

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO URBANO E
REGIONAL

“DINÂMICA ESPACIAL URBANA E POTENCIAL DE
ATRATIVIDADE”

Niara Clara Palma

Orientador:

Romulo Krafta

PORTO ALEGRE

2011

NIARA CLARA PALMA

**“DINÂMICA ESPACIAL URBANA E POTENCIAL DE
ATRATIVIDADE”**

Tese Apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Planejamento Urbano e Regional da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul (PROPUR) para Obtenção
do Título de Doutor em Planejamento Urbano e Regional

Área de Pesquisa: Sistemas Configuracionais Urbanos

Orientador Professor Romulo Krafta PhD

Porto Alegre 2011

Ficha catalográfica elaborada na fonte, CCAA2

P171d Palma, Niara Clara
Dinâmica espacial urbana e potencial de atratividade / por
Niara Clara Palma – 2011.
234 f. : il.; 30 cm.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande
do Sul. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação
em Planejamento Urbano e Regional, Porto Alegre, RS, 2011.
Orientador: Prof. Phd. Romulo Krafta

1. Dinâmica de desenvolvimento urbano. 2. Estrutura
urbana. 3. Atratividade – Interação espacial . 4. Auto-
organização. 5. Parâmetro de ordem. I. Título. II. Krafta,
Romulo.

CDU 711.4

Catálogo na Publicação:

Bibliotecário Nilton Gaffrée Júnior - CRB 10/1258

Esse trabalho é dedicado à minha mãe Isis Palma

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Romulo Krafta por ser um exemplo de mestre, de pesquisador e por sempre incentivar a curiosidade e a busca pelo novo em cada um dos seus alunos.

Aos colegas e Professores do PROPUR por acreditarem na busca do conhecimento e na pesquisa como ponte para uma cidade melhor e igualitária.

À Ana Paula e ao Júnior por serem mais que amigos no meu coração.

Aos meus sobrinhos Aninha, Alex, Mari, Rodrigo, Gabi e Natalia por sua alegria e entusiasmo.

Aos meus cunhados Luciano e Luiz Otávio, pela presença, amizade, carinho, ombros e ouvidos nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos Jussara e Iuri por serem meu alicerce, minha força e por sempre cuidarem de mim.

Agradeço especialmente ao meu Pai, por ter me incentivado na busca pelo crescimento através do estudo e do esforço próprio.

Por fim, agradeço a Deus por ter colocado todas essas pessoas na minha vida.

RESUMO

A estrutura urbana muda de acordo com as necessidades da sociedade. Essas modificações são identificadas em características físicas como a volumetria das edificações, intensidade de ocupação urbana, e infraestrutura. Cada decisão de alocação de atividades é tomada considerando a estrutura urbana existente que limita a capacidade de decisão de outras atividades pelo uso do espaço ou das relações estabelecidas assumindo um comportamento sistêmico.

Considera-se a transformação, tanto espacial, quanto de uso do solo como o resultado da interação entre diferentes níveis de um sistema: decisões individuais, subsistemas urbanos (interdependência socioeconômica) e o macrossistema urbano (interação entre subsistemas) gerando um processo de mudança contínuo.

O conceito de interação espacial oferece um modelo abstrato abrangente no qual a cidade sofre a influência de um “campo de forças” gerado pela distribuição das atividades que atraem-se ou repelem-se umas às outras. O crescimento e a alocação das atividades seguem princípios como atratividade, acessibilidade (Wilson, 1961), competição, economia de aglomeração e relações socioeconômicas.

A transformação da estrutura urbana é considerada como o resultado da interação entre componentes de um sistema complexo com diferentes níveis de organização: decisões individuais, subsistemas urbanos e macrossistema urbano. Essa abordagem considera os conceitos ligados às teorias neoclássicas dentro de um arcabouço teórico ligado à auto-organização e sinérgica (Haken, 1983).

A representação da dinâmica urbana será feita a partir do Modelo Autômato celular POTENCIAT (Potencial Change and Intra-urban Attractiveness) onde atividades são alocadas baseadas com base na informação disponível que consistem de: geração de atratividade de atividades iguais e suas complementares; geração de repulsão entre atividades incompatíveis.

As relações funcionais definem a complementaridade e repulsão, assim como a capacidade de competir com as outras atividades do sistema. A analogia reduz o sistema urbano a um campo de cargas positivas e negativas, simulando atratividade de cada atividade urbana localizada espacialmente.

Os resultados das Simulações do Modelo Potenciat são objeto de estudo a partir de cinco indicadores para encontrar convergência com propriedades e comportamentos existentes em sistemas reais. Os resultados das quatro simulações serão avaliados segundo suas propriedades espaciais e estruturais.

ABSTRACT

Urban environment changes according to the needs of our society. These modifications are identified in characteristics such as building typology, intensity of urban occupation, and infrastructure. Each decision is taken considering the existing urban structure and it limits the decisions of other activity units by the use of space or the relations that are established, therefore assuming a systemic behavior.

It is considered here the transformation, either spatial or of urban land use as a result of the interaction among different levels of a system: individual decisions, urban subsystems (social and economic interdependence) and urban macro system (interaction among subsystems), generating an ever changing process.

The concept of spatial interaction offers a thorough abstract model, in which the city is a changing force field, created by the activities' distribution that attract or repel themselves. The growth and location of activities follow principles such as attractiveness, accessibility (Wingo 1961), competition, agglomeration economy and social and economic relationship.

Urban structure transformation is considered as a result of the interaction of components of a complex system with different organization levels: individual decisions, urban subsystems and urban macro systems. This approach considers the concepts related to the neoclassical theories within a theoretical framework linked to self-organization and sinergetics (Haken, 1983)

Urban dynamic representation will occur from the Celular Automata POTENCIAT model (Potencial Change and Intra-urban Attractiveness) where activities are allocated based on the available information, which consists of: generating attractiveness by means of equal activities and their complementary ones; generating repulsion of incompatible attractivenesses.

Each urban activity defines the complementarity and repulsion relations, as well as the capacity of expelling other activities from the system. The analogy used reduces the urban system to an electric field of positive and negative charges, simulating the attractiveness of each urban activity located spatially.

Results of Simulations with Model POTENCIAT are object of a study based on five indicators in order to find convergence with existing properties and behavior in real systems. The results of four simulations will be evaluated according to their spatial and structural properties.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introdução..... | 20 |
| | 1.1 Hipótese..... | 26 |
| | 1.2 Justificativa..... | 27 |
| | 1.3 Objetivos..... | 28 |
| | 1.3.2 Objetivos Particulares | 28 |
| 2 | Arcabouço Teórico | 29 |
| | 2.1 Estrutura Urbana, Atividades e Interação Espacial | 30 |
| | 2.1.1 Dependência Espacial | 30 |
| | 2.1.2 Uso do Solo | 31 |
| | 2.1.3 Interação Espacial | 32 |
| | 2.1.4 Classificação das Atividades | 33 |
| | 2.1.5 Padrões de Ocupação e Competição | 35 |
| | 2.2 Dinâmica de Transformação Espacial e de Uso do Solo | 38 |
| | 2.2.1 Atratores | 39 |
| | 2.2.2 Estrutura em Redes | 41 |
| | 2.2.3 Parâmetro de Ordem | 43 |
| | 2.3 Modelos Urbanos Dinâmicos | 48 |
| | 2.4 Autômato Celular – A.C. | 51 |
| | 2.4.1 A.C. e Sistemas Urbanos | 54 |
| 3 | Modelo de Geração do Campo de Potencial de Atratividade – POTENCIAT | 57 |
| | 3.1 Alocação de Atividades e Geração de Atratividade | 58 |
| | 3.1.1 Interação Espacial e Atratividade: O Conceito do Campo de Forças | 59 |
| | 3.1.2 Potenciat – Atratividade e Estrutura urbana | 61 |
| | 3.2 Descrição do Modelo POTENCIAT | 62 |
| | 3.2.1 Atratividade | 63 |
| | 3.2.2 Interação | 63 |
| | 3.2.3 Crescimento | 65 |
| | 3.2.4 Alocação | 66 |
| | 3.2.5 Coeficiente de Ocupação | 67 |
| | 3.2.6 Saturação do Sistema | 68 |
| | 3.2.7 Saturação Máxima do Sistema | 69 |
| | 3.2.8 Acessibilidade | 70 |
| | 3.2.9 Escolha de Localização | 71 |
| | 3.2.10 Avaliação | 72 |
| | 3.3 Simulações do modelo POTENCIAT | 75 |
| | 3.3.1 Simulação 1 | 79 |
| | 3.3.2 Primeiros Resultados | 81 |
| | 3.3.3 Simulação 2 | 86 |
| | 3.3.4 Simulação 3 | 92 |
| | 3.3.5 Simulação 4 | 97 |
| | 3.4 Considerações sobre as simulações apresentadas | 101 |
| 4 | Avaliação dos resultados | 104 |
| | 4.1 Exame das densidades | 106 |
| | 4.1.1 Simulações | 109 |
| | 4.1.2 Análise | 117 |
| | 4.2 Estatística Espacial | 118 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2.1 | Santa Cruz do Sul/RS | 119 |
| 4.2.2 | Coefficiente Moran – Dependência Espacial | 123 |
| 4.2.3 | Análise de Clusters Espaciais | 124 |
| 4.2.4 | Evolução de Padrões de Ocupação do Espaço | 125 |
| 4.2.5 | Análise | 132 |
| 4.3 | Análise de Redes Complexas | 134 |
| 4.3.1 | Relações Topológicas Arquitetura e Urbanismo | 134 |
| 4.3.2 | Evolução do Sistema e Informação Mútua | 138 |
| 4.3.3 | Resultados das Simulações | 140 |
| 4.3.4 | Definição dos Grafos e Medidas de Centralidade | 142 |
| 4.3.5 | Análise | 157 |
| 4.4 | Análise multivariada e formação de agrupamentos | 158 |
| 4.4.1 | Conglomerados espaciais | 159 |
| 4.4.2 | Santa Cruz do Sul | 160 |
| 4.4.3 | Simulação 1 | 163 |
| 4.4.4 | Simulação 2 | 166 |
| 4.4.5 | Simulação 3 | 169 |
| 4.4.6 | Simulação 4 | 172 |
| 4.4.7 | Análise | 175 |
| 4.5 | Geometria Fractal | 176 |
| 4.5.1 | Dimensão Fractal | 177 |
| 4.5.2 | Dimensão Fractal e Análise Morfológica Urbana | 180 |
| 4.5.3 | Estudos de Caso | 180 |
| 4.5.4 | Uso de solo | 192 |
| 4.5.5 | Aplicação nos resultados do modelo POTENCIAT | 202 |
| 4.5.6 | Análise | 214 |
| 5 | Conclusão e críticas | 217 |
| 5.1 | Atividades urbanas em um contexto de transformação espacial e de uso | 218 |
| 5.2 | Discussão sobre arcabouço teórico | 219 |
| 5.3 | Modelo POTENCIAT | 221 |
| 5.4 | Discussão sobre os métodos de avaliação | 222 |
| 5.5 | Críticas e possibilidades de estudos posteriores | 227 |
| 6 | Bibliografia | 229 |
| 7 | Anexo 1 | 238 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | | |
|------------|--|----|
| Equação 1. | Equação Geral de Interação Espacial..... | 33 |
| Equação 2. | Intensidade da força entre duas cargas pontuais..... | 60 |
| Equação 3. | Intensidade do campo elétrico P1..... | 60 |
| Equação 4. | Potencial de atratividade de cada célula calculado para cada tipo de agente | 63 |
| Equação 5. | Definição de potencial de atratividade para cada atividade..... | 64 |
| Equação 6. | Crescimento da população em função da taxa e do aumento de empregos..... | 65 |
| Equação 7. | Crescimento de residências final..... | 65 |
| Equação 8. | Crescimento de comércio e serviços e outras atividades consideradas “dependentes”..... | 66 |
| Equação 9. | Coefficiente de ocupação..... | 67 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Equação 10. | Potencial de atratividade de cada célula segundo o coeficiente de ocupação..... | 67 |
| Equação 11. | Modificação da saturação da célula individualmente..... | 68 |
| Equação 12. | Número de atividades a serem alocadas..... | 69 |
| Equação 13. | Acessibilidade de cada célula..... | 71 |
| Equação 14. | Potencial de Atratividade final..... | 71 |
| Equação 15. | Probabilidade de escolha de cada célula para a alocação..... | 73 |
| Equação 16. | Probabilidade de escolha de cada célula para a expulsão..... | 73 |
| Equação 17. | Redução do número de agentes que se encontra em campos de atratividade negativos..... | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|-----|
| Figura 1. | Representação do modelo Urbano | 50 |
| Figura 2. | Componentes de um autômato celular genérico..... | 53 |
| Figura 3. | Relação entre células de um sistema A.C. onde a influência decai com a distância..... | 54 |
| Figura 4. | Representação de uma estratégia de ação a partir de um modelo mental | 72 |
| Figura 5. | Diagrama Geral de Funcionamento do Modelo..... | 75 |
| Figura 6. | Modelo POTENCIAT, configurações de cada simulação..... | 76 |
| Figura 7. | Modelo POTENCIAT, inserção da célula “semente”..... | 76 |
| Figura 8. | Potencial de Atratividade indústria..... | 77 |
| Figura 9. | Modelo POTENCIAT em iteração do sistema..... | 77 |
| Figura 10. | Distribuição da ocupação da População 2..... | 78 |
| Figura 11. | Localização do Bairro Anchieta na cidade de porto alegre e distribuição das atividades no ano de 1990..... | 106 |
| Figura 12. | Imagem aérea do Bairro Anchieta, 2011..... | 107 |
| Figura 13. | Distribuição das atividades em Santa Cruz do Sul, 1870 | 120 |
| Figura 14. | Distribuição das atividades em Santa Cruz do Sul, 1922..... | 120 |
| Figura 15. | Distribuição atividades Comercial e Industrial em Santa Cruz do Sul..... | 121 |
| Figura 16. | Distribuição População 1, 2 e 3 em Santa Cruz do Sul..... | 122 |
| Figura 17. | Mapa de significância Indústria – 600, 700 e 800 iterações | 125 |
| Figura 18. | Agrupamentos espaciais Simulação 1 Sistema Total – 600, 700, 800 iterações. | 126 |
| Figura 19. | Agrupamentos espaciais – Indústria 600,700 e 800 iterações..... | 127 |
| Figura 20. | Comércio, População 1 e População 2, 800 iterações..... | 127 |
| Figura 21. | Agrupamentos espaciais – População 3 - 600,700 e 800 iterações..... | 127 |
| Figura 22. | Agrupamentos espaciais Simulação 2 Sistema Total – 400, 600, 700 iterações | 128 |
| Figura 23. | Agrupamentos espaciais – População 2 - 400, 600 e 700 iterações..... | 128 |
| Figura 24. | Agrupamentos espaciais – Indústria - 700 iterações..... | 129 |
| Figura 25. | Agrupamentos espaciais – Comércio, Populações 1 e 3 - 700 iterações..... | 129 |
| Figura 26. | Agrupamentos espaciais Simulação 3 Sistema Total – 400, 600, 700 iterações | 130 |
| Figura 27. | Agrupamentos espaciais – Comércio - 700 iterações..... | 130 |
| Figura 28. | Agrupamentos espaciais – Indústria - 400, 600 e 700 iterações..... | 130 |
| Figura 29. | Agrupamentos espaciais – Populações 1 2 e 3 - 400, 600 e 700 iterações..... | 131 |
| Figura 30. | Agrupamentos espaciais Simulação 4 – Sistema Total – 400, 600, 700 iterações | 131 |
| Figura 31. | Agrupamentos espaciais – Indústria - 400, 600 e 700 iterações..... | 131 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Figura 32. | População 1 – 800 iterações..... | 132 |
| Figura 33. | Agrupamentos espaciais – Comércio e Populações 2 e 3 - 800 iterações..... | 132 |
| Figura 34. | Porto Alegre: desagregação axial e medida de integração global..... | 136 |
| Figura 35. | Representação de um sistema espacial urbano através de um grafo..... | 137 |
| Figura 36. | Centralidade Sante Cruz do Sul - 1870 e 1922 | 138 |
| Figura 37. | Centralidade Sante Cruz do Sul - 1940 e 2002..... | 139 |
| Figura 38. | Representação das células originais, representadas por pontos e ligações..... | 140 |
| Figura 39. | Ocupação População 1, grafo com a distribuição de valores do da População 1 | 141 |
| Figura 40. | Imagem original Santa Cruz do Sul, Células e Grafo gerado para a análise..... | 160 |
| Figura 41. | Geração de um Tapete de Sierpinski: em cada passo, cada quadrado é substituído por N=5 quadrados com comprimento reduzido pelo fator $r =$ | 178 |
| Figura 42. | Geração de um fractal pela adição de elementos que pode ser relacionado a uma rede viária..... | 178 |
| Figura 43. | Um Tapete Sierpinski consistente de uma série de clusters (a), um compacto com hierarquia de espaços abertos (b) e um tipo Poeira de Fournier que | 179 |
| Figura 44. | Mapas históricos Curitiba (1894), Porto Alegre (1840) e Santa Cruz do Sul (1890)..... | 183 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabela .1. | Relação entre temperatura e densidade da água..... | 48 |
| Tabela .2. | Equações de crescimento de cada atividade..... | 79 |
| Tabela .3. | Equações de evolução Simulação 1..... | 79 |
| Tabela .4. | Atuação do coeficiente de ocupação em cada célula | 80 |
| Tabela .5. | Equações de evolução e coeficientes de ocupação Simulação 2..... | 87 |
| Tabela .6. | Equação de evolução e coeficiente de ocupação Simulação 3..... | 92 |
| Tabela .7. | Equações de evolução e coeficientes de ocupação simulação 4..... | 97 |
| Tabela .8. | Número de empresas e domicílios no Bairro Anchieta..... | 108 |
| Tabela .9. | Grupos formados Simulação 1 – Gráfico tipo Radar - 500 iterações..... | 162 |
| Tabela .10. | Grupos formados Simulação 1 – Gráfico tipo Radar - 500 iterações..... | 164 |
| Tabela .11. | Grupos formados Simulação 1 – Gráfico tipo Radar - 700 iterações..... | 165 |
| Tabela .12. | Grupos formados Simulação 2 – Gráfico tipo Radar - 600 iterações..... | 167 |
| Tabela .13. | Grupos formados Simulação 2 – Gráfico tipo Radar - 700 iterações..... | 168 |
| Tabela .14. | Grupos formados Simulação 3 – Gráfico tipo Radar - 600 iterações..... | 170 |
| Tabela .15. | Grupos formados Simulação 3 – Gráfico tipo Radar - 800 iterações..... | 171 |
| Tabela .16. | Grupos formados Simulação 3 – Gráfico tipo Radar - 600 iterações..... | 173 |
| Tabela .17. | Grupos formados Simulação 4 – Gráfico tipo Radar - 700 iterações..... | 175 |
| Tabela .18. | Lista de atributos para objetos fractais..... | 176 |
| Tabela .19. | Cardiff: evolução da forma e dimensão fractal..... | 182 |
| Tabela .20. | Curitiba: evolução da forma e dimensão fractal..... | 184 |
| Tabela .21. | Porto Alegre: evolução da forma e dimensão fractal..... | 185 |
| Tabela .22. | Santa cruz do Sul: evolução da forma e dimensão fractal | 186 |
| Tabela .23. | Simulação 1, 2, 3 e 4: evolução da forma e dimensão fractal | 189 |
| Tabela .24. | Diferentes valores para cada tipo de ocupação..... | 192 |
| Tabela .25. | Atividade Industrial Limites adotados..... | 194 |
| Tabela .26. | Atividade Comercial limites adotados..... | 194 |
| Tabela .27. | População 1 limites adotados..... | 195 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabela .28. | População 2- Limites adotados..... | 195 |
| Tabela .29. | População 3- Limites adotados..... | 196 |
| Tabela .30. | Atividade industrial - Limites adotados..... | 197 |
| Tabela .31. | Atividade Comercial - Limites adotados..... | 198 |
| Tabela .32. | Atividade Comercial - Limites adotados..... | 199 |
| Tabela .33. | Atividade Industrial - Limites adotados..... | 199 |
| Tabela .34. | Atividade Comercial - Limites adotados..... | 200 |
| Tabela .35. | Atividade Residencial - Limites adotados..... | 201 |
| Tabela .36. | Limites da atividade Industrial Simulações 1, 2, 3 e 4..... | 203 |
| Tabela .37. | Limites da atividade Comercial simulações 1 e 2..... | 205 |
| Tabela .38. | Limites da atividade População Residencial 1 – Simulações 1, 2, 3 e 4..... | 208 |
| Tabela .39. | Limites da atividade População Residencial 2 – Simulações 1, 2, 3 e 4..... | 210 |
| Tabela .40. | Limites da atividade População Residencial 3 – Simulações 1, 2, 3 e 4..... | 212 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|-------------|--|----|
| Gráfico 1. | Evolução do Coeficiente de ocupação de uma célula com sat=10..... | 67 |
| Gráfico 2. | Ocupação, acessibilidade e Potencial de Atratividade População 1 - 1 iteração..... | 81 |
| Gráfico 3. | Acessibilidade, Coeficiente de Ocupação e Ocupação Total - 100 iterações..... | 81 |
| Gráfico 4. | Localização Atividade Industrial 500, 700 e 800 Iterações..... | 82 |
| Gráfico 5. | Potencial de Atratividade Indústria 500, 700 e 800 iterações..... | 82 |
| Gráfico 6. | Localização Atividade Comercial 500, 700 E 800 iterações..... | 83 |
| Gráfico 7. | Potencial de Atratividade Comércio , 700 E 800 iterações..... | 83 |
| Gráfico 8. | Localização População 1 - 500, 700 e 800 iterações..... | 84 |
| Gráfico 9. | Potencial de Atratividade População 1 - 500, 700 e 800 iterações..... | 84 |
| Gráfico 10. | Localização População 2 - 500, 700 e 800 iterações..... | 84 |
| Gráfico 11. | Potencial de Atratividade População 2 - 500, 700 e 800 iterações..... | 85 |
| Gráfico 12. | Localização População 3 - 500, 700 E 800 iterações..... | 85 |
| Gráfico 13. | Potencial de Atratividade População 3 - 500, 700 e 800 iterações..... | 85 |
| Gráfico 14. | Localização Sistema Total - 500, 700 e 800 iterações..... | 86 |
| Gráfico 15. | Localização Indústria – 400, 600 e 700 iterações..... | 87 |
| Gráfico 16. | Potencial de Atratividade Indústria – 400, 600, e 700 iterações..... | 88 |
| Gráfico 17. | Localização Comércio – 400, 600 E 700 iterações..... | 88 |
| Gráfico 18. | Potencial de Atratividade Comércio – 400, 600, e 700 iterações..... | 88 |
| Gráfico 19. | Localização População 1 – 400, 600 e 700 iterações..... | 89 |
| Gráfico 20. | Potencial de Atratividade População 1 – 400, 600, e 700 iterações..... | 89 |
| Gráfico 21. | Localização População 2 – 400, 600 e 700 iterações..... | 89 |
| Gráfico 22. | Potencial de Atratividade População 2 – 400, 600, e 700 iterações..... | 90 |
| Gráfico 23. | Localização População 3 – 400, 600 e 700 iterações..... | 90 |
| Gráfico 24. | Potencial de atratividade População 3 – 400, 600, e 700 iterações..... | 91 |
| Gráfico 25. | Localização Sistema Total – 400, 600 e 700 iterações..... | 91 |
| Gráfico 26. | Acessibilidade do sistema - 400, 600 E 700 iterações | 91 |
| Gráfico 27. | Localização Indústria – 600, 700 e 800 iterações..... | 93 |
| Gráfico 28. | Potencial de atratividade Indústria – 600, 700, e 800 iterações..... | 93 |
| Gráfico 29. | Localização Comércio – 600, 700 e 800 iterações..... | 94 |
| Gráfico 30. | Potencial de atratividade Comércio – 600, 700, e 800 iterações..... | 94 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Gráfico 31. | Localização População 1 – 600, 700 e 800 iterações..... | 94 |
| Gráfico 32. | Potencial de atratividade População 1 – 600, 700, e 800 iterações..... | 94 |
| Gráfico 33. | Localização População 2 – 600, 700 e 800 iterações..... | 95 |
| Gráfico 34. | Potencial de atratividade População 2 – 600, 700, e 800 iterações..... | 95 |
| Gráfico 35. | Localização População 3 – 600, 700 e 800 iterações..... | 95 |
| Gráfico 36. | Potencial de atratividade População 3 – 600, 700, e 800 iterações..... | 96 |
| Gráfico 37. | Localização Sistema Total – 600, 700 e 800 iterações..... | 96 |
| Gráfico 38. | Coefficiente de ocupação - 600, 700 E 800 iterações | 97 |
| Gráfico 39. | Localização Indústria – 300, 600 e 700 iterações..... | 98 |
| Gráfico 40. | Potencial de atratividade Indústria – 300, 600, e 700 iterações..... | 98 |
| Gráfico 41. | Localização Comércio – 300, 600 e 700 iterações..... | 98 |
| Gráfico 42. | Potencial de atratividade Comércio – 300, 600, e 700 iterações..... | 99 |
| Gráfico 43. | Localização População 1 – 300, 600 e 700 iterações..... | 99 |
| Gráfico 44. | Potencial de atratividade População 1 – 300, 600, e 700 iterações..... | 99 |
| Gráfico 45. | Localização População 2 – 300, 600 e 700 iterações..... | 100 |
| Gráfico 46. | Potencial de atratividade População 2 – 300, 600, e 700 iterações..... | 100 |
| Gráfico 47. | Localização População 3 – 300, 600 E 700 iterações..... | 100 |
| Gráfico 48. | Potencial de atratividade População 3 – 300, 600, e 700 iterações..... | 101 |
| Gráfico 49. | Localização Sistema Total – 500, 600 e 700 iterações..... | 101 |
| Gráfico 50. | Gráfico com o número de domicílios e estabelecimentos ligados às atividades de Comércio, Serviços e Abastecimento..... | 108 |
| Gráfico 51. | Simulação 1, População 3 - 400 iterações..... | 109 |
| Gráfico 52. | Simulação 1: áreas estudadas..... | 110 |
| Gráfico 53. | Simulação 1: densidade de atividades na área central..... | 111 |
| Gráfico 54. | Simulação 1: densidade de atividades na área 1..... | 111 |
| Gráfico 55. | Simulação 1: densidade de atividades na área 2..... | 112 |
| Gráfico 56. | Simulação 2: Áreas estudadas..... | 112 |
| Gráfico 57. | Simulação 2: densidade de atividades na área central..... | 112 |
| Gráfico 58. | Simulação 2: densidade de atividades na área 1..... | 113 |
| Gráfico 59. | Simulação 2: densidade de atividades na área 2..... | 113 |
| Gráfico 60. | Simulação 3: Áreas estudadas..... | 114 |
| Gráfico 61. | Simulação 3: densidade de atividades na área central..... | 114 |
| Gráfico 62. | Simulação 3: densidade de atividades na área 1..... | 115 |
| Gráfico 63. | Simulação 3: densidade de atividades na área 2..... | 115 |
| Gráfico 64. | Simulação 4: Áreas estudadas..... | 116 |
| Gráfico 65. | Simulação 4: densidade de atividades na área central..... | 116 |
| Gráfico 66. | Simulação 4: densidade de atividades na área 1..... | 116 |
| Gráfico 67. | Simulação 4: densidade de atividades na área 2..... | 117 |
| Gráfico 68. | Índice de Moran atividade Industrial 600, 700 e 800 iterações | 124 |
| Gráfico 69. | Gráfico Radar Simulação 1_ Grupo Zero..... | 161 |
| Gráfico 70. | Dimensão Fractal Cardiff..... | 182 |
| Gráfico 71. | Gráficos resultantes da análise fractal tipo correlação para a cidade de Porto Alegre..... | 184 |
| Gráfico 72. | Gráfico de evolução da Dimensão Fractal de cada cidade analisada..... | 187 |
| Gráfico 73. | Gráficos de evolução da Dimensão Fractal dos Sistemas Simulados..... | 181 |
| Gráfico 74. | Evolução da Dimensão Fractal Atividade Industrial Simulações 1, 2, 3 e 4 | 201 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Gráfico 75. | Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Comercial das Simulações 1, 2, 3 e 4..... | 204 |
| Gráfico 76. | Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Residencial População 1 das Simulações 1, 2 3 e 4..... | 207 |
| Gráfico 77. | Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Residencial População 2 das Simulações 1, 2 3 e 4..... | 209 |
| Gráfico 78. | Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Residencial População 3 das Simulações 1, 2 3 e 4..... | 211 |

LISTA DE GRAFOS

| | | |
|-----------|--|-----|
| Grafo 1. | Representação geométrica de um grafo..... | 134 |
| Grafo 2. | Grafo de acessos de uma edificação..... | 135 |
| Grafo 3. | Planta do Palazzo de Porto Festa e grafo de adjacência..... | 135 |
| Grafo 4. | Grafo de adjacência sobreposto ao grafo de planta do Palazzo de Porto Festa | 136 |
| Grafo 5. | Simulação 1: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio..... | 143 |
| Grafo 6. | Simulação 2: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio..... | 144 |
| Grafo 7. | Simulação 3: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio..... | 144 |
| Grafo 8. | Simulação 4: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio..... | 145 |
| Grafo 9. | Simulação 1: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3 | 145 |
| Grafo 10. | Simulação 2: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3 | 146 |
| Grafo 11. | Simulação 3: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3 – 700 it.... | 146 |
| Grafo 12. | Simulação 4: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3 – 700 it.... | 147 |
| Grafo 13. | Simulação 1: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it..... | 148 |
| Grafo 14. | Simulação 2: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it..... | 148 |
| Grafo 15. | Simulação 3: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it..... | 149 |
| Grafo 16. | Simulação 4: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it..... | 149 |
| Grafo 17. | Simulação 1: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 150 |
| Grafo 18. | Simulação 2: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it | 150 |
| Grafo 19. | Simulação 3: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 151 |
| Grafo 20. | Simulação 3: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 151 |
| Grafo 21. | Simulação 1: centros detectados Indústria e Comércio – 700 it..... | 153 |
| Grafo 22. | Simulação 2: centros detectados Indústria e Comércio – 700 it..... | 153 |
| Grafo 23. | Simulação 3: centros detectados Indústria e Comércio – 700 it..... | 153 |
| Grafo 24. | Simulação 4: centros detectados Indústria e Comércio – 700 it..... | 154 |
| Grafo 25. | Simulação 1: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 155 |
| Grafo 26. | Simulação 2: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 155 |
| Grafo 27. | Simulação 3: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 156 |
| Grafo 28. | Simulação 4: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it..... | 156 |
| Grafo 29. | Delimitação dos Grupos - Simulação 1 – 500 iterações..... | 163 |
| Grafo 30. | Delimitação dos Grupos - Simulação 1 – 700 iterações..... | 165 |
| Grafo 31. | Delimitação dos Grupos - Simulação 2 – 600 iterações..... | 167 |
| Grafo 32. | Delimitação dos Grupos - Simulação 2 – 700 iterações..... | 168 |
| Grafo 33. | Delimitação dos Grupos - Simulação 3 – 600 iterações..... | 170 |
| Grafo 34. | Delimitação dos Grupos - Simulação 1 – 500 iterações..... | 171 |
| Grafo 35. | Delimitação dos Grupos - Simulação 4 – 600 iterações..... | 173 |
| Grafo 36. | Delimitação dos Grupos - Simulação 4 – 700 iterações..... | 174 |

1. INTRODUÇÃO

Muitas vezes os problemas que enfrentamos podem servir como fonte de reflexão e estudo. No meu caso, a troca de moradia para uma nova casa no Bairro Anchieta em Porto Alegre no ano de 1990 causou o enfrentamento de conflitos não esperados. O que a princípio parecia ser um bairro predominantemente residencial, se transformou em um local repleto de estabelecimentos ligados à atividade de abastecimento, embalagens, preparo de alimentos, etc.

Parecia que a força de influência definida pela alocação da Central de Abastecimento do Rio Grande do Sul S.A - CEASA RS vinha, desde 1974, atraindo para o Bairro a alocação de estabelecimentos de grande porte. Os fluxos de veículos pesados acabaram se tornando freqüentes em uma área projetada para a atividade residencial com caixas de ruas e calçadas estreitas, além de lotes pequenos que muitas vezes foram aglutinados para a implantação de novos pavilhões.

O transporte público tinha dois problemas principais, o primeiro era a convivência dos usuários residentes do bairro com mercadorias como alho, rabanetes, cebola, cestos, etc. O segundo, era a grande dificuldade de utilizar o transporte coletivo nos finais de semana quando a empresa responsável por aquela área reduzia em grande parte a disponibilidade de veículos.

Não seria de estranhar que o conflito tenha se instaurado na área com os moradores tentando recorrer à lei no sentido de fazer valer a proibição de estabelecimentos daquele tipo que constava no plano diretor. Vários manifestos, reportagens e audiências com representantes municipais ocorreram e a nova atividade acabou, mesmo assim, se instalando no local, causando a expulsão dos moradores que passaram a ver como bom negócio a venda de terrenos com maior valor e a possibilidade de procurar outros lugares mais adequados para sua moradia.

As mudanças ali observadas se mostraram diretamente conectadas à inserção de edificações que passaram a abrigar atividades incompatíveis com a atividade residencial com problemas como, por exemplo, geração de fluxos incompatíveis com as atividades anteriormente existentes, atração de público diferencia modificação do valor da terra, mudança nas relações de acessibilidade, etc.

Esses fenômenos instigam a necessidade de compreensão e, se possível, chegar à formulação de uma representação conceitual sobre o assunto de forma mais geral e não somente

restrita às primeiras experiências. A ideia aqui é procurar explicitar relações que ocorrem no espaço urbano e que, com o tempo, levam ao processo de transformação espacial e de uso do solo.

Um ponto importante desse fenômeno é a existência de relações socioeconômicas entre essas atividades influenciando não só a sua localização, mas também outras áreas que lhe são complementares. Essa influência mútua acaba por interferir na estrutura da cidade através da geração de fluxos de transporte de pessoas e mercadorias que são chamadas de interação espacial.

Os estudos ligados aos modelos de interação espacial têm tratado desse fenômeno desde a década de 60 aplicando sobre a cidade teorias ligadas à lei gravitacional de Newton¹. A noção de atratividade entre áreas urbanas é trabalhada a partir de deslocamento de pessoas e mercadorias entre áreas que exercem atividades complementares (Wilson, 1961).

O espaço torna-se, portanto, o mediador entre as atividades complementares permitindo que elas “funcionem” a partir de duas importantes características: ligação e estoque construído. Os elementos de ligação como vias e espaços abertos permitem o transporte e fluxos entre as áreas com relações funcionais; o estoque construído é o conjunto de edificações propriamente dito onde ocorrem as atividades. A combinação desses elementos básicos forma o padrão físico do espaço urbano onde as atividades ocorrem.

Se isso for colocado em termos relacionados ao universo da física, assim como nos modelos de interação espacial, pode-se dizer que as interações espaciais entre as atividades urbanas constituem “forças de atração” geradas por seus diferentes tipos de atratividade que atuam sobre o espaço.

A diferença de abordagem em relação a esses modelos clássicos é a decomposição da atratividade conforme cada atividade considerada no sistema e a concepção da construção da estrutura urbana como um processo dinâmico e contínuo. Ao invés de um espaço físico e

¹ As ciências sociais, por serem mais novas do que as chamadas ciências naturais se servem muitas vezes de conceitos relativos a disciplinas como a biologia, química e, no caso desse trabalho, da física.

distribuição das atividades como uma estrutura fixa, este trabalho considera uma unidade de tempo maior, tornando ambas mutáveis.

A transposição desses elementos, inicialmente ligados a teorias microeconômicas (Alonso 1961), para uma visão dinâmica da estrutura urbana e sua organização serve de base para uma reflexão desse processo, mesmo que, de certa forma, sua origem seja hoje considerada obsoleta.

Avanços importantes como a teoria sinérgica (Haken, 1983) e estruturas dissipativas (Prigogine, 1976) surgem com conceitos como bifurcação e caos delimitando uma nova visão da realidade que já não se encaixa em uma visão equilibrada e imutável da estrutura urbana. Essa passa a ser considerada em uma abordagem ligada aos sistemas complexos e à auto-organização.

Nessa linha de pesquisa, os estudos ligados à cidade levam em conta seu crescimento, mudança, padrões emergentes e, conseqüentemente, a novas ordens e estruturas, diferentes das anteriores. Aplicações têm sido feitas nesse sentido por Batty (2003), Allen (1997), Portugali (1997), Weidlich (2000), Benguigui, Blumenfeld-Lieberthal e Batty (2008), Feng J, Chen Y (2010), etc.

Pesquisadores têm trabalhado no sentido de desenvolver modelos que possam refletir características dinâmicas do sistema urbano. O modelo, sendo uma representação simplificada da realidade, permite a descrição e simulação de fenômenos urbanos de modo sistêmico. Esse processo ocorre no sentido de extrair do sistema urbano concreto as peculiaridades fundamentais de cada fenômeno estudado e inferir sobre relações existentes.

Ao retornar-se aos conceitos de interação espacial, atratividade e relações de complementaridade socioeconômicas, procura-se levantar as relações entre os elementos urbanos aqui citados a partir do ponto de vista de um sistema dinâmico. Dessa forma, será explicitado o modo como cada componente influencia e é influenciado pelos demais, como mudam e causam desequilíbrios levando a uma nova fase da estrutura urbana.

A definição sobre o que é a atratividade tem diferenças de acordo com cada abordagem de pesquisa. Nesse trabalho especificamente, a atratividade pode ser tanto positiva, quanto negativa para cada área e atividade ali localizada. A desagregação dessas atividades permite a abordagem onde as “forças incidentes sobre o sistema urbano” são diferenciadas de acordo com suas relações funcionais e localização.

Os “desequilíbrios” gerados a partir da modificação das “forças incidentes”, provenientes das relações de atratividade podem gerar um processo de competição pelas localizações mais atrativas já que o espaço urbano é um recurso finito e heterogêneo. Essa competição se dá de várias formas e a considerada mais básica é a capacidade de “oferecer renda” pela localização desejada.

Essa descrição tem suas referências primordiais nos já citados modelos baseados em teorias econômicas neoclássicas (Alonso,1964). A renda da terra, elemento importante nos primeiros modelos de localização, passa também a definir relações positivas ou negativas para a alocação de atividades. Em um processo de competição áreas ocupadas por atividades com maior capacidade de renda tornam-se muitas vezes negativas para outras consideradas menos abastadas.

Partindo dessa visão sobre a organização da estrutura urbana, constitui-se agora outra etapa: a descrição e formulação de um modelo que leve em consideração as relações dinâmicas aqui apresentadas. Esse propósito passa pela necessidade de abstração dos elementos constituintes do fenômeno da transformação espacial e de uso do solo urbano para que esse possa ser delineado e implementado.

No modelo POTENCIAT aqui desenvolvido o espaço constitui-se em células que oferecem o ambiente onde as quantidades discretas de atividades são alocadas. Essas atividades alocam-se no sistema em função de uma superfície de atratividade formada por sua própria atratividade, interação entre todas as atividades do sistema (atratividade positiva ou negativa), espaço disponível, acessibilidade e capacidade de competição.

Dessa forma, a estrutura do sistema, no que diz respeito à formação de comunidades, acessibilidade e distribuição de densidade se desenvolvem recursivamente ao longo de muitas iterações em um modo contínuo, gerando um movimento de “feedback” que pode trazer mudanças e desequilíbrios, causando transformação.

A reavaliação do sistema em cada iteração pode trazer a transformação da estrutura existente através da expulsão de atividades, fazendo com que elas se realoquem dentro de uma nova disposição espacial e superfície de atratividade diferenciada da anterior em um processo de

“path dependency²”. Dessa forma, apesar das mudanças, a “informação mútua³” entre estados consecutivos do sistema permanece.

A construção de um modelo teórico, bem como de sua formalização matemática e operacionalização através de um algoritmo capaz de gerar simulações onde a conceitualização da dinâmica de evolução sócio-espacial constitui matéria necessária para a fundação dessa tese de doutorado. Ainda assim, esse propósito não seria alcançado de forma eficiente, sem que os resultados sejam ser validados de alguma forma. Há variadas formas de validar resultados de simulações feitas a partir de modelos computacionais, sendo as principais, as seguintes:

- A) Correlação com dados empíricos: essa é a situação clássica em que a simulação é feita com dados extraídos de uma situação real conhecida e seus resultados comparados com dados da evolução efetivamente experimentada pelo sistema real tomado como caso.
- B) Uso de indicadores: esse é o caso em que indicadores já existentes e testados em diversos casos reais e comparados entre si, com o objetivo de obter um quadro seguro quanto à variação de cada indicador, são aplicados nos resultados das simulações e comparados com o desempenho esperado de cada indicador.
- C) Uso comparativo de modelos simulatórios: nesse caso, os resultados dos modelos são comparados com resultados de outras simulações feitas sobre o mesmo sistema de interesse e devidamente validadas. A construção de cada modelo certamente é resultado de núcleos lógicos diferenciados, mas, como se referem aos mesmos objetos de estudo, deverão apresentar comportamentos emergentes.

A opção escolhida nesse trabalho é a segunda e se justifica por duas principais razões principais: o estágio do desenvolvimento do modelo e a contribuição da formulação de indicadores para a análise urbana.

² “Path dependency” explica o modo como uma série de decisões é limitada por decisões anteriores (Krugman, 1996).

³ Informação mútua: semelhanças configuracionais entre diferentes estados em um sistema auto-organizado (Shannon, 1948).

Em função de o modelo ter sido desenvolvido integralmente pela autora, tendo como base conceitos abstratos e um entendimento conceitual do fenômeno até aqui não suficientemente explorado, sua formulação é ainda experimental e não se presta inteiramente à experimentação empírica. Para realizá-la seria necessário que o modelo estivesse em um estágio mais avançado de seu desenvolvimento, de forma a torná-lo capaz de responder a variações de muitos parâmetros que sequer estão considerados no modelo teórico.

Além das razões expostas acima, a escolha pelo desenvolvimento de indicadores de desempenho socioespacial urbano se dá em função do grande interesse e desenvolvimento na área. Vê-se aí uma oportunidade de vincular seu estudo na dinâmica dos sistemas urbanos a novos indicadores que têm sido descritos recentemente na literatura e ainda demandando contribuições para seu desenvolvimento.

1.2 HIPÓTESE

Nesse trabalho a considera-se que a cidade se transforma continuamente por força das ações de atração e repulsão que atividades exercem umas sobre as outras, tendo o espaço como mediador. Segundo essa hipótese essas relações socioeconômicas agem como “forças incidentes” sobre o sistema urbano podendo ser causa de variações em sua estrutura.

A formação da estrutura urbana é concebida, não apenas através de características físicas, mas também funcionais delineando um contínuo jogo de mudança, assimilação e “feedback” no sentido de manter, modificar ou excluir o padrão espacial e/ou de uso do solo vigente.

A introdução de uma nova atividade desencadeia reações sob forma de novas forças de atração e repulsão que influencia as demais, principalmente as mais próximas, provocando modificações de comportamento em um processo de propagação que afeta todo sistema urbano.

Essas mudanças também podem ser provenientes de mudanças sociais e culturais, tecnologias de transporte, demanda de locais para novas atividades, etc. Na continuidade, a volumetria e a alocação de atividades aparecem como resultado dessas relações em constante transformação. A interação espacial, antes vista como meio de representação de dinâmicas de deslocamentos em uma paisagem fixa, passa agora a ser considerada como um importante elemento no processo na formação e transformação da estrutura urbana.

Nesse trabalho considera-se a cidade como um sistema dinâmico em constante transformação onde a estrutura urbana se forma ao longo do tempo através da interação das atividades e suas relações funcionais gerando potenciais de atratividade capazes de catalisar transformação espacial e de uso do solo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Tradicionalmente considera-se que a alocação de atividades e as relações de atratividade são elementos importantes dentro do processo de formação e transformação da estrutura urbana ao longo do tempo.

Mesmo se tratando de um conceito já trabalhado exaustivamente dentro dos estudos relacionados à cidade, procura-se aqui lançar outro olhar sobre o fenômeno a partir da concepção de um sistema urbano dinâmico com a formação de padrões de ocupação que emergem a partir das relações funcionais, espaciais, atração e repulsão entre atividades urbanas.

Esse trabalho se justifica na medida em que procura examinar o tema pela desconstrução dessas relações de atratividade. Dessa forma, cada atividade tem sua própria atratividade construída a partir da influência que, primeiro, cada uma pode exercer sobre suas iguais e, segundo, as demais atividades exercem sobre ela. Os conceitos aqui levantados servem de base para a elaboração de um modelo de crescimento urbano que permita o estudo mais minucioso destas relações.

1.4 OBJETIVOS

Esse trabalho procura abordar o fenômeno da transformação espacial e de uso do solo procurando levantar quais processos da dinâmica urbana são relevantes para sua compreensão reunindo referências dos modelos neoclássicos com elementos dinâmicos tendo como base o conceito de auto-organização que têm influenciado a teoria urbana desde a década de 80. Nesse sentido foi construído um modelo teórico capaz de simular a dinâmica espacial urbana a partir de alocação de atividades e monitoramento de forças socioespaciais assim geradas.

Com essa abordagem procura-se construir e testar um modelo de representação da dinâmica espacial urbana baseado num sistema de forças de atração e repulsão emitidas e recebidas pelas atividades urbanas influenciando sua alocação e permanência em um sistema que evolui constantemente.

O Modelo POTENCIAT parte de um mapeamento de atratividade intra-urbanas e, a partir disso, procura elencar e desenvolver critérios para a simulação da dinâmica de transformação espacial e de uso do solo.

1.4.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- A) Formular um modelo conceitual que explique a mudança espacial a partir da relação espaço-funcional entre atividades urbanas.
- B) Formalizar matematicamente esse modelo.
- C) Construir um algoritmo que permita simular a dinâmica espacial urbana em questão.
- D) Investigar a validade dos resultados desse modelo a partir do uso de indicadores que possam definir características sistêmicas e sócio-espaciais urbanas.

2 ARCABOUÇO TEÓRICO

Esse capítulo tem por objetivo descrever e discutir a base teórica para a compreensão do fenômeno de Transformação Espacial e de Uso do Solo aqui relatado e para o desenvolvimento de um modelo matemático de simulação dessa dinâmica a ser descrito no capítulo 3.

Como já dito, a interpretação do processo foi concebida a partir de uma prévia formação acadêmica e de pesquisa dentro da área dos sistemas configuracionais urbanos. As relações levantadas não são somente espaciais e morfológicas, mas também pertinentes às funções que se distribuem no território urbano.

Serão apresentadas teorias relacionadas aos processos de classificação de atividades, competição por espaço e interação espacial. Essas serão consideradas dentro de um contexto ligado as teorias da complexidade e auto-organização para que esses conceitos possam ser vistos dentro de um ambiente dinâmico com propriedades emergentes e comportamentos inesperados.

2.1 ESTRUTURA URUBANA⁴, ATIVIDADES E INTERAÇÃO ESPACIAL

As atividades urbanas resultam da iniciativa de indivíduos e grupos de pessoas que buscam satisfazer necessidades individuais e/ou coletivas. Essas atividades procuram seu lugar no “casco espacial urbano” formado por vias, espaços abertos, edificações, etc.

A vizinhança de uma localização consiste de todas as demais localizações que podem influenciá-la, tanto por proximidade espacial como por relações funcionais remotas. A interação e alocação das atividades fazem parte da estrutura urbana ao longo do tempo através da ocupação do espaço ou de relações que se estabelecem e passam a interagir com outras pré-existentes, assumindo um comportamento sistêmico⁵.

Considera-se que cada atividade é alocada segundo suas necessidades espaciais e de interações funcionais necessárias à sua existência. Cada atividade alocada no espaço possui uma área de influência que define o impacto a ser gerado por sua inclusão no sistema.

Desse modo, as relações entre as atividades urbanas não são consideradas somente a partir de suas relações espaciais, mas também funcionais e não necessariamente em áreas vizinhas. Essa abordagem traz em si o conceito de dependência espacial e o de espaço próximo, ou seja, “a qualidade de uma localização relativamente a outras localizações” (Couclelis, 1997).

2.1.1 *DEPENDÊNCIA ESPACIAL*

Generalizando, pode-se afirmar que a maior parte das ocorrências, sejam estas naturais ou sociais, apresentam entre si uma relação que depende da distância. Em função disso, outro conceito importante a ser definido são as noções de “espaço absoluto” e “espaço relativo” Abler, Adams e Gould (1971).

⁴ O termo estrutura urbana se refere não só à configuração espacial de uma cidade mas à forma como seus componentes interagem em função das diversidade de atividades sócio-econômicas que ali se desenvolvem diariamente gerando padrões de funcionamento e às complexas relações decorrentes destas atividades distribuídas no espaço urbano (Christofoletti, 1998).

⁵ Um sistema é um grupo de partes que interagem funcionando com um todo, e distinguível de seus arredores por limites reconhecíveis. O funcionamento do sistema depende tanto da natureza quanto do arranjo de suas partes e usualmente se modifica se componentes são adicionados, removidos ou rearranjados como ocorre com a estrutura urbana a partir do processo de alocação de atividades sócio-econômicas (Christofoletti, 1999).

“Espaço absoluto” contém objetos que estão indexados localmente em termos de uma coordenada fixa do sistema (tipicamente latitude e longitude). A localização de um objeto não é afetada pela adição ou remoção de outros objetos.

A ideia de “espaço relativo” traz a concepção do espaço como uma série de relações entre os objetos: as relações entre os objetos definem o espaço. No conceito de espaço próximo as características mais significantes de uma localização não são aquelas ligadas ao local por si mesmo, mas aquelas que resultam de uma relação com a estrutura espacial global.

2.1.2 USO DO SOLO

A organização⁶ das atividades no território urbano gera os padrões de ocupação que são chamados *uso do solo*⁷. Normalmente essa distribuição de atividades é analisada “*a posteriori*”, ou seja, como resultado de um processo. Ainda que surjam tecnologias como os SIG⁸ que permitem a inclusão de um grande número de dados geográficos, essas características têm sido trabalhadas predominantemente como análises de estado, tanto presentes quanto passadas.

Para Briassoulis (2000), mudança de uso do solo “... significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo...”. Ela pode envolver a conversão de um uso em outro, ou modificação de tipo já existente, tais como mudanças de áreas residenciais de alto para baixo padrão (sem alteração física ou quantitativa dos edifícios), etc.

Nessa pesquisa considera-se o uso do solo não só como resultado de um processo de intenções individuais, mas também como um *catalisador*⁹ de mudanças em virtude das relações contínuas que são geradas. Ou seja, pequenas inserções de uma atividade podem chegar a afetar

⁶ Organização é considerada como as relações que definem o sistema como uma unidade, e determinam a dinâmica de interação, coordenação, cooperação, comunicação e transformação a que este pode estar sujeito, constituem a organização de um sistema. (Prigogine,1977)

⁷ Designação genérica dos tipos de atividades sociais desenvolvidas no espaço urbano. A noção de tipo é adotada aqui para reduzir a grande variedade de atividades sociais, individuais e em grupo, praticadas na cidade e, assim, propiciar formas classificatórias manipuláveis.

⁸ Sistemas de Informação Geográfica

⁹ Catalisador é toda e qualquer substância que acelera (Catalisador Ativador ou Acelerador), retarda (Catalisador Passivador) ou impede (Catalisador Veneno) uma reação química, diminuindo ou aumentando a energia de ativação, diminuindo ou aumentando a energia do complexo ativado, sem ser consumido, durante o processo da reação química. Um catalisador normalmente promove um caminho (mecanismo) molecular diferente para a reação (<http://quimica.ufsc.br/minatti>).

grandemente o curso de evolução do sistema urbano tanto localmente, quanto o território como um todo.

Essa mudança de postura leva à necessidade da compreensão do processo que leva à transformação espacial e de uso do solo e não somente de seu resultado final. Cada atividade alocada possui sua própria atratividade e influencia o sistema através de relações positivas ou negativas em relação às demais, assim como é por elas influenciada pelos processos de *interação espacial*.

2.1.3 INTERAÇÃO ESPACIAL

O conceito de interação espacial considera que as cidades são formadas por elementos distintos (seres humanos, mercadorias, informação, etc.), que estão distribuídos e se movimentam pelo espaço, se comunicam entre si, atraem-se e afastam-se mutuamente (Wilson, 1970). Isto torna possível a importação de um conceito do universo físico, para tratar das várias influências existentes entre áreas diferenciadas (regiões, cidades, bairros, etc.).

Dessa forma pode-se dizer que as relações estabelecidas entre as atividades urbanas são definidas não só por suas necessidades individuais, mas também de seus relacionamentos funcionais e espaciais agindo sobre a estrutura espacial da cidade de forma coletiva. A existência de tais interações define que o comportamento de um elemento é diferente de seu desempenho em outra relação.

São chamados modelos gravitacionais, quaisquer modelos que expressem interação entre dois lugares a partir de uma função que relaciona o tamanho dos dois locais e a distância entre eles.

As populações são multiplicadas para se chegar ao número de pares possíveis de interação (complementaridade potencial) entre os dois locais. O produto obtido entre as populações é dividido pela distância, pois a possibilidade de existir interação espacial (fluxo de pessoas, mercadorias e informação) entre os dois locais considerados é inversamente proporcional à distância existente entre eles. Não é estritamente necessário que a distância seja elevada ao quadrado, pode-se utilizar qualquer valor exponencial α :

Equação 1. Equação Geral de Interação Espacial¹⁰

$$I_{ij} = k P_i P_j / d_{ij}^a$$

$$I_{ij} = k P_i P_j / d_{ij}^{-a}$$

Onde:

I = Interação Espacial

P = População dos locais i e j

d = distância entre i e j

k = constante

Hoje existem vários modelos de transporte que se valem dos princípios do modelo gravitacional para prever fluxos urbanos e impactos dos meios de transporte. Segundo Wegener (2004), a maioria dos modelos considera uma utilidade aleatória ou a teoria da escolha discreta para explicar e antecipar o comportamento de agentes como investidores, populações residentes, firmas e viajantes.

Essa linha de modelos utiliza algoritmos para a simulação dos processos de fluxos de bens e pessoas, apresentando bons resultados quando defrontados com a realidade. As alterações da estrutura urbana ocorrem através da derivação de viagens e da necessidade de reduzir as distâncias entre elas. A distribuição e melhoria da infraestrutura em transporte criam novas oportunidades de interações espaciais que podem ser medidas como acessibilidade do sistema. Por conseguinte a acessibilidade direciona as decisões de alocações de atividades causando mudanças no sistema urbano¹¹.

2.1.4 CLASSIFICAÇÃO DAS ATIVIDADES

Um processo urbano dinâmico pode ser descrito como o crescimento do número de firmas e residências localizadas em uma cidade. Em qualquer período as firmas localizadas em uma cidade são “seguidas” por novas residências em resposta ao aumento de demanda por trabalhadores.

O território, nesse caso, tem efeito sobre as diferentes redes onde as atividades urbanas participam e também é afetado por esse processo. Esse conceito é apropriado nesta pesquisa

¹⁰ Fonte Wilson (1970)

¹¹ A maioria dos modelos relacionados a essa área são modelos de simulação recursiva e considerados “quase-dinâmicos”, pois provém de consecutivas análises de estado a partir da observação de toda a população estudada ou uma parte significativa dela (Wegener,2004).

para que seja possível a construção de uma nova representação do processo de transformação espacial e de uso do solo urbano levando-se em conta as relações de atratividade de forma desagregada.

As classificações das atividades urbanas, como consideradas no campo da geografia, servem de base para a definição da influência de cada atividade sobre as demais. Além disso, essa classificação influencia nas relações de crescimento que são fundamentais para a evolução da estrutura e transformação espacial e de uso do solo.

O peso da ação da atratividade de cada atividade sobre as demais levará em conta a classificação desta dentro do sistema urbano estudado. Como primeira forma de classificação, tem-se a separação das atividades em dois setores: exportação, que corresponde a uma demanda externa, e local, que corresponde a uma demanda interna. A atividade local (muitas vezes chamada residencial, de serviço e não-básica) é considerada como sendo dependente da atividade de exportação (chamada de básica) e, além disso, sendo proporcional a esta.

Considerando este modelo econômico para o sistema urbano, considera-se que o peso de uma atividade considerada básica deverá ser maior do que o considerado para uma atividade local. Seguindo este mesmo raciocínio, uma atividade considerada básica deverá possuir uma posição mais alta na hierarquia de localização em relação às demais atividades que dela dependem.

Segundo Krugman (1997), as demais firmas são dependentes destas atividades e apresentam comportamento ligado à teoria de localização e economia de aglomeração¹² formando relações dependência espacial na estrutura urbana.

Uma combinação entre estas duas formas de se ver as relações espaciais (considerando a distância e o peso de cada objeto do sistema em relação aos demais) resulta em uma análise de dependência e em um sistema hierárquico.

Tal sistema é caracterizado por inter-relações funcionais e isto acaba por refletir-se em interdependência espacial. As relações funcionais e espaciais são importantes na decisão de

¹² A aglomeração de firmas propicia retornos crescentes no nível da produção, o que diminui o custo de transporte. Por isso é vantajoso concentrar a produção de determinados bens em algumas localizações. (Krugman, 1997).

localização de todas as atividades urbanas. Essas escolhas ocorrem em um território limitado e heterogêneo, fato que nos leva a inferir que certas vantagens podem interessar a diversos tipos de atividades gerando um processo de competição.

2.1.5 PADRÕES DE OCUPAÇÃO E COMPETIÇÃO

A oferta de espaço urbano é limitada e diferenciada pelas características da localização. Entre essas são citados os fatores físicos (como o relevo), a localização de determinada área em relação à rede de serviços e utilidades públicas e a tecnologia do sistema de transporte.

Tais diferenças irão se refletir nas vantagens relativas de áreas urbanas para o desenvolvimento de atividades e poderão gerar um processo de competição pelo espaço disponível. Diversos tipos de atividades sócio-econômicas podem encontrar vantagens em locações na mesma área urbana porque fatores de produção necessários ao seu desenvolvimento estão ali acessíveis.

“O padrão de ocupação de uso do solo em cada área urbana é um reflexo da competição por locais, entre vários usos operando através do sistema de preços (Goodall, 1974)”.

Estas afirmações sugerem que existem diferenças na capacidade das firmas para manter e competir pelas facilidades oferecidas por locais particulares da cidade. Cada firma terá que ser capaz de pagar um preço maior pelas características de um determinado local que seja desejado por outros concorrentes.

Classicamente, os economistas têm trabalhado a questão da modelagem urbana relacionando de forma incipiente o fluxo de mercadorias e a localização das atividades econômicas. A questão do espaço é ignorada ou introduzida em um nível alto de agregação (usualmente regional).

