

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



DISSERTAÇÃO

**Simulação de crescimento urbano em espaços celulares com
uma medida de acessibilidade:**

método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul

Marcus Vinicius Pereira Saraiva

Pelotas, 2013

MARCUS VINICIUS PEREIRA SARAIVA

**SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO URBANO EM ESPAÇOS CELULARES COM
UMA MEDIDA DE ACESSIBILIDADE:**

método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de **Mestre em Arquitetura e Urbanismo**.

Linha de pesquisa: **Sistemas Configuracionais Urbanos**

Orientador: **Maurício Couto Polidori, Dr.**

Pelotas, 2013

Dados Internacionais de Publicação (CIP)

S243s Saraiva, Marcus Vinicius Pereira
 Simulação de crescimento urbano em espaços
 celulares com uma medida de acessibilidade : método e
 estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul /
 Marcus Vinicius Pereira Saraiva; Maurício Couto
 Polidori, orientador. - Pelotas, 2013.
 99 f.: il.

 Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo),
 Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade
 Federal de Pelotas. Pelotas, 2013.

 1.Crescimento urbano. 2.Acessibilidade. 3.Ambiente
 natural. 4.Modelagem urbana. 5.Simulação computacional.
 I. Polidori, Maurício Couto , orient. II. Título.

CDD: 711.4

Catálogo na Fonte: Maria Fernanda Monte Borges CRB:10/1011
Universidade Federal de Pelotas

Banca examinadora:

Ana Paula Neto de Faria, Dra.

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel

Cláudia Maria de Almeida, Dra.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE

Niara Clara Palma, Dra.

Faculdade de Arquitetura, UNISC

Rosilena Martins Peres, Dra.

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel

À Eliana, minha companheira de todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Maurício Couto Polidori, pelo apoio e confiança depositada... desde muito antes deste mestrado.

Aos colegas do Laboratório de Urbanismo.

Aos colegas, professores e funcionários do PROGRAU e da FAUrb.

Aos ex-colegas e tutores do grupo PET-FAUrb.

À CAPES.

Em especial, à minha família e aos meus amigos, que me acompanharam e me apoiaram desde sempre, nesta trajetória.

RESUMO

SARAIVA, Marcus V. P. **Simulação de crescimento urbano em espaços celulares com uma medida de acessibilidade**: método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Este trabalho propõe-se a verificar a capacidade de uma medida de acessibilidade para identificar áreas de maior tendência de crescimento urbano, vinculadas à presença de maiores vantagens locacionais. Esse tema é abordado através do uso de modelagem urbana, utilizando técnicas de simulação dinâmica de crescimento urbano baseadas em autômatos celulares.

Medidas de acessibilidade têm se mostrado eficazes em estudos tanto do espaço urbanizado quanto da paisagem natural, que apresentam semelhanças teóricas e metodológicas. Dessa forma, propõe-se uma versão expandida da medida, chamada de Acessibilidade Ponderada, considerando as características do entorno da cidade, tanto naturais quanto modificadas pela ação humana. Esta medida foi implementada em ambiente celular e utilizada em um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano.

O modelo foi testado em cidades do sul do Rio Grande do Sul. Foram considerados dois tipos de condicionantes externos à cidade: a) fatores ambientais, representados pela hidrografia e topografia; b) fatores antrópicos, representados pelo sistema viário de acesso à cidade. Esses condicionantes foram agrupados em quatro cenários: a) ausência de fatores externos; b) presença de fatores antrópicos; c) presença de fatores ambientais; d) presença de fatores antrópicos e ambientais simultaneamente.

As avaliações foram feitas utilizando técnicas de comparação célula a célula e de comparação por semelhança difusa (*fuzzy*). Os melhores resultados foram obtidos nas simulações que consideraram a influência dos fatores ambientais isoladamente ou em conjunto com os fatores antrópicos. Esses resultados indicam que a área do entorno da cidade exerce importante influência no processo de crescimento urbano e que essa influência pode ser identificada pela medida de acessibilidade.

Palavras-chave: crescimento urbano; acessibilidade; ambiente natural; modelagem urbana; simulação computacional.

ABSTRACT

SARAIVA, Marcus V. P. **Simulação de crescimento urbano em espaços celulares com uma medida de acessibilidade**: método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

This work is committed to verify the capability of an accessibility measure to identify areas prone to high urban growth, related to the presence of higher locational advantages. This issue is addressed via urban modeling, using techniques of urban growth simulation based on cellular automata.

Accessibility measures have proven effective in studies about the urbanized space and the natural landscape, with theoretical and methodological similarities. An expanded version of one of such measures is proposed, called Weighted Accessibility, considering the characteristics of the surrounding city, both natural and modified by human action. This measure was implemented in a cellular environment and used in a dynamic urban growth model.

The model was tested in southern Rio Grande do Sul cities. Two types of constraints external to the city were considered: a) environmental factors, represented by the topography and hydrography b) anthropic factors, represented by the city traffic network. These conditions were grouped into four scenarios: a) absence of external factors; b) presence of anthropic factors; c) presence of environmental factors; d) simultaneous presence of environmental and anthropic factors.

Evaluations were made using techniques of cell-by-cell comparison and fuzzy similarity. The best results were obtained in simulations that considered the influence of environmental factors alone or in combination with anthropic factors. These results suggest that city surroundings have an important influence on the urban growth process and that this influence can be identified by the accessibility measure at issue.

Keywords: urban growth; accessibility; environment; urban modeling; computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo do Estado Isolado de von Thünen.....	11
Figura 2 - Modelos urbanos clássicos concêntricos: a) Christaller, 1933; b) Park e Burgess, 1925; c) Hoyt, 1939.....	12
Figura 3 - Alguns padrões gerados pelas regras do Jogo da Vida de Conway.	16
Figura 4, esquerda – CA urbano em <i>grid</i> tridimensional.	18
Figura 5, direita – SLEUTH, modelo de crescimento urbano baseado em CA.	18
Figura 6 - Modelo híbrido entre Grafo e CA, onde as células são as próprias edificações e a vizinhança é determinada pelas arestas do grafo.....	19
Figura 7 - Exemplos de atributos de entrada no <i>CityCell</i> , para a cidade de Torres/RS: a) atributos urbanos (estradas e área urbanizada em diferentes níveis de densidade de ocupação); b) atributos naturais (subsistema de águas superficiais); c) atributos institucionais (áreas de proteção ambiental).	25
Figura 8 - Resumo dos tipos de atributos utilizados no <i>CityCell</i> para a descrição do território, com suas características e efeitos na simulação.....	26
Figura 9 - Resultado Tipo de Célula (<i>CellType</i>), em diferentes iterações, para a cidade de Torres/RS, em marrom.....	28
Figura 10 - Resultado Carregamento Urbano (<i>Urban Load</i>), em diferentes iterações, para a cidade de Torres/RS, em tons de vermelho.....	28
Figura 11 - Resultado Resistência Natural (<i>Environmental Resistance</i>), em diferentes iterações, para a cidade de Torres/RS, em tons de verde.....	29
Figura 12 – Resultados da medida de acessibilidade celular em padrões simétricos: a) <i>grids</i> de entrada, com células com atributos de atração à urbanização em marrom; b) <i>grids</i> de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul..	30
Figura 13 - Resultados da medida de acessibilidade celular em padrões assimétricos: a) <i>grids</i> de entrada, com células com atributos de atração à urbanização em marrom; b) <i>grids</i> de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.....	30
Figura 14 - Resultados da medida de acessibilidade celular ponderada pelos fatores ambientais: a) <i>grids</i> de entrada, com células urbanas em marrom e fundo em tons de verde representando diferentes intensidades de resistências naturais; b) <i>grids</i> de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.....	32
Figura 15 - Resultados da medida de acessibilidade celular ponderada por fatores antrópicos, representados pelo sistema viário: a) <i>grids</i> de entrada, com células urbanas em vermelho e diferentes configurações viárias em tons de cinza; b) <i>grids</i> de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.....	34

- Figura 16 - Resultado visual da avaliação de concordância entre mapas. a) mapa da cidade real; b) mapa da cidade simulada; c) mapa do resultado da avaliação, mostrando em marrom as áreas urbanas dos dois mapas, e em vermelho as áreas de discordância.39
- Figura 17 – Exemplo de comparação entre dois mapas, com células urbanas representadas em cinza e células naturais representadas em branco, identificando limitações das técnicas de comparação célula por célula. a) mapas semelhantes visualmente; b) mapas muito diferentes visualmente.40
- Figura 18 - Resultado visual da avaliação de concordância difusa entre *grids*, considerando apenas células urbanas. a) concordância difusa raio 1, com células além do raio de abrangência marcadas em vermelho e graus de concordância em tons de verde; b) concordância difusa raio 2, com graus de concordância em tons de verde, e nenhuma célula além do raio de abrangência.42
- Figura 19 - Localização da cidade de Jaguarão no Rio Grande do Sul e no Brasil.44
- Figura 20 - Área de estudo delimitada para a cidade de Jaguarão.45
- Figura 21 - Área efetivamente urbanizada de Jaguarão em 1947 (marrom claro, 84 células) e 2009 (marrom escuro, 201 células).46
- Figura 22 - Atributos de entrada para as simulações de Jaguarão.46
- Figura 23 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.1, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.49
- Figura 24 – Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.2, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.51
- Figura 25 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.3, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.52
- Figura 26 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.4, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.54
- Figura 27 - Área efetivamente urbanizada de Jaguarão no ano de 2009.55
- Figura 28 – *Outputs* tipo de célula, em marrom; mapa de concordância, com células coincidentes em marrom e discrepantes em vermelho; mapa de concordância difusa de raio 1, com células coincidentes em verde escuro, coincidência raio 1 em verde claro e discrepância em vermelho. Quatro cenários simulados de Jaguarão: a) cenário 1 – acessibilidade topológica; b) cenário 2 – acessibilidade

ponderada pelos fatores antrópicos; c) cenário 3 – acessibilidade ponderada pelos fatores ambientais; d) cenário 4 – acessibilidade ponderada pelos fatores antrópicos e ambientais.	55
Figura 29 - Localização da cidade de Bagé no Rio Grande do Sul e no Brasil.....	58
Figura 30 – Área de estudo delimitada para a cidade de Bagé / RS.	59
Figura 31 - Área efetivamente urbanizada de Bagé em 1974 (marrom claro, 262 células) e 2012 (marrom escuro, 855 células).	60
Figura 32 - Atributos de entrada para as simulações de Bagé.	60
Figura 33 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.1, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o <i>output</i> tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o <i>output</i> acessibilidade relativa, em tons de azul.	63
Figura 34 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.2, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o <i>output</i> tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o <i>output</i> acessibilidade relativa, em tons de azul.	65
Figura 35 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.3, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o <i>output</i> tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o <i>output</i> acessibilidade relativa, em tons de azul.	67
Figura 36 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.4, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o <i>output</i> tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o <i>output</i> acessibilidade relativa, em tons de azul.	69
Figura 37 - Área efetivamente urbanizada de Bagé no ano de 2012.....	70
Figura 38 – <i>Outputs</i> tipo de célula, em marrom; mapa de concordância, com células coincidentes em marrom e discrepantes em vermelho; mapa de concordância difusa de raio 1, com células coincidentes em verde escuro, coincidência raio 1 em verde claro e discrepância em vermelho. Quatro cenários simulados de Bagé: a) cenário 1 – acessibilidade topológica; b) cenário 2 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos; c) cenário 3 – acessibilidade ponderada por fatores ambientais; b) cenário 4 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos e ambientais.	71

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Acessibilidade celular da célula i	30
Equação 2 – Distância entre as células i e j	34

Equação 3 – Peso da célula c .	35
Equação 4 - Acessibilidade celular relativa da célula i .	36
Equação 5 - Potencial de mudança de estado da célula i .	36
Equação 6 - Percentual de concordância entre dois mapas.	38
Equação 7 - Percentual de concordância esperado.	39
Equação 8 – Estatística Kappa.	40
Equação 9 – Grau de concordância da célula i .	41
Equação 10 - Percentual de concordância difuso entre dois <i>grids</i> .	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espectro dos parâmetros de impedância global (Ω) e impedância local (ω).	33
Tabela 2 – Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.1.	49
Tabela 3 – Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.2.	50
Tabela 4 - Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.3.	52
Tabela 5 - Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.4.	53
Tabela 6 – Resultado das avaliações das simulações realizadas para o caso de Jaguarão.	57
Tabela 7 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.1.	62
Tabela 8 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.2.	64
Tabela 9 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.3.	66
Tabela 10 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.2.	68
Tabela 11 - Resultado das avaliações das simulações realizadas para o caso de Bagé.	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histogramas das avaliações de semelhança difusa. a) percentual de concordância difusa de raio 1; b) percentual de concordância difusa de raio 2.	43
Gráfico 2 - Histogramas de $DP(A_{urb})$ raio 1 para o caso de Jaguarão.	56
Gráfico 3 - Histogramas de $DP(A_{urb})$ raio 1 para o caso de Bagé.	72

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Apresentação do tema e justificativa	1
1.2	Delineamento da pesquisa.....	3
1.3	Delimitação geográfica.....	4
1.4	Estrutura da investigação.....	4
2	Fundamentação Teórica.....	6
2.1	Sistemas Urbanos Complexos.....	6
2.2	Modelagem urbana	9
2.3	Autômatos Celulares.....	13
2.4	Medidas de Acessibilidade.....	18
3	Método	23
3.1	O <i>software CityCell – Urban Growth Simulator</i>	23
3.2	A medida de acessibilidade celular.....	29
3.3	O modelo de crescimento urbano.....	35
3.4	Avaliação dos resultados	37
3.4.1	Avaliação célula a célula	38
3.4.2	Avaliação por semelhança difusa (<i>fuzzy</i>)	40
4	Estudos de Caso	44
4.1	O caso de Jaguarão / RS.....	44
4.1.1	Análise comparada entre os quatro cenários	54
4.1.2	Conclusão do caso de Jaguarão	57
4.2	O caso de Bagé / RS	57
4.2.1	Análise comparada entre os quatro cenários	70
4.2.2	Conclusão do caso de Bagé.....	73
5	Conclusões.....	74
5.1	Validade das hipóteses e alcance dos objetivos.....	74
5.2	Observações registradas durante a pesquisa.....	76
5.2.1	Sobre a descrição ambiental	76
5.2.2	Sobre os estudos de caso	77

5.2.3 Sobre as técnicas de avaliação	78
5.3 Possibilidades, limitações e continuidades.	80
Referências Bibliográficas.....	82

1 Introdução

Este capítulo apresenta a temática do crescimento das cidades e dos aspectos sociais, econômicos e ambientais envolvidos. A seguir, delimita o problema de pesquisa e insere o trabalho nas áreas de modelagem e morfologia urbana. São apresentados a questão de pesquisa, a hipótese, o objetivo geral e os objetivos específicos. Por fim, delimita geograficamente o trabalho e resume os assuntos tratados no decorrer da dissertação.

1.1 Apresentação do tema e justificativa

A humanidade é adaptada à vida em sociedade, tendo passado da organização em pequenos grupos de caçadores-coletores em tempos remotos para a vida em aldeias que, com o tempo, conformaram as primeiras cidades (BENEVOLO, 1983). As cidades são consideradas estruturas complexas, capazes de armazenar e transmitir informações culturais produzidas pela civilização para as gerações futuras (MUMFORD, 2001) além de fornecer um ambiente propício para as trocas sociais e comerciais, favorecendo o desenvolvimento de novas ideias e tecnologias (WRIGHT, 2001).

Essas características favoreceram o surgimento, permanência e crescimento das cidades, de modo que em 2008, pela primeira vez na história da humanidade, mais da metade da população mundial passou a viver em áreas urbanas, conforme dados do Programa de Assentamentos Humanos das Nações Unidas (UN-HABITAT, 2008). Ainda segundo a UN-HABITAT, essa tendência deve se fortalecer ainda mais nas próximas décadas, de modo que a população urbana deverá alcançar aproximadamente 60% da população mundial em 2030.

Além disso, o crescimento das áreas urbanizadas não está apenas condicionado ao incremento populacional. Autores contemporâneos identificam o fenômeno do crescimento espacial das cidades como um processo autônomo e capaz de se manter independente da dinâmica de crescimento dos agentes sociais envolvidos (KRAFTA, 1999). Ou seja, a produção espacial constitui um processo produtivo e econômico em si, onde a alocação de recursos e invenção de novos lugares estão vinculadas à busca de lucro proveniente do aproveitamento de vantagens locais (HARVEY, 1985).

Esse conjunto de relações complexas entre diferentes sistemas é de difícil apreensão, sendo que o entendimento desses processos dinâmicos na escala urbana e regional é um dos maiores desafios da ciência contemporânea (WILSON, 2000). Apesar dessa dificuldade, é possível encontrar padrões morfológicos na conformação urbana decorrentes dessa interação (PANERAI, 2006), indicando que

a forma que a cidade assume a partir de seu crescimento pode estar relacionada a fatores presentes na própria cidade e em seu entorno.

Uma das formas de entender o papel dos processos atuantes no crescimento urbano e suas relações com o surgimento de padrões morfológicos nas cidades é através da realização de simulações em ambiente computacional. Para isso, o trabalho se enquadra na vertente da modelagem urbana (BATTY, 2009), buscando analisar e avançar na compreensão da produção do espaço urbano no campo disciplinar da morfologia urbana, ou seja, da forma da cidade (LAMAS, 1993).

Modelos urbanos têm, tradicionalmente, abordado a cidade como um sistema apartado do ambiente natural, abstraindo-o sob a forma de um plano isotrópico (NYSTUEN, 1968). Esses modelos mantêm o foco nas relações socioespaciais presentes na cidade, considerando todos os lugares como igualmente propícios à urbanização, independente de suas características relacionadas ao ambiente natural. Estudos mais recentes têm avançado no sentido de considerar a influência de fatores ambientais no processo urbano.

Segundo Liu *et al.* (2007), existem complexas e constantes trocas de matéria e energia na interação entre a cidade e o ambiente natural que forma o plano de suporte à urbanização, de modo a criar um sistema integrado e com diversas interinfluências na evolução da cidade e da paisagem natural. Assim, o ambiente natural deixa de ser neutro e passa a exercer influência nos processos urbanos, atuando como um campo de irregularidades capaz de oferecer diferentes graus de oportunidades espaciais à conversão do solo. Estudos integrados entre os dois campos disciplinares têm sido desenvolvidos no sentido de buscar a compreensão dessas interinfluências e das modificações na paisagem e na cidade causadas pelo processo (ALBERTI, MARZLUFF, *et al.*, 2003).

A partir dessas influências recíprocas entre a cidade e o ambiente natural, é possível supor que parte do crescimento urbano é determinado pelas características do entorno, pré-existentes à cidade, além da atuação de mecanismos intra-urbanos. Uma forma de modelar e capturar relações complexas entre um grande número de entidades é através de medidas derivadas da teoria de grafos, comumente utilizadas na modelagem de características inerentes à estrutura interna das cidades. Algumas dessas medidas são a acessibilidade (HAGGETT e CHORLEY, 1970), a centralidade (FREEMAN, 1977; KRAFTA, 1994) e as medidas da teoria da Sintaxe Espacial (HILLIER e HANSON, 1984).

Dentre essas medidas, a acessibilidade possui aplicações tanto em estudos urbanos, vinculados principalmente às áreas de planejamento urbano e de transportes (GEURS e RITSEMA VAN ECK, 2001), quanto em estudos do ambiente natural (BUNN *et al.*, 2000; RAYFIELD *et al.*, 2010). Dessa forma, é possível utilizar

suas características na descrição unificada da cidade e de seu entorno, possibilitando a construção de modelos integrados.

Modelos dedicados a simular o crescimento urbano devem incluir a dimensão temporal em sua concepção. Porém, modelos baseados em grafos e na medida de acessibilidade são mais comumente estáticos, visando capturar a estrutura interna do objeto de estudo em determinado ponto do tempo. Processos urbanos dinâmicos complexos são modelados, frequentemente, com a utilização de recursos de Autômatos Celulares (do inglês *Cellular Automata*, ou CA). CA são abstrações matemáticas espaciais e dinâmicas simples, onde a descrição do espaço é feita através de uma matriz de células iguais, sendo o estado de cada célula determinado a partir do estado das células vizinhas no tempo anterior e de um conjunto definido de regras de transição (WHITE, ENGELEN e ULJEE, 1997). Além disso, suas características iniciais podem ser expandidas com novos recursos, com o objetivo de melhor representar o sistema urbano (TORRENS, 2000).

Apesar dessas potencialidades, são desconhecidos trabalhos em que a medida de acessibilidade é utilizada de forma dinâmica, integrada a autômatos celulares, para descrever conjuntamente o ambiente urbano e o ambiente natural, com vistas à simulação de crescimento urbano. Assim, esse é o foco principal deste trabalho.

1.2 Delineamento da pesquisa

A partir da apresentação do tema, está formulada a pergunta de pesquisa que deverá ser respondida ao longo deste trabalho, exposta a seguir:

- é possível simular o crescimento urbano baseado em uma medida de acessibilidade?

A hipótese para esta pergunta é a seguinte:

- uma medida de acessibilidade expandida que considere, em sua formulação, a atração exercida pela cidade e as características de seu entorno, tanto antrópicas quanto naturais, pode ser utilizada como forma de diferenciação espacial em um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano, em ambiente de autômato celular, de modo a identificar áreas de maior vantagem locacional e, conseqüentemente, maior probabilidade de urbanização.

Para essa hipótese, está assumida a premissa de que as características morfológicas do entorno da cidade exercem influência no processo de produção do espaço urbano.

A hipótese indica que a pesquisa assume um caráter mais metodológico, trazendo a necessidade de desenvolver técnicas de modelagem urbana e de realizar experimentos de caráter empírico, em estudos de caso, para sua verificação.

Com base nas pergunta e hipótese expostas anteriormente, está definido como objetivo principal da pesquisa:

- verificar o uso de uma medida de acessibilidade, com a influência das preexistências do entorno da cidade, em simulações de crescimento urbano.

Além do objetivo principal, estão definidos os seguintes objetivos secundários:

- a) definir uma medida de acessibilidade capaz de considerar conjuntamente as características formais presentes no entorno da cidade, tanto naturais como já modificadas pela ação humana, e suas relações com a área urbanizada;
- b) construir um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano, com apoio em autômatos celulares, utilizando a medida de acessibilidade como forma de diferenciação espacial;
- c) utilizar o modelo proposto em estudos de caso empíricos, de modo a observar a reprodução de fenômenos urbanos reais em situações controladas;
- d) selecionar métodos de avaliação capazes de comparar os resultados obtidos nas simulações com características da cidade real;
- e) legitimar o modelo, através de comparação dos resultados das simulações com o crescimento real da cidade.

1.3 Delimitação geográfica

O teste da hipótese será realizada através de estudos empíricos dedicados a cidades pequenas e médias da metade sul do Rio Grande do Sul, localizadas na área de influência da Universidade Federal de Pelotas - UFPel, instituição sede deste estudo. Estudos anteriores já foram realizados na região pelo grupo do Laboratório de Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUrb – da UFPel, em experiências de ensino, pesquisa e extensão, havendo disponibilidade de dados espaciais referentes à evolução urbana e descrição ambiental de várias dessas cidades. Além disso, a região conta com centros urbanos de diversos portes e níveis de desenvolvimento, permitindo o teste do modelo em diferentes situações empíricas.

1.4 Estrutura da investigação

Este trabalho encontra-se estruturado através dos seguintes capítulos:

- a) Introdução: apresenta a temática do crescimento urbano e a justificativa da pesquisa. Formula a pergunta, constrói a hipótese e delimita os objetivos geral e específicos. Por fim, situa o trabalho geograficamente.
- b) Fundamentação teórica: organiza o referencial teórico do trabalho em duas partes principais. A primeira apresenta questões contemporâneas do

pensamento sistêmico e das teorias da complexidade aplicadas às cidades. A segunda trata mais especificamente da modelagem urbana, com ênfase na utilização de autômatos celulares e de medidas de acessibilidade para a simulação de processos urbanos.

- c) Método: as questões metodológicas são apresentadas em três partes: a primeira apresenta o funcionamento do *software* de simulação de crescimento urbano *CityCell*, mantido pela equipe do Laboratório de Urbanismo da FAUrb/UFPel, cujos recursos serão utilizados para a construção do modelo de crescimento urbano desenvolvido neste trabalho. A segunda parte apresenta a construção da medida de acessibilidade celular e do modelo de crescimento baseado nessa medida. A terceira parte trata das técnicas de avaliação que serão utilizadas na validação dos resultados obtidos com o modelo.
- d) Estudos de caso: apresenta a aplicação do modelo proposto em estudos de caso empíricos em cidades da região sul do Rio Grande do Sul, com o objetivo de testar seu funcionamento e verificar suas possibilidades e limitações.
- e) Conclusões: apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho, registrando observações e indicações de trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

A passagem do século XIX para o século XX foi um período de grande otimismo no contexto do pensamento científico, época em que se acreditava que o entendimento de todos os fenômenos naturais estava muito próximo. Esse otimismo vinha das descobertas científicas possibilitadas, nos três séculos anteriores, pelo paradigma científico conhecido como Reduccionismo, cujo grande representante foi o filósofo francês René Descartes. Segundo o Reduccionismo, qualquer problema poderia ser entendido pela subdivisão em suas pequenas partes componentes, de modo que o entendimento dessas partes levaria ao entendimento do todo (MITCHELL, 2009).

Porém, muitos fenômenos não puderam ser explicados segundo o ponto de vista reducionista, entre eles o clima, o surgimento da inteligência e o comportamento de insetos sociais. Além disso, novas descobertas científicas em áreas como física, química e biologia demonstraram a insuficiência desse paradigma para a compreensão dos fenômenos naturais e sociais (ibid.).

Nesse contexto, novos paradigmas científicos foram desenvolvidos a partir da segunda metade do século XX e encontram progresso contemporaneamente, na tentativa de explicar a dinâmica dos fenômenos complexos que nos cercam. Este trabalho vai abordar a temática da dinâmica urbana do ponto de vista de duas dessas teorias: o pensamento sistêmico (FORRESTER, 1968; SKYTTNER, 2005) e as ciências da complexidade (MILLER e PAGE, 2007; MITCHELL, 2009).

2.1 Sistemas Urbanos Complexos

Importantes avanços foram alcançados na teoria de sistemas ao longo do século XX, começando nas ciências biológicas, passando pela engenharia e chegando às ciências sociais na década de 1960 (BATTY, 2008). Forrester (1968) utiliza o termo ubiquidade para tratar da onipresença dos sistemas na vida social humana, nas ciências e nas tecnologias produzidas pelo homem. Essa visão generalista foi inaugurada pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy, na tentativa de criar uma teoria unificada para os mais diversos campos do saber, cunhando o termo Teoria Geral dos Sistemas. Bertalanffy defende que, apesar de suas diferenças observáveis, todos os sistemas naturais e artificiais tem uma base em comum independente de sua natureza interna (SKYTTNER, 2005).

Um sistema pode ser definido como um conjunto de entidades relacionadas entre si (REIF, 1978). Por entidades, podemos considerar tanto componentes físicos quanto elementos conceituais ou abstratos, podendo chegar a componentes complexos como pessoas e outros seres vivos que, por si só, também podem ser considerados sistemas. As relações entre essas entidades é considerada tão importante quanto as entidades em si, pois a constante interação entre elas origina um comportamento

somente perceptível na escala do sistema como um todo (SKYTTNER, 2005). Esse comportamento global pode ser entendido como o objetivo ou propósito do sistema (KLIR, 1991).

Sistemas passam a ser considerados complexos e auto-organizados quando são formados por um grande número de componentes interligados, sendo que nenhum tipo de controle central é exercido por algum de seus elementos ou por qualquer elemento externo. Esse tipo de sistema é regido por um conjunto de regras operacionais simples, porém o resultado é um complexo comportamento coletivo, processamento de informações sofisticado e capacidade de adaptação por meio de mecanismos como aprendizado ou evolução (MITCHELL, 2009).

Esse comportamento coletivo descentralizado está ligado a mecanismos internos de *feedback*, ou retroalimentação, presentes nos sistemas complexos (JOHNSON, 2003). Sistemas que não possuem mecanismos de *feedback* são chamados de sistemas abertos por Forrester (1968), conformando sistemas que não tem a capacidade de ler seus próprios resultados anteriores. Por outro lado, sistemas baseados em *feedback* são capazes de reagir consigo mesmo, aumentando ou diminuindo seu sinal de entrada de acordo com resultados gerados por ações anteriores e por impulsos externos (KLIR, 1991).

Existem dois tipos de *feedback*. Um componente do sistema está sob o efeito de um *feedback* positivo quando o mesmo reage mantendo ou reforçando seu comportamento em resposta ao resultado ou estímulo gerado pelo comportamento anterior do sistema. Longley e Batty (1996) identificam a atuação desse mecanismo na evolução urbana. Segundo os autores, pequenas mudanças em escala local são capazes de gerar, ao longo do tempo, mudanças estruturais significativas na escala da cidade através de uma série de reações em cadeia, com cada pequeno acontecimento reforçando o próximo.

O *feedback* negativo age no sentido oposto, quando o sistema atenua ou modifica seu comportamento em resposta ao resultado ou estímulo gerado pelo comportamento anterior. Nesse sentido, esse tipo de *feedback* tem efeitos importantes na auto-regulação de sistemas, uma vez que constituem um mecanismo simples de manter o funcionamento do sistema sob controle (JOHNSON, 2003).

Sistemas naturais apresentam uma composição entre mecanismos de *feedback* positivo e negativo. Onde predomina o *feedback* negativo, o sistema tende a se manter estável, oscilando em torno de um ponto médio. Já o predomínio do *feedback* positivo leva ao aumento do nível de complexidade do sistema e ao seu crescimento, cujo efeito acumulado pode levar à superação de limiares, ocasionando mudanças drásticas no sistema e sua reorganização em torno de um novo ponto estável (WHITE, MOTTERSHEAD e HARRISON, 1992).

Sistemas complexos apresentam características inerentes aos processos dinâmicos atuantes em seu interior, devido à constante interação de seus componentes (REIF, 1978). Duas dessas características são a auto-organização e a emergência, com importantes efeitos sobre o comportamento global do sistema.

A auto-organização é a capacidade que alguns sistemas complexos tem de gerar uma estrutura interna organizada, ou uma ordem global, sem a necessidade de intervenção de um agente externo controlador. Pelo contrário, parece haver uma relação de não causalidade, em que as forças externas que atuam sobre o sistema apenas iniciam o processo mas não determinam diretamente o seu comportamento nem os resultados finais (PORTUGALI, 2000). A característica da auto-organização é facilmente observada em fenômenos químicos e físicos (SKYTTNER, 2005), mas suas propriedades também tem sido observadas em estudos urbanos (KRAFTA, 1999) e ambientais (ROHANI, LEWIS, *et al.*, 1997).

A emergência está relacionada ao surgimento de um padrão ou comportamento em escala superior, originado da interação de diversos elementos em escala local. Nessa categoria encontram-se, por exemplo, o comportamento coletivo de insetos sociais e a inteligência. Ainda que algumas formigas não formem uma colônia organizada e alguns neurônios não tenham consciência ou inteligência próprias, da atuação conjunta de um grande número desses pequenos elementos emerge uma característica complexa impossível de ser antecipada. Desse modo, a emergência é uma característica que se manifesta essencialmente de baixo para cima, ou *bottom-up* (JOHNSON, 2003).

