### UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES

### LAERTE JOSE DURAN JUNIOR

Análise do surgimento de polos de ocupação urbana à ótica de Sistemas Complexos

**SÃO PAULO** 

#### **LAERTE JOSE DURAN JUNIOR**

Análise do surgimento de polos de ocupação urbana

à ótica de Sistemas Complexos

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de

Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Complexos

Orientador: Prof. Dr. Camilo Rodrigues Neto

São Paulo

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

# CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO Biblioteca Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo

Duran Junior, Laerte Jose

Análise do surgimento de polos de ocupação urbana à ótica de sistemas complexos / Laerte Jose Duran Junior ; orientador, Camilo Rodrigues Neto. – São Paulo, 2012. 132 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Complexos, Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo.

1. Sociologia urbana. 2. Sistemas dinâmicos. 3. Planejamento urbano. 4. Cidades - Simulação. I. Rodrigues Neto, Camilo, orient. II. Título.

CDD 22.ed. - 307.76

Nome: Laerte Jose Duran Junior

Título: Análise do surgimento de polos de ocupação urbana à ótica de Sistemas Complexos

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprova	do em:
--------	--------

#### Banca Examinadora

Prof. Dr.: Camilo Rodrigues Neto	Instituição: <b>EACH-USP</b>
Julgamento:	Assinatura:
Prof. Dr.: <b>Domingos Alves</b>	Instituição: <b>FMRP-USP</b>
Julgamento:	Assinatura:
Prof. Dr.: Wagner Pralon Mancuso	Instituição: <b>EACH-USP</b>
Julgamento:	Assinatura:

# **DEDICATÓRIA**

À minha família, em especial minha esposa Heléia e meu filho Pedro, pelo amor, compreensão, carinho e apoio.

À memória de meus pais.

# **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Camilo Rodrigues Neto pelo apoio incondicional e por todas as horas disponibilizadas para orientação e apoio a este trabalho.

A todos os professores do programa de pós-graduação em Modelagem de Sistemas Complexos por terem compartilhado conhecimento e pelo incentivo em todos os momentos.

Ao meu amigo Fábio Seco, que viabilizou a participação nas aulas e a construção deste sonho.

A todos aqueles que somaram comigo na crença de que chegar até aqui seria possível.

### RESUMO

Desde os primeiros anos do século XXI mais da metade da população mundial passou a habitar em regiões urbanas. Este processo de urbanização, acelerado a partir da revolução industrial, trouxe consigo benefícios inegáveis à mas também possui externalidades humanidade. evidentes congestionamento, a violência e a segregação. Preocupada com estes problemas, surge a ciência do planejamento urbano, ora atuando na antecipação dos fatos, ora remediando os problemas existentes, utilizando as mais variadas propostas que partem de correntes de pensamento compostas por estudiosos das cidades que, nesta difícil tarefa, procuram embasamento em experiências anteriores ou em estudos que invariavelmente envolvem outras áreas de conhecimento, como sociologia, economia e engenharia. Paralelamente a estes esforços, surge nos últimos 40 anos, outra área de conhecimento, denominada Sistemas Complexos, para estudar fenômenos físicos, biológicos, econômicos e sociais, entre outros, utilizando as técnicas provenientes da dinâmica não linear, da física estatística e da computação baseada em agentes, e que vem sendo progressivamente aplicada ao estudo das cidades. Neste trabalho é realizada uma breve revisão da história do surgimento e da evolução das cidades, apresentada na seção 2, e em seguida, na seção 3, é apresentada a teoria dos sistemas complexos, descrevendo as principais características dos sistemas que podem ser analisados à ótica desta área de conhecimento. Na seção 4 é exposto o embasamento teórico e empírico que permite a fusão entre as duas ciências (Planejamento Urbano e Sistemas Complexos). Na seção 5 são reproduzidos alguns estudos computacionais da expansão urbana, consolidados na literatura científica que utilizam técnicas inerentes à ótica de sistemas complexos. Na seção 6 é proposto um modelo computacional simplificado que permite a visualização, extração de dados e análise da ocupação territorial com ênfase no estudo do custo de deslocamento no interior de um centro urbano, permitindo a conclusão, apresentada na seção 7, de que a cidade é um sistema complexo e que a abordagem através da união das áreas de conhecimento é promissora quando trata de assuntos relativos à expansão urbana, podendo ser de grande valor na elaboração de propostas que visem a amenização ou eliminação das externalidades que há tempo têm sido motivo de preocupação para os habitantes dos centros urbanos.

**Palavras chave:** Sistemas Complexos; Planejamento Urbano; Expansão Urbana; Modelos Baseados em Agentes.

### **ABSTRACT**

Since the beginning of the XXI century, more than half of the world population lives in urban areas. This process, accelerated with the industrial revolution, brought undeniable advantages, but also several handicaps, externalities such as traffic jams, violence and segregation. Concerned with these problems, a Urban Planning science is developed, acting in the effects as well as in the causes of the problems. In this task, the scientists use tools originated in several fields, such as economy, sociology and engineering. Meanwhile, in the last four decades, a different approach appears. It is called Complex Systems theory, targeted to deal with complex physical, biological, economical and social phenomena, utilizing techniques borrowed from the Non-linear dynamics, from the Statistical physics and from the Agent based models. It has been progressively applied to the Urban Planning science. This work reviews the appearance and development of the cities in the section 2, and in the section 3, the principles of Complex Systems theory are presented. In the section 4 it is showed that the Urban Planning science can profit from the Complex Systems approach. Section 5 reproduces some previous early computational models from the literature. This work contribution is presented next, in the section 6, a simplified model, based on Complex System approach, which allows visualization and urban occupation analyses in function of the transportation costs. The last section concludes that the view of the city as a complex system has many advantages when dealing with the urban expansions and the externalities arising from this process.

**Key words:** Complex Systems; Urban Planning; Urban Sprawl; Agent-Based Models.

# **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Imagem do litoral da Noruega. Um exemplo de fractalidade44
Figura 2 – Exemplo de visualização da tela do software NetLogo para o modelo da
segregação proposto por Schelling (1978) – ambiente da simulação70
Figura 3 – Exemplo de visualização da Tela do software NetLogo – código da
simulação72
Figura 4 - Simulação dos modelos de Kohl, Burgess e Hoyt, por Maretto, Assis e
Galvak (2010)77
Figura 5 - Reprodução dos modelos de Kohl, Burgess e Hoyt, utilizando o software
NetLogo78
Figura 6 - Condição inicial da simulação atribuindo valor aos sítios79
Figura 7 - Condição intermediária após o início da dinâmica de realocação dos
agentes80
Figura 8 - Arranjo final (após simulação) para outra condição inicial81
Figura 9 - Panorama do tabuleiro após a simulação da dinâmica entre os habitantes.
82
Figura 10 - Panorama da ocupação e flutuação da população nas cidades82
Figura 11 - Tabuleiro do NetLogo, ocupado por cidades (círculos) e habitantes
(quadrados)85
Figura 12 - Tabuleiro do NetLogo com a demarcação do centro e área de cada
cidade86

Figura 13 - Apresentação da distância (d) medida entre um habitante e o ponto de interesse "1" no tabuleiro
Figura 14 - Vizinhança de Moore, que representa 8 opções (em vermelho) de mudança ao habitante que está na posição central (em azul)91
Figura 15 - Algoritmo da dinâmica de ocupação do solo, procurando a minimização das distâncias entre o habitante e seus vínculos
Figura 16 - Barras deslizantes para ajuste do percentual das classes sociais distribuídas entre os habitantes
Figura 17 - Tabuleiro de apresentação do NetLogo com 20 centros de cidades e 2000 habitantes
Figura 18 - Calibração do modelo através da comparação dos resultados com a literatura publicada. Esquerda: reprodução do modelo de Kohl por Maretto, Assis e Gavlak (2010).Direita: Reprodução de modelo de Kolh para uma cidade99
Figura 19 - Alteração da simulação do modelo de Kohl para 2, 3, 4 e 5 centros atratores
Figura 20 - Diferença da condição inicial do modelo de Kohl e do modelo proposto. À direita: condição inicial do modelo de Kohl. À esquerda: variação da condição inicial do modelo proposto
Figura 21 - Comparativo entre o modelo de Kohl e a proposta com a mesma configuração
Figura 22 - Comparação entre as simulações105

Figura 23 - Evolução da ocupação considerando 4 cidades e cada habitante com o
vínculo em apenas uma cidade106
Figura 24 - Simulação considerando que cada habitante possui dois pontos de
interesse no tabuleiro107
Figura 25 – Simulação considerando que cada habitante possui três pontos de
interesse (vínculos) no tabuleiro107
Figura 26 - Demonstração das configurações finais da ocupação (partindo das
mesmas condições iniciais), alterando-se apenas o fator k entre 0,50, 1,00 e 2,00.
109
Figura 27 – Apresentação das configurações finais da ocupação (partindo das
mesmas condições iniciais, com apenas duas cidades), alterando-se apenas o fator
k entre 0.50, 1.00 e 2.00110
Figura 28 - posições que minimizam a somatória das distâncias após serem
elevadas ao exponente k = 0.50111
Figura 29 - posições que minimizam a somatória das distâncias após serem
elevadas ao exponente k = 1.00112
Figura 30 - posições que minimizam a somatória das distâncias após serem
elevadas ao exponente k = 2.00113
Figura 31 - padrões de ocupação para valores intermediários do exponente k acima
e abaixo de 1.00114
Figura 32 - demonstra a variedade de resultados para nove configurações diferentes
das cidades, variando apenas o fator "k" (kappa)117

Figura 33 - gráfico relacionando a população da cidade e sua posição no rank das
cidades (valores normalizados pela média)118
Figura 34 - gráfico retirado da literatura (BATTY, 2008), relacionando a população da
cidade e sua posição no rank das cidades (valores normalizados pela média)119
Figura 35 - comparação dos padrões históricos de ocupação da cidade de Belo
Horizonte (MG) com os padrões obtidos na simulação do modelo proposto com
ajuste de k igual à 1121
Figura 36 - comparação dos padrões históricos de ocupação da cidade de Belo
Horizonte (MG) com os padrões obtidos na simulação do modelo proposto com
ajuste de k próximo de 2122
Figura 37 - comparação dos padrões históricos de ocupação da cidade de Belo
Horizonte (MG) com os padrões obtidos na simulação do modelo proposto com
ajuste de k próximo de 0123

# **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – lista de áreas de cada cidade representada na figura	87
Tabela 2 - combinações verificadas	104

# **LISTA DE SIGLAS**

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MBA – Modelo Baseado em Agentes (tradução de ABM - Agent-Based Models)

AC – Autômato Celular

SIG – Sistema de Informações Georeferenciadas

# **SUMÁRIO**

1	NTRODUÇÃO	19
2 /	AS CIDADES	21
	2.1 A EVOLUÇÃO DA CIDADE PÓS-REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	21
	2.2 A DINÂMICA DA CIDADE	22
	2.3 SOBRE O ESTUDO DA CIDADE	23
	2.4 A RELEVÂNCIA DO ESTUDO DA CIDADE	26
	2.4.1 A necessidade de novas abordagens	27
	2.5 OBJETIVOS DESTE ESTUDO	30
3 I	MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS	31
	3.1 SISTEMAS COMPLEXOS	31
	3.1.1 Complicado ou complexo?	33
	3.2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS COMPLEXOS	35
	3.2.1 Interação	36
	3.2.2 Conectividade	37
	3.2.3 Auto-organização	38
	3.2.4 Diversidade	38
	3.2.5 Evolução	40

3.2.6 Emergência	41
3.2.7 Realimentação	43
3.2.8 Escala e fractalidade	43
3.2.9 Lei de potência	45
3.3 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO ESTUDO DE S COMPLEXOS	
3.4 O MODELO E A REALIDADE	47
3.5 O PROCESSO DE MODELAGEM	47
3.5.1 Condições iniciais do sistema	49
3.5.2 Regras de transição	51
3.5.3 Resultados de uma modelagem	52
3.6 CALIBRAÇÃO DE UM MODELO	53
3.7 FERRAMENTAS PARA MODELAGEM	53
3.7.1 Softwares para modelagem	54
3.7.2 Autômato Celular (Cellular Automato – CA)	55
3.7.3 Modelagem Baseada em Agentes (Agent-Based Model – ABM)	56
4 ESTUDANDO A CIDADE COMO UM SISTEMA COMPLEXO	58
4.1 A COMPLEXIDADE DOS PROCESSOS URBANOS	59
4.2 A COMPLEXIDADE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO URBANO	60

4.3 O PLANEJAMENTO URBANO E A COMPLEXIDADE	61
4.4 UTILIZANDO <i>AGENT-BASED MODEL</i> (MBA) PARA SIMULAR CIDAD	E64
4.4.1 O reducionismo - escala	65
4.4.2 Vantagens do uso de MBA	66
4.4.3 Limites do uso de MBA	66
4.5 MODELOS DE FORMAÇÃO DA CIDADE	67
5 REVISÃO DOS ESTUDOS DA CIDADE COM A UTILIZAÇÃO DA MBA	68
5.1 MÉTODOS	68
5.1.1 Pergunta da pesquisa	69
5.1.2 Escolha da ferramenta adequada	69
5.1.3 Programa de simulação computacional - NetLogo	69
5.2 O RECORTE DENTRO DA DINÂMICA DA CIDADE	73
5.3 ESTUDO DOS MODELOS DISPONÍVEIS	73
5.3.1 Breve resumo sobre os modelos propostos na literatura	74
5.3.2 Modelo de Segregação de Schelling	74
5.3.3 Modelo de ocupação de Kohl	74
5.3.4 Modelo de ocupação de Burgess	75
5.3.5 Modelo de ocupação de Hoyt	75
5.3.6 Modelo de Batty e Kim	76

5.4 ALTERAÇÕES PROPOSTAS	.78
5.4.1 Alterações iniciais para entendimento da dinâmica de ocupação de sí	tios
	.78
5.4.2 Verificando o surgimento de novos centros	83
6. O MODELO PROPOSTO	84
6.1 COMPONENTES DO MODELO PROPOSTO	84
6.1.1 O tabuleiro da simulação	84
6.1.2 As cidades	.86
6.1.3 Os habitantes	87
6.1.4 Vínculos entre habitantes e cidades	87
6.1.5 Distâncias no tabuleiro	88
6.1.6 Custo de deslocamento	89
6.1.7 Estratégia de ocupação do tabuleiro	90
6.1.8 Condições de ocupação	90
6.1.9 Dinâmica de mudança no tabuleiro	90
6.2 AJUSTES DAS CONDIÇÕES INICIAIS	93
6.2.1 Quantidade de cidades	94
6.2.2 Quantidade de habitantes	94
6.2.3 Quantidade de vínculos	96

6.2.4 Exponente do custo de deslocamento – k (kappa)9	<del>)</del> 6
6.2.5 Montagem da tela inicial da simulação9	)7
6.3 SIMULAÇÕES9	)8
6.3.1 Calibração do modelo9	8(
6.3.2 Variação na inserção dos habitantes10	)1
6.3.3 As combinações iniciais dos mundos simulados10	)3
6.4 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS10	)5
6.4.1 Pequenas alterações dos modelos da literatura10	)5
6.4.2 Alterações no cálculo do custo de deslocamento10	)8
6.4.3 Aproximando a simulação da realidade – vários pontos de interesse11	4
6.4.4 Comparando os resultados com a realidade – A expansão urbana em Bel	
Horizonte11	9
7. CONCLUSÕES12	24
8. BIBLIOGRAFIA12	26

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo Johnson (2001) o desenvolvimento das ciências é um processo que tende a evoluir com o passar do tempo. Os registros das descobertas científicas atravessam fronteiras, possibilitando aos cientistas o envolvimento na produção de conhecimento, agregando ou alterando informações que resultam em avanços no entendimento dos assuntos alvos das pesquisas científicas.

Neste processo de produção de conhecimento, técnicas e abordagens são aprimoradas ou desenvolvidas com o intuito de explorar, da melhor maneira possível, os dados existentes, com vista na perspectiva de extrair novas informações e nova ótica sobre o assunto estudado.

No que se refere às novas formas de abordagem, muitos cientistas, quando da publicação de seus estudos, anseiam pela necessidade de ferramentas ou métodos que pudessem explicar fenômenos já percebidos em suas pesquisas, porém ainda não passíveis de ser completamente explicados à época da publicação de resultados (JOHNSON, 2001), (CHOAY, 2005), (JACOBS, 1961, citada por BATTY, 2007). Segundo Miller e Page (2007) a área de conhecimento de Sistemas Complexos tem sido utilizada como ferramenta no auxílio do entendimento de muitas pesquisas iniciadas onde os fenômenos estudados têm esbarrado em sistemas adaptáveis e auto-organizáveis.

Entre os vários campos da pesquisa que tem passado por este processo evolutivo, encontra-se o planejamento urbano (PORTUGALI, 2001). Apesar de ser uma ciência recente (despertada após a revolução industrial), o planejamento urbano carrega uma bagagem de informações que datam de, pelo menos, 3000 anos, herdando experiências que se acumulam desde os estudos sobre as cidades Gregas (HAROUEL, 1990).

Com ênfase neste binômio: "novas abordagens" e "necessidade de ferramentas auxiliares" para o entendimento dos processos inerentes da cidade (CHOAY, 2005), este trabalho analisa o estágio atual da pesquisa científica na área de concentração que envolve os estudos do crescimento da cidade com o auxílio da Modelagem de Sistemas Complexos e propõe alterações, partindo de resultados já encontrados em pesquisas de Hoyt (1939), Burgess (1925), Batty (2008) entre outros, buscando progredir na compreensão da dinâmica de ocupação do solo urbano, auxiliando na explicação de fenômenos emergentes e procurando contribuir para a melhoria das ciências de planejamento urbano desenvolvidas em todos os centros urbanos.

Para que se alcance o objetivo deste trabalho, ele é desenvolvido em etapas, iniciando-se pela revisão histórica e conceitos sobre cidade, analisando as características de um sistema complexo, caracterizando a cidade como um sistema complexo, revisando a literatura atual que trata das cidades à ótica de sistemas complexos e, por fim, a construção de um novo modelo, partindo de alterações nos modelos existentes, considerando o histórico desenvolvido até os dias atuais.

### 2 AS CIDADES

Apesar de não haver consenso quanto à definição de cidade, segundo Veiga (2001) a classificação das aglomerações urbanas evoluiu em função do tempo. O primeiro registro brasileiro se refere ao Decreto-Lei 311/38 que elevou todas as sedes municipais brasileiras ao status de cidade. No mesmo Decreto-Lei estava preconizado que as futuras cidades precisavam, antes de serem assim declaradas, contar com um agrupamento de, pelo menos, 200 casas.

Algumas alterações para classificação de "cidade" foram propostas posteriormente, sendo que as mais marcantes ocorreram nos períodos pós-1946, pós-1964 e pós-1988. Em 1991 o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) definiu os centros urbanos considerando apenas o grau de intensidade de ocupação humana. Aglomerações até 100 mil habitantes são consideradas pequenas cidades, entre 100 mil e 500 mil, cidades médias e acima de 500 mil habitantes, grandes cidades.

A atual legislação brasileira atribui a cada município o direito de declarar o perímetro urbano conforme diretrizes próprias e os interesses da coletividade.

## 2.1 A EVOLUÇÃO DA CIDADE PÓS-REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Com o advento da revolução industrial a cidade passou a possuir novas características e padrões de desenvolvimento. As cidades que possuíam localização privilegiada, no que diz respeito à facilidade de acesso e condições de mobilidade interna, obtiveram vantagens sobre as demais regiões para ampliarem-se. Este fenômeno é confirmado por Esteves (2003) considerando que as cidades com melhor localização foram favorecidas pelo desenvolvimento dos meios de transporte, exercendo com melhor desempenho a tarefa de agregar matérias-primas disponíveis nas regiões periféricas e acelerando o escoamento da produção local.

Com a expansão territorial, aumento das atividades internas e o surgimento de novos usos e ocupações do solo urbano, sobretudo a partir da segunda metade do século XVIII, surgiram desafios para administradores públicos e estudiosos do urbanismo em manter o controle sobre o desenvolvimento das cidades. Muitas propostas de planejamento urbano foram aplicadas desde a revolução industrial, partindo da construção de uma cidade ideal que pudesse, até certo ponto, ser adequada para os seus ocupantes (CHOAY, 2005). Estas soluções representam, como denominado por Furtado e Delden (2011), as propostas com visão "de-cimapara-baixo", onde o cenário é tratado com base no estado do sistema, desconsiderando os motivos geradores da situação analisada.

Por conta desta visão global, atualmente podemos ver ações governamentais que, devido à demora em serem implantadas, tornam-se obsoletas antes da sua conclusão, pois não consideram que a condição da cidade em dado momento é resultado da dinâmica populacional e tende a variar na escala temporal.

### 2.2 A DINÂMICA DA CIDADE

Apesar dos parâmetros estabelecidos por lei, a definição de cidade tem-se mostrado vaga, pouco uniforme e insuficiente para que, em primeira análise, definase uma determinada localidade como uma cidade. A utilização de dados estatísticos ou empíricos, tais como densidade populacional, população total, área ocupada, presença de monumentos históricos ou índices de congestionamento, têm sido a solução encontrada por alguns autores para atribuir o *status* de cidade para áreas ocupadas (PELLETIER; DELFANTE, 1997).

Mesmo com a utilização de conceitos sobre as funções mínimas de uma cidade, a análise ainda mostra-se esvaziada pela subjetividade. A necessidade da manutenção de atividades mínimas, tais como serviços bancários, administrativos,

de saúde ou segurança pública ainda não se mostram suficientemente eficazes na tarefa de caracterizar aglomerações humanas como cidade.

Segundo Pelletier e Delfante (1997), ao se falar em cidade, a primeira imagem a ser associada a esta palavra está intimamente ligada ao plano territorial, ou seja, o local onde ocorrem as dinâmicas de relações entre os habitantes, que reforçam a ideia de movimento. Portanto não é equivocada a atribuição da palavra "dinâmica" à cidade. A dinâmica da cidade é fruto da ação individual, seja representada por cada indivíduo interagindo diretamente com os demais, seja pela interação dos agentes na esfera pública ou privada, resultando em influências na decisão de todos os demais membros do sistema (WU; SILVA, 2010).

Neste sentido, Wu e Silva (2010) afirmam que a cidade é composta por elementos dinâmicos, como por exemplo, pessoas, processos e interações, e também por elementos fixos, neste caso o plano territorial e a infraestrutura urbana. Portanto para o tratamento deste conjunto é necessário considerar o resultado da somatória de todos os elementos, aproximando o estudo à realidade da cidade. Vale ressaltar que Miller e Page (2007) afirmam, reiteradas vezes, que o resultado final, muitas vezes, não é simplesmente a somatória das partes. Desta afirmação surge a necessidade do desenvolvimento de estudos com capacidade de abordagem ampla, sendo possível a junção das variáveis que interferem no processo, tratando-os como dependentes entre si.

#### 2.3 SOBRE O ESTUDO DA CIDADE

Ainda que considerado o longo período de existência da cidade – mais de 3.000 anos, conforme Petta e Ojeda (1999) – pode-se afirmar que a preocupação com o arranjo físico, social e humano da cidade acentuou-se com o advento da

revolução industrial (ESTEVES, 2003), apesar de haver registros de estudos sobre as cidades pré-industriais realizados por Kohl (MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010).

Segundo Wu e Silva (2010), há décadas empregam-se esforços em prol do entendimento da dinâmica de uso do solo, porém a compreensão tem sido limitada em função das técnicas tradicionais utilizadas (MILLER; PAGE, 2007). A partir da década de 1970, com o avanço na capacidade de processamento dos computadores, a utilização da inteligência artificial e análises que procuram integrar os diversos aspectos da cidade, foi iniciado o processo que tem proporcionado a complementação das técnicas de análise utilizadas até então, resultando em progresso no conhecimento da dinâmica de ocupação dos solos urbanos.

