objeto deste trabalho. Ademais, o entendimento dos conceitos-chave desta monografia poderá facilitar a leitura de pesquisas que fizerem uso de modelos computacionais, o que é de grande importância, tendo em vista a tendência de crescimento de estudos utilizando modelagem, bem como a necessidade de interlocução entre as diferentes áreas de estudo na Academia.

Desse modo, utilizou-se como metodologia o mapeamento e a revisão narrativa da literatura. Esta deve ser distinguida da revisão sistemática da literatura. Enquanto a primeira é utilizada na produção de “[...] publicações amplas, apropriadas para descrever e discutir o desenvolvimento ou o “estado da arte” de um determinado assunto, sob ponto de vista teórico ou contextual” (ROTHER, 2007, p. 7), a segunda consiste em “[...] uma revisão planejada para responder uma pergunta específica e que utiliza métodos explícitos e sistemáticos para identificar, selecionar e avaliar criticamente os estudos, e para coletar e analisar os dados destes estudos incluídos na revisão.” (CASTRO, 2006).

A produção desta monografia justifica-se pelo entendimento da relevância do tema e da necessidade de prover à academia brasileira um guia acerca das práticas de simulação computacional aplicadas às Ciências Sociais e Relações Internacionais. Observou-se a

existência de sociedades para o avanço da simulação computacional em todos os continentes, com exceção da América Latina. Assim, busca-se fornecer uma visão holística a respeito dos estudos que têm sido produzidos a partir dessa metodologia, bem como fornecer subsídios para leitores interessados em utilizar simulações computacionais para explorar problemas sociais. Além disso, buscou-se, no trabalho, escrever de maneira clara e de fácil entendimento para pessoas não familiarizadas com importantes conceitos da computação e metodologias quantitativas.

Estruturou-se o trabalho em três capítulos de desenvolvimento, somados a à introdução conclusão. No próximo capítulo, será retomada a definição de Simulação Computacional (CS, do acrônimo em inglês *Computer Simulation*) aplicada às Ciências Sociais e Relações Internacionais. Na sequência, serão expostos e conceituados os principais tipos de CS utilizados nos campos de estudo selecionados. A partir desse ponto, serão discutidos os pontos fortes e fracos dessa abordagem, e indicados trabalhos que se destacaram.

O terceiro capítulo segue uma estrutura parecida com a do capítulo anterior. Inicia-se pela discussão do conceito de modelagem, bem como apresentam-se algumas ideias centrais para o entendimento desta metodologia de pesquisa. Vale lembrar que a ABM é um tipo de CS, logo está um nível abaixo. Será exposto a seguir o que significa modelar e quais os elementos básicos que compõem um ABM. Será indicado como criar um modelo conceitual e operacional, envolvendo as etapas de desenho, implementação e análise de modelos. Por fim, será apresentado um exemplo de emprego de ABM em casa um dos campos de estudos selecionados para esta pesquisa.

Tem-se como objetivo no quarto capítulo oferecer um guia simplificado para utilização de ABM. Assim, serão apresentados no capítulo os principais recursos bibliográficos disponíveis sobre CS, indicadas estratégias de modelagem, bem como as principais plataformas para criação e execução de modelos.

Por fim, na conclusão, pretende-se retomar a pergunta norteadora do trabalho, a fim de avaliar se as hipóteses levantadas estão de acordo com os resultados encontrados na pesquisa. Dessa forma, será elaborado um panorama geral do que foi apresentado. A partir daí, serão indicados fatores que favorecem e fatores que retardam o desenvolvimento da Modelagem Baseada em Agentes.

2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Tem-se por finalidade, com este capítulo, fornecer uma visão holística sobre simulação como abordagem de pesquisa. Para alcançar tal objetivo, será retomada e aprofundada a definição de Simulação Computacional (*Computer Social Simulation, CSS*) aplicada às Ciências Sociais e Relações Internacionais. Em seguida, serão utilizados dois grandes eixos para classificar as abordagens de simulação: o primeiro apresenta uma sistematização considerando a finalidade do modelo; o segundo reúne algumas variedades de simulação – levando em consideração variáveis, tempo, ferramentas e etc. Por fim, serão indicadas algumas aplicações, que auxiliem na compreensão dos conceitos expostos e sejam representativas do estado da arte dessa abordagem. Conclui-se o capítulo com um breve balanço de vantagens e desvantagens dessa abordagem.

A técnica de imitar o comportamento de uma situação ou processo por meio da criação de uma situação análoga, com finalidade de estudar ou treinar pessoal é a definição de Simulação segundo o dicionário Houaiss da língua portuguesa. Acrescenta-se a esse conceito a definição utilizada por Pepisnki (2005), segundo a qual simulação consiste em uma metodologia de criação de representações artificiais do mundo real, com o propósito de entender, manipular e/ou explorar as propriedades desse sistema (PEPINSKI, 2005). Nenhuma dessas definições relaciona simulação diretamente com computadores, uma vez que é possível realizar estudos sem a utilização de dispositivos digitais.

De um ponto de vista mais técnico, uma simulação computacional é a reprodução de um programa. Chama-se esse programa de modelo. Este, por sua vez, consiste em uma série de equações e algoritmos programados para refletir a situação ou processo selecionado. Diz-se, então, que o pesquisador constrói um modelo que irá reproduzir uma simulação. Enquanto abordagem metodológica, destacam-se três propósitos básicos: (1) criar e testar teorias, (2) aumentar o entendimento do objeto de pesquisa e, conseqüentemente, o conhecimento teórico acerca deste e (3) auxiliar a prever comportamentos do sistema (HEATH, HILL, e CIARALLO, 2009; JACCARD e JACOBY, 2010). Essas categorias estão relacionadas também com o grau de conhecimento do sistema a ser simulado.

Quando este é bastante conhecido, pode-se utilizar a simulação com o propósito de obter resultados preditivos sobre o sistema. Quando este é moderadamente conhecido, o papel da simulação passa a ser o de mediar um melhor entendimento. Dessa forma, é possível utilizar o conhecimento teórico acerca do objeto, de maneira a operacionalizá-lo, melhorar o entendimento e até corrigir imprecisões e falhas. Nesse sentido, não é construído um modelo

que reflete especificamente o sistema real, mas produz-se um modelo capaz de melhorar o entendimento do sistema. Por fim, se o conhecimento do sistema for mais limitado, usa-se a simulação como ferramenta para gerar e testar hipóteses a respeito do seu funcionamento. A Tabela 1 demonstra a sistematização das simulações levando em consideração o seu propósito e conhecimento que se tem sobre um determinado sistema.

Quadro 1 - Propósitos da Simulação

<i>Tipo de Simulação</i>	<i>Grau de Conhecimento do Sistema</i>	<i>Resultado obtido</i>
Geradora	Limitado	Hipóteses
Mediadora	Moderado	Microscópio
Preditiva	Avançado	Calculadora

Fonte: elaborado pela autora, com base em (HEATH, HILL e CIARALLO, 2009)

Desenvolver um modelo requer uma reflexão acerca do sistema que está sendo emulado. É necessário conhecer a realidade que se pretende representar, determinar critérios que melhor a representam, bem como a maneira de operacionalizar as suas interações. Essa prática torna evidente inadequações que podem existir tanto no modo como o pesquisador enxerga o sistema a ser estudado quanto na teorização já elaborada sobre este. O resultado desse processo tende a ser a expansão e/ou aprimoramento das teorias existentes (JACCARD & JACOBY, 2010).

Nessa matéria, é válido fazer menção à crítica de Mearsheimer e Waltz (2013) à tendência generalizada entre os acadêmicos estadunidenses de produzir estudos apenas com testes de hipóteses. A situação identificada pelos autores está na seleção de variáveis dependentes e independentes – principalmente nas áreas de guerra, alianças, cooperação internacional, direitos humanos – e testes estatísticos e análise de covariância entre essas variáveis. Argumenta-se que “o teste simplista de hipóteses é um engano, de qualquer maneira, porque pouca atenção à teoria leva a modelos empíricos mal especificados ou a medidas equivocadas de conceitos-chave” (p. 427)⁴. Esse tipo de estudo se difere da criação de simulações, tendo em vista que é necessária uma reflexão sobre as partes e interações no sistema

⁴ No original: “[...] simplistic hypothesis testing is a mistake, however, because insufficient attention to theory leads to misspecified empirical models or misleading measures of key concepts.”

como um todo. Nesse processo de criação, como mencionado anteriormente, é expandido o conhecimento do sistema, havendo ganhos teóricos.

O segundo eixo de categorização proposto leva em consideração as variedades de modelos. Difere entre as categorias o tempo de execução da simulação, a quantidade de variáveis utilizadas, a natureza das interações e ênfases em determinado tipo de estrutura. O quadro abaixo sumariza os principais tipos de CSS (JACCARD e JACOBY, 2010).

Quadro 2 - Variedades de Simulação

<i>All Machine</i>	<i>Person-Machine</i>
Simula um processo, sistema, ou comportamento na ausência de qualquer participação direta de pessoas.	Envolve uma ou mais pessoas que participam do processo de simulação como parte integral deste.
<i>Descritiva</i>	<i>Analítica</i>
Enfatiza a estrutura física do sistema. A intenção é de desenhar o modelo da maneira mais fiel ao observado na realidade	Enfatiza o processo estudado. Procura reproduzir o processo de maneira mais parecida ao observado na realidade.
<i>Em tempo real / Tempo Comprimido</i>	<i>Em Tempo Expandido</i>
Nas simulações de tempo real, o processo estudado ocorre no mesmo tempo que ocorreria na realidade. Em tempo comprimido, o processo se desenvolveria em um tempo menor do que na realidade.	O processo ocorre em um tempo maior do que ocorreria na realidade, possibilitando uma observação mais detalhada do processo.
<i>Determinística</i>	<i>Não Determinística</i>
Nesse tipo de simulação, intende-se que o resultado obtido seja precisamente determinado pelos <i>inputs</i> .	O resultado obtido é formado pelos <i>inputs</i> iniciais e pelas chances de certos eventos ocorrerem no decorrer do processo.
<i>Free</i>	<i>Experimental</i>
Os eventos que ocorrem durante a simulação são influenciados (em parte ou inteiramente) pelo	Os participantes acreditam ter controle de suas ações. Dessa forma, a simulação experimental se

comportamento dos participantes, ainda que toda a informação que os participantes têm acesso seja programada pelo pesquisador.	assemelha a um experimento de laboratório, em que o observado não tem consciência de manipulação, e o pesquisador tem total controle.
<i>Macro Simulação</i>	<i>Micro simulação</i>
Trabalha-se com um grande sistema, bem como são selecionadas muitas variáveis.	Trabalha-se com um sistema menor, com a seleção de poucas variáveis.

Fonte: elaboração da autora, com base em JACCARD e JACOBY (2010).

Na próxima seção, buscar-se-á apresentar algumas aplicações de simulação computacional ao campo de estudo das Ciências Sociais. Com isso, forneceremos uma visão geral de como essa abordagem está sendo utilizada.

2.1 Ciências Sociais

As primeiras aplicações de simulações computacionais ocorreram nos campos de estudos da matemática e física, alcançando, posteriormente, outras disciplinas. Nas Ciências Sociais, observaram-se os primeiros empregos da abordagem a partir dos anos 1960. Destacam-se os pesquisadores Herbert A. Simon, Karl W. Deutsch, Harold Guetzkow, Robert Axelrod e Thomas C. Schelling. Pouco se falou em simulações sociais durante os anos 1980, em contraste ao campo das ciências naturais, que, durante esse período, integrou consistentemente a abordagem às práticas metodológicas tradicionais do campo. Apesar dos primeiros usos terem acontecido na década de 1960, somente na década de 1990 houve um considerável aumento de aplicações (GILBERT e TROITZSCH, 2009; SQUAZZONI e CASNICI, 2013).

Nessa década, Gilbert e Troitzsch (1999) publicaram o primeiro manual de simulação computacional para cientistas sociais e estabeleceram o periódico *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (JASSS, Periódico de Sociedades Artificiais e Simulação Social na tradução da autora)⁵, publicação de referência acerca do tema. A introdução da metodologia de modelagem baseada em agentes, tema do próximo capítulo, também influenciou na disseminação de simulações como abordagem metodológica (GILBERT, 2005). Abaixo, no Quadro 3, são indicadas algumas simulações computacionais aplicadas a Ciências Sociais.

⁵ Sítio eletrônico JASSS: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/>>. Outros periódicos importantes sobre simulação são o SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International (sítio eletrônico: <<http://sim.sagepub.com/>>); e o Social Science Computer Review (sítio eletrônico: <<http://ssc.sagepub.com/>>).

Quadro 3 - Simulações em Ciências Sociais

Título do Trabalho	Autores
Formal Theories of Mass Behavior	MCPHEE (1963)
A model for analyzing voting systems	MCPHEE e SMITH (1962)
The Limits to Growth	MEADOWS (1972)
Resolving Conflicts of Interest and Ideologies: a simulation of political decision-making	LOVE, ROZELLE e DRUCKMAN (1983)

Fonte: elaboração da autora (2016).

Tendo em vista que as dinâmicas neste campo de estudos apresentam semelhanças às encontradas nas Relações Internacionais, no sentido de as interações apresentarem caráter complexo e ocorrerem simultaneamente em diversos níveis, os benefícios decorrentes do uso de simulações computacionais como instrumento de pesquisa serão encontrados na próxima seção.

2.2 Relações Internacionais

As primeiras aplicações de simulação computacional ao campo de estudo das Relações Internacionais ocorreram também na década de 1960 e acompanharam o ritmo do campo de estudo das Ciências Sociais. O primeiro modelo computacional de Relações Internacionais de que se tem notícia foi criado pelo pesquisador e professor na Universidade de Oklahoma (Estados Unidos), Oliver Benson, em 1959. Consistia em uma tentativa de integrar indicadores – como agressividade, capacidade, geografia e alianças – a fim de prever situações de crise. O modelo era constituído por 25 Estados.