As características de auto-organização e emergência estão associadas à capacidade de permanência dos sistemas complexos ao longo do tempo. A constante reorganização de suas partes em novas estruturas torna esses sistemas capazes de se adaptar a novas situações e enfrentar adversidades com maior eficiência. Em ecologia urbana, essa capacidade está denominada resiliência (ALBERTI, MARZLUFF, *et al.*, 2003). Desse modo, a cidade tolera mudanças internas e externas até determinado ponto crítico, a partir do qual mudam seus processos internos e sua forma de modo a se adaptar à nova realidade (HOLLING, 2001).

Sistemas complexos estão constantemente fora de equilíbrio (PRIGOGINE, 1996) e apresentam internamente forças centrífugas e centrípetas, características também presentes no caso da cidade. Forças centrípetas agem em direção ao centro, consolidando áreas centrais e tendendo a gerar uma cidade compacta, estando associadas à cidades em crescimento mais lento. Forças centrífugas agem em direção à periferia, gerando tendências de ocupação de áreas afastadas do centro e

de fragmentação da forma urbana, estando associadas à cidades em crescimento mais rápido (POLIDORI, 2004).

Essas características tornam difícil a compreensão dos sistemas complexos, tendo em vista que pequenas diferenças nos componentes do sistema, nas regras de interação entre eles ou na quantidade de elementos interagentes geram modificações estruturais importantes em nível global. Porém, essas mesmas características indicam haver padrões nesse comportamento e nas regras subjacentes. Um dos modos de entender esses padrões é através do uso de modelos de simulação, que serão tratados na seção seguinte.

2.2 Modelagem urbana

Modelos são representações simplificadas da realidade (ALMEIDA, 2003). Seu principal objetivo é representar determinado sistema de modo a incluir os aspectos principais das teorias subjacentes, auxiliando em seu entendimento e dos processos que regem sua dinâmica (BATTY, 2009).

Modelos tem sido usados com sucesso na representação e simulação de sistemas complexos e dinâmicos, como é o caso das cidades (BATTY, 1998). Eles permitem que processos urbanos sejam reproduzidos em laboratório, viabilizando a realização de experiências que seriam impossíveis na prática, dada a impossibilidade de manipular pessoas ou estruturas físicas reais (KRAFTA, 2009). O entendimento desse tipo de sistema passa pela compreensão de quais elementos e relações são os mais importantes na emergência de sua estrutura e comportamento complexo (MILLER e PAGE, 2007) .

Existem vários tipos de modelos e formas de classificá-los. Echenique (1968) apresenta a seguinte classificação dos modelos, segundo sua finalidade: a) descritivos; b) exploratórios; c) preditivos; d) operacionais. Modelos descritivos buscam simplesmente a compreensão do funcionamento de um determinado sistema real. Modelos exploratórios incluem, além da descrição da realidade, a parametrização das variáveis estáticas referentes aos elementos e relacionamentos do sistema, permitindo explorar novos cenários possíveis. Modelos preditivos incluem a variável tempo na simulação, permitindo explorar cenários de passado e futuro de forma dinâmica. Modelos operacionais possuem propósito mais voltado ao planejamento, onde podem ser simulados os efeitos de diferentes fatores exógenos atuando sobre os componentes e relacionamentos do sistema, como, por exemplo, decisões tomadas pelos agentes públicos de planejamento.

Outra categorização possível, mais recente e extensa, é apresentada por Briassoulis (2000), segundo aspectos metodológicos e funcionais dos modelos, resumida a seguir:

Modelos estatísticos e econométricos são modelos baseados em técnicas como regressão estatística e análise multivariada, com o objetivo de inferir relacionamentos entre conjuntos de variáveis. Os modelos econométricos podem ser considerados um subconjunto dos modelos estatísticos, uma vez que utilizam essas técnicas para relacionar oferta e demanda de produtos e serviços para análises de equilíbrio de mercado.

Modelos de interação espacial foram concebidos em analogia à lei da gravitação universal de Newton e baseiam-se nas interações decorrentes de atividades humanas, como deslocamentos ao trabalho e distribuição de mercadorias. Esses modelos tem por objetivo tanto o estudo das entidades interagentes como da forma de interação entre elas. Como forma de facilitar sua operacionalização, modelos de interação espacial agrupam as interações individuais em interações entre unidades espaciais.

Modelos de otimização são importantes modelos de suporte à tomada de decisão e tem uso difundido em atividades de planejamento, auxiliando na solução de problemas específicos relacionando os objetivos da situação com os condicionantes apresentados. Nesse sentido, são úteis tanto para a prescrição como para a avaliação de soluções. Vários subgrupos podem ser derivados, com base nas técnicas de programação utilizadas na construção do modelo, como: a) modelos de programação linear; b) modelos de programação dinâmica; c) modelos de programação orientada a objetivos, hierárquica e não linear; d) modelos de maximização de utilidade; e) modelos multiobjetivos/multicritérios.

Modelos integrados consideram a interação entre diversos componentes espaciais, sejam eles econômicos, sociais ou ambientais, e os relacionam com as mudanças no uso do solo. Em geral, esses modelos operam em escalas que começam em áreas urbanas ou metropolitanas e chegam à escala global. Vários tipos de integração podem ser considerados, como: a) integração espacial; b) setorial; c) de uso do solo; d) econômica, social e ambiental; e) de componentes mercadológicos.

Além desses grupos principais, Briassoulis (2000) destaca outros três tipos de modelos que não se enquadram diretamente nessas categorias, bem como não conformariam categorias próprias por seu uso esparso ou muito recente. Modelos baseados em ciências naturais são concebidos no campo disciplinar das ciências ambientais e colocam ênfase nos aspectos biofísicos relacionados à mudança do uso do solo, muitas vezes ignorando os aspectos socioeconômicos envolvidos. Modelos baseados na cadeia de Markov são modelos estocásticos que consideram a mudança do uso do solo entre uma série de estados discretos a partir da probabilidade derivada do estado atual. Modelos baseados em SIG (Sistema de Informações Geográficas) utilizam as possibilidades de organização e análise de

dados espaciais em sistemas de informações geográficas para a modelagem das mudanças de uso do solo.

Outras classificações são encontradas na bibliografia, porém, pela visão geral apresentada, já é possível observar a variedade de modelos existentes e suas possibilidades. Uma breve perspectiva histórica do surgimento dos modelos urbanos e sua evolução é dada a seguir.

Primeiros modelos locacionais urbanos

Von Thünen é considerado o fundador da teoria locacional, pela criação de seu modelo do Estado Isolado. O autor concebeu, em 1826, um modelo composto por uma planície onde haveria apenas um mercado consumidor representado por uma grande cidade. Ao redor dessa cidade, estariam localizadas extensas planícies cultiváveis sem diferenças em condicionantes como fertilidade do solo. A única diferenciação espacial considerada foi a vantagem locacional dada pela proximidade do mercado consumidor (PORTUGALI, 2000).

Seguindo esse princípio, e assumindo que as escolhas locacionais sejam feitas de modo racional, a distribuição de usos do solo ao redor da cidade se daria de forma concêntrica, de acordo com a lucratividade possibilitada por cada tipo de ocupação associada à dificuldade de transporte de cada tipo de produto. Além disso, von Thünen considerou a presença de fatores que deformariam esses anéis concêntricos, aproximando pontos mais distantes (figura 1), como a presença de um rio ou estrada, bem como a inserção de cidades menores na área de influência da cidade principal. Esses anéis também seriam deformados pela própria ação da cidade, através do aumento da demanda causado pelo incremento populacional e pelas variações nos preços dos produtos no mercado (CARR, 1997).

a Estado isolado

b Condições modificadas

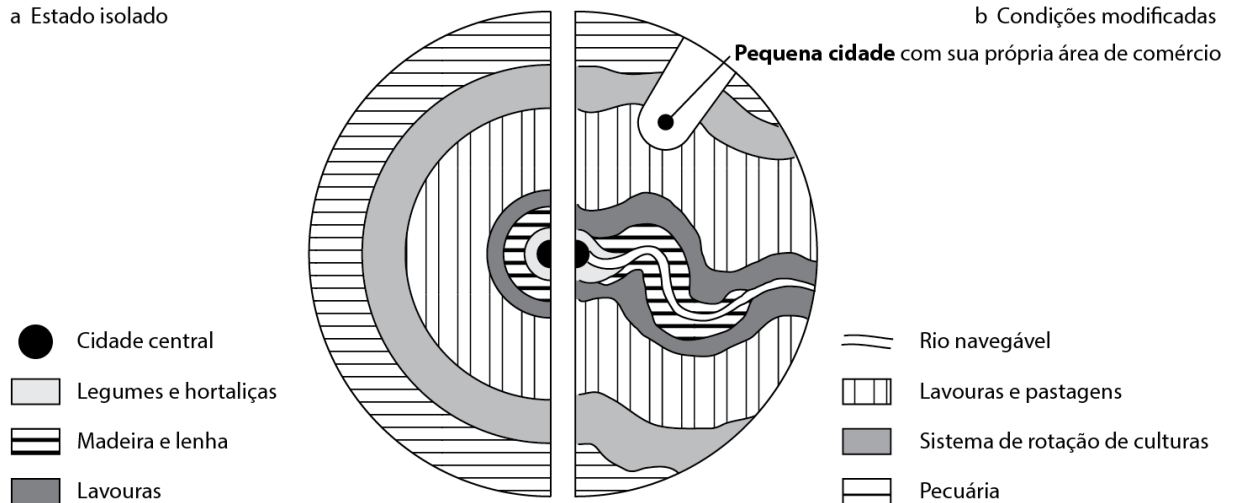


Figura 1 - Modelo do Estado Isolado de von Thünen.
Fonte: (CARR, 1997, p. 307), traduzido pelo autor.

As ideias iniciais de von Thünen foram retomadas no século XX com a Teoria dos Lugares Centrais, criada por Christaller em 1933 e aprimorada por Lösch em 1945 (PORTUGALI, 2000). Christaller também partiu da ideia de um estado isolado, com a presença de uma cidade geometricamente centralizada e uma série de cidades menores em sua área de influência. Esses lugares são hierarquizados de acordo com sua possibilidade de prover bens e serviços, organizando o território em um sistema de hexágonos representando as áreas de influência desses lugares (figura 2a).

O modelo de Lösch é semelhante ao de Christaller, porém mais complexo a medida que incorpora o crescimento populacional e a contínua subdivisão do espaço até encontrar o ponto de equilíbrio representado pelos hexágonos. Esse modelo também é mais complexo em termos de hierarquia e incorpora os conceitos de *city rich* e *city poor*, ou setores de maior ou menor distribuição de cidades e, conseqüentemente, melhor ou pior distribuição de mercadorias e serviços.

Paralelamente a esses modelos baseados em teorias econômicas foram desenvolvidos modelos associados a processos ecológicos, como o proposto por Park e Burgess da escola de ecologia social de Chicago, ainda seguindo a lógica concêntrica (figura 2b). Nesse modelo, a cidade é representada como uma série de zonas residenciais, definidas por renda, ao redor do distrito central de negócios (*Central Business District*, CBD). Hoyt adiciona uma morfologia setorial ao modelo concêntrico, organizando as zonas residenciais e comerciais ao longo de rotas de transporte partindo do centro em direção às bordas da cidade, como vista na figura 2c (CARR, 1997), rompendo com a simetria dos modelos precedentes.

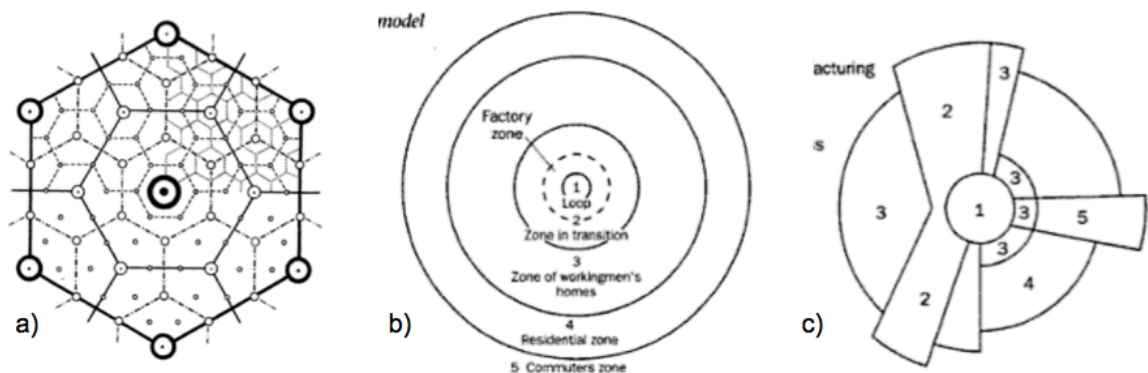


Figura 2 - Modelos urbanos clássicos concêntricos: a) Christaller, 1933; b) Park e Burgess, 1925; c) Hoyt, 1939.

Fonte: (PORTUGALI, 2000, p. 22), (CARR, 1997, p. 164, 165) respectivamente.

Esses primeiros modelos tiveram importante contribuição para o estabelecimento da teoria urbana contemporânea, porém tratam-se de modelos fundamentalmente estáticos. Desse modo, permitem apenas a descrição de uma determinada estrutura urbana e uma eventual comparação entre essas estruturas.

Outra característica notável desses primeiros modelos é sua proximidade ao conceito de acessibilidade. Apesar de suas origens diversas, todos eles consideram a importância da proximidade e facilidade de acesso aos centros urbanos como um fator de influência na configuração física e morfológica do espaço urbano. Essa abordagem foi desenvolvida décadas antes das primeiras tentativas de definir objetivamente o conceito de acessibilidade e formular uma descrição matemática para a medida, como será visto mais adiante neste capítulo, na seção 2.4.

Uma nova geração de modelos urbanos foi desenvolvida paralelamente ao surgimento dos primeiros computadores eletrônicos. Porém, esses modelos eram, de forma geral, baseados em métodos estatísticos ou sistemas de equações lineares e não permitiam a espacialização dos resultados (ALMEIDA, 2003). As questões referentes à dinâmica urbana e sua localização espacial só puderam ser enfrentadas simultaneamente com o desenvolvimento dos primeiros modelos baseados em autômatos celulares, que serão tratados na seção seguinte.

2.3 Autômatos Celulares

Autômatos Celulares (do inglês *Cellular Automata*, ou CA) são originários do trabalho de John von Neumann¹ e Stanislaw Ulam² no final da década de 1940 e início da década de 1950 (TORRENS, 2000). Von Neumann trabalhava na modelagem da auto-reprodução em biologia, baseado em estudos de cibernética. Inicialmente, os estudos eram feitos em espaços tridimensionais, mas posteriormente, a partir de sugestão de Ulam, von Neumann passou a trabalhar com espaços bidimensionais (WOLFRAM, 2002). Esses estudos também estão ligados ao trabalho anterior de Alan Turing, que buscava um computador universal, que pudesse ser reprogramado sem a necessidade de ser reconstruído, que ficou conhecido posteriormente como Máquina Universal de Turing (STRATHERN, 1999).

CA podem ser definidos, segundo White et al (1997), como sistemas espaciais e dinâmicos simples, onde o estado de cada célula depende do estado das células vizinhas no tempo anterior e de um conjunto definido de regras de transição. Outra forma de definir os CA é por meio de seus cinco elementos básicos (WOLFRAM, 1982): o *grid* celular, o estado, a vizinhança, as regras de transição e o tempo. Esses cinco elementos simples, em conjunto, são capazes de gerar comportamento complexo e padrões auto-organizados. Esses elementos estão descritos a seguir, adaptado de Liu (2009) e Torrens (2000).

¹ John von Neumann foi um matemático norte-americano de origem húngara, pioneiro em áreas como teoria dos jogos e criador da arquitetura dos computadores utilizada até hoje.

² Stanislaw Ulam foi um matemático norte-americano de origem polonesa, membro da equipe do Projeto Manhattan e um dos desenvolvedores das técnicas de simulação de Monte Carlo.

O *grid* celular é o conjunto de células que define o espaço em que o autômato existe. Autômatos elementares possuem apenas uma dimensão, sendo úteis para estudos teóricos em complexidade e computação por sua capacidade de gerar padrões auto-organizados e pela simplicidade de concepção e construção. Os mais conhecidos são os contidos no livro *A New Kind of Science*, de Wolfram (2002). CA úteis para estudos urbanos e geográficos normalmente são definidos em duas dimensões, enquanto CA tridimensionais são utilizados em estudos como dissipação de fumaça e meteorologia. CA urbanos tridimensionais ainda são raros e de desenvolvimento recente (SEMBOLONI, 2000; BENGUIGUI *et al.*, 2008), apesar do fato que algumas características das cidades se desenvolvem em três dimensões. Teoricamente, o *grid* pode assumir n-dimensões, mas isso é limitado por questões práticas e de poder de processamento computacional, além da dificuldade de visualização de modelos desse tipo. Tradicionalmente, o espaço celular é construído na forma de um *grid* contínuo, ou seja, as bordas são definidas como sendo conectadas, formando uma fita circular em CA unidimensionais e uma superfície toroidal em autômatos bidimensionais.

Os estados constituem os atributos que podem ser assumidos pelas células do *grid*, descrevendo suas características em um dado momento. Em CA básicos, os estados são finitos e discretos.

A vizinhança é a região no entorno da célula que influencia suas mudanças de estado ao longo do tempo. A vizinhança consiste da própria célula, mais um conjunto de células em seu entorno. Vizinhanças básicas são as vizinhanças de von Neumann, composta pelas quatro células adjacentes (correspondendo às direções norte, sul, leste e oeste), e a vizinhança de Moore, que inclui as quatro células citadas anteriormente mais as células situadas nas diagonais (correspondendo às direções nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste).

As regras de transição definem o modo como o autômato vai evoluir ao longo do tempo. Elas decidem o estado a ser assumido pela célula baseado no estado da própria célula e nos estados de suas células vizinhas. Substituem as equações matemáticas dos modelos tradicionais, traduzindo sistemas complexos em regras simples que orientam sua dinâmica. As regras são aplicadas a todas as células do *grid* simultaneamente.

O tempo nos CA consiste nos passos iterativos executados pelo sistema. Nos CA básicos, o tempo é representado de forma discreta, e não corresponde a uma medida de tempo real. CA tendem a gerar padrões estruturados e comportamento emergente ao longo de sua evolução.

O Jogo da Vida

Os primeiros autômatos feitos por von Neumann eram sistemas muito grandes, consistindo em *grids* de 200.000 células, cada uma podendo assumir 29 estados. Von Neumann acreditava que esse nível de complexidade era necessário para atingir resultados complexos como a auto-reprodução. Estudos posteriores demonstraram que autômatos bem mais simples eram capazes de comportamento complexo, como os CA unidimensionais e o Jogo da Vida, desenvolvido por John Conway e publicado por Martin Gardner em 1972 no periódico *Scientific American* (WOLFRAM, 2002).

O Jogo da Vida, como descrito em Torrens (2000), foi concebido considerando um *grid* retangular regular com as bordas conectadas (formando uma superfície toroidal), onde as células podem assumir somente os estados de viva ou morta, de acordo com regras simples baseadas somente no estado de suas células vizinhas considerando as oito células da vizinhança de Moore. O conjunto de regras é formado por três regras simples: a) a célula permanece viva quando possui duas ou três vizinhas vivas (sobrevivência); b) uma célula viva morre quando possui menos de duas ou mais de três vizinhas vivas (morte); c) a célula morta com exatamente três vizinhas vivas nasce na próxima iteração (nascimento). Assim, as células podem morrer por superpopulação ou por isolamento.

Essas características definem comportamentos puramente locais, ou seja, as células não sabem o que se passa em distâncias além de sua vizinhança imediata. Mesmo assim, o jogo da vida apresenta vários padrões espaciais com diferentes propriedades dinâmicas. Existem padrões que tendem a se estabilizar, morrer ou oscilar em torno de uma configuração estável. Alguns desses padrões podem ser vistos na figura 3, a seguir:

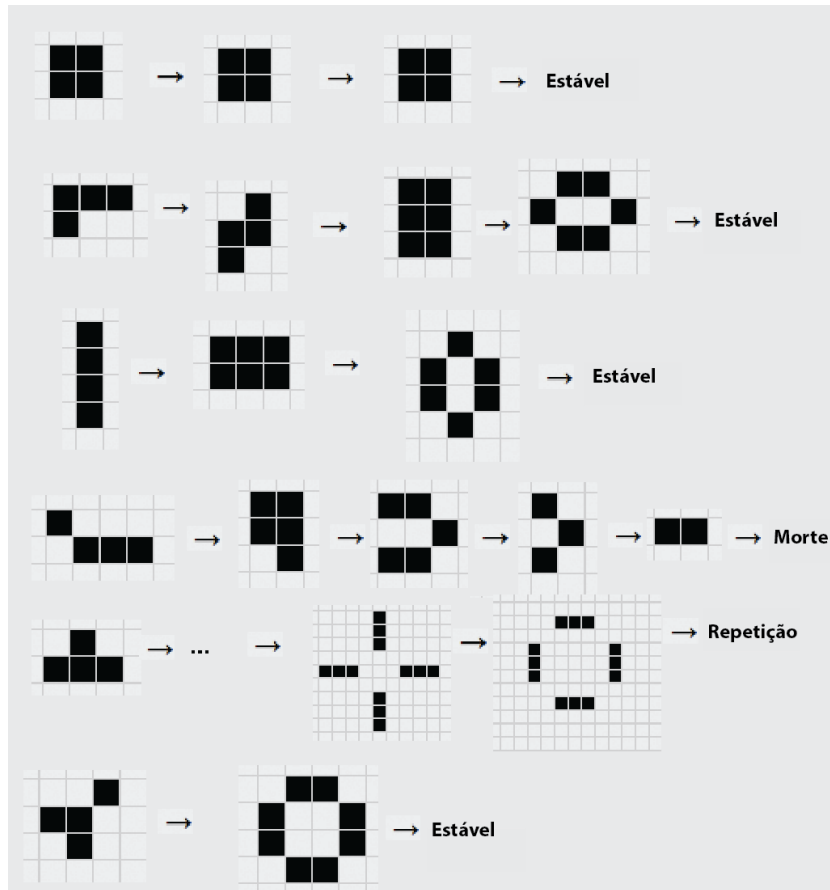


Figura 3 - Alguns padrões gerados pelas regras do Jogo da Vida de Conway.
 Fonte: <http://www.math.cornell.edu/~lipa/mec/lesson6.html>, traduzido pelo autor.

Essa capacidade de gerar padrões complexos a partir de regras simples e totalmente *bottom-up*, ou seja, sem um comando central, chamou a atenção do meio científico para os CA e seus potenciais usos. Com o avanço da capacidade gráfica dos computadores, os autômatos passaram a ser aplicados primeiramente nas ciências físicas e naturais, para posteriormente chegar aos estudos urbanos e ambientais (BATTY, 1997).

CA e estudos urbanos

Diversas vantagens puderam ser observadas em relação ao uso de CA para a modelagem da dinâmica urbana. Autômatos celulares são, por definição, espaciais, o que os torna adequados a estudos urbanos e geográficos (WHITE e ENGELN, 1993). Além disso, a ênfase dos CA em interações de nível local com capacidade para gerar padrões globais, bem como na geração de padrões a partir da repetição de regras simples, torna-os mais parecidos com os fenômenos urbanos (CLARKE e LEONARD, 1998).

Outras vantagens ainda podem ser observadas, segundo Liu (2009): a) facilidade na construção dos modelos, uma vez que a descrição espacial e as regras são muito simples, característica que auxilia no entendimento do processo e na interpretação dos resultados, sem prejuízo da complexidade possível de ser atingida com o

modelo; b) possibilidade de realizar experimentações, já que os CA são mais dirigidos ao estudo dos processos dinâmicos da cidade e não focam diretamente nos padrões espaciais do crescimento urbano, de modo que pequenas mudanças nas regras de transição geram grandes mudanças no comportamento do sistema e possibilitam a exploração de diferentes cenários possíveis; c) afinidade com os dados do tipo *raster* usados em SIG, possibilitando a fácil integração de CA em ambientes de SIG de modo a estender as capacidades do modelo em termos de acesso, organização e análise de dados espaciais.

Mesmo com essas vantagens, as características básicas dos CA não são suficientes para modelagem urbana, já que se tratam de abstrações matemáticas muito simplificadas. Várias mudanças tiveram de ser feitas na sua implementação de modo a adequá-los à representação da cidade. Esses CA foram chamados de Autômatos Celulares Estendidos, como está em Torrens (2000):

Os estados celulares são flexibilizados de forma a melhor representar as características urbanas. São possíveis estados binários (como “urbano” ou “não urbano”), estados discretos (como categorias de uso do solo) e estados contínuos (valores de custo do solo ou densidade populacional). Além disso, esses estados podem ser sobrepostos em uma única célula, diferente dos CA tradicionais.

O *grid* celular, nos CA urbanos, é considerado finito, ou seja, suas bordas não são conectadas como nos CA tradicionais. O tratamento do efeito de borda é feito através de técnicas como a inserção de *buffers* nos limites da área de estudo, onde os resultados são desconsiderados. Por fim, tentativas têm sido feitas no sentido de trabalhar com estruturas de células irregulares para representar as características da cidade.

A vizinhança nos CA urbanos não é limitada às células imediatamente adjacentes. De forma recorrente, as vizinhanças são expandidas para incluir efeitos que ocorrem na escala da cidade como um todo.

O tempo discreto e uniforme dos CA tradicionais frequentemente não é suficiente para simular processos urbanos. Variações podem ser concebidas no sentido de trabalhar em escalas de tempo assíncronas, representando variações na velocidade da dinâmica urbana em diferentes áreas da cidade.

As regras de transição são escritas de modo a representar processos urbanos reais, incluindo a influência de fatores externos ou métodos probabilísticos. Também é possível simular a evolução das regras ao longo do tempo.

As figuras 4 e 5, adiante, mostram dois exemplos de aplicação de CA em ambientes urbanos: a esquerda, o modelo de CA tridimensional de Semboloni; a direita, o modelo SLEUTH.

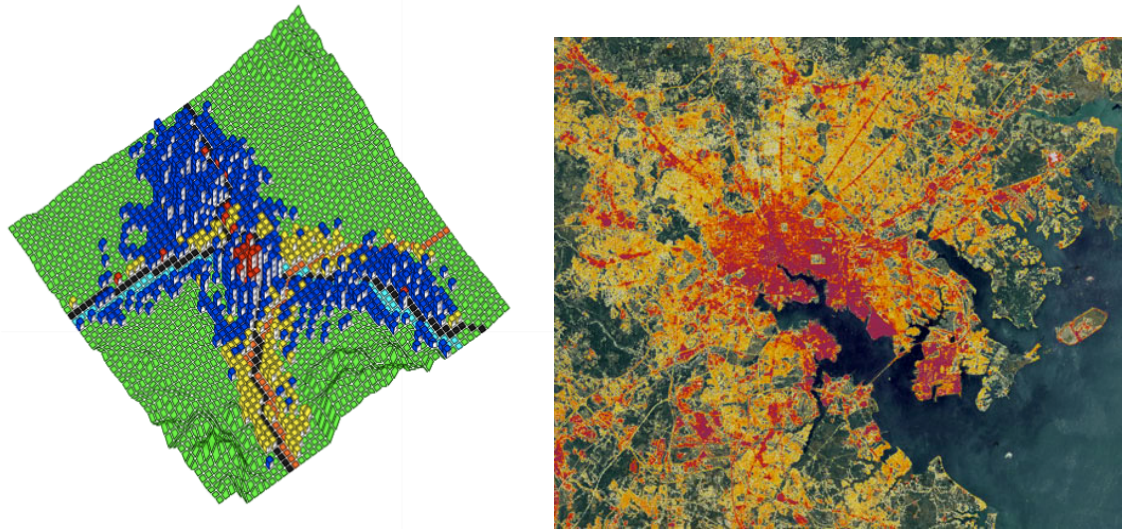


Figura 4, esquerda – CA urbano em *grid* tridimensional.

Fonte: (SEMBOLONI, 2000)

Figura 5, direita – SLEUTH, modelo de crescimento urbano baseado em CA.

Fonte: <http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/view.php?id=24480>

Além dessas variações, autômatos celulares também podem ser modificados para representar restrições oferecidas pelo contexto maior em que a cidade está inserida, como a situação econômica regional, como no modelo de CA restringido (*constrained*, no original) proposto por White *et al.* (1997). Nesse modelo, os autores propõem um funcionamento em duas escalas: na macro escala, são impostas restrições exógenas ao crescimento urbano, como taxas fixas de conversão do solo e demandas por usos específicos; na micro escala, o modelo funciona de maneira convencional, operando sobre as regras locais de transição. Assim, o número de células que vai mudar de estado depende de um fator exógeno definido pelo operador do sistema, mas o modelo define internamente quais células tem maior potencial de mudança. Essa abordagem permite integrar ao funcionamento dos CA fatores provenientes de contextos socioeconômicos e ambientais, conectando perspectivas *bottom-up* e *top-down*.

Outra forma de estender as possibilidades de modelagem urbana com CA é a sua integração com técnicas provenientes da teoria de grafos. Essa abordagem conjunta possibilita extrair medidas típicas de grafos e utilizá-las como formas de diferenciação celular, como será exposto na próxima seção.

2.4 Medidas de Acessibilidade

A medida de acessibilidade tem sido, tradicionalmente, calculada com recursos de grafos. A teoria de grafos provém da topologia, área da matemática dedicada ao estudo das relações entre entidades geométricas a partir de suas conexões. Diferentemente da geometria tradicional, as propriedades estudadas em topologia não variam com a forma do objeto e sim com a posição relativa entre seus

componentes. O estudo de grafos iniciou com o problema das pontes de Königsberg, proposto por Euler no século XVIII como um jogo sem aplicação prática. Com o tempo, várias utilidades foram encontradas para os grafos nas mais diversas áreas da ciência, sendo que hoje a teoria dos grafos é um ramo consolidado da matemática (BOAVENTURA NETTO, 2006).

Grafos podem ser definidos como um conjunto de vértices conectados por arestas, sendo que os vértices correspondem aos elementos de um sistema e as arestas correspondem às relações entre eles. Matematicamente, um grafo é composto por dois conjuntos finitos V e A , em que V é o conjunto não vazio de vértices ou nodos do grafo e A é um conjunto de pares de elementos de V representando as arestas (BALLOBÁS, 1998).

Com o uso de ferramentas computacionais é possível extrair diversas medidas de um grafo, possibilitando o estudo de questões urbanas centrais em estudos de sintaxe espacial (HILLIER e HANSON, 1984) e morfologia urbana (KRAFTA, 1993). Grafos são especialmente úteis para a modelagem de sistemas baseados em redes, tanto artificiais quanto naturais (SÁNCHEZ, 1998).

Grafos têm sido utilizados em conjunto com CA (figura 6), estendendo suas capacidades (O'SULLIVAN, 2001; POLIDORI, 2004). Das medidas derivadas de grafos e úteis à descrição do espaço urbano, temos as medidas da sintaxe espacial (HILLIER e HANSON, 1984), acessibilidade (HAGGETT e CHORLEY, 1970) e centralidade (FREEMAN, 1977; KRAFTA, 1994), entre outras. Destas, a mais importante para esse trabalho é a medida de acessibilidade.