Apesar de todo o avanço verificado com a utilização da inteligência artificial, a escolha do conjunto de métodos corretos é essencial para um resultado satisfatório. Atualmente o método conhecido por autômato celular tem sido amplamente utilizado na simulação de dinâmica de uso do solo (WU; SILVA, 2010). Vale ressaltar que a escolha do método, ou conjunto de métodos a serem aplicados na simulação computacional de cidades deve ser precedida da análise do conjunto que compõe o sistema e do objetivo final a ser alcançado.

Segundo Batty (2008), nos últimos 25 anos a compreensão da cidade tem avançado no sentido de revelar padrões nos processos que levam ao crescimento espacial da cidade, chegando, o mesmo autor, a afirmar que a cidade deve ser tratada como um sistema complexo, devido apresentar características inerentes à complexidade, utilizando vasta bibliografia para embasar esta afirmação.

Maretto, Assis e Gavlak (2010) apresentam estudos realizados no final do século XIX e meados do século XX, analisados novamente com o auxílio de ferramentas computacionais, o que leva à conclusão de que o crescimento da

cidade se dá ao redor de pontos econômicos estratégicos os quais, por consequência, são alimentados de serviços pelos agentes agregados. A formação de grupos, através da descentralização de pontos de interesse, dá à cidade o aspecto de vários pontos semelhantes, porém em escalas diversificadas, fenômeno este verificado pela auto-similaridade dos grupos formados. Esta semelhança em escala também pode ser verificada analisando as redes de transporte de uma ocupação urbana, bem como no mapeamento de vias terrestres (BATTY, 2008).

Apesar do comportamento parecido verificado em vários aspectos da cidade, é necessário ressaltar que algumas características variam em função da escala em que se estuda a cidade, como por exemplo, o tempo empregado nos deslocamentos diários realizados no interior da cidade (conhecido como pêndulo urbano), onde o tempo dispensado a esta prática, apesar de não ser linear, é proporcional ao tamanho da cidade. Analisando esta situação Batty (2005) questiona sobre o tamanho ideal de uma cidade, preocupação já discutida pelos filósofos gregos, a 3.000 anos atrás.

Embora os estudos sobre a cidade tenham mostrado avanços significativos, é fato que o entendimento das condições ideais de ocupação do solo é uma meta ainda inalcançada. A complementação dos estudos já realizados (MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010) com o auxílio de ferramentas atuais e a integração das variáveis envolvidas na dinâmica da cidade tem-se apresentado como uma metodologia promissora na contribuição do entendimento dos processos de ocupação urbana. Melhorias na qualidade de vida passam, indispensavelmente, por melhorias no ambiente em que se vive. Esta premissa remete à importância dos estudos já realizados e da necessidade da continuidade da investigação científica nos assuntos relacionados ao planejamento urbano.

### 2.4 A RELEVÂNCIA DO ESTUDO DA CIDADE

É inegável a relevância da contribuição dos estudos tradicionais sobre o planejamento urbano e sobre as cidades que foram desenvolvidos até os dias atuais. As discussões entre os humanistas, os progressistas e os naturalistas (correntes de pensamento que emergiram em meados do século XX), em muito contribuíram para o debate sobre a administração das cidades e em muitos casos resultaram em boas soluções urbanísticas.

Em contrapartida, segregação, desigualdade, violência, subemprego e condições impróprias para habitação são alguns problemas trazidos pela urbanização (MOREIRA; SENE, 2005), (CHOAY, 2005), principalmente a partir da acentuação do processo de crescimento propiciado pela revolução industrial, ocorrida a partir da segunda metade do século XVIII. Contudo é inegável que a sociedade pós-revolução industrial tem sido favorecida pelos avanços resultantes do emprego de equipamentos e técnicas desenvolvidas na era posterior ao século XVIII. A organização social em torno das cidades tem facilitado o acesso a serviços de saúde, transporte, lazer e demais benefícios que seriam inviáveis, não fossem os avanços tecnológicos frutos da revolução industrial.

Diante deste quadro de externalidades, surgiu a necessidade de propostas de planejamento urbano para as cidades, visando eliminar ou amenizar os efeitos negativos da revolução e maximizar os benefícios oriundos do progresso industrial. Choay (2005) apresenta em sua obra um apanhado histórico da preocupação do homem em propor melhorias para as condições dos trabalhadores nas sociedades pós-industriais. Já em 1798, Robert Owen preocupa-se com este assunto. Apesar de toda a carga filosófica no trato da sociedade, é visível que a melhoria das condições da habitação e de transporte dos trabalhadores está entre as reivindicações das organizações sociais desde os primórdios da cidade pós-industrial.

Ainda neste foco, no decorrer das décadas posteriores ao início da revolução industrial, até os dias atuais, é possível perceber a crescente preocupação com as questões relacionadas ao planejamento urbano. Novas filosofias pregam que a melhoria das condições de trabalho, habitabilidade, locomoção e outros serviços urbanos tornam o cidadão moderno mais produtivo, de forma que o aumento da capacidade produtiva da mão de obra está diretamente relacionada às condições de vida do homem. O aperfeiçoamento das organizações sociais tem resultado em aumento das forças que impulsionam a necessidade de soluções aos efeitos negativos oriundos das formas de ocupação do solo desde a gênese das cidades até a atualidade.

Diante deste problema, cientistas têm dedicado sua vida de pesquisas buscando explicações e soluções que possam contribuir para a solução dos problemas encontrados nas cidades, contudo, em algumas situações, as abordagens tradicionais não têm sido suficientes para a interpretação dos resultados encontrados (MILLER e PAGE, 2007). Diante desta situação é possível ver que alguns estudiosos clamam por novas abordagens para interpretação de suas teorias.

### 2.4.1 A necessidade de novas abordagens

O discurso da necessidade de novas metodologias e abordagens para o estudo da cidade não é novo (CHOAY, 2005), mas também se faz necessário à medida que a cidade é um organismo em constante mudança.

As propostas que surgiram até então tratam os agentes que interagem na sociedade como meros figurantes na cidade, propondo modelos únicos que têm a pretensão de abranger todas as necessidades dos habitantes de determinada localidade (visão tradicionalmente progressista). Há registros de casos onde o planejamento de uma cidade é copiado em outra região, outro país e até mesmo em

outro continente, desconsiderando o histórico cultural e características como clima, relevo, comportamento ou população local (CHOAY, 2005).

Estudar a cidade pela média do comportamento humano tem-se mostrado uma abordagem insuficiente. Miller e Page (2007) fazem analogia do funcionamento de uma colmeia de abelha, onde a percepção da temperatura interna da colmeia varia entre os indivíduos que compõem a colmeia: caso esta percepção fosse homogênea, os autores afirmam que a colmeia entraria em colapso, pois todos os indivíduos entrariam em ação a partir de determinada temperatura, fazendo com que a variação repentina (para cima ou para baixo) alterasse o comportamento de todos ao mesmo tempo e a temperatura iria variar muito rapidamente para cima e para baixo, de forma que jamais seria possível a estabilização da temperatura interna no valor ideal para a colmeia.

Miller e Page (2007) são taxativos ao afirmarem que, em sistemas complexos (considerando a cidade como um sistema complexo) as ferramentas tradicionais de análise das sociedades adaptativas são ineficientes, pois resultam em conclusões parciais, podendo chegar ao extremo de serem enganadoras. Este talvez seja, provavelmente, o motivo pelo qual a implantação de alguns planos de gerenciamento das cidades tenha fracassado.

Contudo os mesmos autores (MILLER; PAGE, 2007) frisam que as técnicas e avanços alcançados até hoje não devem ser desprezados, mas sim utilizados em conjunto com a abordagem proposta pela modelagem de sistemas complexos. A condição ideal é a de complementação, pois cada ferramenta desempenha um papel específico no estudo da ciência. Enquanto a modelagem de sistemas complexos é capaz de reproduzir simulações da vida real, as ferramentas tradicionais devem ser utilizadas para interpretar os resultados e os processos revelados na modelagem.

Dentro da necessidade de novas abordagens para estudo das cidades, Feng, Feng e Sheng (2009) afirmam que as cidades são sistemas complexos e, portanto, a modelagem está se tornando uma ferramenta na análise da "vida" da cidade. O estudo da cidade deve ter uma visão interdisciplinar, envolvendo áreas de estudo como a ciência da computação, urbanismo, arquitetura, engenharia, geografia e economia, entre outras (WU; SILVA, 2010).

A inteligência artificial é promissora na busca do entendimento dos processos dinâmicos da cidade, uma vez que torna possível a análise simultânea das variáveis e a análise reversa dos processos, ou seja, no sentido individual para o global, o que possibilita o contínuo desenvolvimento de ferramentas alimentando a perspectiva de futuro aprofundamento do saber (WU; SILVA, 2010).

A complexidade da dinâmica da cidade é considerada tal por Batty (2008) que o leva a afirmar que os estudos devem ter o objetivo inicial de demonstrar quais são os limites do planejamento urbano. Após o reconhecimento destes limites será possível utilizar a ferramenta da melhor maneira possível.

A lei de potência que relaciona alguns fatores de crescimento físico (área ocupada) a fenômenos econômicos e sociais (renda, trânsito, etc.), assim como a obediência às relações de escala faz com que a cidade assuma características de um sistema complexo (BATTY, 2008).

Analisando o histórico dos estudos desenvolvidos até os dias atuais e as novas demandas que surgiram com a alteração dos cenários das cidades no decorrer da história, fica claro que o estudo da complexidade dos centros urbanos requer tratamento adequado, com o intuito de buscar o avanço no conhecimento dos processos que compõem a dinâmica da cidade e assim diminuir as incertezas nas

propostas de controle dos efeitos negativos herdados pelas sociedades atuais, maximizando os inegáveis benefícios do progresso humano.

#### 2.5 OBJETIVOS DESTE ESTUDO

Esta dissertação tem por objetivos revisar a literatura científica publicada sobre uso e ocupação do solo, realizados a partir do enfoque em Sistemas Complexos (MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010), (FENG; FENG; SHENG, 2009), (WU; SILVA, 2010), propondo alterações e adequações com o intuito de estudar e compreender o comportamento dos agentes envolvidos e os processos de ocupação de centros urbanos no período pós-industrial.

Maior ênfase será dada considerando o desenvolvimento histórico da cidade e as relações entre a viabilidade de transporte e o uso e ocupação do solo, com as respectivas implicações na aglomeração urbana. É sabido, contudo, que a cidade é palco de muitas interações sociais, econômicas e culturais, portanto estes fatores estarão simplificadamente embutidos no comportamento dos habitantes, conforme estudo dos métodos a serem apresentados na seção 5.

Como meta final procura-se colaborar para a compreensão do comportamento do indivíduo no processo de uso e ocupação do solo, no decorrer da mudança de cenário dentro da dinâmica da cidade, em suas várias fases, pois se pressupõe que esta é uma das chaves para o sucesso na elaboração, monitoramento e correção do planejamento urbano.

Todos os estudos realizados pelos métodos e abordagens tradicionais serão utilizados e/ou considerados no decorrer da elaboração deste trabalho, procurando adequá-los, quando necessário, conforme as bases teóricas já consolidadas na literatura através dos estudos realizados nas mais diversas áreas de concentração envolvidas no estudo das cidades.

### **3 MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS**

Considerando os estudos desenvolvidos no decorrer da história sobre planejamento urbano, seguindo a percepção da necessidade de novas abordagens e, ainda, com o desenvolvimento da área de concentração voltada aos estudos de sistemas complexos, neste momento faz-se necessária a revisão sobre a situação atual da teoria de sistemas complexos para vincular os assuntos e prosseguir no desenvolvimento da proposta deste trabalho.

#### 3.1 SISTEMAS COMPLEXOS

Existem fenômenos ou situações que, apesar de serem amplamente percebidos e conhecidos, ainda não possuem definição por si e, portanto são definidos e descritos através de suas características e propriedades. A vida é um exemplo onde a definição da palavra é dada pelas características dos indivíduos que a possuem, acrescentando ao conceito as exceções verificadas empiricamente.

O ramo da ciência de Sistemas Complexos tem percorrido o mesmo caminho, pois ainda não há consenso em sua definição, levando os autores a utilizarem o recurso de descrição do conjunto de características que determinado sistema apresenta para caracterizá-lo como complexo. Miller e Page (2007) recorrem às características e à composição dos sistemas complexos adaptativos para defini-los, enquanto Boccara (2004) e Mitchell (2009) fazem analogia à estrutura hierárquica de uma colônia de formigas para apresentar o conceito de complexidade.

Não é uma tarefa simples determinar se um sistema é complexo, pois é necessário conhecimento específico sobre o assunto estudado para que se verifiquem traços de complexidade no conjunto, conforme será apresentado na seção 3.2 desta dissertação. Este conhecimento está relacionado com as ciências tradicionais, o que justifica a afirmação de Miller e Page (2007) quando relatam a

necessidade do complemento entre a abordagem tradicional e a abordagem de sistemas complexos no estudo da ciência. Neste ponto é necessário ressaltar que cada sistema complexo pode apresentar um conjunto distinto de características, e que nem todos os sistemas complexos apresentam todas as características inerentes aos sistemas que possuem complexidade.

Os Sistemas Sociais Adaptativos, termo no qual é possível incluir o comportamento social relacionado ao planejamento urbano, devem ser estudados tendo em mente que muito ainda há por se descobrir, mas esta barreira não deve ser impeditiva para o avanço da ciência (MILLER; PAGE, 2007). Esta afirmação tem embasamento na analogia às descobertas de Mendel no campo da genética: o fato de o cientista não ter conhecimento sobre a existência do **DNA** e sua estrutura não o impediu de desenvolver princípios que são utilizados até os dias atuais. A caracterização de uma cidade como sistema complexo será realizada na seção 4 desta dissertação.

Em um primeiro momento, o comportamento da cidade pode induzir a percepção de que estamos em uma desorganização total, onde as atividades desenvolvidas não se relacionam, mas a afirmação de Choay (2005) caracterizando a cidade como um organismo vivo, nos alerta para a necessidade de uma análise preliminar antes de afirmar se a cidade é composta por partes interdependentes ou não.

O conceito de complexidade que é utilizado neste trabalho tende a ser confundido com o conceito de complicado, mas há distinção entre sistemas complexos e sistemas complicados. A modelagem de sistemas não é útil para sistemas complicados, pois sistemas complicados podem ser estudados em partes ou etapas, sem a necessidade de modelagem, mas é uma poderosa ferramenta que auxilia o entendimento dos sistemas complexos (MILLER; PAGE, 2007).

#### 3.1.1 Complicado ou complexo?

Existem vários ramos da ciência onde os fenômenos são de difícil compreensão. Para que se entendam tais situações é necessário dedicação e aprofundamento nos estudos, empenho o qual nos provê de capacidade de análise e interpretação sobre assunto de interesse. De posse deste conhecimento prévio, antes da análise de um sistema torna-se necessário afirmar que há diferença entre fenômenos complicados ou complexos.

Resumidamente, um sistema complicado é aquele onde a remoção de um agente afeta apenas os agentes com as quais há ligação direta, enquanto que em um sistema complexo, na retirada de um elemento o resultado se propaga através de ligações diretas e indiretas e afeta o comportamento de todo o sistema, alterando os resultados parciais e/ou finais (MILLER; PAGE, 2007), levando o sistema a obrigatoriedade da execução de mecanismos de autoajuste necessário para que se mantenham as condições "ideais" (BOCCARA, 2004) verificadas antes da remoção do agente.

Miller e Page (2007) classificam os sistemas sociais adaptativos como complexos por natureza, pois atendem ao que preconiza sua classificação, ou seja, com a retirada de um indivíduo, o resultado tende a se propagar por toda a sociedade através das ligações que o agente retirado possuía.

Miller e Page (2007) auxiliam na verificação de outra característica importante que é inerente a cada tipo de sistema e que auxilia a diferenciação entre os dois tipos apresentados - complicados ou complexos. Esta característica está relacionada à possibilidade de divisão dos sistemas complicados em partes ou etapas, as quais podem ser estudadas em separado, pois, apesar de pertencerem ao mesmo conjunto, não são dependentes entre si, enquanto que em sistemas complexos não

é possível esta prática, pois as partes não podem ser estudadas ou analisadas em separado, visto que o resultado final é diferente da soma dos resultados parciais.

Os mesmo autores (MILLER; PAGE, 2007) exemplificam esta afirmação fazendo analogia com o processo de produção de mapas para demonstrarem o que representa um sistema complicado. Cada mapa de um mesmo local pode ser confeccionado atendendo aos preceitos da funcionalidade a que se destina, contendo informações específicas sobre o tema, como divisão geográfica, relevo, densidade populacional, redes fluviais, além de outros usos. Cada um desses mapas pode ser produzido e estudado em separado, sem que haja prejuízo das demais análises. Caso os mapas sejam confeccionados em papel transparente, é possível afirmar que as camadas sobrepostas resultarão no conjunto completo, ou seja, o resultado final é simplesmente a somatória de todos os níveis. Esta verificação resulta na possibilidade de caracterizar o conjunto de mapas como um assunto complicado, visto que a divisão das informações entre os vários mapas facilita a análise do conjunto sem comprometer o resultado final. Esta divisão facilita o estudo da região, pois seria praticamente impossível analisar um único mapa com todas as informações possíveis de serem incorporadas nele.

Boccara (2004) utiliza a dinâmica de um formigueiro para explicar o que é um sistema complexo. Em sua análise, as formigas são divididas em quatro grupos, a partir das funções que cada indivíduo desempenha para sobrevivência do formigueiro - colhedeiras, patrulheiras, faxineiras e as responsáveis pela manutenção da estrutura física do formigueiro. Sempre que há deficiência de mão de obra em qualquer uma das funções, seja por morte de grande quantidade de formigas, alteração nas condições ambientais do formigueiro ou outro motivo que possa gerar tal situação, o grupo se reajusta e realoca mão de obra que é retirada

das outras três funções. Desta forma o equilíbrio do ambiente do formigueiro é retomado e as funções voltam a ser ajustadas.

O principal ponto a ser explorado neste contexto do formigueiro (BOCCARA, 2004) reside no fato da ausência de um comando central. É obvio que não há controle sobre a quantidade de formigas que estão desempenhando determinada função, mas todas são capazes de perceber se determinada condição no formigueiro não está de acordo com o necessário para a sobrevivência da colônia, momento em que é preciso reforço para a tarefa deficiente. Também é necessário notar que o formigueiro tende a retornar ao estado de equilíbrio das funções e, portanto está em constante reorganização. Este ponto de equilíbrio que os sistemas complexos atingem se dá graças à auto-organização do sistema.

Dada esta diferenciação entre sistemas complicados e complexos, vários autores (MILLER; PAGE, 2007) (BOCCARA, 2004) (MITCHELL, 2009) procuram caracterizar os sistemas complexos segundo a presença dos seguintes fatores: interação, conectividade, auto-organização, diversidade, adaptação, emergência e realimentação, que são apresentados a seguir.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS COMPLEXOS

O fato da classificação de um sistema complexo se dar através de um conjunto de características apresentadas pelo sistema, atribui grande importância ao estudo destas características. Cabe ressaltar que nem todos os sistemas complexos possuem todas as características possíveis de serem verificadas, mas em geral as apresentam pelo menos em certo grau: interação, conectividade, auto-organização, diversidade, adaptação, emergência e realimentação.

Miller e Page (2007) afirmam que para um sistema ser considerado complexo é imprescindível que a somatória dos resultados parciais não represente o resultado final do conjunto. A literatura preconiza que esta condição é atendida quando algumas características estão presentes no sistema, como evolução, emergência, realimentação, relações de escala, fractalidade e obediência à lei de potência.

#### 3.2.1 Interação

Dada a composição de um sistema complexo, a interação é o meio pelo qual haverá comunicação entre os agentes, resultando em decisões individuais tomadas em função da percepção do ambiente. Para perceber o ambiente em que está inserido, colher informações e formular sua estratégia, cada agente utiliza os recursos disponíveis que julgar necessário. Em modelagem existem algumas formas para que o agente colete as informações disponíveis no sistema, mas todas estão relacionadas aos estados assumidos pelos demais indivíduos inseridos no modelo e a escolha individual em observar determinada quantidade de vizinhos que compartilham o mesmo ambiente.

Durante a observação e a percepção é possível determinar a quantidade de agentes a serem envolvidos na decisão do observador. As formas mais comuns de escolha dos vizinhos com os quais haverá interação são denominadas como vizinhança de Von Neumann, onde a observação é realizada adotando-se os vizinhos dispostos imediatamente na horizontal e na vertical, e a vizinhança de Moore, com a observação de todos os vizinhos que estão diretamente em contato com o observador (UEHARA; SILVEIRA, 2007). A quantidade de vizinhos e a disposição dos mesmos dependem da topologia da rede de interação, a conectividade.

A adoção de um padrão de observação de vizinhança não é premissa básica de um sistema complexo, mas a interação entre os agentes deve ocorrer em todos os momentos. A rede de relacionamento de cada agente e a influência que ele

exerce sobre os demais componentes do sistema está diretamente relacionada à conectividade de cada agente (BARABÁSI, 2003). É da interação entre os agentes que emergem panoramas com potencial para alterar todo o ambiente em que o mundo social está sendo modelado (MILLER; PAGE, 2007).

#### 3.2.2 Conectividade

O conceito de conectividade está intimamente relacionado a redes. De fato as figuras que apresentam a topologia das redes facilitam a visualização das ligações que existem entre os componentes. Em sistemas complexos as redes representam as ligações existentes entre os agentes que nos permite verificar os caminhos pelos quais as informações se propagam.

Barabási (2003) atribui o crescimento do cristianismo a alta conectividade que um dos seus disseminadores possuía. Para o autor, o apóstolo Paulo pertencia a uma rede de relacionamento ampla e altamente conectada. Estas conexões diretas e indiretas permitiram a fluidez da informação através da sociedade, resultando em uma propagação de informações que culminou no sucesso do cristianismo. A informação que a princípio partiu apenas de uma pessoa permeou pela rede de relacionamento de Paulo e difundiu-se amplamente, de forma que, passados 2000 anos, fez do cristianismo uma das mais importantes religiões do mundo, com aproximadamente dois bilhões de seguidores. Desta premissa é possível afirmar que a partir de um ponto, através de suas conexões, formou-se uma rede que atualmente interliga um terço da população do planeta.

As redes apresentam formas e graus variados de conexão, que são medidos a partir da quantidade de conexões que cada integrante da rede possui. A propagação de informações, as ações, os estados e resultados estão diretamente relacionados ao grau de conexão de uma rede. Através da propagação é possível a

alteração do estado dos agentes que compõem a rede, bem como a adequação às perturbações externas que podem afetar um indivíduo e, por consequência, a rede em sua parcialidade ou totalidade.

#### 3.2.3 Auto-organização

Furtado e Delden (2011) salientam que a verificação da auto-organização é importante, pois através da reestruturação do sistema é possível verificar as interações entre os agentes. Alguns autores recorrem às analogias para a explicação da auto-organização. A imagem que Miller e Page (2007) utilizam é a da "mão invisível" preconizada por Adam Smith. Já Boccara (2004) e Mitchel (2009) utilizam o exemplo da dinâmica de um formigueiro, caso em que é possível verificar a reorganização do sistema a todo instante, sem que haja um comando centralizador das ações.