No âmbito desses modelos a escolha de localização residencial feita pelas famílias se dá a partir de possíveis combinações de três espécies de bens: bem composto, consumo de espaço e distância do centro da cidade (localização) considerando-se um espaço uma planície isotrópica

onde as diferenças de localização são reduzidas a uma única variável: distância do centro de negócios (CBD¹³), onde se encontram as ofertas de trabalho e o acesso aos bens compostos.

Intuitivamente pode-se dizer que, quando a distância aumenta, o rendimento familiar líquido é reduzido em função do aumento das despesas com deslocamento. Se o nível de satisfação da família deve permanecer o mesmo, cria-se necessariamente uma redução na oferta de renda por unidade de espaço à medida que a acessibilidade reduz.

Alonso (1961) procura detectar os mecanismos de coordenação econômica que garantem a distribuição não aleatória dos indivíduos sobre o solo urbano. As trocas neste caso decorrem da livre escolha dos agentes e a configuração espacial é o resultado agregado e coordenado pelo mercado das escolhas de cada um concorrendo pelo solo urbano.

Destaca três maneiras de utilização do espaço a partir de três tipos de usuários com funções e objetivos distintos:

- uso agrícola do solo: visa a produção de bens agrícolas para o mercado;
- empresa: utiliza o espaço para produção, estoque e/ou venda de produtos;
- famílias: utilizam o solo como local de moradia.

Estas três classes de consumidores de espaço deverão maximizar suas funções e estabelecer uma concorrência por espaço e localização. Essa situação leva a uma maneira particular de confronto de mercado: de um lado têm-se três tipos de usuários que “disputam” as localizações no mercado onde cada um vai declarar suas intenções de localização e o preço oferecido por elas, e do outro, a figura do “proprietário ausente” que atua como um “juiz” que vai escolher a mais alta oferta de renda a fim de maximizar o próprio interesse.

A concorrência espacial é estabelecida com base nas intenções de localização representadas pelas curvas de ofertas de renda feita por cada tipo de família. A partir de um processo de competição e chegada ao equilíbrio cada localização a oferta de renda que seja superior às outras será considerada como sendo o uso mais eficaz do solo.

¹³ Central Business District

As abordagens da Nova Economia Urbana¹⁴ e dos Modelos de Interação Espacial constituem duas formas complementares para a análise da estrutura espacial urbana, principalmente em um nível alto de agregação.

Ambas se baseiam em relações econômicas (apesar dos modelos de interação espacial incluir a variável funcional à análise), e partem do pressuposto baseado na teoria econômica Neo-Clássica: quando os diversos componentes da estrutura urbana passariam a interagir uns em relação aos outros, restringindo as possíveis modificações de cada um, chegando a um estado de equilíbrio do sistema.

Segundo Abramo (2001) outra limitação é a impossibilidade de lidar com as externalidades e racionalidade imperfeita dos agentes de decisão. As externalidades podem ser consideradas a partir de fatores como economia de aglomeração e impactos ambientais.

Nas últimas décadas, pesquisadores têm olhado as propriedades do sistema urbano dentro de uma abordagem dinâmica onde o desenvolvimento socioeconômico está também condicionado pela história econômica e às transformações ao longo do tempo na cidade e na região. Segundo Krugman (1997), a partir das condições iniciais têm-se a capacidade de incorporar tecnologia e meios de produção e a geração de aglomeração de bens e serviços trazendo alterações ao sistema.

No momento em que a estrutura da cidade atinge seu limite de ocupação, algumas firmas tendem a procurar novas localizações potenciais para expandir seu mercado. A localização de empresas em cidades e regiões está sujeitas a duas forças:

- A força centrípeta que promove a aglomeração devido à presença de *atratores*;
- A força centrífuga que dispersa e descentraliza a localização de firmas devido a “deseconomias de escala¹⁵”.

Por esse motivo, considera-se que a estrutura urbana permanece em constante evolução e desenvolvimento, ao contrário dos pressupostos dos modelos neoclássicos de localização.

¹⁴ A chamada Nova Economia Urbana foi fundada no final da década de 60 e início dos anos 70, do século XX, como a representante da síntese neoclássica na economia urbana.

¹⁵ As chamadas deseconomias de escala, são os prejuízos causados ao espaço decorrentes do processo de aglomeração, como por exemplo, tráfego congestionado, ausência de áreas para ocupação, poluição do ar, visual, etc. (Krugman, 1997).

Estudos ligados à economia têm focado sua atenção na análise espacial de contextos regionais e urbanos. Neste campo de estudo chamado de geografia econômica, destacam-se os trabalhos de Krugman (1991, 1996 e 1997) e Krugman, Fujita, e Venables (1999) que são componentes da Escola da Nova Geografia Econômica que trata da localização da produção no espaço, ou seja, onde as atividades acontecem e as relações entre os agentes.

A Nova Geografia Econômica também tem utilizado as teorias formuladas em outros campos da economia, como a teoria do crescimento econômico endógeno e da economia internacional (Romer, 1986). Além disso, Krugman (1996, 1997), Krugman, Fujita, e Venables (1999) fazem uso da teoria da complexidade¹⁶ e auto-organização na análise da Nova Geografia Econômica, para inserir de forma mais profunda a questão espacial em seus trabalhos.

2.2 DINÂMICA DE TRANSFORMAÇÃO ESPACIAL E DE USO DO SOLO

O conceito de interação espacial oferece um modelo abstrato abrangente, no qual a cidade é um campo de força em mudança, criado pela variação da distribuição das pessoas e das outras unidades que se atraem ou se afastam, possuindo todos os aspectos físicos de tensão, velocidade, massa, aceleração, distorções, ondas de choque, etc.

Mesmo que a princípio, a ideia de interação espacial esteja ligada a um universo mecanicista e de teorias econômicas neoclássicas, considera-se que esse processo é parte da dinâmica da formação da estrutura urbana agindo como “forças” de manutenção ou de transformação da ordem urbana. Essa surge a partir de um processo evolutivo contínuo apresentando *propriedades emergentes do sistema*¹⁷. Essas propriedades decorrem de alterações das relações entre os componentes da estrutura urbana a partir da alteração de interdependência sócio-econômicas entre áreas da cidade.

Tecnologias relacionadas a transporte ou a formas de produção são particularmente importantes neste tipo de evolução e podem ocasionar mudanças radicais, levando o sistema urbano além de seus limites e a um estado crítico que o força a atingir outro nível de auto-

¹⁶ Frequentemente relacionada à teoria da auto-organização a teoria da complexidade pode ser definida como: interações críticas entre os componentes que se auto-organizam para formar estruturas, que evoluem exibindo uma hierarquia de propriedades emergentes do sistema (Christofoletti, 1998).

¹⁷ Propriedades emergentes de um sistema: propriedades que não sejam consideradas como primárias ao sistema e surjam como resultado da interação entre seus elementos componentes (Christofoletti, 1998).

organização. A história nos mostra isso quando se observa o caso das transformações ocorridas nas cidades industriais no século XIX.

O fenômeno de transformação espacial e/ou de uso do solo urbano pode ser considerado como coevolução, ou seja, um processo evolucionário que surge da interação entre componentes de espécies diferentes em um mesmo sistema. Este processo evolui através de fenômenos que dependem do tempo (time-dependency), e sua história anterior (path-dependency) criando propriedades para o espaço que emergem formando diferentes padrões que, por sua vez, irão influenciar as decisões futuras.

O que nota-se é que sob qualquer ponto de vista, cidades apresentam ordem, padrões, emergência, inovação e surpresas em seu desenvolvimento. O fato de esses processos apresentarem contínua evolução sugere que, ao se descrever e simular a cidade a partir de modelos estáticos que tem como base um estado de equilíbrio, mantém-se a análise urbana em um estágio limitado.

Esta abordagem considera que as cidades e as regiões podem ser consideradas como um sistema aberto. Seu desenvolvimento e crescimento ocorrem de um modo imprevisível e caótico, ou seja, o sistema urbano e regional tem a capacidade de se auto-organizar¹⁸ após receber um estímulo, sem apresentar um comportamento pré-definido.

Ao invés de evoluir simplesmente através do espaço de uma paisagem com estrutura determinada e fixa, as interações entre as populações realmente criam e modificam a paisagem através de sua localização. Dessa forma considera-se que, em uma paisagem adaptativa, as vantagens são geradas pela interação entre as diferentes populações do sistema em um processo de competição por áreas favoráveis à sua alocação.

2.2.1 ATRATORES

A complexidade da realidade permite representá-la de forma completa, pois ela inclui todos os detalhes de cada um dos componentes, assim como todas as percepções e todos os pontos de vista a seu respeito. Na busca da compreensão de seus processos, o sistema urbano é

¹⁸ Todo sistema que assuma uma forma que não seja imposta por forças externas pode ser considerado auto-organizado (Prigogine, 1977).

classificado em componentes e procura-se estabelecer relações que capturem os fenômenos que ordenam e mantêm a estrutura ao longo do tempo. Dentro desse conceito, componentes básicos da estrutura urbana são os *atratores* que regem a dinâmica socioeconômica em ambiente urbano.

O macro-sistema urbano, por se tratar de um sistema complexo, pode ter muitos *atratores*. Estes podem se alterar com mudanças nas interconexões entre os componentes do sistema, de suas propriedades ou das regras estabelecidas. Pode-se citar dois conceitos sobre *atratores* de um sistema:

O primeiro se refere, às edificações que abrigam funções capazes de gerar atividades e deslocamento de pessoas e mercadorias (atratividade). O processo de atração ocorre diariamente através do fenômeno de interação espacial e normalmente como um fenômeno de duplo efeito: as áreas que atraem pessoas durante o dia, as expulsam durante a noite e vice-versa.

A transformação de uso do solo modifica a posição, o número e, muitas vezes, o caráter dos *atratores* do sistema urbano gerando novas interações espaciais. Ao mesmo tempo a forma como a estrutura urbana está configurada traz em si “indicadores de localização” para os referidos *atratores*, através de elementos como o acesso aos clientes ou facilidades de produção das mercadorias por uma determinada firma, acesso aos equipamentos urbanos para atividades residenciais, etc.

O segundo conceito se refere a um estado determinado para o qual o sistema tende a se dirigir. Neste caso trata-se da formação da estrutura urbana ou à sua modificação, gerada pelo processo de alocação de atividades que podem se dar através da implantação de uma nova atividade em uma determinada área, alteração de localização de uma determinada atividade etc..

As novas interações entre os componentes do sistema urbano causadas pelas modificações sócio-econômicas ou simplesmente resultantes do contínuo funcionamento da cidade criariam o que daqui por diante se chamará de “tendência de estado”, ou seja, um estado para a qual o sistema urbano provavelmente irá evoluir. Esta tendência depende de fatores como o estado inicial do sistema, as regras a serem seguidas por seus componentes, e a intensidade de ocorrência dos fatores causadores da sua mudança de estado.

O estado do sistema urbano é percebido pelos agentes que irão praticar uma ação sobre o sistema baseado nas informações¹⁹ disponíveis. Segundo a teoria econômica evolucionista, estas informações nunca são completas e perfeitas, mas possibilitam apenas uma visão parcial do sistema trazendo um grau de incerteza sobre o resultado exitoso das ações praticadas pelos agentes.

Tem-se então, uma série de níveis de organização urbana que surgem das mais elementares formas de dependência entre atividades econômicas e vão alcançando níveis cada vez mais complexos até que resultem na estrutura espacial urbana global.

2.2.2 ESTRUTURA EM REDES

Na definição do espaço relativo, as relações espaciais e funcionais estabelecidas são consideradas mais importantes do que o espaço em si mesmo. Dessa maneira, as atividades urbanas a partir do momento em que se localizam no espaço criam novas interações espaciais que acabam por gerar novas propriedades emergentes dos subsistemas.

Dentro dessa definição considera-se que as relações topológicas²⁰ estabelecidas influenciam a formação e a transformação de subsistemas que regem a modificação espacial e de uso do solo urbano. As relações estabelecidas entre as atividades urbanas assumem um caráter interligado com a formação de redes que interagem umas com as outras em um processo contínuo da evolução da estrutura urbana.

Ao estabelecer-se o conceito de espaço interativo, relações de vizinhança, influência e dependência espacial, a perspectiva de redes surge naturalmente no processo de formulação da base teórica desse trabalho.

As propriedades emergentes dos sistemas urbanos surgem através da formação de redes complexas onde se enfatizam as relações estruturais que muitas vezes são mais importantes para

¹⁹ Informação: pode ser definida como o que modifica ou reduz a incerteza de um sistema. Informação pode ser considerada como o diferenciador entre duas formas de organização ou entre dois estados de incerteza (antes e depois da mensagem ter sido recebida) e também como o grau com que uma variável do sistema depende ou é limitada por outra (Shannon, 1948).

²⁰ Topologia é um processo matemático para definir explicitamente relacionamentos espaciais; Para mapas a topologia define conexões entre entidades, identifica polígonos adjacentes. Refere-se a continuidade do espaço e propriedades espaciais, como conectividade. Estas propriedades não são afetadas quando distorcidas (mudança de sistema de projeções). As principais relações topológicas são: Conectividade, Circunscritividade, Contigüidade e Orientação (NOOY, MRVAR, BATAGELJ 2005).

entender comportamentos observados do que atributos como tipo de atividade, quantidade, etc. As explicações da estrutura relacional podem sobrepujar a análise de atributos individuais e estáticos no que se refere aos padrões de comportamento.

As redes urbanas afetam as percepções e ações através de “mecanismos estruturais” construídos social e economicamente pelas relações entre as entidades provocando um processo dinâmico.

Esse princípio reconhece que redes urbanas não são estruturas estáticas, mas continuam evoluindo ao longo do tempo, relacionando os comportamentos que se dão em um micro nível chegando a transformar o macro nível e a ordem urbana. Em alguns casos as redes apresentam estruturas intermediárias nas quais alguns elementos apresentam mais conexões que outros

Em resumo, a cidade e conjuntos de cidades constituem organizações das redes de atividades em sua forma física, temporal e historicamente funcionando como mecanismos de coordenação social. A organização das relações sociais e econômicas torna-se, assim, um conceito básico de fenômenos sociais que não existem no nível do ator individual. No caso do modelo POTENCIAT, a configuração espacial urbana se dá através da concepção de subsistemas e toda a sua variabilidade.

Os fenômenos de transformação espacial que ocorrem de maneira microscópica na cidade provocam pequenas modificações em sua ordem geral através do fortalecimento, enfraquecimento ou da inclusão de novas relações sócio-econômicas entre as diversas áreas urbanas.

Pode-se dizer então que, dentro contexto global do macro-sistema urbano, ocorre muitas possibilidades de estados locais diferenciados que gerariam subsistemas urbanos a partir de relações funcionais e espaciais.

No que concerne à evolução dos sistemas, as mudanças normalmente passam por um processo de crescimento, redução ou declínio que pode aparecer em um sistema como comportamentos inesperados e emergentes (Batty, 2003). As transformações ocorridas em subsistemas urbanos a partir do processo de alocação de atividades sócio-econômicas urbanas podem ser as seguintes:

- **Fortalecimento:** quando atividades relacionadas aos sub-sistemas são atraídas para as áreas das quais ele faz parte ou se intensifica o uso do solo com os mesmos tipos de atividade, potencializando as relações de complementaridade sócio-econômica já estabelecidas.
- **Enfraquecimento:** quando atividades sócio-econômicas sofrem processo de desativação a partir de redução de demanda.
- **Deslocamento:** quando ocorre deslocamento de atividades sócio-econômicas para áreas que ofereçam maiores vantagens locacionais para estas funções ou são “expulsas” de locais que já abriguem ou passem a abrigar atividades incompatíveis com o subsistema analisado. Esta característica do sistema está intimamente ligada à competição por espaços dentro dos limites urbanos.

Esse seria o resultado da interação entre os sub-sistemas, onde qualquer das situações citadas acima causaria instabilidade dentro da macro-estrutura urbana. Se esta instabilidade for suficientemente forte, poderia causar a re-adaptação desse e de outros sub-sistemas atingidos pela modificação do primeiro. Exemplos disso ocorrem quando uma localização modifica seu caráter original passando a abrigar atividades diferentes e, muitas vezes, levando à transformação espacial.

A desagregação do macro-sistema urbano em subsistemas facilita a calibração, a implementação, a adição e o teste de novas hipóteses, possibilitando uma flexibilização na análise do sistema urbano e regional. O que se pretende no presente estudo é sugerir uma forma de análise da estrutura urbana que se valha de processos de desagregação para a descrição de níveis mais elementares de organização espacial, unindo os conceitos ligados às teorias clássicas de localização de atividades às teorias da complexidade e auto-organização.

2.2.3 PARÂMETRO DE ORDEM

A alocação e interações entre as atividades sócio-econômicas desencadeiam um processo de “feedback” que se dá em vários níveis e que é considerado responsável pela formação da estrutura urbana, ao mesmo tempo em que sofre sua influência. As mudanças obedecem a padrões que são definidos através das “preferências dos agentes”, relações de complementaridade sócio-econômica, economia de escala e processos de interação espacial.

Estes fenômenos permanecem continuamente fluindo através do sistema urbano mantendo sua estrutura, ao mesmo tempo em que causam “desequilíbrios” provocando alterações. As mudanças se dão dentro dos limites físicos por ela impostos (malha viária, oferta de espaço disponível para a alocação de atividades) e sua forma de organização.

As decisões tomadas por cada agente estão sujeitas a uma série de fatores que regulam suas ações no espaço urbano como, por exemplo, a auto-regulação dos preços da terra, a demanda e a oferta por localidades com determinadas características e a compatibilidade ou incompatibilidade entre atividades com intenção de ocupar um mesmo espaço. Aspectos como a acessibilidade entre zonas e os processos de interação espacial também fazem parte deste fenômeno.

A sinérgica trabalha com conceitos como *atratores* comportamentais e modificações de estabilidade, compreensão de graus de liberdade de um sistema complexo em padrões dinâmicos e o surgimento de novas formas de estrutura através de fases de transição distantes do equilíbrio. Além de uma importante formação no campo da física, o trabalho de Haken se estendeu também para o estudo sobre a formação de padrões de comportamento psicológico e social, de cognição e percepção ambiental, sendo este último desenvolvido em conjunto com Portugali (Haken e Portugali, 1995).

Segundo Haken (1983) o sistema é governado por um certo número de variáveis coletivas que fazem surgir propriedades emergentes do sistema que podem ser detectadas pelo o “parâmetro de ordem”. Nos momentos de instabilidade muitas propriedades coexistem e competem entre si até que um “vence” e “escraviza” os componentes do sistema através de seu movimento.

Este processo chamado de “princípio de escravização” considera que sistemas complexos geram relações reprodutivas entre seus componentes escravizando seu movimento. Além disso, em alguns momentos a competição pode ser resolvida através da cooperação entre seus componentes.

As menores partes de um sistema produzem suas próprias propriedades emergentes; este é o mais baixo nível de características do sistema e produz seu próximo nível de estrutura. Os componentes do sistema, gerados através da interação das suas menores partes, por sua vez

produzem a construção do próximo nível de organização, com diferentes propriedades emergentes e este processo pode levar a um próximo nível.

Da mesma maneira, características de uso do solo são frequentemente associadas a diferentes fatores sócio-econômicos²¹ e atividades urbanas. Em virtude do caráter de interdependência dos componentes do sistema urbano estas atividades, a partir do momento em que se localizam em seu espaço, criam novas interações espaciais que acabariam por gerar novas propriedades emergentes dos sub-sistemas e, em um nível superior, alterar as propriedades do macro-sistema urbano.

Como dito acima, a teoria sinérgica é também utilizada na geografia urbana e regional relacionada aos estudos cognitivos considerando-se que a cidade é repleta de padrões, apesar de indivíduos conseguirem focalizar apenas alguns deles.

Estes são os mapas cognitivos da cidade que não aparecem somente em estudos de percepção ambiental. É de acordo com eles que indivíduos e firmas tomam decisões e agem na cidade. A formulação de mapas cognitivos através da abordagem da sinérgica tende a uma conceitualização que dá um peso maior ao ambiente externo e à representação cognitiva externa em si do que a convencionalmente atribuída em ciências cognitivas.

No trabalho “Computadores Sinérgicos e Cognição” (Haken,1991) apresenta a concepção de que o sistema cognitivo em geral e, especialmente o associado com mapas, excede os limites da mente individual até o ambiente externo (Portugali, 1996). Esta ideia está presente também nos trabalhos de Vygotsky (1978) e Gibson (1979). Portugali (1996) desenvolve a noção de IRN a partir destas ideias e considera que o sistema cognitivo pode ser visto como uma rede interna-externa, onde alguns elementos são representados internamente ou estocados no cérebro e outros são estocados ou externamente representados no ambiente externo.

Essa situação sugere a existência de um mosaico cultural urbano e sócio-econômico onde alguns parâmetros de ordem conseguem atrair a atenção de indivíduos governando a dinâmica de transformação do sistema. Este pode ser considerado como um “caos determinístico” (Portugali, 1997) que aparece quando muitas partes individuais são subitamente atraídas por

²¹ Padrões de uso do solo incluem nesta pesquisa as seguintes características: distância das residências ao centro urbano, tamanho do assentamento urbano, “mix” de uso do solo, densidade de desenvolvimento, distribuição de atividades.

uma quantidade pequena de *atratores* ou escravizadas por alguns parâmetros de ordem que podem muitas vezes ser caóticos do ponto de vista macroscópico.

Os diversos componentes competem entre si e somente um consegue escravizar o sistema e conduzi-lo a um novo estado, ou seja, diferentes grupos se apropriam de determinados espaços e, após uma competição entre vários grupos, o vencedor define uma nova ordem que pode ser identificada pelo parâmetro de ordem. Com isso, cria-se uma identidade do espaço urbano e regional e se forma a estrutura da cidade e/ou da região.

As novas informações internas ou externas incorporadas ao sistema cognitivo criam uma perturbação local de pequena escala e o surgimento de um pré-parâmetro de ordem. Isso tem como resultado a formação de uma ordem que conduz o sistema a um novo nível de organização. Esse processo é denominado cognição reprodutiva.

Por outro lado, se a nova informação derivada do sistema cognitivo não for incorporada pelo pré-parâmetro de ordem, pode ocorrer uma dissonância cognitiva, uma bifurcação, uma fase de transição e o surgimento de uma nova estrutura. Isso se denomina cognição bifurcativa (Portugali, 1996).

Portugali, Benenson e Omer (1994) considera que em uma cidade o processo de escravização é visível em casos de invasão-repulsão, invasão-sucessão, assim como no fenômeno da “gentrificação” (Smith, 1982), pois indivíduos “segregadores” preferem residir entre vizinhos de seu mesmo tipo.

Quando o sistema está próximo de uma bifurcação, existem ordens competindo entre si para conduzir o sistema a um novo estado. Somente uma é a vencedora. O parâmetro de ordem pode se revelar em instâncias como a distribuição das atividades sobre o solo, densidades diferenciadas, alocações de atividades e forma de ocupação.

O "parâmetro de ordem" neste trabalho surge da interação entre os diversos componentes de cada subsistema urbano (agentes, estrutura espacial, atividades sócio-econômicas e relações de complementaridade). Ele se materializa na localização das atividades desenvolvidas em cada subsistema e pode criar novas demandas espaciais causando a transformação da configuração do tecido urbano, no que se refere ao uso do solo e características das suas edificações.

2.2.3.1 DENSIDADE E PARÂMETRO DE ORDEM

Em um sistema complexo, considera-se que suas menores partes produzem suas próprias propriedades emergentes; este é o mais baixo nível de características do sistema e produz seu próximo nível de estrutura. Os componentes do sistema, gerados através da interação das suas menores partes, produzem a construção do próximo nível de organização, com diferentes propriedades emergentes.

As propriedades emergentes dos sistemas surgem a partir de mudanças que se manifestam de diversas formas. Entre elas cita-se a densidade de ocupação, que reflete a presença de atividades urbanas de uma determinada área de forma mais ou menos intensa e a maneira como as atividades diferenciadas se associam e co-existem.

Segundo Wilson e Dearden (2010), as transições de fase de sistemas físicos podem ser utilizadas para compreensão de sistemas urbanos de forma análoga, já que existem mudanças em passos discretos de sua evolução. Assim como em termodinâmica a densidade das moléculas da água são observadas na passagem do estado sólido, líquido e gasoso, a densidade de ocupação urbana também pode ser vista como parâmetro de ordem dos sistemas e sub-sistemas urbanos.

Essa definição se adéqua a esse trabalho, pois, além do modelo Potenciat evoluir em passos discretos, também toma como base conceitos da física como interação espacial, atratividade e ordem. Dessa forma as mudanças de fase²² que fazem parte do escopo da mecânica estatística podem servir de base para a construção de um método de pesquisa e análise comparando a mudanças discretas de cidades e regiões.

Fases de transição são comumente designadas estando entre um estado menos ordenado para um mais ordenado e o valor que caracteriza essa propriedade é conhecido como o parâmetro de ordem. Em termodinâmica, a mudança na temperatura da água pode trazer mudanças de fase facilmente detectadas como congelamento, descongelamento ou vaporização. A densidade nesse caso indica mudanças de fase, como se pode ver na tabela abaixo:

²² A fase é uma condição de homogeneidade das moléculas que aparece após uma situação de desorganização.

Tabela .1. Relação entre temperatura e densidade da água²³

| TEMPERATURA (°C) | DENSIDADE (kg/m ³) |
|------------------|--------------------------------|
| 100 (gasoso) | 958.4 |
| 25 (líquido) | 997.0479 |
| 0 (sólido) | 999.8395 |

A mudança de densidade é, portanto, uma indicação da mudança de fase da água, e pode ser utilizada como parâmetro de ordem do sistema já que a alteração do espaço existente entre as moléculas da água é uma característica que depende do seu estado e da energia aplicada sobre ele. Em função disso, a densidade é um resultado do processo que permite indicar a fase que uma substância se encontra, apesar de não influenciar diretamente na ação.

Da mesma forma, o crescimento do número de atividades alocadas a cada iteração define uma quantidade maior de energia aplicada sobre o sistema. Isso faz com que as áreas urbanas tenham que se re-ajustar a novas situações, inicialmente de forma discreta, podendo afetar a todo o conjunto.

O desenvolvimento da economia, localização de serviços públicos, inovação na alocação de postos de trabalho podem ser elementos de competição por espaço influenciando na decisão de alocação das atividades urbanas e densidades decorrentes, podendo demonstrar transições de fase, ou seja, a predominância de um sub-sistema sobre os demais, expulsão, atratividade, etc.

2.3 MODELOS URBANOS DINÂMICOS

As considerações até aqui relacionadas servem como base teórica para o desenvolvimento de um modelo que seja capaz de descrever e simular as mudanças internas ao sistema urbano²⁴ levando à transformação espacial e de uso do solo. Assim, as relações de interação e definição de subsistemas fundamentam a formulação de conceitos que transferem a descrição da estrutura

²³ A densidade da água em kilogramas por metro cúbico em várias temperaturas em graus Celsius.

²⁴ A Teoria de Sistemas postula a ideia de sistemas sendo descritos em termos de estrutura e comportamento, em termos de entradas e saídas, e a noção de controle intencional desses sistemas em termos de retroalimentações positivas e negativas (Bertalanffy, 1975).

urbana para um ambiente aberto, longe do equilíbrio permitindo uma abordagem diferente de sua origem, dentro da área de sistemas complexos.

Nas últimas décadas pesquisadores têm focado sua atenção na forma como as cidades evoluem, na dinâmica urbana e como os padrões são formados a partir de uma série de decisões individuais em um sentido “bottom-up”. Nessa área de pesquisa muitas vezes se vale da formulação dos conceitos estudados a partir de um modelo que pode ser entendido como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica, etc., e segundo uma ou mais teorias (Novaes, 1981).

O estudo de uma realidade introduz a necessidade de representá-la e manipulá-la de alguma maneira. *“Em essência, um modelo é uma representação da realidade. É normalmente uma declaração simplificada e genérica do que parecem ser as características mais importantes de uma situação concreta”* (Lee, 1973).

De acordo com Wegener et al. (1986) um modelo se denomina dinâmico se possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo, e se seus estados dependem de estados anteriores.

A partir dos anos 80 e 90, os geógrafos têm reconhecido que os fenômenos espaciais apresentam comportamentos estocásticos, caóticos e não-lineares. Apesar disso, considera-se que os sistemas urbanos encontram sua ordem através de processos de auto-organização, contínuos e em constante evolução. A geografia tem incorporado a teoria da auto-organização para explicar o comportamento do sistema espacial físico, urbano e regional.

Alguns modelos tratam do modo como as atividades cooperam e competem produzindo estruturas sociais emergentes no sentido “bottom up” como um dos pioneiros desenvolvido por Epstein and Axtell (1996). Os Estudos Urbanos e regionais têm utilizado duas linhas principais da teoria da auto-organização²⁵: estruturas dissipativas²⁶ (Prigogine, 1977) e a sinérgica (Haken, 1983).

²⁵ Todo sistema que assuma uma forma que não seja imposta por forças externas pode ser considerado auto-organizado (Prigogine, 1980).

²⁶ Estruturas Dissipativas: segundo Prigogine (1980) são aquelas que se utilizam de fluxos de energia para manter sua “ordem” ou “entropia negativa”. Elas podem ser auto-organizadas (emergir de forma espontânea) e envolver altos graus de complexidade. O comportamento de estruturas dissipativas, e as transições entre estados do sistema envolvem processos de cooperação entre seus componentes.

Wegener (1994,1995) elaborou um modelo de grande escala que engloba dentro do sistema urbano uma série de sub-sistemas inter-relacionados entre si adicionando a variável ecológica. Essa modelagem é multi-causal, pois os sub-sistemas influenciam e estão sendo influenciados por outros sub-sistemas de modo determinístico. Cada um tem sua parcela de contribuição para a formação do macrossistema urbano, pois a difusão das transformações acontece em tempos diferentes para cada subsistema:

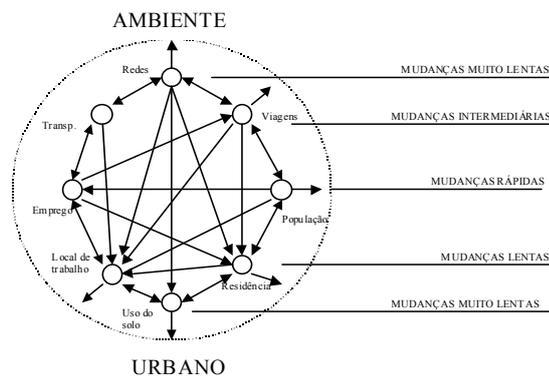


Figura 1. Representação do modelo Urbano²⁷

Importantes contribuições têm colaborado para o desenvolvimento de modelos advindas do campo da física, assim como os modelos gravitacionais. Elas trazem uma nova visão dentro da área de sistemas complexos.

Em modelos como o DLA (Diffusion-Limited Aggregation) de Batty e Longley (1991), o objetivo é simular o desenvolvimento do sistema urbano através do processo de localização de residências ao redor de um CDB, que inicia o processo de desenvolvimento.

Os agentes “caminham” através de um sistema e quando encontram uma célula não-ocupada com um número de vizinhas mínimo definido pelas regras do modelo, param e ocupam esta célula com sua residência. Os modelos tipo DLA são utilizados pela área da física para a simulação de sistemas longe do estado de equilíbrio, e apresentam a emergência de uma estrutura em “forma de árvore”.

²⁷ Fonte: Wegener (1995)

Alguns modelos deste tipo trabalham com a disponibilidade de recursos necessários à preservação da vida dos agentes. Assim que os recursos findam em um determinado local, os agentes se movem para outro a fim de manter sua “vida” como no exemplo do sistema “Sugarscape” que apresenta uma superfície de recursos por onde os agentes podem se mover e consumir (Epstein e Axtell, 1996).

Os diferentes comportamentos crescem, “se espalham” através do sistema e gradualmente preenchem as possibilidades de espaço formando uma “ecologia de atividades”, onde cada identidade e atratividade é formada pela mútua interação e identificação com os demais. Cada população presente no sistema sofre o efeito de rede que é resultado das relações com as demais populações que também ali existem. Da mesma forma ela afeta todas as outras com sua interação com o sistema.

Nas primeiras aplicações destas ideias para sistemas urbanos (Allen e Sanglier, 1981) a questão da auto-organização no espaço geográfico foi examinada através de um sistema não-linear e dinâmico com equações que representavam os padrões de oferta e demanda de diferentes mercadorias e serviços em diferentes pontos do sistema. A emergência gradual de uma estrutura de mercado e padrões de assentamento de funções econômicas faziam com que as localizações prosperassem ou declinassem.

Segundo Wu (1998), a estrutura espacial urbana pode ser vista como uma ordem cumulativa (no sentido temporal) e agregada (no sentido espacial), um contexto onde decisões microscópicas são tomadas. O processo de decisão é essencialmente limitado e a informação e interações são definidas pelo espaço.

2.4 AUTÔMATO CELULAR – A.C.

Na busca de conhecimento, de fenômenos e eventos como é o caso da transformação espacial e de uso do solo, não se pode recorrer apenas às sensações e manifestações imediatas, mas recorre-se à reflexão e conhecimento acumulado através da formulação de hipóteses e formulações de modelos. A abstração constitui uma ferramenta de exercício e aquisição de conhecimento já que para o melhor entendimento de um processo complexo é necessário selecionar quais elementos são fundamentais para sua compreensão e a melhor forma de representá-los.

O Autômato foi originalmente concebido na década de trinta pelo matemático Alan Turing. Desde então, a ideia tem sido direcionada a uma variedade de propósitos como a inteligência artificial e vida artificial. Recentemente a ideia de autômato tem sido utilizada para a simulação de sistemas complexos e pesquisadores nos campo da Geografia e estudos urbanos começaram a utilizar autômatos como base para o desenvolvimento de modelos de sistemas urbanos como os exemplos dos trabalhos desenvolvidos por Batty, Couclelis e Eichen, 1997.

Geógrafos e urbanistas têm se interessado por autômatos desde a década de 80. Uma classe de autômato em particular, o Autômato celular (A.C.) tem se difundido entre os estudiosos dos problemas urbanos, assim como os chamados Sistemas Multi-Agentes (SMA). Os modelos baseados em A.C. oferecem vantagens para a simulação de representação de atributos espaciais e dinâmicos relacionados ao espaço-tempo.

No contexto do A.C., um autômato individual é considerado como sendo limitado por uma estrutura celular. Esta estrutura pode ser, por exemplo, um quadrado, um hexágono ou um polígono irregular. Uma série de A.C. pode ser considerada uma estrutura entrelaçada e a vizinhança é definida pelo número de células adjacentes no arranjo em torno do autômato. Essa característica é influenciada pelas fontes digitais de informação geográfica baseada em pixels a partir de sensoriamento remoto e pela facilidade de programação.

A mudança em cada célula é uma função de reação, difusão ou aleatoriedade como definido a partir da equação de evolução do sistema. No A.C. tradicional, as regras de vizinhança removem qualquer reação à distância sendo a interação ou difusão confinada às células imediatamente adjacentes à célula que é local de tal mudança. Isto é baseado na noção de sistemas físicos como a difusão de gases ou líquidos (os elementos do sistema devem primeiramente mover-se a células adjacentes para viajar qualquer distância).

Formalmente um autômato celular é descrito como segue:

$$Q = \langle E, V, T \rangle$$

Onde Q é o estado global do sistema, E representa uma série de estados possíveis ou atributos internos do autômato celular V é uma vizinhança compostas por todas as células que possuem valores de entrada para a função de transição T que define a mudança de estado do autômato celular do estado atual para o estado no próximo passo do modelo.

Geralmente estas regras são conectadas a um “relógio de tempo”, governando o modo como o autômato pode alterar seu estado interno entre “passos de tempo” baseado na informação que o sistema lhe oferece.

A figura a seguir ilustra os componentes básicos de um A.C. genérico através do seguinte exemplo: o estado das células no espaço celular pode ser ocupado, ou não ocupado; a vizinhança consiste de oito células adjacentes em torno da célula central²⁸; e a função de transição dita como as células se transformam ao longo do tempo, baseada nos estados das células na vizinhança:

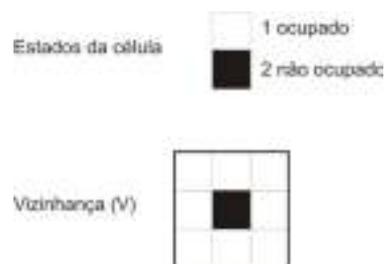


Figura 2. Componentes de um autômato celular genérico²⁹

Exemplo de regra de transição T: ‘se existirem três ou mais células com estado “ocupado” na vizinhança de uma célula central com estado “não ocupado”, esta célula central se tornará “ocupada” no próximo passo: de outro modo, permanece “não ocupada”.’

Vizinhanças celulares imediatas são uniformemente definidas no espaço celular. Ricos e inesperados comportamentos globais são um forte atrativo para a utilização do A.C. para a construção de modelos espaciais em âmbito regional e urbano como nos trabalhos de Batty e Longley (1986); Batty e Xie (1997).

Em alguns casos o A.C. é utilizado para gerar um potencial de desenvolvimento dinâmico para cada célula. A vizinhança pode ser estendida para além das células imediatamente adjacentes com efeitos que decaem em relação à distância e as regras de transição são normalmente probabilísticas.

²⁸ A vizinhança é definida pelas células consideradas adjacentes a um autômato e vai depender do arranjo de cada sistema Leão (2002).

²⁹ Fonte: LEÃO, S. Z., 2002

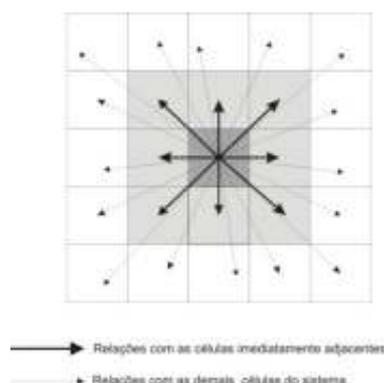


Figura 3. Relação entre células de um sistema A.C. onde a influência decai com a distância²⁷

Para Batty (1976), “modelagem urbana não é apenas uma reflexão de teoria urbana formulada; mas ela constitui uma parte essencial da teoria nos campos de economia urbana, geografia e planejamento”.

A célula nesses modelos podem ser mais ou menos complexas de acordo com a definição dos estados possíveis de uma célula definidos nas regras de um A.C.. Podem envolver tipos de uso do solo, densidades, valores da terra, etc.

2.4.1 A.C. E SISTEMAS URBANOS

Modelos de A.C. teóricos sobre mudanças do uso do solo urbano podem lidar tanto com cidades abstratas/hipotéticas quanto com cidades reais, enquanto que modelos empíricos concernem estritamente áreas urbanas reais. Couclelis (1985) e Portugali et al. (1997) e Semboloni (1997), a título de exemplo, trabalham com modelos de A.C. teóricos para cidades hipotéticas. Batty e Xie (1997) também lidam com modelos de A.C. teóricos, porém sob uma ótica mais estocástica.

Papini et al. (1998), por sua vez, trabalham com um modelo de A.C. teórico, porém aplicado a um ambiente urbano real: a área metropolitana de Roma. O modelo é baseado em aprendizado evolucionário ou algoritmos genéticos.

O trabalho de Clarke et al. (1997), por um outro lado, é um bom exemplo de um modelo de A.C. empírico, no qual regras de transição determinísticas são estabelecidas com base na observação do objeto de estudo, a área da baía de São Francisco, e onde a calibração é também executada levando em consideração o comportamento mutável do estudo de caso ao longo do intervalo de tempo considerado para a simulação.

Existe uma longa tradição na utilização de simulações no estudo da cidade. Estes trabalhos possuem a propriedade de revelar algumas características genéricas do crescimento urbano como, por exemplo, o de Allen e Sanglier (1981), que simularam a evolução da hierarquia urbana a partir de um sistema auto-organizado. Batty e Longley (1991) utiliza a “diffusion-limited-aggregation” (DLA) para simular a formação de morfologia urbana e sua expansão.

A cidade autômato celular é uma forma de representar e simular cidades genéricas. O método fornece uma forma de representação de cidades e ainda uma forma de explorar a formação de estruturas globais a partir de regras localmente definidas.

A razão principal das regras locais serem tão importantes em um A.C. envolve a ideia que ações locais levam, em muitas circunstâncias, a uma ordem global e a uma estrutura emergente. Muitas vezes regras locais que são aplicadas rotineiramente levam a estruturas gerais que parecem altamente ordenadas, mas não podem ser previstas por nenhum comando do estilo “top-down” (Batty, 2003).

Padrões de segregação espacial, por exemplo, podem ser produzidos a partir de regras de preferência em nível local. As pessoas irão normalmente escolher morar ao lado de outras pessoas que possuam opiniões semelhantes às suas (Scheling, 1978). Deste modo, células que não possuem vizinhanças iguais a si mesma em quantidade suficiente, tendem a morrer e as que estiverem em uma localização favorável (semelhante a si mesma) permanecem no sistema.

O Autômato celular, governado por regras de jogo definindo decisões locais que determinam como uma célula irá modificar de um estágio a outro, podem produzir formas espaciais complexas (Wu, 1998). Ao que parece a abordagem baseada em A.C. se torna apropriada para o estudo de crescimento urbano policêntrico como um resultado do fenômeno de preferência de localização residencial.

A partir da década de 1990, com o avanço de técnicas de computação e sensoriamento remoto permitiu avanços teóricos e novas aplicações. Portugali, Benenson e Omer (1994), por exemplo, desenvolvem modelos de A.C. urbanos com o objetivo fundamental de expandir a investigação da segregação urbana, já demonstrada por Thomas Schelling. O fenômeno da gentrificação e o valor de mercado das habitações, considerando efeitos de vizinhança e proximidade, é simulado por O’Sullivan (2001). Batty (1991), por sua vez, enfatiza a análise morfológica da dinâmica urbana através da dimensão fractal.

Uma importante característica dos sistemas, que tem sido adaptada para a simulação de possíveis cenários futuros, é a utilização de mecanismos externos para controlar a taxa de crescimento urbano que gera a demanda por expansão. O modelo de simulação do uso do solo UrbanSim (Waddell, 2003) tem como objetivo principal simular os efeitos de sistemas de transporte no uso do solo e vice-versa. O sistema é modelado com o intuito de servir de plataforma para a modelagem de sistemas de desenvolvimento a partir de escolhas discretas de localização mediada pelo mercado, permitindo efeitos de retroalimentação.

O modelo a ser apresentado a seguir tem como principal característica a relação entre espaço urbano e interação espacial dentro de um conceito dinâmico onde as influências mútuas entre as localizações do sistema socioeconômico e a estrutura urbana se desenvolvem continuamente. Nesse caso a ordem pode ser considerada como a existência de uma estrutura espacial geral com forma relativamente estável que sofre a emergência de novas estruturas produzida através da auto-organização.

O conceito de ordem pode envolver processos de competição e cooperação fazendo emergir propriedades inesperadas que vão se refletir na estrutura da cidade tanto espacial, quanto do sistema socioeconômico. Essas novas situações trazem pequenas variações internas ao sistema (chamadas de flutuações ou ruídos) e levam a uma ordem seletiva através de processos de tentativa e erro. Dessa forma a desagregação das diferentes atratividades como se verá a seguir, tem como objetivo tornar mais claro quais relações socioeconômicas estão presentes em cada área da cidade.

3 MODELO DE GERAÇÃO DO CAMPO DE POTENCIAL DE ATRATIVIDADE – POTENCIAT “POTENTIAL CHANGE AND INTRA-URBAN ATTRACTIVENESS”:

Nesse capítulo é apresentado o Modelo POTENCIAT que é fruto de um processo de sistematização dos conceitos do arcabouço teórico com o objetivo de descrever e simular a formação e transformação da estrutura urbana através das relações de atratividade que influenciam a alocação e o deslocamento das atividades urbanas.

Também serão descritas quatro simulações do modelo que, a partir modificações aplicadas nas equações de evolução dos sistemas gera diferentes configurações tanto espaciais, quanto nas relações estabelecidas entre as atividades.

3.1 ALOCAÇÃO DE ATIVIDADES E GERAÇÃO DE ATRATIVIDADE

Um dos principais objetivos desse trabalho é a formulação de um modelo que seja capaz de descrever e simular a dinâmica de desenvolvimento urbano ligando as transformações espaciais e de uso do solo às atividades socioeconômicas que existem no dia-a-dia da cidade incorporando-se e alterando sua estrutura.

Considera-se que a estrutura urbana que se desenvolve ao longo do tempo em função de sua história pregressa, das condições existentes para a alocação de diferentes atividades e da assimilação dessas mudanças que podem trazer situações positivas ou negativas para as localizações escolhidas em um processo de “feedback” contínuo.

Dentro desses princípios, propõe-se o Modelo Potencial³⁰ onde as ideias sobre evolução espacial, como competição e cooperação no espaço urbano desenvolvidas no capítulo 2 são concebidas em termos de células e atividades para a implementação de um modelo teórico de localização, formação e evolução da estrutura urbana.

O modelo foca no modo como a localização de atividades respondem a atributos de seu ambiente que se modifica constantemente gerando propriedades como acessibilidade e potencial de atratividade. As relações de interação espacial e teoria da localização e economia de aglomeração formam relações de dependência espacial e organização no espaço que se considera como uso do solo.

Esses aspectos aparecem aqui dentro de uma visão dinâmica com base em auto-organização e sinérgica, relacionando as mudanças na estrutura urbana aos conceitos de competição e parâmetro de ordem.

A utilização de diferentes tipos de atratividade difusos pelo território pretende ser um fator de geração de estruturas inesperadas, já que estas serão fruto não só das regras estabelecidas para a localização, mas também da interação entre diferentes agentes e diferentes sub-sistemas urbanos que permite a construção coletiva de estruturas no sentido “bottom-up”.

³⁰ “Potential Change and Intra-urban Attractiveness”

Consideram-se as unidades de espaço como células (grade regular ortogonal³¹) e populações como agentes com atividades individuais. Cada atividade age no sistema definindo sua localização a partir da “superfície de atratividade”. Essa “superfície” é definida para cada tipo de atividade considerado relacionando-a a todas as outras de forma positiva ou negativa.

As alocações das atividades definem modificações na paisagem, que neste caso é ativa, gerando novas informações que irão reger as decisões futuras dos agentes. No caso do POTENCIAT, a descentralização da polarização da atratividade no sistema urbano provém da desagregação do macro-sistema em seus sub-sistemas conferindo diferentes áreas de polarização segundo cada tipo de agente.

3.1.1 INTERAÇÃO ESPACIAL E ATRATIVIDADE: O CONCEITO DO CAMPO DE FORÇAS

Como dito anteriormente, os modelos gravitacionais baseados na Lei de Newton, são utilizados principalmente para a modelagem de fluxos urbanos. Apesar do conceito de interação espacial estar presente na concepção do modelo a ser apresentado, não são considerados somente os fluxos entre as atividades urbanas (como no exemplo residência X local de trabalho), mas a influência de cada atividade localizada no sistema em relação a todas as demais.

Em função disso, a analogia física a ser utilizada no modelo será visualizar o sistema urbano como um campo elétrico de cargas pontuais positivas e negativas, simulando a atratividade de cada atividade urbana localizada espacialmente. O conceito de campo elétrico será utilizado para calcular a intensidade destes campos em cada ponto do sistema.

“O conceito de campo não é restrito apenas ao estudo dos fenômenos elétricos. Assim, considera-se que em torno da Terra (ou em torno de qualquer corpo material) existe um campo gravitacional, pois uma massa “m”, colocada em qualquer ponto do espaço em torno da terra, fica submetida à ação de uma força gravitacional exercida por ela” (Alvarenga e Máximo, 2005).

³¹ Grade regular: é uma matriz onde cada elemento está associado a um valor numérico. Esta matriz está associada a uma região da superfície terrestre, a partir da coordenada inicial, normalmente referida ao canto inferior esquerdo, e de espaçamentos regulares nas direções horizontal e vertical.

De um modo geral, sempre que um ponto de certa região corresponder um valor de uma dada grandeza, diz-se que naquela região, existe um campo associado àquela grandeza. Este campo será um campo vetorial quando se tratar de um campo elétrico ou gravitacional.

Nos modelos gravitacionais a função base utilizada resulta em uma relação entre pessoas e empregos e uma distância existente entre estes dois atributos. O que se propõe no presente trabalho é definir para cada tipo de atividade um campo de forças de atração e repulsão que leve em conta suas relações funcionais e de atratividade em relação às demais do sistema.

No século XVIII, Coulomb realizou uma série de medidas com forças entre duas cargas pontuais, usando uma balança de torção semelhante à usada por Cavendish para comprovar a lei de Gravitação Universal. Através destas experiências, Coulomb conseguiu estabelecer a relação quantitativa entre a força F e a distância r entre as cargas. Disto tem-se que a força F , de atração ou repulsão entre duas cargas pontuais é inversamente proporcional ao quadrado da distância, r , entre elas. Chega-se assim a uma expressão da lei de Coulomb que define a intensidade da força entre duas cargas pontuais.

Equação 2. Intensidade da força entre duas cargas pontuais

$$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

No cálculo de força entre cargas pontuais a constante k é chamada de *constante dielétrica* e é utilizada para definir a redução da interação entre as forças dependendo do meio no qual elas se localizam, ou seja, a força de interação sofre uma redução maior ou menor dependendo meio material onde se encontram.

Observando-se a Lei de Coulomb nota-se a semelhança com a Lei de Newton adotada como base dos modelos de interação espacial. Os princípios do cálculo da lei de Coulomb serão utilizados em virtude da possibilidade de se calcular tanto forças de atração entre atividades complementares ou compatíveis quanto de repulsão entre atividades incompatíveis. A intensidade do campo elétrico E será dada pela expressão:

Equação 3. Intensidade do campo elétrico E

$$E = F/q$$

ou substituindo-se F por sua expressão equivalente:

$$E = K_0 q_1 / r^2$$

No modelo a ser apresentado, a constante k poderá ser utilizada como forma de calibração das forças de atratividade ou de repulsão entre atividades urbanas, definido como peso.

O modelo funciona como um autômato celular onde cada atividade alocada modifica o ambiente influenciando nas decisões de alocação futuras, na expulsão e re-alocação de atividades e na densidade de ocupação. O conceito de campo elétrico será utilizado considerando-se cada edificação como uma carga pontual que gera um campo elétrico em torno de si. Este campo elétrico servirá como informação para as atividades a serem alocadas no sistema.

3.1.2 *POTENCIAT – ATRATIVIDADE E ESTRUTURA URBANA*

Cada modificação gerada pela alocação de uma nova atividade através da inserção de uma nova edificação, modificação de uma pré-existente, desativação ou substituição, gera uma alteração da atratividade do sistema tanto na sua intensidade quanto nas suas características, causando uma reestruturação interna e afetando a todo o conjunto. A partir destas pequenas alterações as forças externas atuantes sobre o subsistema se modificam através de fatores como:

- **intensidade:** a modificação da atratividade da área reforçando ou reduzindo relações pré-existentes (estado de equilíbrio dinâmico);
- **tipo de forças:** forças de atração que atuam sobre uma determinada área urbana, modificando as relações das atividades de uma determinada zona com a estrutura da cidade causando um desequilíbrio no desenvolvimento. Neste caso, dependendo da amplitude da mudança ocorrida, a coexistência de atividades diferentes em um mesmo espaço pode causar pelo menos duas situações:

A) **de cooperação entre atividades compatíveis:** como por exemplo, comércio-residência, que passam a coexistir em uma mesma área urbana tirando proveito das mesmas facilidades por ela oferecidas;

B) **de competição entre atividades incompatíveis:** que passam a coexistir em um mesmo espaço, a partir da inserção de um novo elemento que

modifica as inter-relações sócio-econômicas do subsistema em relação ao macro-sistema urbano.

A complexidade das relações sócio-econômicas e a presença de várias ordens sobrepostas sobre o macro-sistema urbano, dado pelas diversas atividades exercidas no âmbito da cidade e suas relações de dependência, concedem aos sub-sistemas diferentes graus de estabilidade e de possibilidade de mudança de estado.

As regras representarão os parâmetros de ordem que captam maior atenção por parte dos agentes no momento de decisão de localização dentro do sistema urbano e serão estabelecidas a partir de:

- Atração entre atividades iguais e complementares (tendência à aglomeração tanto do ponto de vista das firmas quanto das residências);
- Repulsão entre atividades antagônicas
- Processo de Interação Espacial;
- Regras de competição por espaço entre atividades (hierarquia na escolha de localização, capacidade de expulsão de atividades);
- Princípio de Escravização e Parâmetro de Ordem (que se manifestam em momentos de instabilidade do sistema).

Para a aplicação dos conceitos descritos definem-se para um sistema urbano os tipos de atividades que estarão distribuídos sobre um território celular. O estado de cada célula varia de acordo com o “*tipo ou tipos*” de atividades alocadas e essas também variam em número de “*unidades de atividade*” (variável quantitativa).

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO POTENCIAT

O primeiro passo do Modelo de Potencial de Atratividade é o cálculo da 1ª Matriz de Potencial de Atratividade para cada atividade urbana isoladamente. Para efeito deste cálculo considera-se que a polarização exercida por cada ponto ocupado por uma determinada atividade aumenta com o número de unidades de atividade ali alocado e decai com o quadrado da distância de forma semelhante à lei de Coulomb para cálculo de Intensidade de Campo Elétrico, já descrita.

3.2.1 ATRATIVIDADE:

Desagregando-se o macro-sistema segundo cada tipo de atividade, define-se o campo de potencial de atratividade sem levar em conta as demais atividades presentes no sistema urbano.

Esta é a equação de evolução mais básica do sistema que será aplicada sobre cada célula individualmente e leva em consideração a influência de cada local ocupado por aquela atividade em relação aos demais gerando a matriz de potencial de atratividade individual.

Equação 4. Potencial de atratividade de cada célula calculado para cada tipo de agente individualmente.

$$P_{calc\ aij} = C_{ij} + \sum C_{ijn} / d_{ijn}^2$$

Para o cálculo de atratividade individual, o sistema “percorre” a área urbana representada através de uma grade regular aplicando para cada célula a equação de Potencial de Atratividade como definido no algoritmo apresentado no anexo 1 ao final deste trabalho.

Através deste processo gera-se uma superfície contínua de polarização de cada atividade em relação a ela mesma. Os pontos do sistema urbano assumirão em cada célula, o valor de “Z” que será dado pela quantidade de agentes ligados a esta atividade presentes no sistema.

O cálculo da 1ª matriz de potencial de atratividade leva em consideração somente um tipo de atividade com a capacidade de atrair seus iguais. Como na cidade isto não é uma situação que exista individualmente, procura-se trazer a interação entre as matrizes de atratividade das diversas atividades que compõem o sistema urbano.

3.2.2 INTERAÇÃO:

No sistema urbano encontram-se atividades que são complementares (podendo cooperar para a existência em um mesmo espaço) e outras que são antagônicas (que se prejudicam com a proximidade). A partir disso define-se que as forças de atração assumirão valores positivos e as de repulsão assumirão valores negativos para cada atividade estudada.

Considerando-se que uma mesma célula poderá estar sob a ação de diversos tipos de atratividade, a soma final entre os valores positivos e negativos, multiplicados por uma variável relacionada ao peso de cada tipo de agente sobre os demais, irá fornecer a atratividade da célula

para cada tipo de agente. O modelo pode ser calibrado com a utilização da variável relacionada ao peso “ ω ” ou pode efetuar medida de potencial e alocação de atividades somente com as relações positivas e negativas entre as atividades como se verá adiante.

Equação 5. Definição de potencial de atratividade para cada atividade:

$$P_{ij} = \sum \omega P_{calc\ a_{ij}}, \omega P_{calc\ b_{ij}}, \omega P_{calc\ c_{ij}}, \dots \omega P_{calc\ n_{ij}}$$

Onde:

P_{ij} = Potencial de Atratividade de cada atividade calculado a partir da interação entre as primeiras matrizes de atratividade individual;

$P_{calc\ a_{ij}}, P_{calc\ b_{ij}}, P_{calc\ c_{ij}}, \dots, P_{calc\ n_{ij}}$ = Atratividade Individual de cada atividade;

ω = Peso atribuído às demais atividades, de acordo com a sua influência, positiva ou negativa, sobre a atividade para a qual o cálculo de potencial está sendo efetuado³².

Esta equação deverá ser efetuada para cada atividade com pesos diferentes segundo a influência positiva ou negativa da atratividade das demais atividades sobre aquela que está sendo calculada no momento. Os pesos poderão ser definidos a partir do estudo do comportamento de cada sistema de interesse.

A técnica utilizada na modelagem do sistema é baseada no mapeamento da atratividade existente para cada atividade considerada. A partir deste “Campo de Potencial de Atratividade” inicia-se um processo de interação que potencializa a localização de novos agentes no sistema. No decorrer das iterações forma-se a consequente modificação do potencial de atratividade que servirá como “feedback” para a nova iteração.

É importante ressaltar que, a partir deste momento, o Campo de Potencial de Atratividade apresenta tanto valores negativos, quanto positivos e que a atratividade é calculada para cada tipo de atividade individualmente. Ressalta-se ainda que diferentes tipos de atividade poderão se

³² Um mesmo tipo de atividade poderá ter pesos diferentes relacionados a cada uma das demais atividades.

localizar em uma mesma célula e, além disso, a mesma célula pode apresentar valores positivos para um determinado agente e negativo para outro.

3.2.3 CRESCIMENTO:

A taxa de crescimento será estimada a través da análise do comportamento do objeto de estudo em relação ao processo histórico de crescimento de cada atividade. Considera-se que a taxa de crescimento do sistema será a variável que definirá a demanda por novas áreas causando a expansão urbana e densificação da ocupação do sistema.

A partir de uma porcentagem de crescimento da população definida a priori, novas atividades surgem e, dependendo do tipo de atividade, esta passa a induzir um crescimento da população além do “natural” (natalidade-mortalidade) através da migração de pessoas em busca de emprego. A equação de evolução do sistema mostra esta propriedade.

As atividades que geram crescimento da população além do considerado “natural” seriam as chamadas multiplicadoras como já mencionado no capítulo 2. A indústria é considerada a principal delas, tendo a característica de, além de gerar empregos exógenos, causar a migração de pessoas para a cidade³³.

Equação 6. Crescimento da população em função da taxa e do aumento de empregos

$$N_{re} = M_A * E/k$$

N_{re} = população alocada em função da maior oferta de emprego;

M_A = quantidade de atividades multiplicadoras;

E = empregos gerados;

k = constante de calibragem;

Equação 7. Crescimento de residências final

$$CNR = Nr * E/100 - N_{re} + Ne$$

³³ Nos casos a serem apresentados a Indústria servirá como atividade básica. Contudo, outras atividades poderiam ser assim consideradas como o caso das atividades turísticas, agricultura, empregos públicos, extrativismo, etc.

Onde:

CN_r = crescimento de residências

N_r = número de residências do sistema;

N_{re} = número de residências alocadas em função da alocação de atividades multiplicadoras.