Nessas primeiras aplicações, os modelos eram programados utilizando linguagens orientadas a procedimentos⁶ e equações diferenciais ordinárias⁷. Esses modelos tiveram sucesso

⁶ Também conhecida como Programação Procedural, consiste em um paradigma de programação em que se especificam os passos que um programa deve seguir, a partir de conceito de chamadas a procedimentos (do inglês, *procedures call*). Esse conjunto de passos é seguido por um programa para alcançar determinado objetivo. Para mais, acessar https://pt.wikipedia.org/wiki/Programação_procedural.

⁷ Uma equação diferencial ordinária (EDO) envolve as derivadas de uma equação desconhecida de uma variável. O termo “ordinária” é usado em contraste com o termo “parcial”. O primeiro indica a existência de apenas uma variável independente; o segundo, de mais de uma.

ao representar conflitos assimétricos em um nível mais agregado, como a Guerra do Vietnam e a Guerra do Afeganistão (MILSTEIN e MITCHELL, 1969; STAHEL, 1985). Utilizava-se Dinâmica de Sistemas⁸ como abordagem, ou então trabalhava-se com um grande número de casos. Isso mudou quando da introdução da metodologia de modelagem baseada em agentes, a qual utiliza linguagens orientadas a objetos.

Muitas dinâmicas no sistema internacional apresentam comportamento complexo, contendo múltiplas causas e vários níveis de análise. Apesar da modelagem formal nas Relações Internacionais datar da década de 1950 (RICHARDSON, 1960), tem-se observado a simplificação demasiada, a fim de manter a tratabilidade matemática ou convergências na estimativa de parâmetros. Por esses motivos, a modelagem computacional pode ser uma capaz superar essas limitações ao permitir a representação de estruturas e processos complexos, sem grandes perdas analíticas. Em geral, a modelagem computacional envolve o desenvolvimento de uma teoria do processo estudado, expressão deste por meio de um programa de computador e a simulação do processo por meio da execução desse programa.

É ressaltado na literatura (HEATH, HILL e CIARALLO; SICHMAN, 2015; TABER e TIMPONE, 1996) a necessidade de avaliação tanto da validade do processo – correspondência entre mecanismos do modelo e do sistema no mundo real – quanto dos resultados. A validação do processo pode ser feita pela consideração sobre a plausibilidade da teorização utilizada, uma vez que não existem métodos claros para tal. Outrossim, pode-se variar sistematicamente os parâmetros utilizados e observar se as conclusões do modelo são modificadas: a sua operacionalização pode ser considerada robusta se as conclusões qualitativas básicas são relativamente insensíveis a essas mudanças. Por fim, é possível utilizar, combinado aos procedimentos mencionados anteriormente, a validação dos resultados obtidos. No quadro 4, são indicados trabalhos que utilizam simulações computacionais de diversos tipos exceto simulações baseadas em agentes, uma vez que esta abordagem será abordada de maneira mais detalhada nos próximos capítulos.

⁸ Abordagem de simulação que faz uso de um grande número sistemas de equações diferenciais para plotar as trajetórias das variáveis selecionadas ao longo do tempo.

Quadro 4 - Simulações em Relações Internacionais

Título do Trabalho	Autores
Risk, power distributions, and the likelihood of war	DE MESQUITA (1981)
System and State in International Politics: A Computer Simulation of Balancing in an Anarchic World	STOLL (1987)
Concurrent Interstate Conflict Simulations: testing the effects of the serial assumption	DUFFY (1992)
Quantifying and forecasting vulnerability to dyadic conflict in an integrated assessment model: Modeling International Relations Theory	MOYER (2012)
Modeling, Simulation, and Operations Analysis in Afghanistan and Iraq	CONNABLE et al (2014)

Fonte: elaborado pela autora (2016).

Como mencionado anteriormente, os primeiros exemplos de construção de modelos para simulação surgiram a partir dos anos 1960, coincidindo com a introdução de computadores para pesquisa em universidades. No entanto, somente no final dos anos 1990 a abordagem se tornou mais conhecida entre acadêmicos das Ciências Sociais. Por conseguinte, não se pode dizer que os últimos 25 anos foram suficientes para estabelecer e consolidar práticas comuns na utilização da abordagem (GILBERT, 2005).

Modelos computacionais tem o potencial de beneficiar o estudo de Relações Internacionais, por uma série de motivos. São uma maneira eficaz de superar o “problema dos números” (CUSACK & STOLL, 1990), na medida em que a representação de realidades que demandem a análise de um grande número de atores pode ser operacionalizada sem grandes perdas significados⁹. Por demandarem clareza teórica a respeito do sistema simulado, incentivam o pesquisador a adotar conceitos de maneira precisa e, por conseguinte, ajudam a promover o desenvolvimento teórico no campo. Fornecem expressiva versatilidade,

⁹ Para exemplo de simulação da dinâmica interestatal a nível global, ver: Linneman et all, (1979).

comparados a outras abordagens. Permitem, assim, a exploração de problemas de pesquisa pelo uso de contra factuais e teste de hipóteses (CUSACK e STOLL, 1990; TABER e TIMPONE, 1996). Essas vantagens aplicam-se, também, à modelagem baseada em agentes, assunto do próximo capítulo.

3 MODELAGEM BASEADA EM AGENTES

A modelagem baseada em agentes consiste em uma abordagem para simulação computacional que ganhou popularidade nos anos 1990. A abordagem tem sido utilizada em diversas disciplinas das ciências exatas, naturais e sociais. Neste capítulo, tem-se como objetivos apresentar os elementos básicos de um ABM – os agentes, as interações entre estes e o ambiente – e demonstrar como esses elementos são integrados na construção de um modelo, pela exemplificação de duas aplicações: o Modelo de Segregação Racial (SCHELLING, 1969) e a formação dos Estados pelo GeoSim (CEDERMAN, 2003).

Optou-se por destacar esta abordagem de simulação tendo em vista os avanços que ela apresenta em relação aos tipos de simulação mencionados no capítulo anterior. Destacam-se como vantagens os seguintes aspectos: não há restrição de desenho dos modelos; é possível trabalhar com populações ou espaços heterogêneos; é possível representar múltiplos níveis de abstração, indo de indivíduos a entidades coletivas. Além disso, essa abordagem permite que sejam construídos modelos de maneira mais intuitiva que as abordagens tradicionais (KLÜGL, 2016; SICHMAN, 2015).

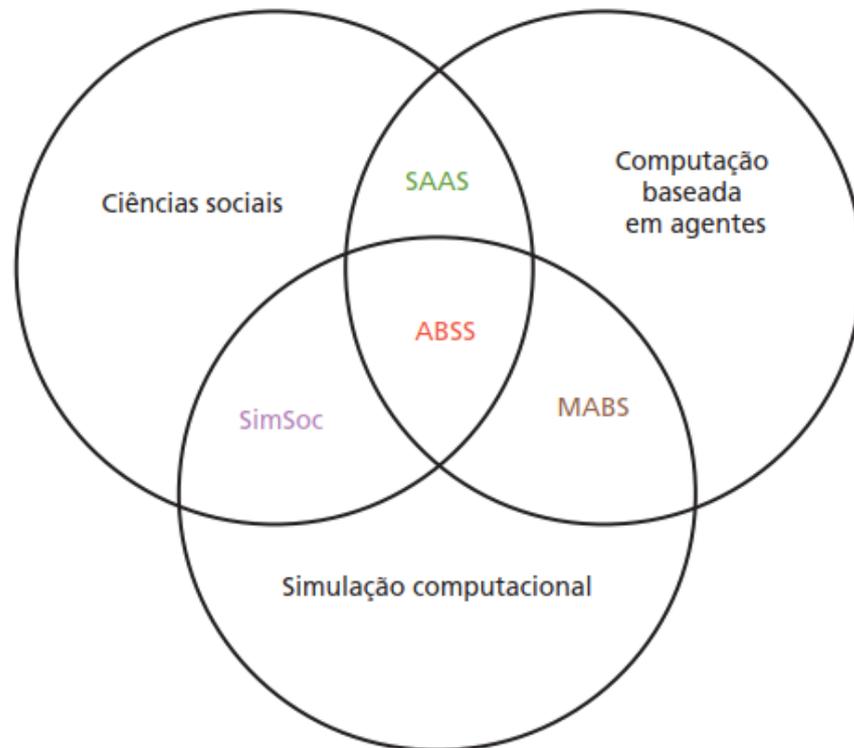
Como previamente mencionado, todo o modelo consiste em uma simplificação da realidade. A maior dificuldade ao modelar reside no primeiro passo: o momento de escolher que aspectos da realidade serão melhor representados na simulação em detrimento de outros (CUSACK e STOLL, 1990). Quanto mais particularidades deixadas de fora, maior o esforço conceitual necessário para gerar conclusões a partir do modelo e compará-las com aquelas observadas na realidade. A escolha de que representações privilegiar é uma questão de prática e conhecimento, mas também da linha teórica seguida e da disponibilidade de dados (BAGGIO, 2009; GILBERT e TERNA, 2000).

A ABM foi concebida a partir da mescla do conhecimento desenvolvido pelo campo de estudo em inteligência artificial distribuída¹⁰ (DAI, acrônimo do termo em inglês *distributed*

¹⁰ Inteligência artificial distribuída consiste em uma classe de sistemas que permite que agentes autônomos realizem tarefas por meio de processamento local e comunicação inter processos. É usada para resolver problemas de aprendizagem, planejamento e tomada de decisão complexos. As vantagens ao distribuir o processamento de um problema são o ganho de poder computacional, a baixa de custo com hardware e maior tolerância a falhas (SHOHAM e LEYTON-BROWN, 2009)

artificial intelligence) e pela teoria de autômato celular¹¹. A partir da combinação dessas noções, foi possível desenvolver arquiteturas e plataformas para projetar e implementar agentes autônomos (GILBERT e TROITZSCH, 2005; SICHMAN, 2015). A mescla dos instrumentos teóricos desses dois campos às Ciências Sociais deu origem ao domínio de pesquisa nominado simulação social baseada em agentes (ABSS, do acrônimo em inglês *agent-based social simulation*), ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Intersecções de áreas que formam ABSS



Fonte: SICHMAN (2015, p. 100) *apud* DAVIDSSON (2002)¹².

Ao executar uma ABSS, o pesquisador pode observar como resultado propriedades que emergirão da interação entre os agentes. Ou seja, trata-se de uma abordagem “de baixo para cima” (da expressão em inglês, *bottom up*), uma vez que as propriedades observadas no sistema como um todo são resultado das interações entre os seus componentes (FURTADO,

¹¹ Autômatos celular é um modelo discreto, que consiste em uma grelha formada por células regularmente distribuídas e classificadas em um dos diferentes estados possíveis. Os estados possíveis são determinados pelo pesquisador e a transição entre um e outro estado ocorre de acordo com regras pré-estabelecidas, estando relacionadas com o estado da célula imediatamente próxima (GILBERT e TROITZSCH, 2005).

¹² DAVIDSSON, Paul. Agent based social simulation: A computer science view. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, Surrey, v. 5, n. 1, 2002. Disponível em: < <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>>. Acesso em: 23. nov. 2016.

SAKOWSKI e TOVOLLI, 2013). Esses elementos serão conceituados nos próximos parágrafos, utilizando como referência bibliográfica a autora Franziska Klügl (2016).

O primeiro elemento-chave de um ABM é o Agente. Esse termo é entendido de maneira diversa entre pesquisadores, não havendo uma definição clara e unânime. Tendo isso em mente, é válido utilizar o trabalho de Franklin e Graesser (1997), que escreveram uma definição após considerar os diversos empregos do termo. Os autores condensaram as atribuições dadas a agentes ao seguinte conceito: “um agente autônomo é um sistema situado no interior de um ambiente, que percebe esse ambiente e age sobre ele, ao decorrer do tempo, perseguindo sua própria agenda e, assim, interferindo sobre o presente e o que presume que será o futuro” (FRANKLIN e GRAESSER, 1997 *apud* KLÜGL, 2016, p. 20, tradução da autora)¹³.

Tal conceito pode ser melhor analisado a partir da especificação de suas propriedades, quais sejam: senso de localização, autonomia, pró-atividade, reatividade, racionalidade limitada, sociabilidade e descrição de alto nível. Um agente é uma entidade que está *localizada* em determinado ambiente e que percebe o que o cerca. O agente está separado do ambiente, mas interage com este. A interação ocorre por meio dos sensores que formam as interfaces dos agentes, captando informações acerca do ambiente. Estas serão utilizadas na tentativa de manipular o ambiente. Percepção e ação também podem consistir em receber e enviar mensagens em alguma linguagem de comunicação para e a partir de outros agentes.

Um agente é uma entidade capaz de executar ações para alcançar seus objetivos, ou seja, ele determina suas próximas ações sem a influência direta externa. Ainda assim, a *autonomia* é uma noção multifacetada: há casos em que o agente tem autonomia para determinar completamente o seu comportamento e há casos em que a capacidade de agir sobre o ambiente é suficiente para determinar autonomia do agente¹⁴. Espera-se que o agente tome iniciativas que o ajudem a alcançar seus objetivos, o que se entende por *pro-atividade*. *Reatividade*, por sua vez, é conceito essencial para garantia da sobrevivência do agente, de maneira que este adapte o seu comportamento em reação a mudanças do ambiente. O grau de racionalidade de um agente vai depender do sistema que se está modelando. Tendo isso em vista, o conceito de *racionalidade limitada* significa que a racionalidade do agente está limitada pela estrutura de suas experiências e capacidades, que podem estar restritas à sua percepção e ação locais. A

¹³ No original: “An autonomous agent is a system situated within and a part of an environment that senses that environment and acts on it, over time, in pursuit of its own agenda and so as to effect what it senses in the future.”