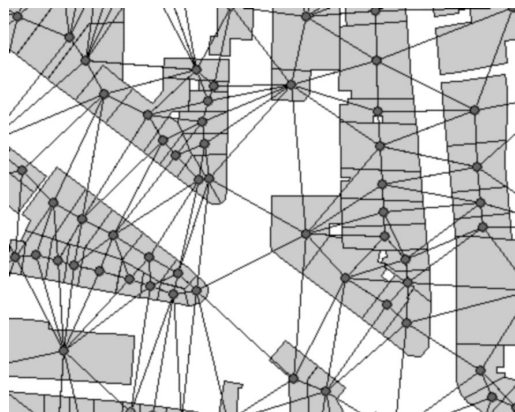


Figura 6 - Modelo híbrido entre Grafo e CA, onde as células são as próprias edificações e a vizinhança é determinada pelas arestas do grafo.

Fonte: (O'SULLIVAN, 2001).

Investigações sobre uma definição objetiva de acessibilidade e uma forma de mensurá-la datam dos anos 1960 e início da década de 1970, com os estudos pioneiros de Kansky (1963), Haggett e Chorley (1970) e Ingram (1971). De forma simples, acessibilidade pode ser definida como a propriedade de determinado

componente de uma rede de estar mais próximo de todos os demais elementos, considerando os caminhos mínimos (ou preferenciais) entre eles. Para efeitos de cálculo, a distância pode ser medida tanto em termos de tempo quanto de espaço, sendo que podem ser qualificadas por itens como declividades, qualidade da via de acesso e capacidade de fluxo, entre outros.

Além dessa definição básica, outras podem ser derivadas para a resolução de problemas mais específicos, tanto que Ingram (1971) já identificava, naquela época, certa confusão no meio acadêmico em relação aos conceitos de acessibilidade e sua medição.

A medida de acessibilidade tem-se mostrado muito útil na análise tanto do espaço urbanizado quanto da paisagem natural. As análises podem ser feitas tanto do ponto de vista dos fluxos existentes quanto da própria estrutura do espaço. Exemplos dessas possibilidades são encontrados na área da morfologia e modelagem urbana, bem como de ecologia de paisagem.

Acessibilidade em sistemas urbanos

Medidas de acessibilidade tem sido usada extensivamente em estudos de planejamento urbano e de transportes, por sua capacidade de medir a eficiência do sistema de mobilidade urbana (GEURS e RITSEMA VAN ECK, 2001).

Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são essenciais aos órgãos de planejamento, por aumentar a eficiência na obtenção, armazenamento, recuperação e análise de dados espaciais. Arentze *et al.* (1994) demonstram a possibilidade de integração de medidas de acessibilidade para sistemas de transporte em ambiente de SIG, aumentando as possibilidades de uso pelos gestores urbanos.

Estudos vinculando diferentes usos do solo e acessibilidade também são frequentes, tendo em vista a possibilidade de qualificar o cálculo da medida pela diferenciação entre locais que são predominantemente origem ou destino das viagens, baseado no uso do solo predominante. Bertolini *et al.* (2005) relacionam acessibilidade e usos do solo para auxiliar no planejamento do sistema de transporte e de ocupação do solo em cidades holandesas, de modo a melhorar a eficiência do sistema, diminuir custos de operação e buscar cidades mais sustentáveis. Woudsma *et al.* (2008) buscam o enfoque inverso: os autores identificam a capacidade da acessibilidade de condicionar a formação de padrões de ocupação do solo para usos muito dependentes do sistema de transportes, como é o caso do setor de logística.

Na área de pesquisas socioespaciais, Omer (2006) utiliza a acessibilidade como forma de medir a equidade no acesso às facilidades urbanas entre cidadãos pertencentes a diferentes grupos étnicos. O autor utiliza a cidade de Tel-Aviv, em Israel, como estudo de caso, região sabidamente marcada por conflitos étnico-religiosos. Equidade pode ser definida como a justa distribuição de bens e serviços

entre lugares ou indivíduos (GEURS e RITSEMA VAN ECK, 2001), e foi verificado que a acessibilidade pode ser um método eficiente para medi-la.

O método mais comum de medir a acessibilidade é considerando os caminhos mínimos entre os pontos de interesse, método que nem sempre pode ser adequado dependendo do problema em questão. Para enfrentar esse problema, Arentze *et al.* (1994) utilizaram o conceito de acessibilidade com múltiplas paradas para calcular a eficiência do transporte urbano de mercadorias. Nesse caso, o método proposto visa calcular a acessibilidade considerando os caminhos mais curtos que contemplem todos os pontos de parada intermediários. Abordagem semelhante foi adotada por Brooks *et al.* (2008), mas com o objetivo oposto. O modelo proposto buscava medir a acessibilidade de diversos pontos comerciais considerando os caminhos percorridos pelos clientes. A medida utilizada considerou os múltiplos destinos dos consumidores em uma saída de compras, além de seus locais de moradia.

Esses estudos indicam que a acessibilidade é capaz de diferenciar espacialmente lugares com diferentes vantagens locais em relação a outros, seja por proximidade de locais de trabalho, comércio ou lazer. Considerando esse fato, Srour *et al.* (2002) compararam diversas medidas de acessibilidade com o custo do solo e as escolhas locais feitas pelas pessoas, encontrando correlação positiva entre as simulações e as medições empíricas.

A teoria da sintaxe espacial apresenta uma série de medidas quantitativas de avaliação da conformação urbana, baseadas apenas na posição relativa entre os elementos estruturantes do espaço (HILLIER e HANSON, 1984). A principal medida da sintaxe espacial é a medida de integração, que é intimamente relacionada à acessibilidade, uma vez que se baseia na proximidade topológica entre os componentes do sistema. Dessa forma, as características da acessibilidade estão relacionadas às propriedades configuracionais inerentes aos sistemas urbanos, e a medida pode ser utilizada para descrever o padrão global da cidade. Essa observação concorda com teorias que consideram o espaço como agente ativo no processo social, e não apenas um resultado do mesmo (SOJA, 1985; HILLIER, 2007).

Acessibilidade em sistemas ambientais

A ecologia de paisagem é um campo relativamente recente da ciência dedicado ao estudo dos padrões espaciais e das interações entre ecossistemas, bem como seus efeitos sobre os processos ecológicos. As unidades espaciais da paisagem podem ser classificadas em três categorias: a) manchas (*patches*), áreas da paisagem relativamente homogêneas e diferentes das áreas vizinhas; b) matriz (*matrix*), é o plano de fundo, o componente predominante em uma paisagem; c) corredores (*corridors*), áreas estreitas que servem de conexão ou barreira entre as manchas (CLARK, 2010).

A acessibilidade em ecologia de paisagem está relacionada à conectividade entre diferentes manchas presentes em um ecossistema, feita principalmente através dos corredores e dependendo da configuração espacial do ambiente. Associada à conectividade, está o conceito de Resistência Mínima Acumulada ou RMA (do original em inglês *Minimal Cumulative Resistance*), que é a resistência imposta pelo ambiente ao deslocamento das espécies entre manchas ou à permanência delas em determinada mancha (WU e HOOBS, 2007).

De modo a medir as características de conectividade e acessibilidade do ambiente natural, estudos de ecologia de paisagem têm incorporado técnicas da teoria de grafos e análise de redes (BUNN *et al.*, 2000; RAYFIELD *et al.*, 2010), demonstrando semelhança metodológica com estudos urbanos. Outra semelhança pode ser observada em estudos como o de Pinto e Keitt (2008), dedicado a identificar a presença de múltiplos caminhos mínimos nas conexões ambientais e sua influência na estrutura da paisagem, de forma semelhante aos modelos de acessibilidade com múltiplas paradas.

Além disso, estudos indicam que a paisagem natural possui características intrínsecas a sua configuração formal, sendo sua capacidade de sustentação influenciada diretamente pelos padrões espaciais da paisagem (YU, 1995; LA MORGIA *et al.*, 2011). Esses estudos também consideram a capacidade de movimentação das diferentes espécies como maior ou menor capacidade de vencer resistências ambientais, de modo semelhante a estudos de acessibilidade dedicados à mobilidade urbana.

Por fim, estudos integrados entre cidade e ambiente têm se tornado cada vez mais comuns na contemporaneidade, uma vez que são evidentes os impactos causados no ambiente natural pela urbanização crescente (ALBERTI, MARZLUFF, *et al.*, 2003). Por outro lado, o crescimento urbano não se dá de forma independente do plano natural de suporte (LIU, DIETZ, *et al.*, 2007).

As semelhanças teóricas e metodológicas apresentadas aqui quanto à teoria de grafos e a medidas de acessibilidade encontram-se nesse contexto de integração entre os dois campos disciplinares. Essa convergência será explorada no próximo capítulo, em que será elaborado um modelo de crescimento urbano baseado em uma medida de acessibilidade concebida para considerar integradamente os ambientes urbano e natural.

3 Método

Apresentado o referencial teórico de relevância para o trabalho, este capítulo trata da construção do modelo de simulação de crescimento urbano proposto nos objetivos da pesquisa. A parte inicial do texto está dedicada a apresentar o *software* de simulação de crescimento urbano *CityCell*, antecedente desta pesquisa. A segunda parte refere-se ao desenvolvimento de uma medida de acessibilidade celular. A terceira parte trata da elaboração do modelo, integrando a medida de acessibilidade proposta em um ambiente de autômato celular. Por fim, a quarta parte trata das técnicas de avaliação de resultados utilizadas neste trabalho.

3.1 O *software CityCell – Urban Growth Simulator*

Com o objetivo de avançar no conhecimento das questões envolvidas no processo de crescimento da cidade, Polidori (2004) propôs um modelo de simulação de crescimento urbano dedicado a realizar estudos da dinâmica espacial urbana. Esse modelo considera integradamente fatores urbanos, naturais e institucionais, que podem atuar tanto como atração quanto como resistência à urbanização, implementando crescimento interno e externo à cidade preexistente.

O modelo denominado SACI (Simulador do Ambiente da Cidade) aplica princípios contidos no modelo de Centralidade e Potencial (KRAFTA, 1994), readequando-os ao ambiente celular e às características do modelo, feito através da integração entre grafos e CA. Esta integração permite tratar conjuntamente relações de vizinhança imediata (obtidas através de CA) e relações de vizinhança remota (obtidas através dos grafos). A operacionalização do modelo é alcançada através do uso de recursos de SIG (Sistemas de Informações Geográficas), que permitem associar dados vetoriais e *raster*, além de facilitar a aquisição, ingresso e armazenamento de dados, bem como possibilitam o processamento do modelo de simulação (BENENSON e TORRENS, 2004).

Simulações de crescimento urbano baseadas no modelo SACI foram realizadas com sucesso em pesquisas acadêmicas e como ferramenta auxiliar no processo de planejamento em cidades como Pelotas (POLIDORI, 2004), Santa Maria (SAURIM, 2005), Santa Vitória do Palmar e São Lourenço do Sul, no Rio Grande do Sul, e Balcarce, na Argentina (POLIDORI, 2010). Além desses, há estudos dedicados à dinâmica urbana articulada à morfologia dos recursos hídricos (PERES, 2010) e à formação de periferias urbanas (TORALLES, 2013), expandindo as possibilidades do modelo.

Recentemente, o *software* que implementa o modelo SACI foi atualizado e recebeu uma série de melhorias e novas possibilidades (SARAIVA, POLIDORI, *et al.*, 2011), sendo renomeado para *CityCell – Urban Growth Simulator*. Entre as melhorias,

podemos citar: a) maior facilidade de uso; b) compatibilidade com versões mais recentes do sistema operacional *Windows*[®], da *Microsoft*; c) independência de plataformas proprietárias de SIG, uma vez que o SACI foi desenvolvido como uma extensão do *software ArcView*[®], da *ESRI*, enquanto o *CityCell* é um *software* independente; d) melhoria significativa de desempenho, gerando ganhos de produtividade aos pesquisadores.

Em relação à sua arquitetura, o *software* é dividido em dois módulos: a) o *CityCell* propriamente dito, responsável pela entrada, processamento e saída de dados; b) os modelos de simulação de crescimento urbano, que são chamados de regras de transição (ou, simplesmente, regras) em referência ao componente dinâmico dos autômatos celulares.

O *CityCell* fornece as ferramentas básicas de geoprocessamento e visualização de dados geográficos necessárias à entrada e manipulação de dados e parametrização de simulações, bem como visualização, análise e avaliação dos resultados gerados. Muitas das funções disponíveis tiveram de ser programadas especialmente para o *CityCell*, devido à decisão de abandonar o vínculo com plataformas proprietárias de SIG e, conseqüentemente, os recursos disponíveis de visualização e análise espacial. Essa decisão trouxe, por um lado, melhor desempenho do sistema, facilidade de uso e autonomia de desenvolvimento, já que não é necessário acompanhar o cronograma de lançamento de *softwares* proprietários e manter a compatibilidade com novas versões. Por outro lado, houve a perda de acesso direto a dados geográficos disponíveis no SIG. Essa limitação foi contornada com a possibilidade de intercâmbio de dados entre o *CityCell* e outros *softwares* a partir de ferramentas de importação e exportação de dados nos formatos mais comumente utilizados.

A seguir, será descrito o funcionamento do modelo de simulação de crescimento urbano, com as etapas de entrada de dados, processamento e geração de resultados, adaptado de Polidori (2004).

Descrição do ambiente urbano e natural

O modelo opera sobre uma base espacial no formato de um *grid* bidimensional regular com células quadradas, cujo tamanho é definido pelo operador do sistema. A partir da delimitação da área de estudo, o modelo permite a livre inclusão de variáveis ou atributos, que podem ser dos tipos urbano, natural ou institucional, assumindo o papel de atração ou resistência à urbanização. Além disso, os atributos podem assumir os comportamentos de *mutable* ou *freezing*. Atributos *mutable* podem ser modificados e removidos durante o processo de crescimento urbano, enquanto células marcadas com a propriedade *freezing* permanecem fixas em seu estado inicial durante todo o processo de simulação.

O número de atributos em cada grupo é definido pelo usuário, considerando sua importância como condicionante do crescimento urbano e a disponibilidade de informações de levantamento. A seguir, estão descritas as características de cada grupo de atributos:

- a) atributos naturais representam os fatores do ambiente natural, modificados ou não pela ação humana, como os sistemas de águas superficiais (águas lóaticas, lânticas, canalizadas, etc.), cobertura do solo (banhados, campos, matas nativas, matas plantadas, etc.) e fatores geomorfológicos (dunas, praias, altitudes, etc.);
- b) atributos urbanos representam o mapeamento do solo já urbanizado e podem receber diferenciação através de pesos, conformando diferentes índices de aproveitamento, custos do solo, entre outras características;
- c) atributos institucionais possibilitam representar mecanismos legais ou práticas de planejamento urbano, como é o caso de legislações de restrição ou incentivo à urbanização.

A seguir, na figura 7, estão exemplificados alguns atributos naturais, urbanos e institucionais.

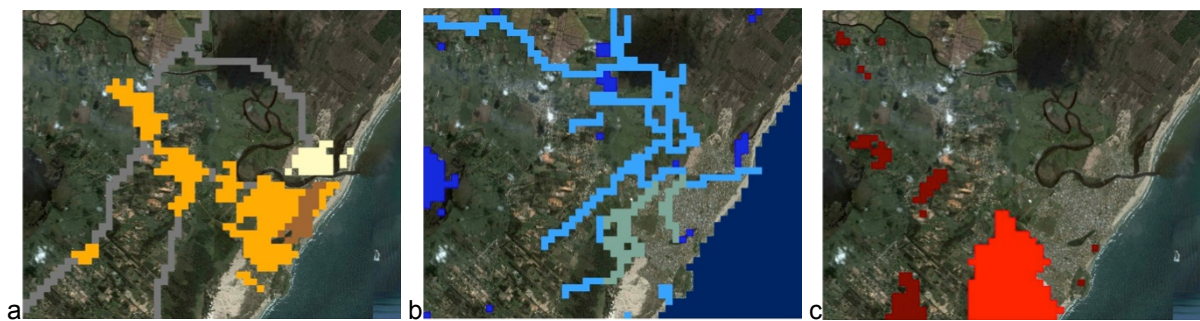


Figura 7 - Exemplos de atributos de entrada no *CityCell*, para a cidade de Torres/RS: a) atributos urbanos (estradas e área urbanizada em diferentes níveis de densidade de ocupação); b) atributos naturais (subsistema de águas superficiais); c) atributos institucionais (áreas de proteção ambiental).

Dessa forma, o conceito de estado dos CA clássicos é expandido, de modo que cada célula do *grid* pode conter atributos urbanos, naturais e institucionais simultaneamente e em vários níveis de intensidade, representando tanto atração quanto resistência à urbanização. A figura 8, a seguir, apresenta um resumo dos tipos de atributos utilizados e suas características:

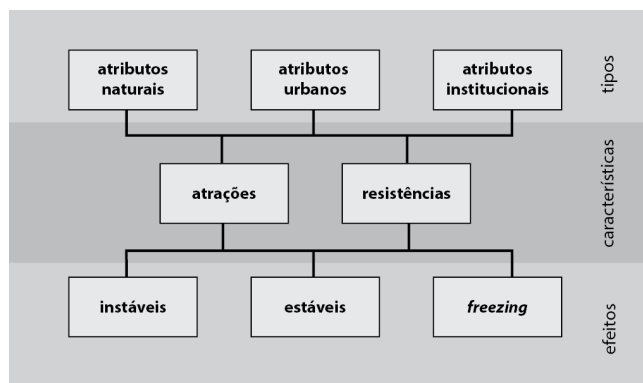


Figura 8 - Resumo dos tipos de atributos utilizados no *CityCell* para a descrição do território, com suas características e efeitos na simulação.

Fonte: (POLIDORI, 2004).

Além desses três tipos ativos de atributo, o *software* ainda permite a inserção de mais dois tipos de atributos, com funções diversas no sistema. Atributos do tipo máscara são uma espécie de curinga no sistema, pois cada regra de crescimento disponível pode utilizá-los para fins diversos. São comumente usados para demarcar áreas da cidade onde determinados parâmetros atuam de forma diferente. Também servem como referência para as ferramentas de validação implementadas no *CityCell*, onde os resultados obtidos nas simulações podem ser comparados com atributos do tipo máscara referentes à área efetivamente urbanizada real. Por fim, atributos do tipo imagem permitem a inserção de imagens de satélite georreferenciadas como forma de auxiliar na visualização e edição dos dados utilizados nas simulações.

Regras de crescimento

As regras de transição, em CA, são os elementos que determinam a dinâmica dos sistemas. No *CityCell*, correspondem a modelos de crescimento urbano que vão atuar sobre o ambiente definido a partir dos atributos. O *CityCell* foi concebido para permitir a inclusão de novas regras, que podem ser derivadas de regras preexistentes ou concebidas a partir de novas teorias. As regras ainda podem ser combinadas em uma mesma simulação, de modo a serem executadas em qualquer sequência determinada pelo operador do sistema e sobre o mesmo conjunto de dados. Desta forma, é possível testar a interação entre diferentes dinâmicas de crescimento urbano.

Atualmente, o *software* possui as seguintes regras implementadas:

- a) *Threshold Potential* e *Free Potential* (POLIDORI, 2004), assumem a medida de centralidade como indicador de qualidade locacional, sendo o potencial de desenvolvimento de cada célula derivado da diferença entre a centralidade da célula e a centralidade máxima em sua vizinhança. No modelo *Threshold Potential*, problemas ambientais são registrados pela superação de limiares de crescimento urbano e superados pelo próprio processo de urbanização. Na

versão *Free Potential*, limiares de crescimento são desconsiderados e, conseqüentemente, problemas ambientais não são registrados;

- b) *Threshold Reload* e *Free Reload* (POLIDORI, 2004), assumem como potencial de crescimento as diferenças entre o carregamento urbano de cada célula e o maior carregamento urbano encontrado em sua vizinhança, eliminando o componente de grafo do modelo representado pela medida de centralidade. A versão *Threshold Reload* registra problemas ambientais cada vez que o crescimento urbano supera determinados limiares, o que não ocorre na versão *Free Reload*;
- c) *Environmental Percolation* (POLIDORI, 2004), baseada em processos naturais de percolação, simula o crescimento dos atributos naturais através da passagem de atributos entre células adjacentes;
- d) *WaterLand Factor* (PERES, 2010), dedicada a estudos da dinâmica do crescimento urbano articulado aos atributos da hidrografia. Funciona como um mecanismo adicional de autoparametrização iterativa à regra *Threshold Potential*, simulando mudanças no modo de crescimento da cidade a partir da alternância entre movimentos de compactação e fragmentação da forma urbana;
- e) *Periurban Growth* (TORALLES, 2013), dedicada a estudos sobre a formação de núcleos urbanos periféricos, tanto derivados da atuação do mercado formal e destinados à população de alta renda, quanto derivados da ocupação informal de áreas periféricas pela população de baixa renda.

Além dessas, também está implementada a regra *Environmental Accessibility*, referente ao modelo de simulação de crescimento urbano descrito neste trabalho.

Cada regra possui seu próprio conjunto de parâmetros, que tem por objetivo adaptar seu comportamento a diversas situações e objetivos de estudo.

Obtenção de resultados

O *CityCell* apresenta resultados de simulação em forma de gráficos (*grids*) e de tabelas. Os dados gráficos podem ser considerados os principais tipos de resultados, pois possibilitam a análise da dinâmica urbana e da morfologia da cidade resultante do processo de crescimento simulado. Além disso, os *grids* podem ser transportados para sistemas de geoprocessamento, possibilitando a realização de operações avançadas de análise espacial.

Os resultados padrão, disponíveis a todas as regras, derivam diretamente do processamento dos atributos de entrada. Atributos que atraem urbanização são agrupados em forma de Carregamentos, que podem ser Urbanos, Naturais ou Institucionais (*Urban Load*, *Environmental Load* e *Institutional Load*, respectivamente, no modelo). Atributos que se opõem à urbanização são agrupados em Resistências,

que também podem ser Urbanas, Naturais ou Institucionais (*Urban Resistance*, *Environmental Resistance* e *Institucional Resistance*, respectivamente, no modelo). Esses resultados são calculados tendo por base a presença dos atributos nas células e do peso definido pelo usuário para cada atributo para a simulação. Por fim, carregamentos e resistências são normalizados entre zero e 1 e podem ser elevados a coeficientes, informados pelo usuário, como forma de aumentar ou diminuir sua influência no processo.

Derivados dos carregamentos e resistência, existem os resultados chamados de Valor Urbano, Natural e Institucional (*Urban Value*, *Environmental Value* e *Institucional Value*, respectivamente, no modelo). Esses resultados correspondem à soma dos fatores urbanos, naturais e institucionais, tanto carregamentos como resistências, presentes nas células. Da comparação entre valor urbano e valor natural deriva o Tipo de Célula (*CellType*, no modelo), que pode ser Urbano ou Natural.

Por fim, os dois últimos tipos de resultado gráfico derivam do tipo de célula e auxiliam na análise das simulações. A Máscara de Borda (*Border Mask*, no modelo) identifica as células presentes na interface entre o ambiente urbano e o ambiente natural. A Máscara de Células Novas (*New Cell Mask*, no modelo) identifica as células convertidas do tipo natural para o tipo urbano a cada iteração.

Três dos resultados mais comuns estão exemplificados a seguir: Tipo de Célula (figura 9), Carregamento Urbano (figura 10) e Resistência Natural (figura 11), com as escalas de cores padrão de cada um. Todos exemplos referem-se a estudos realizados pelo autor com dados da cidade de Torres/RS e apresentam imagens de diferentes iterações de uma mesma simulação.



Figura 9 - Resultado Tipo de Célula (*CellType*), em diferentes iterações, para a cidade de Torres/RS, em marrom.

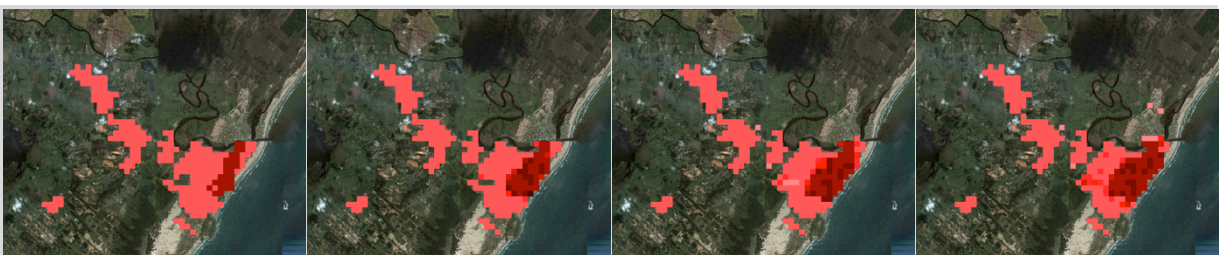


Figura 10 - Resultado Carregamento Urbano (*Urban Load*), em diferentes iterações, para a cidade de Torres/RS, em tons de vermelho.

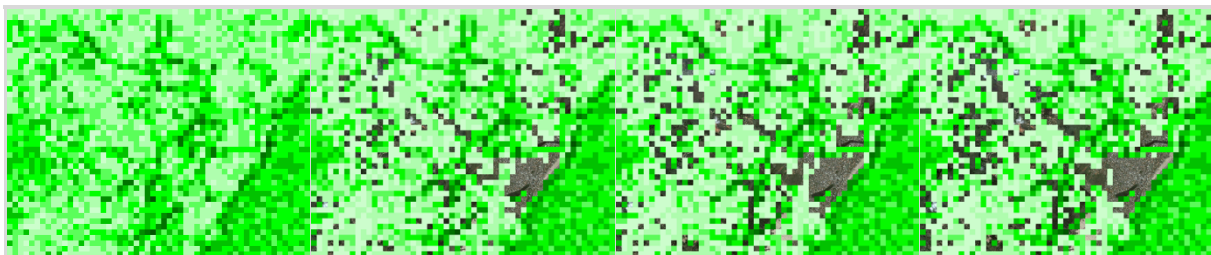


Figura 11 - Resultado Resistência Natural (*Environmental Resistance*), em diferentes iterações, para a cidade de Torres/RS, em tons de verde.

Além destes resultados básicos, cada regra pode ter seu próprio conjunto de resultados, de acordo com suas características, como de fato ocorre no caso das regras citadas anteriormente.

Este trabalho pretende utilizar as possibilidades do *CityCell* para implementar uma nova regra de crescimento, aproveitando os recursos já desenvolvidos referentes à descrição ambiental, visualização de resultados, análises espaciais e parametrização. Uma nova regra de crescimento implementada no simulador de crescimento urbano servirá para estender as possibilidades de uso do *software*, adicionando novas possibilidades de interpretações e estudos no campo da modelagem urbana.

O processo de modelagem, neste caso, passa pela definição da medida de acessibilidade celular, tratada no próximo tópico.

3.2 A medida de acessibilidade celular

Medidas de acessibilidade são tradicionalmente calculadas utilizando recursos de grafos. Para este trabalho, buscando aproveitar as características dinâmicas dos modelos baseados em CA, está proposta a definição de uma medida de acessibilidade celular, representada na forma de *grid*.

A interação entre as células para o cálculo da acessibilidade celular, no modelo, se dá da seguinte forma: a) são consideradas células de origem todas as células do *grid*; b) células de destino são todas as células com atributos que atraem a urbanização, podendo ser urbanos, naturais ou institucionais. A partir disso, a acessibilidade celular pode ser definida como a propriedade de cada célula do *grid* de estar mais próxima das áreas de maior atração à urbanização.

Matematicamente, a acessibilidade celular descrita anteriormente é definida conforme a equação 1, a seguir. Na sequência, resultados dessa medida, referentes a diferentes descrições ambientais, podem ser vistos nas figuras 12 e 13.

Equação 1 - Acessibilidade celular da célula i .

$$AC_i = \sum_{(j \neq i) \in U} \frac{1}{d_{ij}}$$

onde se lê:

A acessibilidade celular da célula i é igual ao somatório do inverso das distâncias entre as células i e j , para toda célula i diferente de j , sendo que toda célula j pertence ao conjunto das células com atributos de atração à urbanização do *grid*.

sendo:

AC_i : acessibilidade celular da célula i .

d_{ij} : distância entre as células i e j .

U : conjunto das células do *grid* com atributos de atração à urbanização.

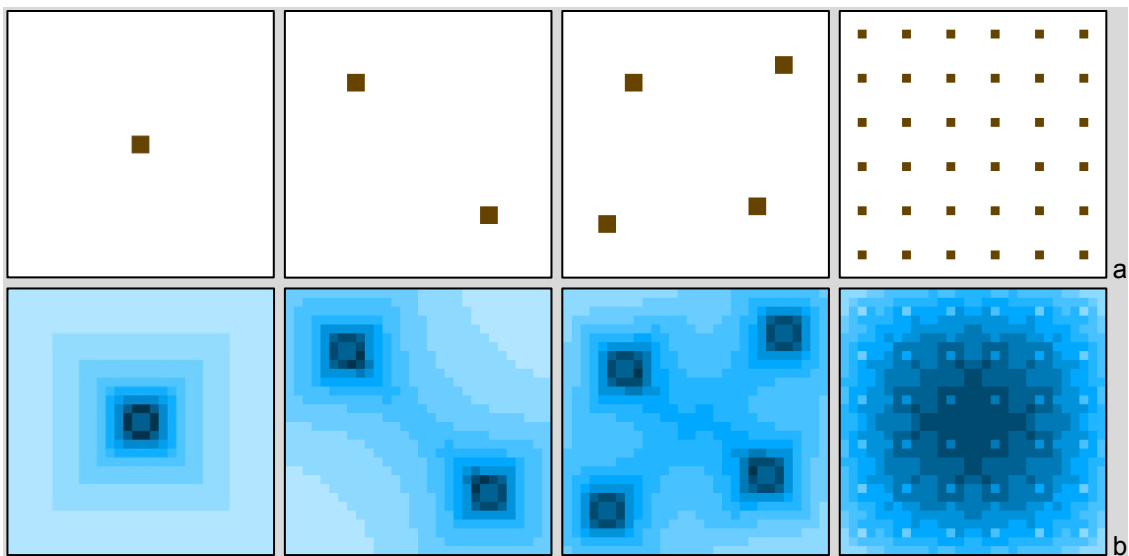


Figura 12 – Resultados da medida de acessibilidade celular em padrões simétricos: a) *grids* de entrada, com células com atributos de atração à urbanização em marrom; b) *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

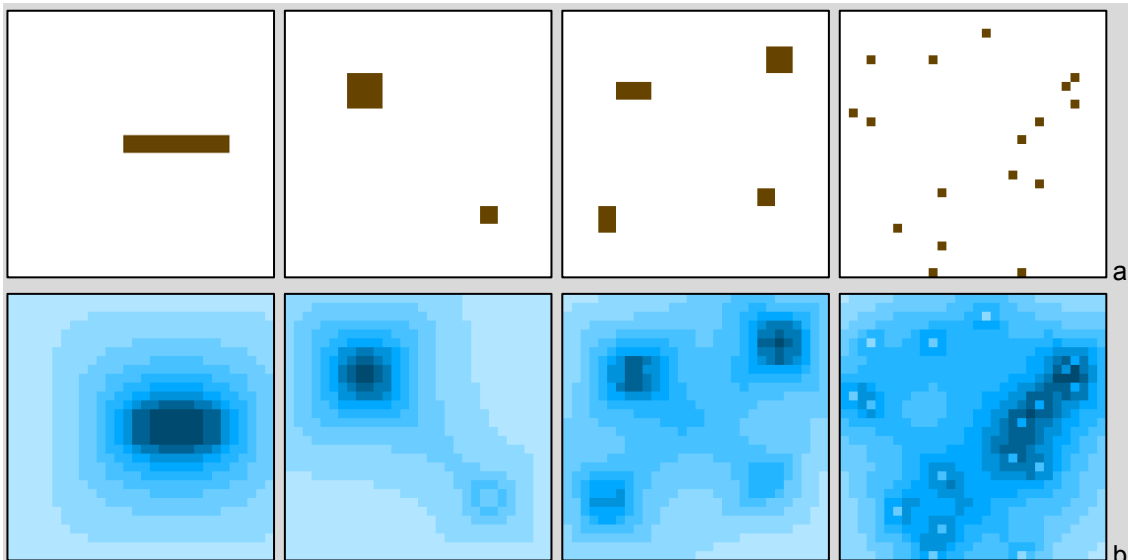


Figura 13 - Resultados da medida de acessibilidade celular em padrões assimétricos: a) *grids* de entrada, com células com atributos de atração à urbanização em marrom; b) *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

Os resultados da medida de acessibilidade celular apresentam alta tendência à concentração em torno das áreas de maior presença de células capazes de atrair a urbanização, como esperado. A figura 12 apresenta resultados simétricos, devido à distribuição também simétrica das células atratoras. Já a figura 13 demonstra a sensibilidade da medida ao responder a mudanças nos atributos de entrada, onde pequenas variações nesses atributos geram mudanças significativas no padrão de distribuição da acessibilidade pelo *grid*.