N_e = Número de residências deslocadas em função da avaliação (a ser apresentado no item V.e.).

λ = taxa de crescimento natural da população.

Este campo de atratividade direciona a alocação de agentes que se multiplicam em função do crescimento da população como explicitado na equação de crescimento de “atividades dependentes” apresentada a seguir:

Equação 8. Crescimento de comércio e serviços e outras atividades consideradas “dependentes”.

$$CNcs = Nre * \mu / 100 + Ce$$

Onde:

$CNcs$ = crescimento de comércio e serviço (ou outras atividades dependentes consideradas para cada sistema);

Nre = número de novas residências alocadas no sistema;

μ = taxa de residências atendidas por cada comércio e serviço individualmente.

Ce = número de comércio e serviços deslocados em função da avaliação.

Nesta situação não é considerada a rede de transporte. Supõe-se que os custos de transporte são incluídos na equação com o decaimento da atratividade em relação à distância.

3.2.4 ALOCAÇÃO

Os lugares centrais do sistema emergem das sucessivas iterações que modificam a atratividade de cada célula em relação às demais. Com isso não existe apenas um CDB a partir do qual todos os agentes definem sua localização, mas uma série de áreas que possuem diferentes tipos de atratividades calculadas para cada tipo de agente, levando em conta a interação entre atividades complementares e antagônicas.

A seguir serão apresentados outros fatores que influenciam na localização das atividades causando “modificações” nas superfícies de atratividade geradas puramente pela posição relativa de cada atividade.

3.2.5 COEFICIENTE DE OCUPAÇÃO

À medida que uma célula vai sendo ocupada, a disponibilidade de espaço vai decaindo. Como resultado, define-se uma redução na possibilidade de alocação de um novo agente. Isto vai influir na atratividade da célula que, apesar de continuar difundindo atratividade por todo o sistema, tem a sua própria reduzida através do coeficiente de ocupação apresentado abaixo:

Equação 9. Coeficiente de ocupação

$$q = S * (S - N) / S - N^2$$

Onde:

q= coeficiente de ocupação da célula;

S= saturação ou limite máximo de ocupação estabelecido para cada célula;

N= somatório de todas as “unidades de atividades” localizadas em cada célula.

Com a ocupação da célula o número de atividades ali localizadas se aproxima do limite e sua atratividade decai, como se vê no gráfico abaixo que relaciona a saturação máxima (10) ao número unidades de atividades presente em uma célula:

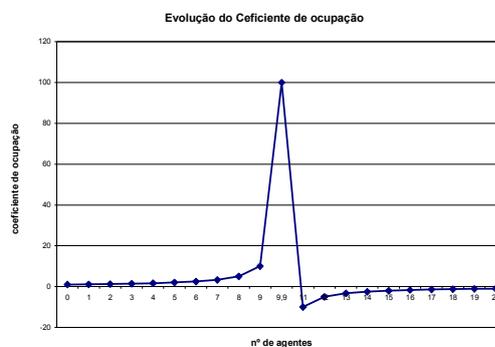


Gráfico 1. Evolução do Coeficiente de ocupação de uma célula com sat=10

Quando a quantidade de “unidades de atividade” ultrapassa o valor de saturação definido para o sistema, o coeficiente de ocupação se torna negativo impedindo a alocação de novas atividades.

Equação 10. Potencial de atratividade de cada célula segundo o coeficiente de ocupação

$$Pq_{ij} = P_{calc\ ij} / q$$

P_{qij} = potencial de atratividade levando em conta o coeficiente de ocupação de cada célula
 P_{calcij} = potencial de atratividade individual calculado para cada agente
 q = coeficiente de ocupação

3.2.6 SATURAÇÃO DO SISTEMA

Como a densidade urbana não se apresenta de forma homogênea sobre a superfície de ocupação, o limite de ocupação de cada área urbana também não pode ser igual em todos os lugares da cidade. Desta forma optou-se pela definição individual da saturação de cada célula que se dá da seguinte forma:

1. o modelo inicia a simulação com uma saturação geral a todas as células;
2. à medida em que os coeficientes crescem o valor de atratividade da célula decai;
3. quando a saturação permitida pelo sistema é ultrapassada em uma determinada célula, o coeficiente de ocupação se torna negativo criando um potencial de atratividade negativo;
4. a célula entra no sorteio probabilístico para a expulsão de agentes do sistema,;
5. a partir do sorteio uma porcentagem dos agentes é expulsa;
6. na próxima rodada a saturação aumenta individualmente segundo a equação a seguir (a saturação individual da célula cresce somente a partir do momento em que a célula é escolhida através do “sorteio probabilístico para a expulsão de atividades):

Equação 11. Modificação da saturação da célula individualmente:

$$S_{nij} = S_{ij} * k$$

S_{nij} = novo valor de saturação da célula

S_{ij} = valor de saturação da célula

K = constante de modificação da saturação de cada célula(definido para cada simulação)

A célula volta a ter um valor de potencial de atratividade suficiente para atrair novos agentes, pois a relação entre ocupação real e ocupação máxima se modifica. Desta forma pretende-se simular uma maior oferta de espaço neste local que se dará em função de sua atratividade.

3.2.7 SATURAÇÃO MÁXIMA DO SISTEMA

A saturação de cada célula é resultado das condições iniciais do modelo e da evolução do sistema. Apesar disso, define-se um horizonte a partir do qual a saturação não crescerá. Este valor é a saturação máxima do sistema, ou seja, o valor máximo de agentes que poderão se alocar em cada célula. Este valor é definido antes da simulação e pode ser modificado entre as iterações do sistema.

Além de servir como limite de ocupação, a saturação máxima do sistema serve como base de cálculo para o número de agentes que se localizarão em cada célula, pois o simples sorteio como definido no item anterior acaba por criar áreas de densidade exagerada a partir do momento em que o sistema se torna maior.

Isso se dá em função da equação de crescimento que se baseia em porcentagem em relação ao total de agentes no sistema e da definição de apenas uma célula para alocação dos agentes em cada rodada.

Desta forma, define-se a quantidade de células a serem escolhidas para alocação através da seguinte equação:

Equação 12. Número de atividades a serem alocadas

$$CAloc = (total * 100 / satmax) / fator + 1,0$$

Onde:

Total: número total de agentes a serem alocados;

Satmax: saturação máxima do sistema;

Fator: porcentagem da saturação máxima a partir da qual será efetuada a divisão.

Exemplo: se a saturação máxima do sistema for 100 e o valor a partir do qual as alocações serão divididas for 30%, a alocação de 50 “unidades de atividade” se dará nas duas primeiras células sorteadas.

Quando a Saturação atinge o limite máximo, a célula só voltará a ser atrativa quando forem expulsas atividades suficientes para que o coeficiente de ocupação volte a ser atrativo. A possibilidade de geração de células com total de atividades maior que a saturação máxima se dará pela dinâmica da atratividade do sistema.

3.2.8 ACESSIBILIDADE

Como já visto nos capítulos anteriores a estrutura urbana é considerada neste trabalho como o resultado das relações estabelecidas entre agentes urbanos, processos de interação espacial, competição por espaço, princípio de escravização, etc.

Estas relações definem áreas de atratividade para atividades urbanas no seu processo de alocação que muitas vezes acaba por definir um comportamento contraditório.

A preferência por áreas com agentes semelhantes a si mesmo acaba gerando um comportamento de segregação espacial, “empurrando” os agentes para áreas mais externas da estrutura urbana seguindo o que foi chamado de “força centrífuga”. Também são responsáveis por este tipo de comportamento as “deseconomias de escala” como a alta densidade, excesso de ruído, congestionamentos das áreas mais centrais, etc.

Ao mesmo tempo em que isso acontece, existe também uma força que faz com que os agentes procurem se localizar mais próximos ao centro com uma tendência à aglomeração que surge em função da necessidade de proximidade às áreas com maior acesso às facilidades, da melhor posição em relação à totalidade dos consumidores (como no caso do comércio), etc.

Desta forma considera-se a existência de dois tipos de forças trabalhando ao mesmo tempo no sistema, gerando tanto uma tendência de descentralização, quanto de aglomeração.

A primeira já foi trabalhada neste modelo quando se definiu o coeficiente de ocupação “ q ” que reduz o potencial de atratividade à medida que a quantidade de agentes em cada célula vai se aproximando de sua saturação.

Quanto à força centrípeta, considera-se que se faz necessária a inclusão de uma nova medida ligada somente à posição de uma célula em relação a todas as outras. A medida de acessibilidade “ Ac ” é definida segundo o seguinte procedimento:

Células ocupadas do sistema assumem valor = 1
Células desocupadas valor = 0.

Ocupação:

Se “ C_{ij} ” > 0, então “ C_{ij} ” = 1, senão “ C_{ij} ” = 0

1. O cálculo de diferença de potencial é aplicado para esta situação conferindo o potencial de atratividade de cada célula somente em função de sua posição relativa dentro do sistema.

Equação 13. Acessibilidade de cada célula

$$A_{cij} = C_{ij} + \frac{\sum C_{ijn}}{d_{ijn}^2}$$

A medida de acessibilidade é efetuada levando em consideração a distribuição espacial das células ocupadas do sistema. Desta forma inclui-se um valor que é definido apenas a partir de relações espaciais.

Equação 14. Potencial de Atratividade final:

$$Pot_{ij} = Pq_{ij} + Ac_{ij} * \omega$$

Pot_{ij} = Potencial de Atratividade final de cada célula

Pq_{ij} = potencial de atratividade levando em conta o coeficiente de ocupação de cada célula

Ac_{ij} = Acessibilidade da célula

ω = Peso do valor de acessibilidade (diferenciado para cada tipo de agente).

3.2.9 ESCOLHA DE LOCALIZAÇÃO

Considera-se que a atratividade de cada célula denota a potencialidade de escolha desta para a alocação de cada tipo de agente. A partir dessa premissa, calcula-se a probabilidade de ocupação de cada célula a partir do potencial de atratividade calculado como mostra a equação:

Equação 15. Probabilidade de escolha de cada célula para a alocação

$$Pri_{ij} = \frac{Pot_{ij}}{|\sum Pot_n|}$$

Pri_{ij} = probabilidade de cada célula ser escolhida

Pot_{ij} = potencial de atratividade calculado para cada célula

$\sum Pot_n$ = somatório total de todos potenciais de atratividade do sistema

Quanto maior o potencial de atratividade, maior será a probabilidade da célula ser escolhida pelo agente. Sendo o valor de potencial (**Pot_{ij}**), uma variável em constante modificação a partir das diversas iterações do sistema, a probabilidade de escolha de cada célula também irá se modificar continuamente com o passar do tempo.

O Campo de Potencial de Atratividade Final criado para cada tipo de agente irá reger a decisão de localização. O resultado do cálculo de probabilidade de escolha de cada célula será multiplicado por um número aleatório entre 0 e 1, simulando um “sorteio probabilístico” que definirá a escolha de localização dos agentes.

3.2.10 AVALIAÇÃO:

O modelo é composto por processos de “feedback” positivos e negativos para cada tipo de agente:

1. Positivos:

- Atratividade gerada pela existência de agentes iguais (economia de aglomeração);
- Atratividade gerada pela existência de agentes complementares (a importância relativa de cada agente complementar deverá ser “calibrada” através do “peso” de cada agente em sua função de evolução).
- Acessibilidade da célula em relação a toda área ocupada do sistema.

2. Negativos:

- Repulsão gerada pela existência de agentes antagônicos;
- Redução da atratividade da célula à medida que toda sua capacidade é preenchida (competição por espaço por ocupantes potenciais de uma localização particular).

A cada iteração, a situação dos agentes dentro do sistema é avaliada. Se um agente estiver localizado em uma célula que sofra efeito de um campo de atratividade favorável à sua permanência (neutro ou positivo para o seu tipo de agente), ele continua em sua localização, do contrário poderá ser expulso do sistema, devendo se alocar novamente na próxima rodada. Na figura a seguir é apresentado um modelo mental de ação de agentes.

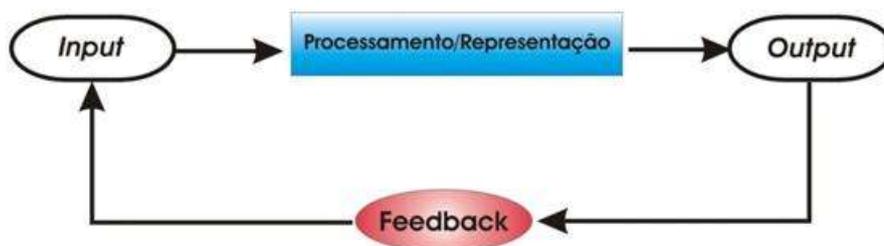


Figura 4. Representação de uma estratégia de ação a partir de um modelo mental genérico:

Uma mesma célula pode oferecer vantagens de alocação para agentes diferentes em diferentes épocas. A modificação do tipo de agente ali alocado e a possível expulsão dos anteriores será regida a partir da capacidade de certas atividades para provocar o deslocamento de outras atividades que lhe sejam incompatíveis, ou ainda capazes de ofertar uma renda maior pela utilização dos terrenos urbanos.

Se um determinado subsistema for resultado de relações sócio-econômicas estáveis entre as diversas zonas urbanas, sua possibilidade de mudança de estado será mínima. Por outro lado, se existir uma forte competição entre as forças incidentes sobre um determinado subsistema, a ponto de desestabilizar o tipo de relação sócio-econômica que o caracteriza, haverá uma maior possibilidade de modificação de seu estado.

A modificação do estado de um subsistema qualquer (transformação espacial e uso do solo) seriam acionada pelo processo de competição entre as forças relacionadas às atividades praticadas nas áreas que dele fazem parte e pela sua intensidade de influência sobre o referido subsistema. Disso se pode admitir que tanto a modificação da força predominante sobre um subsistema urbano quanto a mudança de intensidade desta força, reduz sua resistência e amplia as possibilidades de transformação espacial e modificação de uso do solo.

A avaliação verifica a posição de cada agente relacionada ao seu campo potencial de atratividade positivo ou negativo. A partir desta avaliação ocorre um sorteio probabilístico.

Equação 16. Probabilidade de escolha de cada célula para a expulsão

$$Prn_{ij} = \frac{Pn_{ij}}{|\Sigma Pn_n|}$$

Prnij = probabilidade de cada célula ser escolhida

Pnij = potencial de atratividade negativo calculado para cada célula

ΣPqn = somatório total de todos potenciais de atratividade negativos do sistema.

Após este cálculo efetuado para cada tipo de agente os valores de probabilidade são multiplicados por um número aleatório entre zero e 1. O menor valor negativo define a célula que deverá sofrer expulsão de agentes a cada rodada do modelo. Se não existirem áreas negativas para um determinado tipo de agente não ocorrerá expulsão.

Os agentes não são expulsos todos de uma vez das áreas que lhe são negativas, mas vão deixando estas células aos poucos modificando o campo de potencial de atratividade das iterações seguintes.

Cada célula que se encontre na situação acima descrita e for sorteada para o processo de expulsão deverá ter um “decaimento” gradativo ao longo das iterações do modelo.

Equação 17. Redução do número de agentes que se encontra em campos de atratividade negativos:

$$N_e = N_{a_{ij}} * \beta / 100$$

Onde:

$N_{e_{ij}}$ = Número de agentes a ser deslocado;

$N_{a_{ij}}$ = Número total de agentes em campo de atividade negativo localizado na célula³⁴;

β = taxa de agentes a ser deslocada em cada iteração;

A porcentagem da redução de agentes dependerá da calibragem de cada aplicação do modelo. Além disso, para evitar que o modelo fique infinitamente retirando agentes de uma mesma célula, define-se um limite mínimo a partir do qual todos os agentes em uma célula com potencial negativo devam ser retirados como, por exemplo:

Célula i j

Taxa de agentes a serem retirados a cada iteração: 10%

Número mínimo de agentes em campo de potencial negativo: 3

Rodada 10: 4 agentes em campo de potencial negativo;

Rodada 11: retira 0,4 e deixa 3,6 agentes em campo de potencial negativo;

Rodada 12: retira 0,36 e deixa 3,24 agentes em campo de potencial negativo;

Rodada 13: ao invés de deixar 2,916 em campo de potencial negativo, todos os agentes são retirados.

³⁴ Pode existir mais de um tipo de agente na mesma célula.

Isso evita que o modelo entre em “looping” retirando sempre uma taxa de 10% do valor da célula que, de outra forma nunca chegaria a zero. Os agentes deslocados em uma iteração voltam a se alocar em iterações seguintes.



Figura 5. Diagrama Geral de Funcionamento do Modelo

3.3 SIMULAÇÕES DO MODELO POTENCIAT

O Modelo de Campo de Potencial de Atratividade é ainda um modelo teórico e, em função disso, os passos discretos do modelo representam uma dimensão abstrata de tempo, ou seja, o tempo aqui é considerado pelo número de iterações definido na janela de configurações do sistema.

Note-se que os parâmetros de cada simulação como a saturação do sistema, seu crescimento e a taxa de crescimento de cada atividade também podem ser definidas nessa janela de configuração.

O tempo em um A.C. avança em passos discretos que podem ser concebidos para simular um “tempo real” que seja condizente com o tipo de simulação a ser desenvolvida.

anteriormente, a alocação de apenas uma atividade gera o potencial de atratividade inicial a partir da distribuição da acessibilidade do sistema.

The screenshot shows a spreadsheet with a grid of numerical data. The columns are labeled 'Subatividade', 'Atividade', and 'Acessibilidade'. The rows represent different stages or iterations of the model. The data consists of a dense array of numbers, likely representing potential values for different activities and accessibility levels.

Figura 8. Potencial de Atratividade indústria

Todas as etapas descritas até aqui são executadas no Modelo Potenciat a cada iteração do sistema que é reavaliado segundo os novos potenciais de atratividade que servem de base para as próximas alocações:

The screenshot displays a detailed calculation log within a spreadsheet interface. The log shows the following steps:

- Calculando Itens... 199
- Calculando estrutura de potencial, segundo:
 - Deslocando 7,28948338865887 e deslocando 19,14879227864497 na escala 29,32 de Pa 1
 - Deslocando 18,74272526789771 e deslocando 25,86525581822144 na escala 20,33 de Pa 2
 - Deslocando 25,114997026601238 e deslocando 25,24820246761224 na escala 30,29 de Pa 3
 - Deslocando 1,7864577014134386 e deslocando 4,948486787864643 na escala 25,14 de C
 - Deslocando 8,24214882944199745 e deslocando 8,5649952444012378 na escala 10,31 de
- Indústria
- Estimacao atratividade em 27,33 para 18,8
- Estimacao atratividade em 28,27 para 18,8
- Estimacao atratividade em 25,14 para 28,8
- Estimacao atratividade em 18,31 para 28,8
- Atualizando e gerando as parcelas dos itens...
- Calculando estrutura de potencial, segundo:
 - Deslocando 1,1445377014134386 e deslocando 15,88425581822144 na escala 29,32 de Pa
 - Deslocando 11,4189952444012378 e deslocando 25,545181822144 na escala 20,33 de Pa

Figura 9. Modelo POTENCIAT em iteração do sistema

The image shows a screenshot of a software application window titled 'CDBsim versão 3.2.7 01/05/2004'. The window displays a large data table with multiple columns and rows. The columns are labeled as follows: 'Comercial Pot', 'Industrial Pot', 'Comercio', 'Residencial', 'Acessibilidade', 'Comercial Pot', and 'Comercial Cdb'. The rows contain numerical values, likely representing simulation results or parameters. At the bottom of the window, there are buttons for 'CALCULAR', 'ALOCAR', 'PROMETERIAÇÕES', 'Gravar Tabela', and 'Configurações'.

Figura 10. Distribuição da ocupação da população 2

Apresentam-se a seguir as simulações do Modelo POTENCIAT em bases celulares com 50X50 células. A atividade básica em todas as simulações é a industrial que é alocada em primeiro lugar para a geração de potencial de atratividade para as atividades dependentes, definidas como residencial e comercial.

Para o início de uma simulação o modelo exige a definição de uma célula inicial e a alocação da atividade considerada básica provocando o crescimento das demais incluídas no sistema.

A célula inicial escolhida foi a localizada na linha 25, coluna 25 (25,25) do território celular simulando o CDB a partir do qual o sistema urbano irá evoluir. Foi definido o valor de inicial “0,1” para a atividade industrial.

Os demais agentes se alocam a partir deste centro e do potencial gerado pela alocação da atividade básica criando áreas positivas no seu entorno. A definição dos valores a serem alocados depende das equações de crescimento definidas individualmente para cada atividade.

As equações de evolução do sistema definem as “preferências” de cada atividade no momento da alocação de suas unidades. Dessa forma, valores positivos são considerados como vizinhanças desejáveis e negativos como indesejáveis.

A influência da alocação de cada atividade sobre as demais é especificada segundo o “peso” que representa o quanto uma atividade pode influenciar positiva ou negativamente as demais. Note-se que esse “peso” é definido para cada atividade individualmente e que, nas simulações apresentadas. O peso de cada atividade sobre si mesma é igual a zero, com exceção do comércio que gera atratividade positiva em relação a si mesmo.

O modelo POTENCIAT tem a característica de gerar diferentes padrões de acordo com as modificações especificadas em suas equações de evolução. Para exemplificar essa propriedade do modelo, foram geradas quatro simulações com diferentes regras de transição apresentadas a seguir.

3.3.1 SIMULAÇÃO 1

A Simulação 1 foi a primeira desenvolvida para o teste do Modelo POTENCIAT. A alocação da Indústria provoca o crescimento das demais atividades que se dará em função das equações da tabela 2.

Tabela .2. Equações de crescimento de cada atividade:

| AGENTES: | CRESCIMENTO | TAXA |
|--|---|------|
| Indústria: considerada como atividade básica | $ind = tot_i * tx_{ind} / 100$ | 2% |
| Comércio: Representa as facilidades em geral | $(res + res_2 + res_3) * tx_{com} / 100;$ | 10% |
| População 1: alto nível de renda | $res = tot_p * tx_{res} / 100 + ind * 10,0$ | 1% |
| População 2: Médio nível de renda | $res_2 = tot_p * tx_{res} / 100 + ind * 10,0$ | 1% |
| População 3: baixo nível de renda | $res_3 = tot_p * tx_{res} / 100 + ind * 10,0$ | 1% |

O valor de acessibilidade “Ac” (acessibilidade) é agregado ao valor final de Potencial de Atratividade de cada atividade, segundo o peso considerado por sua importância para cada uma.

Tabela .3. Equações de evolução simulação 1

| ATIVIDADES | EQUAÇÕES DE EVOLUÇÃO |
|------------|--|
| POP 1 | $0 * pop_1[i][j] - 0 * pop_2[i][j] - 0 * pop_3[i][j] + 0,2 * com[i][j] - 0 * ind[i][j] + 10 * Ac[i][j];$ |
| POP 2 | $0,0 * pop_2[i][j] - 0,1 * pop_1[i][j] + 0 * pop_3[i][j] + 0 * com[i][j] - 0,1 * ind[i][j] + 10 * Ac[i][j];$ |
| POP3 | $0 * pop_3[i][j] - 0,01 * pop_1[i][j] - 0 * pop_2[i][j] + 0 * com[i][j] + 0 * ind[i][j] + 10 * Ac[i][j];$ |
| COM | $0 * pop_1[i][j] + 0 * pop_2[i][j] + 0 * pop_3[i][j] + 0 * com[i][j] - 0 * ind[i][j] + 10 * Ac[i][j];$ |
| IND | $+ 0 * ind[i][j] + 0,001 * com[i][j] - 0 * pop[i][j] - 0 * pop_2[i][j] + 0 * pop_3[i][j] + 10 * Ac[i][j];$ |

Os resultados das equações de Potencial de Atratividade localizados em cada célula são divididos pelos respectivos coeficientes de ocupação, ou seja, após a determinação da distribuição do Potencial de Atratividade definido para cada atividade, o coeficiente de ocupação insere uma variável relacionada ao espaço disponível.

Tanto o valor de acessibilidade quanto o de coeficiente de ocupação são calculados a cada iteração do modelo, pois dependem da evolução do sistema, das áreas ocupadas e da possível mudança do valor de saturação relacionado a cada célula, como visto na equação 11 desse capítulo. Esse valor influencia de forma diferente cada célula e ainda considera a necessidade de espaço de cada atividade.

No caso da Simulação 1, a atividade industrial consome mais espaço, por isso seu valor de ocupação é multiplicado por 10. Por outro lado, a área disponível para o comércio pode ser menor e, por isso, os valores são multiplicados por dois.

Tabela .4. atuação do coeficiente de ocupação em cada célula

| ATIVIDADES | COEFICIENTES DE OCUPAÇÃO |
|------------|--|
| POP1 | $\text{poppot}[i][j]/(\text{coefi}[i][j]*2);$ |
| POP2 | $\text{pop2pot}[i][j]/\text{coefi}[i][j];$ |
| POP3 | $\text{pop3pot}[i][j]/\text{coefi}[i][j];$ |
| COM | $\text{compot}[i][j]/(\text{coefi}[i][j]/2);$ |
| IND | $\text{indpot}[i][j]/(\text{coefi}[i][j]*10);$ |

É importante salientar que as relações estabelecidas pelas equações de evolução baseiam-se em princípios gerais provenientes da literatura e pesquisa na área e também através de observações empíricas sobre o processo.

Em cada um dos gráficos são mostradas as 2500 células que determinam o “território celular” onde as atividades se alocam. A ocupação inicial do sistema apresenta a localização da Indústria na célula inicial que gera o gráfico de acessibilidade e a distribuição dos valores de acessibilidade a partir da célula inicial. O potencial de atratividade é um gráfico 3D que representa a superfície do potencial de atratividade de cada atividade.



Gráfico 2. Ocupação, acessibilidade e Potencial de Atratividade População 1 - 1 iteração

É relevante salientar que nesse momento somente a medida de acessibilidade cria uma polarização que define os valores de potencial de atratividade do sistema. Os outros componentes começam a fazer parte do cálculo de potencial logo após a alocação das atividades dependentes, que nesse caso são as Populações 1, 2 e 3 e a Atividade Comercial.

Saturação inicial é 5 e o coeficiente de ocupação é gerado individualmente levando-se em conta esta saturação preliminar do sistema.

3.3.2 PRIMEIROS RESULTADOS

Com cem iterações do modelo as atividades se encontram ainda concentradas em torno do núcleo inicial de ocupação, e apresentam pouca diferenciação no resultado do Campo de Potencial de Atratividade de cada tipo de atividade.



Gráfico 3. Acessibilidade, Coeficiente de Ocupação e Ocupação Total - 100 iterações

À medida que as células vão sendo ocupadas, as saturações individuais permanecem e, conseqüentemente, os coeficientes de ocupação se alteram. Esta nova situação gera menor oferta de espaço nestas células que, em um momento de ocupação igual ou maior que o valor de saturação, podem passar a ser representadas como uma depressão nos gráficos de Distribuição de Potencial de Atratividade.

É importante salientar que o valor de Potencial de Atratividade é também distribuído para as células desocupadas do sistema e não só às suas vizinhas como em um A.C. tradicional. No gráfico a seguir a atividade Industrial é apresentada, segundo sua localização, em três estágios de evolução: 500, 700 e 800 iterações.



Gráfico 4. Localização Atividade Industrial 500, 700 e 800 Iterações

Abaixo vê-se a distribuição dos valores de Potencial de Atratividade também com 500, 700 e 800 iterações. A apresentação em 3D foi escolhida em primeiro lugar para diferenciar das imagens geradas pela alocação das atividades como no caso acima. Em segundo, por essa forma de apresentação permitir também a melhor visualização dos valores negativos.

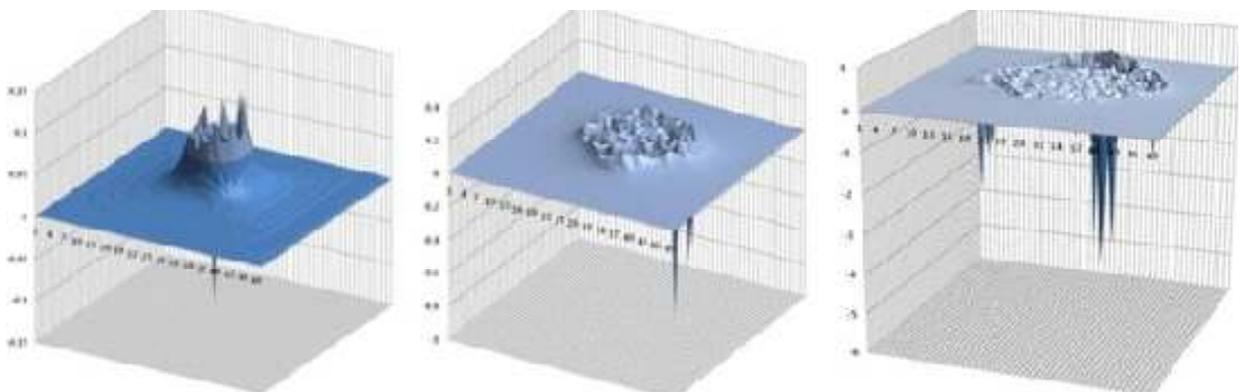


Gráfico 5. Potencial de Atratividade Indústria 500, 700 e 800 iterações

Na Simulação 1 a Indústria tem tendência a se deslocar e a se localizar nas áreas mais periféricas da ocupação em função da necessidade de maiores espaços. Essa peculiaridade causa o rápido deslocamento das áreas mais centrais que, apesar de ainda abrigar unidades dessa atividade, possuem as menores densidades.

Pode-se observar como a superfície de atratividade vai evoluindo ao longo do tempo demonstrando que localizações que antes eram positivas acabam tornando-se negativas, forçando a expulsão de atividades que voltarão na próxima iteração. Este é um típico caso de modelo recursivo onde cada passo baseia-se na informação gerada pelo anterior sob forma de realimentação.

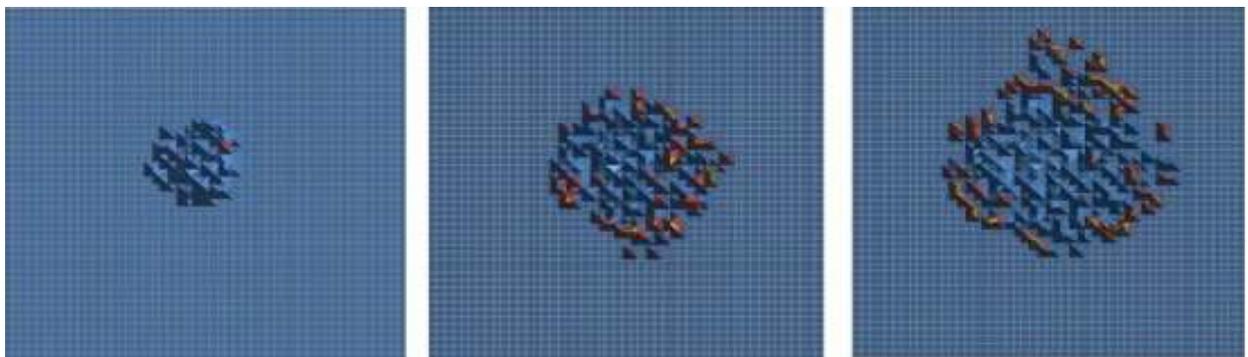


Gráfico 6. Localização Atividade Comercial 500, 700 E 800 ITERAÇÕES

Diferentemente da Indústria, a atividade comercial evoluiu mantendo uma forma regular ao longo do tempo com altas densidades na área central, em função dessa atividade não precisar de espaços amplos, tendo até mesmo seu coeficiente de ocupação reduzido para simular a menor necessidade de espaço.

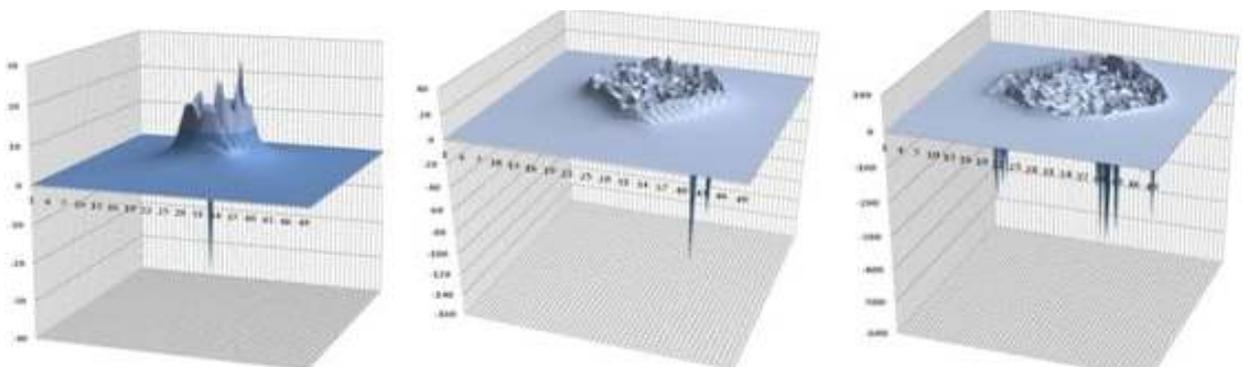


Gráfico 7. Potencial de Atratividade Comércio , 700 E 800 iterações

A População 1 foi definida de forma que a acessibilidade não fosse tão importante como no caso das populações 2 e 3. Essa faceta gerou o deslocamento dessa população residencial para áreas mais afastadas do centro, como demonstra a formação de grupos nas áreas periféricas do sistema.

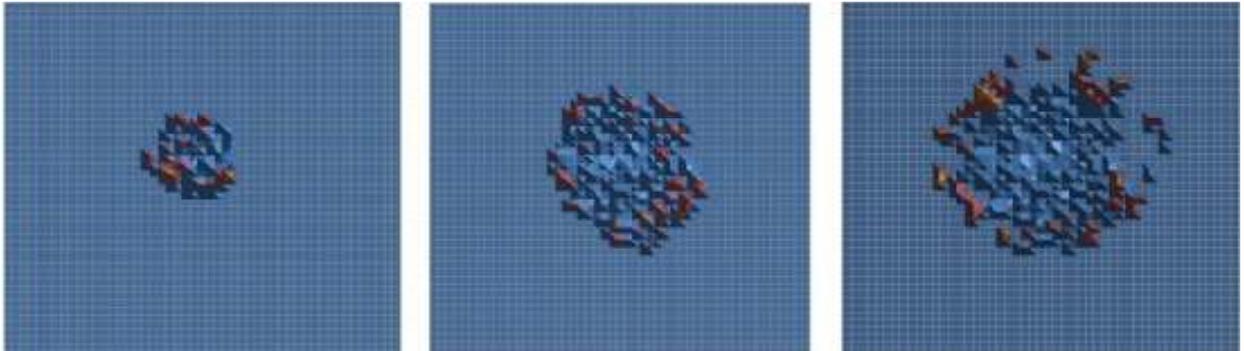


Gráfico 8. Localização População 1 - 500, 700 e 800 iterações

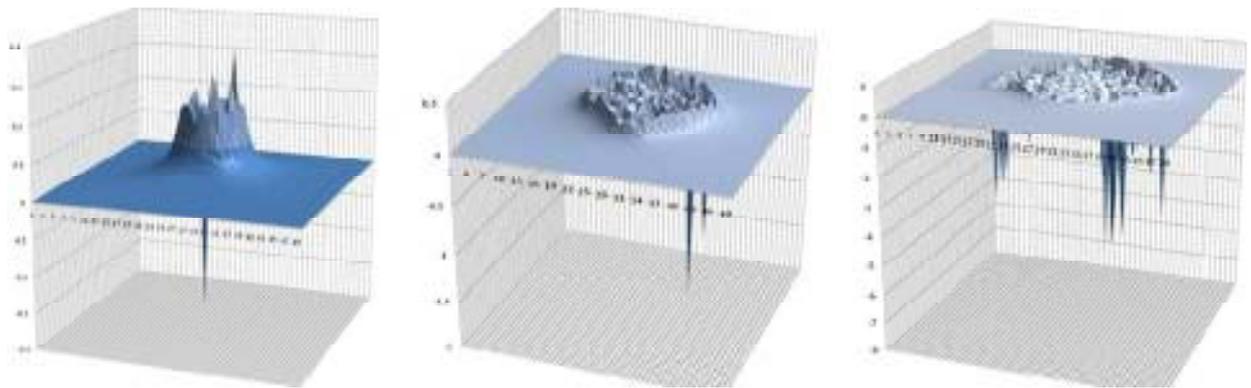


Gráfico 9. Potencial de Atratividade População 1 - 500, 700 e 800 iterações

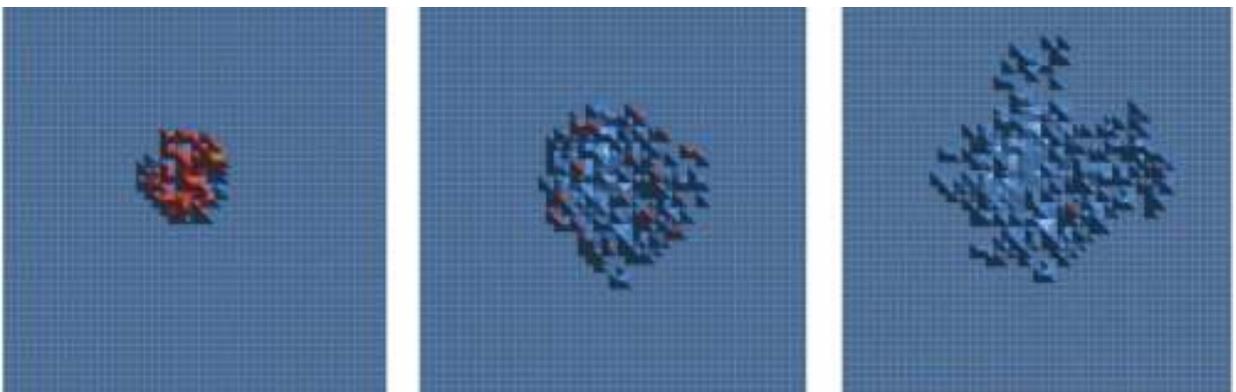


Gráfico 10. Localização População 2 - 500, 700 e 800 iterações

A População 2 é a única que com 800 iterações do modelo ainda apresenta pontos de atratividade positiva próximas ao núcleo inicial de ocupação, o que resultou em uma re-alocação dessa atividade em áreas no centro inicial de ocupação.

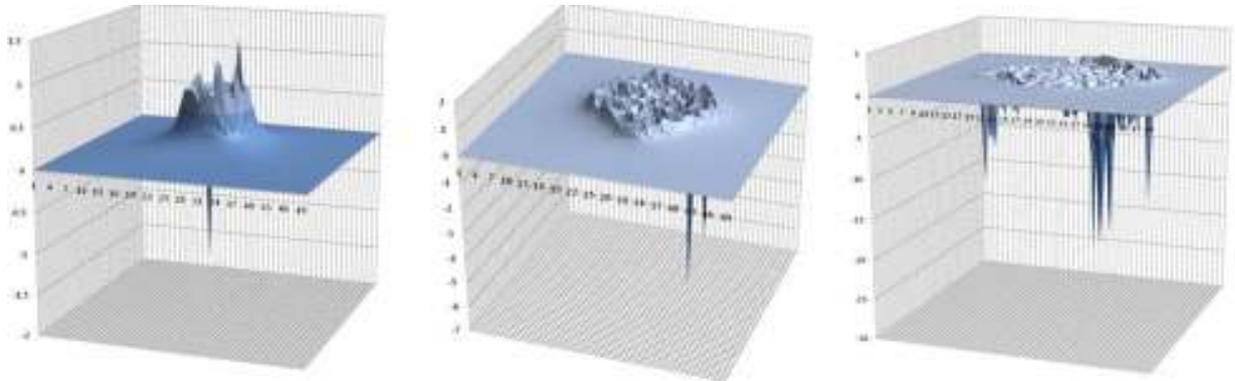


Gráfico 11. Potencial de Atratividade População 2 - 500, 700 e 800 iterações

Com 700 iterações as maiores densidades da população 3 já se concentram na periferia no lado direito da ocupação. Com 800 iterações uma organização diferenciada se apresenta pelo “agrupamento de atividades” em pontos da periferia afastados do núcleo inicial, apesar da sua preferência pelas áreas de maior acessibilidade.



Gráfico 12. Localização População 3 - 500, 700 E 800 ITERAÇÕES

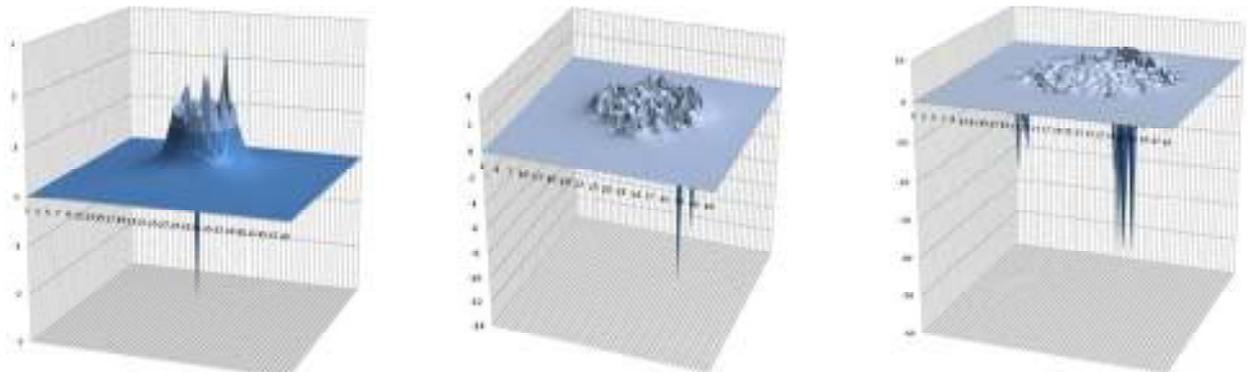


Gráfico 13. Potencial de Atratividade População 3 - 500, 700 e 800 iterações

Nesta simulação, apesar da manutenção de uma área central com densidade maior e concentração das diferentes atividades de forma conjunta, as áreas periféricas demonstram uma situação de segregação entre as três populações residentes que geram vazios visualizados em cada atividade individualmente.

Somente a atividade comercial se manteve com uma forma semelhante ao sistema total. É interessante notar que a ocupação do sistema total, por sua distribuição homogênea, não parece trazer uma ordem com segregação. Essa propriedade aparece apenas quando observa-se as atividades e suas áreas de ocupação isoladamente.

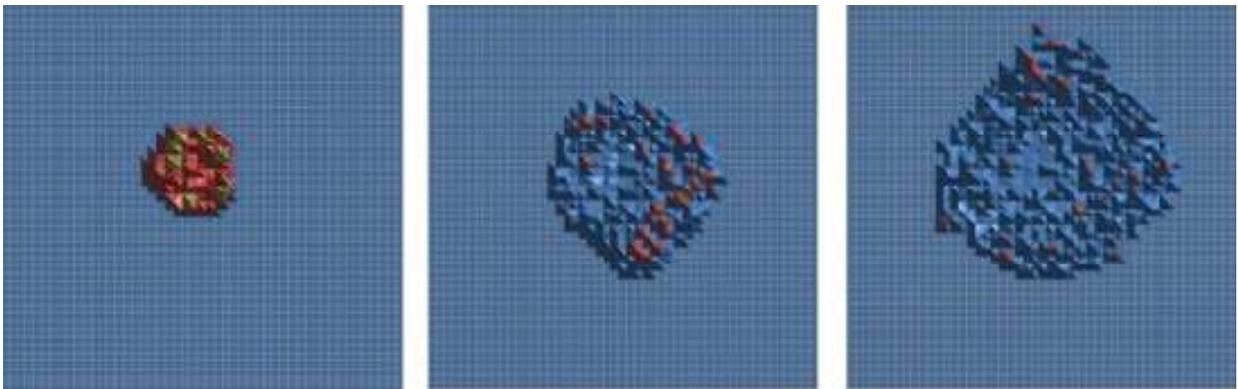


Gráfico 14. Localização Sistema Total - 500, 700 e 800 iterações

3.3.3 SIMULAÇÃO 2

Na **Simulação 2** as equações de evolução foram modificadas com o intuito de desenvolver um sistema onde as escolhas de localização sofrendo maior influência das demais definidas como o “peso” nas equações de evolução de cada atividade.

O peso de cada atividade foi ampliado e as equações de evolução do sistema geram padrões de ocupação com menor liberdade na escolha de localização do que se viu na **Simulação 1** deste trabalho. A tabela abaixo permite a visualização das equações de evolução que foram modificadas para a Simulação 2 com o intuito de testar a sensibilidade do modelo às mudanças e a possível formação de diferenças nas formas de ocupação.

Tabela .5. Equações de evolução e coeficientes de ocupação Simulação 2

| ATIVIDADES | EQUAÇÕES DE EVOLUÇÃO |
|------------|---|
| POP 1 | $0 * \text{pop } 1[i][j] + 0 * \text{pop}2[i][j] + 0 * \text{pop}3[i][j] + 0.2 * \text{com}[i][j] - 0.01 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| POP 2 | $0 * \text{pop}2[i][j] - 0.1 * \text{pop}1[i][j] + 0 * \text{pop}3[i][j] + 0 * \text{com}[i][j] - 0.1 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| POP3 | $0 * \text{pop}3[i][j] - 0.01 * \text{pop}1[i][j] - 0 * \text{pop}2[i][j] + 0.1 * \text{com}[i][j] + 0.01 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| COM | $0 * \text{pop}1[i][j] + 0 * \text{pop}2[i][j] + 0 * \text{pop}3[i][j] + 0 * \text{com}[i][j] - 0 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| IND | $0 * \text{ind}[i][j] + 0.001 * \text{com}[i][j] - 0 * \text{pop}1[i][j] - 0 * \text{pop}2[i][j] + 0 * \text{pop}3[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| ATIVIDADES | COEFICIENTES DE OCUPAÇÃO |
| POP1 | $\text{poppot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] * 2);$ |
| POP2 | $\text{pop}2\text{pot}[i][j] / \text{coefi}[i][j];$ |
| POP3 | $\text{pop}3\text{pot}[i][j] / \text{coefi}[i][j];$ |
| COM | $\text{compot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] / 2);$ |
| IND | $\text{indpot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] * 10);$ |

Essa simulação surge com um comportamento diferenciado em relação às demais em função da forma de ocupação extremamente densa que a população 2 se desenvolve afetando, dessa forma, todas as demais atividades.

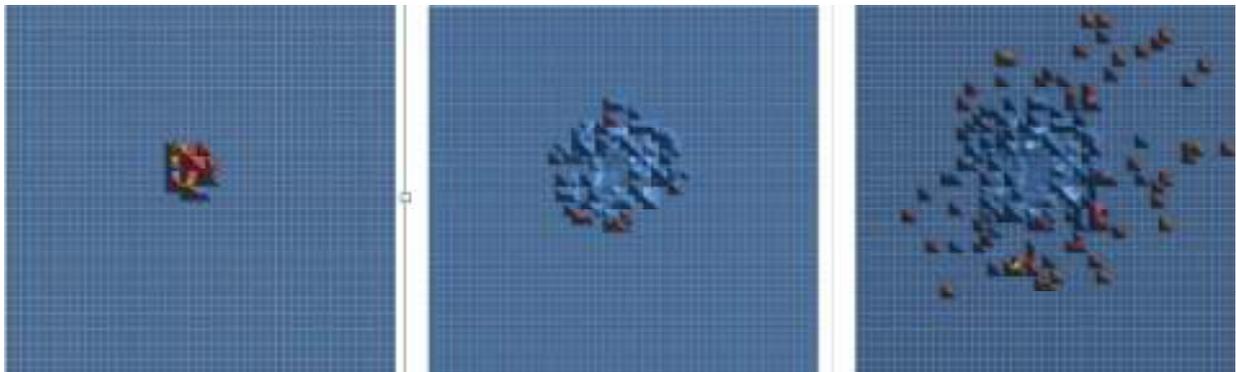


Gráfico 15. Localização Indústria – 400, 600 e 700 iterações

A atividade industrial, assim como todas as demais atividades do sistema, evolui até 600 iterações de forma usual, em torno do núcleo inicial de ocupação.

No entanto, entre 600 e 700 iterações a distribuição espacial dessa atividade tem uma modificação drástica, forçando a criação de uma série de “ilhas” dispostas por um território em forma de elipse.

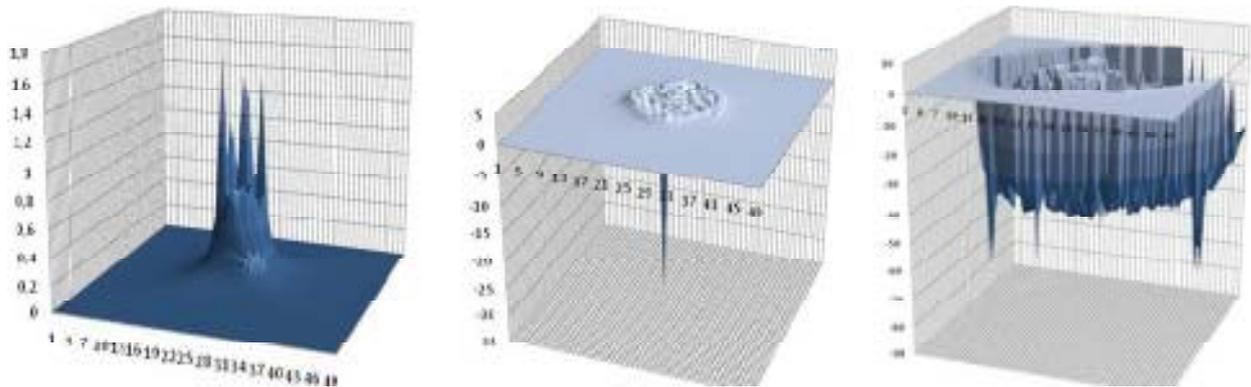


Gráfico 16. Potencial de Atratividade Indústria – 400, 600, e 700 iterações

O comércio também se apresenta de forma semelhante, porém com distribuição mais homogênea, com menores distâncias em relação ao centro.

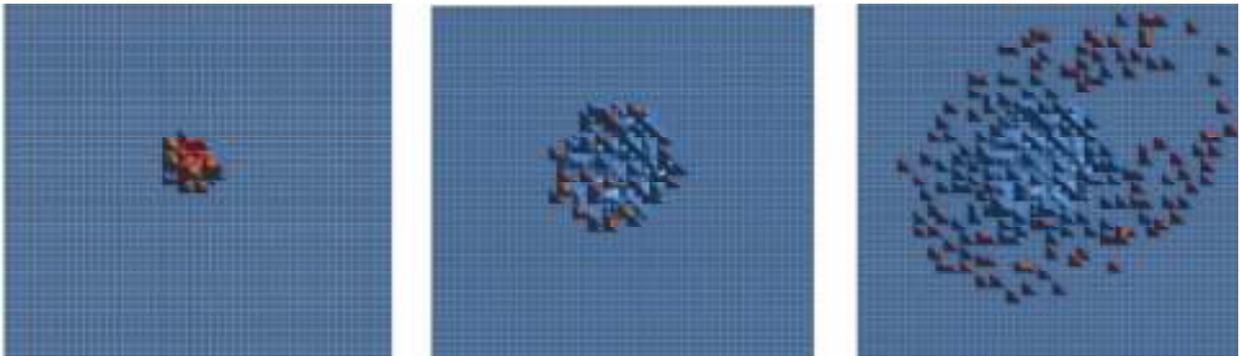


Gráfico 17. Localização Comércio – 400, 600 E 700 iterações

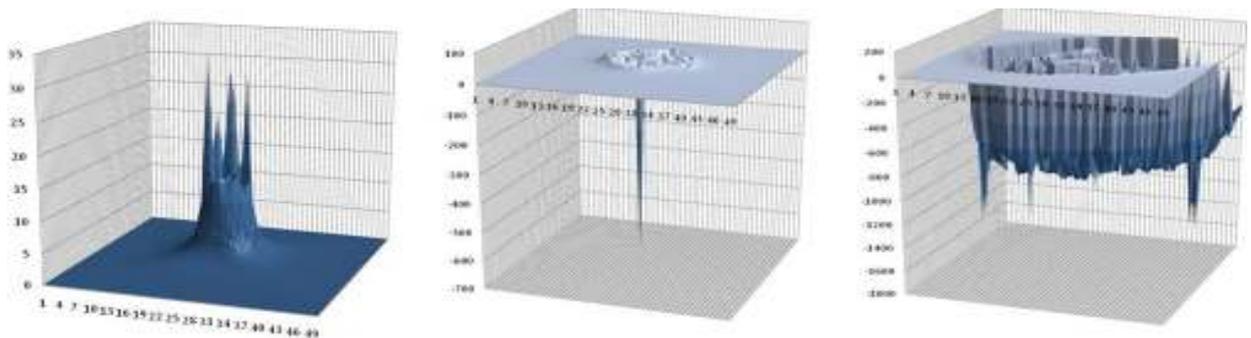


Gráfico 18. Potencial de Atratividade Comércio – 400, 600, e 700 iterações

O comportamento dos gráficos de potencial de atratividade para essa atividade demonstra, assim como na Indústria, a continuidade de valores positivos nas áreas centrais em uma continuidade da forma de ocupação, apesar da evolução peculiar do sistema.



Gráfico 19. Localização População 1 – 400, 600 e 700 iterações

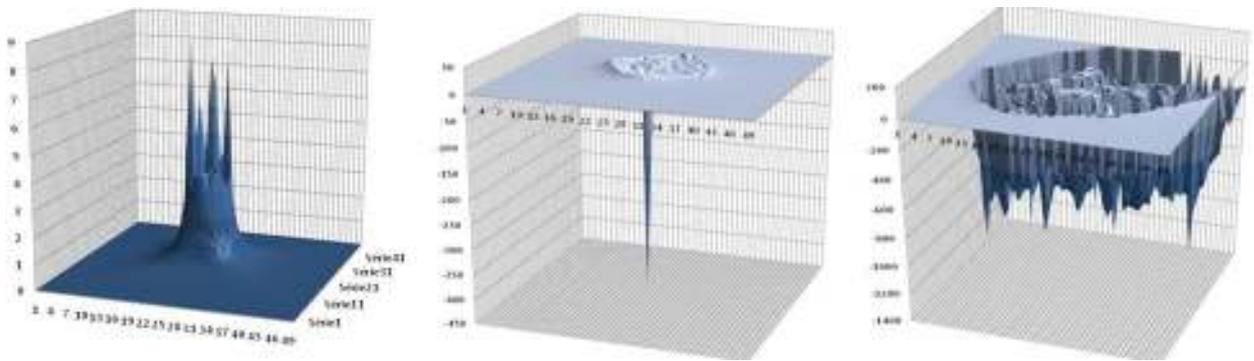


Gráfico 20. Potencial de Atratividade População 1 – 400, 600, e 700 iterações

A População 1 se mostra de forma diferente formando 4 grupos de densidade maior, deixando vazios na da borda periférica que serão ocupadas com as maiores densidades da da População 3, como vê-se adiante.

Já a População 2, com sua extrema compactação na ocupação do território celular acabou por gerar um parâmetro de ordem diferenciado em relação às demais atividades.



Gráfico 21. Localização População 2 – 400, 600 e 700 iterações

Além de ser a única a permanecer com densidades altas no núcleo central, também cria um outro espaço de ocupação espesso. Mesmo que essa forma alcançada pela População 2 não traga

em si as outras atividades, seu deslocamento modifica as relações de acessibilidade e direciona a alocação das demais.

A diferença entre essa área e as demais pode ser vista observando-se a superfície de potencial de atratividade da População 2 que, com 600 iterações já aparece diferenciada das demais por manter áreas centrais com valores positivos.

Com 700 iterações, apresenta uma superfície heterogênea com vários pontos positivos, mesmo em áreas ocupadas por outras atividades.

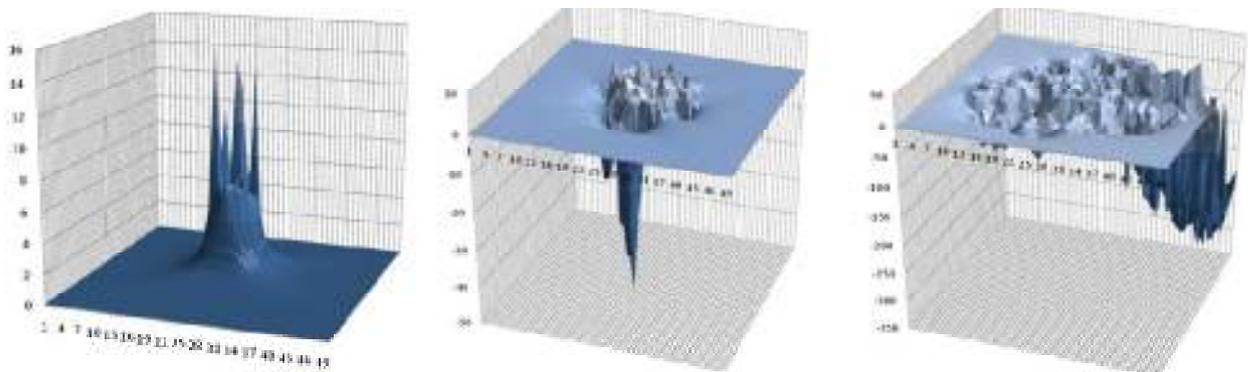


Gráfico 22. Potencial de Atratividade População 2 – 400, 600, e 700 iterações

A população 3 praticamente ocupa toda a borda entorno do centro inicial e da área de forte concentração da população 2.

Apesar desta simulação se caracterizar pela inusitada distribuição de atividades, a ocupação total se mostra densa e bem distribuída, ainda apresentando locais com as maiores densidades no núcleo inicial de alocação.



Gráfico 23. Localização População 3 – 400, 600 e 700 iterações

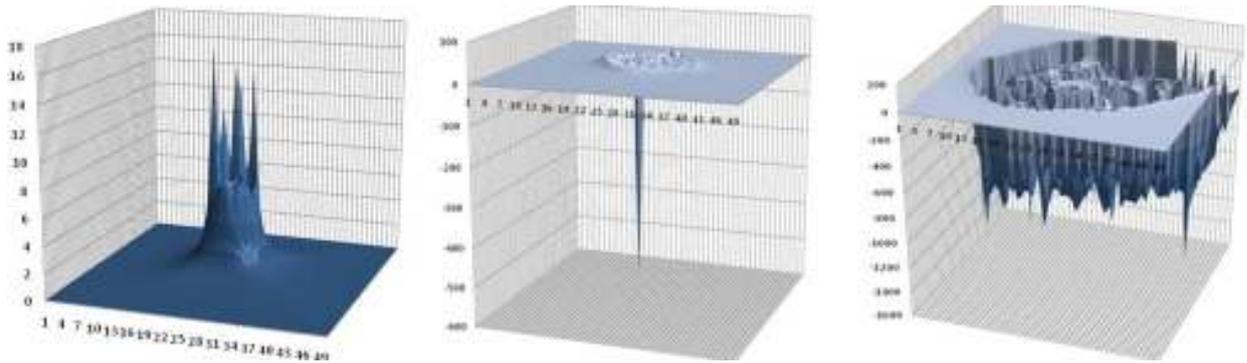


Gráfico 24. Potencial de atratividade População 3 – 400, 600, e 700 iterações



Gráfico 25. Localização Sistema Total – 400, 600 e 700 iterações

Esta simulação tem caráter bastante diferenciado em relação às demais pela forma de distribuição das atividades sob o território celular. Abaixo, as imagens refletem o desenvolvimento dos valores de acessibilidade criados no sistema. A superfície gerada pela distribuição dos valores de acessibilidade também criam uma “topografia” quando os valores são distribuídos sobre o território celular, como está representada no gráfico abaixo.