¹⁴ A primeira noção é derivada da Inteligência Artificial, enquanto a última é determinada pela robótica. Alguns pesquisadores defendem que a autonomia do agente precisa estar amparada por habilidade de aprender, enquanto outros defende ser suficiente a capacidade de agir sobre o ambiente se a intervenção humana (FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. Is it an agent, or just a program? a taxonomy for autonomous agents. In: JENNINGS, N; WOOLDRIDGE, M. **Intelligent Agents, volume III. Springer**. 1193. p. 21–36).

capacidade de interagir com outros agentes é denominada *sociabilidade*. Autonomia e orientação a objetivos são pré-requisitos para uma *descrição de alto nível* do comportamento do agente, baseada em objetivos. Esse último elemento não é essencial para tecnologia de agentes *mainstream*, mas indica que existe proposições de arquitetura que podem ser usadas no contexto de ABM.

O segundo elemento-chave é o ambiente. Este consiste em tudo o que compõe o ABM e que não é o agente. No ambiente, podem ser encontrados os seguintes componentes: mediadores ou facilitadores, que dão suporte à infraestrutura ao fornecer serviços como encontrar e identificar outros agentes; infraestrutura; entidades facilitadoras e recursos como fontes de informação, bancos de dados, provedores de serviço, etc.

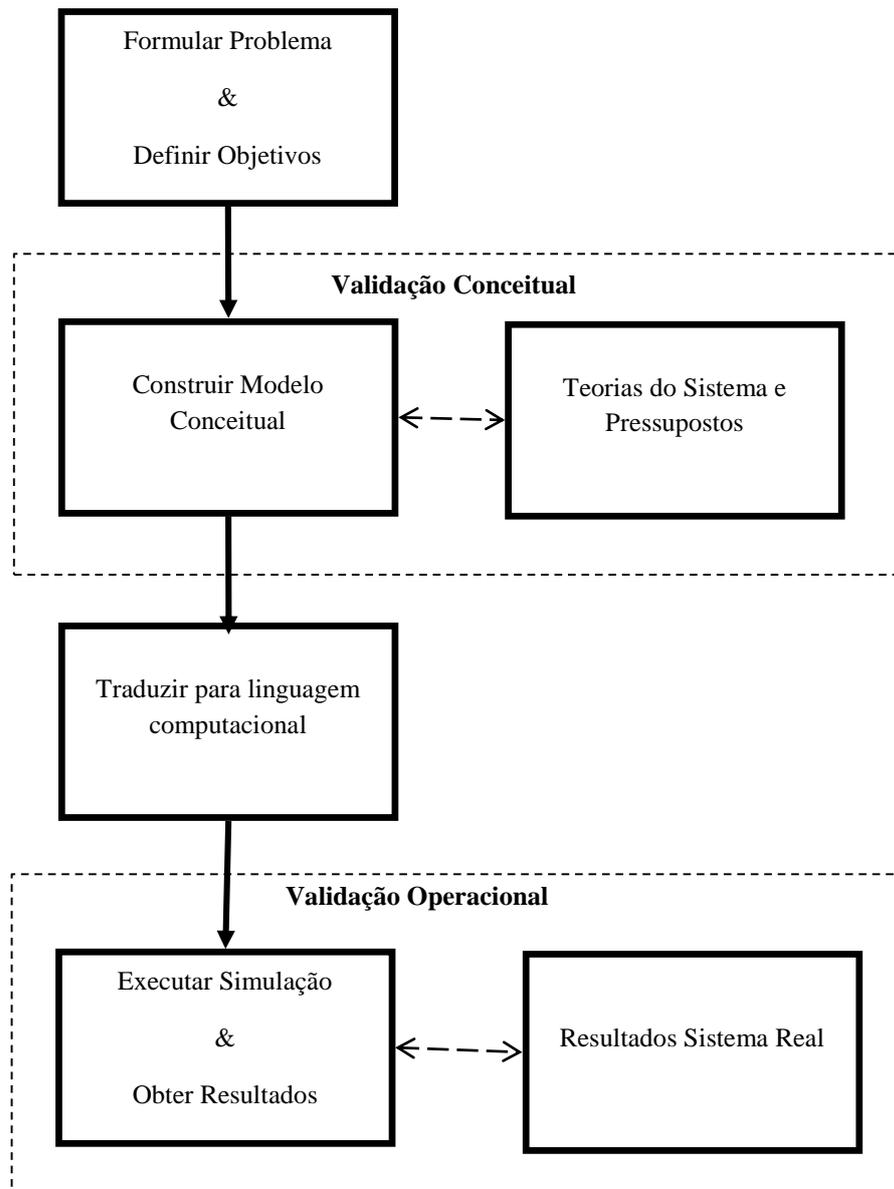
Por fim, o terceiro elemento-chave são as interações. Estas são consideradas como aspecto central dos ABMs. Elas podem assumir diferentes formas, distinguidas por: frequência, persistência, nível, variabilidade e objetivos. Abstrações organizacionais desempenham um papel importante no desenvolvimento de ABMs. Introduzir uma organização estruturada auxilia no desenho do modelo, na medida em que restringe e estrutura possibilidades de interação entre agentes.

A operacionalização de um ABM pode ser orientada por diferentes estratégias, algumas destas serão apresentadas no próximo capítulo. De maneira geral, antes de adotar uma estratégia específica, existem alguns passos que podem guiar o projeto de um modelo. Sichman (2015) e Heath, Hill e Ciarallo (2009) indicam etapas para construir e executar uma simulação baseada em agentes (ABS, do acrônimo em inglês *agent-based simulation*):

- a) coleta de dados no mundo real;
- b) formulação do problema e dos objetivos da simulação;
- c) desenvolvimento de um modelo de agente e um de simulação conduzidos por uma teoria subjacente e por dados empíricos coletados;
- d) validação conceitual do modelo;
- e) definição de parâmetros iniciais, com base em pesquisas;
- f) implementação da simulação e geração de resultados;
- g) validação do modelo de simulação pela comparação dos resultados com os dados coletados, que devem ser necessariamente diferentes daqueles usados para construir o modelo.

A Figura 2 sistematiza esses passos, destacando dois momentos de validação¹⁵ do modelo. A validação conceitual ocorre depois de realizados dos três primeiros passos e testa o modelo lógico da simulação (AXELROD, 1997). Um modelo conceitual falho indica que a representação que se pretende fazer da realidade está inexata. Já a validação operacional faz uma comparação entre os resultados obtidos ao final da execução da simulação e os dados obtidos no primeiro passo da construção do modelo.

Figura 2 – Operacionalização de um ABM



Fonte: adaptado de HEATH, HILL e CIARALLO (2009).

¹⁵ Os métodos de validação de ABMs são muitos, para um estudo aprofundado, ver: BALCI, 1998; KLÜGL, 2016; ORMEROD e ROSEWELL, 2009; SARGENT, 2005; SICHMAN, 2015.

Entende-se que os conceitos os passos para operacionalização expostos possuem um alto nível de abstração. Tendo em vista o propósito de tornar possível a assimilação desses conceitos, nas próximas seções serão indicados alguns modelos consolidados e reconhecidos nas Ciências Sociais e nas Relações Internacionais. Ademais, no intuito de fornecer subsídios para responder à pergunta de pesquisa, serão ressaltados aspectos encontrados na literatura acerca do uso de ABMs nesses dois campos de pesquisa.

3.1 CIÊNCIAS SOCIAIS

Nos últimos vinte e cinco anos, modelos baseados em agentes têm encontrado maior aceitação enquanto ferramenta de pesquisa aplicável aos problemas analisados pelo cientista social (PEPINSKI, 2005; ŠALAMON, 2011). Originalmente, ainda que se tenha notícia de algumas aplicações desenvolvidas já na década de 1960 – como o modelo de Thomas Schelling, apresentado nos próximos parágrafos –, coincidindo com o uso do computador para pesquisas nas universidades estadunidenses e europeias, somente na década de 1990 a abordagem de ABM tornou-se mais difundida. Diferentemente, a ABM foi recebida com entusiasmo pelo campo das ciências da natureza, em que teve significativos desenvolvimentos e atualmente é uma ferramenta metodológica tradicional (GILBERT e TROITZSCH, 2005; KLÜGL e BAZZAN, 2012).

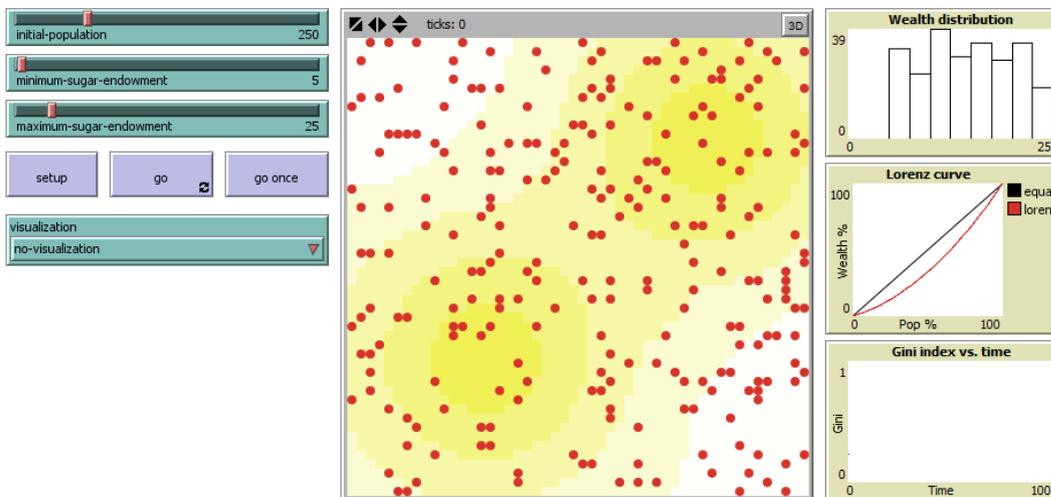
Na década de 1990 foram lançadas e disponibilizadas gratuitamente plataformas para o desenvolvimento de ABMs como o NetLogo e o Swarm (GILBERT e TROITZSCH, 2005)¹⁶. Com essas aplicações, a modelagem tornou-se mais acessível. Ainda assim, é importante mencionar e a operacionalização de um modelo computacional, ou seja: traduzir o modelo conceitual de determinado sistema da realidade para algoritmos e equações requer um grande conhecimento multidisciplinar¹⁷. Nesse período, Joshua Epstein e Robert Axtell (1996) produziram o *Sugarscape*, um ABM de grande escopo que busca representar uma sociedade artificial. No modelo, o ambiente consiste em uma grelha de células, às quais são distribuídas diferentes quantidades de açúcar. Os agentes são dotados de visão (o alcance da visão ao procurar por açúcar), metabolismo (consumo de açúcar), além de outros atributos codificados no seu código genético artificial. Esses agentes possuem regras locais para decisão acerca do movimento, do comportamento de comércio, combate, e outros tipos de interação com o ambiente. Ao se movimentar em busca de energia, os agentes gastam o açúcar que possuem a

¹⁶ Ambas as aplicações serão apresentadas nas seções 4.2.1 e 4.2.2 deste trabalho.

¹⁷ Observou-se que comumente os resultados de simulações são publicados em conjunto por autores de formação em Ciências Sociais e ciências da computação.

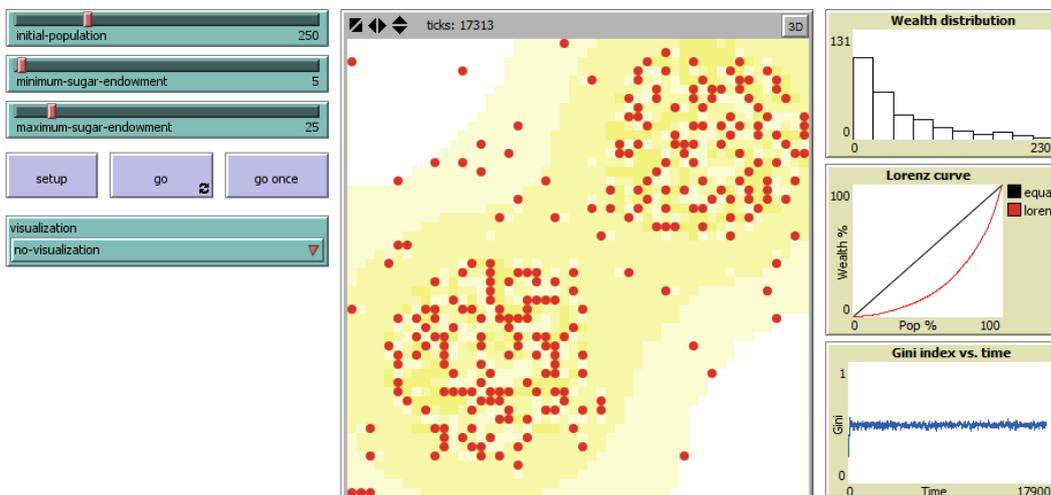
uma determinada taxa. Se todo o açúcar de um agente é consumido, este morre. Os agentes também se reproduzem e transmitem genes (EPSTEIN e AXTEL, 1996; KLÜGL, 2016). Com esse modelo os autores foram capazes de reproduzir fenômenos como distribuição de renda, segregação espacial, poluição causada por atividades econômicas (GILBERT e TROITZSCH, 2005). Na Figura 3 pode ser observado o momento de início da simulação, em que os parâmetros estão ajustados. Na Figura 4, observa-se um segundo momento, em que o experimento ocorreu por mais de 17.000 turnos. O código do modelo pode ser consultado no Anexo II.

Figura 3 – Sugarscape: representação anterior à execução da simulação



Fonte: LI e WILENKSI (2009).