A medida de acessibilidade definida na equação 1 e representada nas figuras 12 e 13 pode ser chamada de acessibilidade topológica, devido à forma de cálculo das distâncias entre as células. Em estudos urbanos baseados em grafos, incluindo estudos de acessibilidade, são comuns duas formas de cálculo das distâncias entre as entidades: topológica e geométrica. A distância topológica considera cada elemento com o mesmo tamanho ou peso dos demais, ou seja, cada elemento percorrido conta um passo topológico em direção ao destino. A distância geométrica considera as distâncias euclidianas entre dois pontos, o que pode gerar uma grande variação no resultado final.

Em um ambiente celular de células quadradas, como é o caso do *CityCell*, a distância geométrica não difere da topológica pois todas as células de um *grid* possuem o mesmo tamanho. Mesmo que se considere o tamanho geométrico da célula no cálculo, o resultado prático entre a medida geométrica e a medida topológica será o mesmo. Essa limitação pode ser superada através da propriedade das células de armazenar diferentes atributos simultaneamente, que podem representar a dificuldade em transpor cada célula ou seu tamanho relativo: mesmo que todas as células tenham o mesmo tamanho físico, a distância de cálculo a ser percorrida na sua transposição pode ser diferenciada. Neste trabalho, esta característica será chamada de peso da célula.

A partir dessa propriedade, está proposta a definição de uma medida de acessibilidade ponderada. Neste trabalho, serão testadas duas formas de ponderação: a) pelos fatores ambientais; b) pelos fatores antrópicos.

A ponderação a partir dos fatores ambientais é feita a partir das características naturais das células do entorno urbano. Dessa forma, os valores referentes à intensidade da presença de fatores ambientais associados às células podem ser usados no cálculo da acessibilidade para aumentar ou diminuir as distâncias relativas ao percorrer cada célula. Assim, cada célula representa uma diferente dificuldade em ser transposta, caracterizada por seus condicionantes ambientais.

Esse método está associado ao conceito de Resistência Mínima Acumulada (*Minimal Cumulative Resistance*, no original), ou RMA (WU e HOOBS, 2007), utilizada em estudos de ecologia de paisagem para representar resistências ao deslocamento entre diferentes áreas da paisagem. Nesse caso, o espaço

intermediário às relações de interação entre as células do sistema funciona como um campo de irregularidades que têm de ser superadas antes de permitir o crescimento urbano.

A mudança no tamanho relativo da célula, proporcional à RMA, influencia não só o valor final da distância entre dois pontos, mas também a própria forma do caminho preferencial entre eles. Ao invés de uma linha reta, esse caminho preferencial passa a assumir formatos mais sinuosos, dependendo das características do ambiente. Nesse caso, áreas de alta resistência tendem a ser evitadas em favor de áreas de menor resistência ou de atração à urbanização. Os efeitos da ponderação pelos fatores ambientais na acessibilidade estão demonstrados na figura 14, a seguir.

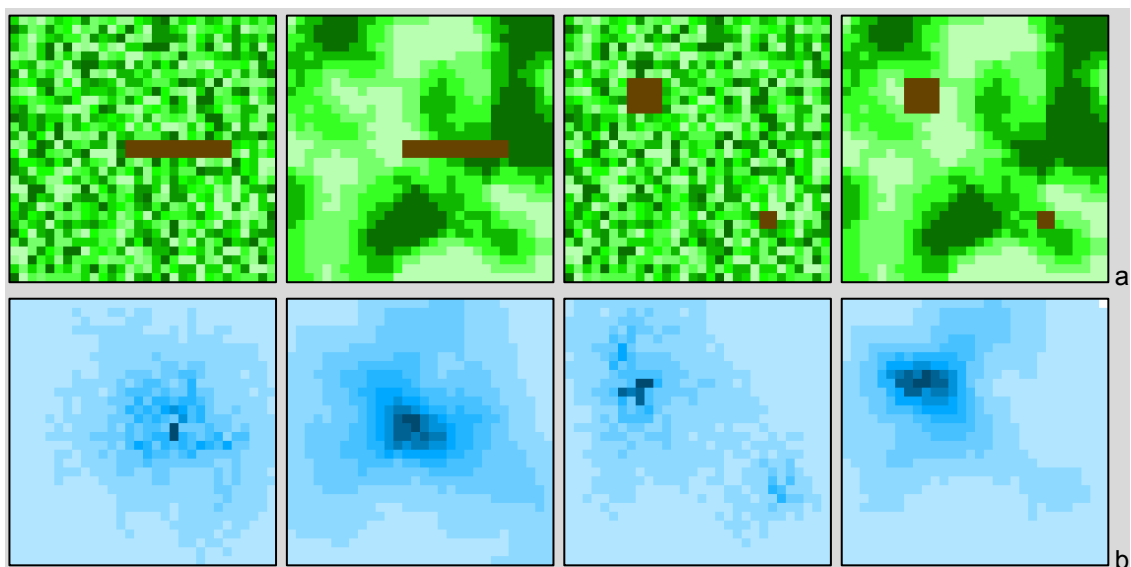


Figura 14 - Resultados da medida de acessibilidade celular ponderada pelos fatores ambientais: a) *grids* de entrada, com células urbanas em marrom e fundo em tons de verde representando diferentes intensidades de resistências naturais; b) *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

A ponderação a partir dos fatores antrópicos é feita a partir das características presentes no entorno urbano que são provenientes da ação humana. Esse tipo de ponderação consiste em reconhecer que a área do entorno da cidade apresenta indícios da presença humana desde antes da efetiva urbanização. Essas características podem influenciar a acessibilidade desses lugares e encontram-se em grupos distintos, como: a) sistema de transportes, em diferentes modais (rodoviário, hidroviário e ferroviário); b) presença de infraestrutura, além de sua qualidade; c) diferentes usos do solo, com áreas destinadas à atividades rurais ou industriais; d) aspectos culturais, como a percepção ambiental e os costumes e a memória locais.

Os fatores antrópicos são representados, no modelo, por atributos do tipo máscara definidos pelo operador. Esses atributos atuam como fatores de atração ou de resistência presentes nas células correspondentes. Neste trabalho, o parâmetro representado pelos fatores antrópicos será chamado de impedância.

A impedância pode ser regulada pelo usuário através de dois parâmetros: a impedância global (Ω) e a impedância local (ω). A impedância global age igualmente sobre todas as células pertencentes aos fatores antrópicos, enquanto a impedância local pode ser configurada individualmente para cada célula desse conjunto. Assim, a impedância local pode ser usada para valorar a intensidade da presença dos fatores antrópicos em diferentes áreas do *grid*, diferenciando, por exemplo, uma rodovia asfaltada de uma pequena estrada rural de saibro.

A impedância age como um fator multiplicador da peso da célula, portanto seu efeito é inverso: quanto menor o valor da impedância, menor a distância relativa a ser percorrida para transpor determinada célula e, portanto, maior sua acessibilidade. A tabela 1, a seguir, define os valores que podem ser assumidos pela impedância global (Ω) e pela impedância local (ω).

Tabela 1 – Espectro dos parâmetros de impedância global (Ω) e impedância local (ω).

Ω ω	significado
$\geq 0; < 1$	atração à urbanização
$= 1$	neutro
> 1	resistência à urbanização

Áreas onde estão ausentes fatores antrópicos possuem valor de impedância global e local igual a 1, anulando seu efeito nessas regiões do *grid*. O efeito da ponderação pelos fatores antrópicos sobre a acessibilidade é demonstrado a seguir, na figura 15. Neste exemplo, a ação humana é representada pelo sistema viário de acesso a cidade, onde quatro configurações são testadas: a) ausência de sistema viário; b) presença de uma rodovia em sentido horizontal, de impedância média ($\omega = 0,5$); c) presença de duas rodovias em formato de cruz, ambas de impedância média ($\omega = 0,5$); d) presença de duas rodovias em formato de cruz, sendo a área em cinza claro representando impedância média ($\omega = 0,5$) e a área em cinza mais escuro representando impedância mais baixa ($\omega = 0,2$).

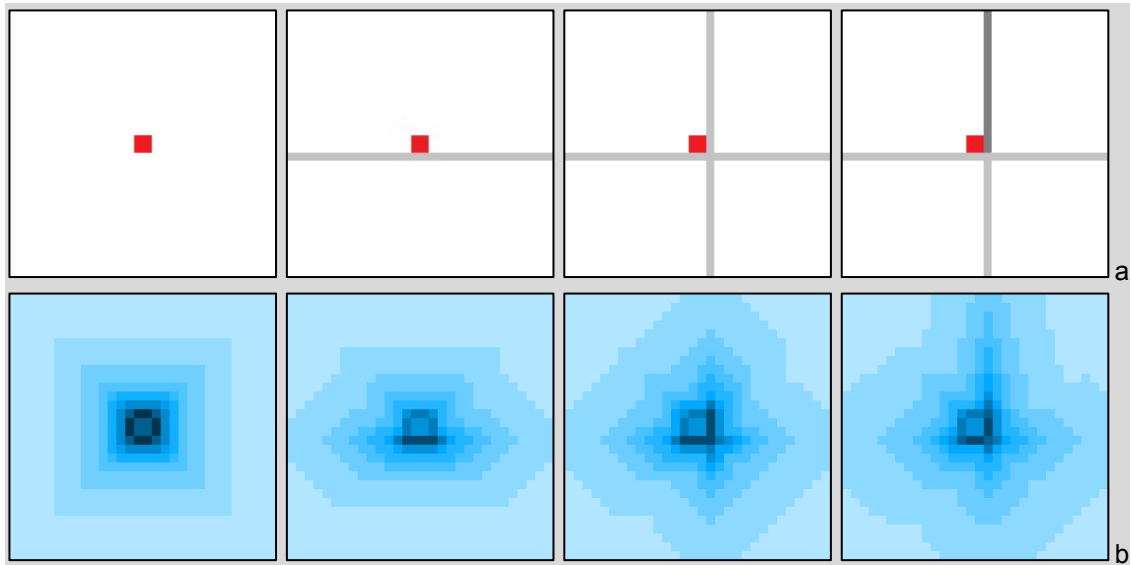


Figura 15 - Resultados da medida de acessibilidade celular ponderada por fatores antrópicos, representados pelo sistema viário: a) *grids* de entrada, com células urbanas em vermelho e diferentes configurações viárias em tons de cinza; b) *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

A partir dos resultados ilustrados nas figuras 14 e 15, é possível observar que a medida de acessibilidade celular proposta neste trabalho é capaz de capturar a estrutura do sistema, apresentando visíveis variações em resposta a mudanças na descrição ambiental. A medida tem resultados derivados da relação entre a cidade e o ambiente em seu entorno, tanto natural quanto modificado pelo homem. Diferentes combinações entre atributos de entrada geraram mudanças visíveis no padrão de distribuição da acessibilidade, representando um avanço na capacidade de descrição ambiental do modelo e na possibilidade de representação de sistemas urbanos reais.

A partir da definição de acessibilidade ponderada apresentadas, é possível detalhar a equação da acessibilidade celular para incluir esses conceitos. A distância entre duas células do *grid* é dada pela equação 2, a seguir:

Equação 2 – Distância entre as células i e j .

$$d_{ij} = \sum_{c \in C_{ij}} P_c$$

onde se lê:

A distância entre as células i e j é igual ao somatório dos pesos das células c pertencentes ao caminho preferencial entre i e j .

sendo:

d_{ij} : distância entre as células i e j .

P_c : peso da célula c .

C_{ij} : conjunto das células do caminho preferencial entre i e j .

A forma de cálculo do peso das células é variável, de acordo com a configuração escolhida pelo operador do modelo, podendo assumir uma das quatro variações descritas na equação 3, a seguir:

Equação 3 – Peso da célula c .

a) peso da célula c para acessibilidade topológica:

$$P_c = 1$$

b) peso da célula c para acessibilidade ponderada pelos fatores antrópicos:

$$P_c = \Omega \times \omega_c$$

c) peso da célula c para acessibilidade ponderada pelos fatores ambientais:

$$P_c = Env_c$$

d) peso da célula c para acessibilidade ponderada pelos fatores ambientais e antrópicos:

$$P_c = Env_c \times \Omega \times \omega_c$$

onde se lê:

- a) o peso da célula c é igual a 1.
- b) o peso da célula c é igual à *impedância global* multiplicada pela *impedância local* da célula c .
- c) o peso da célula c é igual à intensidade dos fatores ambientais da célula c .
- d) o peso da célula c é igual à intensidade dos fatores ambientais da célula c multiplicada pela *impedância global* e pela *impedância local* da célula c .

sendo:

P_c : peso da célula c .

Ω : impedância global.

ω_c : impedância local da célula c .

Env_c : intensidade dos fatores ambientais presentes na célula c .

Da forma como exposto neste item, a medida de acessibilidade celular resulta do relacionamento entre os ambientes urbano e natural, cumprindo o objetivo inicial de integrar os dois ambientes em uma única descrição espacial. Aqui, ela será usada como medida de diferenciação espacial, representando vantagens locais e funcionando como indutor do crescimento urbano.

3.3 O modelo de crescimento urbano

Como forma de facilitar a concepção do modelo, bem como a análise dos resultados, o procedimento proposto busca ser o mais simples possível. Deste modo, é possível compreender melhor o funcionamento do modelo e o papel de cada elemento na dinâmica do conjunto (MILLER e PAGE, 2007).

Para efeito de cálculo, o valor da acessibilidade celular é normalizado entre zero a 1, conforme procedimento indicado na equação 4, a seguir. A normalização é utilizada para compatibilização da medida de acessibilidade com a escala de valores utilizada na representação dos fatores aleatórios presentes no modelo, como será visto mais adiante, na equação 5.

Equação 4 - Acessibilidade celular relativa da célula i .

$$ACrel_i = \frac{AC_i}{ACmax}$$

onde se lê:

A acessibilidade celular relativa da célula i é igual à acessibilidade celular da célula i dividida pela máxima acessibilidade celular do sistema.

sendo:

$ACrel_i$: acessibilidade celular relativa da célula i .

AC_i : acessibilidade celular da célula i .

$ACmax$: acessibilidade celular máxima do *grid*.

O processo de simulação está feito considerando a associação entre alta acessibilidade e presença de vantagens locais. Assim, a medida de acessibilidade representa a probabilidade de conversão do solo de cada célula, ou seja, áreas de maior acessibilidade indicam locais onde é mais provável que ocorra a urbanização.

Juntamente com a acessibilidade, o cálculo do potencial de crescimento urbano no modelo inclui um componente aleatório, de modo a capturar parte das incertezas presentes no processo de crescimento urbano. Em um sistema absolutamente racional, as células de maior acessibilidade seriam as primeiras a serem convertidas em espaço urbanizado a cada iteração. O fator aleatório atua como uma forma simplificada de superar essa lógica totalmente determinística.

A relação entre os componentes determinístico e aleatório, no modelo, é dada pela equação 5, a seguir:

Equação 5 - Potencial de mudança de estado da célula i .

$$Potencial_i = (ACrel_i \times \alpha) + (Random \times \beta)$$

onde se lê:

O potencial de mudança de estado da célula i é igual ao produto da acessibilidade celular relativa da célula i e do coeficiente α (*alfa*), multiplicado pelo produto de um valor gerado aleatoriamente e do coeficiente β (*beta*).

sendo:

$Potencial_i$: Potencial de mudança de estado da célula i .

$ACrel_i$: Acessibilidade celular relativa da célula i .

$Random$: Valor entre zero e 1, gerado aleatoriamente.

α (*alfa*): grau de influência do fator determinístico.

β (*beta*): grau de influência do fator aleatório.

Dessa equação resulta a medida de potencial de mudança de estado celular, a partir da qual ocorre o crescimento urbano. A equação concilia um fator determinístico, representado pela medida de acessibilidade, e um fator aleatório, caracterizando o modelo como semi-determinístico. A influência da acessibilidade e do fator aleatório é ajustada pelo operador do modelo através dos coeficientes α (*alfa*) e β (*beta*), respectivamente. Ambos coeficientes são definidos como números reais variando

entre zero e 1. O valor zero para algum dos coeficientes anula o valor da sua variável de influência, enquanto o valor 1 mantém seu valor no máximo.

O último parâmetro definido pelo usuário do modelo é a taxa de crescimento. Essa taxa define o número de células que deverão passar do estado natural para o estado urbano ao fim de cada iteração, conformando o crescimento da cidade. Essas células são escolhidas conforme seu potencial de mudança de estado, definido na equação 5. Em casos em que a taxa de crescimento definida tenha sido insuficiente para gerar crescimento urbano em uma iteração, o sistema assume como valor mínimo a conversão de uma célula, mesmo que esse número represente uma taxa superior à informada pelo usuário.

Assim, o crescimento urbano, no modelo, se dá pela relação entre a taxa de crescimento externo, estipulada pelo usuário, e a probabilidade de crescimento de cada célula, calculada internamente pela lógica do modelo, funcionando como um caso de CA restringido (WHITE, ENGELEN e ULJEE, 1997).

O modelo gera três saídas (ou *outputs*) na forma de *grids*:

- a) Tipo de célula (*Cell Type*, no modelo): faz parte dos resultados padrão do *CityCell*, e indica se uma célula é urbana ou natural;
- b) Acessibilidade Celular Absoluta (*Absolute Accessibility*, no modelo): valor da acessibilidade celular, antes da normalização;
- c) Acessibilidade Celular Relativa (*Relative Accessibility*, no modelo): valor da acessibilidade celular relativa, normalizada entre zero e 1, para cada célula do sistema;

3.4 Avaliação dos resultados

A avaliação do modelo deverá ser obtida através de um processo de calibração, buscando aproximar os resultados das simulações aos casos reais em estudo. A calibração pode ser feita em relação a tempos pregressos, de modo a permitir a comparação dos resultados com os dados históricos do crescimento urbano da área de estudo. Para atingir o objetivo da validação, é necessário selecionar os métodos de avaliação de resultados, de modo a escolher as simulações que mais se aproximam da realidade entre as realizadas.

O primeiro nível de aproximação de resultados entre simulação e realidade é visual, quando são eliminadas regulagens discrepantes e é selecionado um conjunto novo de regulagens que se aproximem mais do resultado desejado. Além disso, a análise visual é importante por representar uma avaliação qualitativa dos resultados, permitindo depreender padrões referentes à morfologia urbana decorrentes do processo de crescimento urbano, bem como semelhanças gerais entre a simulação e fenômenos encontrados na realidade. Apesar de parecer mais simples em

comparação a métodos matemáticos, a análise visual permite encontrar padrões e semelhanças muitas vezes impossíveis de detectar com o uso de algoritmos automatizados.

Após a análise visual dos resultados, são buscados métodos quantitativos que permitam a aferição do grau de concordância entre dois mapas (o real e o simulado) e a comparação entre as diferentes regulagens permitidas pelo modelo. As medidas utilizadas neste trabalho encontram-se no grupo das avaliações célula por célula e das avaliações por semelhança difusa (*fuzzy*). Os métodos utilizados serão descritos a seguir, adaptados de Hagen (2002) e Visser e de Nijs (2006).

3.4.1 Avaliação célula a célula

Esse tipo de avaliação consiste em uma análise mais exata dos resultados das simulações, comparando-os diretamente com estados de controle e medindo sua consistência.

Neste grupo, a primeira medida é o percentual de concordância (*percent of agreement*, $P(A)$) entre dois mapas, também conhecida como exatidão global. Neste método, cada célula do mapa simulado é comparada com a célula localizada na mesma posição em um mapa de controle, representando um estado da cidade real, de modo a computar acertos e erros. O percentual de concordância é dado pela equação 6, a seguir.

Equação 6 - Percentual de concordância entre dois mapas.

$$P(A) = \frac{p_c}{p_t}$$

onde se lê:

O percentual de concordância entre dois *grids* é igual quantidade de células coincidentes nos dois *grids* dividida pela quantidade total de células nos dois *grids*.

sendo:

$P(A)$: percentual de concordância.

p_c : contagem de células coincidentes nos dois *grids*.

p_t : contagem do total de células.

O percentual de concordância pode ser obtido para o mapa como um todo ou por áreas específicas do *grid*. Neste trabalho, também será utilizada a medida de percentual de concordância descontando as áreas não urbanizadas da cidade simulada e da cidade real, bem como as áreas já urbanizadas ao início da simulação e que, pelas características do modelo, não podem mudar de estado. Essa medida será referenciada por $P(A_{urb})$.

Além dos valores numéricos, um resultado gráfico também pode ser derivado dos percentuais de concordância. A figura 16, a seguir, ilustra um mapa representando a cidade real (figura 16a), a cidade simulada ligeiramente deslocada à direita e acima

(figura 16b) e a comparação entre elas (figura 16c). O mapa da comparação mostra, em marrom, as áreas urbanizadas em ambos os mapas, e, em vermelho, as áreas que representam células que são urbanas em um dos mapas e naturais no outro.

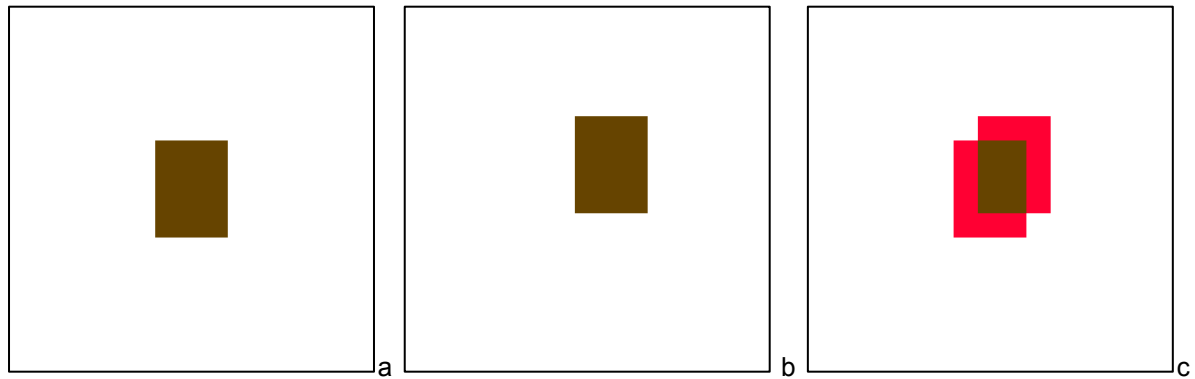


Figura 16 - Resultado visual da avaliação de concordância entre mapas. a) mapa da cidade real; b) mapa da cidade simulada; c) mapa do resultado da avaliação, mostrando em marrom as áreas urbanas dos dois mapas, e em vermelho as áreas de discordância.

No caso representado acima, $P(A) = 94,7\%$ e $P(A_{urb}) = 33,3\%$. O alto percentual de concordância deve-se, em parte, pela presença elevada de células naturais no entorno da área urbanizada. Essas células, muitas vezes, não são afetadas pelas simulações e podem incluir áreas bastante afastadas dos núcleos urbanos. Assim, $P(A_{urb})$ parece ser uma medida mais real do desempenho do modelo, apesar de ser bastante exigente quanto à exatidão dos resultados.

Um avanço em relação ao percentual de concordância é a medida Kappa, desenvolvida por Cohen (1960) primeiramente para uso em comparação de dados tabulares, sendo posteriormente empregada na avaliação de dados espacializados. Cohen percebeu que, entre dois conjuntos de dados, parte considerável das concordâncias poderiam ser explicados por simples coincidência aleatória. A partir dessa premissa, desenvolveu um método para descontar esse percentual aleatório do resultado final.

O cálculo da medida Kappa é feito considerando, além do percentual de concordância, um percentual de concordância esperado (ou $P(E)$), conforme equação 7, a seguir.

Equação 7 - Percentual de concordância esperado.

$$P(E) = P_u + P_n$$

onde se lê:

O percentual de concordância esperado é igual à soma das probabilidades de concordância aleatória entre células urbanas e células naturais.

sendo:

$P(E)$: percentual de concordância esperado.

P_u : probabilidade de concordância aleatória entre células urbanas.

P_n : probabilidade de concordância aleatória entre células naturais.

Com os dois percentuais de concordância, é obtida a estatística Kappa, conforme a equação 8, a seguir:

Equação 8 – Estatística Kappa.

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

onde se lê:

O valor de Kappa é igual ao percentual de concordância menos o percentual de concordância esperado, dividido por 1 menos o percentual de concordância esperado.

sendo:

$P(A)$: percentual de concordância.

$P(E)$: percentual de concordância esperado.

O desconto da aleatoriedade de concordância da estatística implica que valores de Kappa menores que zero significam que o resultado observado é pior que o resultado que seria esperado de um modelo totalmente aleatório. A estatística Kappa é mais bem utilizada na comparação entre diversos cenários, pois os valores absolutos podem variar consideravelmente de acordo com a natureza dos dados de entrada.

3.4.2 Avaliação por semelhança difusa (*fuzzy*)

As medidas de avaliação célula por célula constituem importantes ferramentas de aferição do grau de correspondência entre dois mapas. Porém, esse tipo de avaliação pode levar a erros de interpretação, visto que mapas muito diferentes entre si podem gerar percentuais de concordância idênticos. Um exemplo dessa discrepância pode ser visto na figura 17, a seguir.

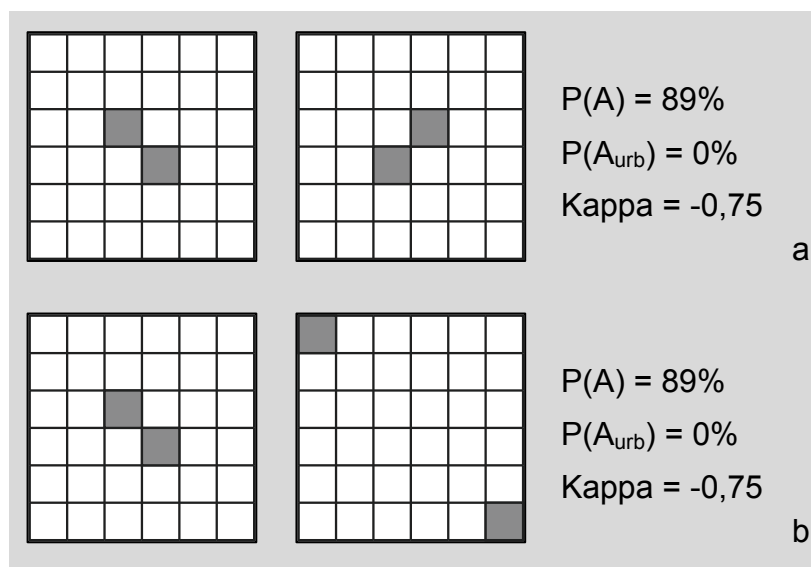


Figura 17 – Exemplo de comparação entre dois mapas, com células urbanas representadas em cinza e células naturais representadas em branco, identificando limitações das técnicas de comparação célula por célula. a) mapas semelhantes visualmente; b) mapas muito diferentes visualmente.

A figura 17a mostra dois mapas visualmente semelhantes entre si. As células não estão na posição correta, porém estão muito próximas desta localização. Neste caso, o $P(A)$ ainda é muito alto (89%), devido a predominância das células não urbanas (representadas em branco). Porém, o percentual de concordância para as células urbanas (representadas em cinza) é zero, pois, apesar da proximidade, as células não coincidem. No caso da figura 17b, os resultados numéricos são exatamente os mesmos, ainda que, visualmente, a discrepância entre os mapas seja muito maior que no caso anterior. O tipo de semelhança visto na figura 17a simplesmente não é identificado pelos métodos descritos anteriormente.

Em modelagem urbana, é mais importante que os modelos sejam capazes de identificar padrões gerais na estrutura do objeto de estudo do que acertar detalhes em pequena escala. Assim, é importante que as técnicas de avaliação sejam capazes de identificar situações de quase-acerto, diferenciando os erros por sua relevância. Por isso, são úteis técnicas de avaliação por semelhança difusa (fuzzy), que partem do conceito de que a representação de uma célula é também influenciada pela sua vizinhança.

A semelhança difusa pode ser medida pelo percentual de concordância difusa (de *diffuse percent of agreement*, $DP(A)$), que também pode ser medido considerando todas as células do *grid* ou apenas as células urbanas, descontando as células já urbanizadas ao início da simulação ($DP(A_{urb})$, neste caso). Assim, o grau de concordância de cada célula varia conforme a distância até a célula de mesmo tipo mais próxima (equação 9).

Equação 9 – Grau de concordância da célula i .

$$G(i) = \frac{1}{d_{ij}}$$

onde se lê:

O grau de concordância da célula i é igual ao inverso da distância entre a célula i e a célula do mesmo tipo de i mais próxima.

sendo:

$G(i)$: grau de concordância da célula i .

d_{ij} : distância entre as células i e j , sendo j a célula mais próxima de mesmo tipo de i .

Com os graus de concordância calculados para cada célula, o percentual de concordância difuso agregado do *grid* é calculado (equação 10).

Equação 10 - Percentual de concordância difuso entre dois *grids*.

$$DP(A) = \frac{\sum G(i)}{p_t}$$

onde se lê:

O percentual de concordância difuso entre dois *grids* é igual ao somatório dos graus de concordância de todas as células *i* pertencentes ao *grid*, dividido pela contagem do total de células do *grid*.

sendo:

$DP(A)$: percentual de concordância difuso.

$G(i)$: grau de concordância da célula *i*.

p_t : contagem do total de células.

A avaliação de concordância difusa pode ser calculada considerando raios máximos de abrangência, delimitando um ponto de corte a partir do qual é atribuído grau de concordância zero para a célula. Considerando o cenário hipotético da figura 16, com a cidade real representada pela figura 16a e a cidade simulada representada pela figura 16b, os resultados visuais da avaliação de concordância difusa até raio 2 pode ser vista na figura 18, a seguir.