Gráfico 26. Acessibilidade do sistema - 400, 600 E 700 iterações

Os valores de acessibilidade de cada célula direciona o desenvolvimento do sistema. Tem-se aqui uma tendência de estado que se confirma como atrator na direção de evolução do sistema influenciando sua forma final.

3.3.4 SIMULAÇÃO 3

As mudanças das equações de evolução nessa simulação afetam a atividade residencial População 1 no que se refere ao espaço consumido. Isso se dá em função da utilização do coeficiente de ocupação ser menor aos apresentados nas outras simulações. Isso reduz a necessidade de deslocamento da População 1 em função da ocupação de espaço.

Outra importante mudança se dá pelo fato da atividade comercial ter relação positiva para a População 1. Como a exigência por espaço é menor, a População 1 tem tendência a ocupar áreas mais densas do que antes, tendo menor deslocamento em relação ao centro inicial.

Essa característica em conjunto com a menor demanda por espaço faz com que a tendência à centralização da ocupação ocorra de forma diferenciada.

Tabela .6. Equação de evolução e coeficiente de ocupação Simulação 3

| ATIVIDADE | EQUAÇÃO DE EVOLUÇÃO |
|-----------|---|
| POP1 | $0 * \text{pop1}[i][j] - 0 * \text{pop2}[i][j] - 0 * \text{pop3}[i][j] + 0.01 * \text{com}[i][j] - 0.01 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| POP2 | $0 * \text{pop2}[i][j] - 0.1 * \text{pop1}[i][j] + 0 * \text{pop3}[i][j] + 0.01 * \text{coM}[i][j] - 0.1 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| POP3 | $0 * \text{pop3}[i][j] - 0.01 * \text{pop1}[i][j] - 0 * \text{pop2}[i][j] + 0.1 * \text{com}[i][j] + 0.01 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| COM | $0 * \text{pop1}[i][j] + 0 * \text{pop2}[i][j] + 0 * \text{pop3}[i][j] + 0.1 * \text{com}[i][j] - 0 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| IND | $0 * \text{ind}[i][j] + 0.001 * \text{com}[i][j] - 0 * \text{pop1}[i][j] - 0 * \text{pop2}[i][j] + 0 * \text{pop3}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| ATIVIDADE | COEFICIENTE DE OCUPAÇÃO |
| POP1 | $\text{poppot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j]);$ |
| POP2 | $\text{pop2pot}[i][j] / \text{coefi}[i][j];$ |
| POP3 | $\text{pop3pot}[i][j] / \text{coefi}[i][j];$ |
| COM | $\text{compot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] / 10);$ |
| IND | $\text{indpot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] * 10);$ |

A Indústria aparece aqui ocupando áreas próximas ao centro e, como se verá em outras atividades, o território ocupado permanece praticamente o mesmo com diferenças apenas nos locais onde se concentram as maiores densidades.

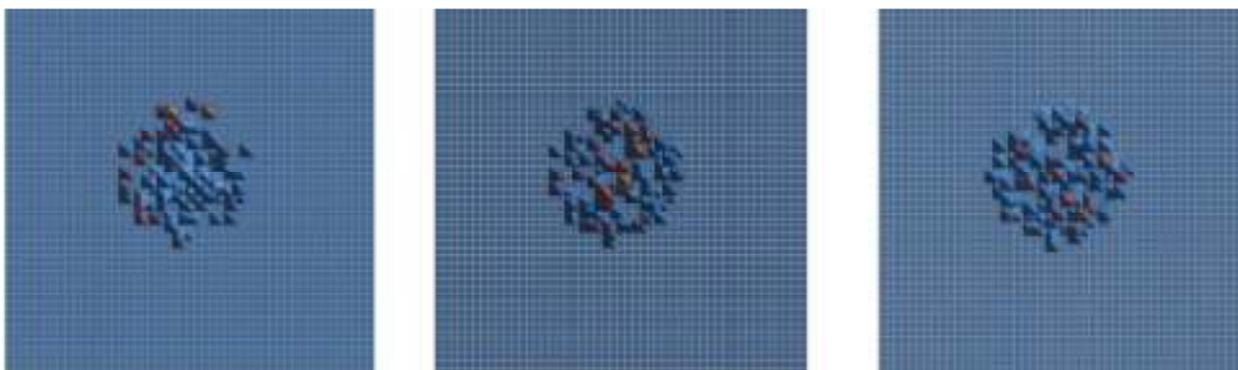


Gráfico 27. Localização Indústria – 600, 700 e 800 iterações

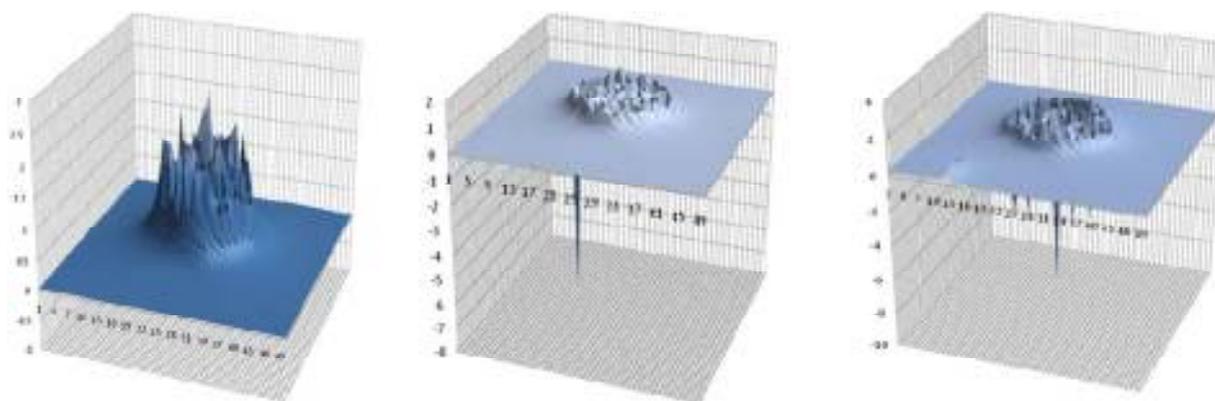


Gráfico 28. Potencial de atratividade Indústria – 600, 700, e 800 iterações

Esta simulação se caracteriza pelas modificações ocorrerem todas no entorno do núcleo inicial de forma bem densa. Este é o caso do comércio que se dispersa com vazios e depois passa por uma densificação na área mais central.

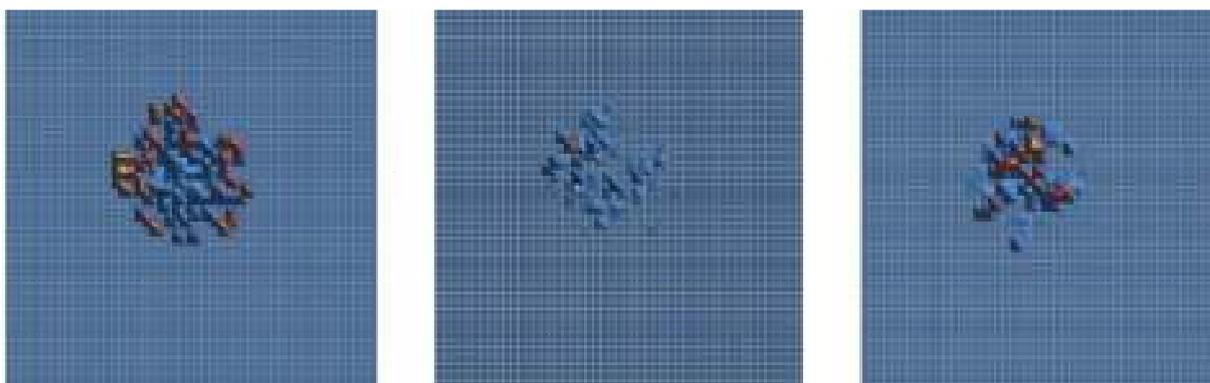


Gráfico 29. Localização Comércio – 600, 700 e 800 iterações

Com 700 iterações a área central ainda apresenta pontos com potencial de atratividade positivos tanto para o Comércio quanto para a População 1. Chegando a 800 iterações, a área

central volta a ter em alguns pontos valores de Potencial de Atratividade tão altos como os apresentados no início da simulação.

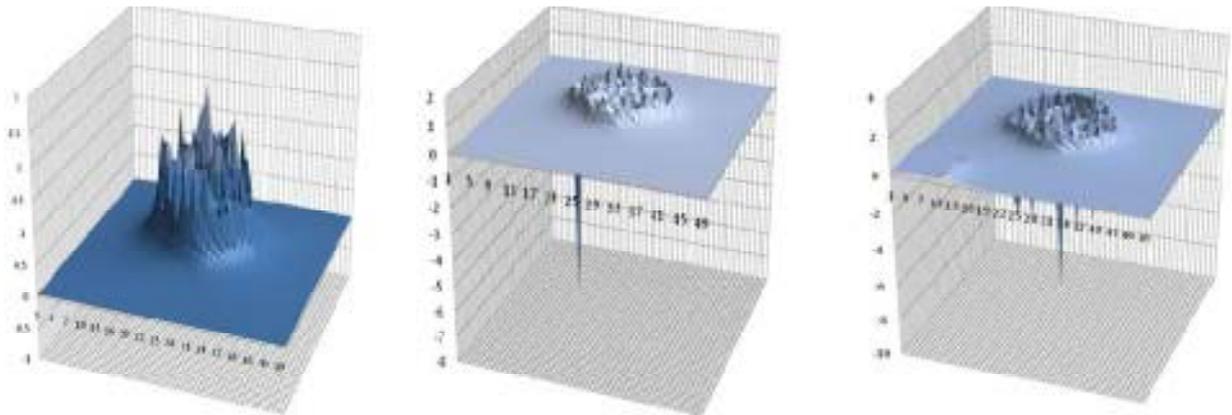


Gráfico 30. Potencial de atratividade Comércio – 600, 700, e 800 iterações

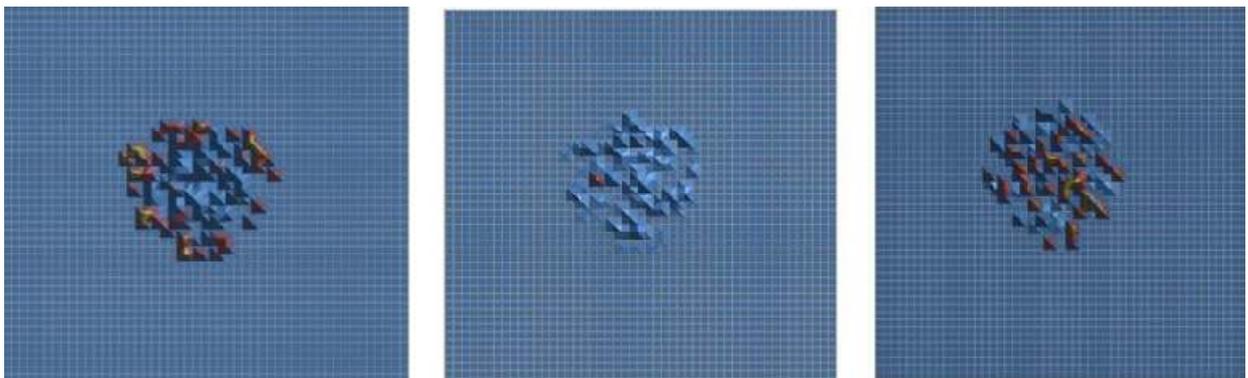


Gráfico 31. Localização População 1 – 600, 700 e 800 iterações

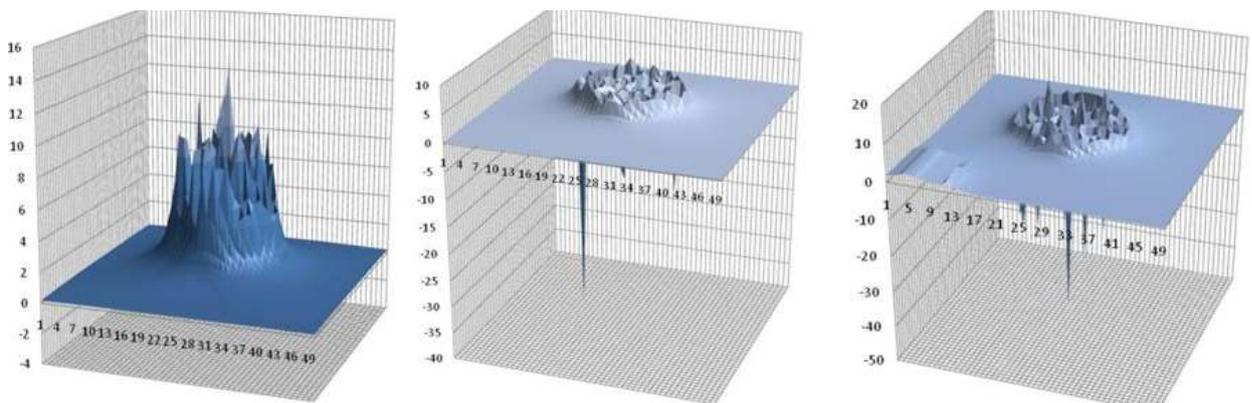


Gráfico 32. Potencial de atratividade População 1 – 600, 700, e 800 iterações

A população 2 se comporta de modo diferenciado ao se deslocar do núcleo inicial e ocupar a periferia da ocupação. A superfície de atratividade peculiar em “forma de funil” expulsa toda a População 2 do centro inicial forçando a realocação na borda da área ocupada.

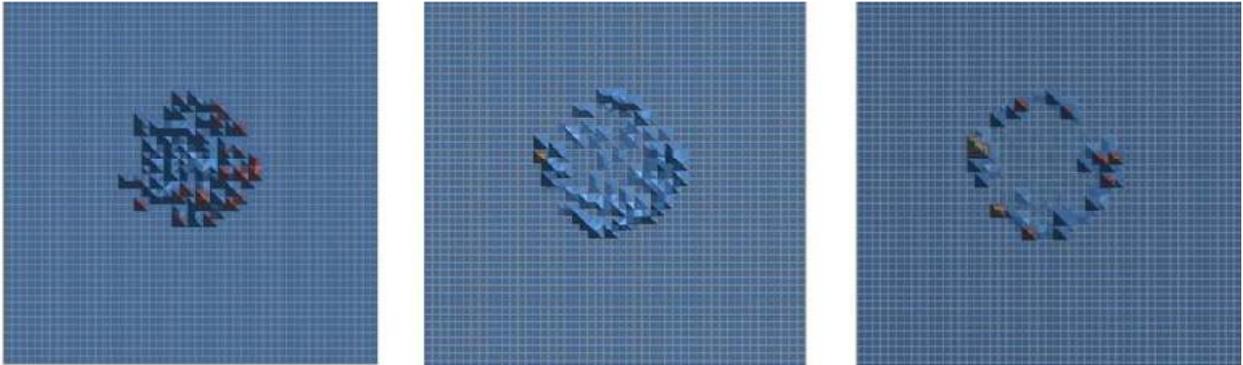


Gráfico 33. Localização População 2 – 600, 700 e 800 iterações

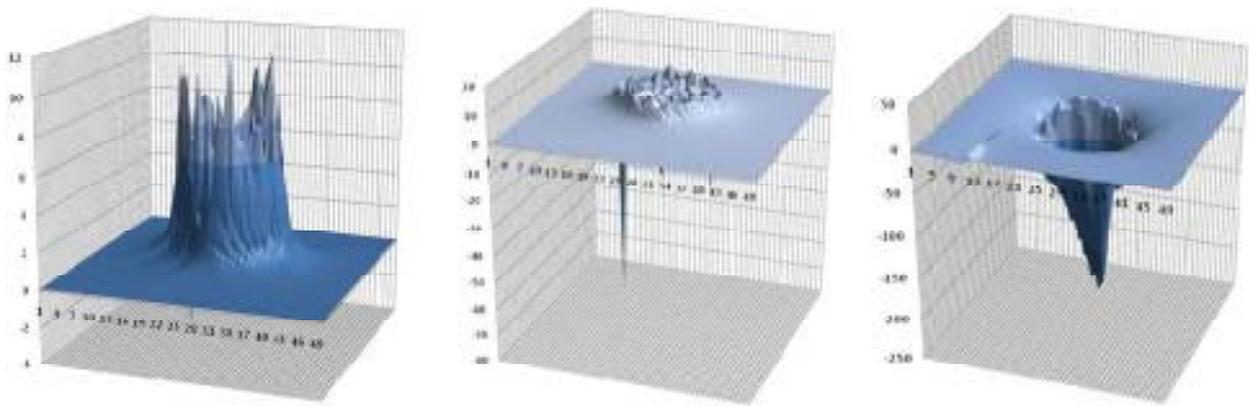


Gráfico 34. Potencial de atratividade População 2 – 600, 700, e 800 iterações

Ao longo das iterações, cada população apresenta comportamentos diferenciados que se revelam na forma de ocupação que se manifestam sob forma de centralização (Populações 1 e 3) ou descentralização (caso da População 2) praticamente dentro da mesma área de ocupação ao longo do tempo.

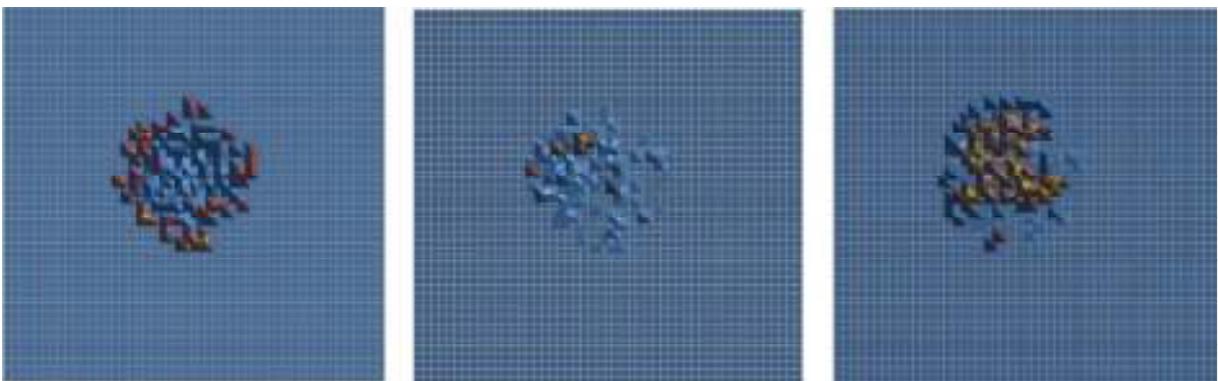


Gráfico 35. Localização População 3 – 600, 700 e 800 iterações

Essa é a única simulação com altos valores de potencial de atratividade na área central para a População 3 que acaba por ocupar de forma densa a área do núcleo inicial de ocupação.

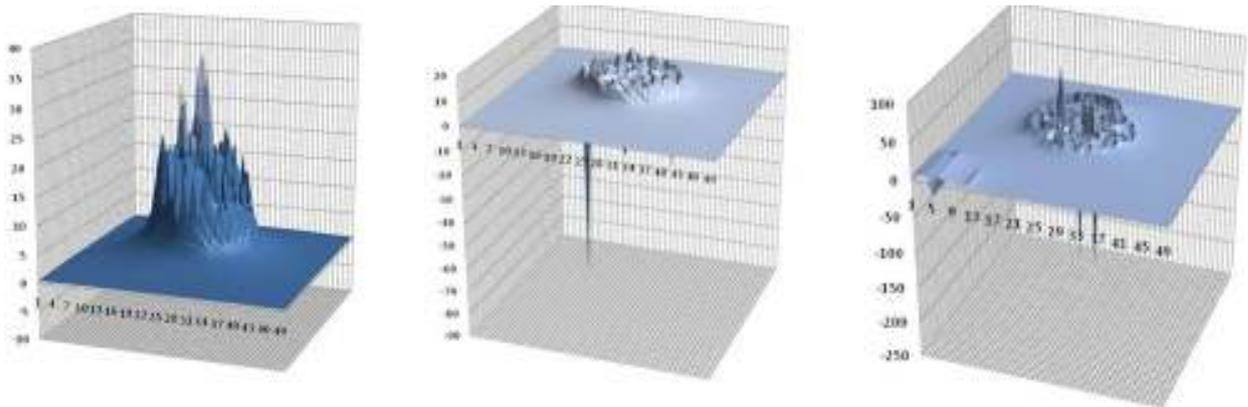


Gráfico 36. Potencial de atratividade População 3 – 600, 700, e 800 iterações

O somatório do sistema ao longo das iterações apresenta espaços de densificação em diferentes pontos sem grandes variações no tamanho da área ocupada.



Gráfico 37. Localização Sistema Total – 600, 700 e 800 iterações

Essa simulação exemplifica bem a variação do coeficiente de ocupação que, juntamente com a saturação de cada célula, se altera seguindo as variações de ocupação dos sistemas simulados.

Os gráficos a seguir demonstram a evolução do coeficiente de ocupação que mesmo depois de se tornarem negativos em algumas células, passam a se tornar novamente positivos. Isso se dá em função da ampliação dos valores de saturação que podem ocorrer a partir do momento que o coeficiente passa a ser negativo como descrito nas equações 6.8, 6.9 e 6.10 nesse mesmo capítulo.

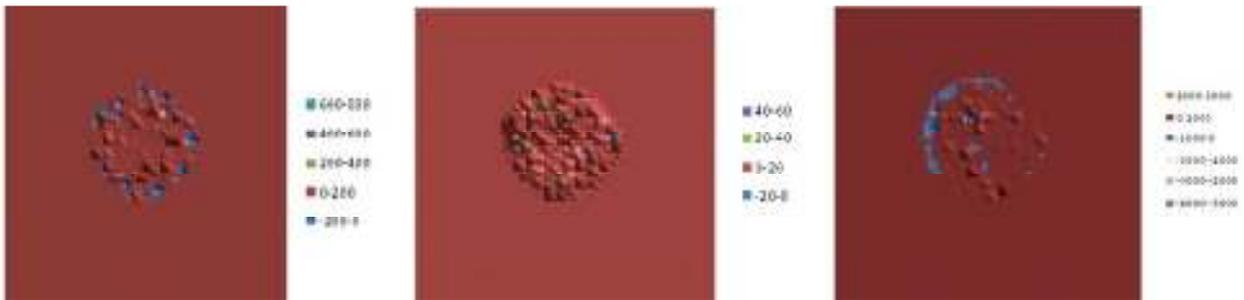


Gráfico 38. Coeficiente de ocupação - 600, 700 E 800 iterações

Em função disso o coeficiente de ocupação pô se tornar negativo e posteriormente positivo dentro da mesma área. Esse tipo de comportamento poderia ser relacionado com a inexistência de uma atividade que se desloque do centro criando novas áreas com valores altos de acessibilidade em novas áreas do sistema “direcionando” a ocupação de novas áreas.

3.3.5 SIMULAÇÃO 4

Nesta simulação o índice de ocupação torna a População 1 mais suscetível a se deslocar do centro inicial. Essa característica surge em função de sua preferência por maiores espaços como definido na equação que relaciona seu potencial de atratividade ao coeficiente de ocupação.

Tabela .7. Equações de evolução e coeficientes de ocupação simulação 4

| ATIVIDADE | EQUAÇÕES DE EVOLUÇÃO |
|-----------|---|
| POP1 | $0 * \text{pop1}[i][j] - 0 * \text{pop2}[i][j] - 0 * \text{pop3}[i][j] + 0.01 * \text{com}[i][j] - 0.01 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| POP2 | $0 * \text{pop2}[i][j] - 0.1 * \text{pop1}[i][j] + 0 * \text{pop3}[i][j] + 0.1 * \text{com}[i][j] - 0.1 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| POP3 | $0 * \text{pop3}[i][j] - 0.01 * \text{pop1}[i][j] - 0 * \text{pop2}[i][j] + 0.1 * \text{com}[i][j] + 0.01 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| COM | $0 * \text{pop}[i][j] + 0 * \text{pop2}[i][j] + 0 * \text{pop3}[i][j] + 0.1 * \text{com}[i][j] - 0 * \text{ind}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| IND | $0 * \text{ind}[i][j] + 0.01 * \text{com}[i][j] - 0.01 * \text{pop}[i][j] - 0 * \text{pop2}[i][j] + 0 * \text{pop3}[i][j] + 10 * \text{centraux}[i][j];$ |
| ATIVIDADE | POTENCIAL DE ATRATIVIDADE / COEFICIENTE DE OCUPAÇÃO |
| POP1 | $\text{poppot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] * 5);$ |
| POP2 | $\text{pop2pot}[i][j] / \text{coefi}[i][j];$ |
| POP3 | $\text{pop3pot}[i][j] / \text{coefi}[i][j];$ |
| COM | $\text{compot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] / 10);$ |
| IND | $\text{indpot}[i][j] / (\text{coefi}[i][j] * 10);$ |

A atividade industrial passa por um processo singular nessa simulação. Inicialmente apresenta um grande deslocamento do entorno do núcleo inicial, voltando apresentar alguma densidade nessa área com 700 iterações do sistema.

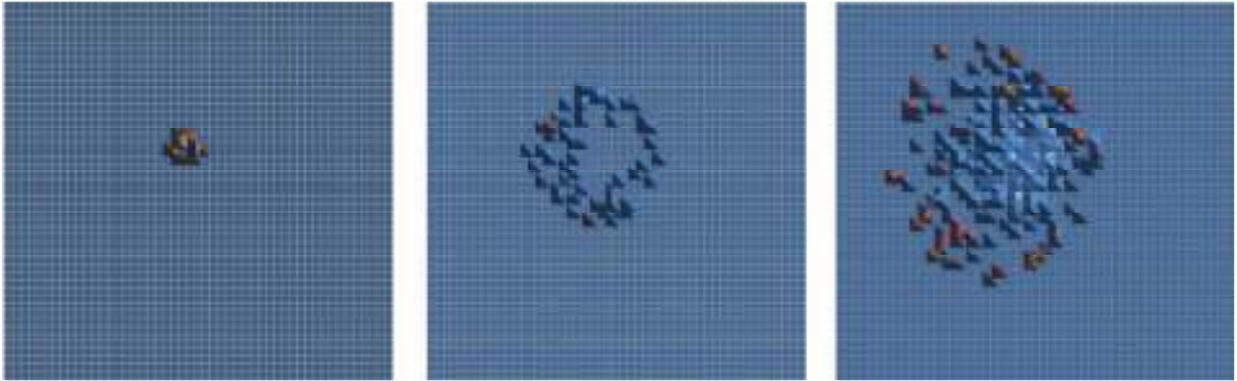


Gráfico 39. Localização Indústria – 300, 600 e 700 iterações

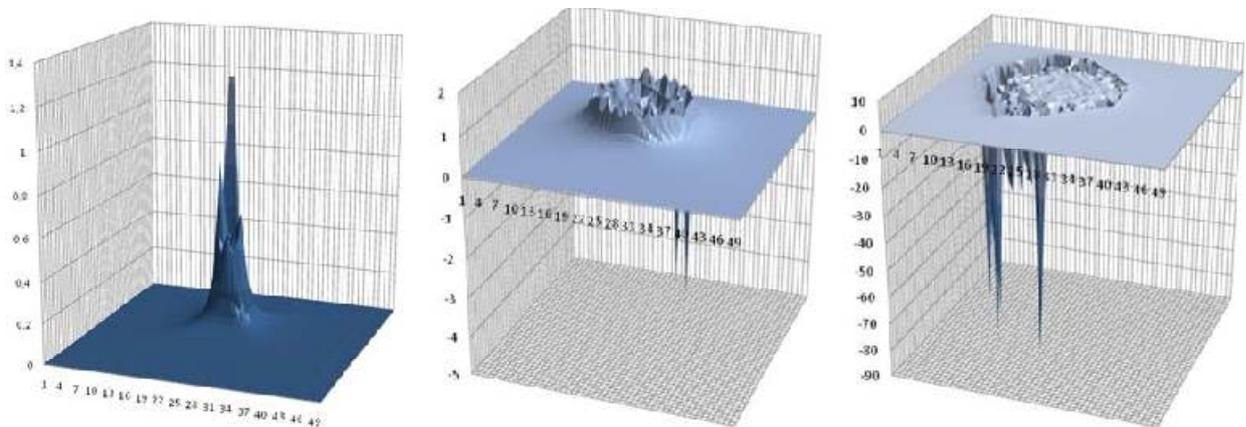


Gráfico 40. Potencial de atratividade Indústria – 300, 600, e 700 iterações

Essa situação emerge em função da interação entre a Indústria e as populações residenciais, que iniciam seu desenvolvimento ocupando as áreas centrais, deixando-as após 600 iterações. Dessa forma a atividade industrial volta a ter áreas positivas no núcleo inicial e arredores.

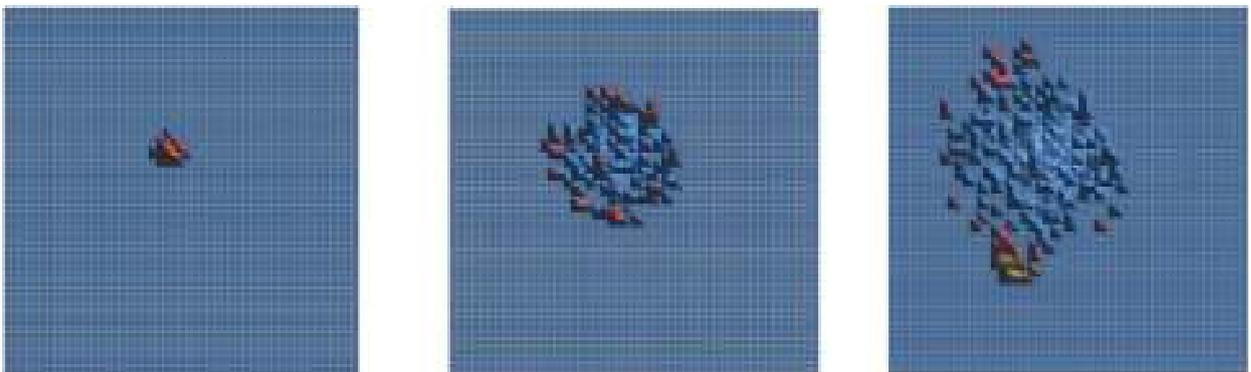


Gráfico 41. Localização Comércio – 300, 600 e 700 iterações

Com 700 iterações o comércio ocupa a área gerando pontos de concentração na periferia do sistema acima e abaixo do núcleo inicial.

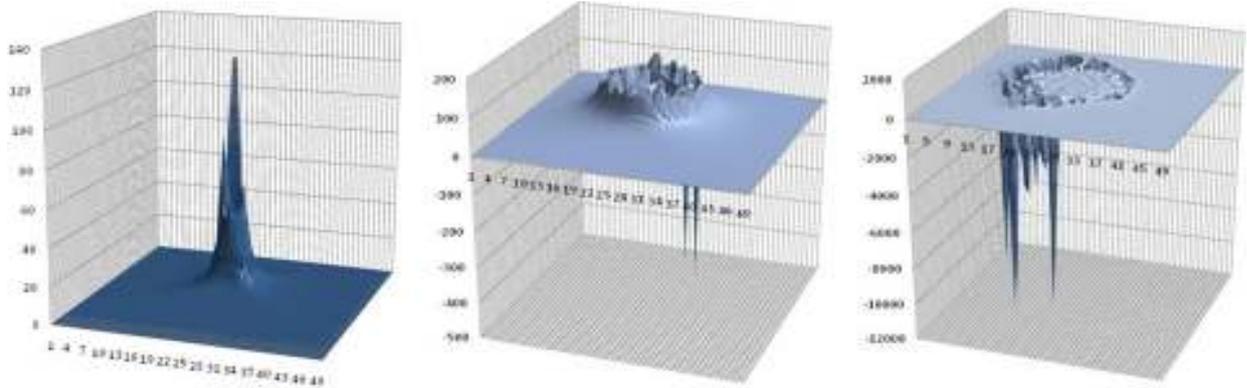


Gráfico 42. Potencial de atratividade Comércio – 300, 600, e 700 iterações

Nota-se aqui um redirecionamento das áreas de maior crescimento que passa da periferia como um todo à ocupação mais densa na área esquerda do território celular.

A População 1 ocupa o núcleo inicial passando a ter áreas mais periféricas gerando vazios entre o centro e sua localização mais distanciada.

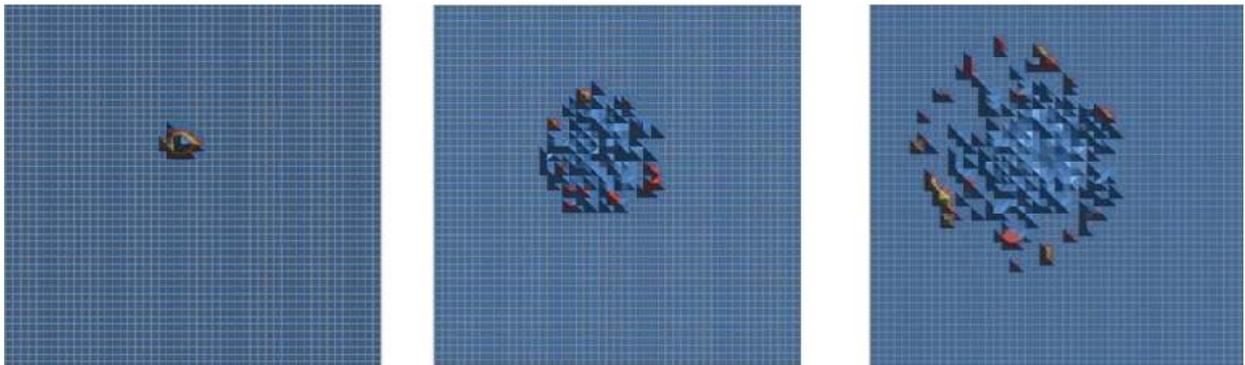


Gráfico 43. Localização População 1 – 300, 600 e 700 iterações

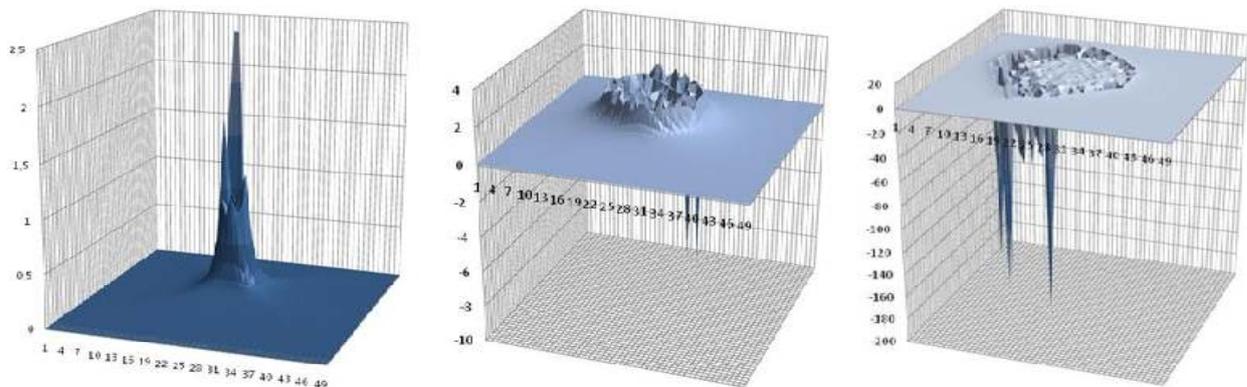


Gráfico 44. Potencial de atratividade População 1 – 300, 600, e 700 iterações

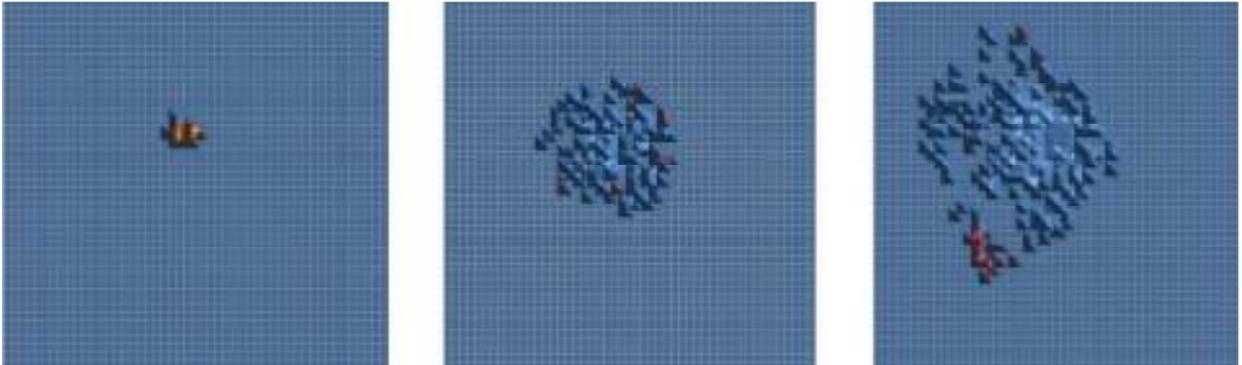


Gráfico 45. Localização População 2 – 300, 600 e 700 iterações

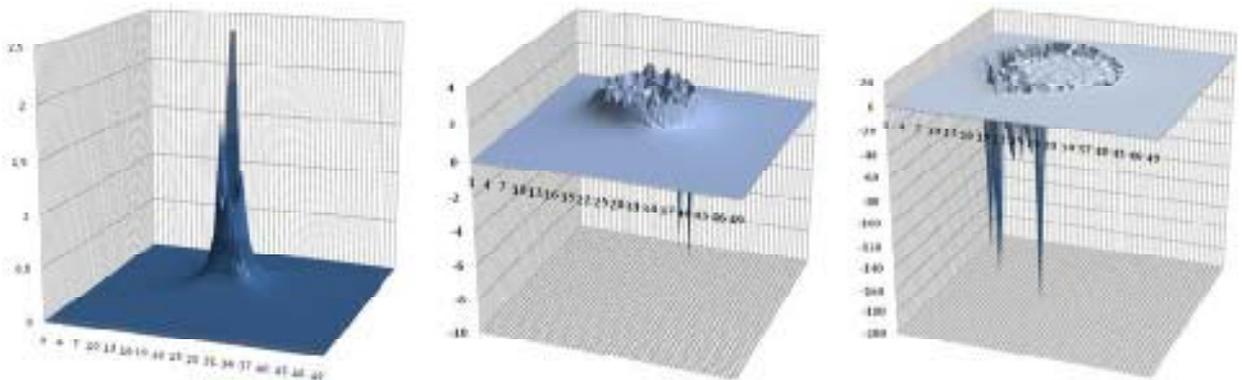


Gráfico 46. Potencial de atratividade População 2 – 300, 600, e 700 iterações

As populações 2 e 3 também deixam vazios e se localizam na “borda de maior densidade” seguindo o direcionamento desigual do crescimento do lado esquerdo do sistema que se reflete na ocupação do Sistema Total.



Gráfico 47. Localização População 3 – 300, 600 E 700 iterações

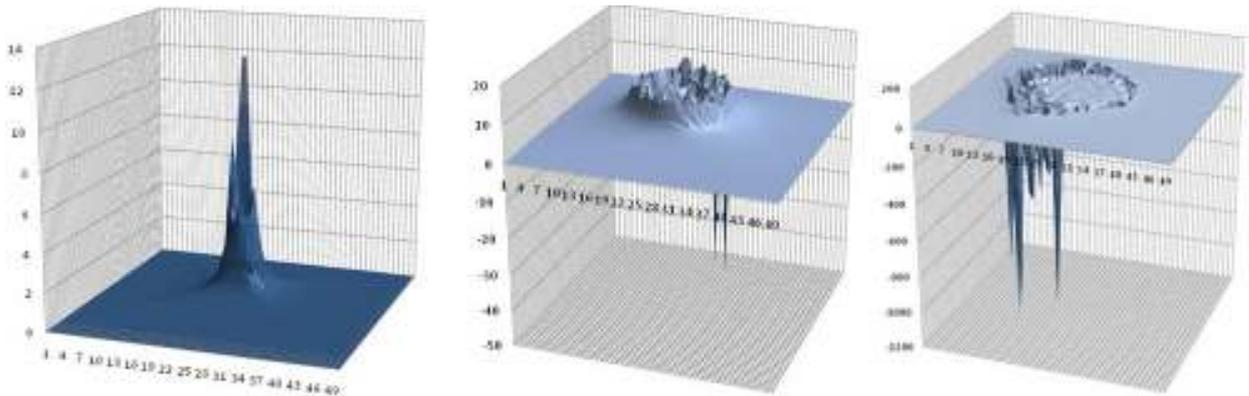


Gráfico 48. Potencial de atratividade População 3 – 300, 600, e 700 iterações

Além da forte concentração em apenas um “lado da borda externa” da ocupação, a Simulação 4 também possui dessemelhança das demais simulações em função de seu sistema, já com 700 iterações, ainda possui valores positivos nas áreas centrais para todas as atividades.

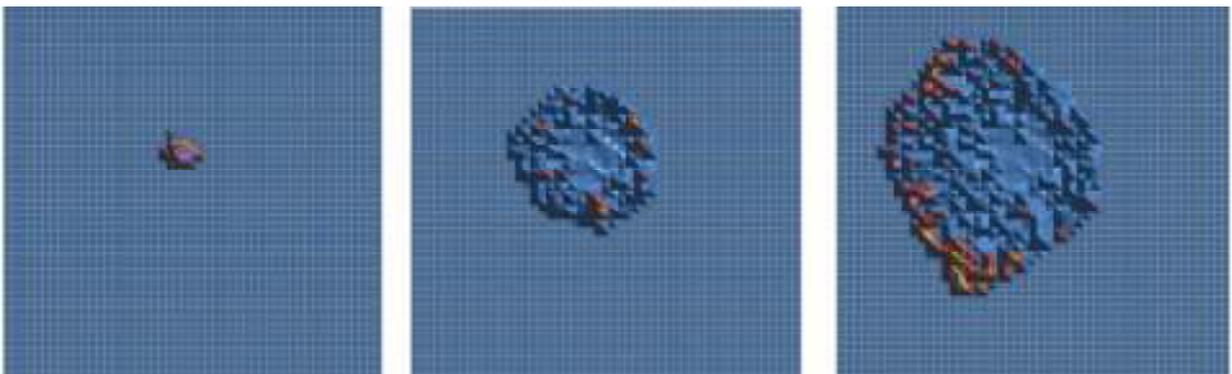


Gráfico 49. Localização Sistema Total – 500, 600 e 700 iterações

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES APRESENTADAS

As relações descritas na construção do Modelo POTENCIAT, deram origem a quatro simulações onde os mecanismos internos de seu funcionamento foram alterados para testar a sensibilidade do modelo em relação às regras definidas nas equações de evolução.

A diferenciação, apesar de ser fruto de pequenas alterações, se manifestou na maneira como as atividades se relacionaram e nas ocupações. Assim, foi possível a emergência de padrões espaciais diversos, pois as diferenciações não se limitaram à comparação dos resultados finais das quatro simulações, mas também ocorreram ao longo da evolução de cada uma.

Os resultados das simulações até agora permitem uma análise a partir da visualização dos resultados para levantar as relações espaciais, estruturais e funcionais encontradas nos quatro

sistemas simulados. Apesar do caráter abstrato do modelo e seus resultados, essa avaliação procura elencar características que, a princípio, seriam encontradas também em sistemas reais.

Cada sistema simulado evolui em passos discretos e, em cada simulação, a estrutura dos sistemas foi sendo construída ao longo das iterações, ou seja, as operações efetuadas a cada iteração do modelo se deram a partir dos estágios anteriores. Apesar de cada atividade possuir sua própria estrutura, a interação entre todas foi responsável pelo surgimento da ordem e evolução dos sistemas de forma coletiva, tendo sempre como input o output do passo anterior em uma relação de retroalimentação.

Essa situação define um sistema em que cada modificação é feita sobre uma situação anterior e acaba, de forma circular, servindo de base para as próximas alterações, sejam elas espaciais ou funcionais. Pode-se reconhecer que em um sistema urbano real essa estrutura permaneça ao longo do tempo, mantendo identificação com estágios anteriores de desenvolvimento. Um dos resultados mais claros dessa propriedade é a criação e manutenção de um centro inicial de ocupação que permanece importante na estrutura criada ao longo das iterações.

Apesar dessa permanência, as estruturas criadas sofreram alterações importantes, inclusive gerando áreas de atratividade negativa em locais antes positivos para determinadas atividades. Os desequilíbrios gerados por essa dualidade derivam das relações construídas entre as atividades ao longo das iterações causando a modificação das “topografias de potenciais de atratividades”.

As preferências e a capacidade de competição das atividades influenciam de forma contundente a associação entre elas e definem a emergência de relações funcionais e espaciais, como a diferenciação espacial.

O Modelo foi capaz de criar diferentes densidades distribuídas sobre o território celular que são definidas pela interação entre as atividades e formação de áreas mais atrativas com a geração de limites de saturação maior, em função da maior atratividade nessas áreas. Essas propriedades emergentes aparecem também na diferenciação de densidades entre áreas da mesma atividade.

Uma interessante característica que pode ser ressaltada na apresentação das simulações é a contradição formal da maioria dos sistemas urbanos reais. A maioria das cidades apresenta uma

forma externa com tendência a evoluir para uma forma regular quando levamos em consideração o sistema total. Por outro lado, os diferentes usos de solo, por serem fruto da interação entre as diversas atividades, dirigem-se a uma forma mais fragmentada com ilhas e sobreposições.

Essa característica surge também nos sistemas simulados onde os contornos externos dos Sistemas Totais demonstram uma clara tendência à estabilização da forma. As atividades, por outro lado aparecem com formas mais fragmentadas e irregulares. Essa propriedade surge em função do contínuo deslocamento das áreas mais atrativas, que se modificam constantemente gerando novas ocupações.

Por outro lado, quando os espaços ocupados por determinada atividade se torna negativo para ela, nem todas as atividades são obrigadas a se retirar do sistema buscando uma nova alocação na próxima iteração. Algumas ficam e essa situação também contribui para que a forma final da ocupação de cada atividade alcance uma forma irregular.

Em uma primeira avaliação, o modelo parece capaz de criar dinâmicas de ocupação diferenciadas, mas, mesmo assim, a avaliação visual dos resultados não será suficiente para a validação das estruturas geradas em relação à sua convergência com propriedades e comportamentos existentes em sistemas reais. Os resultados das quatro simulações serão agora avaliados segundo suas propriedades espaciais e estruturais que serão:

- 1) Estudo das Densidades
- 2) Formação de agrupamentos em Estatística Univariada;
- 3) Estrutura em redes;
- 4) Análise de agrupamento multivariada.
- 5) Geometria Fractal.

4 AValiação dos Resultados

Os resultados dessa pesquisa dificilmente podem ser validados com apenas um método de estudo. A avaliação nesse caso é construída por um conjunto de instrumentos de análises onde cada uma pratica diferentes abordagens sobre o objeto a ser medido e testado. Esse processo leva a uma compreensão mais completa sobre as variáveis que estão sendo avaliadas já que procura explicitar os resultados do Modelo POTENCIAT através de diferentes conteúdos.

Neste capítulo os resultados obtidos nas simulações do modelo POTENCIAT serão avaliados para que as qualidades intrínsecas sejam trazidas à tona. O que se pretende é revelar em que medida o modelo reproduz processos do mundo real que não podem ser detectadas pela simples observação da forma de ocupação e concentração de atividades. Com esse objetivo, os resultados do Modelo POTENCIAT serão comparados com sistemas urbanos reais. Porto Alegre, Santa Cruz do Sul e Curitiba entram nessa parte do trabalho servindo de base de comparação nas diferentes avaliações dos resultados das quatro simulações desenvolvidas no capítulo 3.

Os sistemas serão avaliados segundo:

- 1. Avaliação das densidades:** A forma como o sistema urbano é ocupado exemplifica a existência de cooperação ou competição entre as diferentes atividades urbanas. Dessa forma, a avaliação da densidade de cada atividade em diferentes áreas de cada sistema simulado traz a possibilidade de utilização dessa medida como um parâmetro de ordem do sistema, indicando as transformações de intensidade de ocupação.
- 2. Concentração de densidade e formação de grupos univariados:** A dependência espacial é uma premissa do modelo e não pode servir como elemento de validação direta. Contudo, a forma como os grupos são formados ao longo das iterações do modelo e suas características individuais podem ser estudadas através desse tipo de análise.
- 3. Análise topológica:** essa avaliação, baseada em conceitos de redes complexas, procura estudar a posição relativa das células ocupadas por cada atividade, suas interconexões, formação de comunidades, centros, sub-centros, etc.

4. **Formação de grupos multivariados:** a forma de ocupação de cada atividade depende não só da atratividade individual, mas também de sua interação com as demais atividades. Assim, a análise multivariada vem nos fornecer uma forma de identificar como as atividades estão cooperando para a ocupação em uma mesma área do sistema simulado.
5. **Dimensão Fractal:** Essa avaliação da forma dos limites urbanos externa e internamente nos permite a comparação preliminar dos sistemas simulados com sistemas reais.

Ressalta-se que a metodologia de análise aqui empregada levará em consideração as cidades reais como base de análise de forma diferente em cada avaliação. As cidades Porto Alegre/RS, Santa Cruz do Sul/RS e Curitiba/PR serão levadas em consideração de forma diferente para cada análise implementada e, além disso, não servirão como base para todas as avaliações.

4.1 EXAME DAS DENSIDADES

Seguindo as proposições teóricas que dirigiram a formulação do modelo POTENCIAT, procura-se agora definir um importante conceito de sua teoria básica: o *parâmetro de ordem*. Nesse caso as orientações teóricas do problema servem como “guias” para a análise dos resultados do modelo nas quatro simulações apresentadas no capítulo anterior.

Na cidade de Porto Alegre o caso do Bairro Anchieta, citado na introdução desse trabalho, exemplifica os conceitos de transformação espacial e de uso do solo aqui citados. O loteamento que hoje vem a ser o Bairro Anchieta foi registrado em 02 de dezembro 1953 tendo uma parte industrial e uma área estritamente residencial.

O Bairro permaneceu abrigando atividades residenciais exclusivamente até o ano de 1974 quando foi ali inaugurada a CEASA/RS (Centro de Abastecimento do Rio Grande do Sul S.A.). A implantação da CEASA/RS atraiu para o Bairro uma série de atividades ligadas ao abastecimento de produtos hortigranjeiros que antes se localizavam no mercado da Av. Praia de Belas na área centro-sul da cidade.

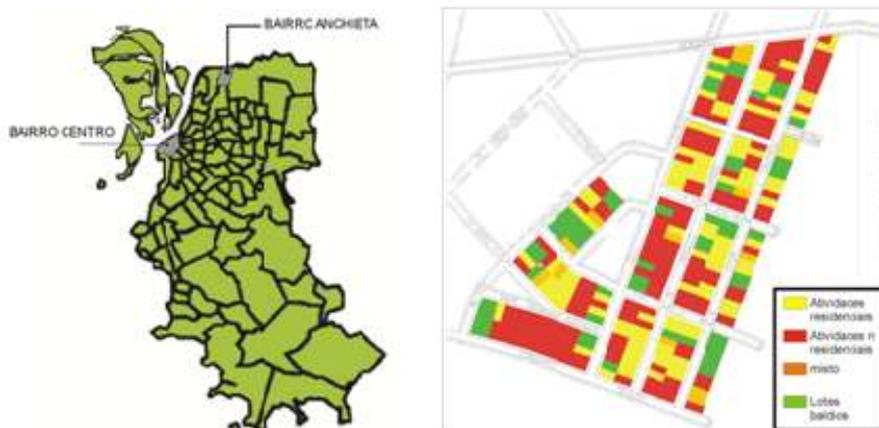


Figura 11. Localização do Bairro Anchieta na cidade de Porto Alegre e distribuição das atividades no ano de 1990.³⁵

Uma vez estabelecida a CEASA/RS, o Bairro Anchieta passou a representar um local centralizador de negócios ligados à atividade de abastecimento não só de produtos

³⁵FONTE: PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DA LEGISLAÇÃO URBANÍSTICA LEI C. 43/79 – 1990

hortigranjeiros, como também de outros tipos de comércio atacadista como o Makro Atacado, embalagens plásticas, produtos de limpeza, etc. Também passaram a se instalar ali indústrias de diversos tipos modificando de forma drástica a paisagem urbana da área, mesmo que isso não fosse permitido pela legislação urbana vigente na época.

A partir do início do fenômeno de “sucessão” da atividade residencial por atividades comerciais e industriais na área, iniciou-se um processo de protesto por parte dos moradores do bairro para impedir o que foi denominado pelos jornais da época de “invasão das indústrias”.

Em virtude da inserção inadequada de uma área residencial no interior de uma área predominantemente industrial, pode-se inferir que as transformações ocorridas no Bairro Anchieta deveriam acontecer mesmo que a CEASA/RS não tivesse sido ali localizada. O que se supõe é que a forma rápida com que as transformações espaciais do bairro vieram a ocorrer foi causada em grande parte pelo poder polarizador que um equipamento urbano como a CEASA/RS possui.

Na imagem a seguir tem-se a situação do bairro hoje, com a localização da CEASA. É possível identificar as edificações ligadas às atividades de comércio, abastecimento e serviços, que hoje predominam na área, pelo tipo de cobertura utilizada nas edificações.



Figura 12. Imagem aérea do Bairro Anchieta, 2011³⁶

³⁶ Fonte: <http://guiapoa.biz/anchieta/empresas?next=46>

Note-se a dimensão da área destinada à CEASA e ao Bairro propriamente dito: ambas ocupam áreas muito similares causando desequilíbrio no subsistema ligado à atividade residencial.

A tabela abaixo demonstra a quantidade de residências e estabelecimentos de comércio e serviços ao longo do tempo:

Tabela .8. Número de empresas e domicílios no Bairro Anchieta³⁶

| ANO | EMPRESAS | DOMICÍLIOS |
|------|----------|------------|
| 1970 | 13 | 224 |
| 1985 | 112 | 81 |
| 1991 | 154 | 52 |
| 2011 | 285 | 49 |

Quando colocamos esses dados em um gráfico de linhas, pode-se observar a inversão da predominância de uma atividade sobre a outra no que se refere à concentração de atividades na área.

Nesse caso, a atividade residencial, que a princípio ocupava a maioria da área no bairro, é substituída pela atividade comercial e abastecimento após passar por um período de concorrência.

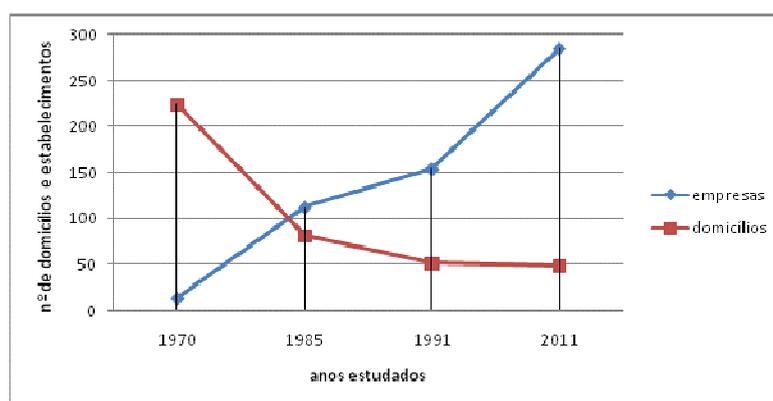


Gráfico 50. Gráfico com o número de domicílios e estabelecimentos ligados às atividades de Comércio, Serviços e Abastecimento³⁷.

³⁷ Fonte: Palma, N. (1991) e <http://guiapoa.biz/anchieta/empresas>

A época de competição mais ferrenha vai desde o início dos anos 80 até meados da década de 90 quando a atividade comercial, de serviços e abastecimento passa a predominar no Bairro, expulsando várias unidades de atividade residencial que hoje são apenas 49.

Essa mesma metodologia foi aplicada nos resultados das simulações desenvolvidas no capítulo 3. O que se pretende nesse exercício é demonstrar a formação e transformação espacial e de uso do solo que são modificados com a evolução do sistema.

4.1.1 SIMULAÇÕES

Considerando o sistema urbano, a densidade de ocupação de cada atividade pode ser utilizada como parâmetro de ordem e verificação da mudança em áreas discretas, já que a ocupação das áreas dos sistemas podem ser diferenciadas. Assim, optou-se como premissa de investigação a avaliação de áreas diferenciadas para verificar sua evolução. Cada uma tem 88 células e a densidade provém da soma de cada uma das atividades alocadas nessas áreas.

As transições espaciais e funcionais do sistema urbano são identificadas pelas mudanças no parâmetro de ordem que, nesse caso, se caracteriza como a variação da densidade de ocupação de cada atividade nas áreas analisadas. A distribuição das atividades ao longo das iterações demonstram a predominância de uma atividade sobre a outra, além das relações estabelecidas em cada fase da simulação, que podem ser de cooperação ou de competição.

A densidade da ocupação de cada atividade nas diversas áreas demonstram não só o tipo de sub-sistema ali vigente, mas também, apesar do modelo POTENCIAT ter resultados abstratos, inferir a modificação espacial através do volume gerado em cada célula.

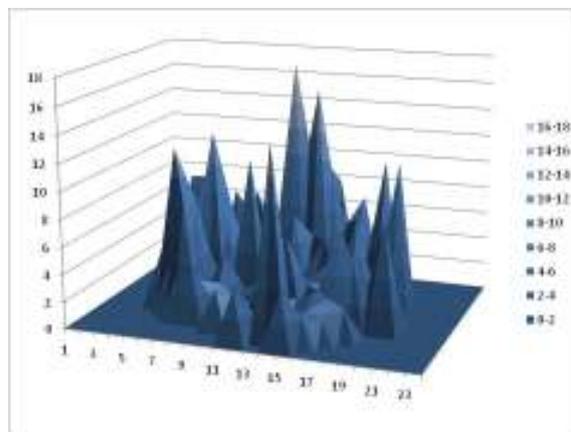


Gráfico 51. Simulação 1, População 3 densidade de ocupação - 400 iterações

O gráfico em três dimensões demonstra que os resultados do modelo podem também ser vistos como volume de atividades em cada célula permitindo assim, a utilização da densidade como um resultado que indica o estado do sistema a cada iteração.