Figura 4 – Sugarscape: representação após a execução da simulação

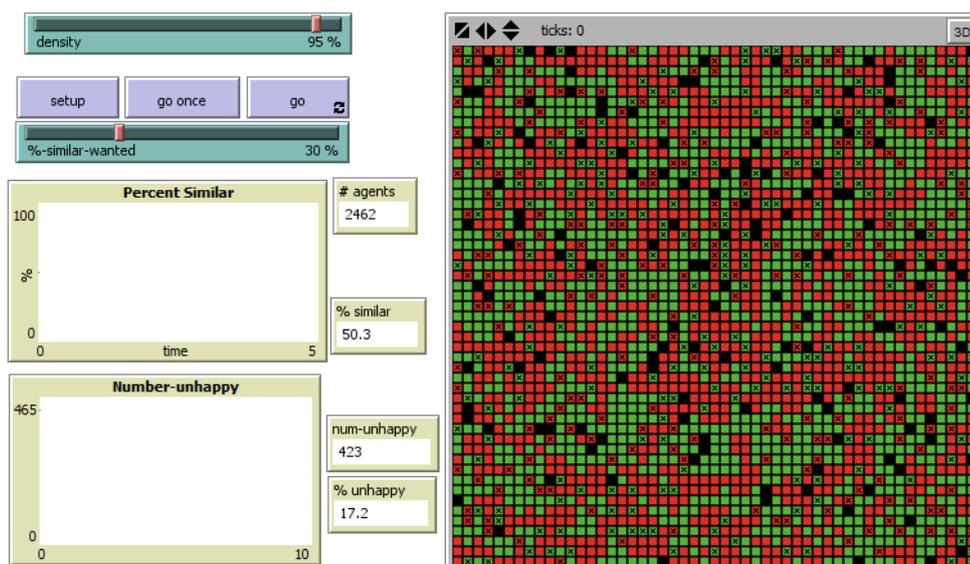


Fonte: LI e WILENKSI (2009).

O modelo criado por Epstein e Axtel foi influenciado pelo experimento realizado pelo economista Thomas Schelling. Este propôs, no fim da década de 1960, um modelo em que uma vizinhança era representada por quadras em um quadro, onde em cada célula pode existir um indivíduo ou família vivendo em uma residência. Para cada indivíduo, são observados oito vizinhos, de maneira a saber se estes compartilham determinada característica (no caso do modelo proposto por Thomas Schelling, a característica selecionada é a cor da pele). Se o número está abaixo de dada marcação, então esse indivíduo é transferido para uma célula randomicamente selecionada e desocupada no quadro. Esse processo é repetido até que nenhum dos indivíduos se movam. Na adaptação do modelo ao NetLogo, especificam-se dois tipos de agentes em uma vizinhança, distinguidos nas cores verde e vermelho, os espaços representados na cor preta não estão ocupados e correspondem a 10% do total de espaços (WILENKY, 1997).

Cada agente é configurado de maneira a preferir viver próximo a outro agente de mesma cor. A simulação irá demonstrar como essas preferências se propagam pela vizinhança de maneira a gerar um novo padrão de distribuição dos agentes. Essa diferença pode ser observada nas Figuras 5 e 6. Na primeira, é demonstrada a distribuição randômica dos agentes pelo quadro. Na segunda, após a execução do modelo, a nova distribuição evidencia o fenômeno de segregação, o qual emergiu do comportamento dos agentes. No Apêndice A é possível ler a codificação do modelo, escrito na linguagem de programação Logo¹⁸.

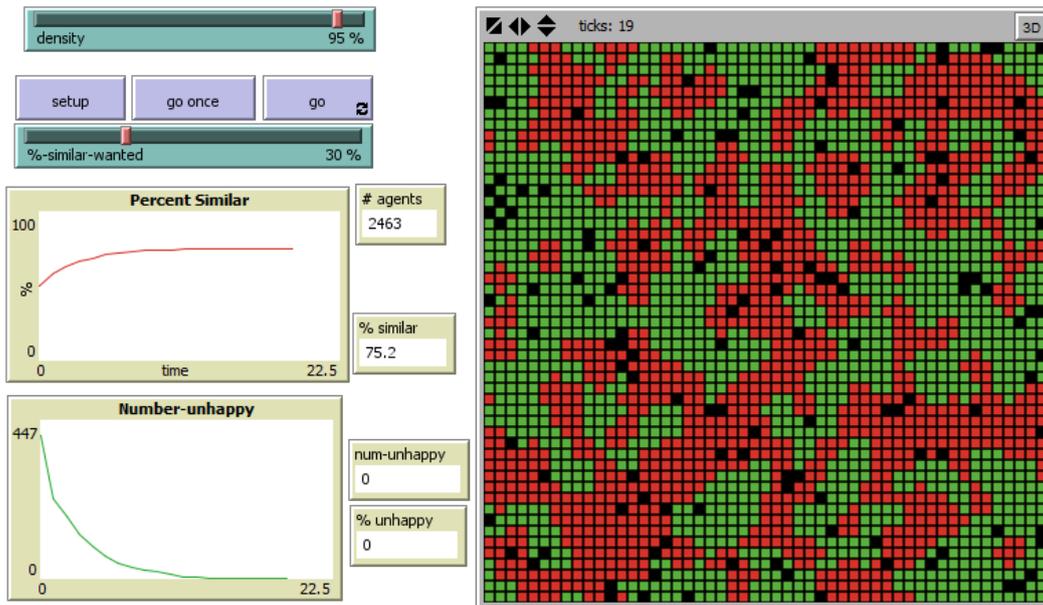
Figura 5 – Modelo de Segregação: representação anterior à execução da simulação



Fonte: WILENKY, 1997.

¹⁸ O Logo é uma linguagem de programação interpretada, utilizada com grande sucesso como ferramenta de apoio ao ensino regular e por aprendizes em programação de computadores.

Figura 6 – Modelo de Segregação: representação após a execução da simulação



Fonte: WILENKSY, 1997.

Apesar de os modelos de Schelling não serem prescritivos, é possível observar neles destacam a emergência de comportamentos macro, impulsionados por motivações no nível do indivíduo (FURTADO, SAKOVSKI, TÓVOLI, 2015). Na próxima seção, o modelo apresentado terá também uma estrutura de grelha, semelhante ao modelo de segregação apresentado. No entanto, o agente deixa de ser o indivíduo e passa a ser o Estado.

3.2 RELAÇÕES INTERNACIONAIS

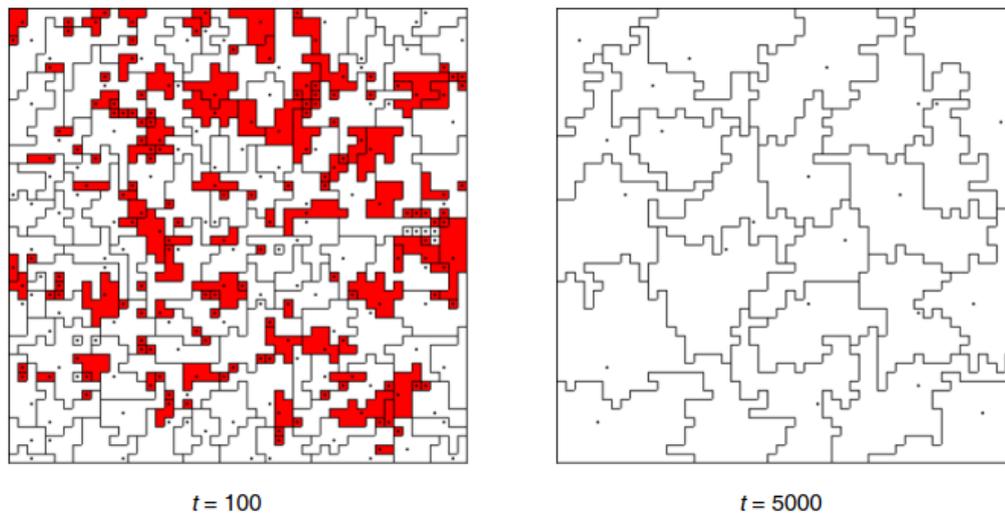
Nas Relações Internacionais, a primeira simulação de que se tem notícia foi iniciada ainda na década de 1960 e publicada em 1977. Os autores foram Bremer e Mihalka (1977), os quais propuseram um modelo para disputas geopolíticas. Nesse estudo, cada país é visto como um ator unitário que procura maximizar seu poder. Poder é definido nessa simulação como controle sobre territórios e recursos. Para representar a interação entre os Estados, os autores criaram uma grelha de 96 hexágonos. As fronteiras são identificadas nos lugares em que os hexágonos se tocam, e nesses pontos há possibilidade de guerra. Cada Estado possui informação sobre suas próprias capacidades e do status do Estado adjacente. O Estado que derrotar o seu vizinho passa a controlar parte do território e recursos do oponente (JOHNSON, 1999).

Esse modelo serviu de inspiração para a criação do GeoSim, o qual é uma família de ABMs programada no MASON¹⁹, em que se representam Estados e províncias em uma grelha, análoga à criada por Bremer e Mihalka. As interações ocorrem entre países adjacentes. Cada

¹⁹ Ver seção 4.2.4 deste trabalho.

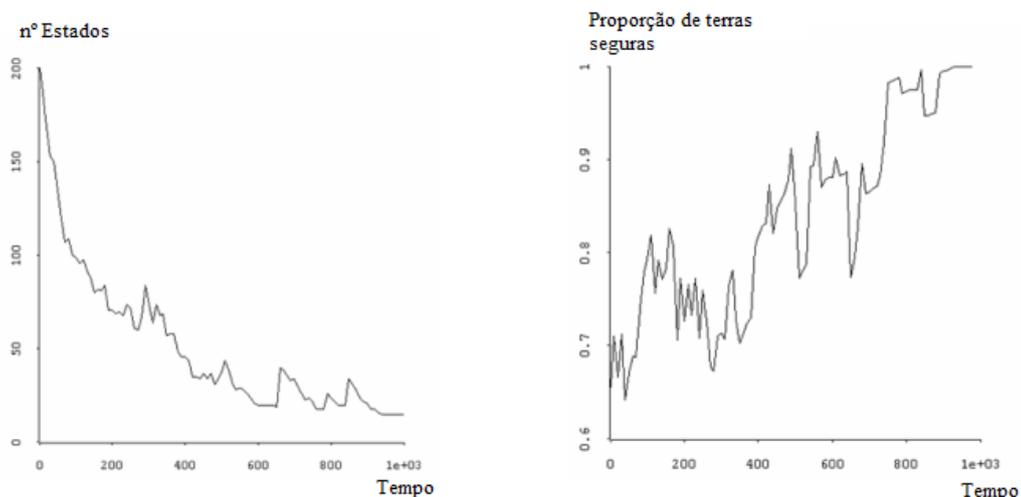
capital pode dominar e integrar províncias adjacentes ao seu próprio território. O poder é derivado a partir do número de províncias controladas, portanto, quanto maior for um Estado, mais poderoso será. Conflito acontece se a balança de poder local exceder um determinado limite em favor do atacante. Na Figura 7, à esquerda, são representadas em vermelho as zonas em que há desequilíbrio na balanças de poder; à direita, é representado o novo status do sistema, passado o tempo (CEDERMAN, 1997; CEDERMAN; 2003).

Figura 7 – Geosim: processo de consolidação estatal



Fonte: CEDERMAN e GIRANDI (2005, p. 05).

Gráfico 1 - Geosim: a consolidação de um sistema estatal



Fonte: adaptado pela autora (2016), com base em CEDERMAN e GIRANDI (2005, p 06).

Observa-se que o número de Estados declina drasticamente, enquanto o número de áreas seguras aumenta. Podem-se destacar três semelhanças com o modelo de Schellin, demonstrado na seção anterior. Primeiro, o processo alcança o equilíbrio por meio da auto-organização. Segundo, há uma redução de unidades coletivas: no modelo de segregação racial, diminuem o número de bairros, enquanto no GeoSim, o número de Estados decresce. Por fim, o sistema se adapta à medida que as suas unidades alcançam a satisfação ou segurança. Entretanto, apesar das semelhanças mencionadas, os dois modelos divergem no mecanismo de adaptação: enquanto no modelo de Schellin, as unidades se movem pelo quadro, no GeoSim são as fronteiras de cada unidade – os Estados – que se movem pelo quadro (CEDERMAN, 1997; CEDERMAN e GIRANDI, 2005).

Além da aplicação de modelos de grande escopo, que simulam interações a nível sistêmico, como os de Bremer e Mihalka (1977), Cusack e Stoll (1990) e Cederman (1997)²⁰, existem aplicações de nível regional, como o AfriLand (CIOFFI-REVILLA e ROLLEAU, 2010). Este pretende representar dinâmicas socioculturais, ambientais, de migração e tráfico entre os estados da África Oriental. São poucos os modelos, entretanto, que representam a interação entre vários países a nível de regiões do sistema internacional. Predomina a aplicação de modelos que representam dinâmicas internas de um Estado ou deste com poucos vizinhos (CIOFFI-REVILLA, ROLLEAU, 2010; PARAVANTIS, 2016).

A exemplo disso, ressalta-se a ampla aplicação de simulações computacionais em assuntos militares, existindo inclusive periódicos dedicados a veicular esse tipo de uso, como o *Journal of Defense Modeling and Simulation*²¹. No Departamento de Defesa estadunidense, já são utilizados modelos para apoiar a tomada de decisão. Alguns dos usos da modelagem computacional envolvem o teste de mudanças de doutrina e tática, estruturação de forças, planos de guerra e teste de diferentes combinações de equipamentos para alcançar maior eficiência e eficácia no combate (CIOPPA, LUCAS, SANCHEZ, 2004; ILACHINSKI, 1997; ILACHINSKI, 2004). É válido também ressaltar que existem contribuições brasileiras nesse tipo de aplicação, destacam-se os trabalhos de Furtado (2014), e de Oliveira Lyrio e de Beauclair Seixas (2006). As simulações tradicionalmente utilizadas são caracterizadas pela alta complexidade e intensividade em recursos, uma vez que existem múltiplos fatores agindo sobre conflitos militares. Por conseguinte, demandam expertise na modelagem e no conhecimento acerca de operações, bem como dos dados disponíveis sobre o objeto a ser modelado.