Segundo Allen (1997) citado por Furtado e Delden (2011) sistemas com autoorganização são aqueles onde, a partir da interação entre os agentes internos,
emerge uma estrutura coletiva no próprio sistema que tende à estabilidade. Segundo
Miller e Page (2007) a auto-organização está diretamente relacionada aos sistemas
complexos, partindo do princípio de que perturbações internas se propagam e
afetam o conjunto, levando-o a necessidade de reestruturação. Este fenômeno
difere complexo de complicado, onde as partes são perfeitamente encaixadas e não
há emergência de resultados.

#### 3.2.4 Diversidade

Sistemas complexos são, inerentemente, compostos por agentes heterogêneos. Sistemas que apresentam homogeneidade na sua composição (não complexos) são relativamente fáceis de serem analisados, pois o comportamento esperado se repete por todos os ciclos (MILLER; PAGE, 2007). Portanto a

diversidade em sistemas sociais adaptativos é necessária para que as dinâmicas das interações não resultem em colapso do sistema, como explicado por Miller e Page (2007) ao fazerem analogia com o sistema que mantém a temperatura interna de uma colmeia de abelhas e também por Boccara (2004), quando utiliza o sistema de trabalho de uma colônia de formigas nas funções vitais de um formigueiro.

Considerando que os dois sistemas apresentados acima por Miller e Page (2007) e Boccara (2004) fossem compostos por indivíduos homogêneos, no primeiro caso, no estudo de uma colmeia de abelhas, ao perceberem que a temperatura interna do ambiente estivesse subindo, todos os indivíduos entrariam em ação ao mesmo tempo, rebaixando a temperatura rapidamente, o que acionaria o mecanismo reverso, para aumenta-la novamente. Este ciclo se repetiria exaustivamente e a temperatura ideal jamais seria atingida. Ao analisarmos a dinâmica do formigueiro, se todos os indivíduos percebessem ao mesmo tempo a falta de alimento, todos sairiam para caçar ou coletar, fato que tornaria o formigueiro completamente vulnerável ao ataque de inimigos.

Destes exemplos analisados, justifica-se a necessidade da composição heterogênea em sistemas como forma de sobrevivência. A heterogeneidade faz parte do conjunto de premissas básicas para caracterizar um sistema como complexo, pois a ação de um indivíduo reflete na decisão de cada um dos demais agentes de forma diferente. Enquanto uma abelha entra em ação para regular a temperatura da colmeia, as demais podem continuar a desempenhar as demais funções, inclusive a tarefa de reforço no arrefecimento do ambiente, mantendo o conjunto em equilíbrio em todas as necessidades básicas.

Considerando que heterogeneidade é necessária para o equilíbrio dos sistemas, é possível afirmar que os sistemas compostos pela diversidade de indivíduos têm maiores chances de sobrevivência, portanto sistemas heterogêneos

estão em constante evolução, e podem ser considerados como "organismos vivos", termo que Choay (2005) utiliza para adjetivar a cidade e sua dinâmica.

#### 3.2.5 Evolução

Para Miller e Page (2007) a evolução de um sistema está associada a capacidade do agentes em interpretar as informações no ambiente e tomar decisões em direção a consecução de seus objetivos, de acordo com a respectiva estratégia adotada. A partir desta premissa é possível afirmar que todos os indivíduos que compõem o sistema apresentam certo grau de percepção, o que, em sistemas sociais adaptativos, promove a evolução do conjunto.

É importante ressaltar que o resultado das ações dos agentes após a atuação individual, apoiada nas informações coletadas na rede de agentes, não pode imediatamente ser considerada como otimização da sociedade, ou mesmo que um conjunto de ações leve ao equilíbrio do sistema (MILLER; PAGE, 2007), pois o momento da ação pode coincidir para vários agentes, levando o sistema para outro extremo de condições. Ainda neste contexto não é possível afirmar que o objetivo dos indivíduos é promover o bem coletivo, como é verificado entre as abelhas e as formigas, portanto conclui-se que a adaptação nem sempre leva para o bem estar do conjunto, mas também é possível resultar em ruínas. Diamond (2005) dedica sua obra à análise das sociedades onde as escolhas individuais levaram o conjunto à falência ou ao ápice de toda a sociedade.

A evolução deve ser inserida no modelo através de características dadas aos agentes, os quais devem ser providos de capacidade de se adaptar às situações e aprender com os resultados das ações anteriores, seja do próprio agente ou dos demais indivíduos que compõem o ambiente. Delden e Furtado (2011) afirmam que a evolução é resultado das regras de transição que determinam os estados futuros

dos agentes, após a verificação da condição presente e aplicação da estratégia em prol do objetivo individual.

#### 3.2.6 Emergência

Em sistemas complexos, embora cada indivíduo possua suas características próprias de comportamento, decisão, omissão e escolhas, dados em função de suas estratégias, sempre haverá interações que poderão resultar em um novo panorama, diferente ou não da situação anterior. Este fenômeno ocorre devido à evolução do sistema. O panorama atingido influenciará as próximas escolhas do próprio indivíduo e/ou dos demais que compõem o sistema (MILLER; PAGE, 2007). Este novo ambiente, diferente das condições anteriores, surge a partir de um processo denominado emergência e irá realimentar o sistema como condições para futura escolha dos indivíduos.

A emergência é um fenômeno esperado em sistemas sociais adaptativos, contudo o mesmo não ocorre com o resultado final, ou seja, apesar de ser sabido que haverá emergência em um sistema, não é possível prever com exatidão quais serão os resultados em tempo futuro devido a dinâmica que emerge da interação entre os agentes no decorrer do tempo.

Diante desta característica de sistemas adaptativos complexos, não é possível a aplicação do teorema do limite central para estudo do conjunto durante todo o processo de análise do sistema (MILLER; PAGE, 2007). Este teorema preconiza que em um conjunto de comportamentos a distribuição tende a ser normal, e quanto mais indivíduos forem agregados ao sistema, a curva normal tende a se firmar. Mesmo que inicialmente o comportamento seja proposto desta forma, com as interações, adaptações e estratégias adotadas pelos agentes, o comportamento tende a não obedecer este teorema.

É válido ressaltar que a emergência não é exclusividade dos sistemas complexos. Como recurso para exemplificar a emergência, Miller e Page (2007) utilizam o exemplo de uma fotografia digital. Enquanto o pixel de uma foto não passa de um ponto que possui apenas uma cor, do conjunto de pixels (milhões deles) emerge uma imagem que representa um cenário, um indivíduo ou outra imagem desejada. É fato que neste caso a fotografia não é um sistema que evolui e claramente não é um sistema complexo.

Segundo Miller e Page (2007) grande parte dos fenômenos que surgem como emergentes só podem ser verificados e estudados quando analisados em sistemas modelados por computador, contudo modelos simplificados podem ser até mesmo empiricamente analisados. É o caso do estudo da plateia, proposto por Schelling (1978) citado por Miller e Page (2007).

Neste estudo, Schelling (1978) analisa o comportamento de cada espectador em relação ao espetáculo e à plateia. Para o autor, cada indivíduo que compõe uma plateia, ao aplaudir o espetáculo, tem basicamente dois pontos de referência, a saber: a percepção individual da apresentação e a análise do meio em que está inserido.

Schelling (1978) afirma que o fato de um indivíduo aplaudir um espetáculo em pé não está firmado só na avaliação individual da qualidade da apresentação, mas o fato de outros indivíduos levantarem-se para o aplauso também tem influência direta na ação dos demais membros da plateia, levando-os a ficarem em pé diante da possibilidade de serem julgados socialmente se não o fizerem. Este estudo apresenta viabilidade para ser reproduzido empiricamente, através do controle de parte da plateia, ou seja, posicionando estrategicamente pessoas já orientadas a aplaudirem em pé misturadas com pessoas alheias à combinação e verificando o efeito final da simulação.

#### 3.2.7 Realimentação

O mesmo modelo de Schelling (1978) pode ser utilizado para explicação do fenômeno da realimentação, pois o fato de algumas pessoas se levantarem para aplaudir um espetáculo induz aos outros a também ficarem em pé. Se em cada intervalo de tempo podemos considerar uma quantidade de pessoas em pé, o momento seguinte será resultado da condição apresentada no momento anterior. Se a cada instante a quantidade de pessoas varia em função da tomada anterior, podese afirmar que está havendo uma realimentação do sistema.

Miller e Page (2007) enfatizam que a realimentação é uma característica inerente aos sistemas complexos, visto que para se observar este fenômeno é necessário que as ações dos indivíduos sejam independentes, mas que as alterações no ambiente sejam produzidas pelo conjunto de ações individuais e que este mesmo ambiente influencie as decisões futuras.

#### 3.2.8 Escala e fractalidade

Segundo Mitchell (2009) há inter-relação entre a escala e a fractalidade apresentadas em sistemas considerados complexos, portanto esta premissa dá embasamento para afirmar que o estudo em conjunto destas duas características facilita o entendimento de ambas.

Diz-se que um fenômeno ocorre em escala quando, independente das dimensões do conjunto estudado, há similaridade entre os fenômenos verificados. Batty (2008) afirma que alguns processos que levam às aglomerações humanas em cidades, independem de seu tamanho, obedecem a escalas, pois ocorrem da mesma forma na grande maioria das cidades do mundo.

Enquanto o conceito de escala é algo de fácil assimilação, a fractalidade (que está relacionada à escala) necessita de exemplos para ser descrita. Neste sentido Mandelbrot (1967) utiliza o desafio de medir o comprimento da costa da Grã-Bretanha, utilizando o conceito de que cada parte da costa litorânea representa a costa como um todo, porém em escala reduzida. Desta demonstração surge o conceito de fractalidade, conforme se observa na figura 1.

O aspecto visual que é representado pela foto de satélite pode ser percebido em fragmentos da mesma figura, de forma que, apresentando apenas a silhueta da foto não é possível afirmar em qual nível de visualização a mesma está sendo apresentada, pois a similaridade entre os desenhos é evidente.

Este fenômeno pode ser percebido em sistemas complexos, onde, muitas vezes, a redução da parte de um sistema analisado facilita a interpretação dos dados extraídos, sem que haja alteração do resultado global, pois o comportamento do conjunto é similar, independente da escala analisada.



Figura 1 - Imagem do litoral da Noruega. Um exemplo de fractalidade

Mitchell (2009) alerta para o uso do termo "fractal" para várias finalidades e define fractal como sendo uma forma geométrica assumida por algo e que se repete em qualquer escala de visualização.

Por semelhança é possível afirmar que as imagens de ocupação urbana (capturadas por satélite) apresentam fractalidade, reforçando a teoria de que apresentam fenômenos em escala (Batty, 2007).

#### 3.2.9 Lei de potência

Alguns cientistas procuram descrever o grau de complexidade de um sistema utilizando a análise da escala de repetição que é verificada no sistema, fato este que está relacionado à fractalidade do sistema (como visto no item anterior).

Mitchell (2009) apresenta um estudo onde é verificada a relação entre a massa do corpo dos mamíferos e a taxa metabólica dos mesmos. Os resultados apontam que para descobrir o valor aproximado da taxa metabólica de cada animal basta elevar o valor da massa corporal à potencia 3/4.

Toda relação de escala é regida por uma proporção que envolve um valor de potência (exponente igual a três quartos, para o caso apresentado acima). Este fenômeno, comum aos sistemas complexos, é denominado lei de potência.

# 3.3 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO ESTUDO DE SISTEMAS COMPLEXOS

Segundo Miller e Page (2007), com o aprofundamento das pesquisas, muitas áreas de concentração têm esbarrado nos limites de transição com outras áreas das ciências. A partir deste ponto, o avanço no conhecimento requer que o assunto seja tratado em uma esfera multidisciplinar. A abordagem dos estudos de sistemas complexos vai além das bordas que delimitam uma única área da ciência,

agrupando o conhecimento desenvolvido pelas diversas áreas e estudando o comportamento de sistemas onde o resultado final não é igual a somatória das partes analisadas separadamente apenas por uma única área de concentração.

Miller e Page (2007) consideram que os trabalhos de Adam Smith datados do século XVIII já extrapolavam os limites de um único campo da ciência. Ao considerar a "mão invisível", na verdade o economista estava introduzindo o comportamento social dos indivíduos como responsável por manter a organização do mercado.

Atualmente, com o rápido desenvolvimento dos computadores, ganhos em capacidade de processamento e redução dos custos de implantação de infraestrutura, a utilização de métodos computacionais tem-se mostrado um fator auxiliador no tratamento de sistemas sociais à ótica de sistemas complexos. Esta abordagem tem favorecido a aproximação dos estudos, das análises e das conclusões para o mundo real.

Aliado ao ganho do poder de processamento dos computadores, a escolha adequada dos parâmetros a serem utilizados em simulações resultam na simplificação dos sistemas analisados, o que tem possibilitado a aplicação de sistemas computacionais na análise de sistemas sociais, pois em um sistema computacional simplificado, tradicionalmente as regras de transição são determinísticas (WU; SILVA, 2010), e os estados das células, no caso de autômatos celulares, são discretos (SHALIZI, 2006).

A abordagem abstrata e a aplicação da linguagem adequada têm favorecido o progresso da modelagem nos estudos de sistemas complexos (LIMA ET AL., 2009), permitindo a utilização de analogias entre fenômenos e permitindo a reutilização de estudos compartilhados entre as diversas áreas de conhecimento (PORTUGALI, 2011). Contudo a construção de modelos computacionais se tem mostrado muito útil

no auxílio do entendimento de fenômenos reais, como a ocupação do espaço urbano, o comportamento de cadeias alimentares, a proliferação de doenças em populações, entre outras.

#### 3.4 O MODELO E A REALIDADE

Ao imaginar um modelo computacional, a princípio, tende-se a idealizar um sistema desenvolvido por computador com capacidades ilimitadas. Contudo a essência da criação de um modelo está na simplificação das diversas condições que compõem o conjunto. Miller e Page (2007) afirmam que a arte de modelar está na escolha correta das informações extraídas da realidade de forma que a condição ideal seja aquela onde os elementos inseridos correspondem exatamente àqueles que são essenciais para simular o comportamento dos agentes, extraindo-se todos os demais que não resultarão em alterações no panorama analisado.

O modelo deve ser uma simplificação e abstração da realidade, caso contrário, não há justificativa para empregá-lo, visto que um modelo composto por todos os detalhes do mundo real seria equivalente a verificação empírica do sistema.

A simplificação e outras características inerentes à modelagem de sistemas complexos é fruto de um processo que requer o recorte ideal do assunto a ser tratado, bem como o emprego de técnicas adequadas para que o modelo possa ser considerado útil.

#### 3.5 O PROCESSO DE MODELAGEM

A modelagem de sistemas complexos não se propõe a reinventar a ciência que até então fora praticada, muito menos desprezar os conhecimentos adquiridos pelas várias áreas do conhecimento científico. Também não tem o intuito de substituir a forma como se praticam as atividades de ciências na atualidade. Tanto

esta afirmação é verdadeira que a modelagem só é possível de ser executada por aqueles que possuem conhecimento prévio do assunto, ou caso o modelador seja auxiliado por alguém que possua esta capacidade.

Um modelo de sistemas complexos adaptativos é uma abstração do mundo real (MILLER; PAGE, 2007). A modelagem visa muito além da interpretação do resultado final ou da explicação de um fenômeno ocorrido, ou ainda da previsão futura, já que ao modelo pode ser analisado em tempo regresso ou em tempo futuro. Descrever a forma como o sistema evoluiu é um dos mais importantes objetivos da abordagem realizada pela modelagem de sistemas complexos e pode ser considerado mais importante do que verificar o resultado final do sistema. Estudar e compreender a forma de evolução do sistema e o comportamento dos agentes que levam o conjunto para um determinado estado representa o conhecimento profundo do processo, o que pode ser considerado a chave para um melhor trato dos problemas em sociedades adaptativas.

Miller e Page (2007) frisam que a modelagem é viável através da reprodução de quadros sucessivos no decorrer do tempo, representando a evolução de uma sociedade. Em cada quadro os agentes assumem determinadas condições, embasando-se no seu estado anterior, na percepção do mundo a sua volta e na estratégia adotada para alcançar seu objetivo final, seja ele qual for.

Outro fator determinante da modelagem é a simplificação do conjunto. Há várias formas de simplificar o comportamento de uma sociedade e a arte da modelagem em sistemas complexos está no recorte ideal – simplificação – de forma que mantenha o objetivo final o mais perto da realidade possível (MILLER; PAGE, 2007).

A modelagem de sistemas complexos é uma ferramenta que pode ser utilizada para simular sociedades adaptativas complexas (MILLER; PAGE, 2007), mas não podem garantir exatidão nos resultados. Furtado e Delden (2011) afirmam que na medida em que há aprimoramento das técnicas e ferramentas verificam-se ganhos na qualidade dos modelos propostos. É possível que os resultados encontrados possam contribuir para diminuir significativamente as incertezas, não exatamente com a predição do futuro, mas com o entendimento do desenvolvimento dos processos evolutivos verificados nos sistemas complexos, contudo é incorreto afirmar que a configuração apresentada pelo modelo reflete o que ocorrerá na realidade.

#### 3.5.1 Condições iniciais do sistema

As condições iniciais de uma modelagem devem ser aplicadas tanto para o ambiente quanto para os agentes, quando existirem. Trata-se de atribuir o estado que cada componente da modelagem assume no início, momento que pode representar qualquer ponto na linha do tempo na qual, a partir de então, o sistema será monitorado. No caso de uma cidade, não há necessidade de iniciar o modelo desde a entrada de seu primeiro habitante ou da primeira interferência local, mas é possível que o panorama seja estruturado de forma que represente uma condição real, em dado momento, ou uma condição hipotética completamente embasada no conhecimento científico. Demais condições aleatórias ou arbitrárias podem ser adotadas, desde que justificadas e consideradas na análise dos resultados do modelo.

O objetivo do estudo é o fator que determinará qual é o estado inicial do modelo. Vale ressaltar que este estado pode ser variável a cada vez que o modelo é testado, permitindo ajustes e comparações entre o desenvolvimento e resultados obtidos pelas diversas formas de evolução do sistema, em função das condições

iniciais. Em programas de modelagem é possível que as condições iniciais sejam inseridas de forma completamente aleatória, dentro dos limites estabelecidos pelo código inserido ou de forma condicionada, através de ajustes executados pelo modelador.

A importância das condições iniciais deve ser ressaltada. Mitchell (2009) afirma que pequenas alterações nestas condições podem alterar significativamente o resultado final de um dado sistema complexo, portanto é necessário que o trato destas informações seja cuidadoso, sob o risco de a modelagem apresentar evolução equivocada e resultados enganosos.

O ambiente da modelagem pode permanecer estático ou pode ser dinâmico no decorrer da evolução do sistema, ou seja, o sistema pode evoluir apenas em relação aos demais agentes, no caso de Modelos Baseados em Agentes (MBA) ou pode evoluir em função do ambiente, como pode ocorrer em MBA ou Autômato Celular (AC).

Em modelagem com autômato celular é comum que os agentes adotem condições discretas (SHALIZI, 2006), ou seja, variem pelas condições prédeterminadas nos modelos e não entre elas. O estado inicial de cada agente deve ser determinado por aquele que modela e preferencialmente deve ter respaldo científico ou empírico, para que os resultados possam ser comprovados.

Para escolha do panorama que será determinado como marco zero da simulação é preciso considerar o objetivo da análise da modelagem, para tanto é necessário sintonia entre os parâmetros ajustados e as regras de transição do modelo, as quais irão reger o comportamento dos agentes, do ambiente e, portanto a evolução do sistema como um todo.

#### 3.5.2 Regras de transição

Regras de transição são os parâmetros a serem verificados pelos componentes da modelagem para assumir um estado no próximo estágio do sistema de acordo com o objetivo individual e a estratégia adotada por cada objeto. Segundo Delden e Furtado (2011) estas regras podem ser extremamente simples ou altamente complexas, dependendo do tipo de sistema e do motivo da simulação.

A orientação para determinar as regras de transição de um sistema complexo deve estar solidamente embasada em modelos já desenvolvidos com eficácia comprovada, bem como em produção científica consolidada, haja vista que esta é uma parte fundamental da simulação e sua ação dentro da dinâmica e evolução é acumulativa, pois a evolução do conjunto está apoiada sobre tais regras. Ainda nesta linha, vale ressaltar que as regras de transição também podem ser dinâmicas, e serem alteradas manualmente ou pelo próprio sistema ao longo do processo (DELDEN; FURTADO, 2011).

Conforme Miller e Page (2007) a simplificação ideal é difícil de ser encontrada, fato que pode levar o pesquisador a se conformar com aproximações menos eficientes. O processo de modelar implica em muitas tentativas que pode regredir a pesquisa, e por isso devem ser abandonadas ou revistas. O modelo é ideal onde há abstração e redução da realidade na medida certa e quando o modelo torna-se capaz de produzir os mesmos processos e resultados já descritos na literatura. As regras de transição fazem parte do corpo desta redução.

A evolução do sistema e o comportamento individual dos agentes estão diretamente relacionados às regras de transição. É esta dinâmica que dará base para o resultado parcial ou final do sistema.

#### 3.5.3 Resultados de uma modelagem

Miller e Page (2007) afirmam que os melhores modelos estão entre aqueles que, a partir das características atribuídas aos agentes e as regras de transição estabelecidas, espera-se um resultado interessante para ser interpretado, e não um resultado esperado. Esta afirmação refuta a crítica de que o resultado da modelagem é embutido no modelo, isto é, de que ao determinar os dados de entrada da simulação e as regras de transição, o simulador já os escolhe conforme o resultado que deseja obter.

Vale ressaltar que os modelos não têm limite para simplificação, portanto toda informação relevante ao sistema pode ser incluída no modelo. Omitir dados que podem alterar o resultado final da simulação significa que a ferramenta não foi adequadamente utilizada (DELDEN; FURTADO, 2011). Em busca da simplificação adequada, várias tentativas devem ser executadas e as simulações devem ser repetidas tantas vezes quanto necessário com o objetivo de se encontrar resultados que sejam sólidos e teoricamente embasados.

Em modelagem o resultado final pode ser confrontado com resultados obtidos por métodos tradicionais, principalmente quando a função do modelo é analisar o comportamento dos agentes e a emergência de fenômenos. Para este fim, é possível calibrar o modelo construído (MILLER; PAGE, 2007). Com a calibração do modelo a simulação nos permite avançar ou regredir no tempo, sendo possível não só a confirmação da situação do modelo, comparando-o com as diversas fases comprovadamente conhecidas pelas técnicas convencionais, mas também analisar o comportamento dos agentes nas diversas fases do fenômeno.

Por fim, Miller e Page (2007) afirmam que os resultados obtidos em modelagem podem ser considerados mais testáveis do que os resultados que surgem em metodologias convencionais, pois a repetição e os ajustes que os modelos permitem são características específicas da modelagem.

## 3.6 CALIBRAÇÃO DE UM MODELO

Calibração é o processo de comparação do comportamento ou do resultado do sistema modelado com dados estatísticos disponíveis ou com a realidade empírica (FURTADO; DELDEN, 2011). Wickramasuriya et al., 2009, citado por Furtado e Delden (2011), alertam para a necessidade de alimentar o modelo com informações registradas sobre o passado e fazê-lo progredir, de forma a considerá-lo em vários períodos distintos de condições conhecidas, permitindo a confrontação dos resultados e possibilitando a realização de ajustes e a calibração das regras de transição trazendo o modelo para próximo da realidade.

Porém em abstrações, nem sempre a calibração é possível, sendo necessária a busca de outros parâmetros que possam validar a evolução e os resultados atingidos por uma simulação. Em modelos com esta característica é importante frisar as condições iniciais quando da análise dos resultados.