Os gráficos a seguir evidenciam quais atividades têm tendência a crescer, estagnar ou reduzir sua ocupação nas diferentes áreas analisadas. Dessa forma vê-se a manutenção da ordem existente ou a inversão das atividades que apresentam as maiores densidades.

Relembrando que cada célula do território pode apresentar todas as atividades consideradas, a análise se dá somando a quantidade de cada atividade na área avaliada.

Em função das simulações iniciarem sua ocupação como um sistema monocêntrico, as análises iniciaram com a avaliação do núcleo inicial de ocupação aqui chamado de área central. Também foram avaliadas duas áreas no entorno, para averiguar a existência de possíveis variações no parâmetro de ordem. Essas áreas estão localizadas nas imagens de cada sistema simulado como A central, A1 e A2.

4.1.1.1 SIMULAÇÃO 1

A Simulação 1 apresenta configuração tradicional com o centro bem definido e periferia composta pela alocação das diferentes atividades.

A área central traz um comportamento com tendência a manter sua configuração das atividades de forma equilibrada, tendo atividade comercial um início de declínio entre 700 e 800 iterações do sistema.

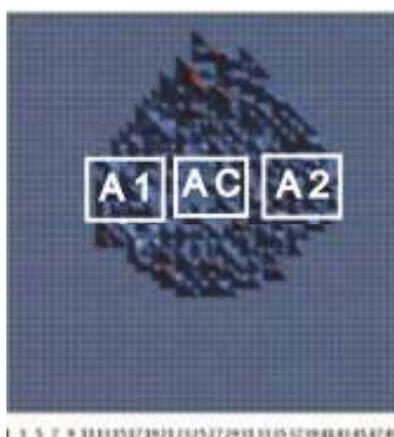


Gráfico 52. Simulação 1: áreas estudadas

A única atividade com tendência de crescimento nessa área é a População 2 que apresenta forte convergência na área central a partir de 700 iterações.

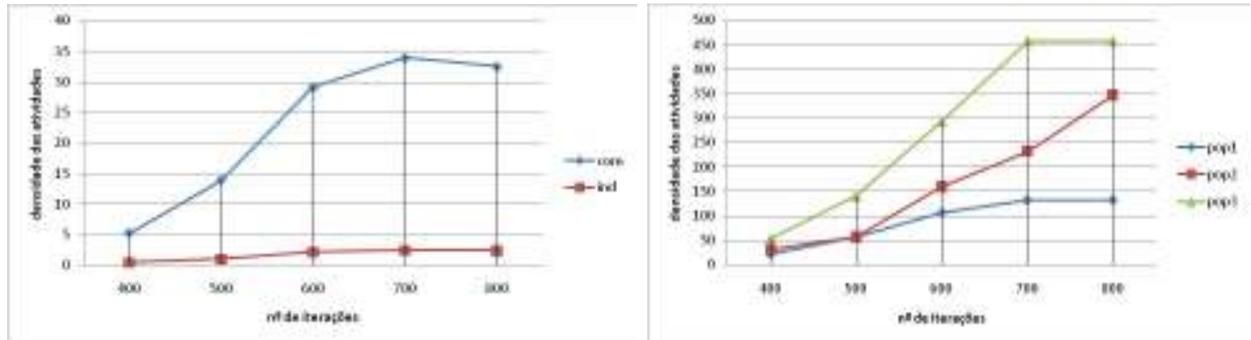


Gráfico 53. Simulação 1: densidade de atividades na área central

Na área 1 a ocupação se mantém proporcional entre as três atividades residenciais mas, a partir de 700 iterações, passam a apresentar modificação do parâmetro de ordem com uma inversão de predominância da População 2 sobre a População 3. Dessa forma, a População 2 passa a ter maior densidade começando um processo de expulsão da População 3, modificando a quantidade e as características das atividades predominantes na área.

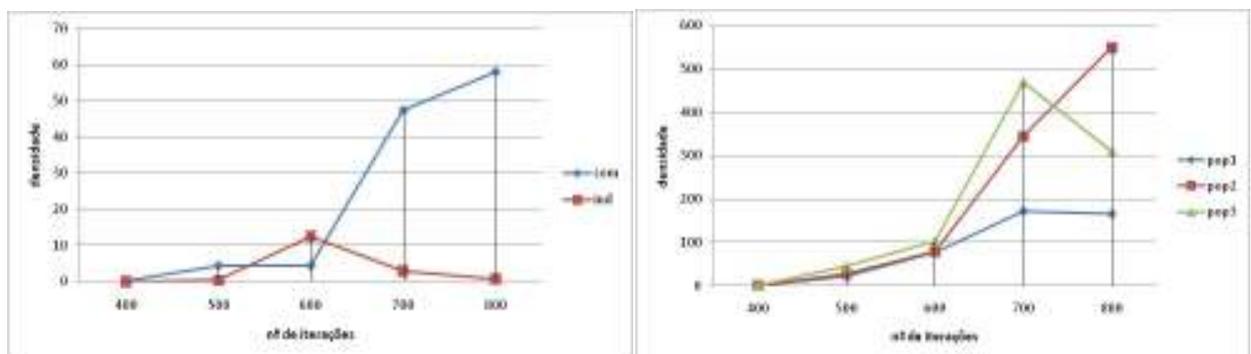


Gráfico 54. Simulação 1: densidade de atividades na área 1

Nessa simulação, com exceção da área central, as duas áreas estudadas apresentam-se com o mesmo tipo de relação entre indústria e comércio ao longo do tempo. Apesar disso, quando o comércio dá um grande salto no valor de densidade, a indústria começa a decair.

Na área 2 parece se configurar um equilíbrio dinâmico entre as atividades residenciais 2 e 3 uma vez que suas curvas de crescimento continuam demonstrando crescimento nessa área. A População 1, por outro lado, aparece com estagnação entre 700 e 800 iterações.

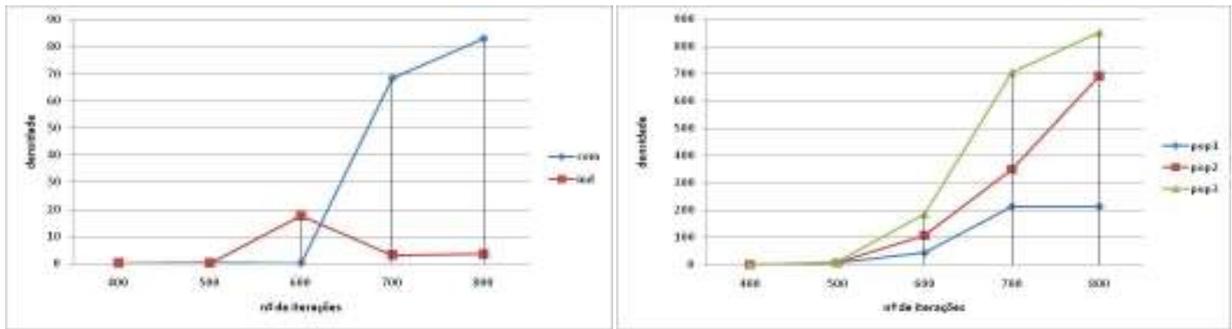


Gráfico 55. Simulação 1: densidade de atividades na área 2

4.1.1.2 SIMULAÇÃO 2

A Simulação 2 apresenta formato diferenciado em relação à Simulação 1 apresentando uma forma alongada, semelhante a uma elipse. Por esse motivo, as áreas a serem estudadas foram deslocadas para possibilitar a análise de áreas mais significativas para a avaliação do sistema.

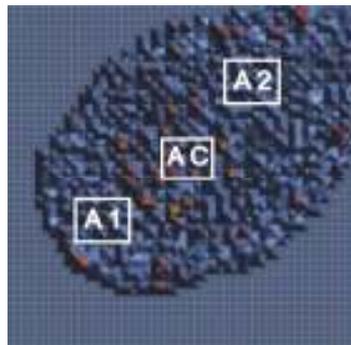


Gráfico 56. Simulação 2: Áreas estudadas

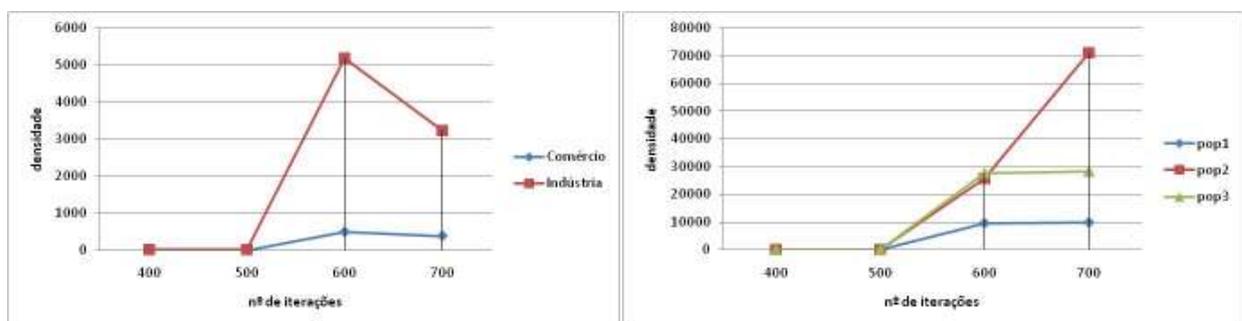


Gráfico 57. Simulação 2: densidade de atividades na área central

A “brusca mudança” no sistema em função da densa ocupação aparece nos gráficos da área central tanto na “queda” na atividade comercial, quanto no crescimento da População 2

que, a partir 600 iterações, passa a dominar a área central enquanto as demais atividades permanecem estagnadas.

Na área 1 é interessante notar que até 600 iterações a ocupação se mostra equilibrada, mas, a partir daí, existe uma importante mudança de fase quando as populações 1 e 3 passam a apresentar maior densidade.

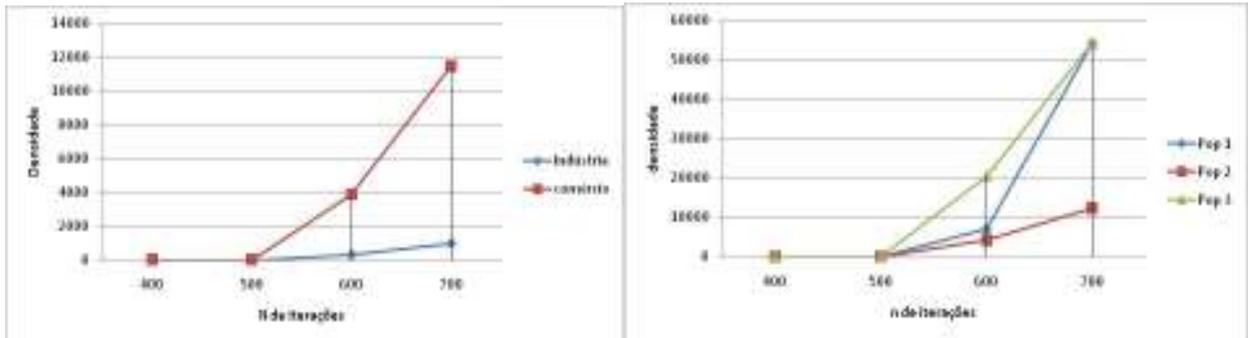


Gráfico 58. Simulação 2: densidade de atividades na área 1

A área 2, já ressaltada na descrição da evolução do Sistema 2 do capítulo anterior, tem aqui a comprovação da mudança do parâmetro de ordem nessa área que tem a População 2 como atividade dominante.

Essa evolução demonstra a inversão rápida e contundente do princípio de escravização citado no capítulo 2 desse trabalho. Se for observado somente o início do gráfico com as Populações residenciais, não aparece ainda a indicação de como o sistema irá evoluir, mas, a partir de 600 iterações, a atividade População 2, em virtude de sua ocupação densa, inverte a situação, passando a dominar a área.

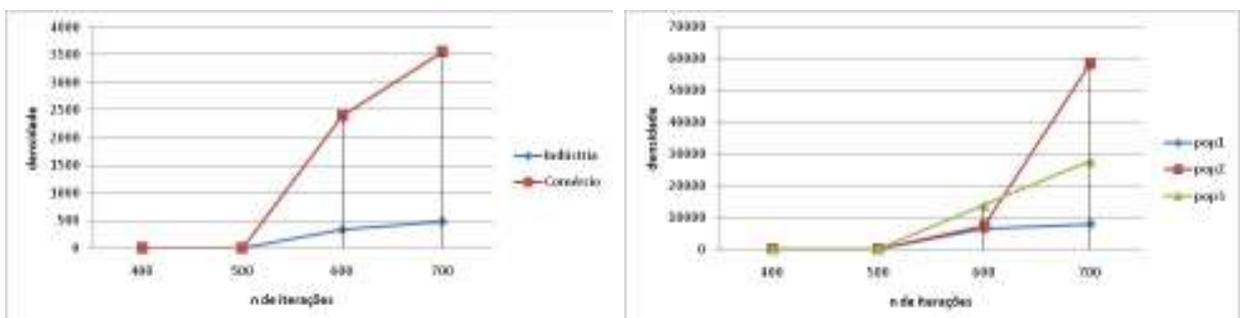


Gráfico 59. Simulação 2: densidade de atividades na área 2

4.1.1.3 SIMULAÇÃO 3

A centralidade das atividades é a principal característica da Simulação 3. Como já visto, a área ocupada continua praticamente a mesma durante as 800 iterações desse sistema.

Dessa forma, as mudanças na densidade da ocupação e de uso do solo são modificadas internamente à área ocupada, sem o deslocamento para territórios mais periféricos. Nessa simulação fica evidenciado um comportamento inesperado com a cooperação entre as atividades residenciais 1 e 3 na área central.

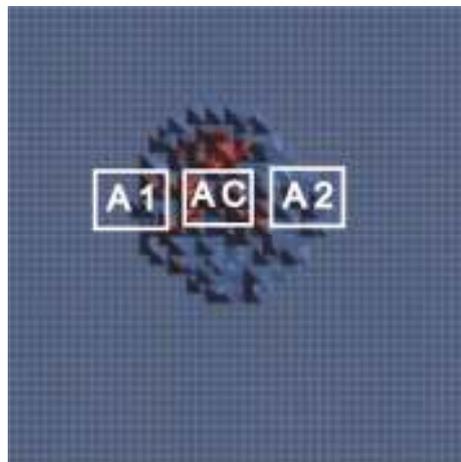


Gráfico 60. Simulação 3: Áreas estudadas

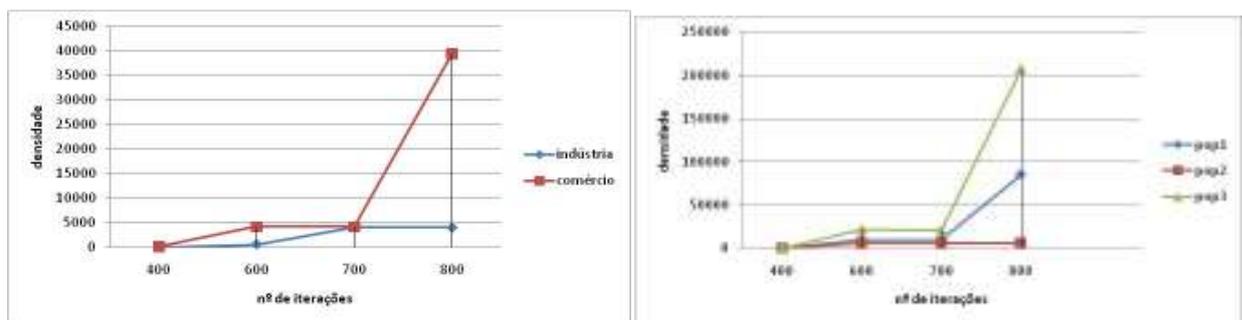


Gráfico 61. Simulação 3: densidade de atividades na área central

Já a área 1 demonstra a predominância da População 3 que se mostra evidente depois de 700 iterações do modelo ao contrário dos estágios anteriores, que apresentavam quantidades semelhantes entre as três populações residenciais.

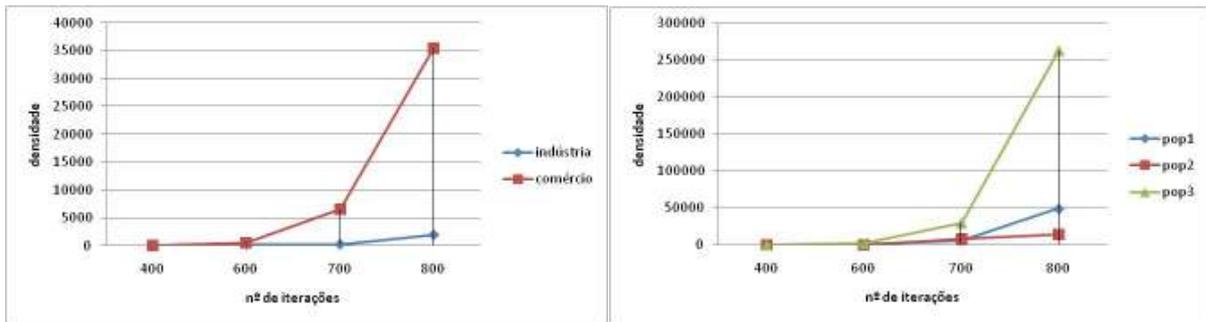


Gráfico 62. Simulação 3: densidade de atividades na área 1

A Área 2, de forma imprevista, é a única com relação de equilíbrio de ocupação entre as populações 1 e 3. Durante as últimas iterações do sistema, a população 2 é “empurrada” para a borda total da ocupação, fazendo com que sua quantidade apareça sempre menor do que as demais.

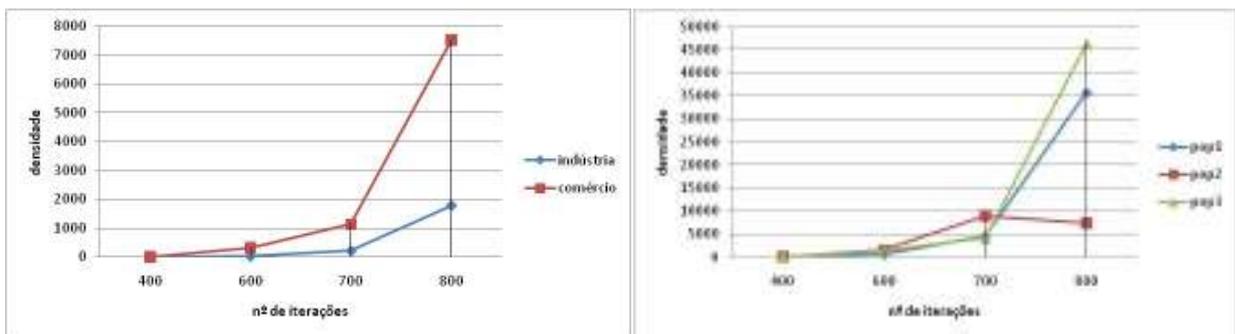


Gráfico 63. Simulação 3: densidade de atividades na área 2

O Comércio se faz presente com tendência de crescimento em todas as áreas analisadas apesar da sua densidade ser maior na área central.

4.1.1.4 SIMULAÇÃO 4

Assim como na Simulação 2, a Simulação 4 apresenta forma mais alongada, com densidades áreas mais expressivas sobre a borda formada no lado esquerdo da ocupação

A área central tem nessa simulação características diferenciada das demais com a estagnação das atividades Comerciais e Industriais e das Populações 1 e 3. A População 2, por outro lado, continua apresentando tendência de crescimento que se torna mais aguda depois de 600 iterações.

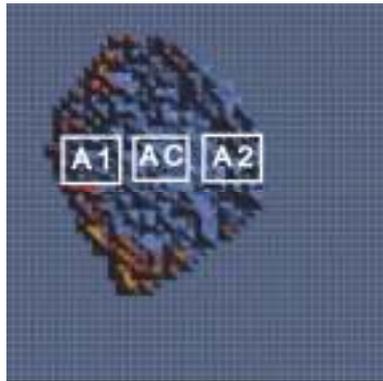


Gráfico 64. Simulação 4: Áreas estudadas

Esse comportamento sugere uma importante propriedade já que a configuração local não parece estar causando o súbito crescimento da População 2 nessa área. A transformação provém de processos externos e das interações de todas as atividades alocadas no sistema.

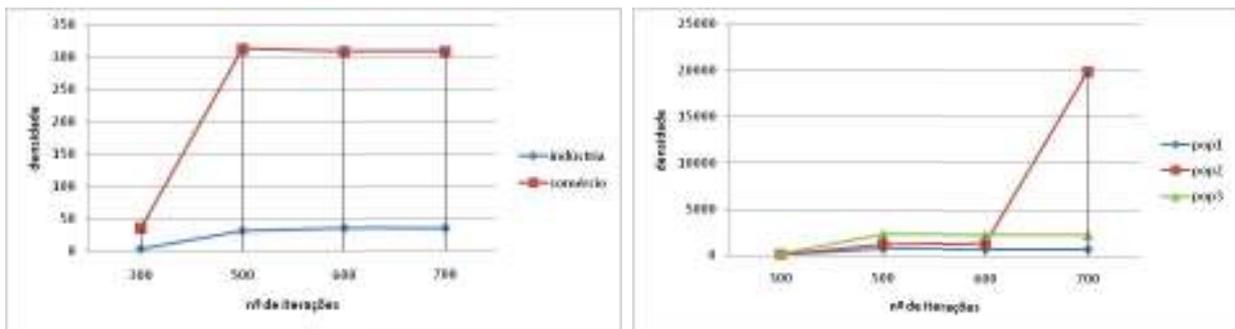


Gráfico 65. Simulação 4: densidade de atividades na área central

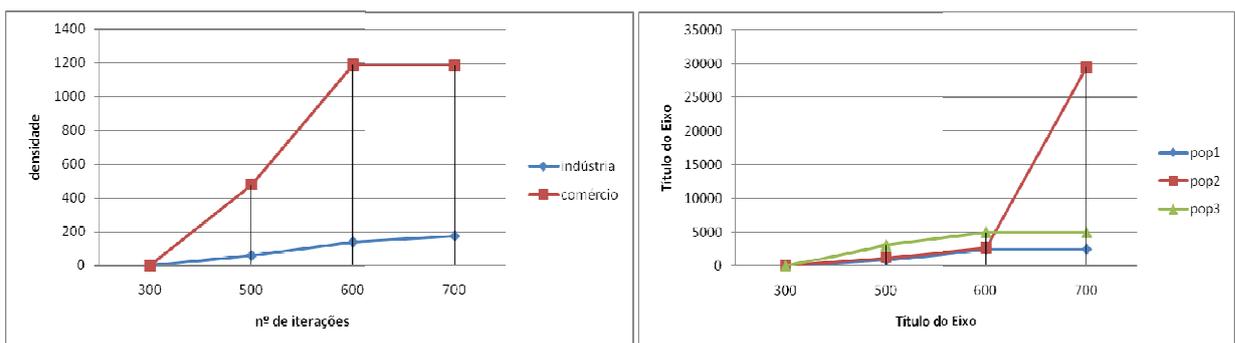


Gráfico 66. Simulação 4: densidade de atividades na área 1

A área 1, apesar de pequenas diferenças, apresenta comportamento semelhante à área central. A área 2 quase não apresenta estagnação na sua evolução. Com exceção da População 2, as demais atividades continuam crescendo.

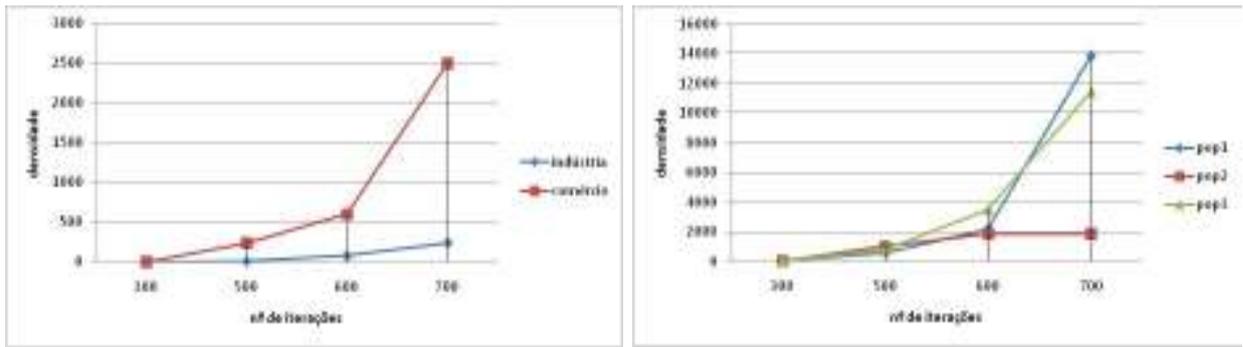


Gráfico 67. Simulação 4: densidade de atividades na área 2

4.1.2 ANÁLISE

Nas simulações aqui apresentadas as transições de fase são identificadas pelas variações contínuas ou descontínuas da densidade de atividades aqui definidas como o parâmetro de ordem dos sistemas.

Assim como a observação do espaço entre as moléculas da água serve para descrever a transição de fase líquido-vapor, a densidade de ocupação das atividades podem servir como parâmetro de ordem dos sistemas reais e simulados. Dessa forma, a observação do comportamento das atividades ao longo do tempo pode representar a transição entre formas de organização da Estrutura Urbana, no que se refere à transformação espacial (que nesse caso aparece intensidade de ocupação) e de uso do solo.

Como já dito, em alguns casos os comportamentos individuais de cada componente do sistema podem competir e um irá se sobrepôr aos demais. Em outros casos coexistem e chegam a estabilizar uns aos outros. A forma que o sistema irá se organizar, a partir de competição e escravização ou coexistência e cooperação, pode resultar em padrões de ocupação diferenciados.

A Ordem surgiu de forma individualizada para cada simulação, demonstrando a existência de diferentes *parâmetros de ordem* possíveis em cada passo discreto e evidenciando a existência de diferenciação espacial e de uso do solo em áreas de um mesmo sistema.

Além disso, as questões levantadas no capítulo 2 sobre atratores sendo designados, não apenas como localizações de atividades que geram transporte de pessoas e mercadorias, mas também como uma tendência de estado para o qual o sistema provavelmente vai evoluir, se tornam mais evidentes com esse tipo de avaliação.

A densidade de ocupação vista dessa forma pode descrever o comportamento dos subsistemas e, além disso, servir como um indicador de possíveis conflitos e comportamentos futuros. Essa possibilidade provém do conceito já apresentado no arcabouço teórico dessa pesquisa, que considera que as atividades alocadas passam também a servir como um catalisador de transformação espacial e de uso do solo, assim como a CEASA o foi para o Bairro Anchieta citado no início dessa análise. Nesse caso, assim com nas simulações analisadas, as densidades mostraram o comportamento das atividades e a mudança do tipo de uso do solo predominante na área.

As configurações de cada simulação foram modificadas, demonstrando a sensibilidade do sistema a essas modificações nas respectivas equações de evolução. Consequentemente as relações estabelecidas deram origem a formas diferenciadas de ocupação do espaço que serão agora representadas através de Geometria Espacial e análise de agrupamentos com o objetivo de verificar como cada atividade se relaciona com ela mesma.

4.2 ESTATÍSTICA ESPACIAL

O principal objetivo da estatística espacial é caracterizar padrões espaciais entre os dados analisados. As variáveis espaciais dificultam a utilização de métodos estatísticos simples pela existência de fenômenos como dependência e heterogeneidade espacial.

Neste trabalho, será utilizada uma técnica específica da estatística espacial para detectar a presença ou não de autocorrelação espacial das atividades consideradas nas simulações do Modelo POTENCIAT. Esta metodologia permite investigar se há “transbordamentos” entre os aglomerados produtivos, ou, em outras palavras, se o a localização de atividades em determinadas células influi no desenvolvimento da mesma atividade em células vizinhas.

Em um sistema real as atividades tendem a formar grupos. Dessa forma, o comportamento dos agentes que alocam suas atividades dependerá da história pregressa da cidade, estrutura existente, acesso a facilidades urbanas como comércio e serviços, etc. Os grupos formados podem se mostrar como um único conglomerado ou de forma mais fragmentada, formando mais de um bloco.

Dentro da literatura sobre urbanismo é ponto pacífico que as atividades urbanas alocam-se no espaço criando comunidades em processos de dependência espacial. Essa propriedade pode ser conferida nos gráficos que contém a distribuição das atividades na cidade de Santa Cruz do Sul, classificadas de acordo com as atividades consideradas nas simulações do modelo POTENCIAT em três épocas de sua evolução: 1870, 1922 e 2002.

O que se pretende apresentando esses dados é criar um preâmbulo para a apresentação dos resultados obtidos com o uso do software OpenGeoDa 0.9.8.14 (2009) aplicados nas Simulações 1 a 4. Esse exercício foi desenvolvido com o intuito de identificar as propriedades de dependência espacial e formação de grupos levando em consideração cada sistema total e, posteriormente, cada atividade isoladamente.

4.2.1 SANTA CRUZ DO SUL/RS

Nesse estudo apresenta-se uma série temporal onde as quantidades relacionadas a cada atividade estão alocadas sobre um território celular semelhante à base espacial do Modelo POTENCIAT.

A cidade de Santa Cruz do Sul teve sua fundação em 1855 pelo Capitão Tenente da Armada Francisco Cândido de Castro Menezes obedecendo a um padrão de grelha regular.

A partir do relatório do Diretor da Colônia em 1866, percebe-se que a povoação de Santa Cruz começa a atrair e concentrar a produção não-agrícola da colônia de tal forma que, dos cinco curtumes, três estão na povoação e fornecem matéria-prima para quatro sapatarias, duas fábricas de lombilhos e selas e duas fábricas de tamancos, além de uma fábrica de sabão que se instala em 1867.

Além das citadas acima, existem duas cervejarias, sete estabelecimentos artesanais fabricantes de charutos, indicando a vocação da área quanto à futura industrialização do tabaco. Abaixo se vê a concentração de atividades sobre o núcleo inicial de ocupação. A linha branca identifica a área do município em 2002.

Com o passar do tempo e em função da atratividade de atividades ligadas às áreas urbanas a cidade passa a abrigar cada vez mais populações residentes. A Indústria e o Comércio continuam a ocupar, em uma clara sobreposição de usos, o núcleo inicial de ocupação, tendo um pequeno crescimento em sua área em relação ao que havia em 1870.

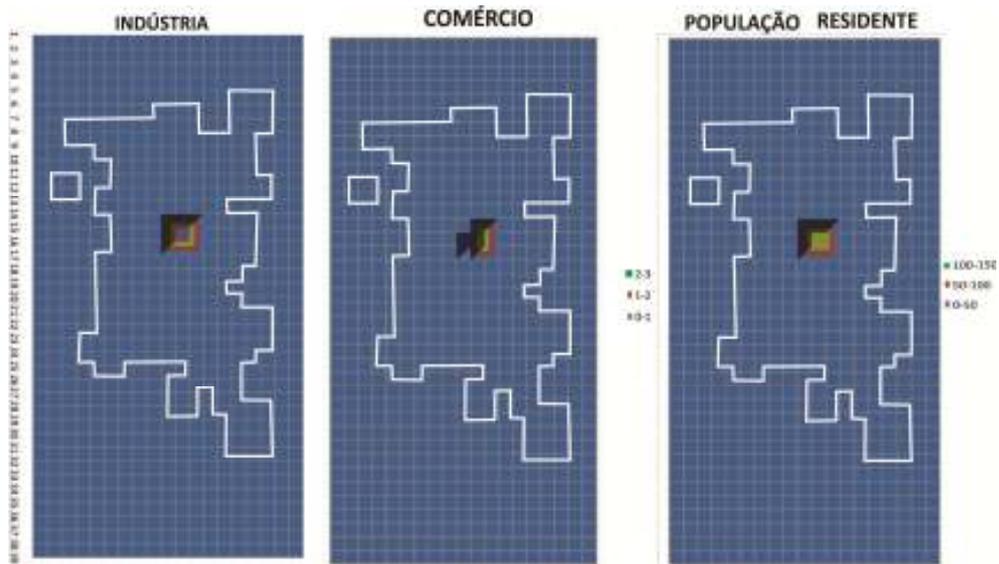


Figura 13. Distribuição das atividades em Santa Cruz do Sul, 1870³⁸

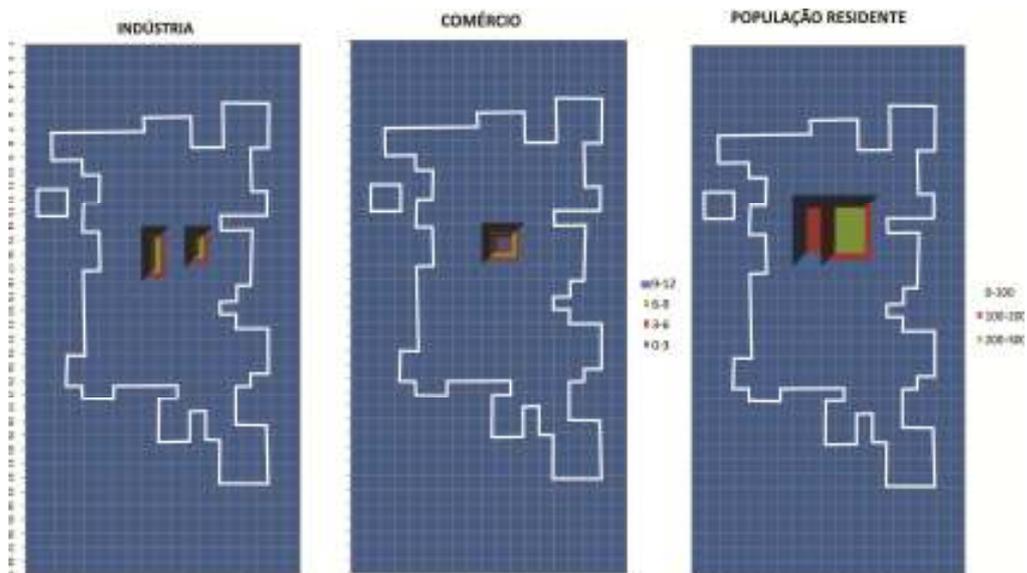


Figura 14. Distribuição das atividades em Santa Cruz do Sul, 1922¹

A industrialização de Sta. Cruz do Sul, originada após 1917, gerou um aumento expressivo da população urbana como aparece nos mapas e relatórios da cidade em 1922.

Os valores adquiridos através do senso do IBGE de 2002 foram transferidos para uma grelha ortogonal, semelhante à base celular utilizada nas simulações do modelo POTENCIAT,

³⁸ Wink, 2002.

segundo a faixa salarial de 1 a 5 salários mínimos para a População 3, de 5 a 10 salários mínimos para a População 2 e acima de 10 salários mínimos para a População 1.

A origem dos dados apresentados a seguir caso é o resultado da amostra por área de ponderação 2000. RAIS (Relação Anual de Informações Sociais) bases estatísticas – Ministério do Trabalho.

Uma das primeiras observações foi, como esperado, a existência de sobreposição de uso na maioria das células da cidade. Apesar disso, como se pode ver, a distribuição das maiores densidades se localiza em áreas diferentes nas cinco atividades consideradas, a começar pela atividade Industrial e de Comércio e Serviços.

Considera-se que o direcionamento da formação dos grupos mais significativos surge em função das iterações entre as diferentes atividades, sua estrutura espacial, atratividade e relações funcionais e evolução anterior. Para ilustrar essa observação, pode-se ver a localização da indústria que, apesar de ter a sua maioria localizada no Distrito Industrial da cidade, ainda possui áreas ligadas a essa atividade localizadas próximas ao centro urbano, início do povoamento que não se deslocaram em direção à área sul.

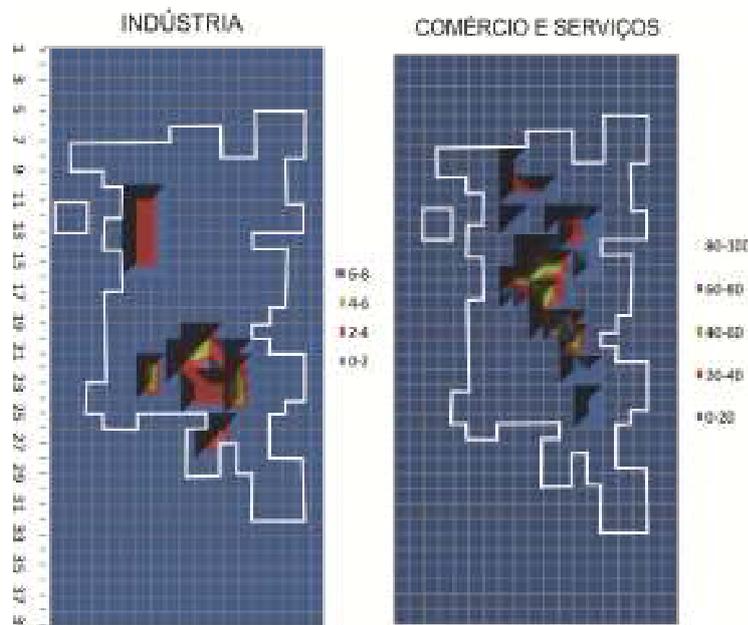


Figura 15. Distribuição atividades Comercial e Industrial em Santa Cruz do Sul

Entre as populações residenciais também existe diferenças de configuração. Enquanto a População 1 forma um único núcleo mais denso, a População 2 tem picos de ocupação mais

distribuído em áreas próximas ao centro além de uma continuidade em relação ao sul da ocupação.

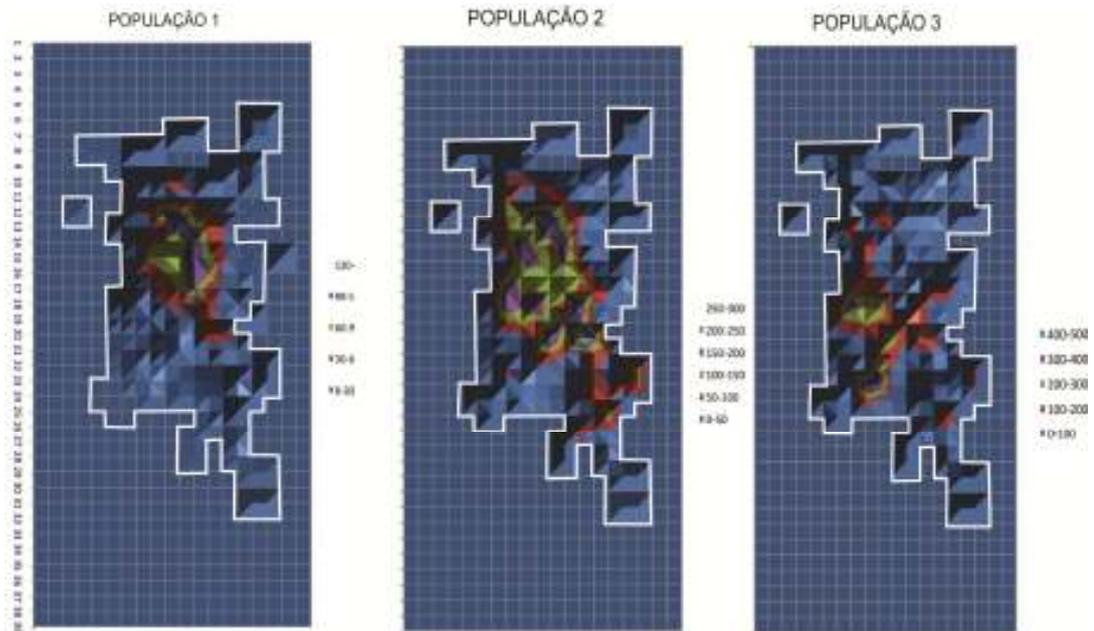


Figura 16. Distribuição População 1, 2 e 3 em Santa Cruz do Sul

A População 3, por sua vez, acabou por “seguir” a movimentação da atividade industrial se encontrando a meio caminho desta e o centro da cidade. Esse fato é proveniente de fatores segregacionistas e de complementaridade socioeconômica em função da localização dos postos de trabalho relacionados à atividade industrial que interessa a essa população.

Por tratar-se de um estado do sistema urbano real, reflete-se aqui o efeito de décadas de evolução da cidade desde sua ocupação inicial até hoje em um comportamento dinâmico e auto-organizado. Como resultado disso, cada atividade se localiza sobre o território de forma heterogênea, gerando diferenciação espacial e picos de densidade em diferentes áreas.

Outra importante característica que pode ser aqui observada é a existência de áreas especializadas, ou seja, com predominância de uma atividade sobre outras, como no caso da Indústria que predomina na área sul da cidade localizada no distrito industrial. Apesar de ter ainda população residente nessa área, fica clara a preponderância dessa atividade considerada básica para a cidade.

Tendo esses dados como parâmetro passa-se agora para a análise dos resultados do modelo POTENCIAT, com o objetivo de confirmar a dependência espacial e a formação de grupos significativos que, de alguma forma, tenham propriedades semelhantes a sistemas reais.

4.2.2 COEFICIENTE MORAN – DEPENDÊNCIA ESPACIAL

Questionar a existência de dependência espacial em um modelo que a considera a priori, como no caso do Potenciat, se torna de certa forma redundante. Mesmo assim, em todos os momentos das simulações aqui apresentadas foi aplicado o índice Moran para confirmar a existência dessa propriedade em cada sistema³⁹.

De uma forma geral o I de Moran presta-se a um teste cuja hipótese nula é de independência espacial; neste caso, seu valor seria zero. Valores positivos (entre 0 e +1) indicam correlação direta e negativos (entre 0 e -1), correlação inversa.

Uma vez calculado é importante estabelecer sua validade estatística. O comum é o teste de pseudo-significância, com diferentes permutações do valor do atributo associado às áreas do modelo.

Dentro dessa premissa, os resultados do Modelo Potenciat para 4 simulações executadas foram analisados. As propriedades de dependência espacial e análise de agrupamento foram feitas com o programa de Estatística espacial OpenGeoDa 0.9.8.14 (2009) utilizando a variável número de unidades de atividades alocadas em cada célula individualmente e no total do sistema.

O conceito de vizinhança adotado nesta avaliação é o mesmo tipo de vizinhança queen utilizada nas simulações do modelo. Foi realizado o teste de permutação aleatória do nível de significância de I, sob a hipótese nula de ausência de autocorrelação espacial entre as localizações de indústrias⁴⁰ e o resultado foi 0.001, 0.0005 e 0.003.

³⁹ Todos os sistemas analisados apresentaram correlação positiva e as demais avaliações estão localizadas no Anexo 1 ao final desse trabalho.

⁴⁰ Fonte: Autora com base no software GeoDA

A partir disso, rejeitou-se a hipótese nula de ausência de autocorrelação espacial entre as células ocupadas pela atividade industrial. Esta validação foi feita para cada atividade e para o somatório total final, sendo de valor positivo em todas.

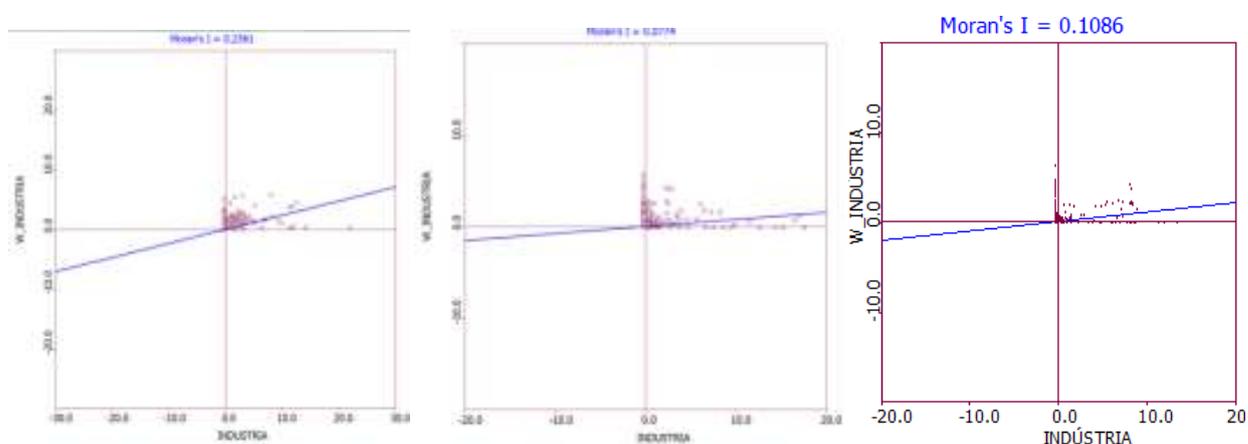


Gráfico 68. Índice de Moran atividade Industrial 600, 700 e 800 iterações

4.2.3 ANÁLISE DE CLUSTERS ESPACIAIS

Após a confirmação de relações positivas, ou seja, da existência de dependência espacial nos sistemas considerados, passa-se a outro tipo de avaliação que possa exibir mais claramente as características provenientes da distribuição de densidades ao longo de sua evolução.

A análise baseada apenas nos procedimentos de Moran ignora a possibilidade de instabilidades locais no sistema global. O principal objetivo da análise de clusters é construir grupos homogêneos de áreas geográficas de acordo com um conjunto de variáveis (por exemplo, variáveis socioeconômicas).

Para essas análises, procura-se identificar padrões espaciais de distribuição nos valores observados. As técnicas de análise de dados de área foram desenvolvidas para tentar identificar regiões onde a distribuição dos valores possa apresentar um padrão específico associado à sua localização espacial.

A informação que se busca é o quanto o valor de uma variável em uma determinada área assemelha-se com os valores da mesma variável localizada em sua vizinhança próxima, e o quanto é similar ou dissimilar aos valores de sua vizinhança distante.

4.2.3.1 *TESTE DA HIPÓTESE NULA DE ALEATORIEDADE LOCAL:*

O indicador LISA (local indicator of spatial analysis) proporciona, para cada observação, uma indicação da existência de clusters espaciais significativos, de valores similares ao redor daquela observação.

Valores positivos de Li significam que existem clusters espaciais com valores similares (altos ou baixos); Valores negativos de Li significam que existem clusters espaciais com valores diferentes entre a região e seus vizinhos

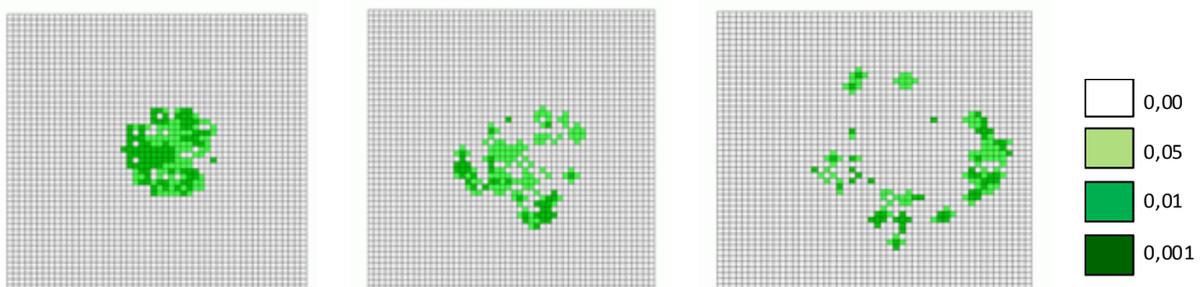


Figura 17. Mapa de significância Indústria – 600, 700 e 800 iterações

Esses testes também foram aplicados a todas os sistemas aqui apresentados a partir do programa de Estatística espacial OpenGeoDa 0.9.8.14 (2009). Os gráficos da análise indicam a existência e localização dos agrupamentos mais significativos, permitindo abordar também questões sobre a distribuição da densidade de cada ocupação.

4.2.4 *EVOLUÇÃO DE PADRÕES DE OCUPAÇÃO DO ESPAÇO*

Além da confirmação da formação de comunidades e da existência da dependência espacial na alocação de todas as atividades, a observação dos grupos pode também servir de informação sobre a organização das estruturas geradas no que se refere ao sistema total e às atividades individualmente.

As interações entre os componentes do sistema resultantes do contínuo funcionamento da cidade formam a “tendência de estado”, ou seja, um estado para a qual o sistema urbano provavelmente irá evoluir. Esta tendência depende de fatores como o estado inicial do sistema, as regras a serem seguidas por seus componentes, e a intensidade de ocorrência dos fatores causadores da sua mudança.

Nesse modelo, as densidades e suas mudanças ocorrem em função das equações evolutivas de cada atividade, a interação entre elas e do desenvolvimento da configuração de cada sistema. Em alguns casos essa evolução acontece de forma previsível e, em outros, comportamentos inesperados surgem para levá-los à ordem dominante escravizando os comportamentos individuais.

Seguindo o direcionamento apresentado no item anterior, considera-se a densidade de ocupação como parâmetro de ordem para o exame dos sistemas simulados. A diferença é que nessa avaliação as densidades de cada atividade são consideradas isoladamente, levando em consideração todas as células do sistema, possibilitando a visualização da distribuição espacial de seus grupos mais significativos com o objetivo de identificar os zoneamentos espontâneos e especialização das áreas.

4.2.4.1 GRUPOS SIGNIFICATIVOS SIMULAÇÃO 1

O crescimento e a distribuição da densidade pode seguir um movimento único com resultados esperados, como na simulação 1 que denota um comportamento onde cada passo do sistema pode ser inferido pelos estados anteriores.

A formação da estrutura ocorre a partir de um processo de sucessão dos grupos mais significativos que, com o crescimento do sistema, partem da região central em direção à periferia. Fica mais clara aqui a questão dos “transbordamentos” citados acima, já que os principais grupos seguem com claras relações espaciais com a configuração anterior.

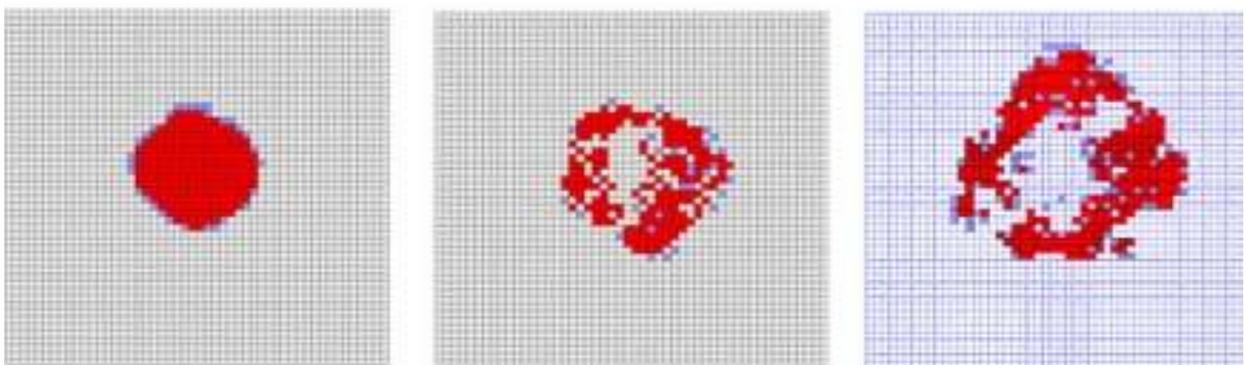


Figura 18. Agrupamentos espaciais Simulação 1 Sistema Total – 600, 700, 800 iterações

Na Simulação 1 a maioria das atividades apresenta comportamento esperado ao longo do tempo como no caso da Indústria apresentado abaixo.

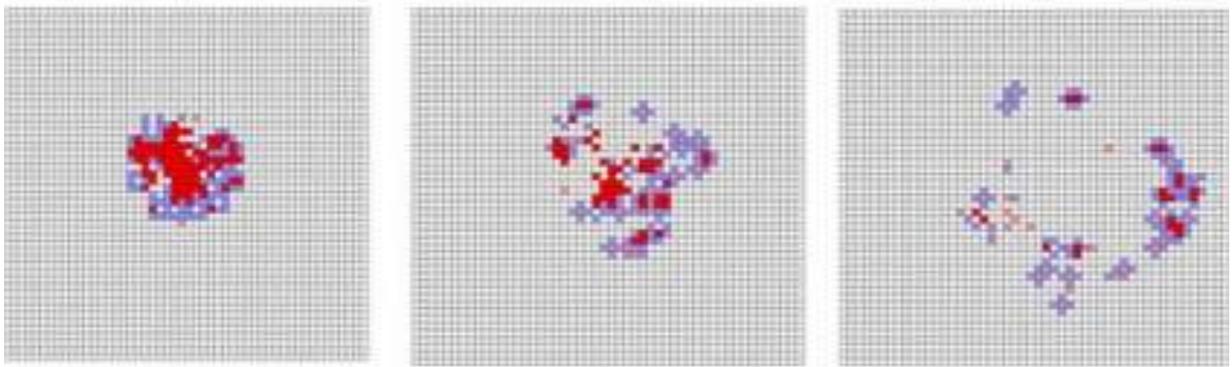


Figura 19. Agrupamentos espaciais – Indústria 600, 700 e 800 iterações

Por outro lado, os sistemas podem demonstrar emergência de estruturas inesperadas, como no caso das Populações 2 e 3.

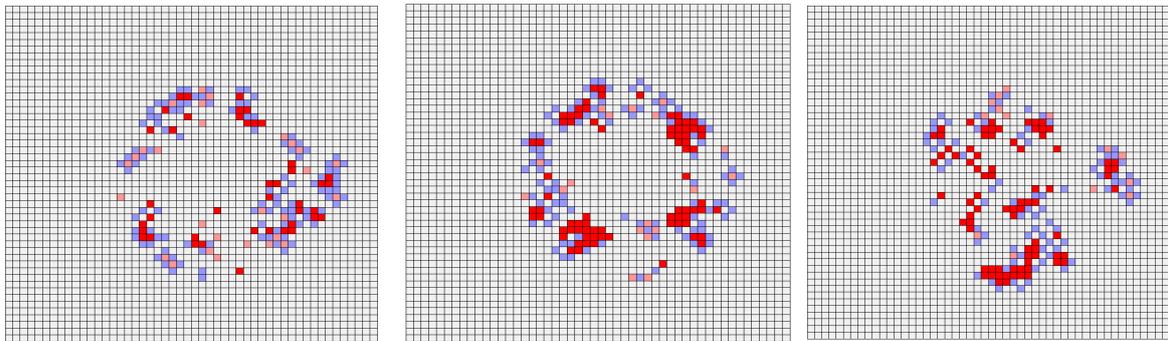


Figura 20. Comércio, População 1 e População 2, 800 iterações

A População 2 passa a ocupar as áreas centrais, ao contrário do que acontece com as demais atividades. Note-se que, com 800 iterações, áreas antes ocupada pela População 3 passam a ter grandes densidades de População 1, demonstrando a dinâmica do crescimento das atividades, com comportamentos inesperados.

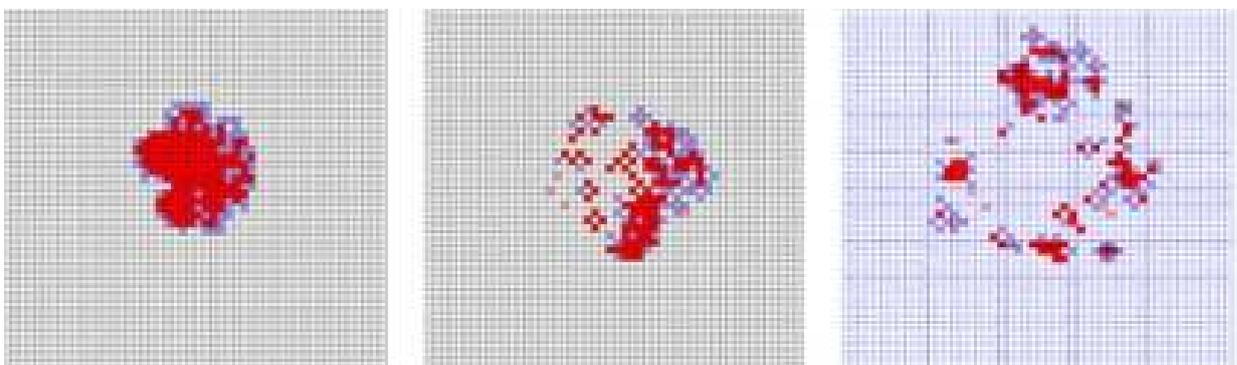


Figura 21. Agrupamentos espaciais – População 3 - 600,700 e 800 iterações

Isso demonstra o movimento interno das áreas de predominância de cada atividade e complementa os dados do parâmetro de ordem que fazem parte da análise anterior.

4.2.4.2 GRUPOS SIGNIFICATIVOS SIMULAÇÃO 2

A Simulação 2 ocupa a maior área, com forma diferenciada e regular semelhante a uma elipse. Essa simulação chega a 700 iterações apresentando um grupo coeso formado pela ocupação da População 2 na área central. Isso determina a localização das demais atividades no entorno desse grupo.

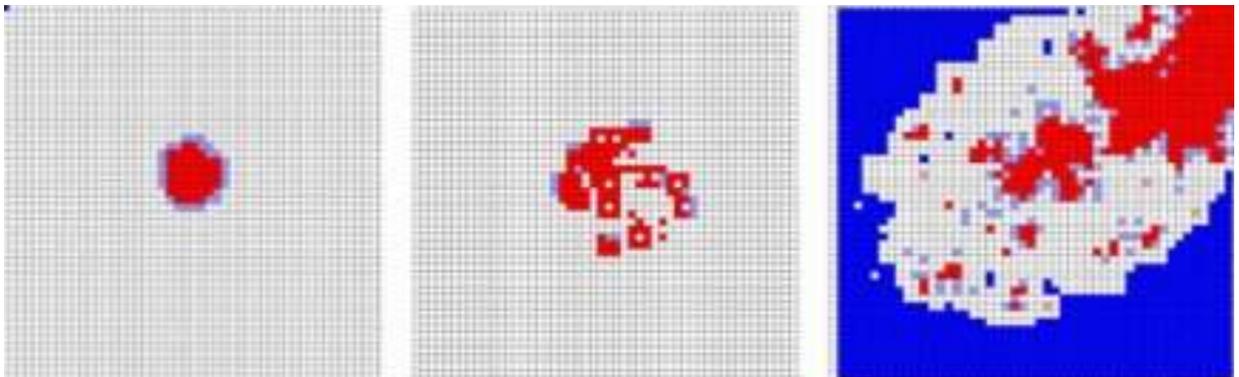


Figura 22. Agrupamentos espaciais Simulação 2 Sistema Total – 400, 600, 700 iterações

Nota-se ainda que as etapas anteriores da Simulação 2 não demonstravam claramente o direcionamento para esse tipo de crescimento. Com 600 iterações os grupos mais significativos poderiam facilmente ser confundidos com um sistema regular semelhante ao exemplo da Simulação 1. A alocação da População 2 em dois grupos extremamente densificados “escravizam” as demais atividades forçando-as à ocupação na periferia dessa áreas de forma inesperada.