²⁰ Os primeiros dois modelos foram construídos utilizando a linguagem de programação C, enquanto o último foi construído no *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit* (consultar seção 4.2.3).

²¹ Sítio eletrônico: < <http://dms.sagepub.com>>.

O *Map-Aware Non-Uniform Automata* (MANA) é um exemplo de aplicação desenvolvida para fins militares. Criado pela Agência de Tecnologia na Defesa (DTA, da sigla em inglês *Defence Technology Agency*) da Nova Zelândia, considera duas noções: o comportamento das entidades modeladas é um componente crítico da análise; modelos demasiadamente detalhados costumam focar em aspectos não essenciais para a análise, por conseguinte, não são eficazes para determinar a combinação de diferentes forças (CIOPPA; LUCAS e SANCHEZ, 2004).

Do ponto de vista metodológico, é importante ressaltar que, para a técnica de simulação ser válida no estudo de fenômenos internacionais, o pesquisador deve assumir que os agentes, ambiente, parâmetros e regras de interação estão fundamentados teoricamente. Thomas Pepinski (2005, p. 377, tradução da autora) reforça que "os dados coletados de uma simulação refletem a teoria que a simulação foi designada a testar e, por conseguinte, não pode servir para testar a validade empírica da teoria em questão."²² Além disso, projetar uma simulação do sistema internacional demasiadamente simplificada e baseada em uma teoria inexata ou desconexa pode levar a resultados semelhantes aos encontrados no mundo real. A heurística adotada pode parecer funcionar. Entretanto, antes de avaliar se uma simulação está adequadamente programada ou se está fornecendo prospecções corretas, é necessário analisar se esta considera os aspectos relevantes do sistema representado e se está teoricamente avaliada (PEPINSKI, 2005;).

4 RECOMENDAÇÕES PARA USO DE ABM

Ainda que não existam procedimentos padronizados para elaborar um ABM, é possível destacar estratégias para a construção de modelos. Estas, irão variar de acordo com o aspecto do sistema que se deseja representar, das informações disponíveis e da pergunta norteadora da pesquisa. A partir do que se pretende representar e que aspectos privilegiar na simulação também é feita a escolha da plataforma ou linguagem de programação utilizada para construir e executar o modelo, bem como analisar os resultados de tal simulação. Com a intenção de fornecer subsídios para a tomada dessas decisões, serão expostos neste capítulo estratégias de modelagem e os principais softwares utilizados para gerar simulações.

²² No original: "The data collected from a simulation necessarily reflect the theory that the simulation is designed to test, and cannot then serve to test the 'empirical validity' of the theory itself."

4.1 Estratégias de Modelagem

Ao identificar um problema para ser analisado por meio de um ABM, deve-se prestar atenção a três elementos: os agentes, as interações e o ambiente. A partir disso, deve-se escolher a estratégia de modelagem que utiliza principalmente as informações que se tem acesso acerca do sistema. Nos próximos parágrafos, utilizando como subsídio bibliográfico os manuais de Gilbert e Troitzsch (2005) e Klügl (2016), explicitaremos quatro estratégias de modelagem: a primeira, orientada a agentes; a segunda, orientada a interações; a terceira, orientada ao ambiente; a quarta, por fim, orientada a organizações.

4.1.1 Modelagem Orientada a Agentes

Ao utilizar essa estratégia, o foco da construção do modelo fica sobre os agentes, seus processos decisórios e seus comportamentos. Os aspectos relativos ao ambiente e às interações são adicionados quando requeridos na especificação dos agentes. Podem-se destacar seis procedimentos a serem seguidos:

- a) observação dos agentes e descrição preliminar de seu comportamento são o passo inicial. Observa-se o comportamento dos agentes no mundo real e, a partir disso, deriva-se a descrição de seu comportamento. Essa descrição pode ser amparada pela literatura a respeito do agente e a seu processo decisório, ou pela operacionalização de hipóteses. Nesse momento, também se analisa que dados podem ser obtidos acerca do comportamento dos agentes, para futura validação por meio de testes estatísticos;
- b) categorização e determinação de heterogeneidades são especificadas em seguida, a partir da descrição preliminar dos agentes. Assim, aponta-se que classes e tipos de agentes serão modelados. As heterogeneidades devem estar no nível da configuração de parâmetros, diferentes atividades ou até diferentes;
- c) decisão acerca da arquitetura deve ser tomada a partir da descrição preliminar realizada no primeiro passo, a qual tratou os agentes como caixas-pretas. Em princípio seria indicado modelar a partir de um comportamento específico. Por exemplo, usando regras de percepção e ação – com ou sem representação interna de estado – ou uma arquitetura explicitamente baseada em objetivos, configuração e seleção de planos²³ ou até mesmo utilizando a geração de planos a partir dos

²³ Esse tipo de arquitetura se assemelha àquela utilizada em engenharia de software conhecida como *belief–desire–intention* (BDI, na sigla em inglês).

primeiros princípios ou ainda utilizando modelos cognitivos mais elaborados. Essa seleção é feita a partir da complexidade e flexibilidade necessárias ao modelo;

- d) formalização e implementação do comportamento e objetivos garantem a complementação do comportamento dos agentes na arquitetura. Esse passo é realizado a partir da análise, elaboração e refinamento do comportamento;
- e) adição de interações e características do ambiente, quando necessário. Esses aspectos são adicionados quando o comportamento dos agentes está baseado em crenças específicas, mensagens ou contém manipulações de entidades do ambiente. Enquanto esses aspectos são adicionados em alguma maneira *ad hoc*, deve-se, com alguma frequência, redesenhar o modelo;
- f) teste, quando necessário reproduzir um macro fenômeno. Assume-se que o foco nos agentes levará a um nível válido de informações acerca do comportamento dos agentes, o maior esforço será testar se a interação entre os agentes e ambiente resulta em um macro comportamento válido.

4.1.2 Modelagem Orientada a Interações

Existem simulações nas quais é mais apropriado focar nas macroestruturas, para fazer isso, recomenda-se a modelagem baseada em interações. Na modelagem orientada a interações os agentes basicamente são vistos como caixas-pretas que produzem mensagens e informações. O procedimento geral deve ser modelado futuramente orientado a organização. Exemplo de utilização dessa estratégia é a representação de sistemas dos quais se deseja analisar a performance de um sistema organizacional. Abaixo, são indicados alguns passos:

- a) identificação de atores/entidades e interações entre estes em vez de observar cada um dos agentes no mundo real;
- b) descrição preliminar de protocolos, condições e condicionantes. Atores e interações identificados são refinados a protocolos indo de noções gerais de interação até trocas atômicas de informação e manipulação do ambiente. Aqui, recomenda-se usar linguagens como a Linguagem de Modelagem Unificada (UML, do inglês *Unified Modeling Language*)²⁴, as quais fornecem expressividade adicional para flexibilizar interações;
- c) derivação do comportamento dos agentes para produção de elementos de interação em nível atômico (mensagens, sinais, ações, etc.) e adição de entidades

²⁴ Recomenda-se a consulta ao estudo produzido por Guedes (2012).

formadoras do ambiente ao modelo, quando necessário para interação. Nesse passo, algo como uma linguagem finita de estado, como a *Classroom Object Oriented Language* (COOL), pode ser usada para especificar as interações dos agentes com estados dos agentes como reação a mensagens recebidas ou enviadas. Ao final deste passo, o pesquisador deve reparar o comportamento dos agentes para providenciar contexto suficiente e válido para a programação dos agentes, propriamente dita;

- d) implementação do comportamento dos agentes e teste se as interações desejadas e, assim, o resultado no nível macro está realmente sendo produzido por todo o sistema. Deve-se, também, testar se o comportamento do agente é plausível ou válido – dependendo dos dados disponíveis.

4.1.3 Modelagem Orientada a Organização

Uma extensão da modelagem orientada a organizações é baseada na estruturação de interações de acordo com algum modelo organizacional. Em vez de começar das interações, essa estratégia começa a partir das relações entre estruturas organizacionais. Existem diferentes tipos de relação entre agentes e organizações, como relações de informação ou controle. Essas relações podem ser estáticas e determinadas do início ou podem ser evolutivas e não persistentes.

Depois de especificar completamente a estrutura organizacional que pode ser encontrada no mundo real, as atividades e papéis são determinados, incluindo papéis de interação. O próximo passo consiste em definir os agentes e que papéis eles podem assumir. Deve-se, também, especificar como e quando os papéis dados aos agentes podem ser modificados. Aspectos temporais e de interação devem também ser especificados. Esse procedimento de desenho é aplicável quando existe algo como uma estrutura organizacional persistente a ser abordada. Se a evolução ou emergência de uma organização é estudada, não faz sentido utilizar esta estratégia, dado que o seu ponto de partida corresponde ao resultado desejado do estudo.

4.1.4 Modelagem Orientada ao Ambiente

Em analogia às estratégias de desenho de modelos mencionadas anteriormente, o ponto de partida da modelagem orientada ao ambiente consiste em uma análise da estrutura do

ambiente. Baseado nisso, definem-se a interface dos agentes e seus comportamentos. Os passos a serem seguidos são especificados abaixo:

- a) identificação de aspectos relevantes (estado global, dinâmicas globais/ entidades locais) da parte do modelo que representa o ambiente dos agentes;
- b) determinação das ações básicas dos agentes e suas reações às entidades do ambiente;
- c) determinação das informações do ambiente, as quais devem ser fornecidas aos agentes para que estes possam selecionar as ações a serem praticadas;
- d) decisão acerca da arquitetura dos agentes, sendo possível a conexão entre percepções e ações dos agentes de maneira apropriada para produzir o comportamento dos agentes. Concomitantemente, deve-se programar os elementos internos dos estados dos agentes;
- e) a depender dos objetivos da simulação e da complexidade do ambiente, aconselha-se fazer uso de mecanismos de aprendizagem para determinar o comportamento dos agentes. Se for o caso, pode-se criar uma função para fornecer *feedback* aos agentes. O esquema de recompensa também aborda questões como quando e com que frequência será fornecido feedback aos agentes, se todos os agentes aprenderão baseados em um mecanismo coletivo ou individual de aprendizagem;
- f) implementação do modelo do ambiente, incluindo a função de recompensa e aprendizagem, se necessário;
- g) especificação e implementação do comportamento ou da interface dos agentes, em combinação com o mecanismo de aprendizagem escolhido;
- h) teste e análise dos resultados da simulação como um todo, bem como das trajetórias individuais dos agentes. Deve-se atentar para o aparecimento de artefatos provenientes de equívocos na modelagem do ambiente ou interfaces. Aspectos técnicos como a dinâmica do ambiente e atualização de sequências devem ser considerados.

Dois riscos decorrem da utilização dessa abordagem: o primeiro está relacionado aos resultados das interações em um ambiente programado de maneira equívoca, os quais não são confiáveis; o segundo, à seleção do mecanismo de aprendizagem. Pode facilmente ocorrer de não existir um mecanismo apropriado para o que se quer representar, tendo em vista que não é difícil chegar às fronteiras do conhecimento existentes na abordagem. Por fim, pode ainda

ocorrer de a lista regras programadas ser extensa demais para modelar nessa arquitetura. Se isso ocorrer, recomenda-se a aplicação de uma arquitetura mais complexa.

Na seção acima, foram apresentadas quatro estratégias de modelagem. Em todas elas, recomenda-se a construção do modelo a partir de um dos elementos básicos da modelagem de simulações baseadas em agentes. Existem, no entanto, outras estratégias que levam em consideração diferentes pontos, as quais não foram abordadas nesta monografia por serem específicas, de maneira que fogem do escopo deste trabalho²⁵.

4.2 PLATAFORMAS DE MODELAGEM

Nos últimos anos, foram criados inúmeros programas de computador destinados a rodar modelos de simulação. A *survey* mais recente de se tem notícia foi elaborada pelos pesquisadores Cynthia Nikolai e Gregory Madey (2009). Os autores estudaram mais de 50 programas apropriados para a criação de ABMs, com o objetivo de auxiliar na escolha de ferramentas adequadas às características de um sistema que se pretende representar. Nesta monografia, de outro modo, pretende-se apresentar os cinco programas mais utilizados para rodar simulações, sob a justificativa de que são ferramentas consolidadas, de fácil acesso a tutoriais e que admitem uma diversidade de características e propósitos de modelagem.

Não se deve, no entanto, deixar de mencionar que é possível criar modelos utilizando linguagens típicas de programação (como C++, Java e Python), ou utilizando programas estatísticos e de modelagem tradicionais (como Matlab e Mathematica). A utilização de linguagens de programação para modelar têm como benefício a alta flexibilidade ao construir um modelo (KLUGL, 2016). No entanto, requer um conhecimento altíssimo dos paradigmas de ABM, de computação e lógica de programação, bem como do sistema a ser representado. A modelagem de sistemas por meio de programas de computador criados para tal finalidade é a maneira recomendada para pesquisadores menos experientes.