Todo o processo de modelagem, partindo do recorte, das premissas, dos ajustes e dos testes realizados, deve ser pensado considerando as possibilidades oferecidas pelas ferramentas disponíveis para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

#### 3.7 FERRAMENTAS PARA MODELAGEM

Apesar de alguns estudos, como os de Schelling (1978) sobre o comportamento de uma plateia ou sobre a segregação de uma sociedade, ou ainda as teorias de Burgess (1925) sobre a ocupação dos centros urbanos terem sido desenvolvidas sem o auxílio de ferramentas específicas, atualmente o avanço dos recursos computacionais tem favorecido a disseminação de meios que viabilizam a utilização de modelagem como abordagem de diversos assuntos.

#### 3.7.1 *Softwares* para modelagem

Atualmente há ferramentas específicas para modelagem de sistemas complexos que vão desde *softwares* complicados que requerem alto conhecimento de linguagens de programação até ferramentas amigáveis que simplificam a inserção de códigos específicos para esta finalidade, também conhecidos por *toolkits*. Embora a utilização de *toolkits* seja facilitada pelas bibliotecas disponíveis e por comandos simplificados, Lima et. al. (2009) alertam para as limitações inerentes destas ferramentas, visto que as condições da programação devem se encaixar em modelos pré-definidos, não permitindo ao modelador ampla liberdade para "personalizar" o assunto que está sendo tratado.

A utilização de *softwares* proporciona a possibilidade de moldar a simulação conforme as pretensões do cientista, permitindo a inserção quase que ilimitada de recursos, limitando-se apenas aos limites da linguagem adotada, em contrapartida estas ferramentas exigem muito mais em conhecimento e demandam tempo superior na execução das tarefas.

Entre as várias ferramentas disponíveis, as que podem oferecer maior contribuição para a modelagem de sistemas adaptativos complexos, mais especificamente para o estudo de uso e ocupação do solo são aquelas relacionadas à MBA. Como exemplos de toolkits que atuam nesta linha, podemos destacar que as mais difundidas são *Swarm* e *Repast*, enquanto que o *Netlogo* pode assumir a posição de *software*, dentro desta mesma linha de possibilidades (LIMA et al., 2009).

Embora seja necessário o conhecimento das ferramentas utilizadas para modelagem de sistemas complexos, Miller e Page (2007) frisam que o mais importante na simulação são os resultados extraídos, sejam eles em relação às condições do sistema, na análise do comportamento dos agentes ou propriamente o

estado final do sistema. Enfim, quaisquer que sejam os dados extraídos de uma simulação deve-se ter em mente que o mais importante é a modelagem em si, e não os programas ou equipamentos (*hardwares*) empregados no processo (MILLER; PAGE, 2007).

Além da escolha do equipamento, após o recorte do assunto, a escolha correta da ferramenta a ser utilizada para modelagem do sistema deve considerar a experiência dos envolvidos, a literatura disponível, as necessidades específicas de cada usuário e a situação a ser modelada (LIMA et al., 2011).

#### 3.7.2 Autômato Celular (Cellular Automato – CA)

O Autômato Celular figura entre as classes mais populares entre as escolhas para simulação de sistemas complexos (SHALIZI, 2006) e são as melhores formas de estudo de sistemas auto-organizáveis (FURTADO; DELDEN, 2011).

A estrutura inicial dos AC´s é composta por uma grade com células, que são consideradas autônomas (FURTADO; DELDEN, 2011) e dotada de características consideradas discretas (SHALIZI, 2006). A disposição destas células, considerando a sua vizinhança e suas características, serão submetidas às regras de transição, durante a evolução do tempo, as quais irão culminar em resultados diferentes dos iniciais, portanto, apresentam emergência.

Os modelos desenvolvidos em **AC** têm características em comum, citados por Furtado e Delden (2011) como sendo: uma grade com células; vizinhança; estados possíveis de serem assumidos pela célula; regras para transição entre os estados possíveis e as restrições inerentes ao sistema a ser modelado.

Segundo Wu e Silva (2010) o autômato celular tem sido amplamente utilizado no estudo do solo, principalmente devido a sua facilidade na interação de dados

colhidos através de **SIG** (imagens adquiridas através de imagens de satélites), pois ambos trabalham com células dispostas em grade, tornando possível que os dados de entrada sejam similares aos dados de saída. Apesar de todas as funcionalidades, os autores mencionam como principal limitação dos **AC**'s, o excesso de simplificação.

Entre as características do **AC**, Brow et al. (2005) citado por Furtado e Delden (2011) e Batty (2005) alertam que o uso de autômatos celulares é melhor adaptado para estudar processos que resultam na emergência de padrões, entretanto, para se fazer previsões, faz-se necessário a utilização de método mais apropriado ou modelos mistos, que podem incluir também os **AC**'s trabalhando em conjunto com outros programas.

#### 3.7.3 Modelagem Baseada em Agentes (Agent-Based Model – ABM)

Segundo Miller e Page (2007) agent-based model é considerado um método bottom-up, onde as características do conjunto são estudadas a partir do comportamento individual em direção ao estado do sistema. Esta abordagem difere das ferramentas tradicionais que analisam apenas o comportamento médio ou diretamente o estado final do sistema, caso em que o resultado tende a ser parcial ou até mesmo enganoso.

O modelo baseado em agentes é executado a partir do reducionismo ou simplificação, mas isto não significa que o entendimento do conjunto seja comprometido, pois não é necessário ter um conhecimento de todas as características dos agentes para se estudar fenômenos sociais (MILLER; PAGE, 2007).

Para Furtado e Delden (2011) os agentes são providos de características préestabelecidas e devem ser autônomos, orientados, ativos, comunicativos, móveis, flexíveis e capazes de aprendizado, além de serem os veículos responsáveis pelas interações durante a evolução do processo, seguindo as regras de transição estabelecidas na modelagem.

O MBA é composto por três elementos básicos, a saber: um grupo de agentes, regras de interação entre agentes e o ambiente onde as interações ocorrem, sendo que o último elemento, quando imutável no sistema, não necessariamente precisa ser representado (SHALIZI, 2006).

Pela utilização do **MBA** é possível o teste de diferentes hipóteses postuladas para a dinâmica da cidade, de forma que a utilização desta técnica tem sido de grande valia para o aumento do entendimento dos processos inerentes da dinâmica da cidade (WW; SILVA, 2010).

# 4 ESTUDANDO A CIDADE COMO UM SISTEMA COMPLEXO

Por todo o século XIX a cidade era vista como uma desordem. O subúrbio de Londres era considerado como um ponto negativo da cidade. Esta impressão perpetuou-se e norteia o planejamento e gerenciamento das cidades até os dias atuais (CHOAY, 2005), permanecendo inalterada até os estudos de Jacobs (1961), citados por Batty (2008), que apresentou o contexto urbano agregado aos fatores econômicos, sociais e políticos, postulando que a cidade é passível de inovação e favorável à tolerância, diversidade e mutação. Embora o estudo date de 1961, o processo de mudança de visão e compreensão dos processos urbanos ainda está em consolidação, sendo que o período que mais contribuiu para esta alteração são os últimos 25 anos.

Adotando esta nova visão, Batty (2008) afirma que a cidade é extremamente organizada e apresenta padrões de comportamento que são fruto das interações entre os habitantes na competição por espaço, além de apresentar outras características como perturbações que provocam desequilíbrios, poder de autoorganização e processos descritos por lei de potência. Esta ideia dá suporte à afirmação de que "a cidade é um sistema complexo por excelência" (BATTY, 2008).

Portugali (2011) relata que a teoria da complexidade foi inicialmente desenvolvida para estudo de fenômenos naturais e devido à semelhança verificada entre processos naturais e urbanos, a utilização de analogias tem permitido a aplicação desta teoria para o estudo das cidades, mostrando-se eficaz, principalmente, no auxílio de estudos dos comportamentos individuais e na emergência de fenômenos a partir da interação entre os habitantes.

Alguns estudos já foram realizados com as cidades sob à ótica de sistemas complexos, bem como alguns modelos já foram desenvolvidos procurando resgatar estudos realizados anteriormente com a visão tradicional (FENG; FENG; SHENG, 2009) (BATTY; KIM, 2011) (MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010). O ponto pacífico entre os estudos está na afirmação de que os processos urbanos são complexos.

#### 4.1 A COMPLEXIDADE DOS PROCESSOS URBANOS

Allen (1997) afirma que em primeira análise pode parecer que os processos urbanos se enquadram nos preceitos da mecânica de Newton. O autor nos interroga: se, conhecendo o processo de ocupação do solo, não é possível prever o futuro? Se assim fosse, os exemplos de planejamento urbano desenvolvidos com características determinísticas que continuam sendo amplamente utilizado até os dias atuais (CHOAY, 2005), seriam suficientes para tratar os problemas verificados no ambiente urbano.

Os processos urbanos não podem continuar a serem tratados em separado das demais vertentes enraizadas na sociedade. A abordagem proposta no item 2.4.1 deste trabalho sustenta a complexidade inerente aos processos urbanos e a necessidade de tratamento adequado com o intuito de progredir nos estudos de uso e ocupação do solo. Portugali (2011) afirma que a divisão entre "ciência dos cientistas" e a "ciência das artes" é responsável por algumas propostas fracassadas que surgiram no decorrer da história. O autor relata que a união entre as ciências seria de grande valia para o avanço dos estudos que poderiam, em muito, facilitar e dar apoio na solução de vários problemas pelos quais a humanidade tem passado. Miller e Page (2007) com o mesmo enfoque afirmam que a abordagem de sistemas complexos deve, em parceria com as informações colhidas pelos métodos tradicionais, propiciar auxílio para que as pesquisas científicas avancem quando o problema não pode mais ser tratado isoladamente dos demais campos das ciências.

Com o intuito de prosseguir nos estudos já realizados sobre sistemas complexos, o uso de analogias com comportamento coletivo de enxames de abelhas ou colônias de formigueiros tem se tornado comum no estudo da dinâmica da cidade (WU; SILVA, 2010). Esta comparação é uma evidência sobre a complexidade inerente à cidade. Parker et al. (2003) afirma que a cidade é o espaço dinâmico onde há interações humanas. O dinamismo do espaço está exatamente na interação entre os habitantes da cidade que realimenta o ambiente em que os indivíduos estão inseridos. As próximas decisões dos habitantes serão tomadas após a observação do ambiente e a aplicação das regras de transição com vistas no objeto individual dos agentes da cidade. Este processo de dinamismo e realimentação são características inerentes a sistemas complexos.

## 4.2 A COMPLEXIDADE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO URBANO

Apesar da radical alteração na dinâmica de uso e ocupação do solo em consequência da Revolução Industrial, a preocupação com os efeitos colaterais deste processo acentuaram-se somente a partir do início do século XX, quando as cidades passaram a tomar maiores proporções. A necessidade de oferta de condições para monitoramento, controle e gerenciamento do uso e ocupação do solo resultou em uma crescente quantidade de propostas objetivando o tratamento destes panoramas (CHOAY, 2005).

A grande quantidade de propostas que surgiram no decorrer da história com o objetivo de propor adequações para amenizar as externalidades da aglomeração urbana é prova de que muitas delas falham naquilo a que se propunham. A ineficácia de muitas delas pode ser atribuída principalmente ao estudo isolado dos processos urbanos, desconsiderando, acima de tudo, a necessidade de adaptação humana para a viabilidade da solução (MILLER; PAGE, 2007).

Entre os fatores urbanos relacionados ao uso e ocupação do solo é notório que a facilidade de acesso e o deslocamento podem ser considerados de fundamental importância (MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010). Relacionado diretamente a estes itens, os sistemas de transportes, sejam individuais ou de massa, públicos ou privados, são os meios pelos quais tanto o acesso quanto o deslocamento tornam-se possíveis no interior da cidade. Batty e Kim (2011) enfatizam o uso de automóvel particular como gerador de alteração na ocupação do solo e propõem um modelo onde a aplicação de uso misto, entre veículo e trem ou ambos, em complementação, é utilizado para minimizar os custos de transportes, e maximizar a eficácia da mobilidade urbana. No decorrer do estudo os autores apresentam as externalidades do sistema misto de transporte. Maretto, Assis e Gavlak (2010) ao modelarem o estudo de Hoyt (1939) verificam alterações na mancha de ocupação urbana em função das áreas que apresentam melhores condições de acesso e infraestrutura.

Diante da necessidade da abordagem multidisciplinar e da ótica de sistemas adaptativos complexos (MILLER; PAGE, 2007) para o estudo da cidade, parece razoável propor a mesma abordagem quando da proposta de ações que visem gerenciar os processos urbanos. Neste contexto é possível afirmar que o planejamento urbano pode ser executado com o auxílio de ferramentas que permitam o estudo sob o ponto de vista de sistemas complexos, verificando o comportamento dos habitantes no decorrer do processo com o objetivo de diminuir a probabilidade de erro nas ações a serem propostas.

#### 4.3 O PLANEJAMENTO URBANO E A COMPLEXIDADE

Apesar de problemas internos da cidade já existirem desde que o homem se organiza em sociedade, segundo Choay (2005), o planejamento urbano, nas suas mais diversas escolas, surgiu da necessidade de organização da sociedade

industrial no século XIX, momento em que se verificou a intensificação dos índices demográficos nas cidades, surgindo alterações das necessidades de meios de transporte, comunicação e a emergência das demais novas funções da cidade. A população urbana, que no ano de 1900 representava 10% da população mundial, atingiu recentemente a metade dos seis bilhões e meio de humanos que habitam o planeta (IRWIN, et. al., 2009).

Há registros de alguns poucos estudos multidisciplinares sobre a cidade a partir de meados de 1800. Estes estudos envolviam economia e geografia (MILLER; PAGE, 2007). O fato da necessidade desta abordagem é indício da complexidade do assunto a ser tratado, pois de fato as cidades podem ser consideradas sistemas complexos adaptativos. Contudo, o planejamento urbano praticado no início do século XIX tinha como finalidade adequar a cidade ao novo uso, fornecendo subsídios necessários para receber a mudança herdada da revolução industrial. Na Europa se vê a abertura de grandes avenidas, a implantação de grandes lojas, cafés e demais equipamentos, gerando a ocupação da área de subúrbio com as indústrias e com a classe operária (CHOAY, 2005).

Diante do avanço da cidade, o planejamento urbano passa a verificar os fatos isoladamente, tratando-os pontualmente. Com a reincidência de demandas e a emergência de novos problemas, alguns estudiosos passam a tratar a cidade com a metáfora à um câncer (CHOAY, 2005), pois ao solucionar um problema isolado, surgiam outros ao redor. Considerando que a aglomeração urbana pode ocorrer de forma repentina (IRWIN, et. al., 2009), as ações pontuais tornam-se ineficazes, uma vez que a quantidade de problemas passa a ter crescimento compatível com o crescimento territorial e populacional da cidade. Tratar problemas de forma pontual, sem corrigir o fato gerador é um erro cometido em planejamento até os dias de hoje.

Uma das razões pela qual os padrões de planejamento urbano aplicados nas cidades se têm mostrado historicamente ineficazes está no fenômeno do caminho da dependência, onde o futuro será dado em razão das decisões do passado, e a escolha de diferentes rumos causa diferentes efeitos acumulativos (IRWIN, et. al., 2009). Considerando que a escolha dos caminhos apresenta diversas alternativas, a quantidade de possibilidades finais é muito superior aos moldes de planejamento urbano existentes, estruturados nos padrões tradicionais.

Apesar dos casos de sucesso, é visível a falência dos padrões de planejamento urbano, o que pode ser comprovado através dos efeitos colaterais verificados nos centros urbanos, como segregação (SCHELLING, 1978) (MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010), congestionamentos, violência e desordem.

A forma de planejamento urbano utilizada até recentemente partia do pressuposto de encontrar um modelo adequado, entre uma lista modelos prédefinidos que atendesse as características das regiões e se adequasse ao comportamento dos habitantes (CHOAY, 2005). Contudo o embasamento teórico dos sistemas complexos preconiza que o comportamento do grupo difere do comportamento individual e a interação entre grupos em ambientes diversos resultam na emergência de fenômenos distintos (WU; SILVA, 2010; MILLER; PAGE, 2007), portanto a adoção de um único modelo pode ser considerada incapaz de atender todas as situações de maneira satisfatória.

Para o estudo do planejamento urbano é possível afirmar que o assunto preferencialmente deve ser tratado como um sistema complexo, pois do comportamento individual emergem resultados do comportamento da sociedade (MILLER; PAGE, 2007), portanto, como visto anteriormente, as ferramentas até agora utilizadas para o planejamento urbano tendem a apresentar resultados parciais ou enganosos.

Apesar de o resultado final de uma ação de planejamento ser considerado uma incógnita, alguns comportamentos de uma sociedade podem, quando analisadas isoladamente, apresentar regularidades que permitem a descrição matemática como "leis de potência" (BATTY, 2008), característica marcante nos sistemas complexos (MILLER; PAGE, 2007). Essa característica pode ser utilizada em favor da abordagem proposta nesta dissertação.

A partir da caracterização dos processos urbanos como complexos e da conclusão da necessidade da elaboração do planejamento urbano auxiliado por esta abordagem, passa a ser preciso escolher as formas como modelar a cidade com o objetivo de maximizar a precisão dos resultados extraídos para análise, visando o entendimento de todas as etapas do processo de uso e ocupação do solo, confirmando a utilidade do método no referido assunto.

# 4.4 UTILIZANDO *AGENT-BASED MODEL* (MBA) PARA SIMULAR CIDADE

Wu e Silva (2010) informam que uma das primeiras utilizações de Modelos Baseados em Agentes - MBA – especificamente relacionada ao uso do solo data de 1993, quando a técnica foi utilizada para fins de controle agrícola. Desde então diversas aplicações foram desenvolvidas com os mais variados objetivos, entre eles: aplicação de política pública de segurança, impacto de políticas de controle agrícola e alteração de uso do solo no decorrer do tempo.

Maretto, Assis e Gavlak (2010) afirmam que **MBA** é uma boa ferramenta para modelar cidades, permitindo estudar o comportamento e relações entre os agentes, assim como padrões e resultados em macro comportamento. Após a modelagem de três estudos sobre ocupação do solo apresentadas no decorrer da história, concluem que os resultados encontrados enfatizam a capacidade desta ferramenta.

Miller e Page (2007) apontam o espaço e a aglomeração como principais fatores a serem modelados no estudo da cidade. Os demais fatores como

mobilidade, recursos naturais e topografia são variáveis a serem incluídos no modelo quando necessário. Considerando que analogamente o espaço da cidade é representado pelo tabuleiro e a aglomeração pelos agentes dispostos no tablado, o modelo baseado em agentes reforça a afirmação de Maretto, Assis e Gavlak (2010) quanto a capacidade dos **MBA's**.

#### 4.4.1 O reducionismo - escala

Lima et al. (2009) relacionam a utilização de MBA à representação em escala de uma cidade, onde a criação de "micro-mundos" tem o objetivo de verificar o comportamento individual e o surgimento da estrutura e dos padrões no uso e ocupação do solo. As cidades apresentam muitas características de sistemas complexos, e entre elas está a correspondência de escala. Batty (2008) afirma que há correspondência entre os fatores que governam os fenômenos em grandes cidades e em pequenas aglomerações. Esta observação nos permite estudar estes fenômenos em escalas reduzidas, resultando em facilidades no tratamento de dados, para posteriormente aplicar os padrões encontrados nas mais diversas escalas.

Boccara (2004) enfatiza o estudo de determinadas redes que apresentam possibilidades de serem trabalhadas em escala. A redução de escala possibilita melhor visualização dos agentes, de suas interações e, por consequência, a emergência de fenômenos. Em modelagem de sistemas complexos o reducionismo é amplamente utilizado, dadas as condições propiciadas por este recurso para simplificar o mundo real sem que haja perda significativa nos processos que possa comprometer a análise e a possibilidade de elaboração de propostas para tratamento do assunto modelado.

Além da possibilidade de uso da escala em modelagem, os **MBA**'s apresentam outras vantagens significativas para aplicações relacionadas ao uso e ocupação do solo.

#### 4.4.2 Vantagens do uso de MBA

Flexibilidade, descrição dos sistemas modelados e a possibilidade de verificação de fenômenos emergentes são consideradas vantagens oferecidas pelos MBA's (LIMA ET AL., 2009). Wu e Silva (2010) mencionam a habilidade desta ferramenta em modelar a decisão individual de cada habitante, incorporando fatores sociais e ambientais na escolha da estratégia e dos rumos dentro da simulação. Outra vantagem citada pelos mesmos autores é a possibilidade de utilização de programas computacionais paralelamente aos MBA's, permitindo o compartilhamento de dados e imagens, comumente utilizados em programas SIG - Sistemas de Informações Georeferenciadas.

Embora as vantagens do uso de MBA sejam muitas, também é necessário ressaltar que há limites no uso destas ferramentas.

#### 4.4.3 Limites do uso de MBA

Lima et al. (2009) inicia a exposição dos limites do **MBA** considerando que a necessidade do recorte ideal é uma limitação existente em todas as técnicas de modelagem de sistemas complexos. Miller e Page (2007) também expõem, de forma a abranger todas as técnicas de modelagem, que a modelagem é uma aproximação do mundo real, portanto não é capaz de predizer o futuro com garantia, apesar de diminuir as possibilidades de erro em relação a abordagem tradicional.

## 4.5 MODELOS DE FORMAÇÃO DA CIDADE

Na revisão da literatura é possível verificar alguns modelos com a pretensão de demonstrar a organização urbana partindo do princípio de que a cidade se inicia pela inclusão de moradores, partindo da premissa de que a prioridade para ocupação dos sítios está diretamente relacionada à condição econômica do agente. Maretto, Assis e Gavlak (2010) apresentam os pontos principais e as divergências entre os estudos realizados por Kohl (1841, citado por SJOBERG, 1960) Burgess (1925) e Hoyt (1939), remodelando a simulação computacional das propostas de cada autor.

Enquanto Kohl estuda a formação de uma cidade na era pré-industrial, Burgess e Hoyt focam em cidades pós-industriais. Em todos os estudos a prioridade de ocupação está relacionada ao poderio econômico de cada agente, os quais são inseridos na cidade "um a um". Os resultados encontrados nas modelagens estão de acordo com o que preconiza o autor original do estudo.

O estudo de Schelling (1978) sobre segregação também já foi modelado e é uma das provas de que o comportamento coletivo pode diferir das preferências individuais dos agentes que compõem o sistema. Em um ambiente onde a resistência individual em ocupar um sítio rodeado por agentes diferentes é baixa, seria razoável esperar a heterogeneidade do ambiente estudado, mas a simulação comprova a teoria de Schelling onde a segregação emerge, contrariando a preferência da maioria.

Como preconiza Miller e Page (2007) a partir dos modelos disponíveis na literatura, com base nos estudos de sistemas complexos e dos conhecimentos tradicionais sobre urbanismo, será desenvolvido estudo com o intuito de agregar conhecimento à ciência do planejamento urbano.

# 5 REVISÃO DOS ESTUDOS DA CIDADE COM A UTILIZAÇÃO DA MBA

### **5.1 MÉTODOS**

Após a revisão da bibliografia, foi consolidado o embasamento teórico para caracterização da cidade como sistemas complexos. Reunidos todos os dados necessários, foi realizado recorte dentro dos assuntos relativos ao uso e ocupação do solo, sem desconsiderar os demais assuntos agregados que tem influência direta e indireta sobre o assunto a ser tratado.

Dentro da literatura pesquisada, estão sendo reproduzidos alguns modelos já estudados com a ótica direcionada aos pontos de interesse desta pesquisa. A sequência de estudos consultados está sendo disposta em ordem cronológica, com o intuito de verificar o progresso e as novas abordagens a partir da literatura existente. Está sendo dada preferência aos modelos que agregam o fator locomoção como variável na decisão de ocupação do solo.

Após a reprodução de modelos existentes, será proposta alteração ou adaptação de um modelo a ser escolhido, ou, se necessário, a proposta de um novo modelo com o objetivo de analisar as dinâmicas relacionadas ao assunto.