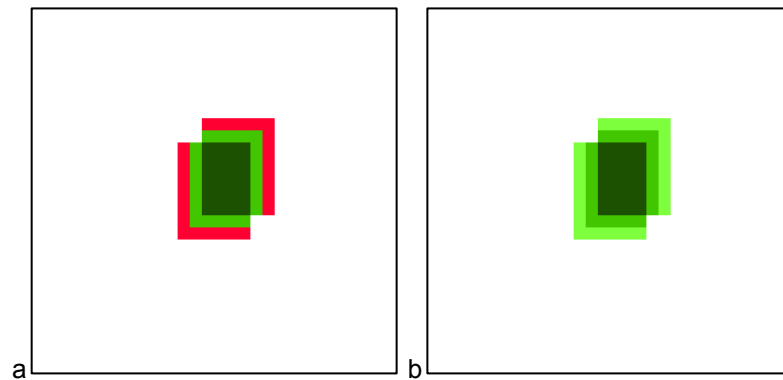


Figura 18 - Resultado visual da avaliação de concordância difusa entre *grids*, considerando apenas células urbanas. a) concordância difusa raio 1, com células além do raio de abrangência marcadas em vermelho e graus de concordância em tons de verde; b) concordância difusa raio 2, com graus de concordância em tons de verde, e nenhuma célula além do raio de abrangência.

Em relação aos valores agregados, o percentual de concordância passou de 94,7% para 95,9% e para 96,8%, nas avaliações de raio 1 e raio 2, respectivamente. Já os percentuais de concordância para as células urbanas apresentou ganhos mais significativos, passando de 33,3% para 48,6% e 60,6%, também nas avaliações de raio 1 e raio 2.

Além dos resultados gráficos e numéricos, a avaliação dos histogramas extraídos a partir dos *grids* também pode ser utilizada para verificar o melhor resultado entre vários cenários. Os histogramas referentes às avaliações apresentadas na figura 18 podem ser vistos a seguir, no gráfico 1.

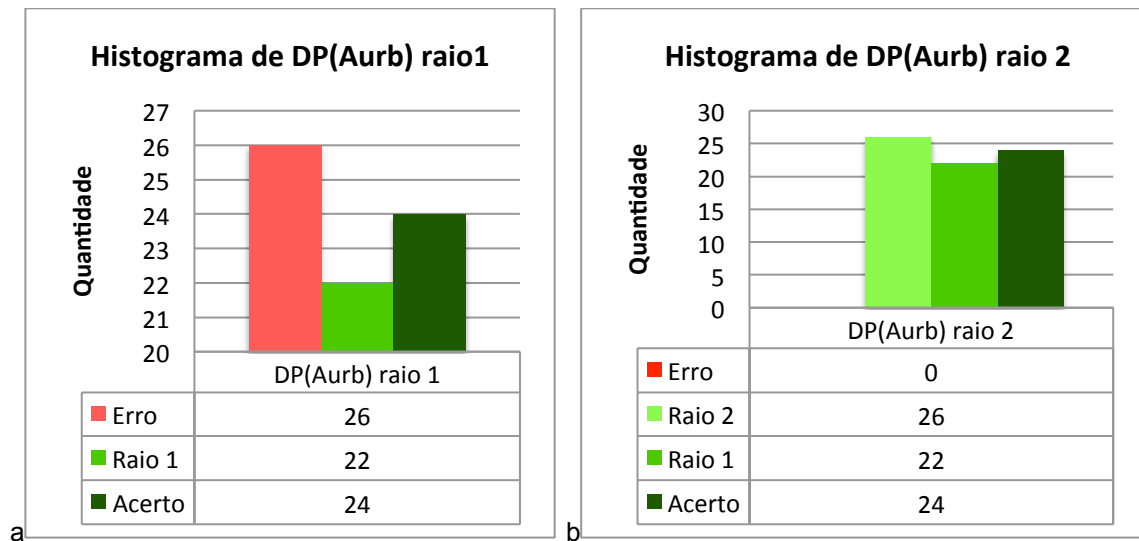


Gráfico 1 – Histogramas das avaliações de semelhança difusa. a) percentual de concordância difusa de raio 1; b) percentual de concordância difusa de raio 2.

Os métodos de avaliação apresentados serão utilizados nos estudos de caso do próximo capítulo com o objetivo de legitimar o modelo, através da comparação entre os resultados obtidos através das simulações e dados reais da evolução urbana dos estudos de caso selecionados.

4 Estudos de Caso

Neste capítulo, estão apresentados dois experimentos realizados com o objetivo de validar o modelo proposto. Foram escolhidas as cidades de Jaguarão e de Bagé, ambas localizadas na região de fronteira entre o estado do Rio Grande do Sul e o Uruguai. As análises estão feitas segundo as técnicas de avaliação apresentadas no capítulo anterior, buscando a calibração do modelo, ou seja, a aproximação entre o processo de simulação e o crescimento urbano real verificado nessas cidades. Por fim, são feitas considerações a respeito do modelo e indicações de avanços para a continuidade do trabalho.

4.1 O caso de Jaguarão / RS

A cidade de Jaguarão está localizada ao sul do estado do Rio Grande do Sul, às margens do rio Jaguarão e na divisa com o Uruguai, conforme figura 19. Jaguarão é uma cidade de pequeno porte, com uma população de 27.931 habitantes segundo dados do censo de 2010 (IBGE, 2010).



Figura 19 - Localização da cidade de Jaguarão no Rio Grande do Sul e no Brasil.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Jaguarão>.

Para os trabalhos de simulação de crescimento urbano, a área de estudo foi definida de modo a englobar a área urbanizada no ano de 2009, delimitada em ambiente SIG com base em imagem do satélite QuickBird, acrescida de uma área de entorno. Esta área de entorno é recomendada devido à possibilidade de mal-funcionamento dos modelos urbanos nos limites físicos das áreas de estudo, onde os resultados podem apresentar-se menos significativos do que em áreas mais afastadas da borda (REIF, 1978). O resultado é uma área retangular delimitada pelas seguintes coordenadas geográficas, em UTM, para o fuso 22 sul: a) limite norte: 6.398.800; b) limite sul: 6.392.800; c) limite oeste: 273.000; d) limite leste: 281.000. Esta área foi dividida em

células quadradas de 200 metros de lado, compondo um *grid* celular de 1200 células, sendo 40 células no sentido leste-oeste e 30 células no sentido norte-sul. A área abrange uma superfície total de 48 km². Essas informações aparecem na figura 20, a seguir:

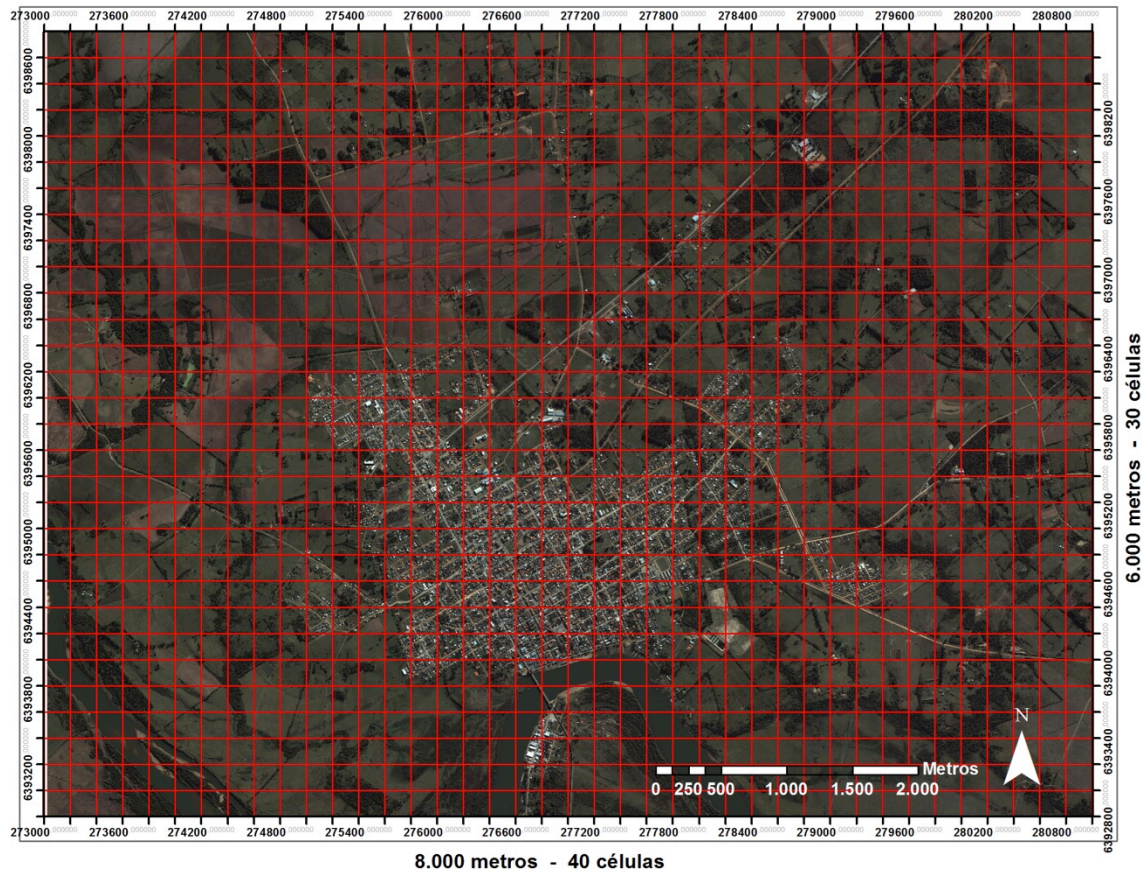


Figura 20 - Área de estudo delimitada para a cidade de Jaguarão.
Fonte: mapa elaborado pelo autor, sobre imagem de satélite QuickBird.

O processo de calibração parte da eleição de dois estados passados da área de estudos, escolhidos pela disponibilidade de dados referentes à evolução urbana da cidade em questão. Para o caso de Jaguarão, o estado inicial corresponde à área efetivamente urbanizada de 1947, obtida a partir de dados disponíveis na Prefeitura Municipal. O estado final corresponde à área efetivamente urbanizada de 2009, desenhada sobre imagem de satélite QuickBird. Os dois estados estão indicados na figura 21. A área urbanizada de 1947 é composta por 84 células, enquanto a área urbanizada de 2009 corresponde a 201 células. Assim, nesse período de 62 anos, a superfície ocupada pela cidade aumentou 239%, o que corresponde a uma taxa média de crescimento anual de 1,4%.

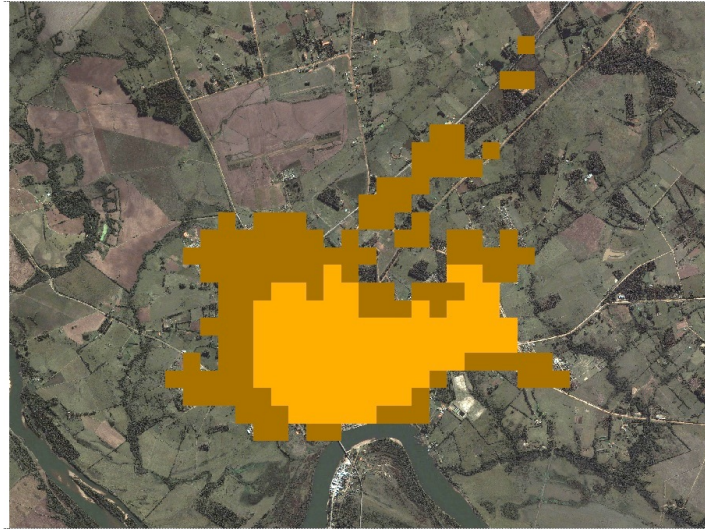


Figura 21 - Área efetivamente urbanizada de Jaguarão em 1947 (marrom claro, 84 células) e 2009 (marrom escuro, 201 células).

Após a definição da área de estudo e dos cenários de controle, foram construídos os atributos de entrada (ou *inputs*) do modelo. De modo a simplificar a descrição ambiental, serão utilizados atributos de apenas três tipos, selecionados a partir das combinações disponíveis no *CityCell*: a) atributos urbanos que geram atração à urbanização; b) atributos naturais que geram resistência à urbanização; c) atributos do tipo máscara, representando os fatores antrópicos do entorno da área urbanizada.

Esses atributos estão ilustrados na figura 22, a seguir, e descritos na sequência.

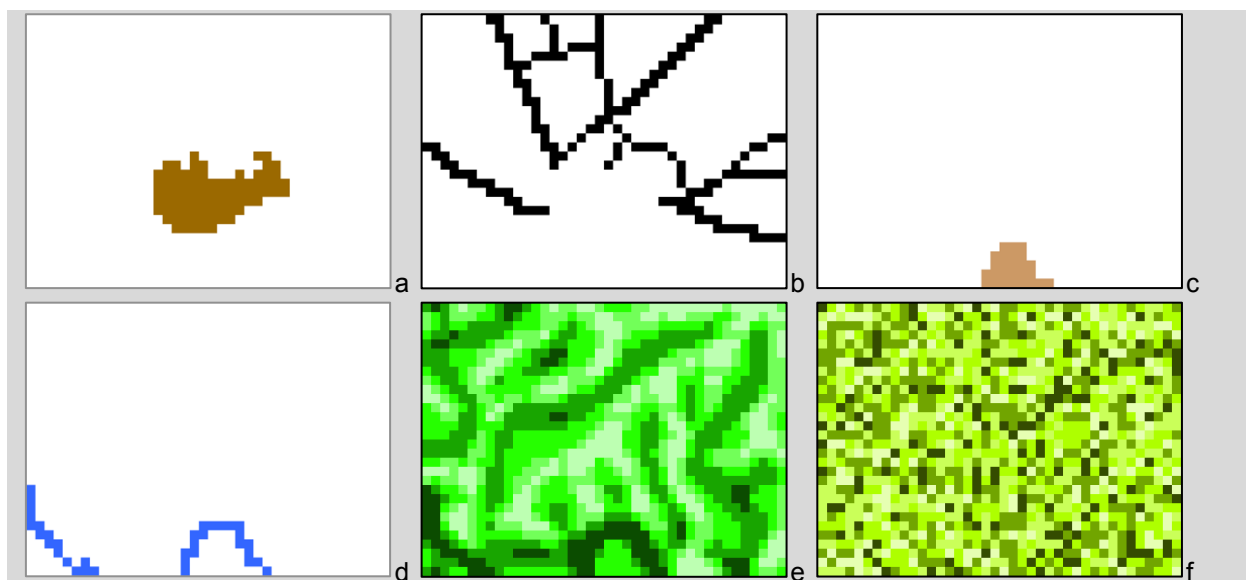


Figura 22 - Atributos de entrada para as simulações de Jaguarão.

- a) núcleo urbano de 1947 (atributo urbano, atração, figura 22a): representa a área efetivamente urbanizada de Jaguarão/RS no ano de 1947, com peso 1,0;

- b) sistema viário (atributo máscara, figura 22b): representa as estradas municipais de acesso à zona rural e a rodovia BR-116;
- c) município de Rio Branco/Uruguai (atributo urbano, atração, *freezing*, figura 22c): representa a área pertencente ao município de Rio Branco, no Uruguai, com peso zero e marcada como *freezing* para impedir a urbanização de áreas não pertencentes ao município de Jaguarão;
- d) rio Jaguarão (atributo natural, resistência, *freezing*, figura 22d): representa a área ocupada pelo rio Jaguarão, com peso zero e marcada como *freezing* para impedir a urbanização sobre o rio;
- e) hidrografia (atributo natural, resistência, figura 22e): consiste de um *grid* de resistências naturais construído com base nas sub-bacias hidrográficas da área de estudo, diferenciado em cinco classes por interpolação entre as linhas de drenagem, onde situam-se as maiores resistências, e os divisores de águas, onde a urbanização é facilitada, com peso 0,7;
- f) *grid* randômico (atributo natural, resistência, figura 22f): consiste de um *grid* de resistências naturais dividido em cinco classes, distribuídas aleatoriamente, como forma de introduzir irregularidades na descrição ambiental, com peso 0,3.

O principal fator de descrição do ambiente natural a ser utilizado nas simulações deste trabalho é o *grid* derivado da hidrografia (figura 22e). Este atributo foi escolhido devido à característica das bacias hidrográficas de sintetizar informações ambientais e de sua capacidade de permanência ao longo do tempo. Além disso, a topografia e os recursos hídricos têm demonstrado influência ativa na conformação urbana das cidades da região, de tradição urbanística tipicamente portuguesa. Nestas cidades, é comum, por exemplo, o traçado de ruas principais sobre os divisores de águas e ruas secundárias seguindo linhas de maior declividade (YUNES, 1995), além de coincidências morfológicas entre as áreas urbanas e os recursos hídricos e da existência de movimentos de compactação e fragmentação da forma urbana condicionados pelas bacias e sub-bacias hidrográficas (PERES, 2010).

Os fatores antrópicos presentes no entorno da cidade são representados, nos estudos de caso realizados neste trabalho, pelo sistema viário de acesso à zona rural e a outros municípios. Foi escolhido o sistema rodoviário pela sua maior importância, no espaço e tempo abordados nesta pesquisa, em relação aos modais hidroviário e ferroviário. A influência do sistema de circulação e transporte é reconhecida tanto em relação à morfologia urbana, na conformação histórica das

idades (BENEVOLO, 1983; PANERAI, 2006), quanto em modelagem urbana desde os primeiros modelos urbanos de Von Thünen (CARR, 1997).

Além dos atributos escolhidos para a realização dos estudos de caso neste trabalho, podem ser testadas outras formas de descrição espacial. O *CityCell* possui um sistema aberto de descrição ambiental, permitindo que quaisquer dados espaciais disponíveis sejam inseridos nas simulações. Assim, testes com informações mais detalhadas são possíveis, desde que haja disponibilidade de informações de levantamento.

Os testes de calibração para o caso de Jaguarão estão realizados conforme quatro cenários: a) cenário 1 – acessibilidade topológica; b) cenário 2 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos; c) cenário 3 – acessibilidade ponderada por fatores ambientais; d) cenário 4 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos e ambientais.

Para cada um desses cenários foi executada uma série de simulações, com variações nos parâmetros buscando aproximações sucessivas ao cenário de controle. Os parâmetros utilizados foram: a) coeficiente determinístico (α), variando de zero a 1; b) coeficiente aleatório (β), variando de zero a 1; c) impedância global (Ω), nos cenários em que fatores antrópicos são considerados, variando de 0,1 a 0,9. Os limites da impedância global foram definidos pelos seguintes motivos: a) o limite inferior deve ser superior a zero, caso contrário o peso da célula também será zero e, conseqüentemente, a acessibilidade tenderá ao infinito; b) o limite superior foi definido abaixo de 1, caso contrário o valor da impedância não terá efeito sobre o peso da célula; c) valores superiores a 1 não foram considerados pois implicariam em resistências à urbanização, o que não é o caso do sistema viário. Finalmente, o parâmetro impedância local (ω) não foi utilizado, simplificando a descrição dos fatores antrópicos.

A taxa de crescimento por iteração foi fixada em 2,8% em todas as simulações, sendo cada iteração simulada correspondente a, aproximadamente, dois anos de crescimento espacial da cidade real. O melhor resultado para cada cenário será apresentado a seguir. Ao final, será apresentada a análise comparada entre os resultados dos diferentes cenários.

Cenário Jaguarão.1 – Acessibilidade topológica

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$.

O primeiro cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade topológica, sem a influência do sistema viário ou do ambiente natural. Um resumo dos atributos de entrada é apresentado na tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.1.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1947	urbano / atração
município de Rio Branco	urbano / <i>freezing</i>
rio Jaguarão	natural / <i>freezing</i>

Os resultados gráficos (ou *outputs*) de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados a seguir, na figura 23.

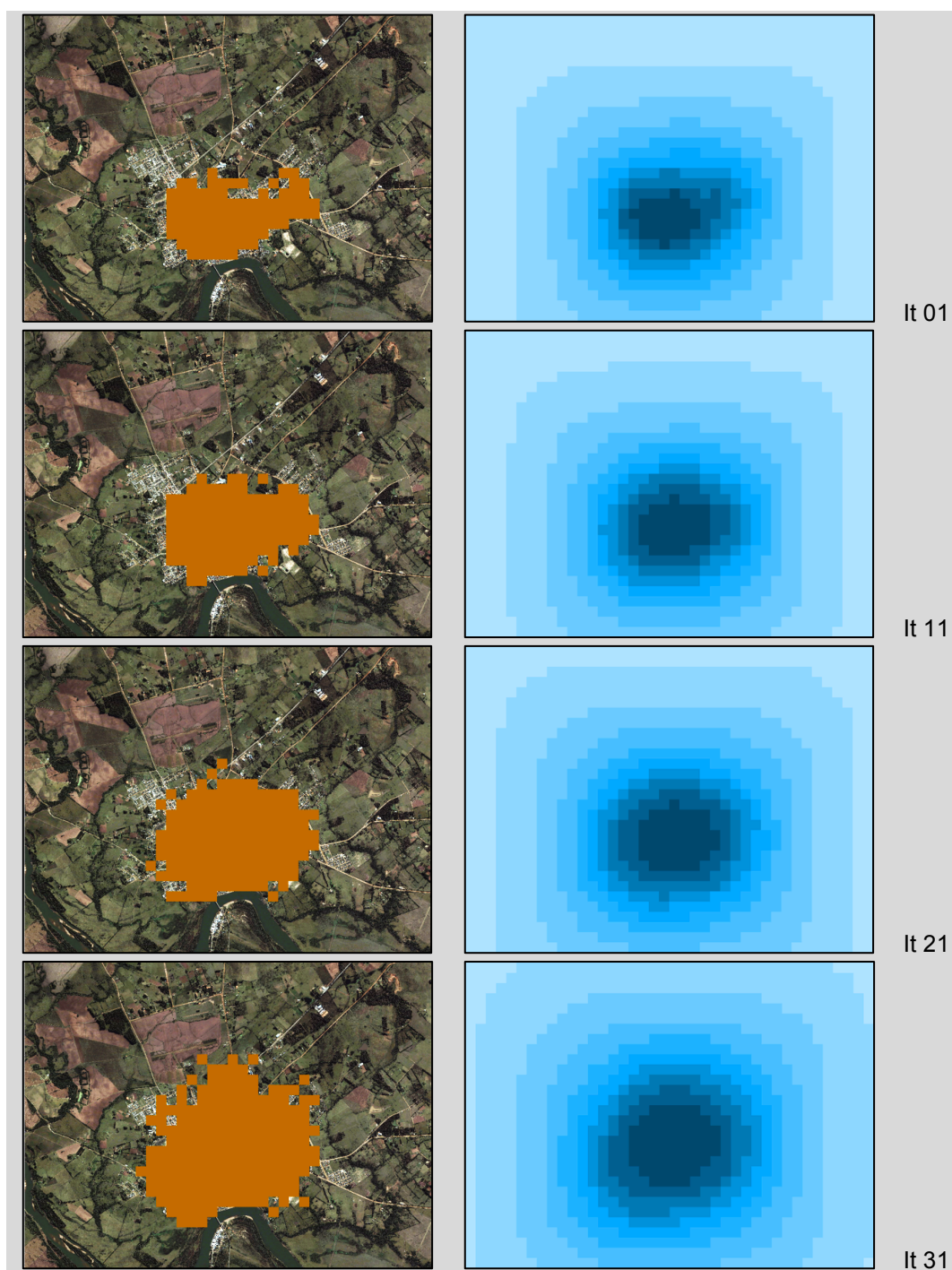


Figura 23 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.1, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

Esse cenário representa um ambiente de crescimento urbano praticamente livre de restrições, onde as escolhas de localização se dão basicamente em função da distância de cada célula ao centro urbano. Essa tendência pode ser observada no *output* da acessibilidade relativa, que apresenta uma forte concentração em torno do núcleo urbano e um enfraquecimento gradual em direção às bordas da área de estudo. O resultado é uma área urbanizada que evolui para uma área circular, que não é alcançada devido a três motivos principais: a) crescimento urbano insuficiente; b) presença do fator aleatório, que age no sentido de formar bordas urbanas fragmentadas, apesar de não evitar a compactação do centro; c) as restrições exógenas representadas pelo rio Jaguarão e pelo município de Rio Branco.

Cenário Jaguarão.2 – Acessibilidade ponderada pelos fatores antrópicos

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$; $\Omega = 0,5$.

O segundo cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade ponderada apenas pelos fatores antrópicos, representados pelo sistema viário. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.2.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1947	urbano / atração
sistema viário	máscara
município de Rio Branco	urbano / <i>freezing</i>
rio Jaguarão	natural / <i>freezing</i>

Os resultados gráficos para os *outputs* de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados na figura 24, na página seguinte.

Neste cenário, a forma urbana ainda apresenta-se compacta ao centro e ligeiramente fragmentada nas bordas, pela atuação do fator aleatório. A tendência à formação de uma cidade circular é quebrada pela influência dos eixos viários, que determinam um desenvolvimento maior em direção a leste.

A atuação do sistema viário é observada na distribuição da medida de acessibilidade. Se anteriormente o resultado era uma formação de círculos concêntricos, agora as acessibilidades mais altas também se distribuem ao longo dos eixos viários, alcançando áreas mais afastadas do centro urbano e formando um padrão misto de concêntrico e axial.

O melhor resultado, neste cenário, foi obtido com um valor intermediário de impedância global ($\Omega = 0,5$), sendo que testes com valores menores de impedância geraram excessivo desenvolvimento urbano ao longo dos eixos viários. Esses estudos indicam que somente a atuação do sistema viário não é suficiente para explicar a forma urbana de Jaguarão.

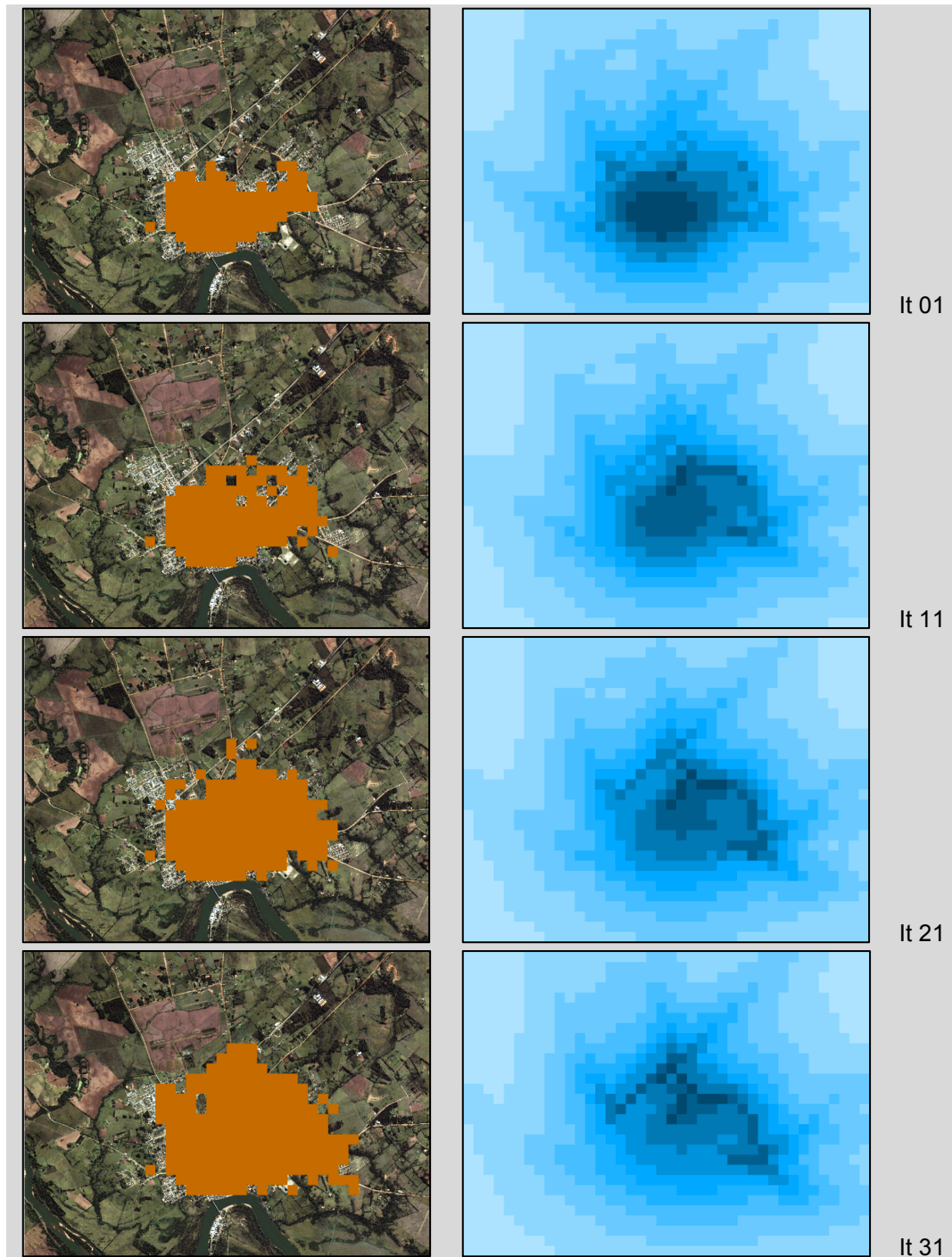


Figura 24 – Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.2, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

Cenário Jaguarão.3 – Acessibilidade ponderada pelos fatores ambientais

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$.

O terceiro cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade ponderada apenas pelos fatores ambientais. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 4, a seguir.

Tabela 4 - Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.3.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1947	urbano / atração
município de Rio Branco	urbano / <i>freezing</i>
rio Jaguarão	natural / <i>freezing</i>
hidrografia	natural / resistência
randômico	natural / resistência

A seguir, estão os *outputs* de tipo de célula e acessibilidade relativa (figura 25).

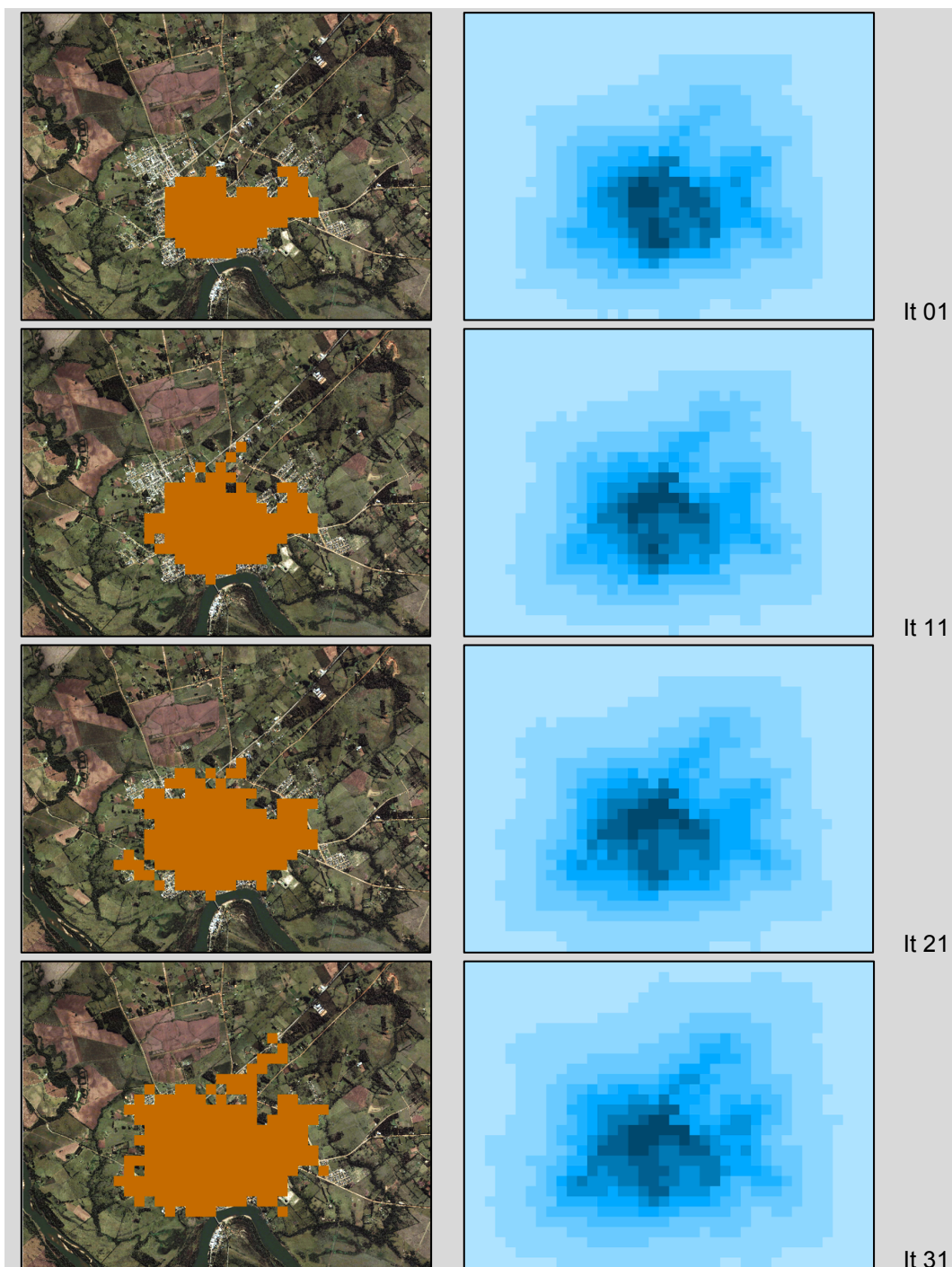


Figura 25 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.3, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

Neste caso, a semelhança visual entre o resultado da simulação e o cenário de controle é maior em comparação aos casos anteriores. A forma urbana circular e compacta é diminuída neste cenário. O padrão formado pela acessibilidade relativa apresenta-se mais complexo que nos casos anteriores, acompanhando as irregularidades do ambiente natural.