Nos próximos parágrafos, serão apresentados quatro programas que permitem a criação e execução de modelos baseados em agentes: NetLogo, Swarm, RePast e MASON. Por serem desenvolvidos em código aberto e distribuídos gratuitamente, as aplicações criadas por usuários também são publicadas e disponibilizadas para uso. Além disso, essas plataformas se destacam em inúmeros *surveys*, seja por serem mais utilizadas ou apresentarem melhor desempenho (HEATH, HILL e CIARALLO, 2009; KLUGL, 2016; NIKOLAI e MADEY, 2009;

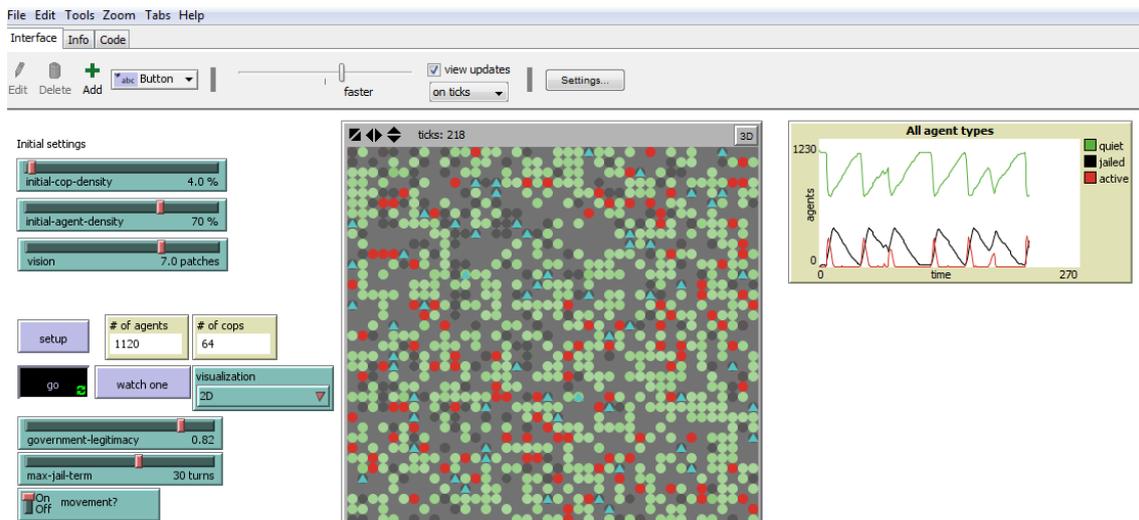
²⁵ Para um estudo mais aprofundado, recomenda-se a leitura de Klügl (2016).

RAISLBACK, LYTINEN e JACKSON, 2008). Para uma lista extensa de plataformas, consultar o Apêndice A.

4.2.1 NetLogo²⁶

Desenvolvido em 1999, por Uri Wilenky (1999) consiste em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) desenvolvido especialmente para criar e implementar ABMs (GRIMM *et al*, 2011). É considerada a ferramenta de maior popularidade, credibilidade e de mais fácil utilização (HEATH, HILL & CIARALLO, 2009), uma vez que não requer conhecimentos prévios de programação. Possui uma biblioteca de modelos aplicado a disciplinas como biologia, Ciências Sociais, filosofia, matemática e psicologia. Por conseguinte, é altamente recomendado para uso educacional. O programa possui basicamente três interfaces. A primeira consiste em uma espécie de editor para programação do modelo. A segunda permite a visualização do ambiente e seis parâmetros, permitindo ainda a visualização do ambiente e a fácil modificação dos parâmetros. Na terceira interface é guardada a documentação estruturada do modelo. A facilidade na documentação é um dos fatores responsáveis pela crescente popularidade do NetLogo, juntamente com a facilidade de acesso a tutoriais e uma extensa biblioteca de modelos. O software é escrito nas linguagens Scala e Java, possuindo Licença Pública Geral (GPL, do inglês *General Public License*). A Figura 8 demonstra a interface do NetLogo.

Figura 8 – Interface Gráfica NetLogo



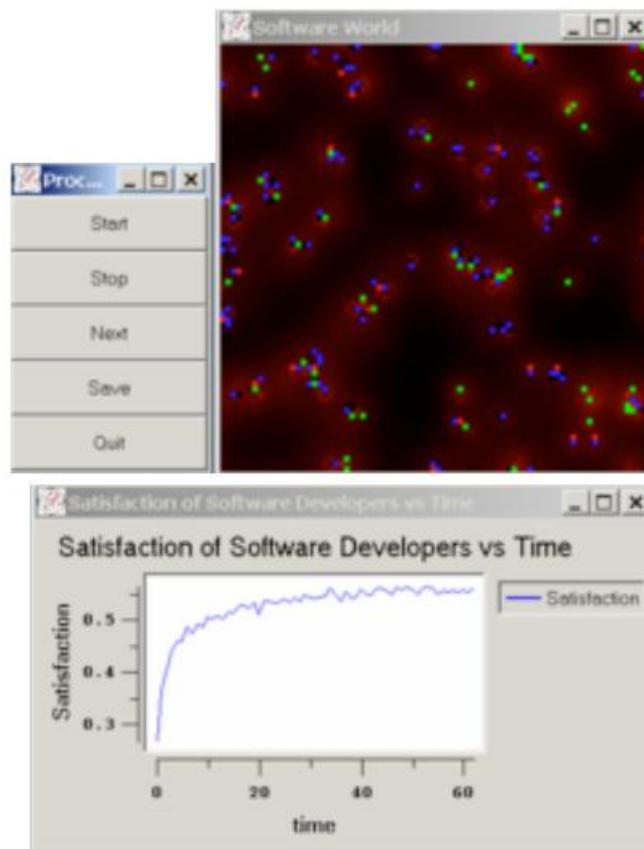
Fonte: WILENSKY (1999).

²⁶ Sítio eletrônico: <<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>.

4.2.2 Swarm²⁷

Lançado em 1994, tem como objetivo prover vocabulário e uma série de ferramentas básicas para o desenvolvimento de modelos de simulação multi-agentes. Seguindo o paradigma de programação orientada a objetos, foi desenvolvido primeiramente em Objective-C e depois em Java. No software, a unidade básica é o *swarm*, um grupo de agentes que executam tarefas pré-determinadas. Cada agente desse grupo pode ser composto por um novo grupo de agentes, dado que a arquitetura da plataforma permite modelagem hierárquica (RAISLBACK, LYTINEN e JACKSON, 2008). O Swarm conta com uma biblioteca de componentes para a construção, análise, controle e visualização de modelos (KLÜGL e BAZZAN, 2012). O software está disponível para download e instalação, sob a GLP. A Figura 9 demonstra a interface gráfica do Swarm.

Figura 9 - Interface Gráfica Swarm



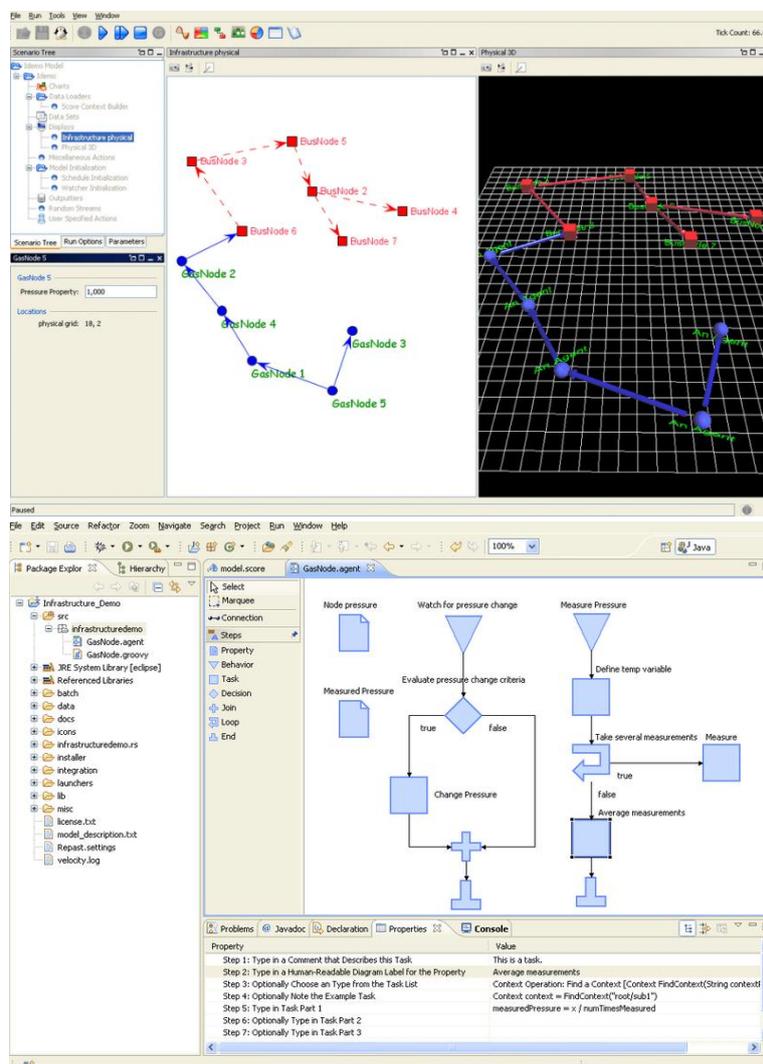
Fonte: MADEY, FREEH e TYNAN (2002).

²⁷ Sítio eletrônico: <http://www.swarm.org/wiki/Swarm_main_page>.

4.2.3 Recursive Porous Agent Simulation Toolkit (Repast)²⁸

Criado por um grupo de pesquisadores da Universidade de Chicago, seu primeiro lançamento ocorreu no ano de 2000. Foi desenvolvido em linguagem Java, a partir de conceitos adotados previamente no Swarm. Teve como objetivo inicial de atender a peculiaridades específicas de modelos para Ciências Sociais. Oferece uma coleção de funcionalidades essenciais para construir e rodar simulações baseadas em agentes, bem como de ferramentas para visualização de resultados (tabelas, gráficos). Apresenta ainda a capacidade de integrar informações do Sistema de Informação Geográfica (SIG ou GIS, do inglês *Geographical Information System*). A Figura 10 demonstra a interface gráfica do Repast.

Figura 10 - Interface Gráfica Repast



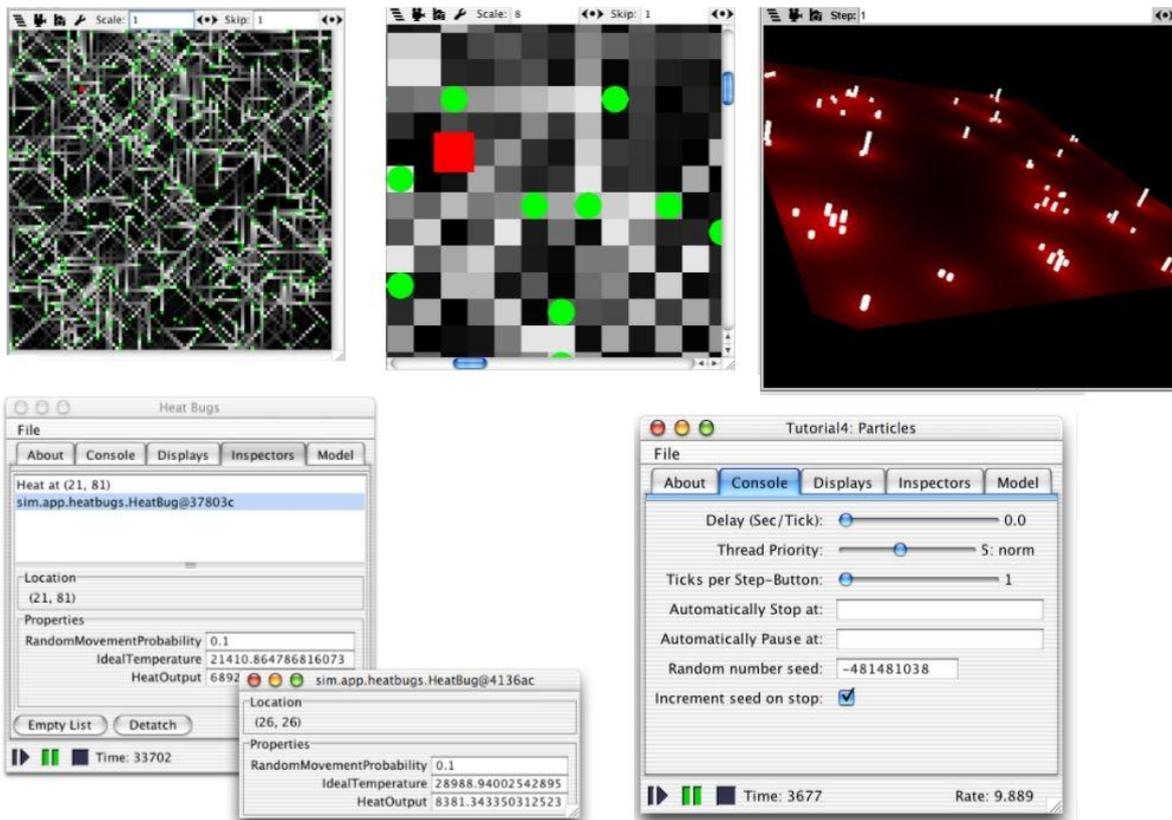
Fonte: SMITH, GOODCHILD e LONGLEY, 2015.

²⁸Sítio eletrônico: <http://repast.sourceforge.net/>.

4.2.4 MASON (Multi-Agent Simulator of Neighborhoods)²⁹

Desenvolvido no centro de Computação Evolucionária na Universidade George Mason, teve sua primeira versão lançada em 2003. Foi projetado como uma alternativa menor e mais rápida em relação ao Repast, com foco em viabilizar a criação de modelos que demandem recorrentes interações entre um grande número de agentes. Pretendeu-se, com o desenvolvimento desta plataforma, viabilizar criação de modelos mais robustos, envolvendo um número maior de agentes e várias execuções do modelo. Maximização da velocidade de execução e garantia da completa reprodutibilidade em diferentes *hardwares* (RAISLBACK, LYTINEN e JACKSON, 2008). São consideradas prioridades a integração e desintegração de aplicação de interfaces gráficas, interrupção e transferência da simulação para outros computadores. Só foram incluídas ferramentas de domínio geral. Desenvolvido em Java, também pode ser acessado sob a licença GPL. A Figura 11 mostra a interface gráfica do MASON.

Figura 11 - Interface Gráfica MASON



Fonte: <<http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/#Screenshots>>.

²⁹ Sítio eletrônico: <<http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>>.