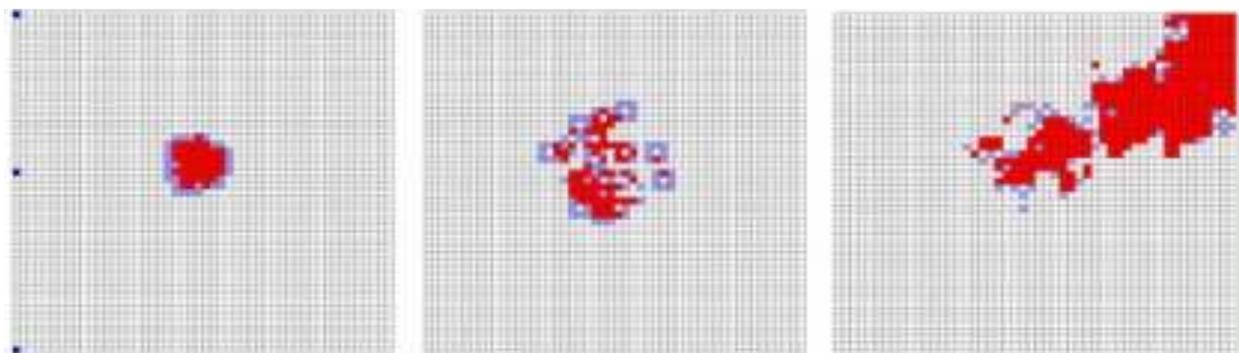
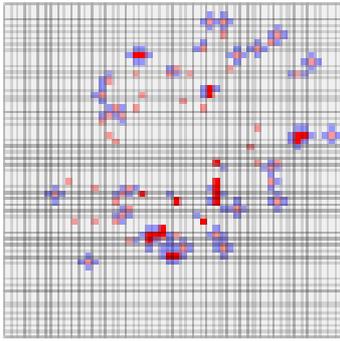


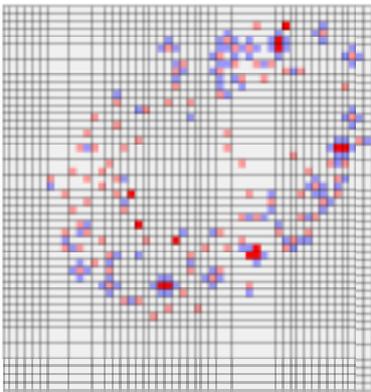
Figura 23. Agrupamentos espaciais – População 2 - 400, 600 e 700 iterações



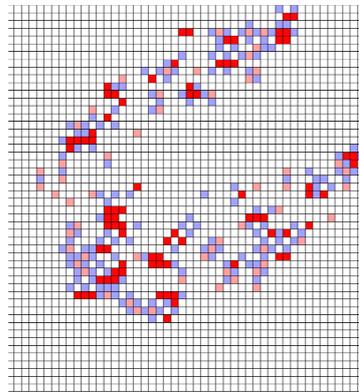
A existência desses grupos em forma de elipse ocorre a partir da manutenção de um núcleo que influencia de forma decisiva a composição morfológica das demais atividades através da distribuição dos valores de acessibilidade do sistema.

Figura 24. Agrupamentos espaciais – Indústria - 700 iterações

Comércio



População 1



População 3

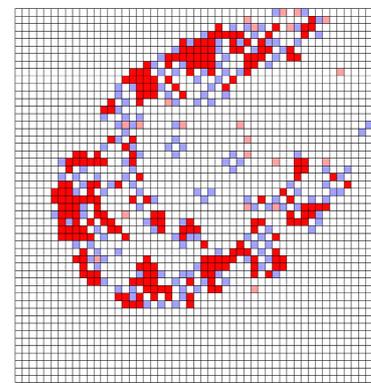


Figura 25. Agrupamentos espaciais – Comércio, Populações 1 e 3 - 700 iterações

Apesar de sua preferência por locais acessíveis e próximos aos pontos de comércio e serviços, a População 3 tem a tendência em ocupar áreas mais periféricas em função da interação com as demais atividades.

Essa particularidade parece ser fruto da pouca capacidade de competição pelo espaço definida na sua equação de evolução do sistema principalmente no que diz respeito à População 1. Note-se que os grupos mais significativos da População 1 impedem que a População 3 tenha as maiores densidades nessas células.

4.2.4.3 GRUPOS SIGNIFICATIVOS SIMULAÇÃO 3

A Simulação 3 apresenta também comportamento inesperado ao se tornar cada vez mais centralizada e com praticamente a mesma área de ocupação, enquanto as outras simulações crescem e criam grupos maiores na periferia do sistema.

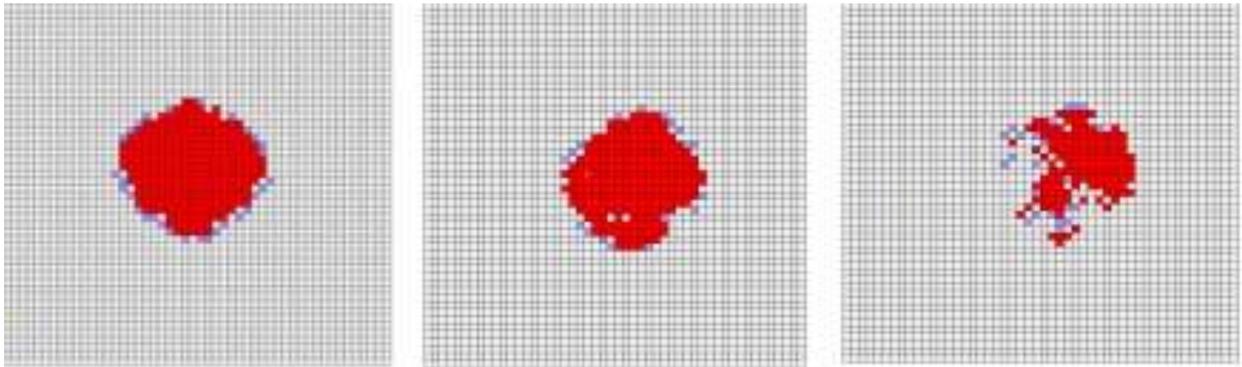
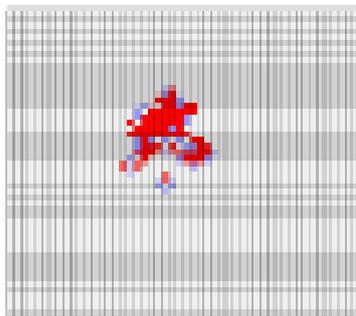


Figura 26. Agrupamentos espaciais Simulação 3 Sistema Total – 400, 600, 700 iterações



Na Simulação 3 a definição das equações das Populações Residenciais com atratividade positiva para a atividade comercial foi fundamental para formar o padrão de ocupação. O comércio apresenta-se quase como um único grupo na área central, influenciando a densificação do sistema.

Figura 27. Agrupamentos espaciais – Comércio - 700 iterações

Esse comportamento teve tanta capacidade de centralização da ocupação que acabou por fortalecer o agrupamento no entorno o centro de ocupação inicial mesmo para a atividade Industrial que possui, nas outras iterações, a tendência de se deslocar das áreas centrais.

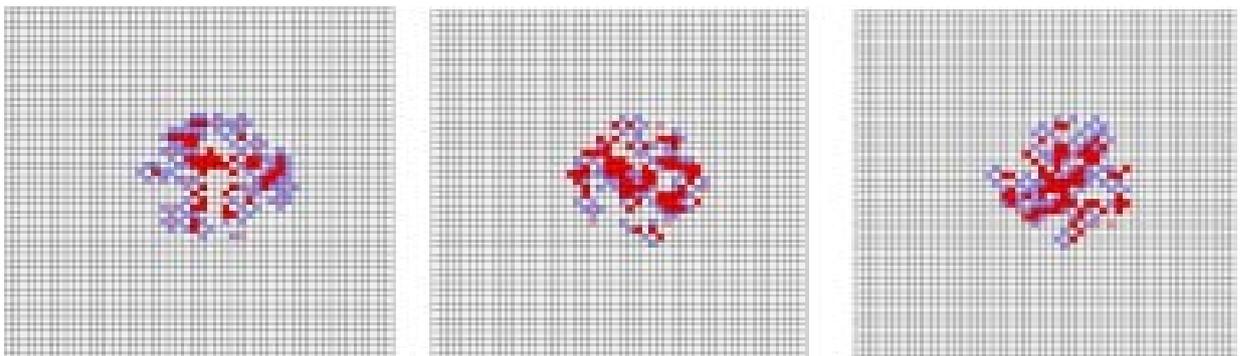


Figura 28. Agrupamentos espaciais – Indústria - 400, 600 e 700 iterações

Esse sistema tem como característica a criação de uma “borda” contínua ao redor de quase toda a ocupação gerada pela População 2, enquanto a População 3 acaba ocupando o núcleo inicial do Sistema. Essa é uma propriedade inesperada já que nas outras simulações a População 3, assim como a Indústria, foi expulsa das áreas centrais.

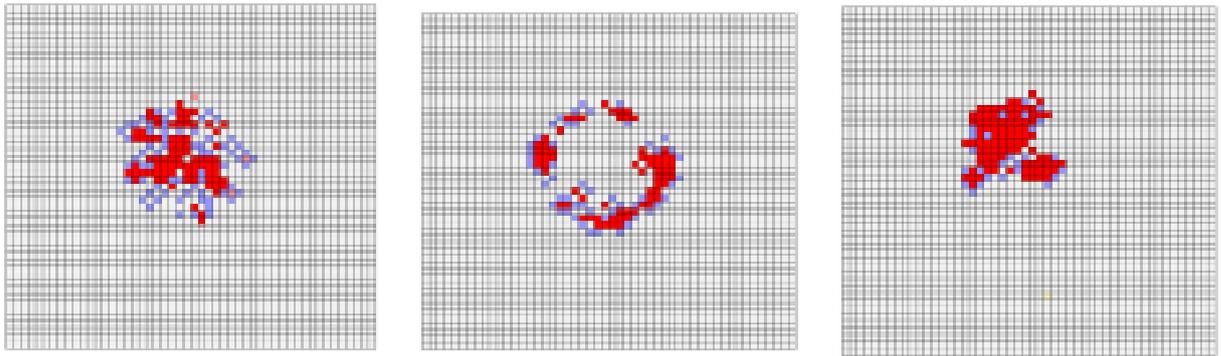


Figura 29. Agrupamentos espaciais – Populações 1 2 e 3 - 400, 600 e 700 iterações

4.2.4.4 GRUPOS SIGNIFICATIVOS SIMULAÇÃO 4

A Simulação 4 tem como característica o direcionamento do crescimento que aparece sob forma de uma borda com altas densidades no lado esquerdo da ocupação.

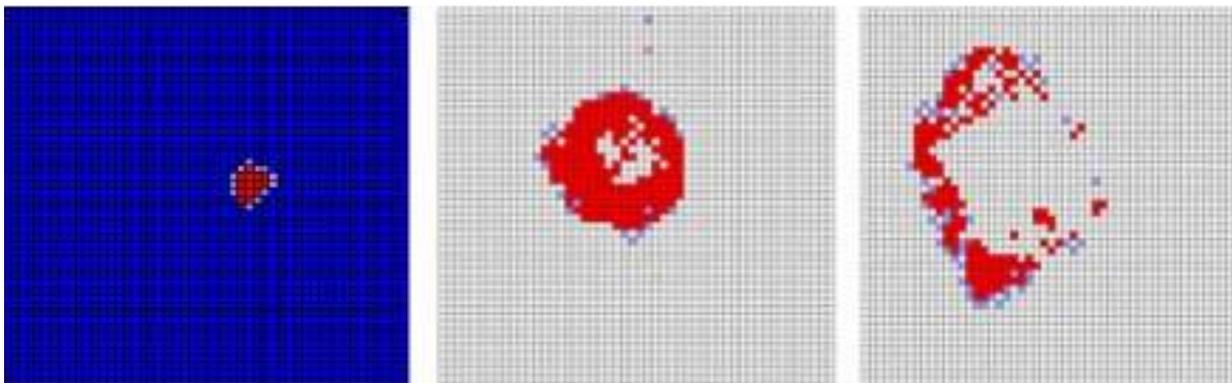


Figura 30. Agrupamentos espaciais Simulação 4 – Sistema Total – 400, 600, 700 iterações

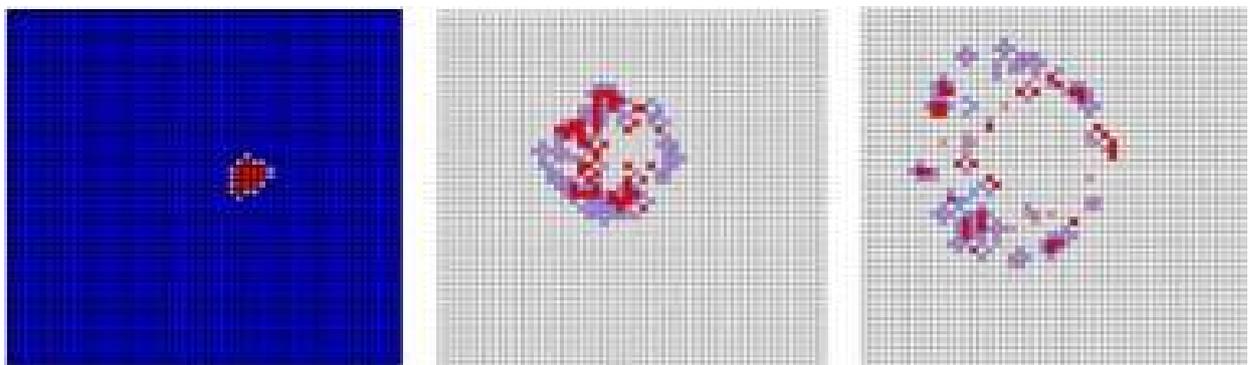
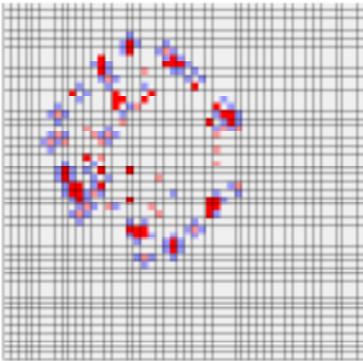


Figura 31. Agrupamentos espaciais – Indústria - 400, 600 e 700 iterações



Essa tendência já aparece na atividade industrial com 600 iterações do sistema, e acaba conduzindo as demais atividades nessa mesma direção.

As demais atividades acabam seguindo essa tendência de estado e nota-se que, mesmo assim, a o Comércio permanece com grupos significativos em todo o entorno do sistema, assim como a População 1

Figura 32. População 1 – 800 iterações

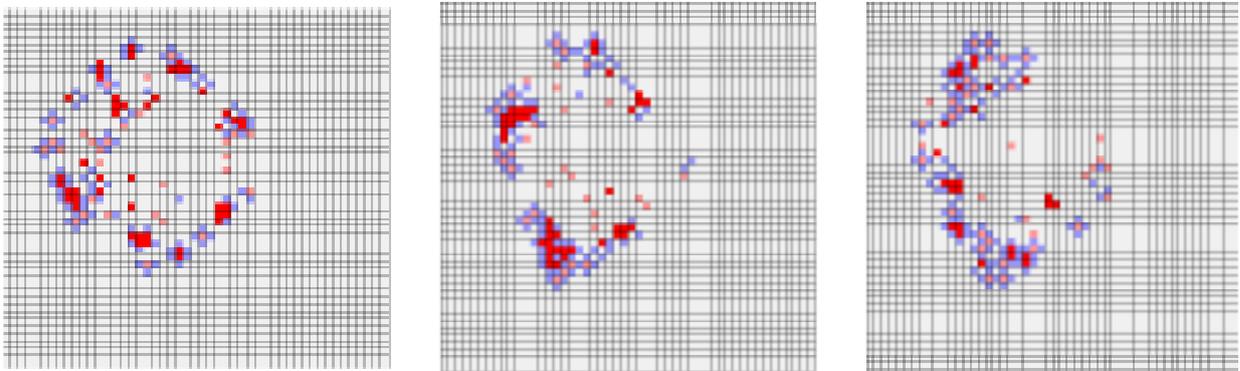


Figura 33. Agrupamentos espaciais – Comércio e Populações 2 e 3 - 800 iterações

O que pode ser inferido nesse caso é que diferentes atividades são afetadas de forma diversa dentro de um mesmo sistema. Dessa forma, tipos de configuração díspares surgem definindo cada atividade de uma mesma simulação.

4.2.5 ANÁLISE:

O objetivo inicial desta análise baseada em estatística espacial era comprovar a formação de agrupamentos e as relações de dependência espacial nos sistemas gerados pelo Modelo POTENCIAT.

Como se pôde ver nos mapas Lisa, todos os resultados do modelo POTENCIAT aqui observados apresentam grupos significativos. Essa foi uma premissa de desenvolvimento do modelo e aqui é confirmada utilizando-se uma análise a partir de estatística espacial.

Além das questões de dependência espacial e da formação de grupos significativos, um ponto importante nessa análise seria a procura de características coincidentes entre os sistemas

simulados e resultados reais, aqui representados pela distribuição de atividades da cidade de Santa Cruz do Sul em uma série temporal que vai desde 1870 a 2002. Essas imagens descrevem as áreas ocupadas por cada atividade ao longo do tempo.

Com essa ideia, pôde-se verificar a formação de diferentes padrões de ocupação das atividades da cidade analisada. Esses, em uma perspectiva histórica, apresentam ordem e estruturas que se transformaram através do tempo, com inovação de áreas de alocação e diferentes morfologias dependendo da história pregressa de cada atividade dentro do sistema urbano.

A distribuição de densidade, que nesse caso é representada em sua forma espacial, continua sendo uma importante característica para a avaliação de um sistema urbano e a organização de sua estrutura.

Considera-se que a densidade, vista dessa forma pode descrever características das áreas urbanas e a predominância de subsistemas observando ao mesmo tempo o conjunto da paisagem celular possibilitando a observação dessas características espacialmente.

De forma semelhante à cidade analisada, os grupos das atividades das quatro simulações aqui apresentadas constituíram-se ao longo das iterações e apresentam hierarquização gerando um processo de “zoneamento espontâneo”. Esse zoneamento pode ocorrer de forma centralizada ou mais fragmentada como é o caso da População 2 na cidade de Santa Cruz do Sul.

Nos 4 sistemas o processo gerado pelo Modelo POTENCIAT acabou por formar diferentes tendências de estado que foram captadas, definindo no processo de re-avaliação do sistema e as tendências na alocação das atividades nas iterações seguintes.

A informação sobre o parâmetro de ordem das diversas áreas de cada sistema possibilitou, nas Simulações 1 e 4, inferir a transformação espacial e de uso do solo através da perenidade ou “transbordamento” dos grupos mais significativos de cada atividade. Nos casos das Populações 2 e 3 as configurações espaciais dos sistemas foram modificadas inesperadamente levando a resultados que forçaram uma adequação às novas condições nas alocações seguintes em um sistema de “feedback”.

A seguir será apresentado outro tipo de estudo a partir das propriedades topológicas das ocupações das diferentes atividades. Serão levadas em consideração as propriedades de

centralização, distâncias topológicas e formação de centros. Essa avaliação adquire um caráter mais abstrato, pois não leva em consideração a quantidade de atividades alocadas em cada célula, mas sim sua posição relativa dentro do sistema.

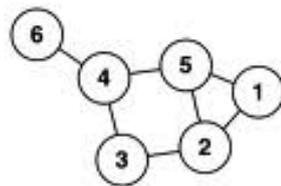
4.3 ANÁLISE DE REDES COMPLEXAS

O estudo de redes como bases de complexidade tem sido eficiente para entender a estrutura e a função de vários sistemas naturais e artificiais. Este tipo de relação é utilizado por diversas áreas do conhecimento como informática, teoria da informação, redes sociais e outros.

A percepção da dinâmica urbana através de teorias ligadas às redes complexas permite a consideração da estrutura urbana como um sistema integrado que vai das pequenas ligações de vizinhança ou locais até a cidade como um todo.

Dentro desse contexto, se torna necessário a transformação na maneira de descrever o sistema para que as análises relacionadas à constituição de redes possam ser aplicadas. Com esse intuito as relações espaciais muitas vezes são relacionadas à representação através dos grafos que traduzem relações topológicas de sistemas espaciais através de uma linguagem matemática.

Tipicamente, um grafo é representado como um conjunto de pontos (*vértices*) ligados por retas (as *arestas*). Dependendo da aplicação, as arestas podem ser direcionadas, e são representadas por "setas".

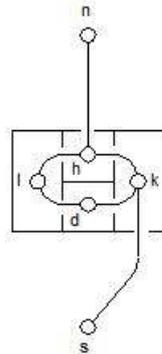


Grafo 1. Representação geométrica de um grafo

4.3.1 RELAÇÕES TOPOLÓGICAS ARQUITETURA E URBANISMO

Na área da Arquitetura e do urbanismo vários trabalhos exploram as relações topológicas do espaço através de nós e ligações que representam, segundo o interesse de cada pesquisa, diferentes tipos de unidades espaciais, bem como a forma de ligações entre eles.

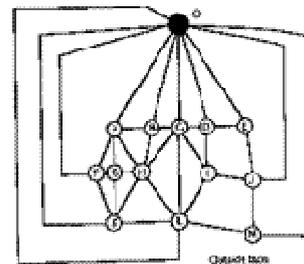
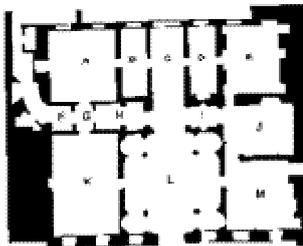
Algumas aplicações exemplificam como a forma como esse tipo de análise vem sendo aplicado aos casos de Arquitetura. Além da adjacência entre compartimentos de uma planta separados por uma parede, outra maneira de representar uma edificação é através de seu grafo de acessos. Neste caso as ligações são efetuadas para representar a possibilidade de acesso entre as peças internas e também com o espaço exterior como no exemplo abaixo:



Grafo 2. Grafo de acessos de uma edificação⁴¹

Neste tipo de grafo podem-se representar os caminhos possíveis dentro de uma edificação até o exterior, a existência de ciclos internos e externos, bem como a distância topológica entre um compartimento e outro e de cada um até o exterior.

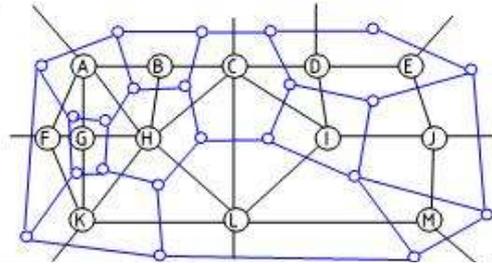
O grafo de adjacência do Palazzo de Porto Festa de Palladio é uma abstração da planta original que relaciona os compartimentos topológica e funcionalmente a partir dos acessos entre os cômodos.



Grafo 3. Planta do Palazzo de Porto Festa e grafo de adjacência⁴⁰

⁴¹ fonte: Steadman J.P.; Architectural Morphology; Londres;1983

Já o grafo de planta da mesma edificação preserva a forma como as relações necessárias para o funcionamento do prédio, levantadas no grafo de adjacências foram resolvidas em planta.



Grafo 4. Grafo de adjacência sobreposto ao grafo de planta do Palazzo de Porto Festa⁴⁰

Dentro da área da pesquisa sobre o urbanismo destaca-se, o trabalho de Hillier e Hanson “The Social Logic of Space” de 1984, onde os espaços convexos são representados como linhas axiais e suas conexões formam uma rede de onde são geradas medidas clássicas como a medida de integração que mede o quão “profunda”, ou distante, uma linha axial está de todas as outras linhas do sistema, ruas, esquinas etc. Vias mais “rasas” estão mais próximas das outras, portanto diz-se que são mais integradas. Vias mais “profundas” em relação às outras são ditas segregadas.



Figura 34. Porto Alegre: desagregação axial e medida de integração global⁴²

⁴² <http://www.spacesyntax.org/software/index.asp>

Outra importante contribuição é o Modelo de Centralidade (Krafta, 1994) que se propõe a instrumentar a análise das propriedades morfológicas do sistema urbano a partir de duas categorias básicas: espaços públicos e formas construídas, tendo como objetivo descrever a diferenciação espacial da estrutura urbana. Considera-se que cada porção elementar de formas construídas, sendo intermediada por um sistema interconectado de espaços públicos, é alcançável de qualquer outra porção.

A base de dados utilizada para a alimentação do Modelo de Centralidade requer uma representação abstrata da estrutura espacial do sistema urbano. A partir das relações topológicas da estrutura espacial urbana gera-se uma representação matemática chamada de grafo urbano (Krügger, 1989).

O grafo apresentado a seguir é uma forma de desagregação do sistema espacial no qual cada ponto representa uma via ou uma edificação do sistema. Cada linha representa as relações de adjacência entre cada espaço ou a ligação de cada forma edificada à sua via de acesso.

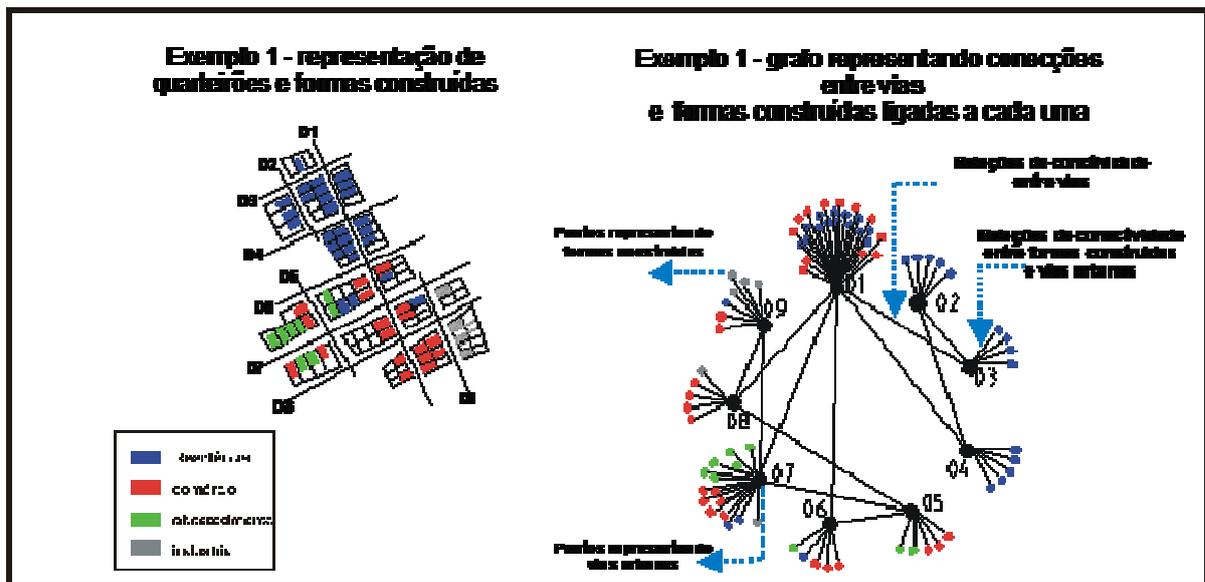


Figura 35. Representação de um sistema espacial urbano através de um grafo

A partir do grafo numerado é possível descrever o tecido a ser analisado partindo de cada espaço e de suas relações de conectividade, a fim de informar ao programa de centralidade (Krafta, 1994) sua posição relativa dentro sistema.

4.3.2 EVOLUÇÃO DO SISTEMA E INFORMAÇÃO MÚTUA

A evolução da estrutura urbana, como já dito nesse trabalho, pode ser representada como um sistema que progride em passos discretos. Cada estado alcançado depende da história, relações funcionais, e processo de evolução anterior. Essa premissa nos possibilita ver que cada alocação de cada atividade dentro do sistema urbano depende de estados anteriores, mesmo que sua evolução traga inovação e propriedades emergentes.

Um importante conceito nessa formulação é a informação mútua do sistema designado como um elemento que reduz a incerteza do comportamento de um sistema e pode ser comparado às relações existentes na configuração urbana através da medida de centralidade.

A seguir são apresentados os grafos com o resultado da medida de centralidade do software Medidas Urbanas 1.15 (Polidori et al. 2001) da cidade de Santa Cruz do Sul/RS em uma série histórica:

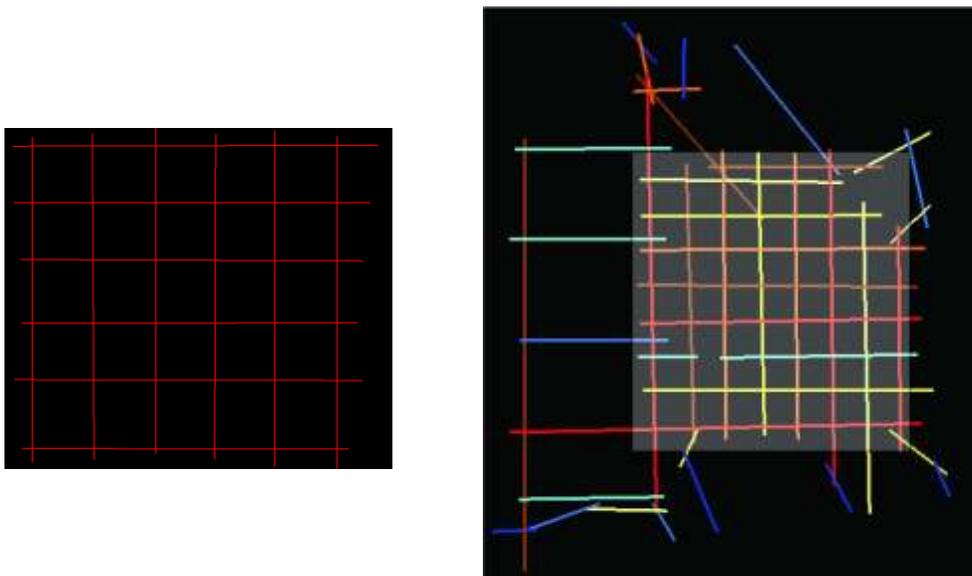


Figura 36. Centralidade Santa Cruz do Sul - 1870 e 1922

É possível se observar nesses mapas axiais, coloridos segundo a centralidade de cada linha, a existência de uma continuidade na estrutura urbana da cidade, mantendo a área inicial do povoamento como área central da cidade, ressaltada no mapa, mesmo com o crescimento e o deslocamento de importantes funções urbanas em áreas periféricas.

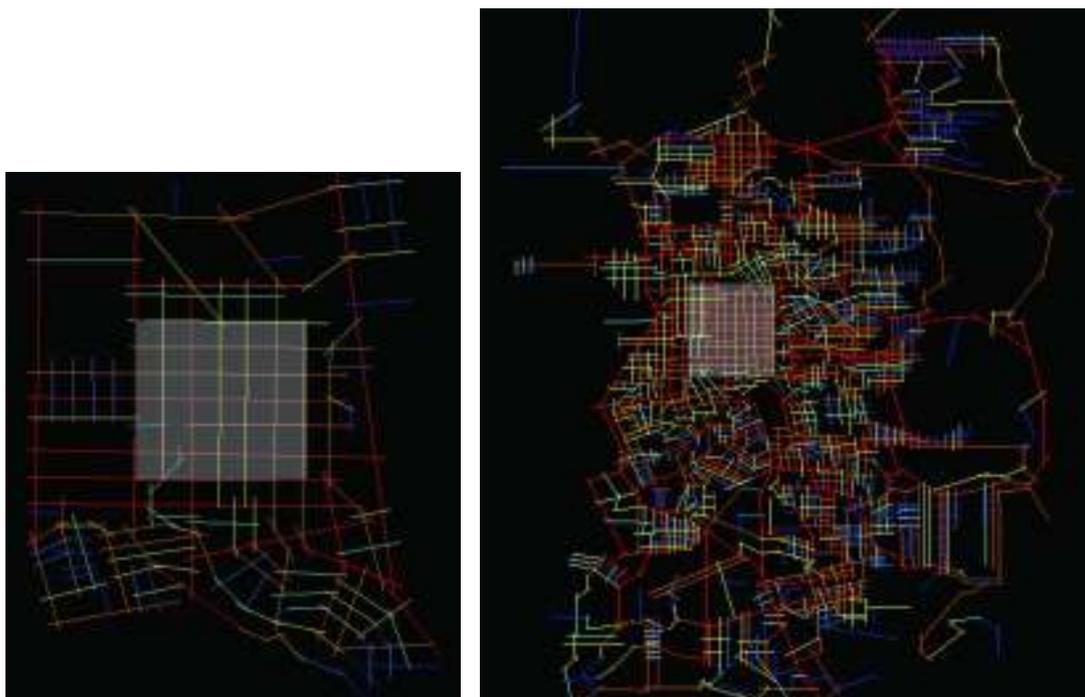


Figura 37. Centralidade Santa Cruz do Sul - 1940 e 2002

A Informação mútua pode ser definida como um processo de continuidade da estrutura urbana ao longo do tempo, sem apresentar um caráter determinante em sua evolução. Avalia-se a simulação em T (sendo T o número de iterações do sistema) e $T+1$, com objetivo de medir quanta informação há em comum entre os dois passos discretos de evolução.

Outro ponto interessante na observação desses mapas é a constatação da descentralização da estrutura à medida que ela evolui. As linhas vermelhas que aqui representam as mais centrais do sistema aparecem não só no centro inicial, mas também em áreas periféricas que, no caso de Santa Cruz do Sul, conectam importantes atratores da cidade, como o Distrito Industrial, Universidade e o Shopping Center da cidade.

Mesmo que nossos estudos de caso sejam apenas em duas cidades (Porto Alegre no capítulo 2 e Santa Cruz do Sul), é fácil compreender que essas propriedades se aplicam de alguma forma a sistemas urbanos em geral. Essa propriedade também pode ser vista do ponto de vista que Krugman traz em seu trabalho como “*força centrípeta*” que gera centralização e “*força centrífuga*” que descentraliza o sistema devido a “deseconomias de escala” sendo esses conceitos citados no capítulo 2 desse trabalho.

Nas análises apresentadas a seguir pretende-se observar o comportamento dos resultados do Modelo Potenciado segundo suas propriedades topológicas relacionadas à centralidade dos

sistemas em três medidas: Centralidade por proximidade, Grau de Intermediação e Detecção de Centros.

4.3.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A partir de agora as células serão representadas como pontos e as relações de vizinhanças como linhas ou setas conforme o esquema abaixo. Pontos e linhas irão descrever a paisagem celular através de suas relações topológicas formando grafos, como definido no capítulo 2.

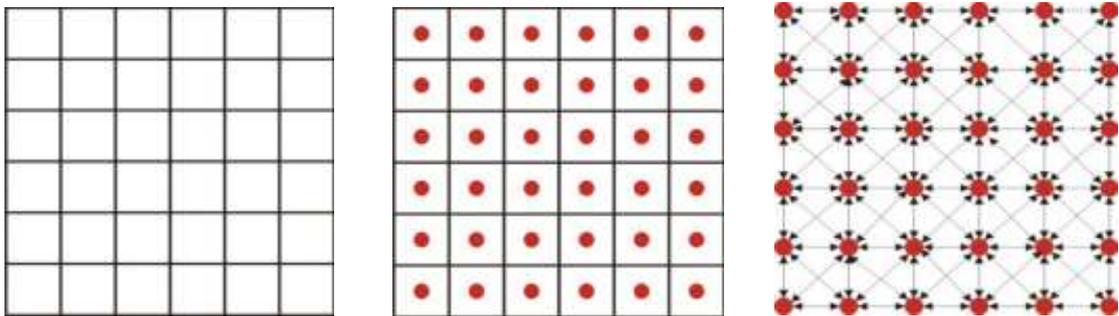


Figura 38. Representação das células originais, representadas por pontos e ligações

Essa representação pode levar em consideração o sistema celular como um todo ou apenas extrair dele as partes mais essenciais. Nesse trabalho, os grafos com a ocupação de cada atividade serão extraídos do grafo 50 X 50 original.

Um subgrafo de um segundo grafo G é um grafo que possui todos os pontos e linhas em G . O processo de análise iniciou com a definição de um grafo global contendo todos os vértices do sistema.

Abaixo se vê a distribuição da População 1 na paisagem celular. A imagem a seguir representa o grafo completo com os vértices variando de tamanho segundo a quantidade de unidades da População 1 ali alocada. Por último tem-se o subgrafo formado apenas pelos pontos ocupados que servirão de base para a primeira análise de formação de comunidades de cada atividade individualmente.

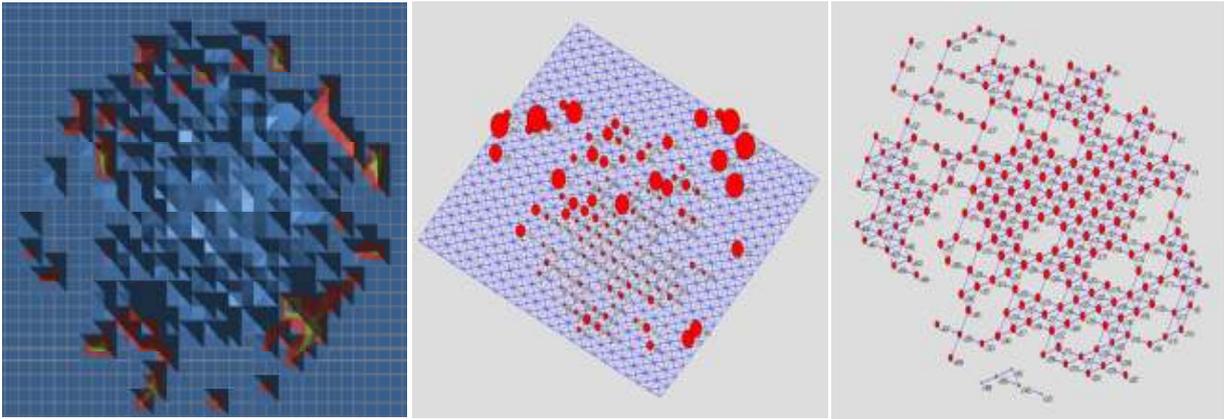


Figura 39. Ocupação População 1, grafo com a distribuição de valores do da População 1 e subgrafo com os pontos ocupados por essa atividade.

Grafos representando sistemas auto-organizados não são regulares, ou seja, são objetos onde a ordem coexiste com desordem. Partindo desse pressuposto, defini-se a propriedade das redes auto-organizadas que não produzem grafos aleatórios, mas sim, heterogêneos revelando uma alta hierarquização.

O grau de distribuição é amplo e normalmente seguem a característica de muitos vértices com baixo grau e outros com alto grau. Além disso, a distribuição das ligações não são globais, mas produzem alta concentração de ligações entre grupos de vértices especiais e baixa concentração entre esses grupos.

4.3.3.1 DETECÇÃO DE COMUNIDADES

“Uma característica importante de redes complexas é a existência de estruturas de comunidades”. Comunidades também são chamadas de “clusters” ou agrupamentos e são formadas por grupos de vértices que provavelmente partilham propriedades comuns, incluindo sua função na estrutura do grafo.

Comunidades refletem relações topológicas entre os elementos de um sistema e representam entidades funcionais. Por exemplo, comunidades podem ser grupos de indivíduos relacionados em redes sociais. Em alguns casos podem ser consideradas como entidades separadas com autonomia dentro do sistema. Os resultados do modelo POTENCIAT foram analisados a partir do software para análise e representação de redes PAJEK (1996, 2010 V. Batagelj, A. Mrvar).

O Objetivo dessa análise é verificar que tipos de grupos se formam a partir das ocupações das atividades dentro do sistema. Dessa forma a análise não é feita apenas a partir da localização das atividades, mas também dos “agrupamentos” que são uma propriedade emergente do sistema proveniente da evolução.

4.3.4 DEFINIÇÃO DOS GRAFOS E MEDIDAS DE CENTRALIDADE

O processo de análise iniciou com a definição de um grafo global contendo todos os vértices do sistema. Os subgrafos foram extraídos do grafo principal, mantendo apenas os vértices ocupados por cada atividade, que a partir de agora serão analisados segundo suas propriedades topológicas.

4.3.4.1 “CENTRALIDADE POR PROXIMIDADE”

Redes auto-organizadas não são grafos aleatórios e, além disso, são heterogêneas revelando hierarquização. A análise desse processo pode ser feita a partir de características topológicas da rede como as medidas de centralidade. A dimensão dos vértices provém de seus valores alcançados nas diferentes medidas de centralidade e não da quantidade de unidades de atividades em cada célula ou em cada nó.

Um dos indicadores mais simples de centralidade é a quantidade de ligações que cada vértice possui. Esta propriedade chama-se grau do vértice e, na estrutura das ocupações das atividades do modelo POTENCIAT, acaba por se tornar de menor importância, pois a organização das células concede um número similar de ligações entre todos os vértices, apresentando alguma variação somente nas bordas das áreas ocupadas.

Outra forma de determinar a importância relativa de um vértice em uma rede é a medida de “centralidade por proximidade”. A “centralidade por proximidade” de um vértice é o número de vértices dividido pela soma de todas as distâncias entre o vértice analisado e todos os outros.

Essa medida pode ser utilizada para a detecção de continuidades das características estruturais presentes nas redes estudadas em diferentes etapas da simulação. O objetivo é verificar se os vértices ocupados nas etapas iniciais da simulação permanecem com valores de centralidade altos ao longo das iterações preservando assim sua estrutura.

Isso é particularmente importante no caso de modelos urbanos, pois denota a continuidade da estrutura e a evolução do sistema dependendo da configuração anterior em um processo chamado de “path dependency” já citado aqui.

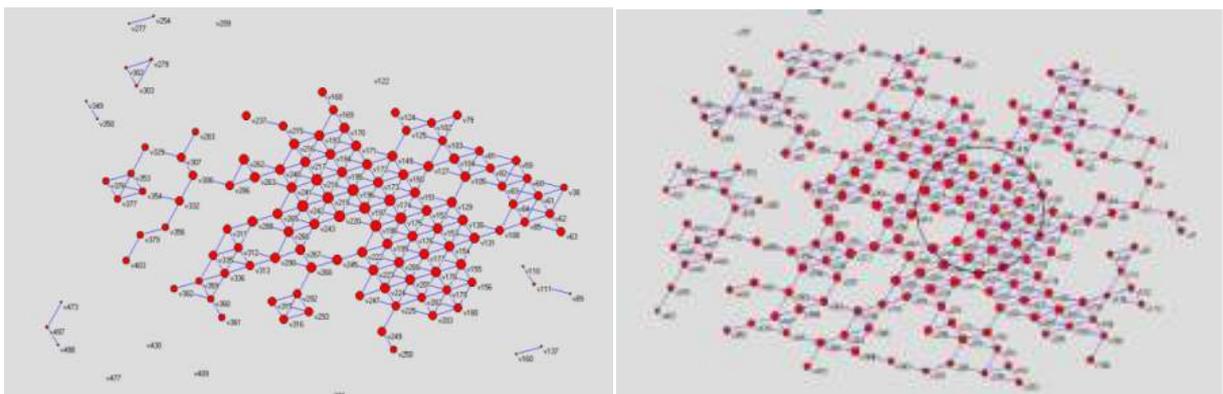
Em função disso, os quatro sistemas simulados neste trabalho foram alvo de estudo em suas propriedades.

4.3.4.1.1 ATIVIDADE COMERCIAL E INDUSTRIAL

Com a evolução do sistema e o maior aparecimento de vazios e ilhas, os valores de centralidade dos vértices passam a ter alguma diferenciação mais marcante sugerindo heterogeneidade espacial nas estruturas desenvolvidas a partir do modelo.

Mesmo com 700 iterações a atividade Industrial apresenta nas quatro simulações os maiores valores sobre o núcleo inicial de ocupação definindo uma área central homogênea, fortemente conectada em cada atividade. Por outro lado, em razão do surgimento de vértices desconectados da estrutura principal, acaba gerando pontos onde o valor de centralidade é zero.

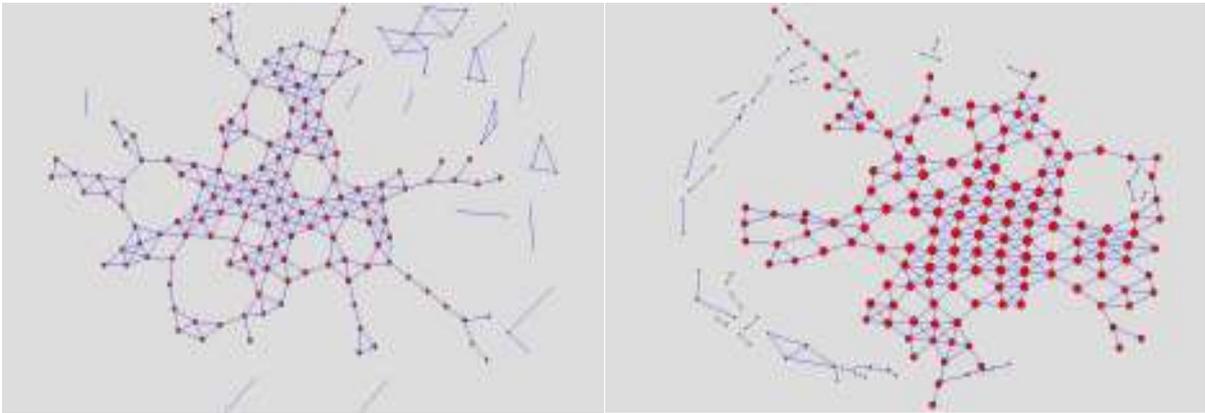
Os grafos da atividade comercial apresentam demarcação do núcleo inicial da ocupação com maiores valores de “centralidade por proximidade”. A atividade comercial continua com uma estrutura fortemente ligada aos vértices que sofreram as primeiras ocupações. Mesmo assim surgem grupos pouco conectados à área central que denotam a formação de comunidades.



Grafo 5. Simulação 1: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio

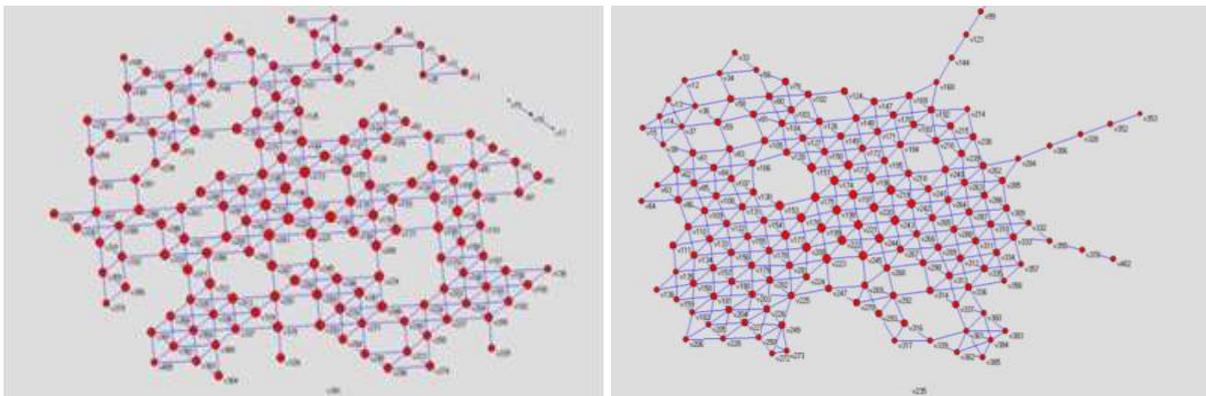
Na simulação 1 as atividades da Indústria e Comércio ainda permanecem com forma de ocupação coesa. Apesar disso, a atividade industrial tem tendência à descentralização como mostram os “focos de ocupação” dessa atividade em áreas distantes do centro. A área assinalada no grafo representa a centralidade por proximidade da atividade comercial.

A Simulação 2, por outro lado, apresenta uma estrutura mais rarefeita com descontinuidades e formação de várias “ilhas” desconectadas do núcleo inicial.



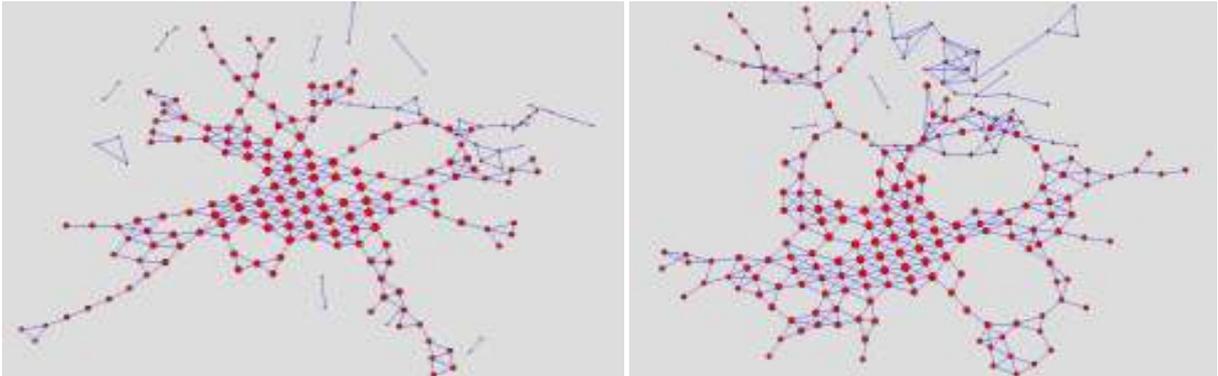
Grafo 6. Simulação 2: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio

A Simulação 3 como já visto anteriormente acaba por ocupar praticamente a mesma área durante a simulação com ocupação extremamente coesa. Com 700 iterações esse sistema apresenta configuração homogênea com valores de “centralidade por proximidade” bem distribuída tanto na atividade industrial quanto comercial formando apenas uma ilha.



Grafo 7. Simulação 3: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio

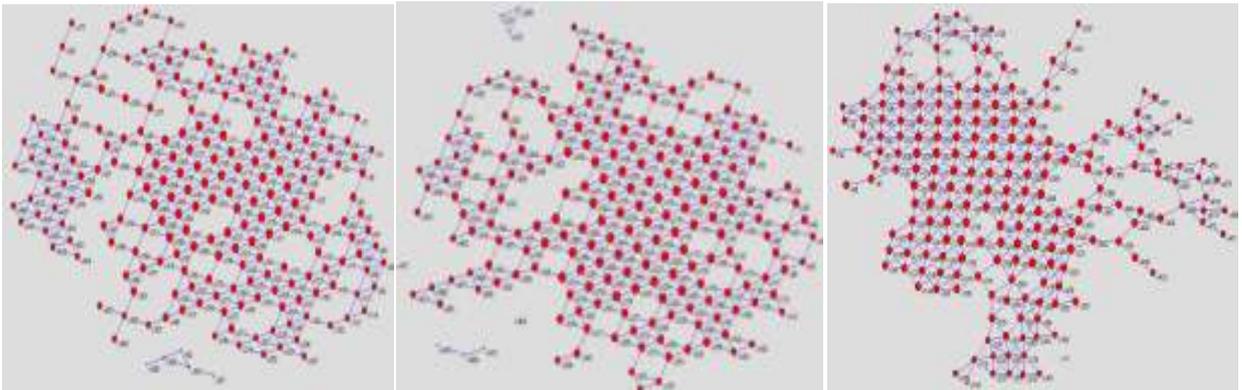
As simulações 2 e 4 são as que apresentam as formas de ocupação mais complexas, com descontinuidades e formação de ilhas em sua configuração. Apesar dessa similaridade, essas duas simulações se diferenciam no que tange à forma de ocupação como se verá adiante, na avaliação das populações residenciais 1, 2 e 3 da quarta simulação.



Grafo 8. Simulação 4: “Centralidade por Proximidade” Indústria e Comércio

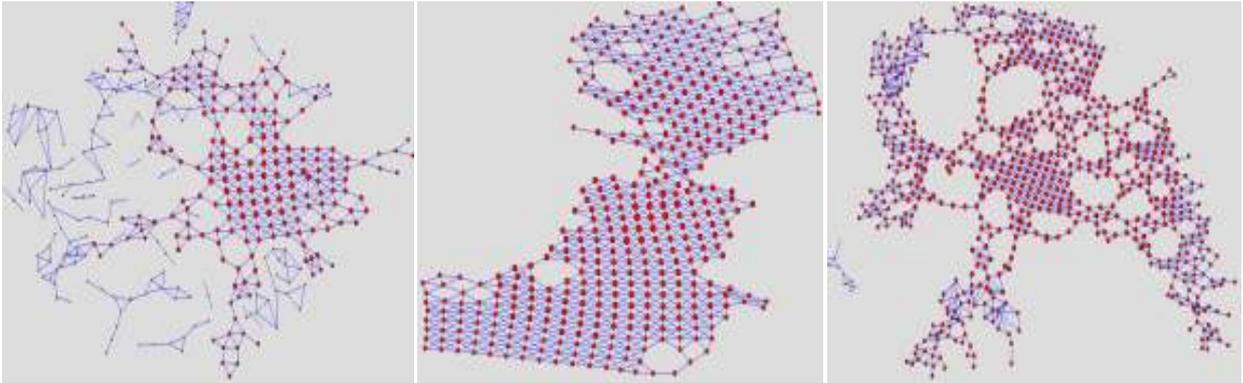
4.3.4.1.2 POPULAÇÕES RESIDENCIAIS 1, 2 E 3

A Simulação 1 evolui para uma configuração coesa e com vértices com alta conectividade. Mesmo assim, surgem algumas áreas pouco conectadas à área central, demonstrando a formação de comunidades, nas áreas periféricas.



Grafo 9. Simulação 1: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3

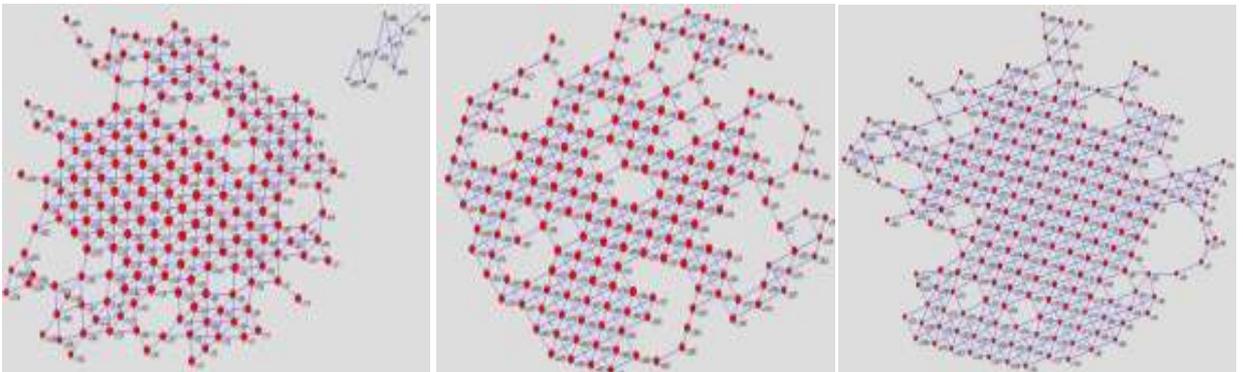
Como já dito na avaliação a partir de estatística espacial, a População 2 tem na Simulação 2 uma característica determinística muito forte criando uma área extremamente coesa em dois grupos, tendo um deles alocados sobre o núcleo inicial de ocupação. Esta característica força as demais atividades a dividirem o espaço no entorno da População 2 com interações que definem grandes áreas vazias e outras desconectadas.



Grafo 10. Simulação 2: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3

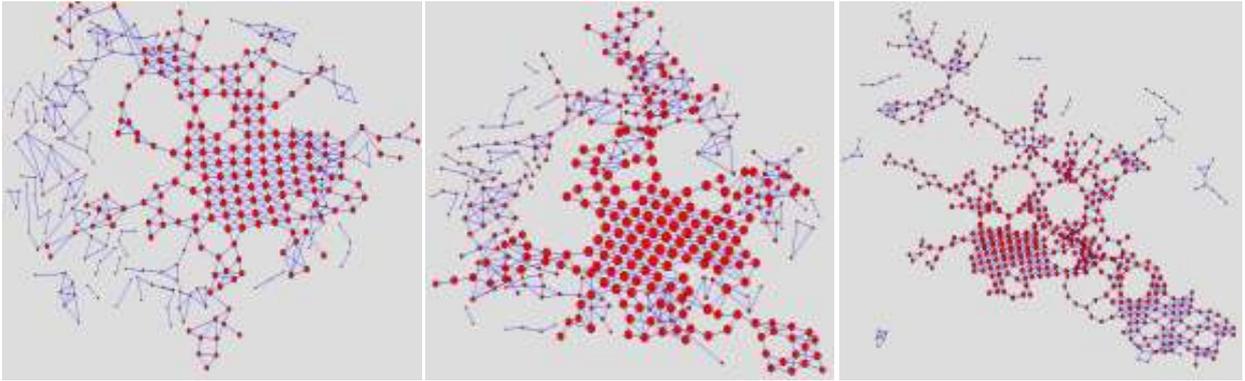
Nesse mesmo sistema, as Populações 1 e 3 se organizam ocupando ainda o núcleo inicial. Enquanto a População 1 apresenta vazios internos e desenvolvimento de ilhas, a População 3 tem uma configuração contínua, porém com vazios internos que concedem uma forma “rendilhada” à área dessa atividade. Essa diferença será posteriormente analisada a partir do uso de geometria fractal.

A Simulação 3 se destaca na forma homogênea que o sistema toma depois de 700 iterações. As Populações 1, 2 e 3 se tornaram as mais equilibradas, com menor quantidade de ilhas.



Grafo 11. Simulação 3: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3 – 700 it

O Sistema 4 apresenta uma ocupação bem rarefeita com tendência à formação de uma “borda” mais densamente ocupada no lado esquerdo da ocupação. A definição dessa nova área de ocupação denota uma interação mais intensa entre as atividades nessa simulação. Conseqüentemente, formam-se mais rapidamente áreas com potencial de atratividade negativas “forçando” a procura de novas áreas para a alocação de cada atividade.



Grafo 12. Simulação 4: “Centralidade por Proximidade” Populações 1, 2 e 3 – 700 it

As áreas ocupadas nos primeiros estágios da simulação permanecem sendo centrais ao longo do tempo quando leva-se em consideração a sua configuração Global.

Todas as atividades evoluem em sua localização preservando topologicamente a sua configuração inicial com os maiores índices de centralidade em um processo que se pode considerar como uma continuidade na organização e hierarquia dos vértices entre os estágios.