Por meta final, tem-se a pretensão de verificar a utilidade da abordagem de sistemas complexos para o planejamento urbano, propiciando o aprofundamento do conhecimento no assunto através da abordagem multidisciplinar, com o entendimento do comportamento dos habitantes no processo de gerenciamento da cidade.

#### 5.1.1 Pergunta da pesquisa

A pesquisa visa responder a pergunta que segue: "A abordagem de sistemas complexos pode contribuir para a compreensão da dinâmica de ocupação do solo urbana?"

#### 5.1.2 Escolha da ferramenta adequada

Embasado nas afirmações de autores como Maretto, Assis e Gavlak (2010), WU e Silva (2010), Feng, Feng e Sheng (2009) e Lima et al. (2009), o trabalho de modelagem será realizado utilizando-se Modelos Baseados em Agentes - MBA. Esta decisão deu-se gradualmente no decorrer da revisão da literatura, período no qual a técnica foi visualizada como compatível com os modelos observados, além de favorecer a análise do comportamento humano em ocupação do solo. Outro fator determinante na escolha desta ferramenta está no fato da facilidade da utilização de imagens geradas por satélites, permitindo a simulações próximas da realidade, facilitando a calibração e validação dos modelos.

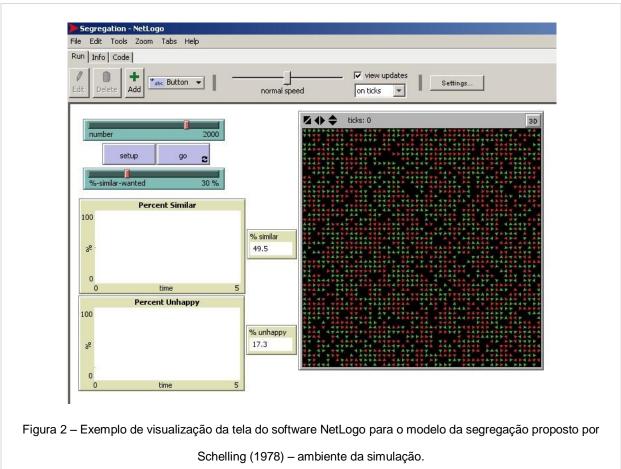
Dentre várias opções, optou-se pelo programa de licença livre NetLogo, de propriedade intelectual de Uri Wilensky.

#### 5.1.3 Programa de simulação computacional - NetLogo

NetLogo é um programa (software) que oferece um ambiente programável de modelagem multi-agente (MBA ou ABM). Segundo Lima et. al. (2009) este programa é bem adaptado para modelagem de sistemas complexos, pois permite a criação de milhares de agentes com características variadas, atuando no sistema de forma independente. Desta principal característica é possível analisar o comportamento individual dos agentes em relação ao conjunto da modelagem.

Outra característica marcante do NetLogo é a simplicidade da linguagem de programação, fato que amplia a possibilidade de utilização, mesmo por iniciantes. Apesar de oferecer grande variedade de opções e ferramentas de trabalho, serão apresentados apenas os mais utilizados nas simulações e reproduções contidas neste trabalho.

O programa oferece abas que permitem a visualização gráfica do ambiente programado, conforme figura 2, e o código de programação – figura 3.



Schelling (1978) – ambiente da simulação.

Os principais elementos que podem ser encontrados na tela de visualizacá

Os principais elementos que podem ser encontrados na tela de visualização da simulação do programa são: tabuleiro da simulação, barras deslizantes, botões de arranjo inicial e de início/pausa da simulação e caixas com dados de saída de resultados.

O tabuleiro representa o ambiente (ambiente físico, no caso de cidades) onde os agentes estão inseridos e o local onde ocorrem as interações. Ainda no tabuleiro é possível verificar a evolução do arranjo dos agentes no ambiente simulado na medida em que as interações ocorrem e o sistema evolui.

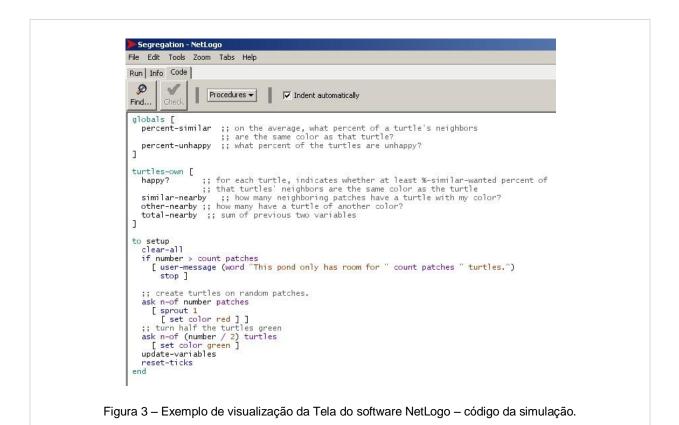
As barras deslizantes são utilizadas para configurar os parâmetros da modelagem, sempre dentro dos limites pré-estabelecidos pelo programador. Os valores ajustados podem influenciar apenas as condições iniciais do sistema ou podem ser alterados no decorrer da simulação, interferindo no ambiente simulado a partir do novo parâmetro.

Realizados os ajustes iniciais da simulação deve-se acionar o botão adequado para que as informações sejam visualizadas no tabuleiro. Este panorama inicial, ponto o qual ainda não houve interações entre os agentes é denominado "condição inicial do sistema".

Após a visualização das condições iniciais, é necessário o acionamento do botão de comando que permite o início das interações previamente programadas. Esta autorização pode ser configurada de três formas distintas: Na primeira opção é possível permitir que as interações ocorram a cada passo, sendo necessário o acionamento do botão novamente para o passo seguinte; na segunda opção é possível determinar uma quantidade exata de interações que serão realizadas, momento em que o sistema entra em pausa automaticamente; por fim, na terceira opção é possível que a autorização seja por um período indeterminado, permitindo que a simulação ocorra de forma contínua até o momento de interferência do usuário. Nesta terceira forma de simulação é possível acionar o botão de pausa a qualquer momento, permitindo a análise do panorama a qualquer momento desejado.

Ainda no ambiente de visualização do programa é possível a inserção de caixas de dados que fornecem informações sobre o ambiente simulado, conforme configuração desejada pelo programador. Estas informações podem ser apresentadas através de dados numéricos ou gráficos variados (histograma, gráficos de linha ou pontos, etc.).

Além da tela de que permite visualizar o ambiente simulado, o programa oferece uma aba onde é possível editar ou visualizar o código de programação utilizado para montagem do ambiente simulado. O NetLogo utiliza a linguagem de programação Logo, considerada por Lima et. al. (2009) como uma linguagem amigável e de fácil utilização. A tela de inserção e edição do código fonte é apresentada na figura 3.



## 5.2 O RECORTE DENTRO DA DINÂMICA DA CIDADE

Dado que a cidade está caracterizada como sistema complexo (BATTY, 2008; FENG; FENG; SHENG, 2009; PORTUGALI, 2011), é possível afirmar que são várias as dinâmicas urbanas que ocorrem em seu interior e que todas elas apresentam certo grau de interdependência. Portanto o estudo da ocupação do solo não pode ser feito desconsiderando os demais fatores que influenciam os agentes a tomarem a decisão sobre a ocupação de determinado sítio dentro do ambiente.

Embasado nos modelos já propostos, é possível afirmar que o uso do solo sofre influências diretas da economia (BATTY; KIM, 2011; MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010; MILLER; PAGE, 2007), da mobilidade (BATTY; KIM, 2011; MILLER; PAGE, 2007; PORTUGALI, 2011), influências sociais (FENG; FENG; SHENG, 2009; MARETTO; ASSIS; GAVLAK, 2010; MILLER; PAGE, 2007; SCHELLING, 1978; PARKER ET AL., 2003) e da localização geográfica (MILLER; PAGE, 2007; BATTY, 2008) e, portanto, estes fatores não podem ser estudados em separado.

Com o intuito de verificar o comportamento humano na ocupação do solo, considerando todos os fatores expostos no parágrafo anterior, os estudos serão direcionados para dar maior ênfase aos efeitos que a necessidade de mobilidade provoca na mancha urbana, e qual é a reação que este fenômeno provoca na população. Busca-se compreender a emergência dos fenômenos em resposta à forma que a cidade vai assumindo no decorrer da auto-organização.

## 5.3 ESTUDO DOS MODELOS DISPONÍVEIS

Dentro dos diversos modelos apresentados na literatura é possível verificar o objetivo de analisar o comportamento dos habitantes em decorrência do panorama

em que estão inseridos. Para Miller e Page (2007) esta é a essência da modelagem de sistemas complexos.

A necessidade de simplificação dos sistemas para viabilizar a modelagem faz com que muitas vertentes sejam descritas no sistema de forma suave, visível apenas através de uma análise minuciosa e aos olhos daqueles que possuem conhecimento prévio sobre as ciências tradicionais.

## 5.3.1 Breve resumo sobre os modelos propostos na literatura

Alguns trabalhos foram estudados e analisados no decorrer da revisão da literatura. Apesar dos variados objetivos dos livros e artigos, os modelos visavam a reprodução de estudos ou situações empíricas para a validação da utilização da abordagem de sistemas complexos na análise de dinâmicas da cidade.

## 5.3.2 Modelo de Segregação de Schelling

Embora o estudo de Schelling (1978) tenha o intuito de confirmar que o resultado final pode ser diferente da somatória das ações individuais - *Micromotives and macrobehavior*, as premissas deste modelo têm sido incorporadas por alguns autores (FENG; FENG; SHENG, 2009) para estudos de ocupação do solo, tendo como base que os limites de tolerância à vizinhança é fator determinante na escolha dos agentes em relação a estabelecer-se em determinado local.

## 5.3.3 Modelo de ocupação de Kohl

O geógrafo alemão J. G. Kohl formulou seu trabalho em meados do século XIX, mais precisamente em 1841, quando os efeitos do capitalismo ainda eram considerados iniciais. Maretto, Assis e Gavlak (2010) afirmam que esta proposta pode ser considerada da era pré-industrial. Kohl concluiu que a sociedade era segregada, com a elite ocupando o centro da cidade e as classes mais pobres na

periferia. Este fenômeno se dava em função das limitações de mobilidade imposta à época e da necessidade da elite se fixar nas proximidades das instituições importantes na época, como a administração da cidade, os agentes financeiros e as empresas, todos localizados na região central.

A modelagem das conclusões de Kohl realizadas por Maretto, Assis e Gavlak (2010) resultou em uma mancha urbana composta por anéis concêntricos sendo que cada anel é ocupado por uma categoria de agentes, divididos em instituições, ricos, médios e pobres.

## 5.3.4 Modelo de ocupação de Burgess

Também modelado por Maretto, Assis e Gavlak (2010) o estudo de ocupação do solo desenvolvido por Burgess em meados da década de 1920 é considerado pós-industrial e relata os primeiros efeitos da industrialização.

Revelando a deterioração do centro da cidade devido aos efeitos da ocupação pelas indústrias a modelagem do estudo de Burgess também resulta anéis concêntricos, a exemplo do modelo de Kohl, mas a ocupação é invertida. Enquanto as classes mais favorecidas financeiramente afastam-se do centro da cidade para fugir da poluição, a mesma é preenchida pelos pobres, que se aproximam do local de trabalho e reduzem tempo e custo com mobilidade.

## 5.3.5 Modelo de ocupação de Hoyt

Realizado pouco depois do período do estudo de Burgess, no final da década de 1930, Hoyt inclui no seu estudo fatores de deslocamento e amenidades às externalidades negativas geradas pelas novas atividades da cidade. Como resultado da modelagem realizada por Maretto, Assis e Gavlak (2010) a mancha urbana apresentou segregação, com os mais ricos ocupando corredores beneficiados por

vias de acesso e áreas consideradas beneficiadas natural e socialmente. Com a presença deste eixo ocupado pelos mais ricos, cercados pela classe média, a disposição em anéis verificadas nos modelos de Kohl e Burgess não é mais visualizada no estudo de Hoyt.

## 5.3.6 Modelo de Batty e Kim

Embora não haja citação do estudo de Hoyt, as premissas apresentadas na modelagem realizada por Batty e Kim (2011) também partem do princípio de que o agente busca o melhor sítio considerando a mobilidade urbana e as externalidades negativas amenizadas. Os avanços no modelo proposto estão na configuração espacial, onde as melhores localizações diferem do ponto central apresentado por Hoyt e nas conclusões apresentadas.

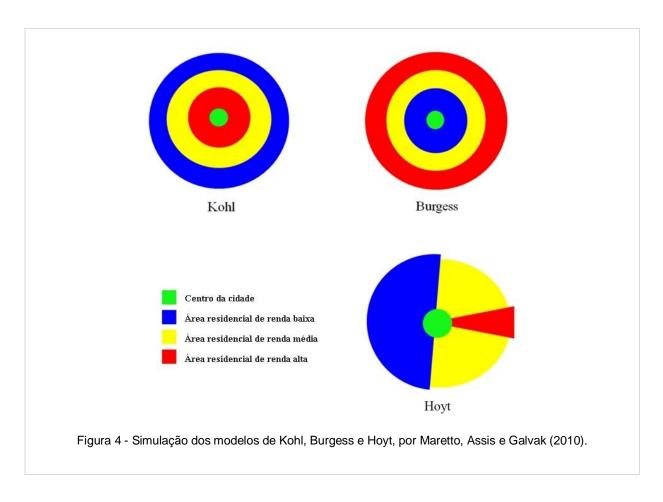
Batty e Kim (2011) afirmam que o modelo precisa ser validado através da comparação com dados empíricos. Na conclusão do trabalho os autores reafirmam a necessidade da abordagem multidisciplinar sobre o estudo do planejamento urbano diante da influência de fatores econômicos, ambientais e sociais nas decisões dos agentes e enfatizam e existência de limitações na modelagem do comportamento humano. Como panorama final, a modelagem apresenta segregação e a formação de *clusters* (grupos isolados).

## 5.3.7 Pontos de interesse dos agentes nos modelos estudados (vínculos do modelo)

Kohl (1841), Burgess (1925) e Hoyt (1939) afirmam que cada habitante procura a melhor posição dentro da cidade para se implantar. Vale ressaltar que estes trabalhos foram realizados em um panorama que difere muito da atualidade. Para Kohl, a posição de interesse dos habitantes estava relacionada ao centro da cidade, pois neste ponto era o local onde estavam implantadas as instituições financeiras que comandavam a cidade na era pré-industrial. Para Burgess, o melhor

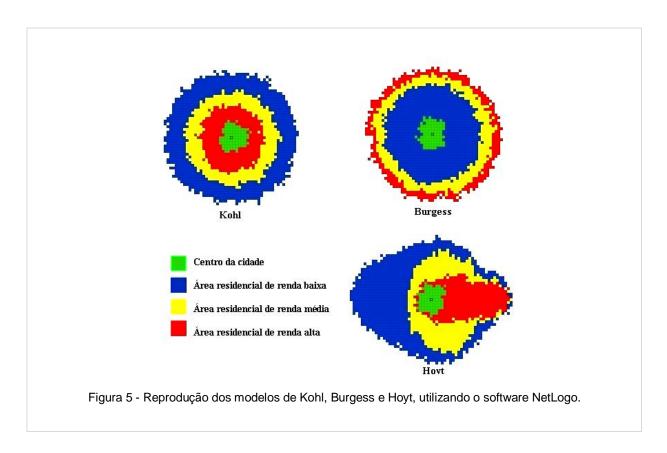
ponto a ser habitado estava na periferia (ponto de interesse), pois em seu modelo já foram consideradas as externalidades decorrentes das atividades industriais executadas nas proximidades dos centros urbanos (era pós-industrial). Já Hoyt assume um corredor como ponto de interesse dos habitantes, partindo do centro da cidade, onde as externalidades são amenizadas e, portanto, os sítios são considerados os melhores para serem ocupados.

Os resultados das simulações com os pressupostos de Kohl, Burgess e Hoyt modelados por Maretto, Assis e Gavlak (2010) estão apresentados na figura 4.



As cores das classes sociais foram mantidas iguais para todas as simulações com o intuito de facilitar a visualização e confrontação dos panoramas finais dos modelos.

Posteriormente ao entendimento dos pressupostos dos modelos, os mesmos foram reproduzidos em NetLogo, e os resultados encontrados assemelham-se com o publicado por Maretto, Assis e Gavlak (2010). Os resultados das simulações montadas e reproduzidas para este trabalho estão apresentados na figura 5.



# **5.4 ALTERAÇÕES PROPOSTAS**

A partir do conhecimento teórico, para a perfeita compreensão da dinâmica de ocupação do solo, algumas alterações nos modelos estudados foram propostas.

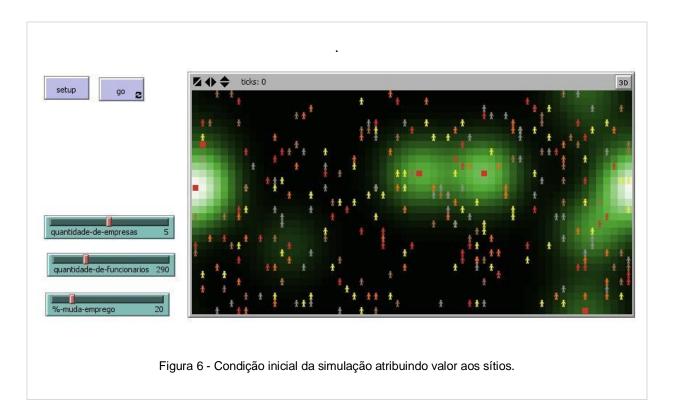
## 5.4.1 Alterações iniciais para entendimento da dinâmica de ocupação de sítios

Conforme preconiza Miller e Page (2007) o avanço das ciências requer a consideração de todos os estudos desenvolvidos até a presente data. Diante desta afirmação os resultados amplamente encontrados na literatura orientam as premissas dos primeiros modelos propostos nesta dissertação, com o objetivo de

calibrar os estudos iniciais e posteriormente, inserir variações que possam aumentar o grau de conhecimento sobre os processos urbanos que são alvos deste trabalho.

Inicialmente foi proposta a modelagem de sistema de ocupação do solo partindo do pressuposto de que há diferença entre os agentes que ocupam os sítios. A cidade é a somatória de diferentes pessoas (CHOAY, 2005) e esta heterogeneidade é necessária para sistemas complexos (MILLER; PAGE, 2007), portanto todos os modelos trabalhados até o momento são compostos por diferentes grupos de agentes, ora dividido por interesse e objetivo, ora dividido em classes econômicas ou grupos semelhantes.

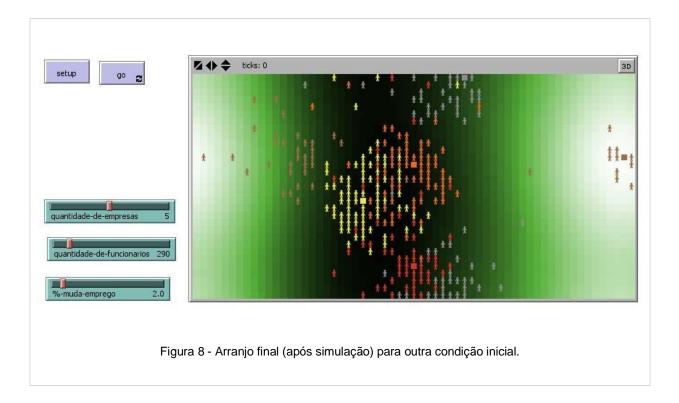
Fatores econômicos foram inseridos em valores distribuídos aos sítios, e representam condição para a ocupação do local. Em um primeiro momento, foi simulada a situação de melhor localização obedecendo a relação entre custo de aquisição do sítio e custo de deslocamento para o alvo pretendido sobre a condição apresentada na figura 6.



Com a evolução do sistema, a partir da análise visual do tabuleiro da simulação, fica sugerido que há relação entre as duas variáveis – deslocamento e custo do sítio. Caso o custo do sítio fosse anulado, todos os ocupantes tenderiam à ocupar as posições imediatamente ao lado o seu destino. Se o deslocamento fosse ignorado, todos procurariam os sítios de menor valor (sítios mais escuros). A consideração das duas variáveis leva a ocupação das regiões intermediárias conforme verificado na figura 7.



A figura 8 apresenta a variação do panorama a partir de uma condição inicial diferente do exemplo anterior. Algumas outras hipóteses iniciais foram realizadas com alterações nas condições iniciais e os resultados têm convergido para as características de ocupação semelhantes às verificadas em simulações anteriores.



Em outra simulação, verificada na figura 9, considerou-se o interesse em se instalar no ponto ideal entre três cidades às quais são atribuídos vínculos aos habitantes, além da escolha de uma vizinhança suportável, dentro do limite de tolerância ajustado. Os três pontos de interesse correspondentes aos três vínculos são escolhidos aleatoriamente, com a possibilidade de repetição. Neste primeiro teste as condições iniciais do modelo são aleatórias. Como estratégia o agente procura por um determinado ponto onde a somatória das distâncias percorridas para alcançar os três vínculos seja a menor possível, dentro da vizinhança admissível.

Ainda na figura 9 é possível verificar o estado do tabuleiro após a simulação, sendo notória a presença de alguns espaços vazios que supostamente deveriam estar ocupados e cidades (representadas por quadrados brancos) um pouco mais isoladas com população mais baixa que as demais. Nesta etapa não foi permitida a ocupação de um sítio por mais de um habitante.



Figura 9 - Panorama do tabuleiro após a simulação da dinâmica entre os habitantes.

Na figura 10 a ocupação é livre de limites em termos de quantidade de habitantes em um mesmo sítio, considerando que o mesmo sítio só pode ser ocupado por habitantes de mesma cor. É possível visualizar que uma das cidades, apesar de possuir maior quantidade de vínculos, possui a segunda menor população, supostamente por estar em localização mais desfavorável que as demais.

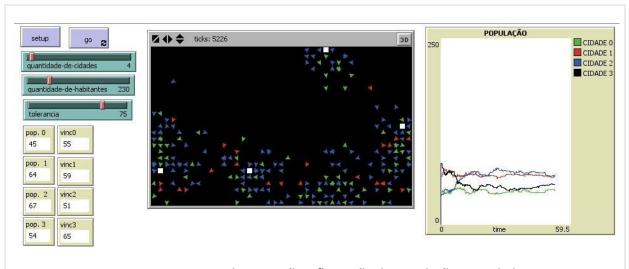


Figura 10 - Panorama da ocupação e flutuação da população nas cidades.

## 5.4.2 Verificando o surgimento de novos centros

Dadas as premissas dos modelos de Hoyt (1939), Kohl (1841) e Burgess (1925) os quais preconizam que a preferência de ocupação dos espaços está diretamente relacionada ao poder aquisitivo dos agentes que compõem a cidade. O modelo proposto, fruto deste estudo, agrega algumas informações ao quadro de simulação incluindo o custo da locomoção dos agentes pela cidade. Esta variável encontra embasamento teórico nos trabalhos de Batty (2007) Maretto, Assis e Gavlak (2010) e Irwin e Bockstael (2007).

A variação na forma de cálculo do custo de transporte é um fator importante a ser inserido no modelo, visto que a simples tomada da distância entre os dois pontos não agrega os demais valores verificados empiricamente, como o gasto de tempo e estresse causado na locomoção, entre outros fatores.

## 6. O MODELO PROPOSTO

O modelo descrito neste capítulo é fruto de um processo de desenvolvimento que se iniciou pela revisão da literatura, reconstrução de modelos existentes seguindo os parâmetros descritos em trabalhos científicos já publicados e algumas adequações ou alterações propostas.