As principais características dessas plataformas são sumarizadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Comparação entre os Softwares

Plataforma	Escalabilidade	Tempo para Execução	Linguagem de Programação	Principal Domínio
NetLogo	desktop	Intermediário	NetLogo	Ciências Sociais e Naturais
MASON	Larga Escala	Rápido	Java	Ciências Sociais, Física, Inteligência Artificial
Swarm	Larga Escala	Lento	Objective-C; Java	Propósitos Gerais
Repast	Larga Escala	Veloz	Java; Python; C++	Propósitos Gerais

Fonte: elaborado pela autora (2016), com base em (KLÜGL e BAZZAN, 2012; NICOLAI e MADEY, 2009; RAILSBACK, 2006; SICHMAN, 2015).

A pesquisadora Franziska Klügl (2016; p. 147) recomenda que, antes da escolha de uma plataforma para criação de um modelo sejam considerados questionamentos como os que seguem. São necessárias ferramentas de *design*? Algumas plataformas incluem ferramentas de design gráfico ou ainda programação visual para auxiliar no desenvolvimento. Qual a flexibilidade necessária, além do *design* visual? Que tipo de visualização é necessária? Movimentação espacial de objetos ou relações entre agentes na forma de redes sociais? É necessário analisar o resultado? Que tipo de dados se espera obter das simulações? São valores agregados? Valores para cada agente? Saber a resposta para tais perguntas ajuda a avaliar que softwares ou complementos poderão ser combinados. Em que sistema operacional se pretende rodar a simulação? Algumas ferramentas podem apenas ser utilizadas no Windows, outras contemplam apenas os sistemas Linux ou Mac OS.

Pode-se observar que existem inúmeros caminhos a serem trilhados para representar um sistema, assim como muitas são as aplicações que podem ser utilizadas. A escolha da estratégia e plataforma para desenvolver ABMs deve ser feita levando em consideração a pergunta de pesquisa e o que se quer representar.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, buscou-se responder à seguinte pergunta de pesquisa: *como a modelagem baseada em agentes tem sido aplicada nos campos de estudos das Ciências Sociais e Relações Internacionais?* As hipóteses formuladas são de que a aplicação de ABMs aos campos de estudo selecionados é caracterizada pela multiplicidade de técnicas de modelagem, pela imprecisão quanto à publicação de premissas e modelo lógico da simulação, bem como da documentação desta; e de que nesses campos de estudo, utilizam-se ABMs predominantemente generativos.

Constatou-se, durante a fase de mapeamento da literatura, que a abordagem de ABM é pouco utilizada em ambos os campos de estudo selecionados para esta monografia, levando em conta duas comparações. A primeira considera que o emprego de ABM em outras áreas do conhecimento (ciências da computação e ciências biológicas) tem ocorrido com maior frequência e, por conta disso, está em estágio mais avançado. A segunda, que a quantidade de aplicações de ABM comparado às demais metodologias de pesquisa que costumam ser empregadas em Ciências Sociais e Relações Internacionais é consideravelmente inferior. Ademais, as hipóteses inferidas durante o levantamento bibliográfico foram confirmadas ao final da pesquisa.

A construção de modelos baseados em agentes proporciona ao pesquisador uma grande liberdade de desenho. Como resultado, observam-se alguns problemas se aplicação: problemas decorrentes do desenho do modelo (inclusão de muitos detalhes), na implementação (não escalonamento), na calibragem (parâmetros mal estruturados), na análise (premissas em demasia), na documentação (muitos aspectos), na validação (dados insuficientes ou nebulosos), etc. (KLÜGL, 2016). Essas insuficiências acabam sendo contraproducentes para o avanço do conhecimento produzido sobre ABM, uma vez que se perdem a credibilidade dos modelos e sua replicabilidade.

Observou-se, no desenvolvimento desta pesquisa, que existem muitas publicações relatando os resultados de simulações sem que seja dada devida atenção à comunicação da metodologia utilizada. Sabendo da importância da verificação replicação de experimentos, pode-se afirmar que a mera publicação de resultados limita o alcance dessas pesquisas, bem como o desenvolvimento desta abordagem de simulação. Essa afirmação é corroborada pela pesquisa bibliométrica realizada por Heath, Hill e Ciarallo (2009). Nesse trabalho, foram analisadas de maneira sistemática 279 publicações de 92 periódicos em que foram construídos

ABMs. Observou-se que menos da metade dos modelos foram validados conceitual e operacionalmente pela pesquisa.

Entende-se que poucos pesquisadores dos campos de estudo selecionados para esta pesquisa utilizam simulações computacionais como instrumento investigação científica pelos motivos expostos a seguir. A abordagem tornou-se mais conhecida nos anos 2000, portanto ainda está em fase inicial de consolidação. O fato de a literatura sobre metodologias de modelagem baseada em agentes ter crescido consideravelmente nos últimos anos reflete a consciência respeito da necessidade de debater e esclarecer como aplicar a abordagem. Existe relutância de pesquisadores em enxergar a ABM como instrumento confiável. Por fim, tendo em vista sua transdisciplinariedade, a aplicação de ABM demanda um elevado conhecimento de fundamentos da computação. Portanto, a utilização de simulações não é ensinada nesses campos de pesquisa, ficando dependente do interesse individual pelo tema.

Subsidiado por uma extensa revisão da literatura, buscou-se fornecer, nesta monografia, um retrato do estado da arte das aplicações de ABMs em Ciências Sociais e Relações Internacionais. A partir disso, foi possível elencar algumas recomendações para a consolidação da modelagem enquanto prática de pesquisa nos campos analisados. Recomenda-se que a publicação de resultados de uma simulação deve comunicar com clareza as premissas do modelo, a teoria que subsidia o experimento, bem como o software ou linguagem de programação utilizados. Por fim, acredita-se que é fundamental o fornecimento de elementos suficientes para que outros pesquisadores possam avaliar e replicar a simulação.

A publicação dos resultados de ABS, acompanhados de uma documentação robusta contribuirão para a superação dos desafios elencados, bem como auxiliarão na consolidação desta abordagem.

REFERÊNCIAS

AXELROD, Robert M. Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. In: CONTE, R. H. R. T. P. **Simulating Social Phenomena**. Berlin: Springer-Verlag, 1997. Cap. 2, p. 21-40.

AXELROD, Robert M. **The Complexity of Cooperation: Agent-based models of competition and collaboration**. Princeton: Princeton University Press, 1997.

BALCI, Osman. Verification, validation, and accreditation. In: **Proceedings of the 30th conference on Winter simulation**. Washington: IEEE, 1998. p. 41-4.

BANKES, S. C. Tools and Techniques for Developing Policies for Complex and Uncertain Systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Santa Monica, v. 99, n. 3, p. 7263-7266, 2002.

BEYERCHEN, Alan D. Clausewitz, nonlinearity, and the importance of imagery. **Complexity, Global Politics, and National Security**, Washington: National Defense University. Cap. 7 p. 70-78, 1997.

BOUSQUET, Antoine; CURTIS, Simon. Beyond models and metaphors: complexity theory, systems thinking and international relations. **Cambridge Review of International Affairs**, v. 24, n. 01, p. 43-62, 2011.

BREMER, Stuart; MIHALKA, Michael. Machiavelli in Machina: Or Politics Among Hexagons. In: **Problems of World Modeling**. Boston: Ballinger. p. 303-37, 1977.

CANABARRO, Diego R. **Governança Global da Internet: tecnologia, poder e desenvolvimento**. Porto Alegre, RS: Tese de Doutorado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Ciência Política da UFRGS. 2014.

CASTRO, Aldemar Araujo. Revisão sistemática e meta-análise. **Compacta: temas de cardiologia**, v. 3, n. 1, p. 5-9, 2001.

CEDERMAN, Lars E. **Emergent Actors in World Politics: how states and nations develop and dissolve**. Princeton: Princeton University Press, 1997.

CEDERMAN, Lars-Erik. Modeling the Size of Wars: from billiard balls to sandpiles. **American Political Science Review**, Thousand Oaks, v. 97, n. 01, p. 135-150, 2003.

CEDERMAN, Lars-Erik; GIRARDIN, Luc. **Exploring geopolitics with agent-based modeling**. 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Luc_Girardin2/publication/242074322_Exploring_geopolitics_with_agent-based_modeling/links/00b7d52f2044398713000000.pdf>. Acessado em: 22. nov. 2016.

CEPIK, Marco; CANABARRO, Diego R. Do Novo Gerencialismo à Governança da Era Digital. In: _____ **Governança de TI: transformando a administração pública no Brasil**. Porto

Alegre: Editora da UFRGS, 2014. Cap. 1, p. 11-18. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cegov/files/pub_48.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

CÂNDEA, Ion. Complex systems—new conceptual tools for international relations. **Perspectives**, Prague, v. 26, n. Summer, p. 46-68, 2006. Disponível em: <<http://perspectives.iir.cz/home/article/view/119>>. Acesso em: 25. out. 2016.

CIOFFI-REVILLA, Claudio.; ROULEAU, M. MASON RebeLand: An Agent-Based Model of Politics, Environment, and Insurgency. **International Studies Review**, New Jersey, v. 12, n. 1, p. 31-52, 2010.

CIOFFI-REVILLA, Claudio; ROULEAU, Mark. MASON AfriLand: **A regional multi-country agent-based model with cultural and environmental dynamics**. Proceedings of the Human Behavior-Computational Modeling and Interoperability Conference, Oak Ridge, 2009.

CIOPPA, Thomas; LUCAS, Thomas; SANCHEZ, Susan. Military Applications of Agent-Based Simulations. In: WILLINGER, W. et al. **Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference**. Washington: IEEE, 2004. p. 171-180.

CONNABLE, Ben et al. **Modeling, Simulation, and Operations Analysis in Afghanistan and Iraq: Operational Vignettes, Lessons Learned, and a Survey of Selected Efforts**. Rand National Defense Research Institute, Santa Monica CA, 2014.

CUSACK, T. R.; STOLL, R. J. State Survival and System Endurance: a simulation study. **International Political Science Review**, Thousand Oaks, v. 11, n. 2, p. 261-278, 1990.

CUSACK, Thomas R.; STOLL, Richard J. **Exploring Realpolitik: probing international relations theory with computer simulation**. Boulder: Lynne Rienner Pub, 1990.

DAVIDSSON, Paul. Agent based social simulation: A computer science view. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, Surrey, v. 5, n. 1, 2002. Disponível em: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>>. Acesso em: 23. nov. 2016.

DA SILVA, Claudio Antonio; DE BEAUCLAIR SEIXAS, Roberto. Arquitetura de um Modelo de Confronto Baseado em Agentes Autônomos e Dados Geográficos. Rio de Janeiro. **VII Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha**, 2004. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/arq0060_0.pdf>. Acesso em: 23. dez. 2016.

DE MESQUITA, Bruce Bueno. Risk, power distributions, and the likelihood of war. **International Studies Quarterly**, Oxford, v. 25, n. 4, p. 541-568, 1981.

EPSTEIN, J. M. Modeling Civil Violence: an agent-based computational approach. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. v. 99, n. 3, p. 7243-7250, 2002.

EPSTEIN, Joshua M.; AXTELL, Robert. **Growing Artificial Societies: social science from the bottom up**. Whashington, DC: Brookings Institution Press, 1996.

EPSTEIN, Joshua M.; AXTELL, Robert. **Growing artificial societies: social science from the bottom up**. Washington: Brookings Institution Press, 1996.

FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLI, M. H. Abordagens de Sistemas Complexos para Políticas Públicas. In: _____. **Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas**. Brasília: IPEA, 2015. Cap. 1, p. 21-42. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/150727_livro_modelagem_sistemas.pdf>. Acesso em: 12 out. 2016.

FURTADO, Ronaldo A. **Modelagem Baseada em Agente como Ferramenta para Diagnóstico de Segurança de Aeroportos: estudo de caso de um ataque com o agente biológico Antraz no Aeroporto Internacional do Galeão**. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação da Escola de Comando e Estado-Maior do Exército. 2014.

GUEDES, Gilleane T. A. **Um Metamodelo UML para a Modelagem de Requisitos em Projetos de Sistemas Multiagentes**. Porto Alegre, RS: Tese de Doutorado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Computação. 2012.

GEYER, R. Beyond the Third Way. **British Journal of Politics and International Relations**, Edinburgh, v. 5, n. 2, p. 237-257, 2003.

GILBERT, Nigel; TERNA, Pietro. How to build and use agent-based models in social science. **Mind & Society**, New York, v. 1, n. 1, p. 57-72, 2000.

GILBERT, Nigel; TROITZSCH, Klaus. **Simulation for the Social Scientist**. Berkshire: McGraw-Hill Education, 2005.

HEATH, Brian; HILL, Raymond; CIARALLO, Frank. A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008). **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, Surrey, v. 12, n. 4, p. 9, 2009.

ILACHINSKI, Andrew. **Artificial war: Multiagent-based simulation of combat**. Hackensack: World Scientific, 2004.

ILACHINSKI, Andrew. Irreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat (ISAAC): An Artificial-Life Approach to Land Warfare. CENTER FOR NAVAL ANALYSES, Alexandria VA, 1997.

JACCARD, J.; JACOBY, J. **Theory Construction and Model-Building Skills: a practical guide for social scientists**. New York: The Guilford Press, 2010.

JOHNSON, Paul E. Simulation Modeling in Political Science. **American Behavioral Scientist**, v. 42, n. 10, p. 1509-1530, 1999.

KAVALSKI, E. The Fifth Debate and the Emergence of Complex International Relations Theory: notes on the application of complexity theory to the study of international life. **Cambridge Review of International Affairs**, Cambridge, v. 20, n. 3, p. 435-454, 2007.

KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. Agent-Based Modeling and Simulation. **AI Magazine**, Palo Alto, v. 33, n. 3, p. 29-40, 2012.