Essas observações sugerem que o ambiente natural do entorno da área urbana de Jaguarão exerceu um papel importante no crescimento da cidade durante o período deste estudo.

Cenário Jaguarão.4 – Acessibilidade ponderada por fatores antrópicos e ambientais
melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$; $\Omega = 0,5$.

O quarto cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade ponderada simultaneamente por fatores antrópicos e ambientais. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 5, a seguir.

Tabela 5 - Atributos de entrada para o cenário Jaguarão.4.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1947	urbano / atração
sistema viário	máscara
município de Rio Branco	urbano / <i>freezing</i>
rio Jaguarão	natural / <i>freezing</i>
hidrografia	natural / resistência
randômico	natural / resistência

Os melhores resultados das simulações neste cenário, assim como nos cenários anteriores, foram obtidos com os parâmetros determinístico e probabilístico em equilíbrio, ou seja $\alpha = 1$ e $\beta = 1$, respectivamente. Além disso, a impedância global foi configurada em $\Omega = 0,5$. Os resultados gráficos para os *outputs* de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados na figura 26, na página seguinte.

Neste último cenário, os resultados obtidos são visualmente semelhantes aos do cenário anterior. Porém, com a influência do sistema viário, houve uma tendência ligeiramente maior de desenvolvimento ao longo dos eixos viários. O *output* da acessibilidade registrou essa influência com maior detalhe, combinando o padrão complexo derivado do ambiente natural com o padrão axial derivado do sistema viário. Todavia, o valor intermediário de impedância ($\Omega = 0,5$) sugere pouca influência do sistema viário na conformação urbana de Jaguarão, já que as simulações com impedâncias menores apresentaram excessivo desenvolvimento axial e foram descartadas.

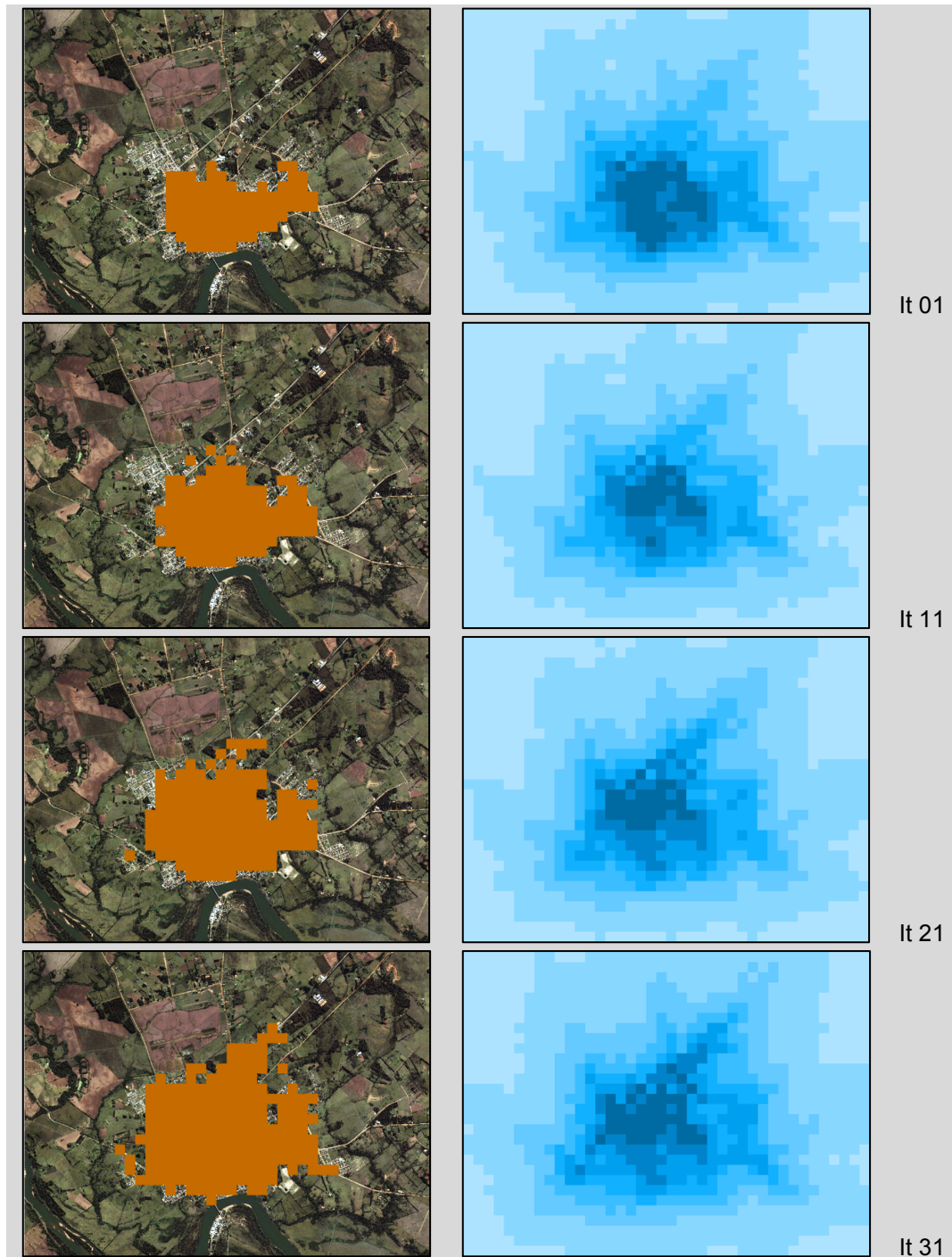


Figura 26 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Jaguarão.4, representados pelas iterações 1, 11, 21 e 31. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

4.1.1 Análise comparada entre os quatro cenários

Para a análise comparada entre os quatro cenários, foram utilizadas as técnicas de comparação de mapas indicadas no capítulo anterior. O cenário de controle corresponde à área efetivamente urbanizada de Jaguarão no ano de 2009 (figura 27.) Os estados finais de cada cenário estão representados pelo *output* tipo de célula e pelos mapas de concordância e concordância difusa de raio 1 (figura 28).



Figura 27 - Área efetivamente urbanizada de Jaguarão no ano de 2009.

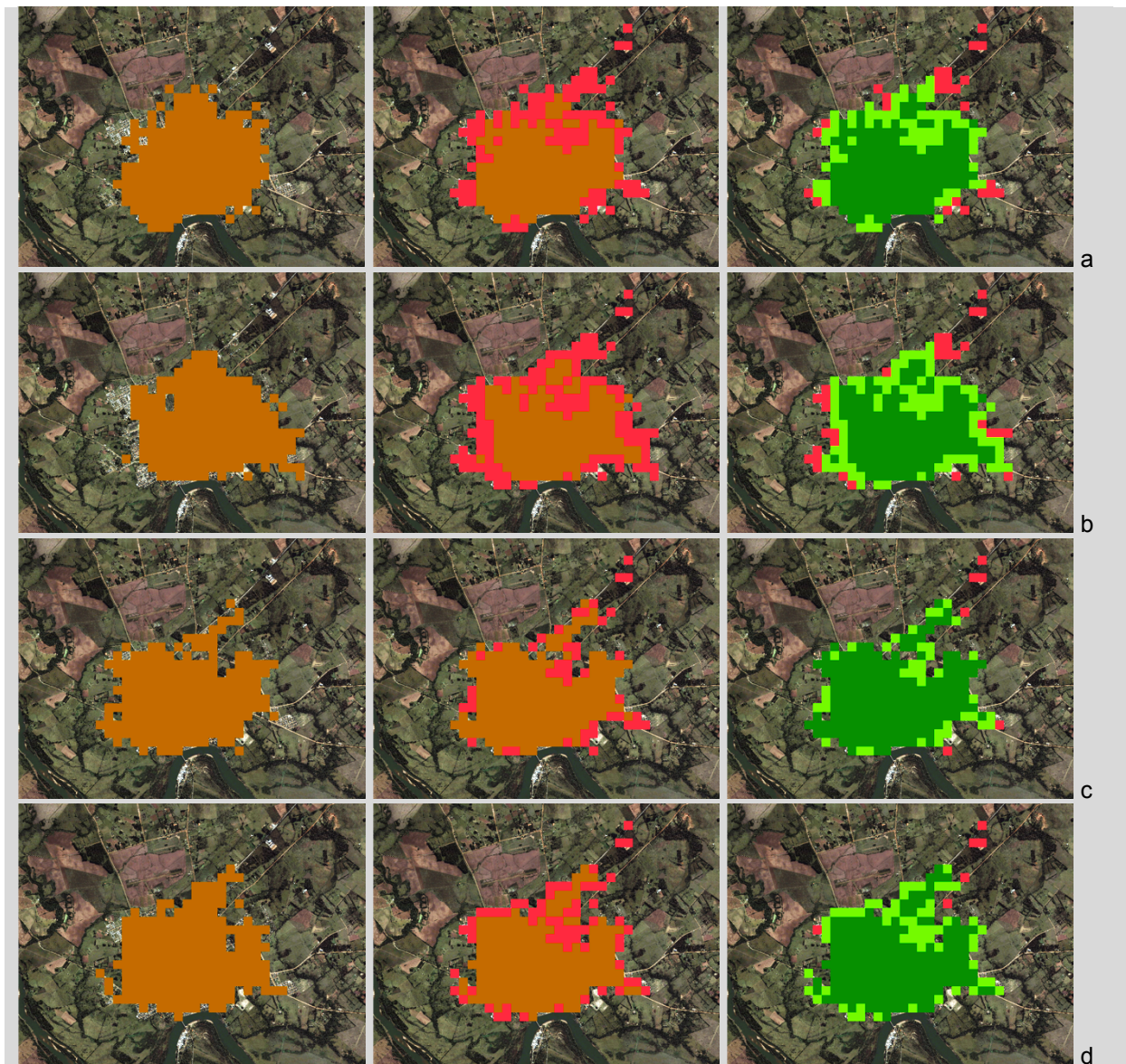


Figura 28 – *Outputs* tipo de célula, em marrom; mapa de concordância, com células coincidentes em marrom e discrepantes em vermelho; mapa de concordância difusa de raio 1, com células coincidentes em verde escuro, coincidência raio 1 em verde claro e discrepância em vermelho. Quatro cenários simulados de Jaguarão: a) cenário 1 – acessibilidade topológica; b) cenário 2 – acessibilidade ponderada pelos fatores antrópicos; c) cenário 3 – acessibilidade ponderada pelos fatores ambientais; d) cenário 4 – acessibilidade ponderada pelos fatores antrópicos e ambientais.

Os melhores resultados aparecem nos cenários 3 e 4, ambos com a influência do ambiente natural. No caso do *output* tipo de célula, é possível identificar visualmente mais semelhanças morfológicas entre simulação e realidade nos cenários 3 e 4 do que nos cenários 1 e 2. Os mapas de concordância e concordância difusa de raio 1 também mostram essa superioridade através da presença significativamente menor de células vermelhas nos *grids*. Os histogramas de frequência para o mapa de concordância difusa raio 1 (gráfico 2) demonstram a maior presença de células coincidentes ou a uma célula de distância da coincidência, aliado ao pequeno número de células discrepantes, nos cenários 1 e 2.

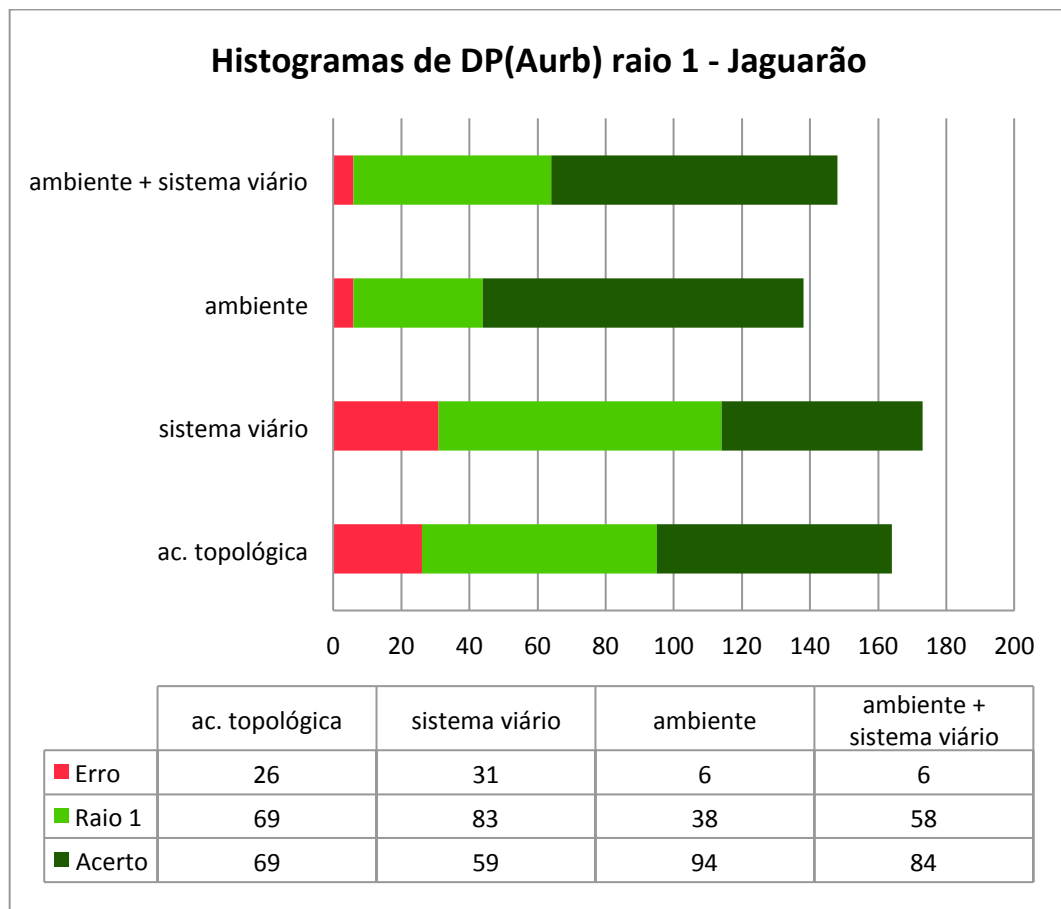


Gráfico 2 - Histogramas de DP(A_{urb}) raio 1 para o caso de Jaguarão.

Os índices de concordância da tabela 6, abaixo, confirmam a avaliação anterior. O percentual de concordância para todas as simulações indica semelhança entre os mapas acima dos 90%, para todos os cenários, sendo o melhor resultado de 96,33% referente ao cenário 3 (acessibilidade ponderada pelo ambiente natural). Esses altos percentuais podem ser explicados, em parte, pelo grande número de células naturais na área de estudo. Os percentuais de concordância para as células do tipo urbano, descontando a área urbana inicial, são mais baixos que o anterior, partindo de 34,10% para o cenário 2 e chegando ao melhor resultado de 68,12%, novamente no cenário 3, o que pode ser considerado um bom resultado devido ao alto grau de

precisão requerido por este método. Considerando os percentuais de concordância difusa de raio 1, o percentual sobe para 81,88% no melhor cenário.

Os valores da estatística Kappa variam entre 0,658 e 0,868. Comparativamente, os valores para os cenários 3 e 4 (0,868 e 0,808, respectivamente) são consideravelmente melhores que os valores obtidos nos cenários 1 e 2 (0,716 e 0,658, respectivamente), mantendo a consistência em relação às avaliações anteriores.

Tabela 6 – Resultado das avaliações das simulações realizadas para o caso de Jaguarão.

Cenário	P(A)	P(A _{urb})	P(A _{urb}) R1	Kappa
1 – acessibilidade topológica	92,08%	42,07%	63,11%	0,716
2 – acessibilidade + fatores antrópicos	90,50%	34,10%	58,09%	0,658
3 – acessibilidade + fatores ambientais	96,33%	68,12%	81,88%	0,868
4 – acessibilidade + fatores ambientais e antrópicos	94,67%	56,76%	76,35%	0,808

4.1.2 Conclusão do caso de Jaguarão

Os resultados obtidos neste estudo de caso demonstram um bom funcionamento do modelo, que foi capaz de replicar o crescimento urbano de Jaguarão ao longo das seis últimas décadas (de 1947 até 2009, totalizando 62 anos), período relativamente longo para estudos do tipo.

Os melhores resultados foram obtidos nos cenários 3 (acessibilidade ponderada por fatores ambientais) e 4 (acessibilidade ponderada por fatores ambientais e antrópicos), ambos com a presença dos fatores ambientais. Além disso, o alto índice de acerto obtido no cenário 3 sugere que o ambiente natural atua ativamente como condicionante da forma urbana. Neste caso, a topografia e hidrografia parecem exercer papel de destaque entre os condicionantes naturais, visto que outros aspectos foram abstraídos da simulação. Esses fatos podem ser explicados pela natureza mais permeável desses componentes da paisagem, exigindo altos investimentos para sua remoção ou modificação, além da sua capacidade de sintetizar informações ambientais.

Os resultados obtidos até aqui estão no caminho da confirmação da hipótese de que o crescimento urbano pode ser determinado pelas características do entorno da cidade, bem como de que a acessibilidade pode ser um meio eficiente de medir essa influência.

4.2 O caso de Bagé / RS

Para avançar na avaliação do modelo, foi realizado um segundo estudo de caso. Para isso, foi escolhida a cidade de Bagé, uma cidade de maior porte em que os resultados poderão ser melhor avaliados.

A cidade de Bagé está localizada na região da Campanha, no estado do Rio Grande do Sul, na divisa com o Uruguai, conforme a figura 19, a seguir. Bagé é uma cidade de médio porte, com uma população de 116.794 habitantes segundo dados do censo 2010 (IBGE, 2010).



Figura 29 - Localização da cidade de Bagé no Rio Grande do Sul e no Brasil.
Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Bagé>.

A área de estudo foi delimitada segundo os mesmos critérios utilizados no estudo anterior, de modo a englobar a área urbanizada atual e uma área de entorno. O resultado é uma área quadrada delimitada pelas seguintes coordenadas geográficas, em UTM, para o fuso 21 sul: a) limite norte: 6.538.000; b) limite sul: 6.523.000; c) limite oeste: 769.000; d) limite leste: 784.000. Esta área foi dividida em células quadradas de 200 m de lado, compondo um *grid* celular de 5625 células, sendo 75 células no sentido leste-oeste e 75 células no sentido norte-sul. A área abrange uma superfície total de 225 km². Essas informações aparecem na figura 30, a seguir:

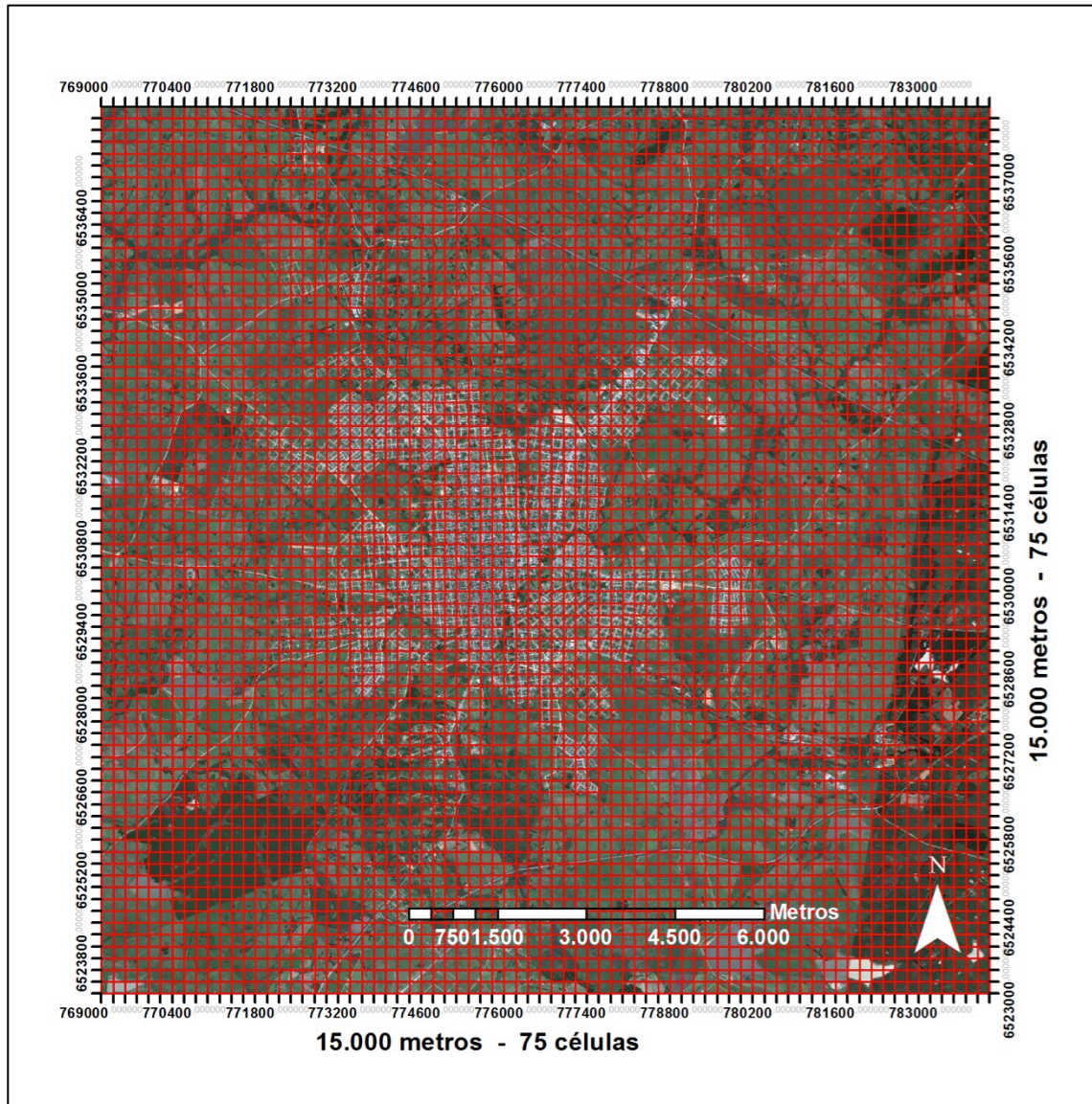


Figura 30 – Área de estudo delimitada para a cidade de Bagé / RS.
 Fonte: mapa elaborado pelo autor, sobre imagem do Google Earth.

O processo de calibração também será feito com a eleição de dois estados passados escolhidos pela disponibilidade de dados da evolução urbana. Para o caso de Bagé, o estado inicial corresponde à área urbanizada de 1974, definida com base em imagem de satélite LandSat disponibilizada pela Agência Norte-Americana de Pesquisa Geológica (*United States Geological Survey*, USGS - <http://earthexplorer.usgs.gov>). O estado final corresponde à área urbanizada de 2012, obtida em imagem de satélite do *Google Earth*. Os dois estados estão indicados na figura 31, a seguir. A área urbanizada de 1974 é composta por 262 células, enquanto a área urbanizada de 2012 corresponde a 855 células. Assim, nesse período de 38 anos, a superfície ocupada pela cidade aumentou 326%, o que corresponde a uma taxa média de crescimento anual de 3,2%.

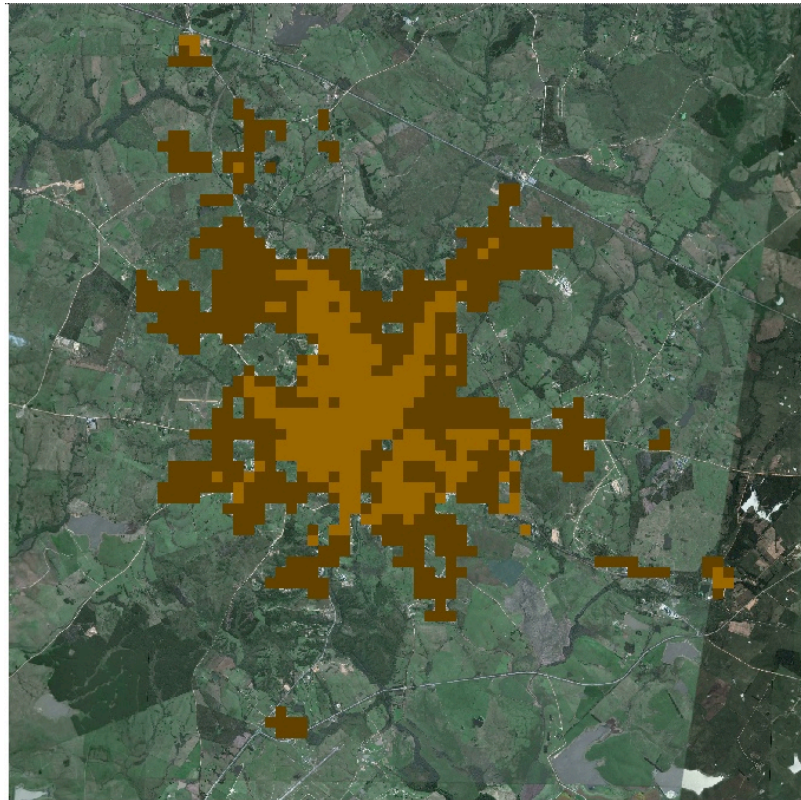


Figura 31 - Área efetivamente urbanizada de Bagé em 1974 (marrom claro, 262 células) e 2012 (marrom escuro, 855 células).

A descrição ambiental está definida a partir dos atributos de entrada ilustrados na figura 32, a seguir, e descritos na sequência.

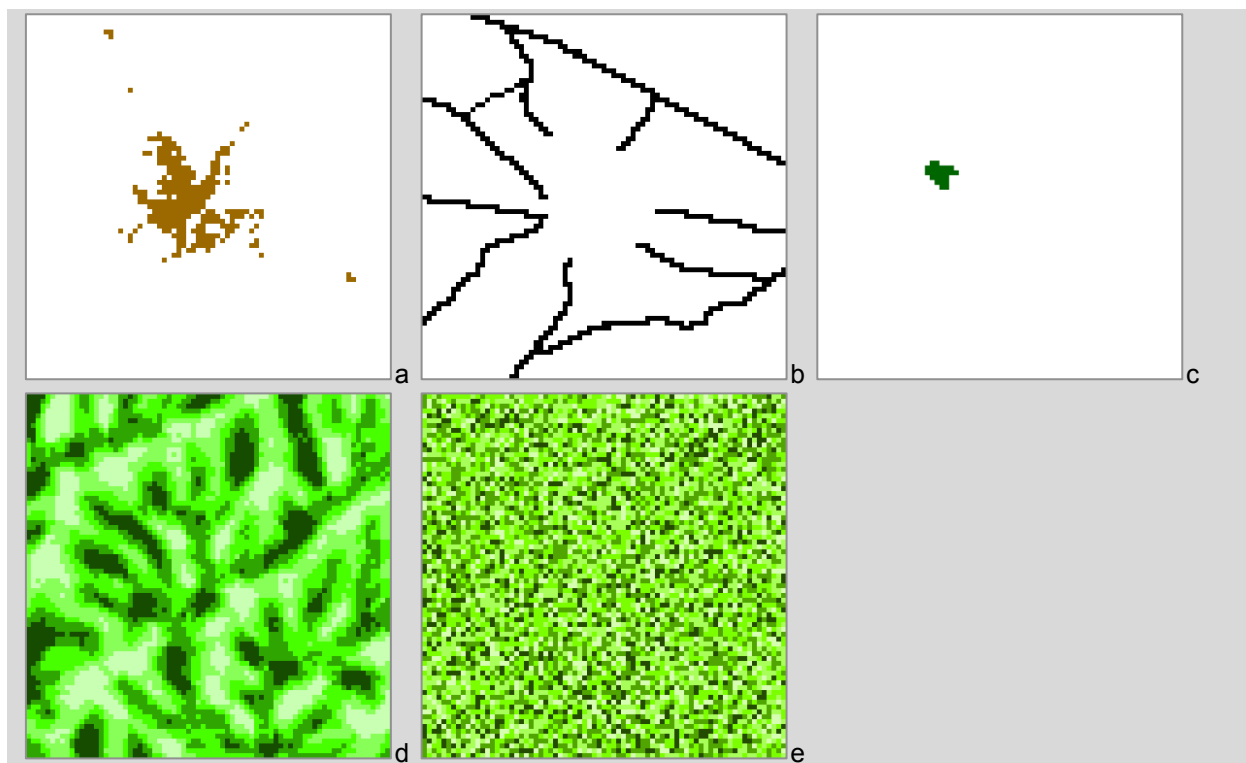


Figura 32 - Atributos de entrada para as simulações de Bagé.

- a) núcleo urbano de 1974 (atributo urbano, atração, figura 32a): representa a área efetivamente urbanizada de Bagé no ano de 1974, com peso 1,0;
- b) sistema viário (atributo máscara, figura 32b): representa as estradas municipais de acesso à zona rural e as rodovias BR-293 e BR-153;
- c) vazios urbanos (atributo institucional, resistência, *freezing*, figura 32c): representa a área de 96 ha pertencente ao campo de exercícios militares do 3º Regimento de Cavalaria Mecanizado do Exército Brasileiro, com peso zero, marcada como *freezing* para indicar a impossibilidade de urbanização neste local;
- d) hidrografia (atributo natural, resistência, figura 32d): consiste de um *grid* de resistências naturais construído com base nas sub-bacias hidrográficas da área de estudo, diferenciado em cinco classes por interpolação entre as linhas de drenagem, onde se situam as maiores resistências, e os divisores de águas, onde a urbanização é facilitada, com peso 0,7;
- e) *grid* randômico (atributo natural, resistência, figura 32e): consiste de um *grid* de resistências naturais dividido em cinco classes, distribuídas aleatoriamente, com peso 0,3.