Deste processo surgiram muitas variações e modificações, algumas abandonadas, outras alteradas novamente, e que enfim resultaram no modelo apresentado.

Todo o modelo foi desenvolvido em **MBA** e utilizado o software NetLogo para reprodução das simulações pretendidas. A seguir o modelo será descrito conforme sua versão final.

## 6.1 COMPONENTES DO MODELO PROPOSTO

O modelo proposto é composto por partes que podem ser visualizadas com facilidade e por partes que estão ligadas às características ou premissas que precisam ser entendidas para que haja compreensão do modelo como um todo.

## 6.1.1 O tabuleiro da simulação

O tabuleiro da simulação representa o ambiente onde ocorrem as interações entre os agentes. Para o modelo proposto ele representa o solo a ser ocupado, composto de uma malha quadriculada com dimensões de 101 x 101 quadros, totalizando 10.201 posições possíveis de serem ocupadas.

No tabuleiro estão representadas as "cidades" (círculos) ou pontos de interesse com os quais os agentes possuem vínculos. Também estão representados os habitantes (quadrados) que se locomovem pelo tabuleiro conforme as regras do

modelo. Para o tabuleiro de 10.201 posições, a quantidade de cidades pode variar de 3 até 100 e a quantidade de habitantes pode variar entre 50 à 10.000. Estes valores podem ser ajustados na tela inicial do programa, conforme necessidade. Um exemplo de tela da simulação proposta pode ser observado na figura 11.

Com o intuito de aproximar-se da realidade o tabuleiro foi considerado um mundo plano, ou seja, limitado pelas quatro arestas do mesmo. Esta decisão possibilitou comparar o tabuleiro da simulação com um mapa de uma região qualquer. A utilização do mundo toroidal foi descartada considerando que, quando comparado com a realidade, as cidades não se repetem em um mapa, pois elas são únicas.

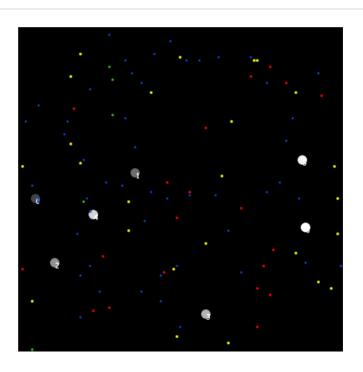
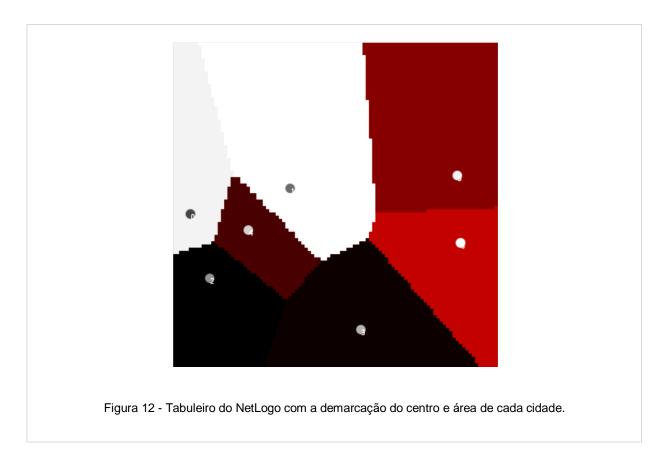


Figura 11 - Tabuleiro do NetLogo, ocupado por cidades (círculos) e habitantes (quadrados).

#### 6.1.2 As cidades

As cidades são as áreas do tabuleiro que representam uma região que é delimitada por contornos claros. Os círculos representam o centro de cada cidade e para determinação dos limites e seu território, é verificada a distância de cada ponto do tabuleiro até o centro mais próximo, incluindo este ponto como território pertencente à cidade com o centro mais próximo. A representação das áreas de cada cidade e de seu respectivo cento pode ser verificada na figura 12 abaixo, onde é representado o tabuleiro, os centros e as referidas áreas de cada cidade.



As cidades são numeradas partindo-se do numero "0", em ordem crescente, até o limite da quantidade de cidades ajustadas na barra deslizante do NetLogo. Para fins de cálculo de área da cidade é contada a quantidade de *patches* (posições possíveis de serem ocupadas pelos habitantes) incluídos dentro dos limites de cada cidade, conforme lista de cidades e áreas verificadas na tabela 1.

Tabela 1 – lista de áreas de cada cidade representada na figura anterior.

#### 6.1.3 Os habitantes

Os habitantes são os agentes que ocupam as cidades e se movimentam pelo tabuleiro conforme uma estratégia (melhor detalhada no item 6.1.7). Seguindo os modelos propostos por Kohl (1841, citado por SJOBERG, 1960) Burgess (1925) e Hoyt (1939), os habitantes foram divididos em 4 classes hierárquicas, conforme seu potencial aquisitivo, sendo as classes denominadas como institucional, ricos, médios e pobres. O poder aquisitivo mais alto pertence às instituições, seguidos pelos ricos, depois pelos médios e termina, com o menor poder aquisitivo, com os pobres.

Ainda seguindo as premissas dos modelos encontrados na literatura, as instituições representam 5% (cinco por cento) dos habitantes, os ricos, 20% (vinte por cento), enquanto os médios formam 25% (vinte e cinco por cento) e os pobres representam os 50% (cinquenta por cento) restantes. Estes valores podem ser diferentes da descrição acima, e podem ser ajustados na tela da simulação.

## 6.1.4 Vínculos entre habitantes e cidades

Apesar de estarem estabelecidos em apenas uma cidade, os agentes podem possuir vínculos com a cidade nas quais estão estabelecidos e/ou com outras cidades existentes no tabuleiro. Esta situação representa, empiricamente, que um habitante qualquer pode habitar em uma das cidades, mas mantém relações de

interesse que o leva a viagens até as demais cidades (independente da periodicidade).

A quantidade de cidades com os quais os habitantes possuem vínculos pode ser ajustada através da barra deslizante na tela do NetLogo denominada "n-vínculos".

#### 6.1.5 Distâncias no tabuleiro

A distância entre dois pontos no tabuleiro é medida por uma reta que liga os dois pontos a serem medidos, conforme apresentado na figura 13. O programa escolhido para simulação (NetLogo) mede esta dimensão através de um comando interno, não sendo necessária a elaboração ou aplicação de fórmulas específicas para esta rotina.

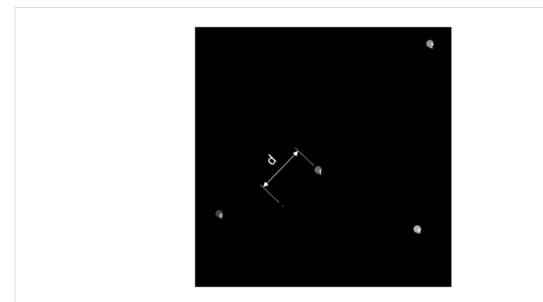


Figura 13 - Apresentação da distância (d) medida entre um habitante e o ponto de interesse "1" no tabuleiro.

A partir de um ponto qualquer no tabuleiro, é possível dimensionar a distância até qualquer outro ponto. Também é possível o armazenamento de mais de uma variável, ou seja, da distância entre determinado ponto e todos os demais pontos dentro do tabuleiro.

Desta forma cada agente possui a informação sobre sua distância até as cidades ou qualquer outro habitante no mundo simulado.

#### 6.1.6 Custo de deslocamento

Dada uma posição qualquer dentro do mundo (tabuleiro) em que um habitante qualquer possa estar (escolhido aleatoriamente), considera-se, para fins de simulação do mundo real, que este habitante deva realizar viagens periódicas até o centro das cidades com as quais possui vínculos.

Esta situação reflete o mundo real, pois trabalhamos em determinado ponto de uma cidade, mas moramos a certa distância do nosso posto de trabalho, assim como estamos localizados a certa distância do local onde estudamos (que é diferente do local onde trabalhamos), ou nos deslocamos para visitas à família, ou ainda para compras ou entretenimento. Enfim, cada ponto com o qual o habitante possui vínculo representa um ponto de interesse para o qual ele se destina por certa necessidade, portanto todos estes pontos de interesse são considerados vínculos de um habitante.

Habitando em um ponto do mundo, considera-se que o habitante terá custo para locomover-se entre sua origem e seus pontos de interesse. O custo de locomoção pode variar com o decorrer do tempo histórico de uma cidade. Por este motivo, na simulação proposta, o custo de locomoção entre o ponto ocupado pelo habitante até o seu ponto de interesse (vínculo) será dado pela formula:

$$C = d^k$$

Onde o custo de deslocamento (C) é igual a: distância entre dois pontos (d), elevado ao exponente "custo de locomover-se", representado por "k"

Para os habitantes que possuem vínculos com mais de um ponto de interesse, o custo do transporte é dado pela somatória de cada distância elevada à k, conforme formula:

$$C = d1^k + d2^k + ... + ...dn^k$$

Onde "n" é a quantidade de vínculos pertencente ao habitante.

## 6.1.7 Estratégia de ocupação do tabuleiro

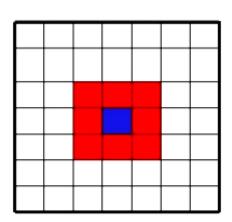
Dado que os habitantes possuem vínculos com diversas cidades, a estratégia dos agentes, independente de sua classificação na hierarquia, é de buscar o melhor posicionamento no tabuleiro considerando o ponto que minimize o seu custo de deslocamento até cada uma das cidades com as quais mantém vínculos.

## 6.1.8 Condições de ocupação

Cada agente pode ocupar apenas uma posição no tabuleiro a cada rodada. Cada posição comporta apenas um agente. Seguindo as premissas dos modelos estudados, (KOHL, 1841, citado por SJOBERG, 1960), (BURGESS, 1925) e (HOYT, 1939) os agentes com maior poder aquisitivo tem preferência de ocupação sobre os agentes com menor poder aquisitivo e, em caso de conflito na ocupação de um sítio, prevalece aquele que tem a preferência.

## 6.1.9 Dinâmica de mudança no tabuleiro

Após os ajustes e ocupação inicial do modelo, um dos habitantes é escolhido aleatoriamente (com a mesma probabilidade dentre todos os habitantes). Este habitante é designado "escolhido". A escolha do habitante é sucedida pela escolha de uma posição no tabuleiro que seja contígua a posição atual, ou seja, para esta escolha é utilizada a vizinhança de Moore, conforme apresentado na figura 14.



# Primeiros vizinhos

Figura 14 - Vizinhança de Moore, que representa 8 opções (em vermelho) de mudança ao habitante que está na posição central (em azul).

Após a escolha da posição de interesse, o agente verifica se o local já se encontra ocupado ou não por outro habitante. Em caso de uma posição livre, ou seja, caso o local esteja vago, é avaliado o fator custo de deslocamento (C) desta nova posição. O habitante escolhido toma por posição aquela que representa o menor valor de "C", conforme a estratégia de todos os habitantes de escolher a posição menos onerosa para se fixar.

Outro caso possível de ocorrer é quando o local escolhido para mudança está ocupado por outro habitante. Nesta condição, seguindo as premissas dos modelos estudados, irá prevalecer a estratégia para aquele habitante que possui maior poder aquisitivo, portanto, caso a posição esteja ocupada por outro habitante de poder aquisitivo igual ou superior ao do escolhido, nada irá acontecer e a rotina retorna para seu início, com a escolha de outro habitante.

Na situação em que o local escolhido estiver ocupado por um habitante que possui poder aquisitivo inferior ao do "escolhido" é verificada a situação de minimização do custo "C". Caso esta seja favorável à estratégia do habitante "escolhido" haverá a troca de posição com o habitante que se encontrava na posição sorteada aleatoriamente, mesmo que nesta troca aquele que estava habitando no local escolhido fique prejudicado na minimização do seu custo de deslocamento "C".

A dinâmica de movimentação no mundo (tabuleiro) que representa a movimentação de uma população, em relação às cidades com as quais possuem vínculos, sempre procurando o melhor posicionamento, no que se refere ao deslocamento, pode ser visualmente verificada no algoritmo representado na figura 15.

Apesar de mantida a mesma estratégia para todas as simulações, o resultado final da ocupação do mundo pode variar conforme os valores a serem inseridos através dos ajustes iniciais do modelo.

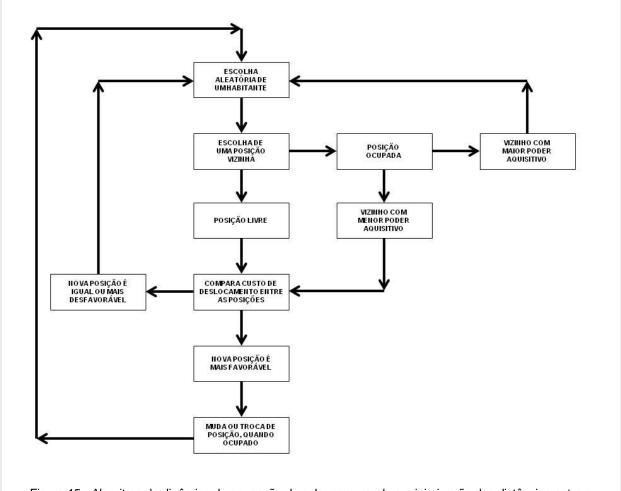


Figura 15 - Algoritmo da dinâmica de ocupação do solo, procurando a minimização das distâncias entre o habitante e seus vínculos.

# **6.2 AJUSTES DAS CONDIÇÕES INICIAIS**

Para o início da simulação da dinâmica de ocupação do solo urbano, o modelo possibilita variação nos ajustes iniciais. Esta variação tem o intuito de comparar o comportamento dos agentes e o panorama final da simulação para situações distintas.

Vale ressaltar que alguns parâmetros, inicialmente, são fixos e sua modificação depende da alteração do código do programa. Entre os parâmetros fixos estão o tamanho do tabuleiro, contendo 10201 *patches* (posições possíveis) e as cores atribuídas às classes hierárquicas dos habitantes, que seguem os padrões

adotados pela literatura estudada, facilitando a comparação visual dos resultados obtidos para as simulações.

Outros fatores podem ser selecionados conforme os limites pré-estabelecidos pelos elementos que compõem a tela do programa. A amplitude dos limites foi estabelecida após a realização de sucessivos testes no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

#### 6.2.1 Quantidade de cidades

A quantidade de cidades representa o numero de pontos de interesse possíveis para os habitantes inseridos na simulação. Considerando o tamanho máximo do mundo (10201 posições) a quantidade de pontos de interesses (cidades) fica limitado ao mínimo de 1 (uma cidade ou ponto de interesse) e ao máximo de 100 (cem).

A quantidade de cidades a serem inseridas pode ser ajustada pela barra deslizante identificada como "numero-de-cidades" na tela do NetLogo.

As cidades são inseridas no mundo através do comando *setup* e seu posicionamento é aleatório. Caso uma cidade seja inserida sobre outra ou fique a uma distância inferior à 2 patches de outra cidade qualquer, ela é movida automaticamente para uma outra posição aleatória no mesmo tabuleiro. Essa prática de manter a distância mínima de 2 *patches* entre cidades inibe a sobreposição de centros e elimina a possibilidade de erro nos resultados da simulação.

### 6.2.2 Quantidade de habitantes

A quantidade de habitantes refere-se ao montante de agentes que serão inseridos no tabuleiro e que buscarão o melhor posicionamento em relação aos

pontos com os quais mantém vínculos, conforme estratégia única adotada para o todos os habitantes existentes no modelo.

Dentre todos os habitantes inseridos no tabuleiro da simulação, há separação de classes sociais, conforme percentual escolhido na tela inicial do NetLogo através das barras deslizantes específicas para cada nível hierárquico.

As classes sociais dividem-se em quatro: instituições, ricos, médios e pobres, sendo o de maior poder aquisitivo as instituições, seguidos pelos ricos, depois pelos médios e o menor poder aquisitivo é atribuído aos pobres. As cores de cada habitante está diretamente relacionada a sua classe social. As instituições são representadas pela cor verde, os ricos estão em vermelho, a classe média assume cor amarela e os pobres utilizam a cor azul. Esta sequência de cores segue o padrão utilizado por Maretto, Assis e Gavlak (2010) na reprodução dos modelos estudados e possibilita clareza e facilidade na comparação dos resultados.

Inicialmente todos os habitantes são inseridos como "pobres" e lhes é atribuída a cor azul. Após a inclusão de todos os habitantes, parte deles é elevada à classe social de médios, outra parte à classe dos ricos e, por fim, parte à classe de instituições. O remanescente permanece pobre.

A quantidade de habitantes que tem a sua classe social alterada representa um percentual da quantidade total de habitantes. Este percentual é ajustado nas barras deslizantes encontradas na tela inicial do NetLogo, dentro dos parâmetros pré-determinados. As instituições podem representar entre 0 e 10% do total de habitantes, os ricos, entre 0 e 30%, os médios, entre 0 e 40% do total de habitantes. A quantidade de pobres corresponde à diferença entre a somatória das instituições, dos ricos e dos médios e a quantidade total dos habitantes.

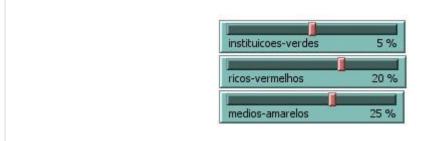


Figura 16 - Barras deslizantes para ajuste do percentual das classes sociais distribuídas entre os habitantes.

#### 6.2.3 Quantidade de vínculos

Os vínculos representam um elo existente entre o habitante e um determinado ponto de atração dentro do mundo simulado. Empiricamente é possível afirmar que o posicionamento do habitante no tabuleiro seria seu ponto de moradia e os vínculos entre o habitante e os pontos de interesse podem representar seu posto de trabalho ou de estudo, seu ponto favorito de entretenimento, a residência de uma pessoa com a qual há visitas periódicas, ou os mais variados motivos de atração de viagens periódicas realizadas por uma pessoa (ou uma família) dentro de um "mundo".

A quantidade de vínculos (ou a quantidade de pontos de interesse) que cada habitante possui pode ser ajustada pela barra deslizante "n-vinculos" existente na tela de simulação do NetLogo e pode variar entre 1 e 10.

## 6.2.4 Exponente do custo de deslocamento – k (kappa)

O exponente do custo de deslocamento refere-se ao índice "k" (kappa), utilizado no cálculo do custo de deslocamento entre dois pontos quaisquer dentro do mundo simulado e é utilizado na fórmula:

 $C = d^k$ 

Onde:

C = custo total do deslocamento entre dois pontos.

d = distância medida entre a origem e o alvo de destino.

k = exponente custo-transporte

O índice "k" pode ser ajustado na tela inicial do NetLogo através da barra deslizante "custo-transporte" e pode variar entre 0,02 e 2,00, em intervalos de 0,02 unidades.

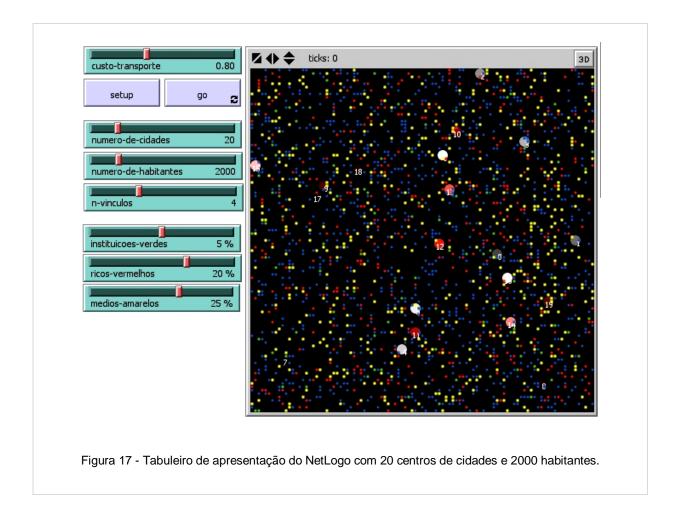
## 6.2.5 Montagem da tela inicial da simulação

Após a finalização dos ajustes inicias (quantidade de cidades, quantidade e divisão dos habitantes, quantidade de vínculos que cada habitante mantém com as cidades e valor do exponente "k") a tela inicial do NetLogo é montada acionando o botão *setup*, que irá apagar todos os dados anteriores do programa e inserir os novos dados, conforme ajuste.

Dentre as variadas possibilidades de montagem do mundo inicial, a figura 17 demonstra um exemplo de montagem para: custo de transporte (índice k) igual à 0,80 (oito décimos); quantidade de cidades igual à 20 (vinte); 2000 (dois mil) habitantes, sendo que 5% (cinco por cento) são instituições, 20 % (vinte por cento) são ricos, 25% (vinte e cinco por cento) são médios e, por exclusão, 50% (cinquenta por cento) são pobres.

Após a configuração inicial do mundo a ser simulado, as quantidades de cidades, habitantes e vínculos permanecem inalteradas no decorrer da simulação.

Caso o botão *setup* seja acionado novamente, sem a alteração dos ajustes iniciais, haverá a redistribuição dos elementos da simulação e todas as informações anteriores são apagadas.



# 6.3 SIMULAÇÕES

Após os ajustes iniciais e a montagem da tela inicial do NetLogo, a partir do acionamento do botão *go*, presente na tela do NetLogo, é dado início à dinâmica de busca da posição ideal para cada habitante. O progresso do arranjo pode ser acompanhado visualmente no tabuleiro. A dinâmica pode ser interrompida em qualquer ponto. Pressionando novamente o botão *go*, é retomada a simulação a partir do ponto interrompido.

## 6.3.1 Calibração do modelo

Após as repetições das simulações iniciais, a calibração do modelo foi realizada com a base teórica do modelo de Kohl, apresentado por Maretto, Assis e Gavlak (2010), onde a premissa básica é de que os agentes com maior poder

aquisitivo ocupam as melhores posições nas cidades, considerando ser o centro da cidade o melhor posicionamento para um habitante. A relatividade do melhor local a ser ocupado é explorada por Burgess (1925) que considera o oposto de Kohl. Para Burgess (1925) o melhor local a ser ocupado é a periferia, dado que em certo período histórico os centros das cidades passam por um processo de deterioração, porém ambas as teorias reafirmam que os agentes com menor poder aquisitivo acabam por ceder sua posição para aqueles com maior poder aquisitivo.

Como ponto inicial, o modelo de Kohl foi reproduzido no NetLogo, conforme pode ser verificado na figura 18 abaixo.

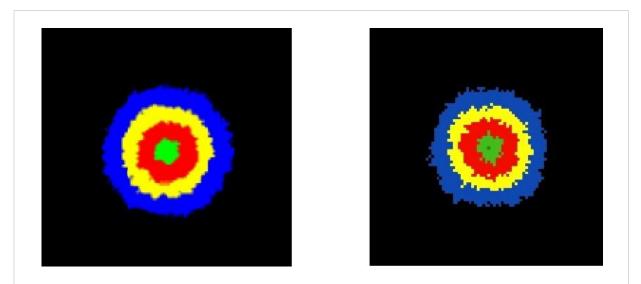
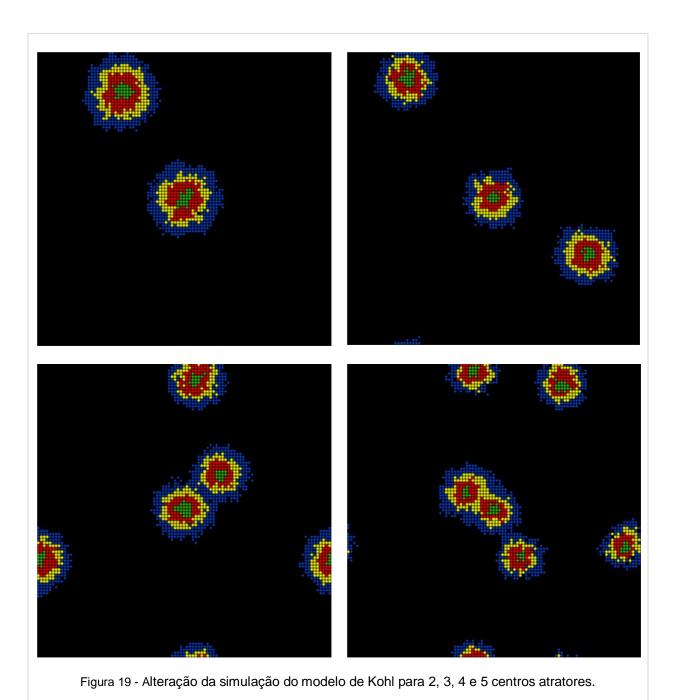


Figura 18 - Calibração do modelo através da comparação dos resultados com a literatura publicada. Esquerda: reprodução do modelo de Kohl por Maretto, Assis e Gavlak (2010).Direita: Reprodução de modelo de Kolh para uma cidade.