KLÜGL, Franziska. **Agent-Based Simulation Engineering**. 2016. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:910313/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 25. out. 2016.

KLÜGL, Franziska; BAZZAN, Ana. Agent-based Modeling and Simulation. **AI Magazine**, Palo Alto, v. 33, n. 3, p. 29-40, 2012.

LENHARD, J.; KÜPPERS, G.; SHINN, T. Computer Simulation: practice, epistemology and social dynamics. In: _____ **Simulation: pragmatic construction of reality**. Sociology of the Sciences Yearbook. Dordrecht: Springer, 2006. Cap. 1, p. 3-22.

LI, J; WILENSKY, U. **NetLogo Sugarscape 2 Constant Growback model**. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Sugarscape2ConstantGrowback>. Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, 2009.

LINNEMAN, H. et al. **MOIRA: Model of International Relations in Agriculture**. Amsterdam-New York-Oxford: North-Holland Publishing Co, 1979.

DE OLIVEIRA LYRIO, Gustavo H. S.; DE BEAUCLAIR SEIXAS, Roberto. Modelagem de Forças de Defesa Baseada em Agentes. Rio de Janeiro. **IX Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha**, 2006. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/arq0067.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

LOVE, Rhonda L.; ROZELLE, Richard M.; DRUCKMAN, Daniel. Resolving Conflicts of Interest and Ideologies: a simulation of political decision-making. **Social Behavior and Personality: an international journal**, Palmerston North, v. 11, n. 2, p. 23-28, 1983.

MARTINS, José Miguel Quedi. Digitalização e guerra local como fatores do equilíbrio internacional. Programa de Pós-Graduação em Ciência Política (UFRGS), Porto Alegre (RS), p. Tese de Doutorado: 327 p., 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/14405>>. Acesso em: 12 out. 2016.

MEARSHEIMER, J. J.; WALT, S. M. Leaving Theory Behind: why simplistic hypothesis testing is bad for International Relations. **European Journal of International Relations**, v. 19, n. 3, p. 427- 457, 2013.

MISOCZKY, Maria Ceci. Da Abordagem de Sistemas Abertos à Complexidade: algumas reflexões sobre seus limites para compreender processos de interação social, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 01-17, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-39512003000100002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 set. 2016.

MORIN, Edgar. **Ciência com Consciência**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

MOYER, Jonathan D. Quantifying and forecasting vulnerability to dyadic conflict in an integrated assessment model: Modeling international relations theory. 2012. Tese de Doutorado. University of Denver

ORMEROD, Paul; ROSEWELL, Bridget. Validation and Verification of Agent-Based Models in the Social Sciences. In: **Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 130-140.

PARAVANTIS, J. A. From Game Theory to Complexity Science and Agent-Based Modeling in World Politics. **Intelligent Computing Systems**, Berlin, v. 627, p. 39-85, 2015.

PEPINSKI, T. B. From Agents to Outcomes: simulation in international relations. **European Journal of International Relations**, Thousand Oaks, v. 11, n. 3, p. 367-394, 2005.

PLOUS, S. Perceptual Illusions and Military Realities Results from a Computer-Simulated Arms Race. **Journal of Conflict Resolution**, v. 31, n. 1, p. 5-33, 1987.

RAILSBACK, Steven; LYTINEN, Steven; JACKSON, Stephen. Agent-Based Simulation Platforms: review and development recommendations. **Simulation**, v. 82, n. 9, p. 609-623, 2006.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. v-vi, Julho 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>>. Acesso em: 12 Setembro 2016.

ŠALAMON, Tomáš. **Design of Agent-Based Models**. Prague: Eva & Tomas Bruckner Publishing, 2011.

SARGENT, Robert G. Verification and Validation of Simulation Models. In: **Proceedings of the 37th conference on Winter simulation**. Washington: IEEE, 2005. p. 130-143.

SCHELLING, Thomas. Dynamic Models of Segregation. **Journal of mathematical sociology**, v. 1, n. 2, p. 143-186, 1971.

SCHELLING, Thomas. Models of segregation. **The American Economic Review**, Nashville, v. 59, n. 2, p. 488-493, 1969.

SHOHAM, Yoav; LEYTON-BROWN, Kevin. **Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

SICHMAN, João. Operacionalização de Sistemas Complexos. In: _____. **Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas**. Brasília: IPEA, 2015. Cap. 5, p. 97-138. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/150727_livro_modelagem_sistemas.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2016.

SIMON, H. A. Architecture of Complexity. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 106, n. 06, p. 467-482, 1962.

SQUAZZONI, Flaminio; CASNICI, Niccolò. Is social simulation a social science outstation? A Bibliometric Analysis of the Impact of JASSS. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, Surrey, v. 16, n. 1, p. 10, 2013. Disponível em: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/1/10.html>>. Acesso em: 17 out. 2016.

STOLL, Richard J. System and State in International Politics: A Computer Simulation of Balancing in an Anarchic World. **International Studies Quarterly**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 387-402, 1987.

TABER, Charles S.; TIMPONE, Richard J. Beyond Simplicity: focused realism and computational modeling in international relations. Mershon **International Studies Review**, New Jersey, v. 40, n. Supplement 1, p. 41-79, 1996.

WILENSKY, U. (1999): NetLogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL

NOWAK, Martin A.; SIGMUND, Karl. Evolution of indirect reciprocity by image scoring. **Nature**, London, v. 393, n. 6685, p. 573-577, 1998.

NOWAK, Martin A.; SIGMUND, Karl. Evolution of indirect reciprocity. **Nature**, London, v. 437, n. 7063, p. 1291-1298, 2005.

NIGEL, Gilbert; TROITZSCH, Klaus G. Simulation for the social scientist. **B: Open University Press**, 1999.

MILSTEIN, Jeffrey; MITCHELL, W. C. Computer Simulation of International Processes: The Vietnam War and the Pre-World War I Naval Race. **Peace Research Society International Papers**, n. 12, p. 117-136, 1969.

STAHEL, Albert A. **Dynamic Models of Guerilla Warfare. Dynamic Models of International Conflic**. Boulder, CO: Lynne Rienner, 1985.

TABER, Charles S.; TIMPONE, Richard J. Beyond Simplicity: focused realism and computational modeling in international relations. **International Studies Review**, New Jersey, v. 40, n. Supplement 1, p. 41-79, 1996.

APÊNDICE A – LISTA DE PLATAFORMAS PARA ABM

Lista de plataformas para desenvolvimento de modelos baseados em agentes.

Distribuição Gratuita e Código Aberto

- **A-globe** <<http://agents.felk.cvut.cz/aglobe>>
- **ABLE** <<http://www.alphaworks.ibm.com/tech/able>>
- **Ascape** <<http://ascape.sourceforge.net/>>
- **Breve** <<http://www.spiderland.org/breve/>>
- **Cormas** <<http://cormas.cirad.fr/en/outil/outil.htm>>
- **Cougaar** <<http://www.cougaar.org/>>
- **EcoLab** <<http://ecolab.sourceforge.net/>>
- **EVO** <<http://omicrongroup.org/evo/>>
- **JADE** <<http://sharon.csel.it/projects/jade/>>
- **JAS** <<http://jaslibrary.sourceforge.net/>>
- **MASON** <<http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>>
- **Mesa** <<https://pypi.python.org/pypi/Mesa/>>
- **metaABM** <<http://www.metascapeabm.com>>
- **NetLogo** <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>
- **Quicksilver** <<http://quicksilver.tigris.org/>>
- **Repast** <<http://repast.sourceforge.net/>>
- **SIM_AGENT** <<http://www.cs.bham.ac.uk>>
- **SeSAm** <<http://www.simsesam.de/>>
- **SimPy** <<https://pypi.python.org/pypi/simpy>>
- **Swarm** <<http://www.swarm.org/>>
- **Xholon** <<http://www.primordion.com/Xholon>>
- **Zeus** <<http://labs.bt.com/projects/agents/zeus/>>

Distribuição gratuita

- **deX** <<http://dextk.org/>>
- **StarLogo** <<http://education.mit.edu/starlogo/>>
- **StarLogoT** <<http://ccl.northwestern.edu/cm/StarLogoT/>>

- **VisualBots** <<http://visualbots.com/>>

Softwares comercializados

- **AgentSheets** <<http://agentsheets.com/>>
- **iGEN** <http://www.chiinc.com/products/products_igen.htm>
- **AnyLogic** <<http://www.xjtek.com/>>
- **MASS** <<http://mass.aitia.ai/>>

ANEXO A – PROGRAMAÇÃO MODELO DE SEGREGAÇÃO (NETLOGO)

```

globals [
  percent-similar ;; on the average, what percent of a turtle's neighbors
                  ;; are the same color as that turtle?
  percent-unhappy ;; what percent of the turtles are unhappy?
]

turtles-own [
  happy? ;; for each turtle, indicates whether at least %-similar-wanted percent of
          ;; that turtle's neighbors are the same color as the turtle
  similar-nearby ;; how many neighboring patches have a turtle with my color?
  other-nearby ;; how many have a turtle of another color?
  total-nearby ;; sum of previous two variables
]

to setup
  clear-all
  ;; create turtles on random patches.
  ask patches [
    if random 100 < density [ ;; set the occupancy density
      sprout 1 [
        set color one-of [red green]
      ]
    ]
  ]
  update-turtles
  update-globals
  reset-ticks
end

;; run the model for one tick
to go
  if all? turtles [ happy? ] [ stop ]
  move-unhappy-turtles
  update-turtles
  update-globals
  tick
end

;; unhappy turtles try a new spot
to move-unhappy-turtles
  ask turtles with [ not happy? ]
  [ find-new-spot ]
end

;; move until we find an unoccupied spot
to find-new-spot
  rt random-float 360
  fd random-float 10
  if any? other turtles-here [ find-new-spot ] ;; keep going until we find an unoccupied patch
  move-to patch-here ;; move to center of patch
end

to update-turtles
  ask turtles [
    ;; in next two lines, we use "neighbors" to test the eight patches
    ;; surrounding the current patch
    set similar-nearby count (turtles-on neighbors) with [ color = [ color ] of myself ]
    set other-nearby count (turtles-on neighbors) with [ color != [ color ] of myself ]
    set total-nearby similar-nearby + other-nearby
    set happy? similar-nearby >= (%-similar-wanted * total-nearby / 100)
    ;; add visualization here
    if visualization = "old" [ set shape "default" ]
    if visualization = "square-x" [
      ifelse happy? [ set shape "square" ] [ set shape "square-x" ]
    ]
  ]
end

to update-globals
  let similar-neighbors sum [ similar-nearby ] of turtles
  let total-neighbors sum [ total-nearby ] of turtles
  set percent-similar (similar-neighbors / total-neighbors) * 100
  set percent-unhappy (count turtles with [ not happy? ]) / (count turtles) * 100
end

```

ANEXO B – PROGRAMAÇÃO MODELO SUGARSCAPE (NETLOGO)

```

turtles-own [
  sugar          ;; the amount of sugar this turtle has
  metabolism     ;; the amount of sugar that each turtles loses each tick
  vision         ;; the distance that this turtle can see in the horizontal and vertical directions
  vision-points  ;; the points that this turtle can see in relative to it's current position (based on vision)
]

patches-own [
  psugar        ;; the amount of sugar on this patch
  max-psugar    ;; the maximum amount of sugar that can be on this patch
]

;;
;; Setup Procedures
;;

to setup
  clear-all
  create-turtles initial-population [ turtle-setup ]
  setup-patches
  reset-ticks
end

to turtle-setup ;; turtle procedure
  set color red
  set shape "circle"
  move-to one-of patches with [not any? other turtles-here]
  set sugar random-in-range 5 25
  set metabolism random-in-range 1 4
  set vision random-in-range 1 6
  ;; turtles can look horizontally and vertically up to vision patches
  ;; but cannot look diagonally at all
  set vision-points []
  foreach n-values vision [? + 1]
  [ set vision-points sentence vision-points (list (list 0 ?) (list ? 0) (list 0 (- ?)) (list (- ?) 0)) ]
  run visualization
end

to setup-patches
  file-open "sugar-map.txt"
  foreach sort patches
  [
    ask ?
    [
      set max-psugar file-read

      set psugar max-psugar
      patch-recolor
    ]
  ]
  file-close
end

;;
;; Runtime Procedures
;;

to go
  if not any? turtles [
    stop
  ]
  ask patches [
    patch-growback
    patch-recolor
  ]
  ask turtles [
    turtle-move
    turtle-eat
    if sugar <= 0
    [ die ]
    run visualization
  ]
  tick
end

to turtle-move ;; turtle procedure
  ;; consider moving to unoccupied patches in our vision, as well as staying at the current patch
  let move-candidates (patch-set patch-here (patches at-points vision-points) with [not any? turtles-here])
  let possible-winners move-candidates with-max [psugar]
  if any? possible-winners [
    ;; if there are any such patches move to one of the patches that is closest
    move-to min-one-of possible-winners [distance myself]
  ]
end

to turtle-eat ;; turtle procedure
  ;; metabolize some sugar, and eat all the sugar on the current patch
  set sugar (sugar - metabolism + psugar)
  set psugar 0
end

```

```

to patch-recolor ;; patch procedure
  ;; color patches based on the amount of sugar they have
  set pcolor (yellow + 4.9 - psugar)
end

to patch-growback ;; patch procedure
  ;; gradually grow back all of the sugar for the patch
  set psugar min (list max-psugar (psugar + 1))
end

;;
;; Utilities
;;

to-report random-in-range [low high]
  report low + random (high - low + 1)
end

;;
;; Visualization Procedures
;;

to no-visualization ;; turtle procedure
  set color red
end

to color-agents-by-vision ;; turtle procedure
  set color red - (vision - 3.5)
end

to color-agents-by-metabolism ;; turtle procedure
  set color red + (metabolism - 2.5)
end

; Copyright 2009 Uri Wilensky.
; See Info tab for full copyright and license.

```