Os principais atributos utilizados na descrição ambiental são, como no caso anterior, o *grid* derivado da hidrografia, para representar os fatores ambientais, e o sistema viário de acesso à cidade, para representar os fatores antrópicos.

Os testes de calibração para o caso de Bagé estão realizados conforme os mesmos quatro cenários testados no caso de Jaguarão: a) cenário 1 – acessibilidade topológica; b) cenário 2 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos; c) cenário 3 – acessibilidade ponderada por fatores ambientais; d) cenário 4 – acessibilidade ponderada por fatores ambientais e antrópicos.

Seguindo a mesma metodologia anterior, para cada um desses cenários foi executada uma série de simulações, com variações nos parâmetros buscando aproximações sucessivas ao cenário de controle. Os parâmetros utilizados foram os mesmos: a) coeficiente determinístico (α), variando de zero a 1; b) coeficiente aleatório (β), variando de zero a 1; c) impedância global (Ω), nos cenários em que fatores antrópicos são considerados, variando de 0,1 a 0,9.

A taxa de crescimento por iteração foi fixada em 3,2% em todas as simulações, sendo cada iteração simulada correspondente a, aproximadamente, um ano de crescimento espacial real. O melhor resultado para cada cenário será apresentado a

seguir. Ao final, será apresentada a análise comparada entre os resultados dos diferentes cenários.

Cenário Bagé.1 – Acessibilidade topológica.

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$.

O primeiro cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade topológica. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 7, a seguir.

Tabela 7 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.1.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1974	urbano / atração
vazios urbanos (3º RCMec)	institucional / <i>freezing</i>

Os resultados gráficos de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados na figura 33, na página seguinte.

Assim como no caso de Jaguarão, este cenário apresenta um cenário de crescimento urbano praticamente livre de restrições. Deste modo, a forma urbana evolui para uma área progressivamente mais circular, com as bordas ligeiramente fragmentadas devido à ação do fator aleatório. Já o *output* da acessibilidade relativa apresenta um padrão circular altamente concentrado em torno do núcleo urbano desde as primeiras iterações, mantendo-se assim até o final do processo.

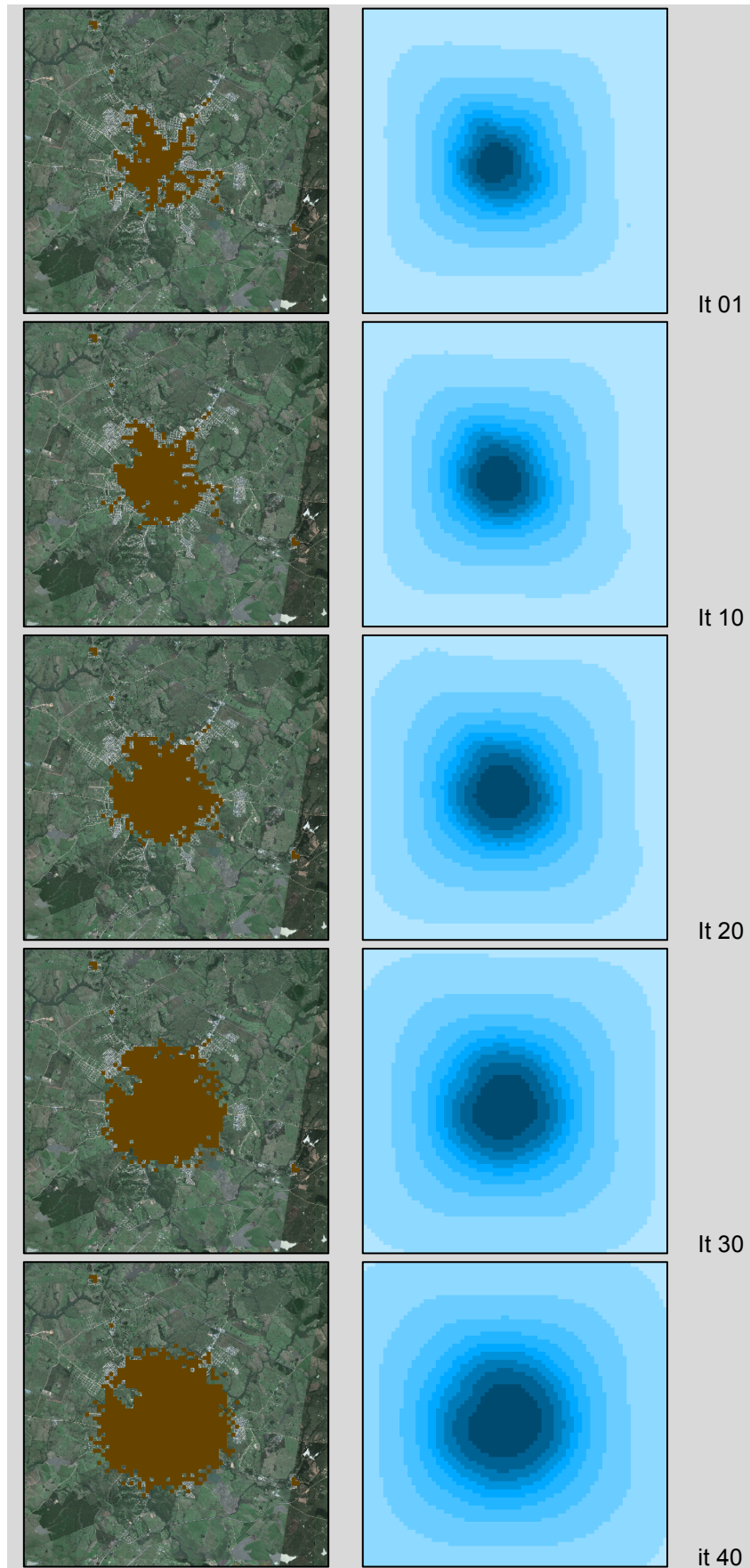


Figura 33 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.1, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

Cenário Bagé.2 – Acessibilidade ponderada pelos fatores antrópicos.

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$; $\Omega = 0,5$.

O segundo cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade ponderada somente por fatores antrópicos. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 8, a seguir.

Tabela 8 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.2.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1974	urbano / atração
sistema viário	máscara
vazios urbanos (3º RCMec)	institucional / <i>freezing</i>

Os melhores resultados das simulações neste cenário foram obtidos com o valor da impedância global configurado em $\Omega = 0,5$, valor intermediário que indica uma fraca influência do sistema viário na conformação da cidade. Valores menores de impedância global, que indicariam maior influência dos fatores antrópicos, geraram excessivo desenvolvimento ao longo dos eixos viários situados à oeste e noroeste. Os resultados gráficos para os *outputs* de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados na figura 34, na página seguinte.

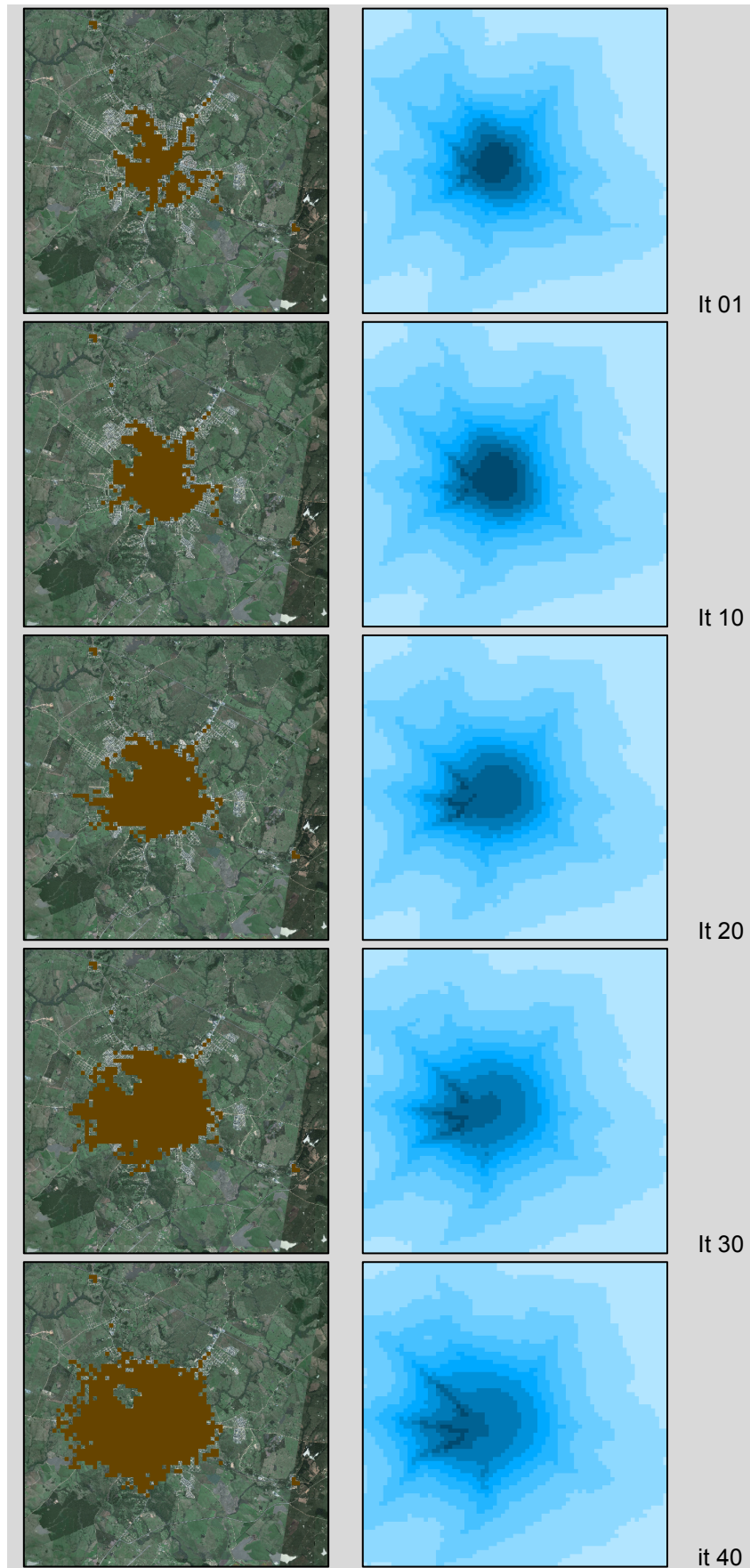


Figura 34 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.2, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

Cenário Bagé.3 – Acessibilidade ponderada pelos fatores ambientais.

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$.

O terceiro cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade ponderada apenas por fatores ambientais. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 9, a seguir.

Tabela 9 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.3.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1974	urbano / atração
vazios urbanos (3º RCMec)	institucional / <i>freezing</i>
hidrografia	natural / resistência
randômico	natural / resistência

Os resultados gráficos de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados na figura 35, na página seguinte.

Neste cenário, a área urbana apresenta morfologia irregular, em resposta às características do ambiente natural, conforme esperado. Porém, se no caso de Jaguarão a presença de condicionantes naturais mostrou-se suficiente para reproduzir as características da cidade, em Bagé essa situação não se repete. A forma urbana simulada apresenta excessivo desenvolvimento ao sul e fraca presença de padrões axiais, características que não são encontradas na cidade real.

A distribuição das maiores acessibilidades varia ao longo da evolução da simulação. Nas iterações iniciais, há um núcleo de alta acessibilidade correspondente à área urbanizada, uma área de média acessibilidade a sudeste e uma diminuição gradual em direção às bordas. Este padrão muda gradativamente, e nas últimas iterações estão espalhados pela área urbana diversos pontos de alta acessibilidade.

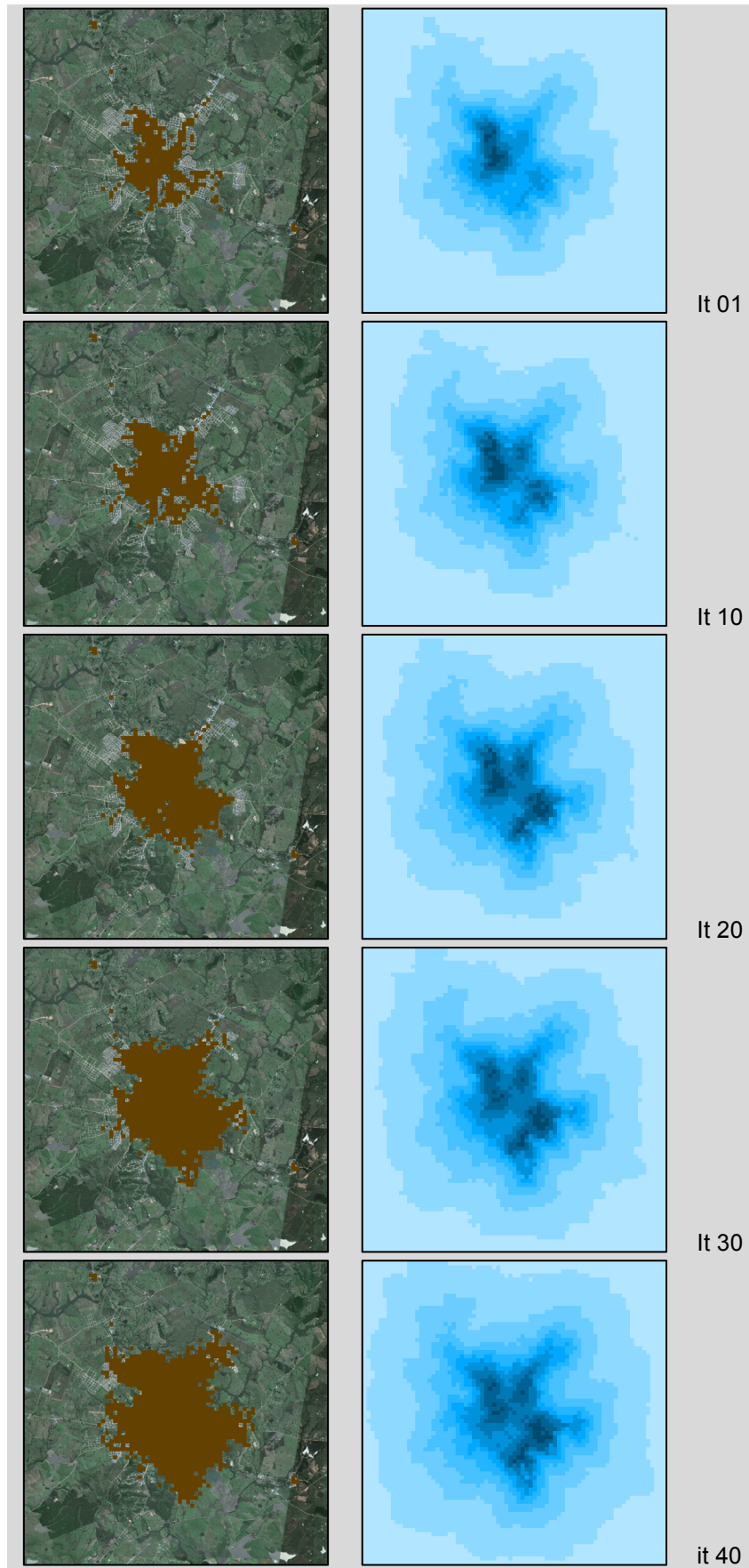


Figura 35 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.3, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

Cenário Bagé.4 – Acessibilidade ponderada por fatores ambientais e antrópicos

melhor parametrização: $\alpha = 1$; $\beta = 1$; $\Omega = 0,2$.

O quarto cenário avalia os resultados das simulações baseadas na acessibilidade ponderada simultaneamente por fatores ambientais e antrópicos. Um resumo dos *inputs* é apresentado na tabela 10, a seguir.

Tabela 10 - Atributos de entrada para o cenário Bagé.2.

Atributo	Tipo
núcleo urbano de 1974	urbano / atração
sistema viário	máscara
vazios urbanos (3º RCMec)	institucional / <i>freezing</i>
hidrografia	natural / resistência
randômico	natural / resistência

Os melhores resultados das simulações neste cenário foram obtidos com o valor da impedância global foi configurado em $\Omega = 0,2$, valor relativamente baixo e que indica uma forte influência do sistema viário na conformação da cidade. Os resultados gráficos para os *outputs* de tipo de célula e acessibilidade relativa estão apresentados na figura 36, na página seguinte.

Os resultados deste cenário apresentam maiores semelhanças com a cidade real. Bagé apresenta uma forma urbana predominantemente compacta e irregular ao centro e axial nas periferias, características que puderam ser replicadas pela influência conjunta do ambiente natural e do sistema viário.

A distribuição das maiores acessibilidades assume um padrão marcadamente axial neste cenário. A atuação do sistema viário eleva a acessibilidade relativa de pontos mais afastados da área urbana, facilitando a conversão do solo desses locais e a forma axial adquirida pela cidade.

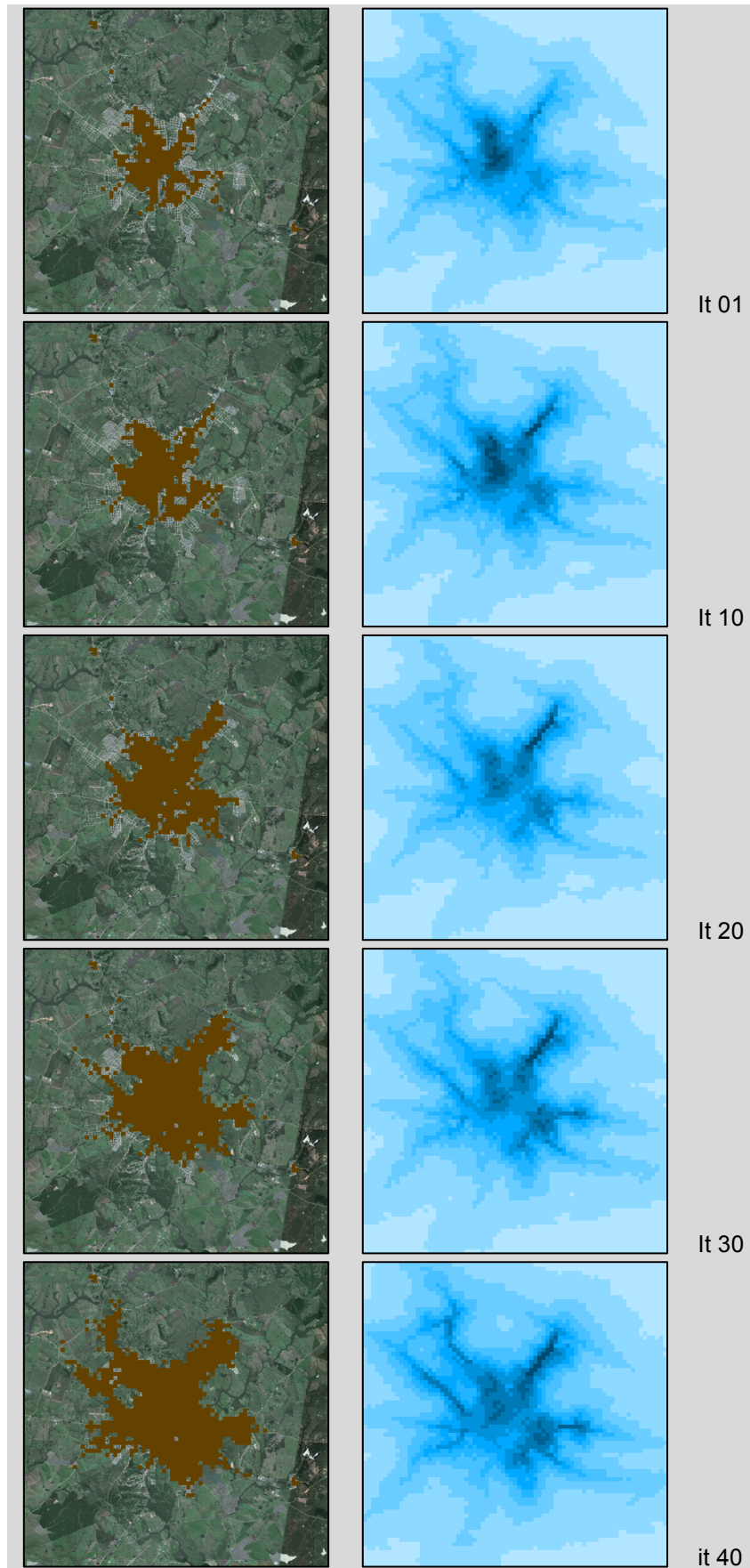


Figura 36 - Resultados da simulação de crescimento urbano do cenário Bagé.4, representados pelas iterações 1, 10, 20, 30 e 40. Na coluna da esquerda, o *output* tipo de célula, em marrom. Na coluna da direita o *output* acessibilidade relativa, em tons de azul.

4.2.1 Análise comparada entre os quatro cenários

O cenário de controle, para todas as análises, corresponde à área efetivamente urbanizada de Bagé no ano de 2012, ilustrada na figura 37, a seguir. Os estados finais de cada cenário, representados pelo *output* tipo de célula, e os mapas de concordância e concordância difusa de raio 1 estão apresentados na página seguinte, na figura 38.

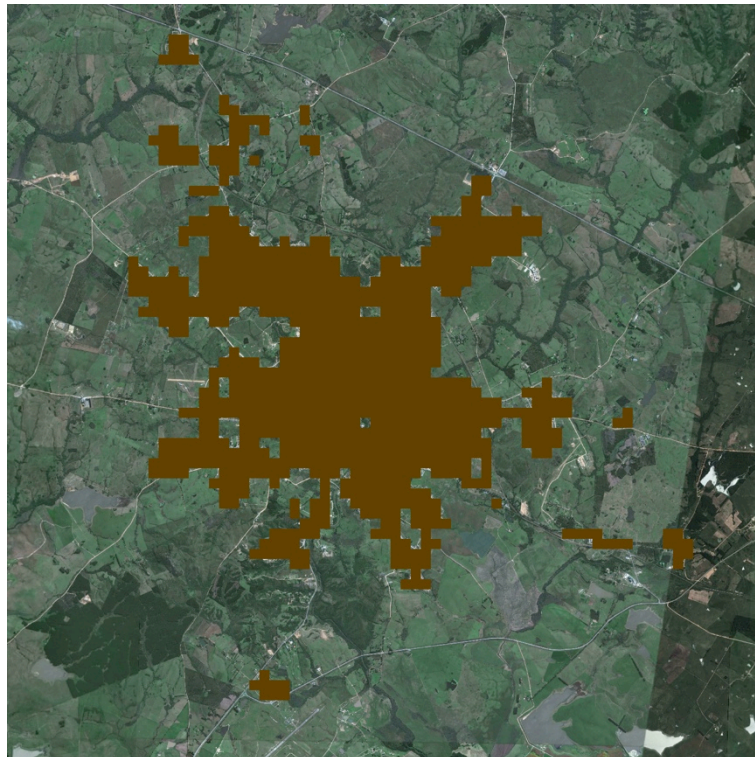


Figura 37 - Área efetivamente urbanizada de Bagé no ano de 2012.

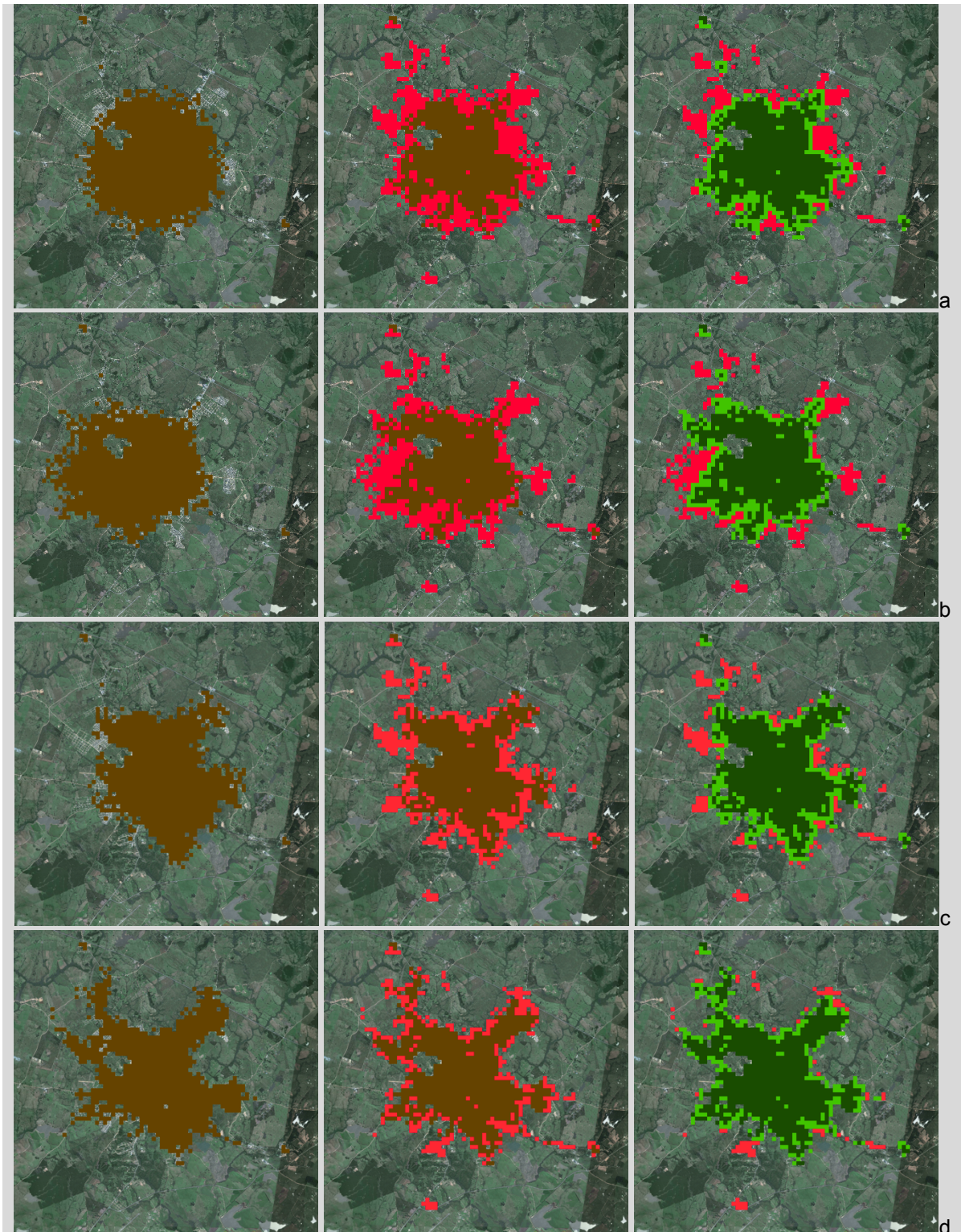


Figura 38 – *Outputs* tipo de célula, em marrom; mapa de concordância, com células coincidentes em marrom e discrepantes em vermelho; mapa de concordância difusa de raio 1, com células coincidentes em verde escuro, coincidência raio 1 em verde claro e discrepância em vermelho. Quatro cenários simulados de Bagé: a) cenário 1 – acessibilidade topológica; b) cenário 2 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos; c) cenário 3 – acessibilidade ponderada por fatores ambientais; d) cenário 4 – acessibilidade ponderada por fatores antrópicos e ambientais.

Os melhores resultados são visualmente perceptíveis no cenário 4, com a influência simultânea do ambiente natural e do sistema viário, apresentando mais semelhanças morfológicas com a cidade real do que os outros cenários. Os erros do modelo concentram-se principalmente nas bordas da cidade, como pode ser visto nos mapas de concordância. Já os mapas de concordância difusa de raio 1 indicam que a estrutura formal da cidade foi adequadamente capturada, com muitas das células simuladas erroneamente localizadas diretamente adjacentes à posição correta.

Os histogramas de frequência para o mapa de concordância difusa raio 1 (gráfico 3) demonstram a maior presença de células coincidentes ou a uma célula de distância da coincidência, aliado ao significativamente menor número de células fora da margem de erro, no segundo cenário.

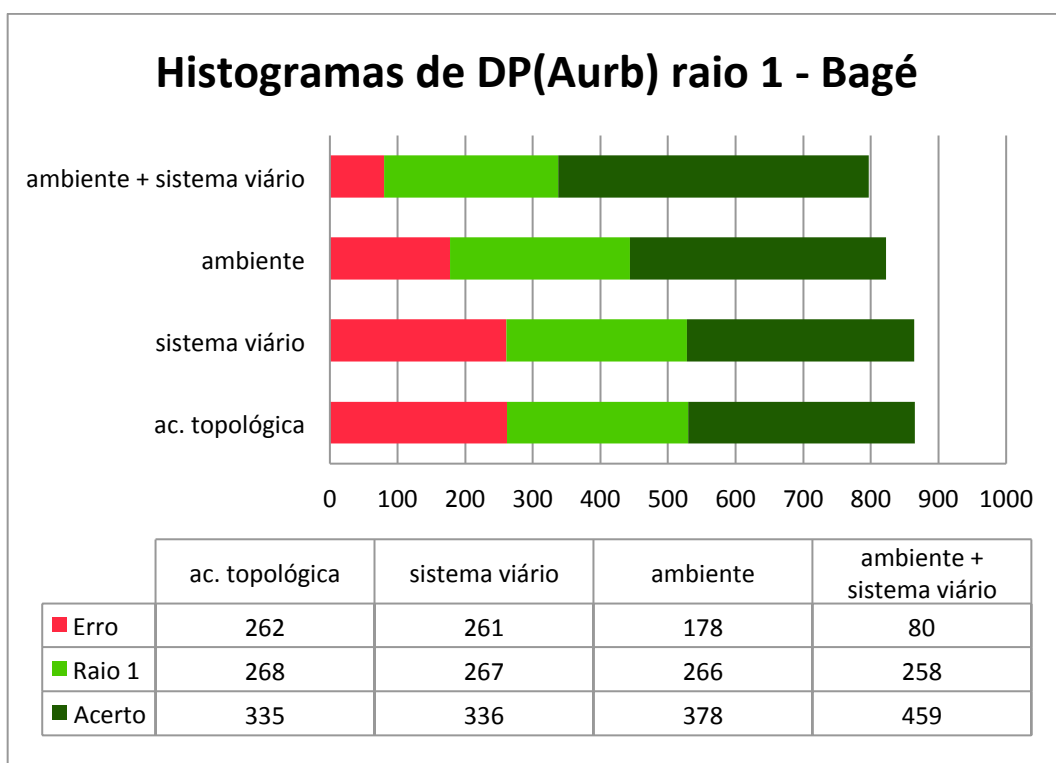


Gráfico 3 - Histogramas de DP(A_{urb}) raio 1 para o caso de Bagé.

Os resultados numéricos da comparação, apresentados na tabela 11, abaixo, confirmam a avaliação anterior. Os percentuais de concordância para as simulações situam-se, mais uma vez, acima dos 90% para todos os cenários. Os percentuais de concordância para as células do tipo urbano são mais baixos, como esperado, chegando a 57,59% no melhor cenário. Considerando o percentual de concordância difusa de raio 1, esse valor sobe para 73,78%, indicando que grande parte dos erros de simulação encontram-se a até uma célula de distância (ou 200 m) da localização real.

Tabela 11 - Resultado das avaliações das simulações realizadas para o caso de Bagé.