Posteriormente a verificação da calibração do modelo através da replicação exata do modelo de Kohl, o modelo foi reformulado, considerando que a quantidade de centros atratores pode ser superior à 1 (um), conforme figura 19, ou seja, em uma região pode haver mais de uma área de interesse "concorrendo" para atrair os moradores da região.



Nota-se que com a inserção de mais de um ponto atrator pode ocorrer a sobreposição de populações que, apesar de estarem interessadas em pontos de interesse distintos, entram em conflito pela ocupação da mesma região, pois o mesmo espaço pode ser considerado uma boa posição para os habitantes vinculados com centros diferentes.

Este fenômeno, resultante da sobreposição das populações originárias de centros atratores distintos é conhecido em planejamento urbano pelo nome de conurbação urbana.

## 6.3.2 Variação na inserção dos habitantes

Deve-se ressaltar que a diferença entre os modelos estudados na literatura e o modelo proposto neste trabalho está apenas na ocupação inicial. Enquanto que nos modelos de Kohl, citado por Maretto, Assis e Gavlak (2010), e Burgess (1925) partem da inserção de um agente por vez, a partir do centro da cidade, o modelo proposto insere aleatoriamente todos os agentes no mundo, os quais buscam sua melhor localização através da mudanças de posicionamento. Mais um exemplo de condições iniciais do modelo proposto pode ser verificado na figura 20.

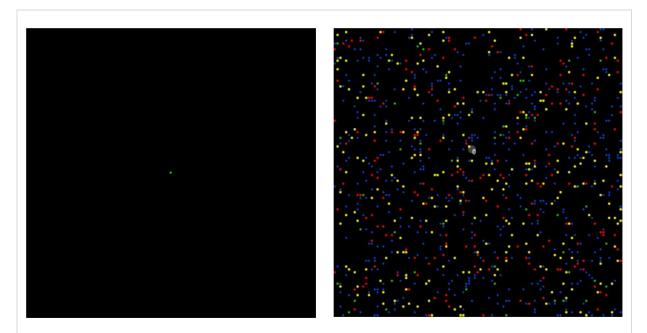
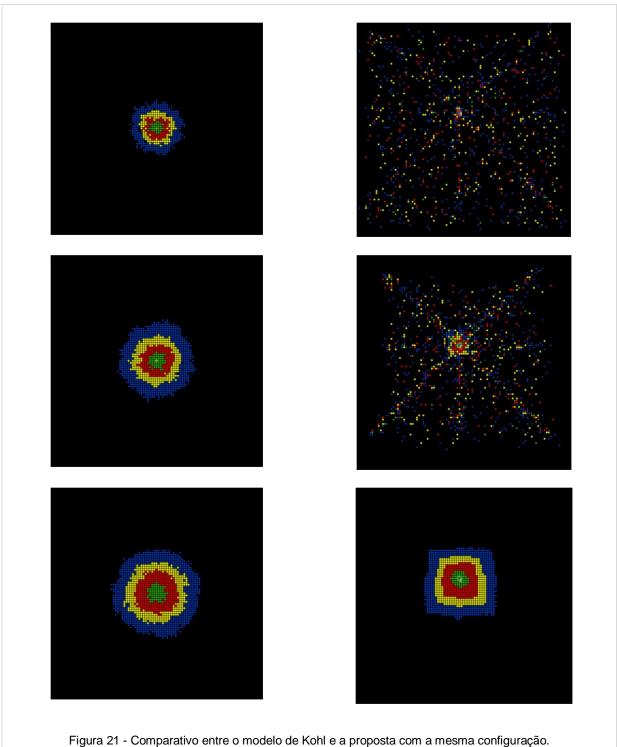


Figura 20 - Diferença da condição inicial do modelo de Kohl e do modelo proposto. À direita: condição inicial do modelo de Kohl. À esquerda: variação da condição inicial do modelo proposto.

Dado que a condição inicial dos modelos é diferente, o visual da evolução temporal também apresenta diferenças visuais no tabuleiro, bem como o quadro final pode apresentar ligeiras alterações, contudo é possível verificar semelhanças.



## 6.3.3 As combinações iniciais dos mundos simulados

Apesar do grande número de possibilidades de combinação de fatores iniciais e da simulação e verificação de muitas delas, os resultados analisados, discutidos e apresentados neste trabalho são fruto da combinação de três variáveis, a saber: quantidade de habitantes, quantidade de vínculos e o índice "k".

Procurando manter a relação entre a quantidade de pontos de interesse (cidades) e habitantes, o que empiricamente é conhecido por densidade demográfica, foram realizadas simulações com as seguintes relações: 10 cidades com o total de 500 habitantes; 25 cidades com 1250 habitantes; 100 cidades, com 5000 habitantes. Esta escolha se deu mantendo a relação de 1:50 cidades:habitantes (densidade demográfica).

Para a variável "vínculos", também foram utilizadas três opções: 1, 3 e 10 vínculos para cada habitante. Para as simulações realizadas, não foram admitidas as repetições de vínculos para um mesmo habitante, ou seja, os três ou dez vínculos de cada habitante eram realizados com cidades diferentes.

O índice "k" também foi testado com três valores, sendo k igual à 0,50, 1,00 ou 2,00. Estes valores foram adotados considerando que para o valor 1,00, o custo de deslocamento é igual a somatória das distâncias. Os outros dois valores foram testados para análise dos resultados quando k < 1,00 e quando k > 1,00.

Desta forma, combinando as três possibilidades de densidade demográfica com as três possibilidades de vínculos, obteve-se um total parcial de 9 (nove) simulações. Destas nove simulações, foram testadas as três opções de valores para o índice "k", o que resultou em um montante de 27 (vinte e sete) panoramas que foram analisados, conforme demonstrado na tabela 2, de onde foram extraídos os dados analisados.

Para as vinte e sete condições simuladas, cada uma foi repetida 20 vezes, e o resultado apresentado refere-se à soma acumulada de todas as repetições. Esta repetição teve por objetivo diminuir o impacto de eventuais valores anormais que pudessem aparecer, distorcendo os resultados finais.

Combinação	Cidades	Habitantes	Vínculos	Карра
1	10	500	1	0,50
2	25	1250	1	0,50
3	100	500	1	0,50
4	10	500	3	0,50
5	25	1250	3	0,50
6	100	500	3	0,50
7	10	500	10	0,50
8	25	1250	10	0,50
9	100	500	10	0,50
10	10	500	1	1,00
11	25	1250	1	1,00
12	100	500	1	1,00
13	10	500	3	1,00
14	25	1250	3	1,00
15	100	500	3	1,00
16	10	500	10	1,00
17	25	1250	10	1,00
18	100	500	10	1,00
19	10	500	1	2,00
20	25	1250	1	2,00
21	100	500	1	2,00
22	10	500	3	2,00
23	25	1250	3	2,00
24	100	500	3	2,00
25	10	500	10	2,00
26	25	1250	10	2,00
27	100	500	10	2,00
Tabela 2 – combinações verificadas				

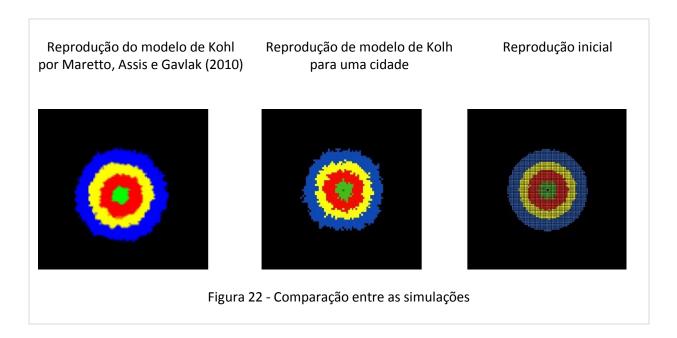
A quantidade de repetições realizadas para cada configuração foi adotada considerando que para simulações repetidas mais de vinte vezes com as mesmas configurações iniciais (exceto posicionamento inicial no tabuleiro) não apresentaram alterações significativas nos resultados encontrados.

# 6.4 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Em todas as fases de desenvolvimento da modelagem proposta foram extraídos resultados que, após análise, mostram-se compatíveis com o processo de calibração utilizado.

## 6.4.1 Pequenas alterações dos modelos da literatura

Os resultados encontrados com a configuração de 1 cidade e, portanto, considerando que todos os habitantes mantém vínculo com esta cidade replicaram os resultados apresentados na literatura estudada, conforme demonstrado na figura 22.



A medida que novas cidades (novos pontos de atração) são inseridas no tabuleiro, dependendo das distâncias existentes entre as cidades, ocorrem sobreposições de populações que, apesar de terem objetivos finais diferentes, concorrem para a ocupação do mesmo espaço, conforme demonstrado na figura 23 e 24

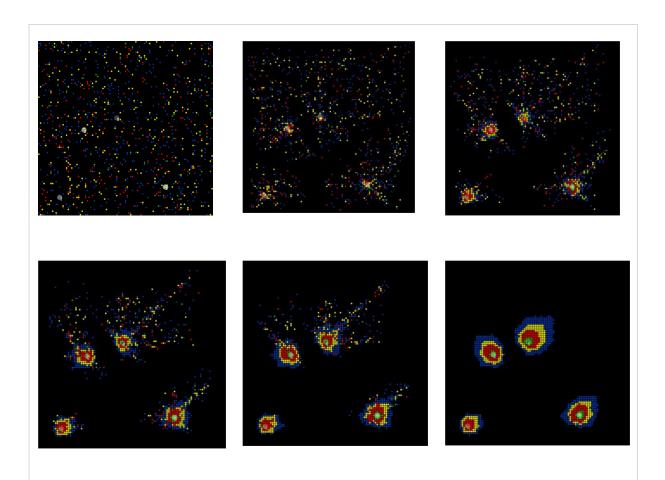


Figura 23 - Evolução da ocupação considerando 4 cidades e cada habitante com o vínculo em apenas uma cidade.

A partir do momento da criação de vínculos entre dois pontos de interesse, se verifica que o posicionamento preferido pelos agentes está localizado entre estes dois pontos, pois a somatória das distâncias entre o ponto escolhido e os extremos da reta é o mesmo valor para qualquer ponto na reta. Nesta configuração, a evolução da simulação passa a ser a verificada na figura 24.

Embora as aglomerações apresentem um desenho diferente da condição anterior (apenas um ponto de interesse), é possível notar a hierarquia presente na ocupação das posições mais favoráveis (neste caso, a menor somatória das distâncias, pois o exponente k está ajustado para 1,00).

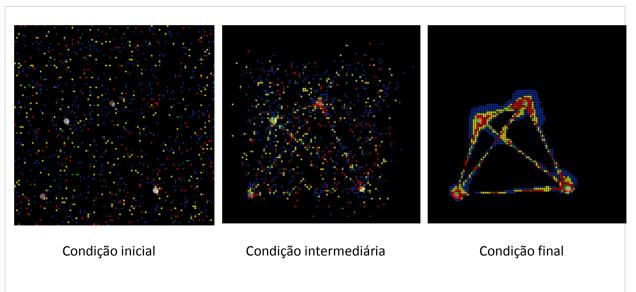


Figura 24 - Simulação considerando que cada habitante possui dois pontos de interesse no tabuleiro.

Com a inserção do terceiro ponto de interesse, o desenho final passa a apresentar uma nova configuração, sendo que a melhor posição de ocupação passa a ser, além do centro de uma cidade, o baricentro formado pelas cidades alvo., conforme se verifica na figura 25.

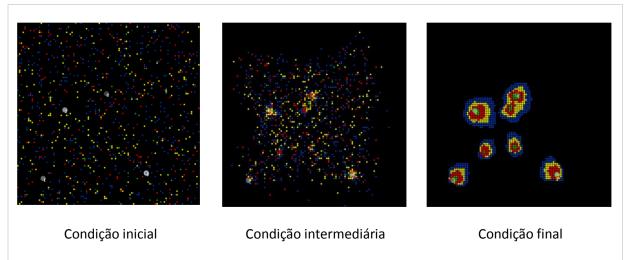


Figura 25 – Simulação considerando que cada habitante possui três pontos de interesse (vínculos) no tabuleiro.

#### 6.4.2 Alterações no cálculo do custo de deslocamento

Como estratégia, todos os habitantes procuram minimizar a distância até o melhor ponto existente no mundo. Maretto, Assis e Gavlak (2010) reafirmam esta estratégia nos modelos estudados. Esta premissa é verdadeira desde a época préindustrial (SJOBERG, 1960), prevalecendo até os períodos pós-revolução industrial (BURGESS, 1925; HOYT, 1939).

É possível afirmar ainda que os caminhos e as distâncias percorridas são de grande importância para a evolução histórica da ocupação de uma cidade (JACOBS, 1961). Com o intuito de atribuir a importância devida à distância percorrida entre dois pontos em uma cidade, faz-se necessário que se contabilize todos os "valores" envolvidos no deslocamento, considerando, além do tempo gasto no deslocamento, o valor gasto com combustível ou passagens, a impossibilidade do desempenho de outras atividades de produção, lazer ou descanso, bem como o estresse físico e mental provocado nos congestionamentos inerentes aos centros urbanos.

Desta forma o custo da distância percorrida entre dois pontos de uma cidade passa a considerar um fator "k" (kappa) que tem o objetivo de agregar à distância percorrida todos os demais fatores apontados acima, ficando estabelecido que o custo final do deslocamento entre dois pontos será:

$$C = d^k$$

Vale ressaltar que no modelo proposto ainda há a possibilidade de manter a consideração da distância simples, para tanto basta o ajuste do exponente "k" para "1.00" (um).

Os resultados apresentados até agora são relativos ao cálculo da distância simples entre dois pontos, o que equivale ao exponente "k" igual a 1,00 (k = 1). A

medida que novos valores são atribuído à "k", percebe-se alterações no comportamento dos agentes, buscando novo posicionamento no tabuleiro. Inicialmente os valores são ajustados para 4 pontos atratores, com os habitantes mantendo vínculos com todos os pontos, variando o exponente k para os valores de 0,50, 1,00 e 2,00. Os resultados podem ser verificados na figura 26.

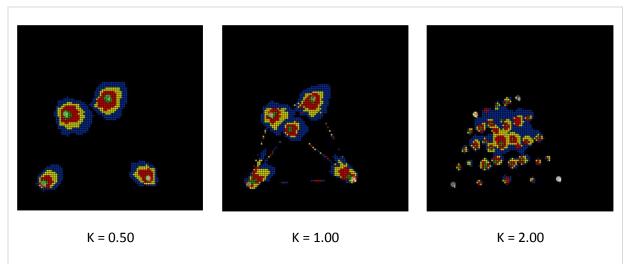


Figura 26 - Demonstração das configurações finais da ocupação (partindo das mesmas condições iniciais), alterando-se apenas o fator k entre 0,50, 1,00 e 2,00.

A figura 27 central replica as condições já discutidas neste trabalho, porém as figuras à esquerda e a direita, ainda na figura 27, demonstram que há variação no posicionamento ideal para os habitantes à medida que o valor do exponente "k" varia para mais ou menos do que 1,00.

As diferenças ficam mais evidentes quando a simulação é realizada com apenas duas cidades e todos os habitantes possuindo vínculos com as duas cidades, conforme pode ser verificado na figura 28 abaixo.

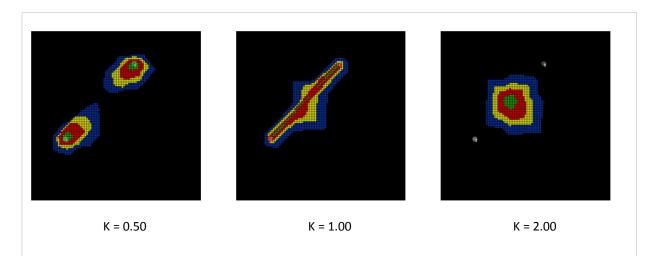


Figura 27 – Apresentação das configurações finais da ocupação (partindo das mesmas condições iniciais, com apenas duas cidades), alterando-se apenas o fator k entre 0.50, 1.00 e 2.00.

Esta preferência de localização pode ser discutida através dos gráficos impressos pelo programa MatLab, os quais relacionam as melhores posições (posições mais baixas no gráfico) a serem ocupadas minimizando a somatória das duas distâncias quando aplicados valores diferentes para o exponente "k".

As figuras 28, 29 e 30 consideram os atratores localizados nos pontos (x,y) – [-1,0] e [1,0] e o custo de deslocamento "C" no eixo Z. Portanto podemos considerar que os melhores locais de ocupação são representados pelos pontos mais baixos em Z, ou seja, aquelas que minimizam a somatória das distâncias após serem elevadas ao índice k. Os valores verificados no eixo Z do plano tridimensional representam a ordem hierárquica de melhor posicionamento, sendo que, quanto menor o valor, melhor a posição.

Na figura 28, são apresentados os pontos que melhor atendem ao objetivo dos agentes que mantém vínculos com as duas cidades quando o exponente K é ajustado para 0,50.

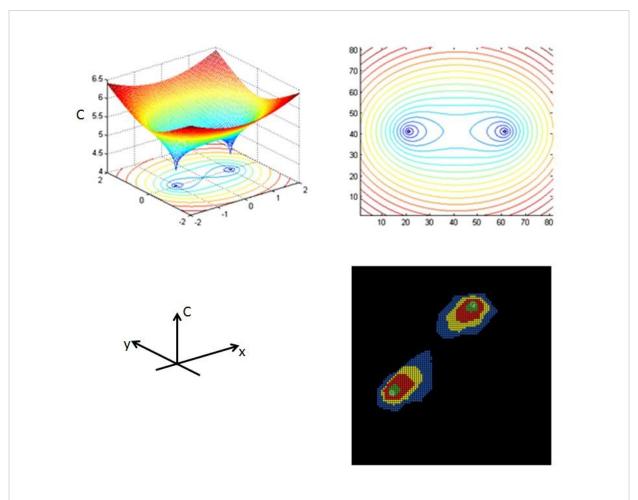
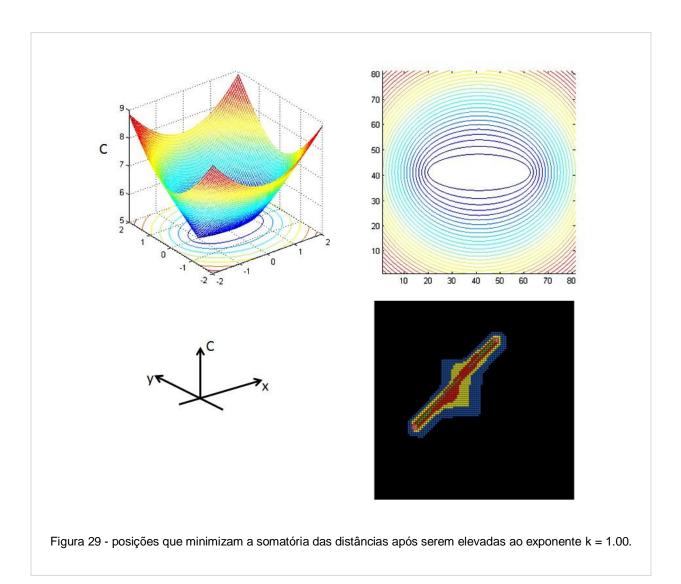


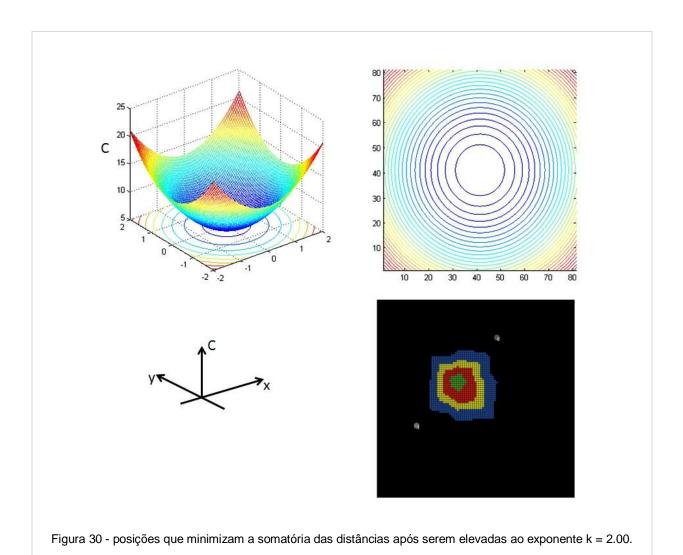
Figura 28 - posições que minimizam a somatória das distâncias após serem elevadas ao exponente k = 0.50.

Na figura 29 o valor de k é ajustado para 1,00. Nesta situação, onde o valor da distância é elevado à 1,00, não há alteração do valor medido, ou seja, C = d1 + d2 (custo de deslocamento é igual a somatória das distâncias), portanto em qualquer ponto da reta a somatória é igual.

Neste momento é válido ressaltar que em algumas situações alguns agentes podem permanecer "presos" à uma determinada posição, visto que, deveriam se deslocar para um local mais desfavorável para, posteriormente, alcançar algum local mais favorável. Esta justificativa explica eventuais diferenças entre os gráficos impressos pelo MatLab e o resultado visual do tabuleiro produzido pelo NetLogo.



Quando o exponente "k" utilizado é igual a 2,00, o ponto ideal de ocupação do tabuleiro é o ponto central entre as duas cidades, conforme pode ser verificado na figura 30.



Para os valores intermediários, tanto abaixo, quanto acima do valor de 1,00, as figuras geométricas obtidas podem ser consideradas intermediárias entre as apresentadas acima, conforme verificado nos panoramas finais para as mesmas condições iniciais. As simulações para ajustes intermediários dos valores de *kappa* estão demonstradas na figura 31.