4.3.4.2 GRAU DE INTERMEDIACÃO

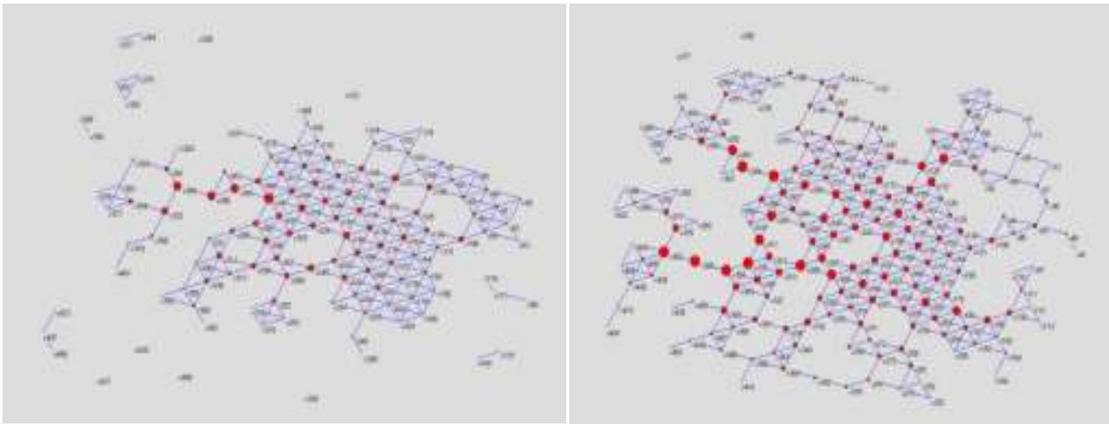
O Grau de intermediação é medido tomando-se em conta quantas vezes um vértice faz parte do menor caminho entre um par de vértices qualquer do sistema. Essa propriedade é utilizada na classificação dos vértices de acordo com sua posição topológica dentro de comunidades.

Serve para a identificação de grupos e suas fronteiras. Os vértices inter-comunicadores podem ser detectados e a formação de comunidades fica mais clara do que na medida de “centralidade por proximidade”.

4.3.4.2.1 ATIVIDADE COMERCIAL E INDUSTRIAL

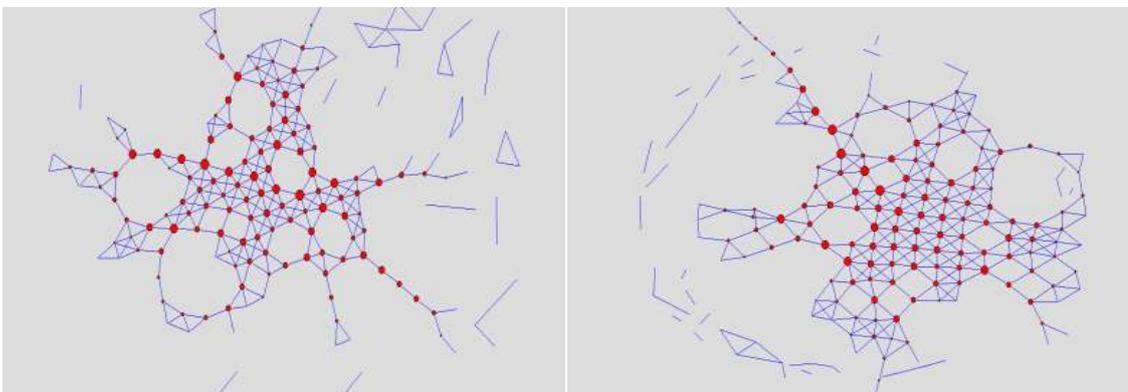
A medida de grau de intermediação detecta uma hierarquia mais clara na do que a medida de centralidade anterior. Isso ocorre em função dos sistemas delinearem uma ocupação mais rarefeita, com várias áreas vazias e formação de ilhas.

Na atividade comercial e industrial se nota a existência de vértices com os maiores valores nos pontos de ligação entre o centro inicial e os grupos que começam a aparecer nas áreas mais periféricas de cada sistema.



Grafo 13. Simulação 1: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it

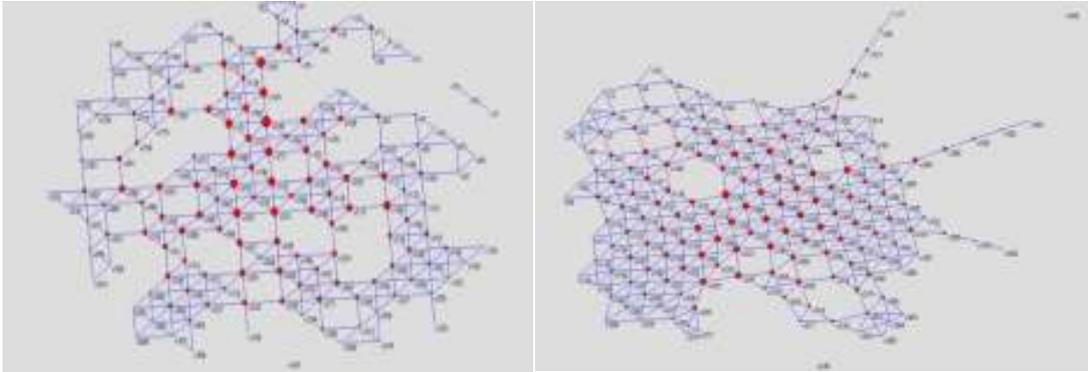
Esta característica demarca a possibilidade de formação de estrutura de comunidades. Nas quatro simulações emerge a concentração dos maiores valores em poucos vértices que podem ser rapidamente identificados nos grafos que representam essa propriedade. Essa demarcação pode ser comparada com a existência de eixos que organizam o crescimento apresentando diferenciação espacial e hierarquia.



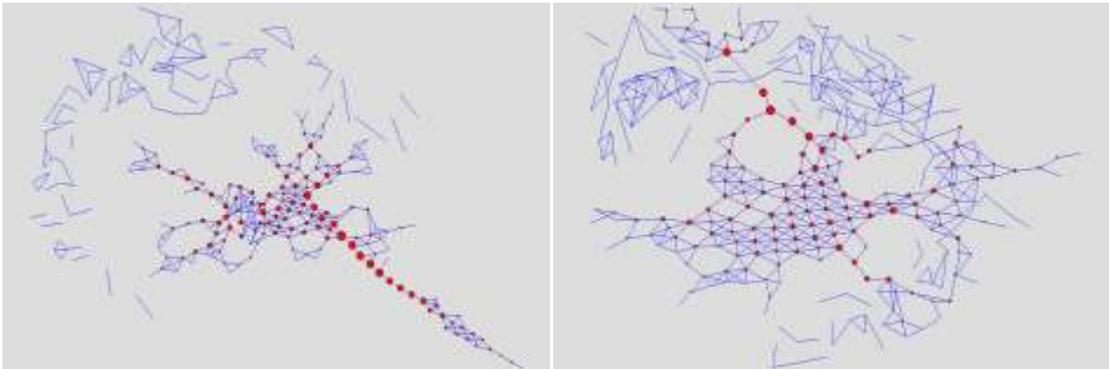
Grafo 14. Simulação 2: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it

Na Simulação 3 fica clara a existência de um núcleo de ocupação muito bem conectado. A diferença principal desse Sistema em relação aos demais é a existência de vértices com alto

valor dessa centralidade nas áreas mais centrais da ocupação enquanto, como no caso da Simulação 4, surgem eixos que conectam áreas longínquas do centro.



Grafo 15. Simulação 3: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it

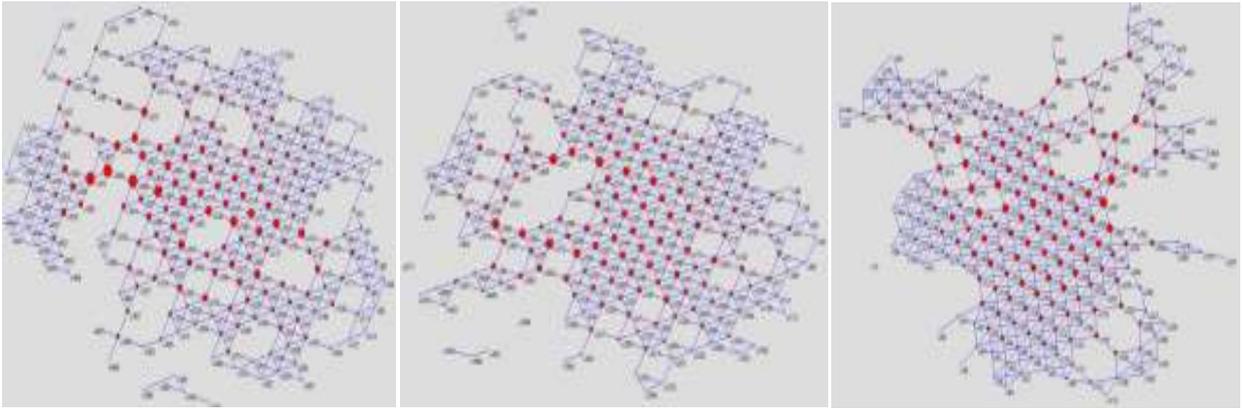


Grafo 16. Simulação 4: “Grau de intermediação” Indústria e Comércio – 700 it

4.3.4.2.2 POPULAÇÕES RESIDENCIAIS 1, 2 E 3

As populações residenciais assumem formas muito diferentes nessa medida de centralidade. Cada Simulação se apresenta com estrutura diferenciada em relação às demais.

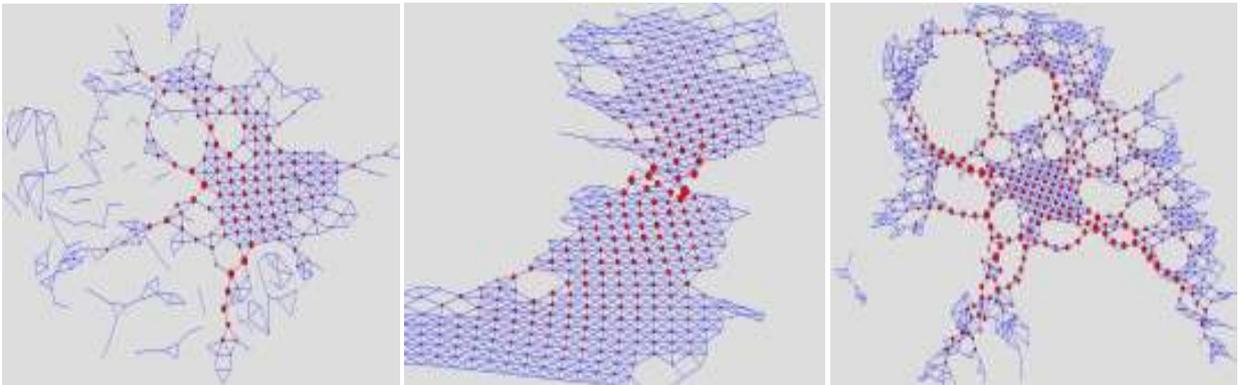
Na Simulação 1 a População 1 acaba com configuração mais compacta apresentando um eixo que atravessa o núcleo inicial formando uma “linha” de vértices com maiores valores de “grau de intermediação”. As demais populações apresentam comportamento semelhante com distribuição de valores maiores em áreas mais centrais.



Grafo 17. Simulação 1: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it

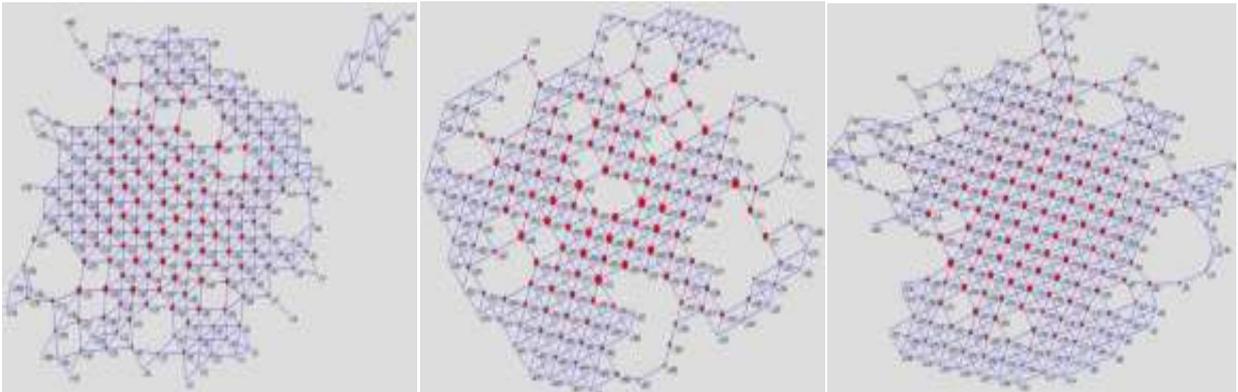
É interessante notar que na Simulação 2 o desenvolvimento da População 2 gera duas áreas bastante compactas conectadas por poucos vértices. Nesta medida de centralidade esses pontos assumem maior valor na área que liga a parte superior, com o núcleo original, à parte inferior.

Esse comportamento direcionou a ocupação das demais atividades gerando dois diferentes tipos de estrutura. Enquanto a População 1 tem forma mais rarefeita com a formação de várias ilhas, a População 3 apresenta vários vazios internos com áreas ligadas por linhas que apresentam os maiores valores dessa centralidade.



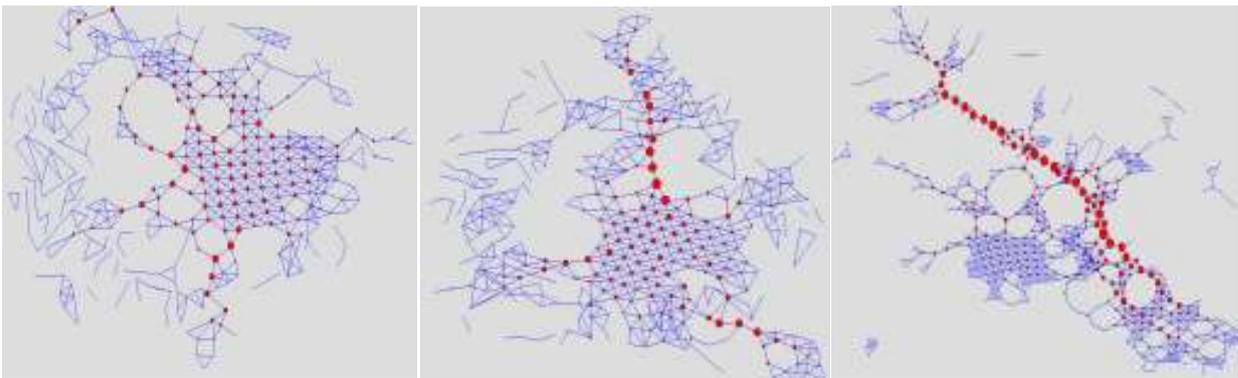
Grafo 18. Simulação 2: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it

Na Simulação 3 os maiores valores dessa medida concentram-se no núcleo inicial de ocupação demonstrando extrema coesão na forma de ocupação de cada atividade. Mesmo assim, algumas áreas aparecem menos conectadas que as demais, indicando a formação de comunidades e a importância desses vértices na estrutura do sistema.



Grafo 19. Simulação 3: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it

O deslocamento dos valores com maiores valores de grau de intermediação nos grafos de cada atividade indica a formação de grupos. Novamente aparecem os eixos que distribuem as áreas mais longínquas assumindo os maiores valores de grau de intermediação.



Grafo 20. Simulação 3: “Grau de intermediação” Populações 1, 2 e 3 – 700 it

A detecção de áreas com tendências a formar clusters pode ser complementada com a medida apresentada a seguir que é a formação de centros dentro do sistema.

4.3.4.3 DETECÇÃO DE CENTROS

Vértices com posição central em seus clusters podem ter importante função no controle e estabilidade dentro do grupo. Podem também ter um papel crítico na mediação de relações e trocas entre diferentes comunidades. Além disso, em alguns casos, podem fazer parte de diferentes grupos em uma sobreposição de redes.

A detecção de centros de um grafo no software PAJEK⁴³ é baseada no “algoritmo de roubo”: vértices que possuem alto grau são considerados mais “fortes” que os vizinhos e por isso podem “roubar” dele.

No início da detecção os vértices recebem valores de acordo com seu grau ou começa com o mínimo valor 1. Quando vértices “fracos” são identificados os vizinhos roubam dele de acordo com seu peso no sistema recursivamente.

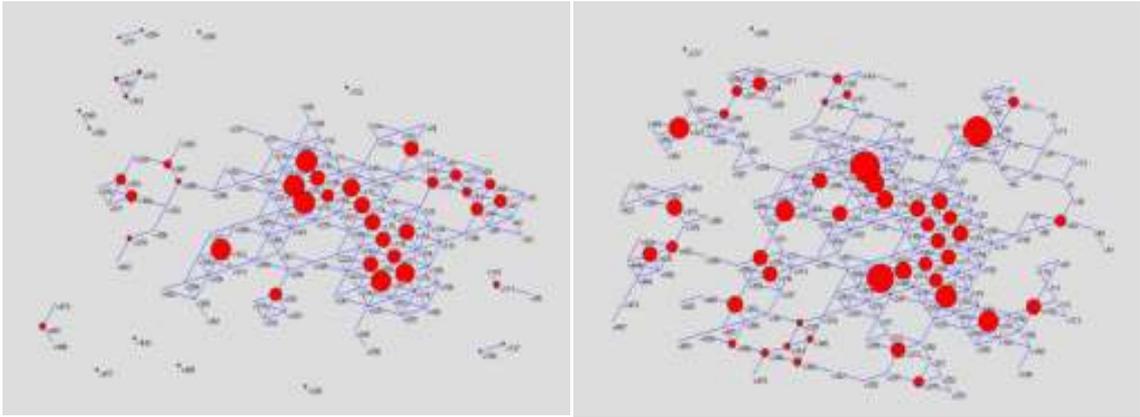
Esta medida acaba por apontar não apenas os pontos mais centrais do sistema de forma global, mas também torna visíveis os pontos importantes localmente que tendem a criar centralidade nos clusters. A definição de centros detecta uma hierarquia clara na altura de 700 iterações do modelo nas quatro simulações. Esse processo surge a partir de uma ocupação rarefeita com várias áreas vazias e formação de ilhas que são detectadas por essa medida de centralidade.

4.3.4.3.1 INDÚSTRIA E COMÉRCIO

Nesta medida as áreas ocupadas inicialmente continuam a ser consideradas centros importantes, mas aparecem com valores menores que outros. Essa configuração denota centros localizados em grupos de vértices pouco conectados ao sistema como um todo. Isso se dá por essa medida ter um caráter mais relacionado ao local do vértice e seu entorno do que à globalidade do sistema.

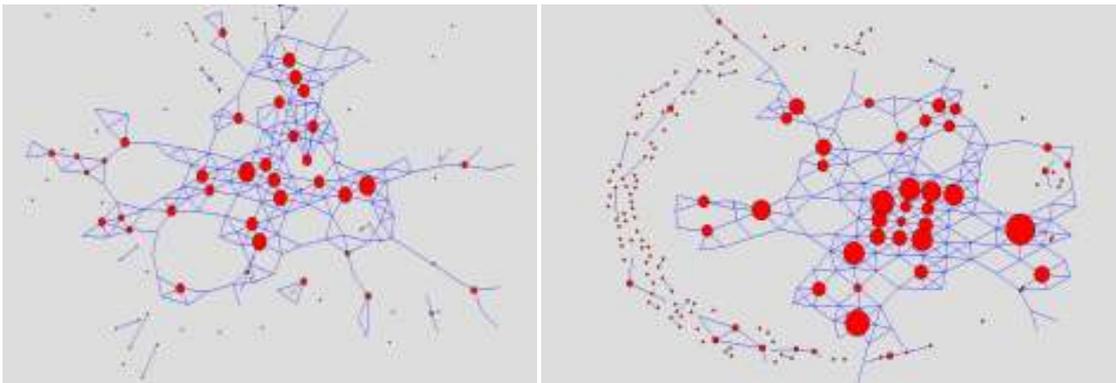
Os grafos definidos por essa medida são mais dispersos, com áreas vazias e, até mesmo, desconectadas formando “ilhas” que surgem da interação das atividades. Enquanto as outras medidas praticamente ignoravam os vértices desconectados do sistema, a detecção de centros atribui valores para esses pontos em função de sua importância local.

⁴³ (1996, 2010 V. Batagelj, A. Mrvar)

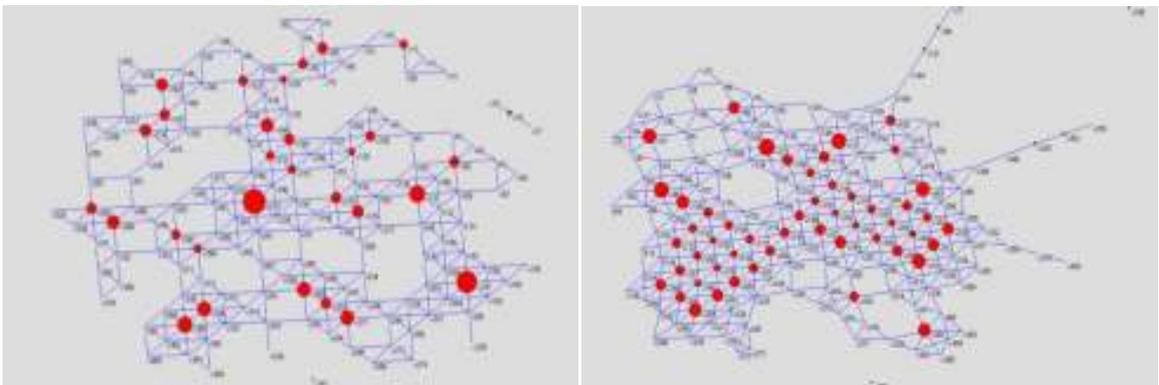


Grafo 21. Simulação 1: Centros detectados Indústria e Comércio – 700 it

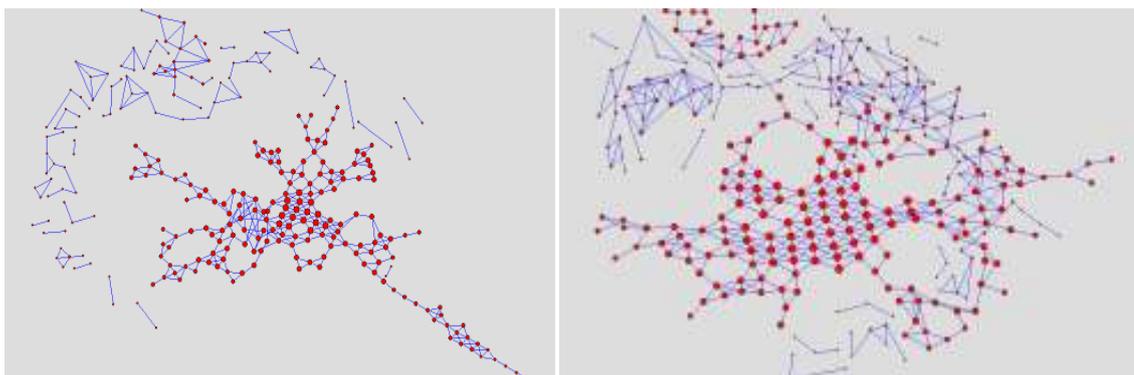
A atividade comercial nas Simulações 2 e 4 apresentam uma série de pequenos centros desconectados do conjunto principal, ocupando com essa forma a “borda” com altas densidades das populações residenciais 1 e 3.



Grafo 22. Simulação 2: Centros detectados Indústria e Comércio – 700 it



Grafo 23. Simulação 3: Centros detectados Indústria e Comércio – 700 it



Grafo 24. Simulação 4: centros detectados Indústria e Comércio – 700 it

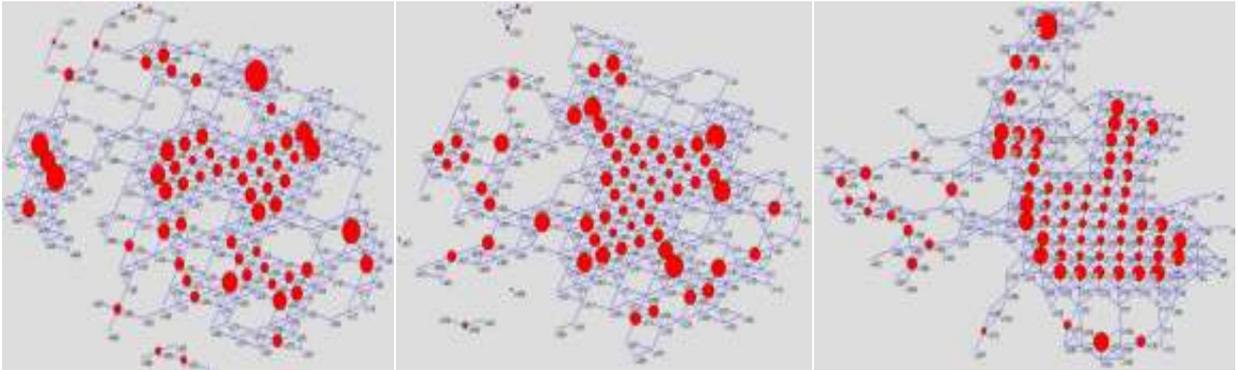
4.3.4.3.2 POPULAÇÕES RESIDENCIAIS 1, 2 E 3

Para melhor compreensão das estruturas formadas pelo Modelo Potenciado em cada simulação é necessária a comparação entre os grafos das diferentes atividades. Isso pode trazer informações importantes como o caso do comércio que forma centros em áreas segregadas, mas que são também centros importantes para a atividade residencial local.

Nas simulações 1 e 3 a atividade industrial forma ainda valores altos próximos aos núcleos iniciais de ocupação apesar de, em alguns casos, existirem vazios vizinhos a eles. Essa atividade apresenta grande possibilidade de formação de novos centros em função da ocupação rarefeita com “ilhas” e pontos sem conexão.

Nas simulações 2 e 4 o núcleo inicial reaparece como forte elemento centralizador para a atividade comercial que, além disso, configura uma “borda” de pequenos centros individuais espalhados sobre o território ocupado. Essa estrutura sugere a formação de eixos de crescimento deslocados em direção à periferia.

Na primeira simulação a População 1 apresenta a formação núcleos em locais na periferia do sistema mostrando uma tendência de formação de comunidades menos conectadas ao núcleo inicial.



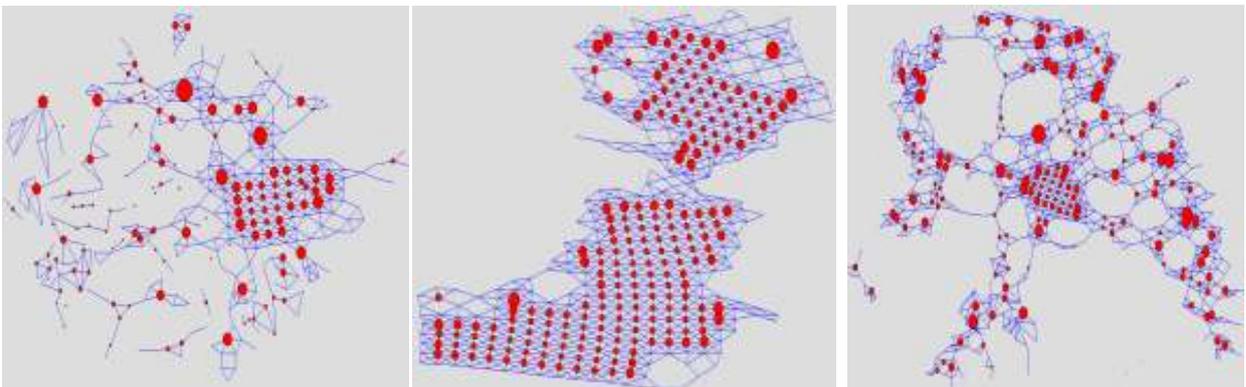
Grafo 25. Simulação 1: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it

A População 2 não apresenta vazios próximos ao centro original por isso as áreas centrais são contínuas formando um grande grupo no centro e adjacências.

O grafo da população 3 define um eixo de centros bem marcado iniciando pelo centro inicial e se completando na área mais periférica onde atinge um valor maior. Assim como a População 1, essa apresenta a formação de grupos mais desconectados do núcleo inicial, com forte tendência a crescer para a parte superior do grafo.

Na Simulação 2 as populações 1 e 3 aparecem com a formação de vários centros corroborando a inclinação de formação de comunidades através dos vazios e áreas menos conectadas ou desconectadas. Nesses casos a distribuição da medida fica concentrada em alguns vértices principais.

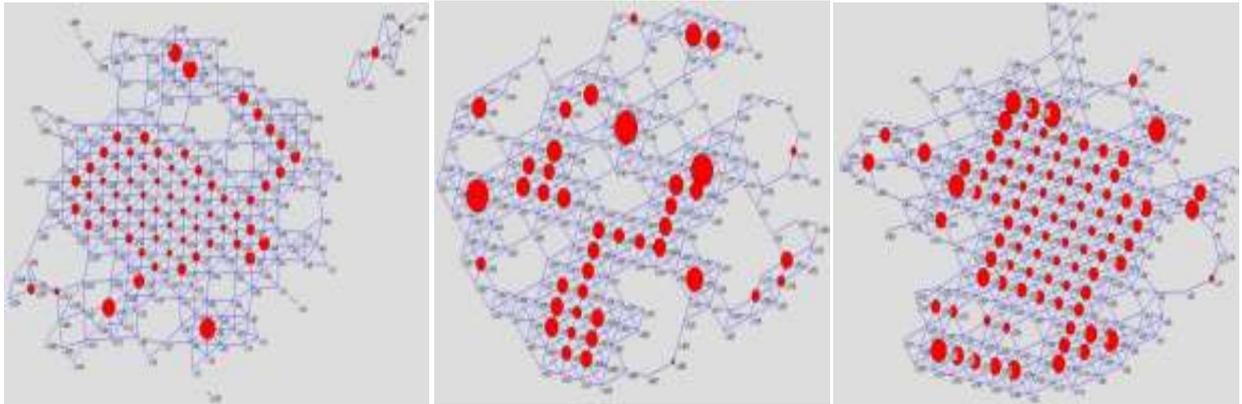
É importante comparar essa duas situações com a População 2 que tem apenas a formação de um grupo superior e outro inferior ligados por poucos vértices centrais com baixos valores dessa medida. A alta conectividade concede pouca diferenciação nos vértices que a formam caracterizando grupos bastante coesos.



Grafo 26. Simulação 2: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it

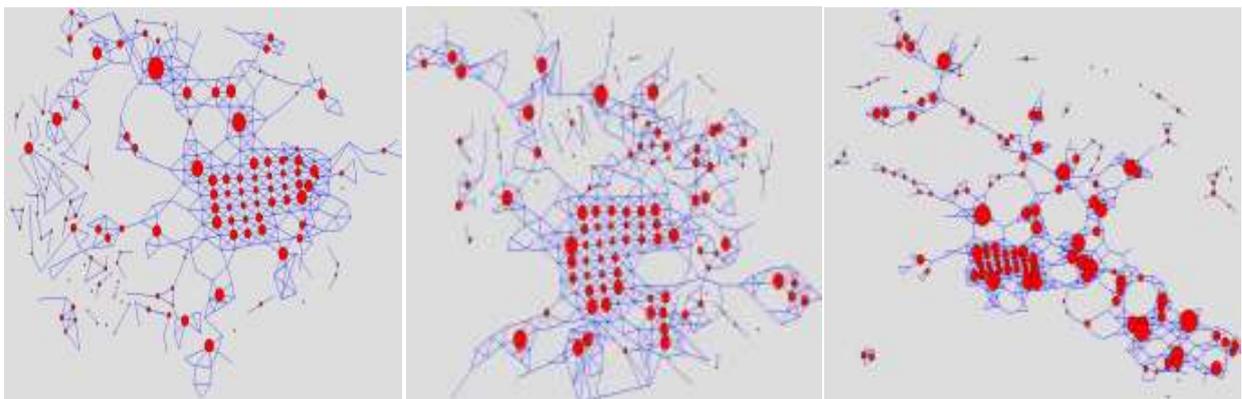
Novamente é importante citar que a ocupação da População 2, por ser extremamente interligada, acabou por definir as ocupações das outras Populações e das atividades Industrial e Comercial.

Assim como as atividades Industrial e Comercial, as Atividades Residenciais da Simulação 3 apresentam uma configuração coesa, sem grandes diferenciações entre os vértices.



Grafo 27. Simulação 3: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it

Na simulação 4 a População 3 demonstra ordem com a formação de uma estrutura longitudinal e vários vazios internos. Tanto a População 2 quanto a 3 demonstram tendência à formação longitudinal que confirma a forma detectada pela observação e estudo de densidade apresentados anteriormente com a geração de uma “borda” de ocupação mais densa no lado esquerdo da área ocupada.



Grafo 28. Simulação 4: centros detectados Populações 1, 2 e 3 – 700 it

De forma geral os sistemas gerados mostram forte descentralização da estrutura em todas as atividades e formação de novos focos de ocupação sugerindo a existência de comunidades.

É importante notar que mesmo com o processo de descentralização e formação de comunidades muitas vezes desconectadas, o núcleo inicial permanece com grande importância nas estruturas formada por cada atividade.

4.3.5 ANÁLISE

As medidas de importância de um nó em uma rede, como grau de proximidade e grau de intermediação, são aqui utilizadas para a análise da estrutura formada ao longo das iterações do modelo. Assim, essas medidas caracterizam a estrutura espacial e a posição de cada vértice dentro da hierarquia espacial de cada ocupação

Em um território celular totalmente disponível, os sistemas evoluíram criando redes e grupos formados pela alocação de atividades em relação a elas mesmas sem que esse comportamento fosse definido nas equações de evolução de cada atividade. Além disso, o modelo demonstrou ser capaz de desenvolver estruturas em redes com formação de comunidades.

A estrutura espacial gerada em cada simulação possui continuidade ao longo das iterações, ainda que as maiores densidades dos sistemas não estejam mais localizadas ali, como se pôde ver na avaliação anterior por meio de estatística espacial. Mesmo assim, as relações espaciais permanecem ao longo do tempo caracterizando o processo de informação mútua e hierarquia espacial.

A estrutura vai se modificando ao longo do tempo em passos discretos. A cada iteração a decisão de alocação das atividades é feita a partir de uma estrutura existente que fornece as informações a serem apreendidas por cada uma.

Dessa forma, se permite a continuidade na evolução dos sistemas sempre a partir do estado anterior, sem perder a configuração inicial completamente. Essa característica pode ser vista em sistemas urbanos reais como no caso de Porto Alegre apresentado no capítulo 2 e posteriormente nos mapas de centralidade de Santa Cruz do Sul apresentados anteriormente.

Os resultados obtidos com as quatro simulações do modelo permitem que uma comparação possa ser efetuada em relação ao sistema real baseado nas linhas axiais de Santa Cruz do Sul. Assim como ocorre no sistema real, a estrutura da organização espacial das

simulações foi capaz de evoluir apresentando coesão e continuidade, mesmo com o crescimento dos sistemas.

Outra peculiaridade importante a ser observada, principalmente na medida de detecção de centros, é a descentralização e criação de sub-centros dentro das comunidades formadas.

As estruturas mantêm um processo de hierarquização e, com o crescimento dos sistemas, passam a configurar comunidades menos conectadas do núcleo inicial, com configuração de centros menores internos a esses grupos. Assim, constata-se que os grafos gerados a partir da ocupação de cada atividade possuem estruturas hierarquizadas e diferenciação espacial da mesma forma que foi identificada na Centralidade de Santa Cruz do Sul.

No próximo item de análise a formação de clusters será vista levando em consideração não apenas as atividades individuais aqui apresentadas, mas as relações de ocupação existente entre elas.

4.4 ANÁLISE MULTIVARIADA E FORMAÇÃO DE AGRUPAMENTOS

Como já dito anteriormente, uma característica de redes complexas é a estrutura de comunidade. Comunidades também são chamadas de “clusters” ou agrupamentos e são formadas por grupos de vértices que provavelmente partilham propriedades comuns, incluindo sua função na estrutura do grafo.

As análises desenvolvidas até aqui tiveram como objetivo principal verificar a condição de dependência espacial, formação de comunidades das atividades individualmente e estruturação das ocupações para formar ordem como propriedade emergente dos sistemas simulados.

Apesar de se continuar utilizando elementos relacionados à Teoria dos grafos, a partir de agora serão definidos grupos de forma diversa, levando-se em consideração os conglomerados espaciais formados por todas as atividades ao mesmo tempo. Isso permitirá a identificação de vértices que definiriam grupos a partir da combinação de mais de uma atividade, diferentemente dos casos já estudados no item anterior dessa análise.

Outro ponto importante a ser tratado aqui é a organização hierárquica das simulações aqui apresentadas. As redes definidas a partir de sistemas reais são compostas por comunidades, que são formadas por comunidades menores e daí por diante.

A análise a seguir terá como objetivo definir comunidades existentes nos resultados das simulações e identificar que tipos de redes são combinadas para a definição dos diferentes grupos.

4.4.1 CONGLOMERADOS ESPACIAIS

Conglomerados espaciais são subconjuntos disjuntos de uma ou mais áreas tal que cada uma das áreas que compõem determinado conglomerado seja vizinha de outra área pertencente ao mesmo conglomerado.

Na análise de conglomerados espaciais, se pode ter duas medidas de distância entre quaisquer dois pares de áreas: uma baseada nas suas posições no espaço geográfico, e outra baseada no espaço das variáveis.

A medida de distância no espaço das variáveis também é chamada de dissimilaridade entre as áreas. É comum tomar a distância euclidiana entre o vetor perfil de duas áreas como a medida de dissimilaridade entre elas. É importante que as variáveis estejam padronizadas de alguma forma antes de calcular essa distância, pois, caso contrário, as variáveis com maior variância vão tender a dominar o valor da dissimilaridade.

O método da Árvore Geradora Mínima foi adotado para particionar áreas em conglomerados espaciais. Este método consiste em reduzir o mapa das áreas a um grafo onde cada nó representa uma área e áreas vizinhas são ligadas por uma aresta. Duas áreas são consideradas vizinhas quando existe uma fronteira comum entre elas.

Uma árvore é um grafo conexo que não contém circuitos. Uma árvore geradora para um grafo G é um subgrafo que é uma árvore e que contém todos os nós de G . Assim, em uma árvore, quaisquer dois nós são unidos por um único caminho. Além disso, o número de arestas é igual a 1 mais o número de nós. Isso implica que, se qualquer aresta é apagada, a árvore estará desmembrada em duas subárvores desconectadas. O custo de um grafo é a soma dos custos das arestas do grafo. Uma árvore geradora mínima é uma árvore geradora que possui custo mínimo.

Após a criação da árvore geradora mínima, passa-se a particioná-la para obter os conglomerados espaciais. O problema combinatório de formação dos conglomerados espaciais está agora bastante reduzido, pois basta verificar as n arestas da árvore e apagar uma delas para ter a árvore separada em dois subgrafos desconectados. Iterando este procedimento que apaga arestas em cada subgrafo resultante, os conglomerados vão sendo criados de forma hierárquica.

O software produz também um gráfico da queda dos desvios versus o número de conglomerados para auxiliar na escolha do número de conglomerados a partir da estabilidade do gráfico.

4.4.2 SANTA CRUZ DO SUL

Assim como a cidade de Santa Cruz do Sul serviu como base para a análise feita a partir de estatística espacial univariada, coloca-se agora a possibilidade de estudar a mesma distribuição de atividades através de uma análise multivariada, levando em consideração todas suas atividades ao mesmo tempo.

Dessa forma, a quantidade de atividades em cada célula e sua posição relativa dentro do sistema serviu como base para a criação de um grafo que foi particionado formando 10 grupos gerados por essa análise.

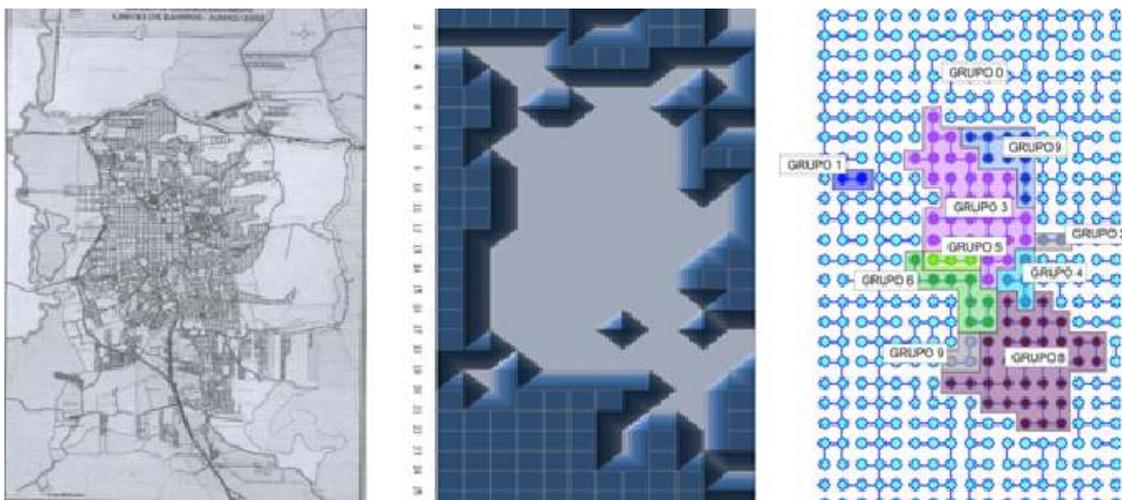


Figura 40. Imagem original Santa Cruz do Sul, Células e Grafo gerado para a análise

Acima se vê a disposição dos 10 grupos gerados pelo software Skater⁴⁴ (Assunção, Lage E Reis, 2003) sendo que o grupo zero abriga todas as células vazias e algumas da periferias e o grupo 3 que é formado pela área central de Santa Cruz do Sul, onde a ocupação da cidade teve início.

O gráfico com a concentração de cada atividade do Grupo zero da cidade de Santa Cruz do Sul é aqui ampliado com o intuito de informar qual atividade está localizada em cada ponta do pentágono formado pelas atividades analisadas. Essa disposição permanece também para as simulações que serão apresentadas.

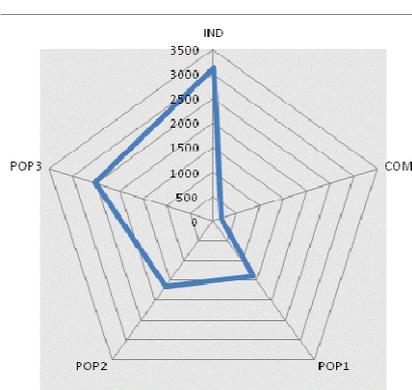


Gráfico 69. Gráfico Radar Simulação 1_ Grupo Zero

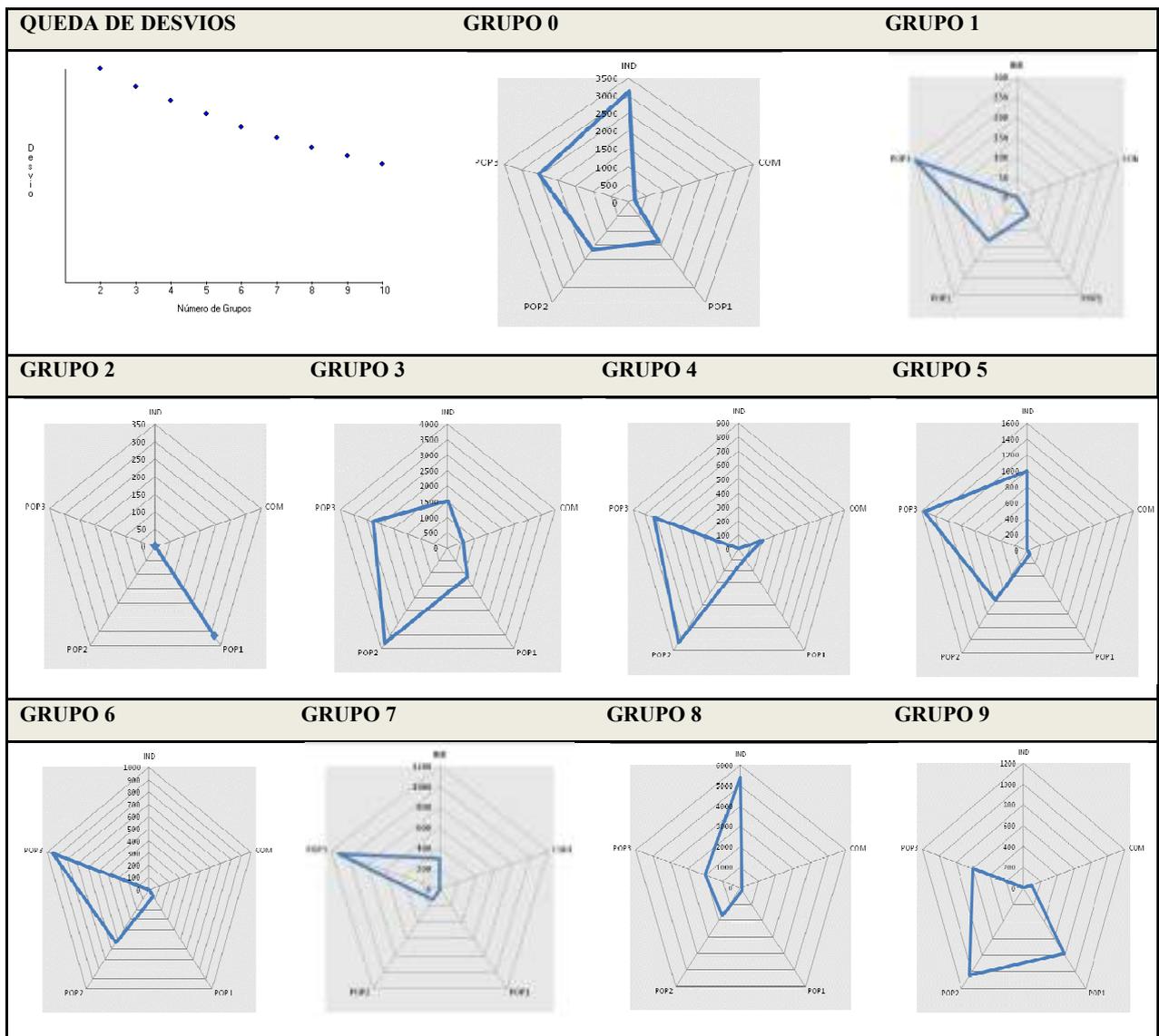
A análise foi capaz de detectar áreas diferenciadas como o caso do grupo 1 que se localiza em área de várzea e sofre com enchentes recursivamente. Nesse grupo a População 3 aparece com maior densidade, confirmando os dados históricos do local. O grupo 2, por sua vez, aparece aqui formado apenas pela População 1 em área que hoje, apresenta crescimento urbano acelerado. Esse direcionamento confirma a especialização da área nessa atividade e o comportamento segregador da ocupação urbana.

Os Grupos 5 e 6 são identificados na área que inicialmente foi ocupada em virtude da grande migração da população rural e de outras cidades para Sta. Cruz do Sul como resultado do crescimento industrial.

⁴⁴ Spatial Kluster Analysis by Tree Edge Removal, versão 1.0a

No Jornal Gazeta de Sta. Cruz o artigo publicado em 24 de Junho de 1952 já considerava o bairro Camboim, hoje bairro Bom Jesus como “A Vergonha de Uma Cidade” se referindo à criação das vilas pobres na parte sul da cidade. A segregação permanece até os dias atuais como se pode ver pela alta concentração da População 3, População2 e da Indústria no local. A especialização aparece também no Grupo 8, localizado sobre o Distrito Industrial de Santa Cruz do Sul e uma das principais vias de escoamento de produtos industriais da cidade.

Tabela .9. Grupos formados Simulação 1 – Gráfico tipo Radar - 500 iterações



O grupo 9 abriga as Populações 1, 2 e 3 sendo um dos mais heterogêneos. A especialização surge naturalmente a partir da estrutura existente, a interação entre as atividades e as preferências e necessidades das atividades.

4.4.3 SIMULAÇÃO 1

Como já dito, a formação de grupos pode servir de indicação para as linhas de crescimento dos sistemas, demonstrando o que se chamará tendência de estado. Com essa ideia em mente pode-se verificar quais sistemas seguiram evoluindo de forma prevista e quais estruturas acabaram por emergir de forma inesperada. O Sistema 1 é apresentado agora através da formação de seus grupos mais significativos.

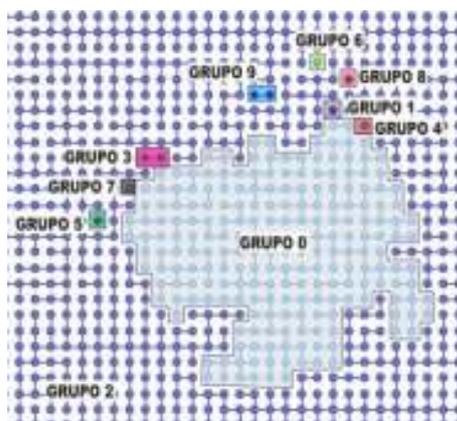
Assim como no gráfico tipo radar apresentado no grupo 0 da cidade de Santa Cruz do Sul, cada atividade está localizada em cada ponta do pentágono desenvolvido para cada grupo.

4.4.3.1 500 ITERAÇÕES

O caráter centralizador da Simulação 1 ainda permanece com 500 iterações e são identificados dois grupos maiores:

- Grupo 0: formado por quase a totalidade da área ocupada o que implica em uma grande homogeneidade na ocupação do núcleo inicial e seu entorno.
- Grupo 2: formado, em sua maioria, pelas áreas desocupadas do sistema.

Dessa forma se configura uma ocupação sobre o núcleo inicial com “ilhas” formando grupos menores e mais especializados, tendo predominância da atividade Industrial em seis dos grupos formados mais na periferia do sistema.

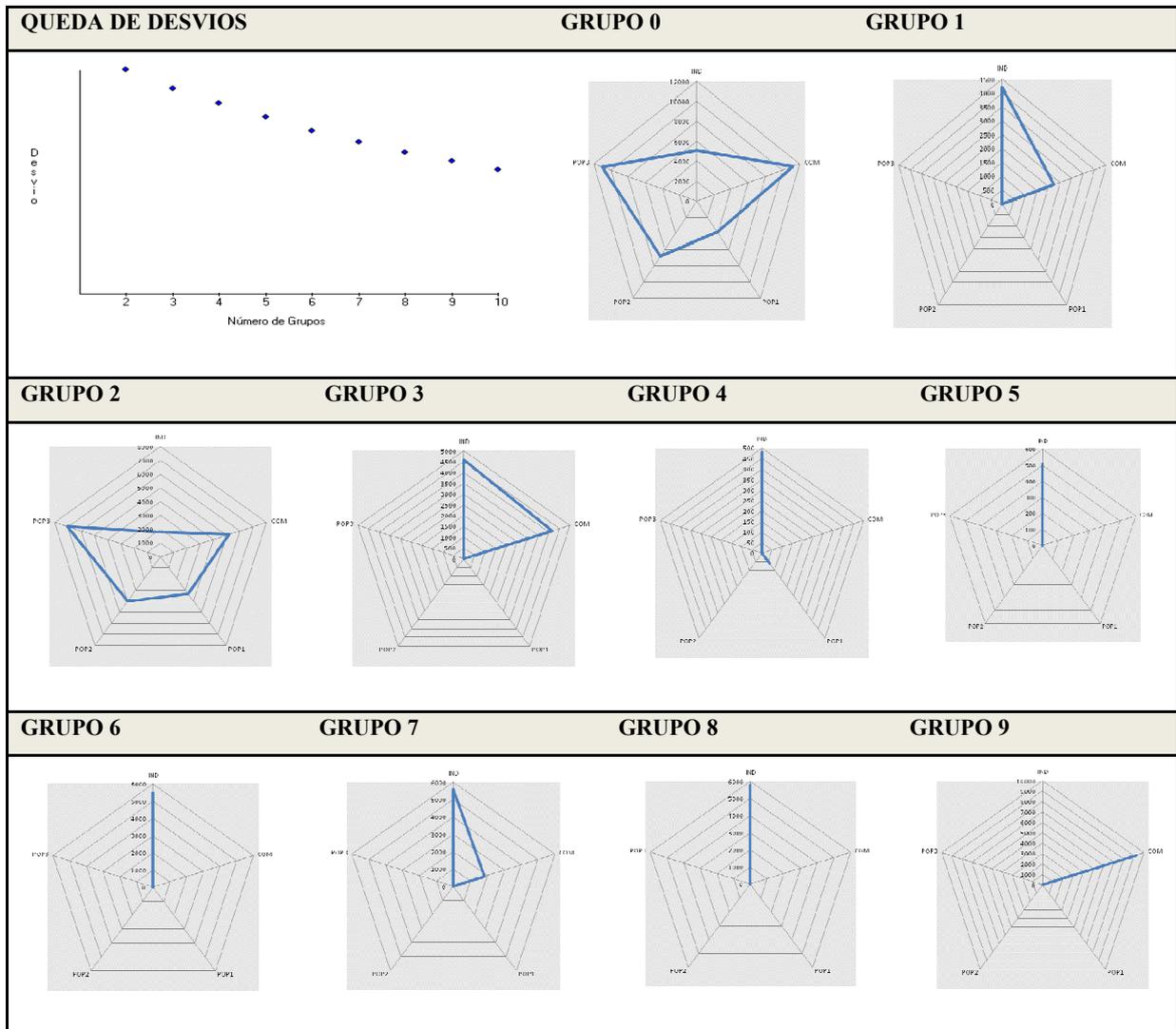


Grafo 29. Delimitação dos Grupos - Simulação 1 – 500 iterações

A geração de atratividade negativa para essa atividade define sua expulsão das áreas mais centrais e também a forma como ela vai se agrupar ou não com as demais atividades. Os

gráficos tipo radar com valores provenientes de cada grupo aqui definido demonstra a diferenciação das atividades relacionadas em cada um.

Tabela .10. Grupos formados Simulação 1 – Gráfico tipo Radar - 500 iterações



O grupo 0 e o 2 trazem em si a distribuição mais equilibrada entre as diferentes atividades. No entanto, é preciso ressaltar que o grupo 2 tem uma porcentagem de ocupação muito pequena com a maioria de suas células desocupadas.

4.4.3.2 700 ITERAÇÕES

Para 700 iterações a definição dos grupos versus a queda dos desvios padrão acabou gerando 15 grupos. Novamente se forma um grupo maior sobre a área do núcleo inicial e arredores definido pelo grupo 4, com distribuição equilibrada entre as cinco atividades.

Pode se observar que a inclinação mostrada pelo sistema com 500 iterações se confirma na forma de sua configuração com 700 iterações. A organização de grupos com predominância de uma ou duas atividades permanece em função da maior concentração de atividades que surge próxima ao limite superior do sistema. Em função do crescimento do sistema essas atividades passam a ter mais impactos umas em relação às outras formando grupos diferenciados.

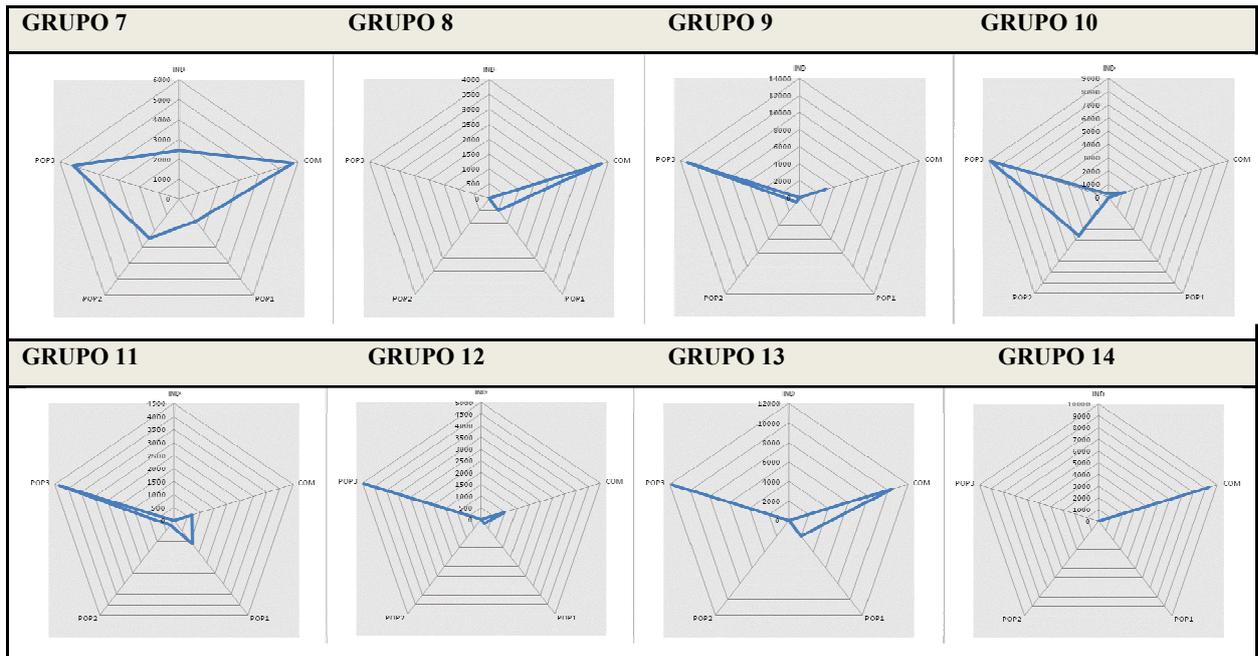


Grafo 30. Delimitação dos Grupos - Simulação 1 – 700 iterações

O grupo 0 é formado em quase sua totalidade pelas células vazias mas, assim como o grupo 4, tem uma quantidade pequena de atividade industrial e a preponderância das atividades residenciais e comercial.

Tabela .11. Grupos formados Simulação 1 – Gráfico tipo Radar - 700 iterações

| QUEDA DE DESVIOS | GRUPO 0 | GRUPO 1 | GRUPO 2 |
|------------------|---------|---------|---------|
| | | | |
| GRUPO 3 | GRUPO 4 | GRUPO 5 | GRUPO 6 |
| | | | |



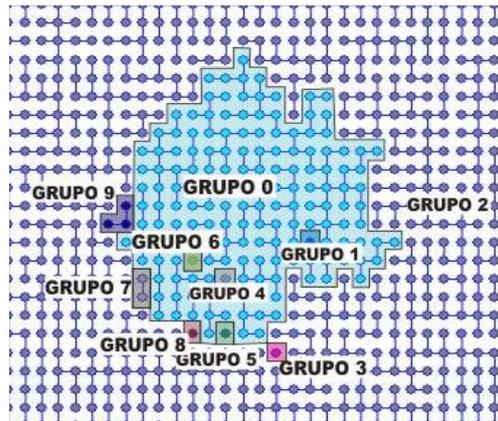
Os grupos 5 e 13 possuem grande concentração de população 3, mas se diferenciam nas quantidades de Indústria e comércio. A população 3 também predomina nos grupos 10 até 13. A população 1 se combina principalmente com a atividade comercial e suas maiores concentrações estão no grupo 4, ou seja, no núcleo inicial e entorno.