Cenário	P(A)	P(A _{urb})	P(A _{urb}) R1	Kappa
1 – acessibilidade topológica	90,58%	38,73%	54,22%	0,637
2 – acessibilidade + fatores antrópicos	90,61%	38,89%	54,34%	0,638
3 – acessibilidade + fatores ambientais	92,11%	45,99%	62,17%	0,696
4 – acessibilidade + fatores ambientais e antrópicos	93,99%	57,59%	73,78%	0,774

4.2.2 Conclusão do caso de Bagé.

As conclusões obtidas a partir do caso de Jaguarão puderam ser confirmadas e expandidas com o estudo de caso de Bagé. O modelo foi capaz de replicar significativamente bem o crescimento da cidade ao longo dos últimos 38 anos (de 1974 até 2012). Apesar do período de tempo menor que o do caso anterior, correspondente a 62 anos, a área de estudo delimitada é significativamente maior: o *grid* foi composto por 5.625 células quadradas, cada uma com 200 m de lado, em contraste às 1.200 células utilizadas nas simulações de Jaguarão.

O melhor resultado foi obtido no cenário 4 - acessibilidade ponderada por fatores antrópicos e ambientais. De forma diferente do ocorrido em Jaguarão, o estudo sugere que cidades de porte médio, como Bagé, têm sua morfologia mais influenciada pelo sistema viário. Assim, locais servidos pelo sistema de transporte passam a ser prioritariamente escolhidos para expansão urbana.

Além do sistema viário, a influência do ambiente natural na forma urbana manteve-se no caso de Bagé. Essa constatação atua na confirmação da hipótese da pesquisa, indicando que as características do entorno da cidade podem ser determinantes da forma urbana.

A medida de acessibilidade mostrou-se capaz de capturar a estrutura do entorno urbano e suas relações com a cidade, sendo utilizada com sucesso para simular crescimento urbano. Porém, os resultados foram melhor alcançados em casos de crescimento concêntrico e axial. No caso de Bagé, pequenos núcleos urbanos localizados de forma difusa não foram capturados pelo modelo. Essa constatação sugere que, em cidades onde esse tipo de morfologia é predominante, o desempenho do modelo pode ser menor, em comparação a este estudo.

5 Conclusões

5.1 Validade das hipóteses e alcance dos objetivos

Este trabalho abordou o tema do processo de crescimento urbano e suas relações com o ambiente preexistente. O assunto foi tratado a partir da vertente da modelagem urbana, através da medida de acessibilidade e de simulações computacionais em ambiente de autômato celular, sendo que a análise e compreensão do processo de produção do espaço urbano se deram no campo disciplinar da morfologia urbana.

A pergunta central de pesquisa, que guiou a investigação, foi a seguinte:

- é possível simular o crescimento urbano baseado em uma medida de acessibilidade?

Como resposta a esse questionamento, foi lançada a seguinte hipótese:

- uma medida de acessibilidade expandida que considere, em sua formulação, a atração exercida pela cidade e as características de seu entorno, tanto antrópicas quanto naturais, pode ser utilizada como forma de diferenciação espacial em um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano, em ambiente de autômato celular, de modo a identificar áreas de maior vantagem locacional e, conseqüentemente, maior probabilidade de urbanização.

No decorrer do trabalho, a metodologia, situada no campo da modelagem urbana, assumiu papel central. Deste modo, a hipótese começou a ser desenvolvida no capítulo 3 - Método, que tratou do desenvolvimento do modelo de simulação de crescimento urbano baseado em uma medida de acessibilidade. Essa medida foi expandida, considerando condicionantes ambientais e antrópicos, e descrita em um ambiente celular, de modo a integrá-la aos recursos de modelagem dinâmica dos autômatos celulares.

As possibilidades de parametrização desenvolvidas permitiram classificar a medida de acessibilidade em quatro grupos: a) acessibilidade topológica; b) acessibilidade ponderada por fatores antrópicos; c) acessibilidade ponderada por fatores ambientais; d) acessibilidade ponderada por fatores antrópicos e ambientais. Desta forma foi possível testar o modelo em diferentes situações, simulando a presença ou ausência de condicionantes externos à urbanização.

Com a metodologia desenvolvida, o modelo foi testado no capítulo 4 – Estudos de Caso. Foram selecionadas duas cidades da região sul do Rio Grande do Sul, Jaguarão e Bagé, para a construção de cenários simulados de crescimento urbano e compará-los com as cidades reais. A partir dessas simulações, foi verificado que os

cenários de urbanização vinculados aos condicionantes externos foram os que apresentaram maiores semelhanças com a cidade real.

Foram testadas duas formas de influência externa na morfologia urbana: a) fatores ambientais; b) fatores antrópicos. Os fatores ambientais foram representados, nas simulações, pelas características da topografia e hidrografia locais, agregadas em um único *grid*. Os fatores antrópicos foram representados pelo sistema rodoviário de acesso às cidades.

Em ambos os casos, o ambiente natural se mostrou importante na conformação urbana, com algumas diferenças entre os dois estudos de caso. No caso de Jaguarão, ambiente natural se mostrou mais influente que o sistema viário, o que pode estar relacionado ao pequeno porte da cidade e sua forma urbana compacta. No caso de Bagé, os melhores resultados foram obtidos com a atuação conjunta do ambiente natural e do sistema viário, o que pode ser explicado pelo maior porte da cidade em relação a Jaguarão e à predominância da morfologia urbana axial nas bordas da cidade.

O objetivo principal do trabalho está vinculado à verificação das hipóteses anteriores, e foi assim enunciado:

- verificar o uso de uma medida de acessibilidade, com a influência das preexistências do entorno da cidade, em simulações de crescimento urbano.

A partir do exposto anteriormente, o objetivo principal pode ser considerado atingido. Quanto aos objetivos específicos, foram abordados nas seções do texto informadas abaixo:

- a) Definir uma medida de acessibilidade capaz de considerar conjuntamente as características formais presentes no entorno da cidade, tanto naturais como já modificadas pela ação humana, e suas relações com a área urbanizada: este objetivo foi abordado na seção 3.2 – A medida de acessibilidade celular, onde foram definidas as características desta medida, formas de parametrização e seus efeitos sobre a acessibilidade e equações matemáticas;
- b) Construir um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano, com apoio em autômatos celulares, utilizando a medida de acessibilidade como forma de diferenciação espacial: a construção do modelo foi abordada em duas partes. A seção 3.1- O *software CityCell*, apresentou o *software* de simulação de crescimento urbano utilizado nesta pesquisa, seu modo de funcionamento, recursos disponíveis e a possibilidade de inserção de novos modelos de simulação em sua base. A seção 3.3 – O modelo de crescimento urbano, que definiu a forma dinâmica de funcionamento do modelo, sua característica semi-probabilística, os parâmetros envolvidos e suas formas de interação e os resultados gerados;

- c) Utilizar o modelo proposto em estudos de caso empíricos, de modo a observar a reprodução de fenômenos urbanos reais em situações controladas: o capítulo 4 – Estudos de Caso, apresenta dois estudos empíricos onde o modelo proposto é aplicado, onde o comportamento do modelo é testado em diferentes cenários e suas potencialidades e limitações são avaliadas;
- d) Selecionar métodos de avaliação capazes de comparar os resultados obtidos nas simulações com características da cidade real: este objetivo foi abordado na seção 3.4 – Avaliação de resultados, onde diferentes métodos de comparação de mapas são selecionados e descritos, divididos em dois grupos: a) avaliações célula por célula; b) avaliações por semelhança difusa (*fuzzy*). Além disso, os métodos selecionados foram implementados no *CityCell*, como forma de automatizar a avaliação dos resultados;
- e) Legitimar o modelo, através de comparação dos resultados das simulações com o crescimento real da cidade: a legitimação do modelo foi feita simultaneamente à realização dos estudos de caso, no capítulo 4, onde as técnicas selecionadas anteriormente foram aplicadas na avaliação dos resultados do modelo .

5.2 Observações registradas durante a pesquisa.

5.2.1 Sobre a descrição ambiental

Este trabalho buscou verificar a influência dos fatores externos à cidade na sua conformação, através do processo de crescimento urbano. Deste modo, adquire fundamental importância a captura e descrição desses fatores em ambiente computacional compatível com a realização de simulações de crescimento urbano.

A decisão pela utilização de um *grid* derivado da topografia e da hidrografia locais como principal fator de descrição do ambiente natural se mostrou eficiente nas simulações realizadas. Os resultados indicam que esses fatores exercem importante influência na conformação das cidades, o que pode ser derivado de sua natureza mais perene, em comparação com outros atributos naturais que sofrem mais variações ao longo do tempo ou que são mais facilmente removíveis. Este fato adquire importância em situações onde levantamentos detalhados do ambiente natural não estão disponíveis, uma vez que levantamentos topográficos para todos os continentes estão disponíveis gratuitamente na internet. Neste trabalho, foram usados dados topográficos da missão topográfica por radar do ônibus espacial (do original *Shuttle Radar Topography Mission*, SRTM), disponibilizados pela agência americana de pesquisa geológica (*United States Geological Survey*, USGS, disponíveis em <http://earthexplorer.usgs.gov>). Além disto, dados mais detalhados

podem ser obtidos junto a prefeituras municipais, que podem dispor de levantamentos aerofotogramétricos.

Estudos podem ser realizados considerando levantamentos mais detalhados dos atributos do ambiente natural, já que o *CityCell* permite a livre inclusão de fatores urbanos, naturais ou institucionais nas simulações. Essa característica é particularmente útil em estudos de cenários de desenvolvimento futuros, onde a descrição ambiental inicial corresponde ao tempo presente, com maior facilidade de obtenção de dados.

Além do ambiente natural, a pesquisa também buscou verificar a influência das modificações introduzidas na paisagem pela ação humana, precedentes à urbanização, como é o caso do sistema viário de acesso à zona rural e a outros municípios. A delimitação desse sistema pode ser feita pela observação direta de imagens de satélite ou fontes cartográficas. Também é possível testar cenários de futuro hipotéticos, de modo a verificar o impacto de ações antrópicas ainda em fase de projeto, como a construção de novas rodovias ou a demarcação de novas áreas de conservação ambiental.

5.2.2 Sobre os estudos de caso

O estudo do caso de Jaguarão possibilitou uma boa aproximação inicial aos objetivos da pesquisa. O pequeno porte da cidade trouxe facilidades quanto à descrição ambiental, montagem dos cenários, realização das simulações e análise dos resultados. Ainda assim, foi possível verificar o funcionamento do modelo em diferentes formas de parametrização.

O desempenho dos cenários de simulação com a presença do ambiente natural foi superior ao dos outros cenários, correspondendo às hipóteses lançadas. Ainda assim, a forma urbana compacta de Jaguarão parece ser pouco influenciada pelo sistema viário. A importância desse estudo de caso também está relacionada às demais cidades da região, visto que muitas delas possuem tamanho semelhante ao de Jaguarão.

O segundo estudo de caso, realizado em Bagé, permitiu verificar a importância do sistema viário na conformação urbana. A cidade, de tamanho maior que Jaguarão, apresenta uma área periférica organizada em eixos ao longo do sistema viário, sendo que esta característica foi bem capturada pelo modelo.

O estudo em duas cidades de portes diferentes permitiu verificar o comportamento do modelo em situações diferentes e entender melhor seu funcionamento. Os dois estudos foram realizados segundo as mesmas técnicas e com a variação dos mesmos parâmetros, facilitando a replicabilidade. Os resultados demonstraram bom

potencial para o modelo, com possibilidades de estudos de cenários de desenvolvimento futuro das cidades estudadas, bem como de outras cidades.

5.2.3 Sobre as técnicas de avaliação

As primeiras avaliações de resultados feitas neste trabalho foram visuais. O objetivo deste tipo de avaliação é verificar a existência de padrões globais no desenvolvimento urbano e de semelhanças morfológicas que o cérebro humano é capaz de identificar, porém dificilmente replicadas por métodos computacionais automatizados. É um método rápido para realizar aproximações iniciais e ajustes na parametrização do modelo, antes dos ajustes finos em busca de simulações mais próximas da realidade.

Além disso, um dos objetivos do trabalho é avançar no desenvolvimento de técnicas de avaliação de resultados que possam selecionar os cenários em que o modelo obtém maior sucesso, além de adicioná-las ao ferramental do *CityCell* para uso em trabalhos futuros. Isso foi feito a partir das métricas de comparação célula a célula e de comparação por semelhança difusa.

As avaliações do tipo célula a célula são eficientes para determinar graus de concordância entre mapas, avaliando ao mesmo tempo tanto a quantidade quanto a localização de células de mesma categoria. Os métodos encontrados na bibliografia e descritos neste trabalho foram usados, em outros modelos, para a comparação de mapas com muitas categorias de uso do solo. No presente trabalho, a simplificação das categorias em duas (urbano / natural) gerou situações diferenciadas em relação aos resultados descritos na bibliografia.

O elevado percentual de concordância ($P(A)$) para as simulações realizadas, todas acima de 90%, pode ser explicado pela predominância de células do tipo natural nos *grids*, devido ao tamanho das áreas de estudo delimitadas. O tamanho da área de estudo é definido em função da necessidade de englobar toda área urbanizada e mais uma área no entorno. Porém, as células mais afastadas da área urbana são pouco influenciadas pelo modelo e acabam elevando artificialmente o percentual de concordância.

O percentual de concordância aplicado à categoria das células urbanas ($P(A_{urb})$) resultou em percentuais menores que os da medida $P(A)$, porém mais hierarquizados entre os cenários testados, permitindo uma melhor avaliação do desempenho do modelo. Mesmo com a diminuição dos valores absolutos, os resultados permaneceram relativamente altos para o caso de Jaguarão (próximo a 70%) e de Bagé (próximo a 60%), nos melhores cenários.

A medida estatística Kappa também apresentou bons resultados. Nesse caso, os melhores valores ficaram em 0,868 para o caso de Jaguarão e 0,774 para o caso de

Bagé. Esses valores podem ser considerados altos tanto em termos absolutos quanto em termos relativos aos outros cenários avaliados. Essa medida possibilitou uma boa hierarquização entre os cenários testados, mesmo com a inclusão de todas as células do *grid* no cálculo.

Os bons resultados obtidos nessas três medidas demonstram a capacidade do modelo de replicar morfologias urbanas reais, pois esse tipo de avaliação é muito exigente quanto à semelhança absoluta entre simulação e realidade, não diferenciando pequenos erros de grandes discrepâncias. Essa característica pode ser considerada um defeito dessas medidas, pois em trabalhos de modelagem urbana, é mais importante entender padrões gerais do que acertar pequenos detalhes.

As medidas de semelhança difusa foram utilizadas para contornar essa característica. Assim, para facilitar a descoberta de padrões e semelhanças mais gerais, e funcionar de forma mais semelhante à percepção humana, foram utilizadas os percentuais de concordância difusa, que podem ser calculados segundo diferentes raios, de acordo com a necessidade. Nos testes realizados, foi utilizado raio de abrangência de uma célula e apenas as células urbanas foram consideradas na avaliação ($DP(A_{urb})$ de raio 1). Apesar de esse raio ser relativamente pequeno, correspondendo a apenas 200 m na escala real, os percentuais de concordância das células urbanas foram elevados para 82% em Jaguarão e 74% em Bagé, valores que podem ser considerados bastante altos, indicando que parte considerável dos erros na verdade eram quase acertos e estavam a apenas uma célula de distância da localização correta. Esses valores são ainda mais significativos considerando que o grau de concordância de cada célula diminui de acordo com a distância da célula de mesma categoria mais próxima (1 para coincidência total, 0,5 para 1 célula de distância, 0,33 para 2 células de distância, e assim por diante).

Os métodos utilizados avaliam tanto a quantidade quanto a localização das células, o que se demonstrou adequado para este trabalho. Porém, outras formas de legitimação podem ser encontradas e utilizadas, inclusive em trabalhos futuros semelhantes a este. Métricas de manchas, derivadas do campo da ecologia de paisagem, podem ser úteis para medir e avaliar outros tipos de semelhanças geométricas entre mapas, sem considerar necessariamente a coincidência de localização. Porém, as medidas utilizadas aqui demonstraram-se suficientes para os objetivos da pesquisa.

Por fim, todas as medidas aqui utilizadas foram implementadas no *CityCell* como um recurso disponível para o operador do sistema, durante a produção deste trabalho. Isso facilita muito a utilização do sistema e se traduz em produtividade para o pesquisador, estando disponíveis em trabalhos futuros que fizerem uso do *software*.

5.3 Possibilidades, limitações e continuidades.

O modelo concebido neste trabalho foi mantido simples, como forma de facilitar a compreensão de seu funcionamento e o entendimento do papel de cada um de seus componentes. Nesse sentido, as possibilidades de parametrização e os atributos de entrada da descrição espacial foram mantidos em pequeno número, com pequenas variações entre os cenários. Ainda assim, o modelo mostrou boa resposta aos condicionantes impostos, com grande variação nos resultados a partir da atuação dos poucos parâmetros, o que permitiu simular situações muito diferenciadas.

A simplicidade dos resultados também facilita sua análise e discussão. O modelo não tem a pretensão de explicar a estrutura da cidade detalhadamente, e sim simular o crescimento urbano a partir da estrutura do espaço adjacente e sua relação com a cidade. A medida de acessibilidade ponderada concebida no trabalho demonstrou ter essa capacidade, com a integração da cidade, dos fatores ambientais e dos fatores antrópicos do entorno em uma mesma descrição, aliada à capacidades de simulação dinâmica dos autômatos celulares.

A descrição ambiental utilizada não depende de levantamentos de difícil obtenção, exigindo esforço de campo ou levantamentos *in loco*. Ao contrário, o levantamento pode ser feito remotamente através de dados disponíveis livremente na internet. Foram utilizados levantamentos topográficos e imagens de satélite históricas LandSat disponibilizados pela agência USGS, bem como imagens atuais disponíveis no *software* Google Earth. Esses dados foram, posteriormente, trabalhados utilizando ferramentas comuns de geoprocessamento.

Os estudos estão limitados a cidades da região, abrangendo duas cidades. Não foram feitos estudos em cidades maiores, ou de desenvolvimento mais rápido e características diferenciadas de ocupação do solo. São cidades de PIB principalmente derivado do comércio e serviços e da produção agropecuária, com pouca participação da indústria e baixas taxas de crescimento. Além disso, Jaguarão apresenta um padrão morfológico principalmente compacto, enquanto Bagé apresenta a forma urbana composta entre compacta e axial.

Não foram realizados estudos em cidades de crescimento rápido e predominantemente difuso. Todavia, os resultados obtidos, principalmente no caso de Bagé, sugerem que cenários urbanos muito fragmentados não devem ser bem reproduzidos pelo modelo, visto que acessibilidade é uma medida essencialmente compacta e com variações gradativas a partir do centro. Por outro lado, o trabalho está delimitado espacialmente na região sul do Rio Grande do Sul, povoada por cidades pequenas e médias, de padrão econômico semelhante às cidades estudadas.

O modelo não trabalha com graus de urbanização diferenciados da área intra-urbana, sendo que as simulações consideram apenas duas classes de células: urbanas ou naturais. A medida de acessibilidade pode indicar a presença de áreas mais acessíveis dentro da cidade, mas testes não foram feitos para verificar a correspondência dessas áreas com indicadores urbanos como densidade, custo do solo, usos do solo predominantes, etc. Testes como esses demandariam a obtenção de mais levantamentos e a seleção de novas técnicas de avaliação, além de fugir do escopo deste trabalho.

Ainda assim, novas possibilidades podem ser adicionadas ao modelo em trabalhos futuros. A medida de acessibilidade pode ser usada em conjunto com outras medidas de diferenciação espacial e outras lógicas de crescimento urbano, alocação de recursos e produção do espaço. Esse modelo teve como proposta simular o crescimento urbano a partir de uma única lógica: a da interação da cidade com o ambiente de entorno, intermediada pela medida de acessibilidade. Porém, na realidade, nada indica que o crescimento urbano obedeça a uma única lógica espacial. Avanços em modelagem urbana ocorrem em várias frentes simultaneamente, porém este trabalho indica que a presença do ambiente do entorno, tanto natural quanto modificado pela ação humana, é um fator a ser considerado em trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas

- ALBERTI, M.; MARZLUFF, J. M.; SCHULENBERGER, E.; BRADLEY, G.; RYAN, C.; ZUMBRUNNEN, C. Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for studying urban ecosystems. **BioScience**, 53, n. 12, Dezembro 2003. 1169-1179.
- ALMEIDA, C. M. D. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil**. Tese de Doutorado INPE. São José dos Campos, p. 351. 2003.
- ARENTZE, T. A.; BORGERS, A. W. J.; TIMMERMANS, H. J. P. Geographical information systems and the measurement of accessibility in the context of multipurpose travel: a new approach. **Geographical Systems**, 1, 1994. 87-102.
- BALLOBÁS, B. **Modern graph theory**: graduate texts in mathematics. New York: Springer, 1998.
- BATTY, M. **Urban modelling**: algorithms, calibrations, predictions. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 381 p.
- BATTY, M. Cellular automata and urban form: a primer. **Journal of the American Planning Association**, 63, 1997. 266-274.
- BATTY, M. Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata. **Environment and Planning A**, 30, n. 11, 1998. 1943-1967.
- BATTY, M. Cities as complex systems: scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphologies. **CASA Working Papers**, London, 2008. Disponível em: <http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper131.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- BATTY, M. Urban Modelling. **International Encyclopedia of Human Geography**, 2009.
- BENENSON, I.; TORRENS, P. M. **Geosimulation**: automata-based modeling of urban phenomena. Chichester: Wiley, 2004. 287 p.
- BENEVOLO, L. **A história da cidade**. 3a edição. ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1983. 729 p.
- BENGUIGUI, L.; CZAMANSKI, D.; ROTH, R. Modeling cities in 3D: a cellular automaton approach. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 35, n. 3, 2008. 413-430.
- BERTOLINI, L.; CLERCQ, F. L.; KAPOEN, L. Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. **Transport Policy**, 12, 2005. 207-220.
- BOAVENTURA NETTO, P. O. **Grafos**: teoria, modelos, algoritmos. 4a. edição. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 328 p.

BRIASSOULIS, H. Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches. **The web book of regional science**, Morgantown, 2000. Disponível em: <www.rri.wvu.edu/web_book>. Acesso em: 19 abr. 2011.

BROOKS, C. M.; KAUFMANN, P. J.; LICHTENSTEIN, D. R. Trip chaining behavior in multi-destination shopping trips: a field experiment and laboratory replication. **Journal of Retailing**, 84, 2008. 29-38.

BUNN, A. G.; URBAN, D. L.; KEITT, T. H. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. **Journal of Environmental Management**, 59, 2000. 265-278.

CARR, M. **New patterns: process and change in human geography**. Cheltenham: Nelson Thornes, 1997. 525 p.

CLARK, W. Principles of Landscape Ecology. **Nature Education Knowledge**, 2, n. 2, 2010. 34.

CLARKE, K.; LEONARD, G. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. **International Journal of Geographical Information Sciences**, 12, 1998. 699-714.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, XX, n. 1, 1960. 37-46.

ECHENIQUE, M. Models: a discussion. **Land Use and Built Form Studies**, Cambridge, 1968.

FORRESTER, J. W. **Principles of systems**. Cambridge: Writhe-Allen Press, 1968.

FREEMAN, L. C. A set of measures of centrality based on betweenness. **Sociometry**, 40, n. 1, 1977. 35-41.

GEURS, K.; RITSEMA VAN ECK, J. **Accessibility measures: review and applications**. RIVM Report n. 408505 006. Bilthoven, Holanda. 2001.

HAGEN, A. **Multi-method assessment of map similarity**. 5th AGILE Conference on Geographic Information Science. Mallorca: [s.n.]. 2002. p. 8.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. **Network analysis in geography**. [S.l.]: St. Martins Press, 1970. 348 p.

HARVEY, D. **The urbanization of capital**. Oxford: Blackwells, 1985. 239 p.

HILLIER, B. **Space is the machine: a configurational theory of architecture**. Londres: Space Syntax, 2007. 355 p.

HILLIER, B.; HANSON, J. **The social logic of space**. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 367 p.

HOLLING, C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. **Ecosystems**, 4, 2001. 390-405.

IBGE. Censo 2010, 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 julho 2011.

INGRAM, D. R. The concept of accessibility: a search for an operational form. **Regional Studies**, 5, 1971. 101-107.

JOHNSON, S. **Emergência**: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades e softwares. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003. 231 p.

KANSKY, K. Structure of transport networks: relationships between network geometry and regional characteristics. **Research Paper n 84**, Chicago, 1963.

KLIR, G. **Facets of Systems Science**. New York: Plenum Press, 1991. 740 p.

KRAFTA, R. **Modernity in urban design is a function of decision support systems**. Making Better Places: Urban Design Now. [S.l.]: Oxford Brookes University. 1993.

KRAFTA, R. Modelling intra-urban configurational development. **Environment and Planning B: Planning and Design**, London, 21, 1994. 67-82.

KRAFTA, R. Spatial self-organization and the production of the city. **Urbana**, Caracas, 24, 1999. 49-62.

KRAFTA, R. **Análise espacial urbana**: aplicações na região metropolitana de Porto Alegre. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009. 176 p.

LA MORGIA, V.; MALENOTTI, E.; BADINO, G.; BONA, F. Where do we go from here? Dispersal simulations shed light on the role of landscape structure in determining animal redistribution after reintroduction. **Landscape Ecology**, 26, 2011. 969-981.

LAMAS, J. M. R. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa: Dinalivro, 1993. 563 p.

LIU, J.; DIETZ, T.; CARPENTER, S.; ALBERTI, M.; FOLKE, C.; MORAN, E.; PELL, A.; DEADMAN, P.; KRATZ, T.; LUBCHENCO, J.; OSTROM, E. Complexity of coupled human and natural systems. **Science**, 317, 2007. 1513-1516.

LIU, Y. **Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata**. [S.l.]: Taylor and Francis Group, 2009. 204 p.

LONGLEY, P.; BATTY, M. **Spatial analysis**: modelling in a GIS environment. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1996. 392 p.

MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex adaptive systems**: an introduction to computational models of social life. Princeton: Princeton University Press, 2007. 263 p.

MITCHELL, M. **Complexity**: a guided tour. New York: Oxford University Press, 2009. 349 p.

MUMFORD, L. **A cidade na história**. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

NYSTUEN, J. D. Identification of some fundamental spatial concepts. In: BERRY, B. J.; MARBLE, D. F. **Spatial Analysis**: a reader in statistical geography. New Jersey: Prentice Hall, 1968.

OMER, I. Evaluating accessibility using house-level data: a spatial equity perspective. **Computers, Environment and Urban Systems**, 30, 2006. 254-274.

O'SULLIVAN, D. Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model. **Environment and Planning B: Planning and Design**, London, 28, 2001. 687-705.

PANERAI, P. **Análise Urbana**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006. 198 p.

PERES, O. M. **Crescimento urbano e hidrografia: dinâmicas morfológicas e articulação à paisagem natural**. Dissertação de Mestrado UFPel PROGRAU. [S.l.], p. 132. 2010.

PINTO, N.; KEITT, T. Beyond the least-cost path: evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. **Landscape Ecology**, 24, 2008. 253-266.

POLIDORI, M. **Simulações de crescimento urbano como instrumento de planejamento urbano e ambiental**. Relatório de Pesquisa CNPQ. Pelotas. 2010.

POLIDORI, M. C. **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**. Tese de Doutorado UFRGS PPGECON. [S.l.], p. 352. 2004.

PORTUGALI, J. **Self-organization and the city**. Berlin: Springer, 2000. 352 p.

PRIGOGINE, I. **Fim das certezas, o tempo, caos e as leis da natureza**. São Paulo: Editora Unesp, 1996. 199 p.

RAYFIELD, B.; FORTIN, M.-J.; FALL, A. The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. **Landscape Ecology**, 25, 2010. 519-532.

REIF, B. **Modelos en la planificación de ciudades y regiones**. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local, 1978.

ROHANI, P.; LEWIS, T. J.; GRÜNBAUM, D.; RUXTON, G. Spatial self-organisation in ecology: pretty patterns or robust reality? **Trends in Ecology and Evolution**, 12, n. 2, 1997. 70-74.

SÁNCHEZ, D. C. Teoría de grafos aplicada a redes naturales y antrópicas. In: MATTEUCCI, S. D.; BUZAI, G. **Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial**. Buenos Aires: Editora Universitaria de Buenos Aires, 1998. p. 321-345.

SARAIVA, M. V. P.; POLIDORI, M. C.; PERES, O. M.; TORALLES, C. P. **CityCell – Urban Growth Simulator (software)**. LabUrb – Laboratório de Urbanismo da FAUrb. Pelotas: UFPel. 2011.

SAURIM, E. **Crescimento urbano simulado para Santa Maria - RS**. Dissertação de Mestrado - PROPUR UFRGS. Porto Alegre. 2005.

SEMBOLONI, F. **The dynamic of an urban cellular automata model in a 3-D spatial pattern**. XXI National Conference Aisre. Palermo: [s.n.]. 2000.

SKYTTNER, L. **General systems theory: problems, perspectives, practice**. Cingapura: World Scientific Publishing, 2005.

SOJA, E. The spatiality of social life: towards a transformative retheorisation. In: GREGORY, D.; HURRY, J. **Social relation and spatial structures**. London: Mac-Millan, 1985. p. 90-127.

SROUR, I. M.; KOCKELMAN, K. M.; DUNN, T. P. Accessibility indices: connection to residential land prices and location choices. **Transportation Research Record**, n. 1805, 2002. 25-34.

STRATHERN, P. **Turing and the computer**. New York: Anchor Books, 1999. 105 p.

TORALLES, C. P. **Cidade e crescimento periférico: morfologia e modelagem da formação do tecido urbano**. Dissertação de Mestrado UFPel PROGRAU. Pelotas. 2013.

TORRENS, P. How cellular models of urban systems work. **CASA Working Papers**, London, 2000. Disponível em: <http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm>. Acesso em: 6 dez. 2010.

UN-HABITAT. **State of the world's cities 2008/2009: harmonious cities**. United Nations Human Settlements Programme. [S.l.]. 2008.

VISSER, H.; DE NIJS, T. The Map Comparison Kit. **Environmental Modelling & Software**, n. 21, 2006. 346-358.

WHITE, I. D.; MOTTERSHEAD, D. N.; HARRISON, S. J. **Environmental Systems: An Introductory Text**. London: Routledge, 1992.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use. **Environment and Planning A**, 25, 1993. 1175-1199.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 24, n. 3, 1997. 323-343.

WILSON, A. **Complex spatial systems: the modelling foundations of urban and regional analysis**. Harlow, England: Pearson Education, 2000. 184 p.

WOLFRAM, S. Cellular automata as simple self-organizing systems., 1982. Disponível em: <<http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/82-cellular/>>. Acesso em: 4 abr. 2011.

WOLFRAM, S. **A New Kind os Science**. London: Wofram Media, 2002. 1197 p.

WOUDSMA, C.; JENSEN, J. F.; KANAROGLOU, P.; MAOH, H. Logistics land use and the city: a spatial-temporal modelling approach. **Transportation Research part E**, 44, 2008. 277-297.

WRIGHT, R. **NonZero: the logic of human density**. New York: Vintage, 2001. 448 p.

WU, J.; HOOBS, R. **Key topics in Landscape Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 297 p.

YU, K. Ecological security patterns in landscapes and GIS application. **CPGIS Journal**, 1, n. 2, 1995. 88-102.

YUNES, G. S. **Cidades Reticuladas: a persistência do modelo na formação urbana do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado USP. São Paulo. 1995.