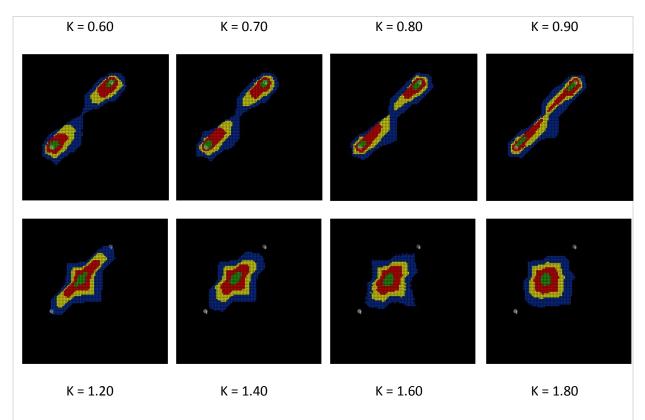
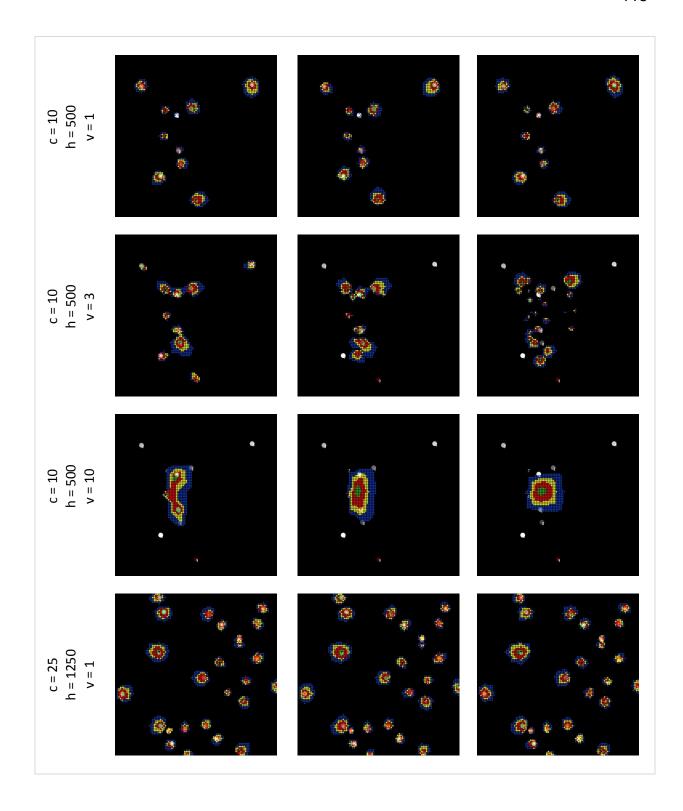


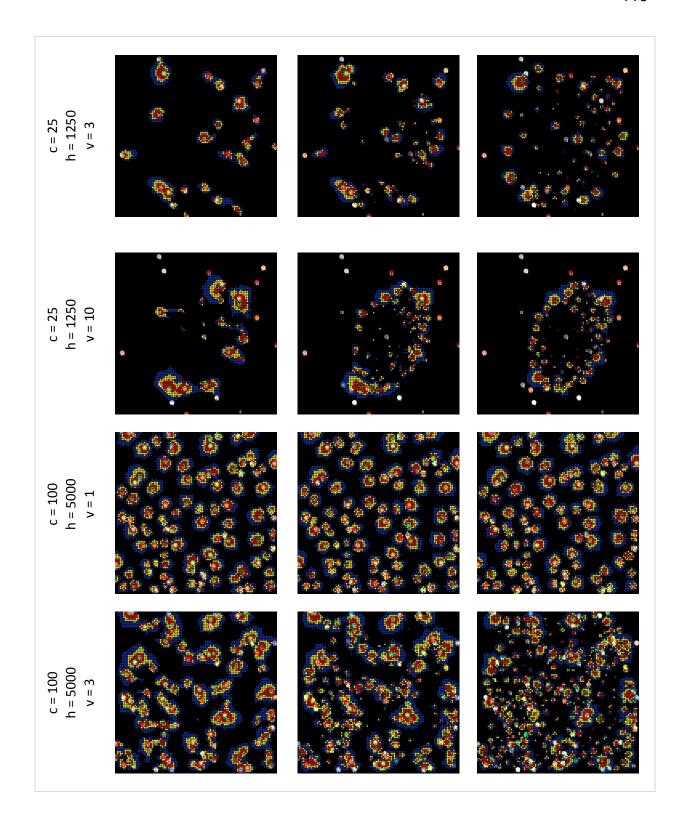
Figura 31 - padrões de ocupação para valores intermediários do exponente k acima e abaixo de 1.00.

### 6.4.3 Aproximando a simulação da realidade - vários pontos de interesse

Após a análise e entendimento da dinâmica de ocupação dos espaços, é possível a exploração de várias montagens do "mundo", a partir da alteração das variáveis que compõem o sistema, como a inserção de muitos pontos atratores e a criação de diversos vínculos para cada habitante, resultando em cenários de fácil visualização, desde que a simulação seja realizada com o auxílio dos softwares específicos, como por exemplo, o NetLogo.

Conforme apresentado na tabela 2, foram exploradas 27 configurações iniciais que apresentaram resultados que corroboram a funcionalidade do modelo proposto. O resultado visual das simulações realizadas pode ser verificado na figura 32.





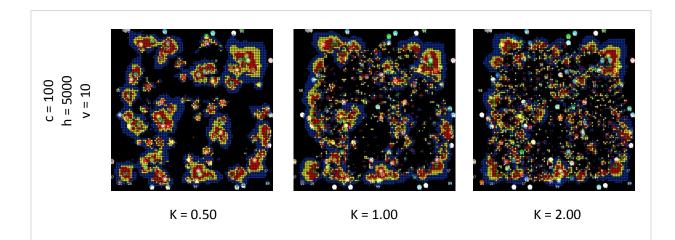


Figura 32 - demonstra a variedade de resultados para nove configurações diferentes das cidades, variando apenas o fator "k" (kappa).

Em todas as simulações foram extraídos resultados que relacionam os dados entre a população de uma cidade, seu território e sua posição relativa em uma escala de territórios. Estes dados foram impressos em gráficos, impressos na figura 33. O eixo Y do gráfico está relacionado à população normalizada pela média das populações de todas as cidades. No eixo X está impresso o posicionamento da cidade normalizado pela média da escala de cidades, ajustada do maior território para o menor território.

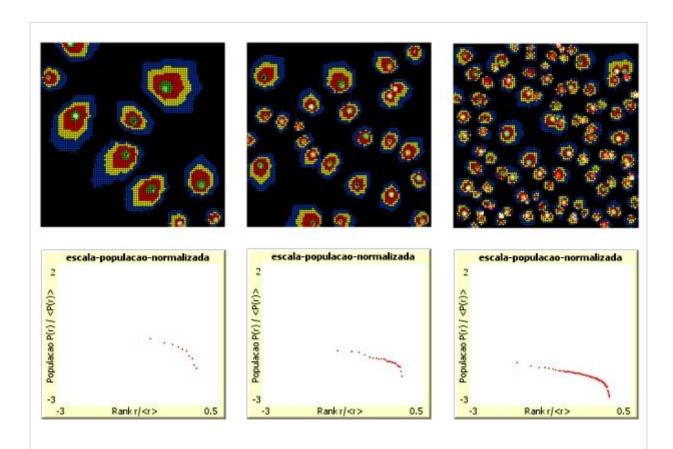


Figura 33 - gráfico relacionando a população da cidade e sua posição no rank das cidades (valores normalizados pela média).

Os gráficos foram construídos procurando manter a mesma escala encontrada na literatura, de forma que facilite a confrontação entre os dados consolidados e os dados extraídos do modelo proposto.

O desenho obtido nos gráficos apresentados na figura 33 acima representa que a distribuição da população nas cidades, considerando a relação entre população absoluta e o território da cidade obedece a uma lei de potência, contribuindo para a calibração do modelo e reforçando a validade dos resultados encontrados.

Os dados extraídos da simulação foram comparados com os gráficos publicados por Batty (2008) e apresentam similaridade, conforme exposto na figura 34.

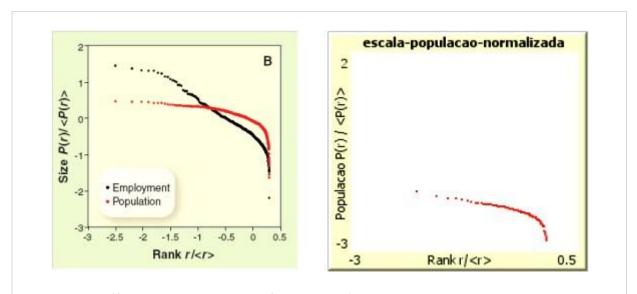


Figura 34 - gráfico retirado da literatura (BATTY, 2008), relacionando a população da cidade e sua posição no rank das cidades (valores normalizados pela média).

# 6.4.4 Comparando os resultados com a realidade – A expansão urbana em Belo Horizonte

Apesar da calibração do modelo proposto estar de acordo com a literatura consultada e consolidada historicamente, desde os modelos pré-industriais (KOHL, 1841) passando pelos modelos pós-industriais de Hoyt (1939) e Burgess (1925), e por estudos mais recentes como o de Schelling (1978), chegando as publicações mais atuais como a de Batty (2011), ainda é possível comparar e comprovar a compatibilidade dos resultados com a situação real de algumas cidades (desde que haja disponibilidade de dados), como no caso de Belo Horizonte.

Nas figuras 35, 36 e 37 é possível verificar a comparação entre partes do mapa que demonstra o histórico da ocupação urbana na cidade de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. Na elipse vermelha, apresentada na figura 35 pode-se ver a ocupação realizada na década de 1950 – indicada pela letra "C" - que interliga centros ocupados à mais de 30 anos, indicados pelas letras "A" e "B". A ocupação se

assemelha à linha reta obtida na simulação que considera dois centros atratores e o índice "k" ajusta para 1,00.

No círculo verde, visualizado na figura 26, é apresentada uma grande região – indicada pela letra "D" - formada entre duas regiões ocupadas simultaneamente. A formação de uma grande região intermediária assemelha-se aos resultados da modelagem realizada para o exponente k ajustado para valores maiores do que 1,00. Enquanto que o círculo azul, indicado na figura 37, apresenta centros menores dispersos – região identificada pela letra "E" -, porém formando grupos de pequenas aglomerações urbanas, conforme o comportamento encontrado quando o exponente *kappa* foi ajustado para valores menores do que 1,00 nas simulações realizadas neste trabalho.

Vale ressaltar que a simulação é uma simplificação do mundo real e não considera fatores que influenciam na tomada de decisão quando da ocupação de um sítio, como relevo, custo de implantação, disponibilidade de infraestrutura, entre outros, mas pode ser considerada uma boa referência para análise dos panoramas existentes e espera-se que possa ser utilizada para estudos que necessitem de ideias de panoramas futuros.

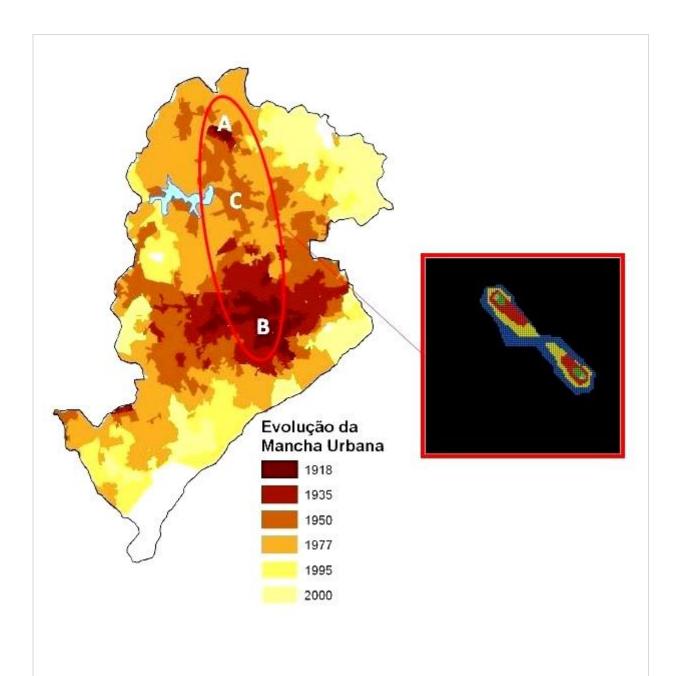


Figura 35 - comparação dos padrões históricos de ocupação da cidade de Belo Horizonte (MG) com os padrões obtidos na simulação do modelo proposto com ajuste de k igual à 1.

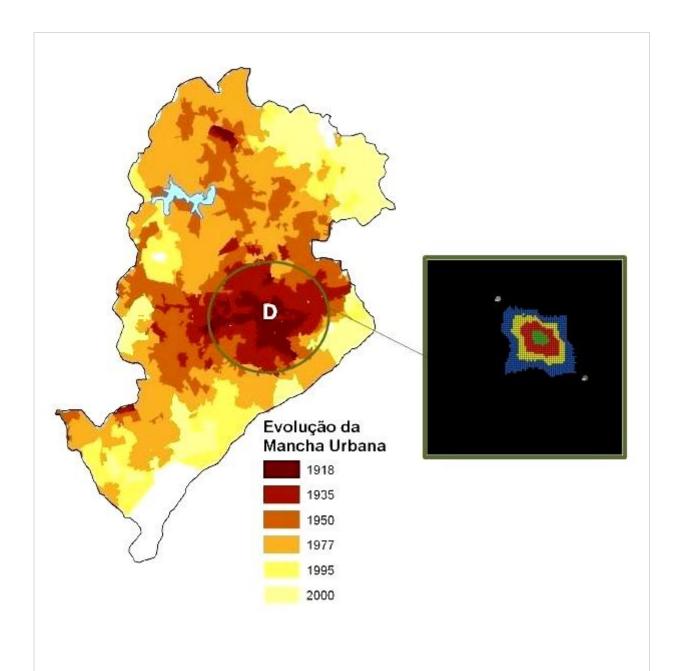


Figura 36 - comparação dos padrões históricos de ocupação da cidade de Belo Horizonte (MG) com os padrões obtidos na simulação do modelo proposto com ajuste de k próximo de 2.

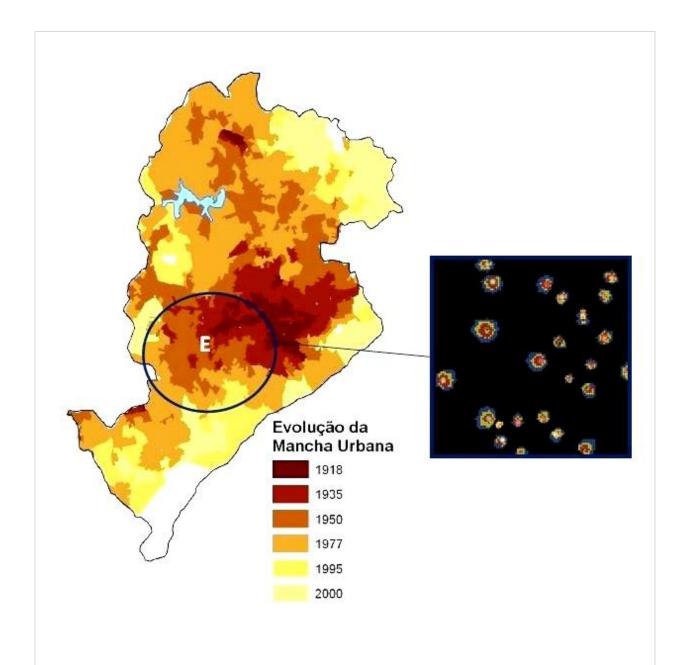


Figura 37 - comparação dos padrões históricos de ocupação da cidade de Belo Horizonte (MG) com os padrões obtidos na simulação do modelo proposto com ajuste de k próximo de 0.

## 7. CONCLUSÕES

Há décadas que é possível perceber nos discursos dos envolvidos em planejamento urbano um clamor por uma abordagem mais abrangente para os problemas recorrentes que as cidades têm enfrentado, principalmente na era pósindustrial.

A dinâmica da cidade e os processos urbanos enquadram-se nos requisitos necessários para serem considerados sistemas complexos, e são compostas por variáveis como localização, deslocamento, agrupamento e segregação.

A literatura e os estudos analisados dão conta de que a modelagem de sistemas complexos é perfeitamente aplicável ao planejamento urbano e possui potencial para que se diminuam as margens de erro das políticas propostas para gerenciamento da cidade. Este conceito pode ser postulado porque a abordagem pode revelar fenômenos relacionados ao comportamento humano, os quais, muitas vezes, são desprezados pelas ciências tradicionais até os dias de hoje (CHOAY, 2005).

Atualmente, alguns sistemas foram modelados com base em estudos anteriormente consolidados que datam do período anterior a abordagem de sistemas complexos que, em suas épocas, foram estudados por métodos tradicionais. É o caso dos estudos de segregação e da plateia de Schelling (1978), de ocupação de solo de Hohl (1841), Burgess (1925) e Hoyt (1939). Outros modelos (BATTY, 2011; PORTUGALLI, 2011) foram adaptados a partir de modelos desenvolvidos para outras finalidades, como por exemplo, para a agricultura, fato que reforça a conclusão de Miller e Page (2007) de que a abordagem de sistemas complexos se completa com as ciências tradicionais em busca do avanço da ciência.

Partindo-se dos estudos consolidados na literatura sobre questões urbanas e de sistemas complexos, através de adaptações e variações dos trabalhos publicados é possível explorar cenários atuais ampliando o conhecimento da dinâmica de ocupação do solo urbano através de premissas e regras simples e objetivas.

Atualmente é evidente a tentativa de ocupação de posições privilegiadas nos centros urbanos e o fator deslocamento até os pontos de interesse na cidade tem sido uma questão de grande relevância para a escolha do ponto de fixação dos habitantes, devido ao tempo dispensado no trânsito congestionado, característicos das grandes cidades.

O custo de deslocamento, quando considerado obedecendo uma lei de potência relacionando a distância entre dois pontos elevada ao fator "k", altera a configuração final da ocupação do território para a mesma estratégia adotada pelos agentes, a saber: minimizar o custo de transporte até os pontos com os quais mantém vínculos.

Diante da literatura estudada e dos resultados encontrados no modelo proposto neste trabalho é possível afirmar que a modelagem de sistemas complexos é uma ferramenta promissora no auxilio do planejamento urbano.

### 8. BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, Peter M. Cities and Regions as Self-organizing Systems: Models of Complexity. Amsterdam: OPA, 1997.
- BARABÁSI, Albert-László. **Linked**: How everything is connected to everything else and what it means for business, Science, and everyday life. Massachusetts: Plume Printing, 2003.
- BATTY, Michael. The size, scale, and shape of cities. **Science,** v. 319, p. 769-771,. feb. 2008.
- \_\_\_\_\_. Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automato,

  Agent-Based Models, and Fractals. London: The MIT Press, 2007.
- Agents, cells and cities; new representational models for simulating multi-scale urban dynamics. **Environmental and Planning A**. v.37, n 8, p. 1373-1394, 2005.
- BATTY, Michael; KIM, Donghan. Modeling Urban Growth: An Agent Based Microeconomic Approach to Urban Dynamics and Spatial Policy Simulation.

  Centre for Advanced Spatial Analysis. London, may.2011.
- BOCCARA, Nino. Modeling Complex Systems. New York: Springer, 2004.
- BURGESS, E. W. **The Growth of the City**: An Introduction to a Research Project. em PARK, R. et al. editors. **The City**, University of Chicago Press, Chicago, 1925.
- CHOAY, Françoise. **O Urbanismo**: Utopias e realidades, uma antologia. São Paulo, Perspectiva, 6º ed., 2005.

- DIAMOND, Jared. **Collapse**: How societies choose to fail or survive. London: Penguim, 2005.
- ESTEVES, Ricardo. **Cenários Urbanos e Traffic Calming,** 2003. 165f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- FENG, Ma Jin; FENG, Mao; SHENG Zhou Wen. **Utilizing Multi-Agent Simulation to Explore Citities**. Second International Workshop on Knowlodge Discovery and Data Mining. 2009.
- FURTADO, Bernardo Alves; DELDEN Hedwing Van. **Modelagem Urbana e Regional com Autômatos Celulares e Agentes**: Panorama teórico,
  aplicações e política pública. Brasilia: Instituto de Pesquisas Econômica
  Aplicada IPEA, 2011.
- HAROUEL, Jean-Louis. História do urbanismo. Campinas: Papirus, 1990.
- HOYT, H. The Structure and Growth of Residential Neighbourhoods in American Cities. Washington: Federal Housing Administration, 1939.
- IRWIN, Elena G.; BOCKSTAEL, Nacy E. **The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation**. Proceedings
  of the National Academy of Sciences (PNAS). Vol. 104 nº 52: pp. 2067220677 (2007).
- IRWIN, Elena G.; JAYAPRAKASH, Ciriyam; MUNROE, Darla K. **Towards a comprehensive framework for modeling urban spatial dynamics**.

  Landscape Ecol. v.24, p. 1223-1236, 2009.

- JACOBS, Jane. **The Death and Life of Great American Cities**. New York: Random House, 1961.
- JOHNSON, Steven. **Emergência**: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades e softwares. Nova York: Scribner, 2001.
- LIMA, Tiago França Melo; FARIA, Sérgio Donizete; SOARES Filho, Britaldo Silveira; CARNEIRO, Tiago Garcia de Senna. **Modelagem de sistemas baseada em agentes**: alguns conceitos e ferramentas. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, 2009.
- MANDELBROT, B.B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. Science v. 156, pp. 636-638, 1967.
- MARETTO, Raian Vargas; ASSIS, Talita Oliveira; GAVLAK, André Augusto.

  Simulating Urban Growth and Residential Segregation through Agent-Based Modeling. Second Brazilian Workshop on Social Simulation. São Bernardo do Campo. 2010.
- MILLER, John H.; PAGE, Scott E. **Complex Adaptative Systems**: An introduction to computational models of social life. New Jersey: Princeton University, 2007.
- MITCHELL, Melaine. **Complexity**: a guide tour. New York: Oxford University Press, 2009.
- MOREIRA, João Carlos; SENE, Eustáquio de. **Geografia**: volume único. São Paulo: Scipione, 2005.
- PARKER, Dawn C.; MANSON, Steven M.; JANSSEN, Marco A.; HOFFMANN, Mattthes J.; DEADMAN, Peter. Multi-Agent Systems for the Simulation of

- **Land-Use and Land-Cover change**: A Review. Annals of the Association of American Geographers. v. 93, pp. 314-337, 2003.
- PELLETIER, Charles; DELFANTE, Charles. **Cidades e Urbanismo no Mundo**. Lisboa: Instituo Piaget, 1997.
- PETTA, Nicolina Luiza de; OJEDA, Eduardo Aparicio Baez. **História Geral**: Uma abordagem integrada. São Paulo: Moderna, 1999.
- PORTUGALI, Juval. Complexity, Cognition and the City. Heidelberg: Springer, 2011.
- SCHELLING, T. Micromotives and macrobehavior. New York: Norton, 1978
- SHALIZI, Cosma Rohilla. Methods and techniques of complex systems science:

  a overview. pp. 33-114 in Thomas S. Deisboeck and J. Yasha Kresh (eds.),

  Complex Systems Science in Biomedicine. Springer, New York, 2006;
- SJOBERG, G. **The Pre Industrial City**: past and present. New York: The Free, 1960.
- TOBLER, W. R. 1979. **Cellular geography**. Pages 379-386 in S. Gale and G. Olsson, eds. **Philosophy in Geography**. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Netherlands. 1979.
- UEHARA, Oscar. K.; SILVEIRA, Ismar. F. Sistemas Complexos Adaptativos no Ensino de Cálculo. In: Proceeding of the International Conference on Engineering and Computer Education: ICECE 2007: Santos, 2007.
- VALE, Gláucia M. Vasconcellos. Redes Organizacionais e desenvolvimento territorial. **Redes**. Santa Cruz do Sul, v. 12 nº 3, pp 74-98, Set-Dez 2007.

- VEIGA, José Eli da. **Desenvolvimento territorial do Brasil**: do entulho Varguista ao zoneamento ecológico-econômico. Anais do XXIX Encontro Nacional de Economia. 2001.
- WICKRAMASURIYA, R. C. et al. The dynamics of shifting cultivation captures in An Extend Constrained Cellular Automata Land Use Model. Ecological Modelling. V. 220, p. 2302-2309, 2009.
- WU, Ning; SILVA, Elisabete A. Artificial Intelligence Solutions for Urban Land Dynamics: A Review. Journal of Planning Literature. v. 24, p. 246-265, 2010.