4.4.4 SIMULAÇÃO 2

Como já dito, essa simulação apresenta um comportamento diferenciado em relação às demais atividades, pois, a partir de uma organização razoavelmente comum, surge um sistema configurado de forma completamente diferente dos demais.

4.4.4.1 600 ITERAÇÕES

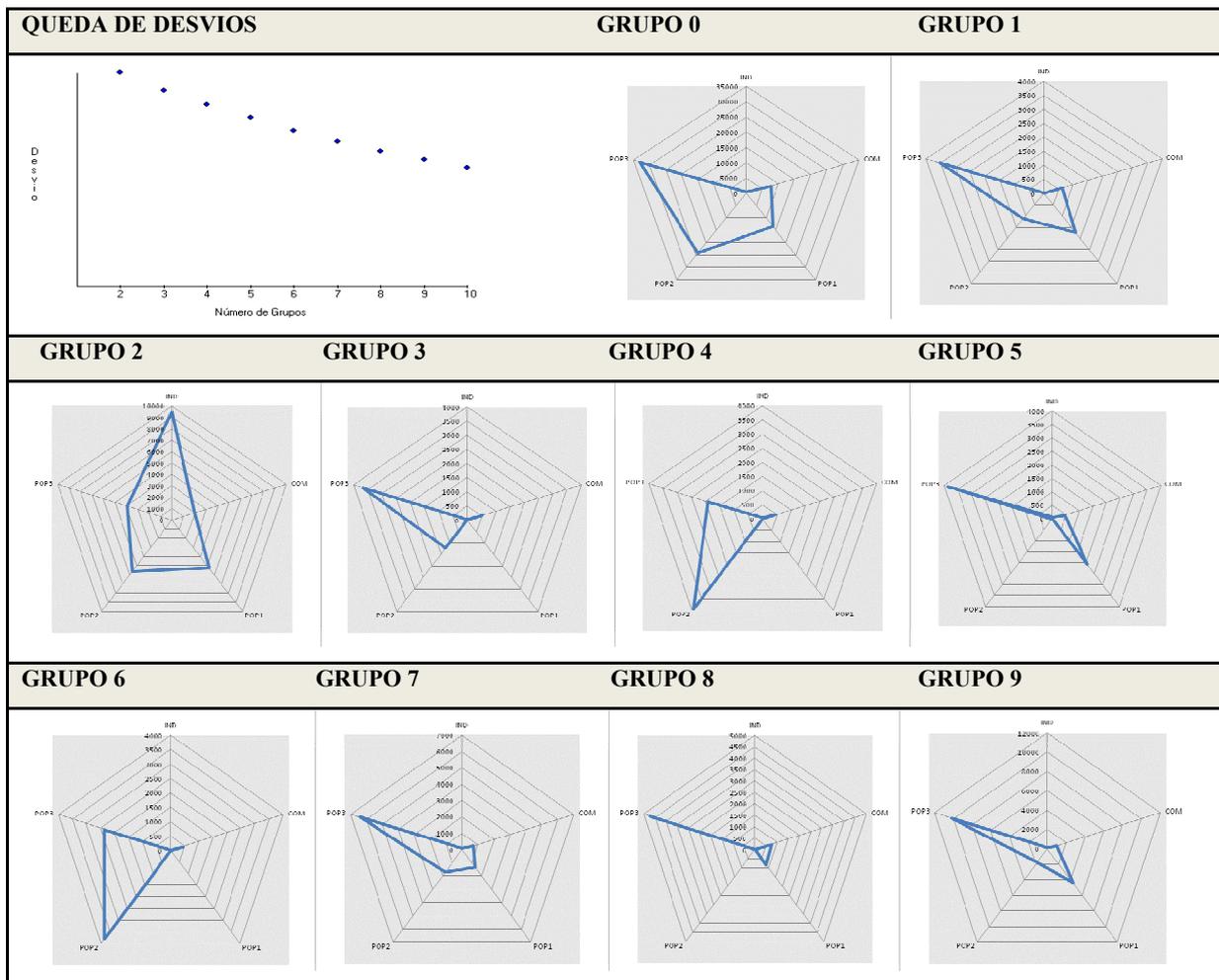
Com 600 iterações a estrutura da Simulação 2 ainda apresenta um núcleo estruturador com pequenas diferenciações formada por grupos menores. A Indústria, na metodologia aqui utilizada, faz parte do grupo 2 que, além de ser o maior, é formado por muitos pontos desocupados. As principais combinações são entre as populações 2 e 3 como é o caso dos grupos 3, 4, 6 e 7.



Grafo 31. Delimitação dos Grupos - Simulação 2 – 600 iterações

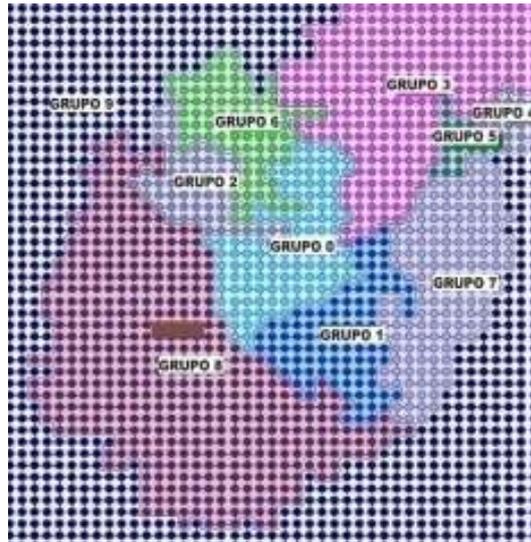
Nessa altura da evolução do sistema existem grupos definidos praticamente pela População 2.

Tabela .12. Grupos formados Simulação 2 – Gráfico tipo Radar - 600 iterações



4.4.4.2 700 ITERAÇÕES

Assim como visto nas análises anteriores, a Simulação 2 acaba por evoluir para uma estrutura bastante diferenciada em relação às demais. A maior diferença se dá pela formação de uma faixa central (grupos 0 e 3) fortemente conectada e ocupada quase em sua totalidade pela População 2.

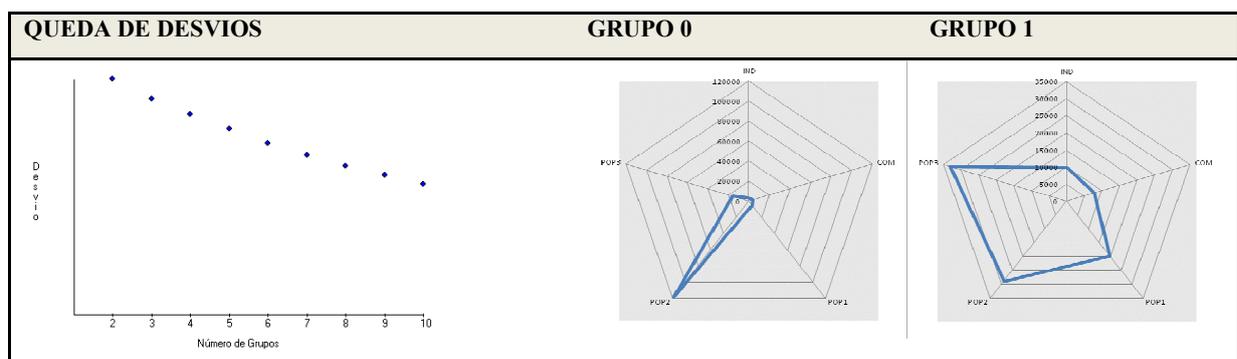


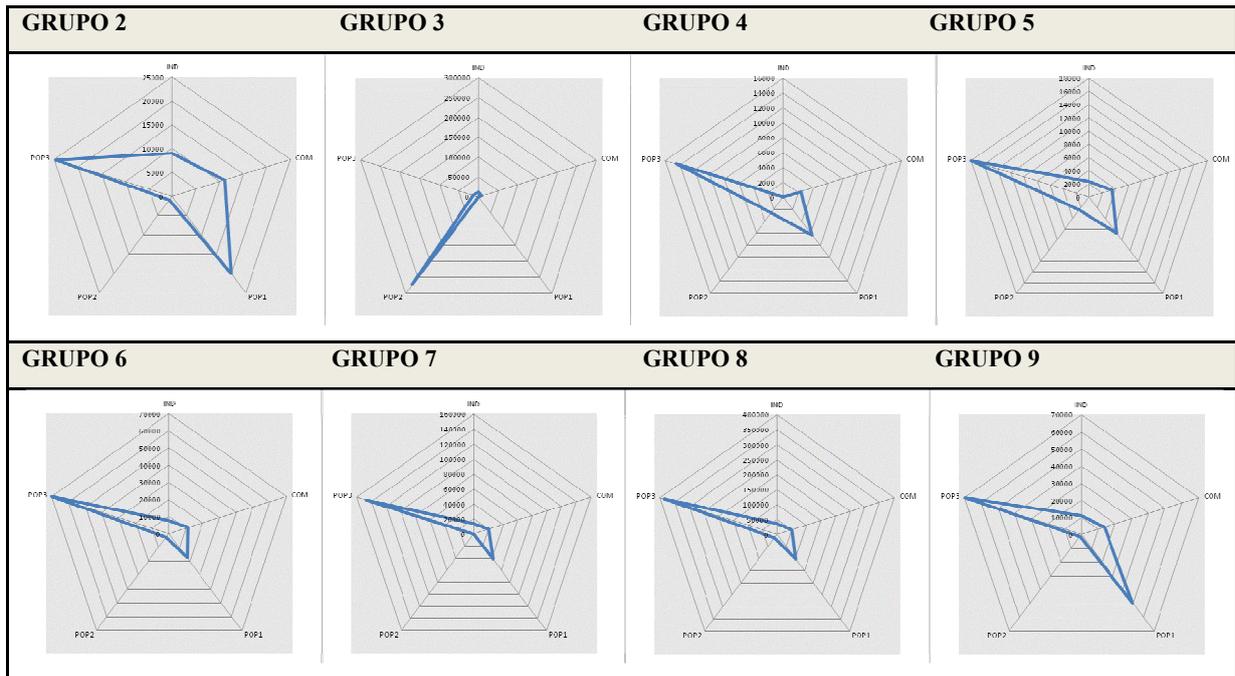
Grafo 32. Delimitação dos Grupos - Simulação 2 – 700 iterações

Também se verifica que o resultado da análise de agrupamento confirma a existência de dois grupos (0 e 3) definidos dentro dessa mesma faixa central como nos mostrou a Medida de Centralidade Betweenness para essa mesma etapa das iterações do sistema.

A distribuição das Populações 1, 2 e 3 no grupo 1 é mais equilibrada juntamente com menores valores das atividades comercial e industrial. Para os grupos 5, 6, 7, 8 e 9, a maioria é a população 3 tendo somente uma combinação mais igualitária com a população 1 no grupo 9.

Tabela .13. Grupos formados Simulação 2 – Gráfico tipo Radar - 700 iterações





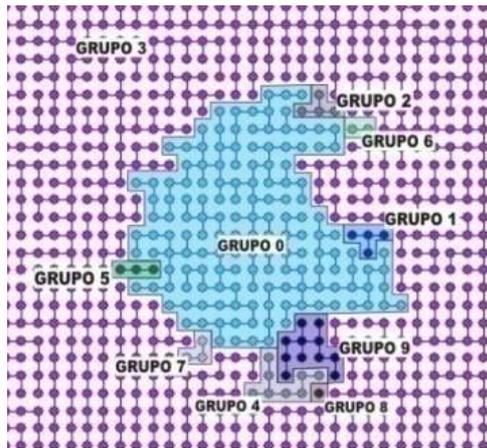
Os grupos 3 e 0, apesar da grande área ocupada, são formados praticamente pela População Residencial 2. O grupo 2, que tem vizinhança com o grupo 0 possui grande concentração das Populações 1 e 3. Isso também ocorre com o grupo 9. Mesmo considerando que o grupo 9 traz a maioria de suas células vazias, esse desequilíbrio se torna importante diferenciando essas áreas da grande agrupamento da População 2.

4.4.5 SIMULAÇÃO 3

Como já dito anteriormente, a simulação 3 tem como característica a “formação de áreas positivas” junto à atividade comercial e menor consumo de espaço, como definido em sua equações de evolução. Essa característica se torna evidente na formação de grupos com grande concentração da População 1 na área central do Sistema. Essa mudança nas regras de alocação das atividades traz para a População 1 um comportamento semelhante, mas menos determinístico, ao da População 2 na Simulação anterior.

4.4.5.1 600 ITERAÇÕES

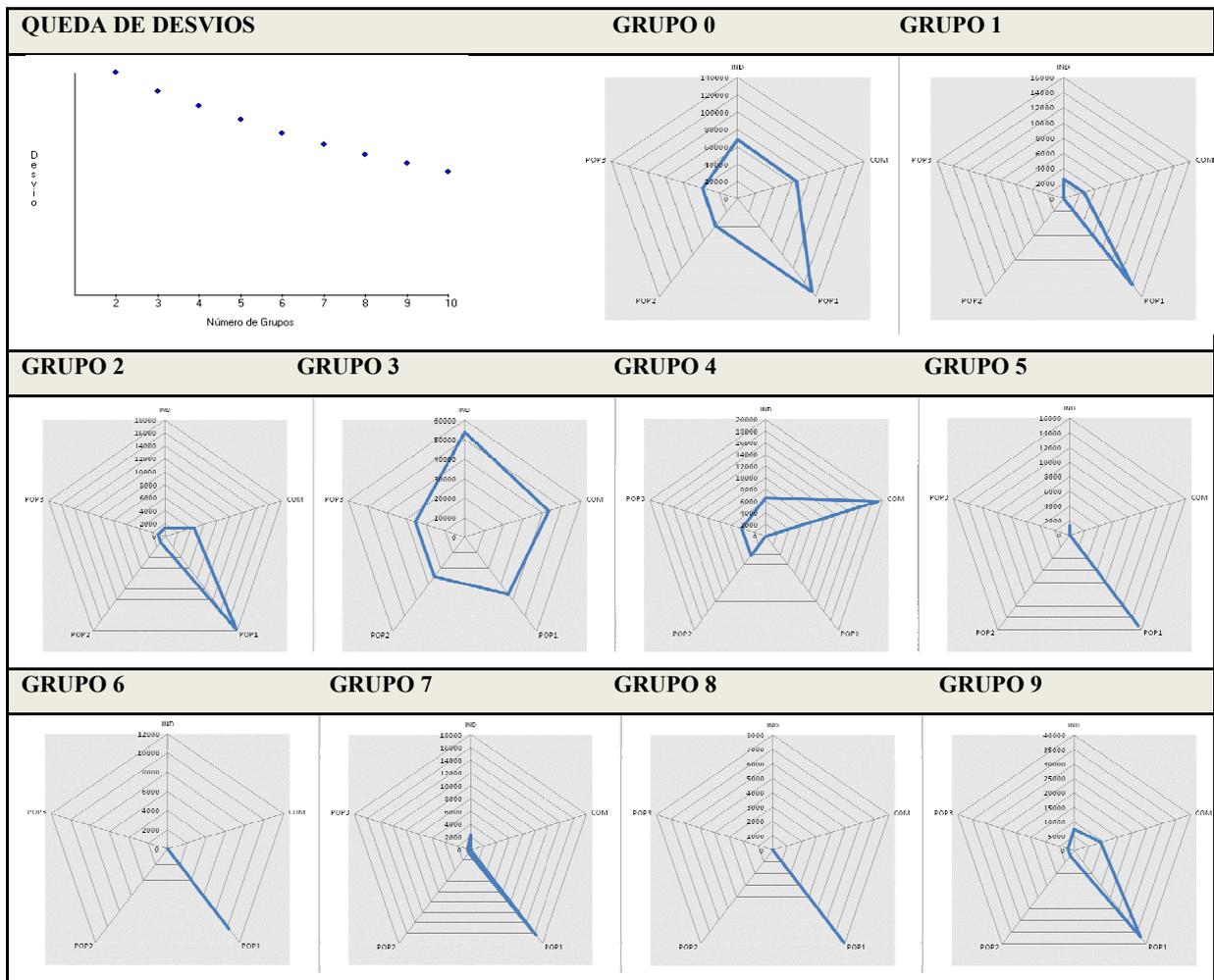
O Sistema 3 é formado por um núcleo central, formado por diversas atividades e por alguns pontos especializados com concentração de uma ou outra atividade.



Grafo 33. Delimitação dos Grupos - Simulação 3 – 600 iterações

Os grupos 0 e 3 são os únicos que apresentam-se com quantidades similares das 5 atividades consideradas na simulação. Logicamente o impacto do grupo 3 é muito menor dentro da organização do Sistema 3 por ser esse formado por apenas um ponto.

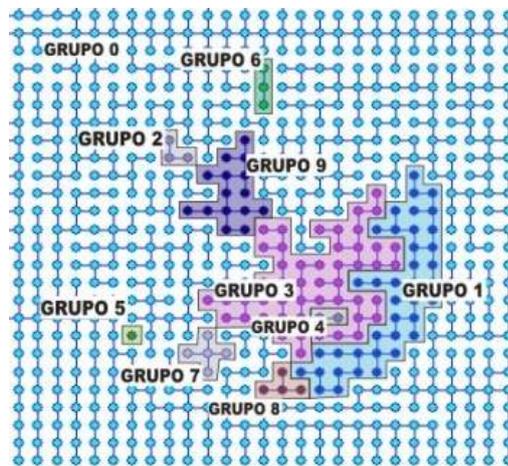
Tabela .14. Grupos formados Simulação 3 – Gráfico tipo Radar - 600 iterações



Os grupos 5, 6, 7 e 8 são praticamente formados somente pela população 1 tendo somente nos grupos 1, 2 e 9 a combinação com a atividade comercial. Pelos grupos formados vemos que a diferenciação na distribuição espacial do Sistema 3 ocorre onde a concentração da População 1 é maior, formando até mesmo áreas individuais.

4.4.5.2 800 ITERAÇÕES

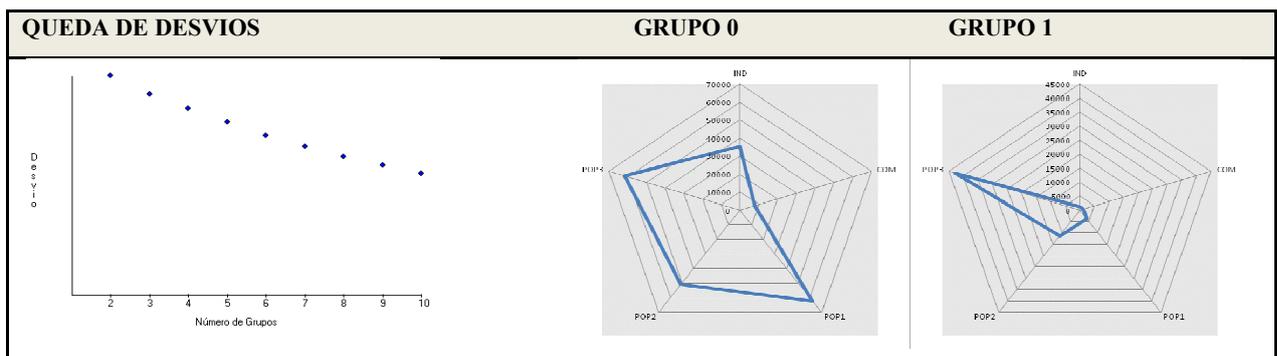
O grupo 0, assim como possui a distribuição mais igualitária entre as 5 atividades. A diferença na Simulação 3 reside na formação do grupo 9 sobre o núcleo de ocupação inicial do sistema. Desta forma é formado um “foco” onde a População 3 tem a predominância.

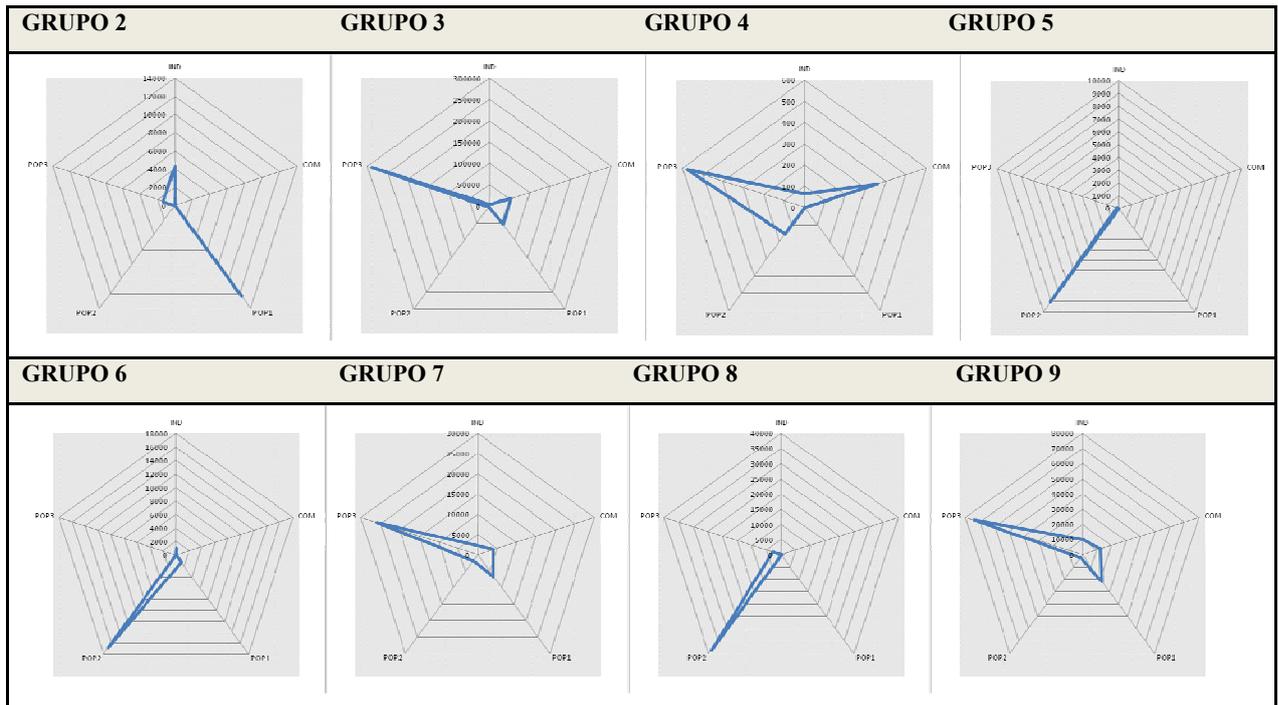


Grafo 34. Delimitação dos Grupos - Simulação 3 – 500 iterações

Essa particularidade tem reflexos também na análise de agrupamentos já mostrada no item 1 desse capítulo. Somente essa simulação tem a População 3 em uma posição centralizada sobre o núcleo inicial de ocupação que aqui aparece como propriedade emergente do Sistema 3.

Tabela .15. Grupos formados Simulação 3 – Gráfico tipo Radar - 800 iterações





Outra distinção dessa simulação é o surgimento de áreas bem definidas para as 3 Populações Residenciais. Pode-se notar, pela variação das quantidades em cada grupo, que cada área possui uma concentração de população residente bem diferenciada como nos casos dos grupos 2, 3, 5, 6, 7 e 8.

4.4.6 SIMULAÇÃO 4

A Simulação 4 também evolui a partir de um sistema centralizado para outro com formação de uma “borda” que combina em si vários grupos e alta densidade.

4.4.6.1 600 ITERAÇÕES

Após 600 iterações tem-se a característica de possuir grupos bem definidos e heterogêneos entre si, com concentração bem marcada de apenas uma atividade em cada um.

Novamente o grupo 0 e 4 apresentam a distribuição de valores de cada atividade de forma equilibrada. O grupo 7 que se localiza no interior do grupo 4 tem distribuição diferenciada destes outros pela concentração de População 3 e Indústria.

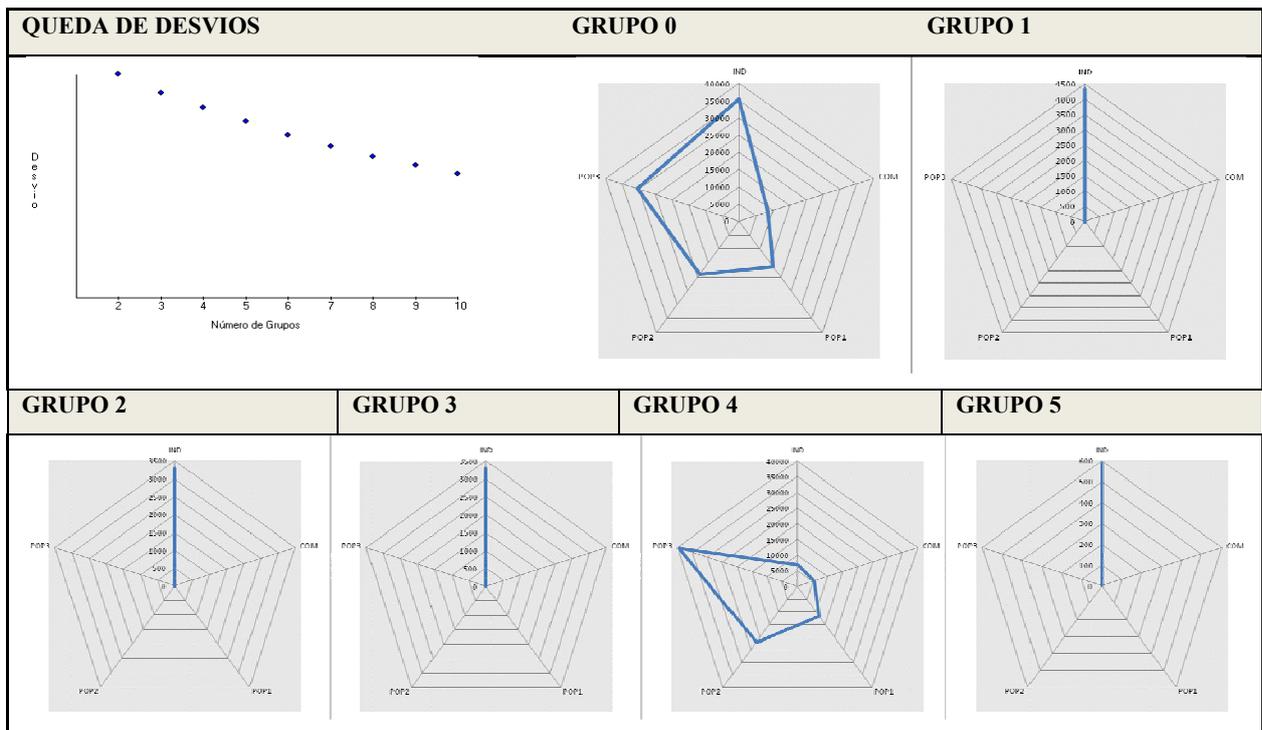


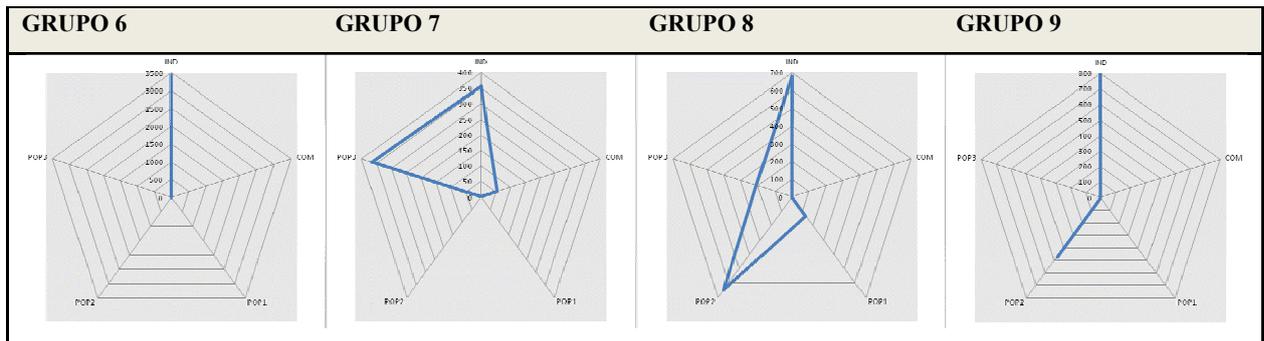
Grafo 35. Delimitação dos Grupos - Simulação 4 – 600 iterações

Os grupos 1, 2, 3, 5 e 6 possuem maiores concentrações da atividade Industrial em células separadas do centro. Essa formação indica a expulsão dessa atividade na região central.

Os grupos desconectados do conjunto de vértices principal acabam por alterar o valor de acessibilidade, induzindo o crescimento em sua direção e a formação de uma “borda de desenvolvimento”.

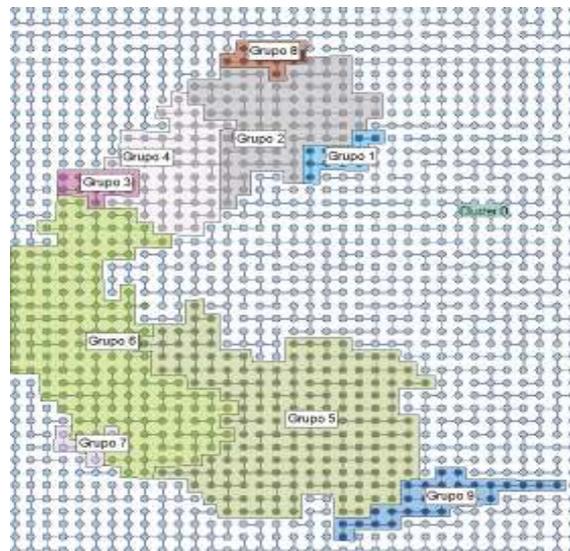
Tabela .16. Grupos formados Simulação 3 – Gráfico tipo Radar - 600 iterações





4.4.6.2 700 ITERAÇÕES

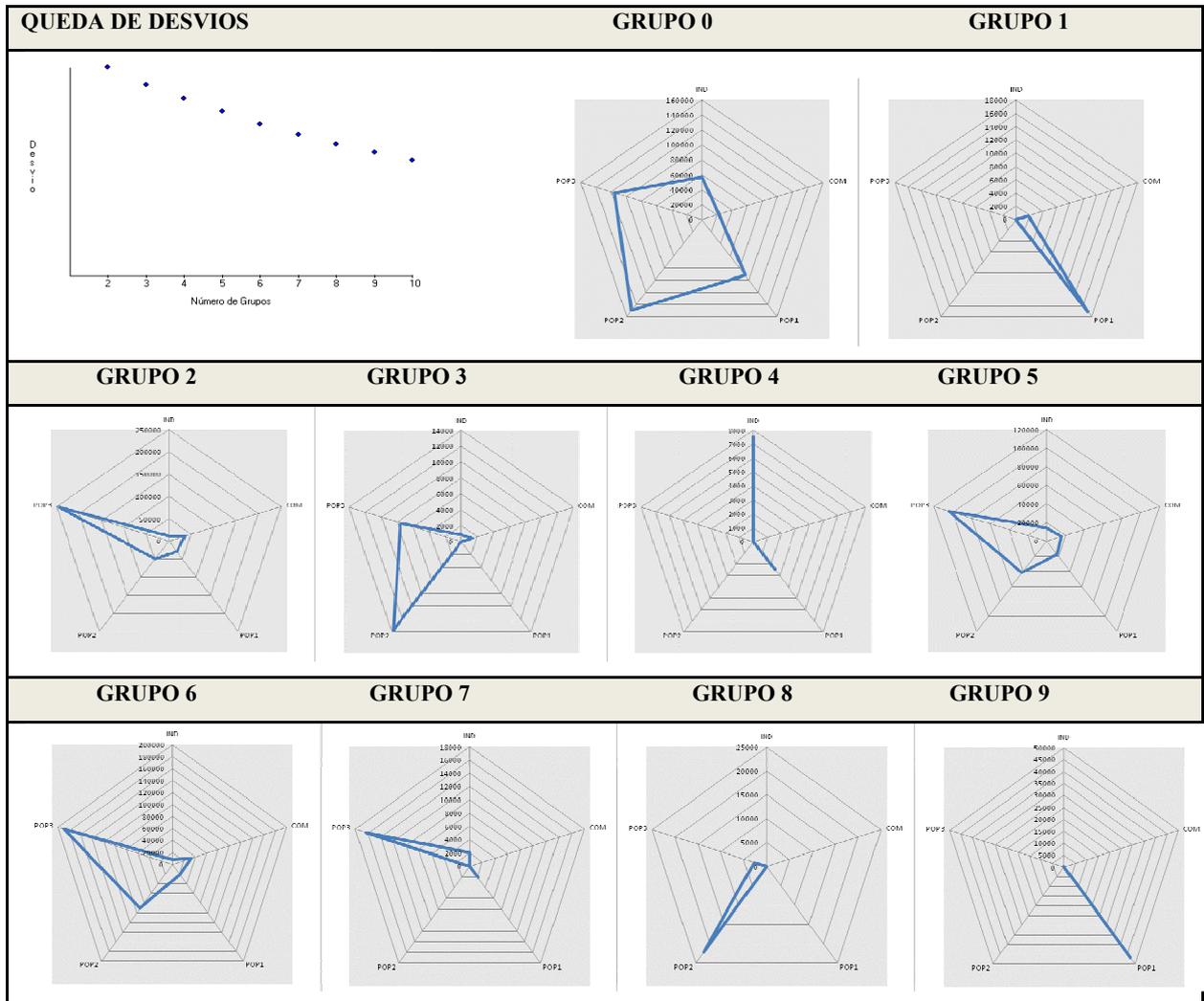
Com 700 iterações o Sistema 4 apresenta a delimitação de uma “borda” com as maiores densidades, Assim como foi definido com 600 iterações, os grupos tem a predominância de uma ou duas atividades em cada um.



Grafo 36. Delimitação dos Grupos - Simulação 4 – 700 iterações

Aqui se torna clara a propensão de ocupação de áreas diferenciadas para cada atividade formando os grupos mais significativos. O núcleo inicial desaparece nessa análise sendo mesclado ao grupo 0 que é o maior, tendo em si também toda a área desocupada do sistema.

Tabela .17. Grupos formados Simulação 4 – Gráfico tipo Radar - 700 iterações



4.4.7 ANÁLISE

A organização das relações sociais torna-se, assim, um conceito básico na análise das propriedades estruturais das redes, no interior das quais os atores individuais estão situados, e na detecção de fenômenos sociais que não existem no nível do ator individual. Em resumo, a cidade e a rede de cidades constituem organizações (temporal e historicamente) ‘provisórias’ das redes de coordenação social e é com elas que a geografia urbana trabalha, não com as redes sociais propriamente ditas.

Uma propriedade que permeia todas as simulações aqui analisadas é a formação de um núcleo inicial e entorno com valores distribuídos para as 5 atividades analisadas. Da mesma forma os grupos formados, em sua predominância, por células vazias tem valores parecidos.

Os núcleos diferenciados mais distantes do núcleo inicial serviram como direcionamento do crescimento posterior em função da modificação de potencial de atratividade ao se concentrarem ali e também pela modificação dos valores de acessibilidade.

Outro ponto importante a se destacar é a formação de grupos heterogêneos entre si a partir das condições iniciais de cada sistema simulado onde os valores de acessibilidade eram o principal elemento polarizador colocando em igualdade todas as atividades.

A seguir será apresentada a avaliação dos sistemas gerados tendo como ponto de referência três cidades reais: Curitiba, Porto Alegre e Santa Cruz do Sul. O estudo será feito a partir da forma de cada um levando-se em conta a Dimensão Fractal.

4.5 GEOMETRIA FRACTAL

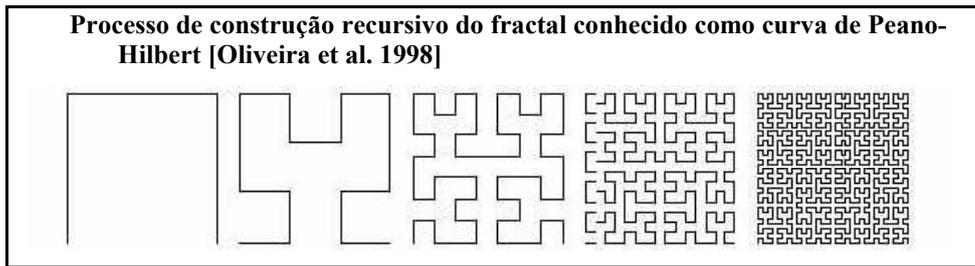
Benoit Mandelbrot introduziu o termo Fractal em 1975 para denominar uma classe especial de curvas definidas recursivamente que produziam imagens reais e surreais. Uma estrutura geométrica ou física tendo uma forma irregular ou fragmentada em todas as escalas de medição.

A geometria fractal estuda subconjuntos complexos. Na geometria de fractais determinísticos, os objetos estudados são subconjuntos gerados por transformações geométricas simples do próprio objeto nele mesmo, ou seja, o objeto é composto por partes reduzidas dele próprio (Mandelbrot 1977).

Ao contrário das formas euclidianas que têm poucas dimensões características, como lado ou raio e podem ser reduzidos ou variados por escala, as formas fractais não têm dimensões características, independem de escalas e são sempre auto-semelhantes (Mandelbrot 1977). Falconer (1990):

Tabela .18. Lista de atributos para objetos fractais:

| CONSIDERANDO F COMO OBJETO FRACTAL |
|---|
| F é auto-similar, ou seja, o intervalo entre $[0, \frac{1}{2}]$ deve ser igual ao intervalo $[\frac{1}{2}, 1]$ |
| F é muito irregular para ser descrito em geometria tradicional |
| F possui dimensão fractal normalmente superior a dimensão euclidiana |
| F pode ser obtido por procedimento recursivo |
| F não varia de acordo com a escala utilizada. |



4.5.1 DIMENSÃO FRACTAL

Muitos fenômenos e formas encontradas na natureza não podem ser explicados nos moldes da matemática convencional, sendo para isso necessário uma matemática especial que os explique e caracterize. Uma forma de se conseguir esse resultado é a utilização da Matemática dos Fractais.

Atualmente a Geometria Fractal, e em especial a Dimensão Fractal, vem sendo utilizada em diversas áreas de estudo de sistemas caóticos como: padrão de formações de nuvens; caracterização de objetos; análise e reconhecimento de padrões em imagens; análise de texturas e medição de comprimento de curvas.

Para os fractais, ao contrário, do que ocorre com os objetos euclidianos “perfeitos”, cada objeto tem sua dimensão própria. As curvas irregulares têm dimensão que varia entre um e dois, de modo que uma superfície irregular tem dimensão entre dois e três.

Das características que definem um fractal, a mais importante é a “Dimensão Fractal”. Ao contrário do que é observado na Geometria Euclidiana, onde o valor da dimensão representa a dimensionalidade do espaço em que dado objeto está inserido, a dimensão fractal representa seu nível de irregularidade.

A dimensão de um fractal indica o espaço ocupado por ele que está relacionado com o seu grau de aspereza, irregularidade (igual em diferentes escalas) ou fragmentação. Daí o fato de os fractais possuírem dimensão fracionária e não inteira, por não serem figuras Euclidianas perfeitas.

4.5.1.1 FRACTAIS: MODELOS CLÁSSICOS

A mais básica propriedade de um fractal é ser um objeto que pode ser avaliado em diversas escalas ou, como é chamado na literatura, multi-escalar. Este resultado é produto direto do procedimento utilizado para construir um fractal teórico baseado na repetição da mesma operação, definida pelo gerador, em escalas menores. Ao mesmo tempo, a borda deste objeto geométrico se torna mais complexa pela inclusão de um número cada vez maior rugosidade.

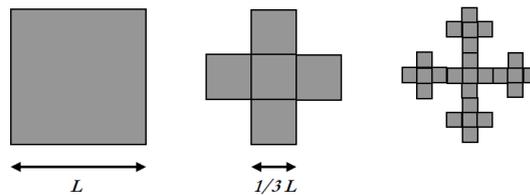


Figura 41. Geração de um Tapete de Sierpinski: em cada passo, cada quadrado é substituído por $N=5$ quadrados com comprimento reduzido pelo fator $r = 1/3$ ⁴⁵

Neste exemplo a estrutura geométrica permanece confinada à área inicial por todas as iterações. O mesmo tipo de objeto geométrico pode ser também construído pela adição de quadrados de acordo com uma regra de geração que cria um objeto cada vez mais complexo.

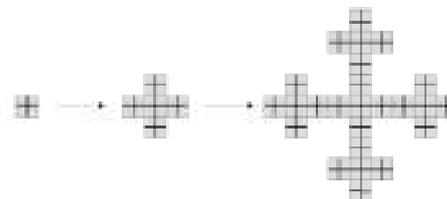


Figura 42. Geração de um fractal pela adição de elementos que pode ser relacionado a uma rede viária.⁴⁴

Segundo Frankhauser (2004) este exemplo pode ser relacionado a casos de urbanização onde, a partir de um núcleo inicial, áreas são adicionadas ao longo de 4 saídas da cidade. No próximo estágio as adições continuam ao longo das vias principais, mas também ao longo de linhas secundárias fazendo surgir uma rede viária hierarquizada.

⁴⁵ DE KEERSMAECKER, M. FRANKHAUSER, P. THOMAS (2003)

Por outro lado, as figuras a seguir podem ser relacionadas a áreas metropolitanas formadas por agrupamentos de tamanho variados desconectados distribuídos de maneira desigual sobre o espaço. Novamente a estrutura dos fractais se torna mais e mais complexa a cada iteração.

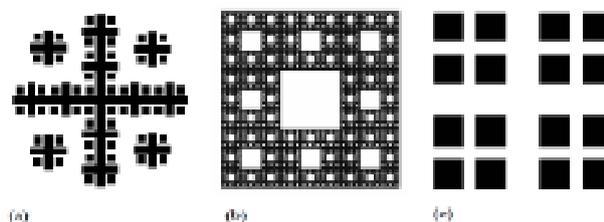


Figura 43. Um Tapete Sierpinski consistente de uma série de clusters (a), um compacto com hierarquia de espaços abertos (b) e um tipo Poeira de Fournier que remete uma rede viária intra-urbana (c).⁴³

Tanto os fractais regulares como os irregulares parecem oferecer uma base interessante para a avaliação de assentamentos urbanos e como ilustrações de medidas utilizadas para descrever padrões. Com esse objetivo são considerados os espaços construídos da cidade como os elementos constitutivos da “massa” de uma estrutura fractal.

A dimensão fractal de uma superfície negra uniforme será igual a 2, uma linha reta é igual a 1 e um ponto isolado é zero. Para estruturas fractais os valores ficam usualmente entre 1 e 2. A dimensão mede o grau de concentração dos espaços ocupados através de diferentes escalas, ou, mais precisamente, o decaimento relativo na massa em qualquer distância do ponto onde a massa é concentrada.

Quanto mais a massa é distribuída de maneira uniforme, mais próximo de 2 é seu valor de dimensão fractal, quanto mais concentrada em um ponto, o valor de dimensão fractal é próximo de zero. Figuras regulares tem valor da dimensão fractal igual a 1.

Estruturas como padrões de ocupação urbanos não são construídas de acordo com iterações como as figuras aqui apresentadas. Em função disso Frankhauser (2004) sugere diferentes métodos para a verificação do quanto um padrão observado é estruturado de acordo com a lógica fractal.

Estes métodos imitam a lógica de iteração medindo a distribuição dos espaços ocupados ou do comprimento da fronteira através de múltiplas escalas. Este tipo de análise foi utilizado para a avaliação diferentes tipos de padrões de ocupação, especialmente aqueles considerados “amorfo” com fronteiras suaves ou, como dito pelo autor “dendríticas”.

4.5.2 DIMENSÃO FRACTAL E ANÁLISE MORFOLÓGICA URBANA

Para a reflexão sobre as diferentes formas de crescimento é conveniente manter-se uma preocupação com a forma destes padrões e com maneiras de representação e comparação de sua morfologia.

Em muitos casos as áreas urbanas são formadas por várias partes de diferentes tamanhos distribuídos espacialmente de maneira não homogênea ao longo de vales, linhas de transporte e áreas menos acessíveis que são ocupadas de maneira esparsa.

Essas situações levam os urbanistas a procurar maneiras para a descrição da morfologia urbana e nesse contexto se inclui o uso da geometria fractal. Esta abordagem possibilita a construção de modelos de referência e a comparação com exemplos reais. Os exemplos de aplicação da geometria fractal para a análise de sistemas urbanos vão desde os utilizados para ilustrar diferentes padrões de organização espacial até o estudo de fragmentação de uso do solo ou morfologias complexas.

Desde os anos 80 a geometria fractal tem sido utilizada para a avaliação de padrões urbanos, em particular o de Batty e Longley (1991) assim como o de Frankhauser (1998, 1997).

As aplicações da geometria fractal têm sido diversificadas na área de pesquisa urbana. Tanto as bordas externas quanto limites de uso do solo intra-urbanos servem de base de medição e classificação de sistemas urbanos através de sua forma. Para Feng e Chen (2010), a dimensão fractal foi utilizada para analisar as características de evolução da forma e da estrutura de uso do solo em Hangzhou, China. Neste trabalho os autores consideraram que as propriedades fractais de um sistema urbano tendem a ficar mais definidas ao longo do tempo. Outra abordagem intra-urbana foi elaborada por Keersmaecker, Frankhauser e Thomas que utilizaram geometria fractal para classificar layouts de ocupação em Bruxelas (2003).

4.5.3 ESTUDOS DE CASO

Assim como o crescimento natural, Batty considera o crescimento urbano envolve adição de subtração de unidades básicas, células ou partículas. No caso de cidades, estas unidades

podem ser individuais, residências, firmas, ligações de transporte e outros, representadas em termos de espaço de ocupações imediatas.

As cidades crescem através da acumulação destas escalas básicas. Estes padrões podem existir em escalas maiores e indicam auto-similaridade em escalas que emergem do processo de crescimento em si.

4.5.3.1 DIMENSÃO FRACTAL - APLICAÇÃO A PARTIR DOS LIMITES EXTERNOS

Considera-se que dentro de cada processo de crescimento existem códigos que determinam sua evolução. A organização destas unidades básicas de desenvolvimento define seu crescimento e forma, repetindo-se em diferentes escalas de uma cidade.

Desta forma a repetição de padrões se torna um elemento natural no desenvolvimento e crescimento urbano. Estudos de caso têm sido utilizados para exemplificar esse tipo de comportamento do sistema urbano como o caso de Cardiff que Batty (1991) apresenta e demonstra sua transformação analisando o comportamento de sua borda externa através da dimensão fractal.

CARDIFF

Em seu livro *Fractal Cities*, Batty desenvolve formas de estimar a dimensão fractal de uma cidade através da identificação de sua borda. O foco na evolução de uma série temporal traz as mudanças dos limites da cidade de Cardiff em 1886, 1901 e 1922. Esta série, que aparece aqui como referência para as análises a serem feitas nas cidades brasileiras e resultados das simulações, mostra a expansão urbana e a mudança na irregularidade de sua borda ao longo do tempo.

A redução progressiva dos valores de dimensão fractal para a cidade de Cardiff demonstra que a forma urbana se tornou mais homogênea ao longo do tempo, reduzindo a irregularidade de sua borda.

Tabela .19. Cardiff: evolução da forma e dimensão fractal⁴⁶

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1886 | 1,239 | 1901 | 1,184 | 1922 | 1,185 |

Esse resultado pode ser observado no gráfico que demonstra a redução de valores ao longo do tempo e também a tendência à estabilização do sistema.

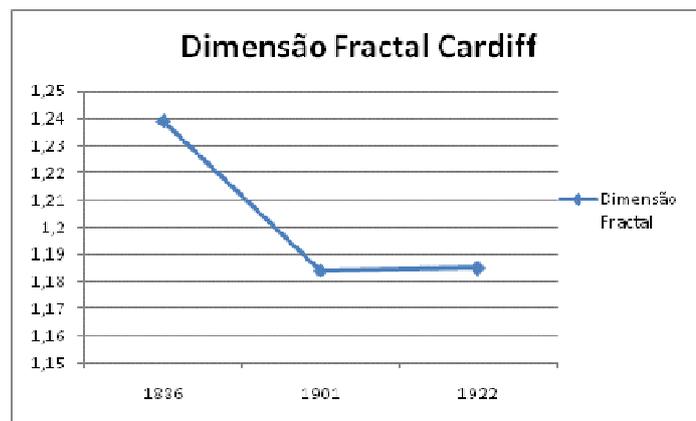


Gráfico 70. Dimensão Fractal de Cardiff

Tendo como base esse primeiro estudo de caso encontrado na literatura sobre o tema, será apresentada a seguir a primeira aplicação da dimensão fractal que será feita a partir da borda extraída de três cidades brasileiras: Curitiba, Porto Alegre e Santa Cruz do Sul.

⁴⁶ Fonte: BATTY e LONGLEY (1991)

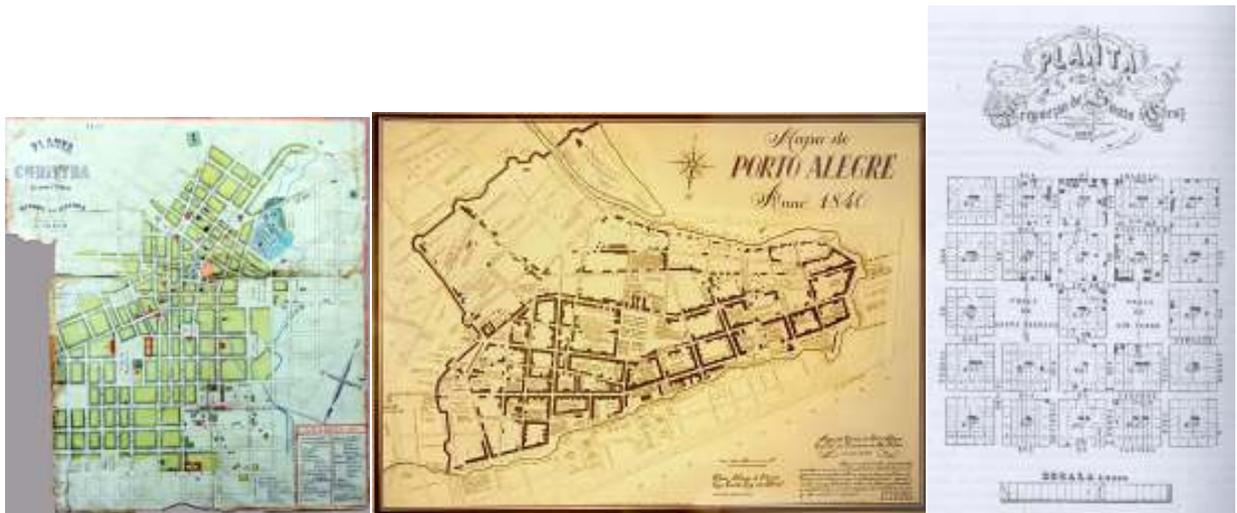


Figura 44. Mapas históricos Curitiba (1894), Porto Alegre (1840) e Santa Cruz do Sul (1890)

Estas cidades foram escolhidas em função de sua singularidade na forma durante seu desenvolvimento. Cada uma delas possui diferentes inícios de formação e evoluíram para formas com características singulares.

A aplicação da dimensão fractal nestas três cidades foi executada segundo o mesmo método aplicado no trabalho de Batty e Longley (1991). A medida de dimensão fractal aqui utilizada foi do tipo “*correlação*” onde cada ponto é rodeado por uma janela de pequeno tamanho. Conta-se o número de pontos ocupados dentro de cada janela e a mesma operação é aplicada para janelas cada vez maiores.

Para a aplicação da dimensão fractal nesse trabalho foi utilizado o software Fractalyse desenvolvido pelo grupo de pesquisa "City, mobility, territory" no centro de pesquisas Théma⁴⁷ sob coordenação de pesquisa de Pierre Frankhauser e Cécile Tannier. Nos gráficos abaixo o eixo X dos gráficos representam o tamanho do lado da janela $\epsilon = (2i + 1)$. O eixo Y representa a média de pontos contados por janela e o parâmetro principal é o tamanho do lado da janela ϵ .

⁴⁷ Théma - Théoriser et Modéliser pour Aménager - Université de Bourgogne

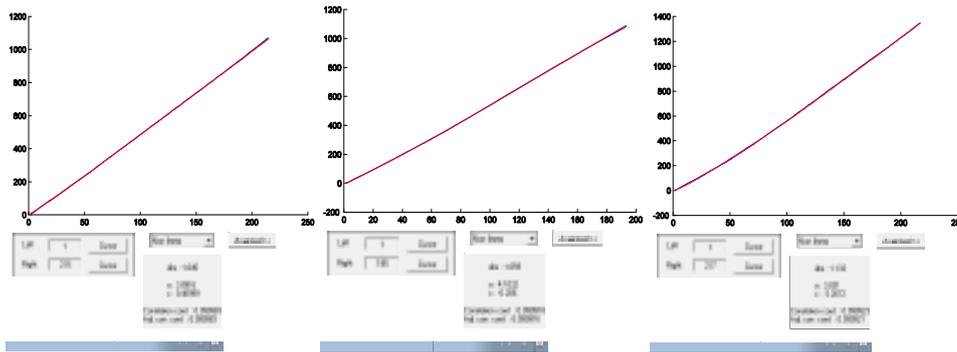


Gráfico 71. Gráficos resultantes da análise fractal tipo correlação para a cidade de Porto Alegre

A intenção é possibilitar a criação de parâmetros obtidos de dados reais que possam servir de referência para a análise do comportamento dos resultados do modelo POTENCIAT. A dimensão fractal também é aplicada aqui para avaliação da evolução da forma sendo, por isso, aplicada para cada cidade em quatro etapas diferentes da simulação.

Mesmo sem levar-se em conta as questões de escala e área da ocupação, existem características que podem ser detectadas a partir da aplicação da dimensão fractal e utilizadas para a comparação de comportamentos de cidades reais com os obtidos com as simulações do sistema.

4.5.3.1.1 CURITIBA

Curitiba é capital do estado do Paraná e foi Fundada em 1693, a partir de um pequeno povoado bandeirante. A cidade se tornou uma importante parada comercial com a abertura da estrada tropeira entre Sorocaba e Viamão e vem sempre sendo alvo de importantes planos urbanísticos.

Tabela .20. Curitiba: evolução da forma e dimensão fractal

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1900 | 1,09 | 1939 | 1,36 | 1967 | 1,319 | 2000 | 1,085 |
| | | | | | | | |

Curitiba apresenta, a partir do ano de 1900, um crescimento com forma irregular que vai se tornando mais complexa ao longo do tempo.

Em 100 anos de desenvolvimento a rápida expansão, juntamente com as limitações do sítio, fez com que a cidade apresentasse uma forma que foi ampliando o valor de dimensão fractal. Posteriormente a ocupação da cidade assume uma forma mais regular fazendo com que o valor de dimensão fractal tenha uma redução. Assim como Cardiff, a medida parece apontar para uma estabilização da forma e da área de ocupação.

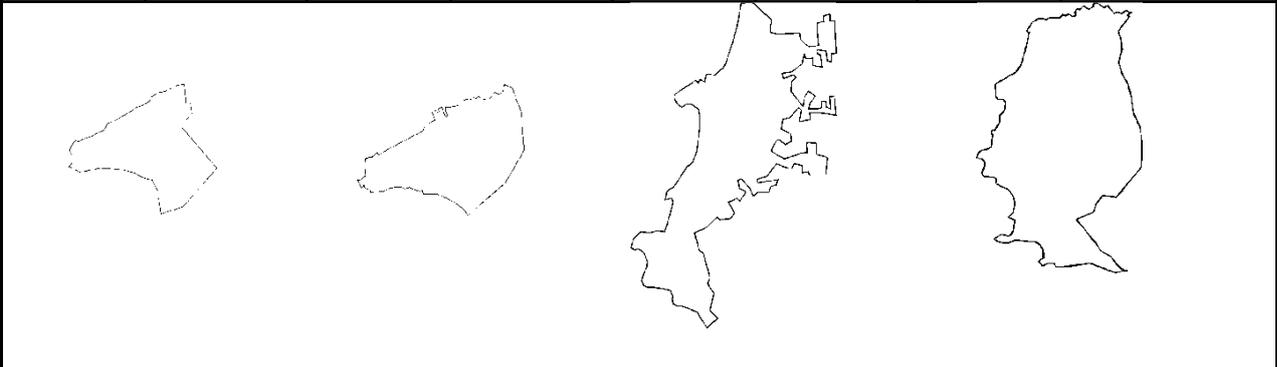
4.5.3.1.2 PORTO ALEGRE

Porto Alegre é fruto da criação da Freguesia de São Francisco do Porto dos Casais, em 26 de março de 1772. Sua forma peculiar se dá em função da limitação de seu crescimento definida pelo Rio Guaíba na sua parte oeste.

Diferentemente do caso de Curitiba, Porto Alegre apresenta forma compacta desde sua fundação até meados do século XX. Essa compacidade em parte se deve à existência de uma muralha que protegia a cidade e só foi derrubada em 1845, após o término da Revolução Farroupilha. Outro motivo seria a necessidade de acesso ao centro que ficava na ponta da península.

Tabela .21. Porto Alegre: evolução da forma e dimensão fractal

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1896 | 1,059 | 1937 | 1,058 | 1950 | 1,377 | 2000 | 1,116 |



Com o tempo, a cidade se expandiu seguindo antigas estradas de acesso, leito de riachos e contorno de morros que acabaram por definir uma cidade com forma mais “dendrítica”.

Até 1937, apesar de não ter uma forma geométrica pura, como um quadrado ou retângulo, a cidade de Porto Alegre apresenta compacidade que define um perímetro regular. A irregularidade da forma atingida depois disso, é traduzida pelo aumento drástico de dimensão fractal de sua borda em meados do século XX.

A ocupação da cidade apresentada no ano de 2000 preencheu os vazios retornando a uma forma mais regular e, conseqüentemente, reduzindo novamente o valor de dimensão fractal.

4.5.3.1.3 SANTA CRUZ DO SUL

Santa Cruz do Sul é um dos principais núcleos da colonização alemã do Rio Grande do Sul. A colônia foi fundada por lei provincial em 6 de dezembro de 1847. Esta cidade possui duas limitações importantes a leste, com um morro chamado de “Cinturão Verde”, e a oeste pela BR 471.

É importante ressaltar que Santa Cruz do Sul teve seu crescimento a partir de um núcleo planejado. Os primeiros lotes foram demarcados pelo engenheiro Frederico Augusto de Vasconcelos Almeida Pereira Cabral com traçado em formato de grelha regular.

Tabela .22. Santa cruz do Sul: evolução da forma e dimensão fractal

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1870 | 1 | 1922, | 1,07 | 1967 | 1,341 | 2000 | 1,341 |
| | | | | | | | |

Este fato definiu uma borda em formato de quadrado nos primeiros anos da colonização e, como será visto a seguir, também a forma das áreas ocupadas pelos diferentes usos de solo da cidade.

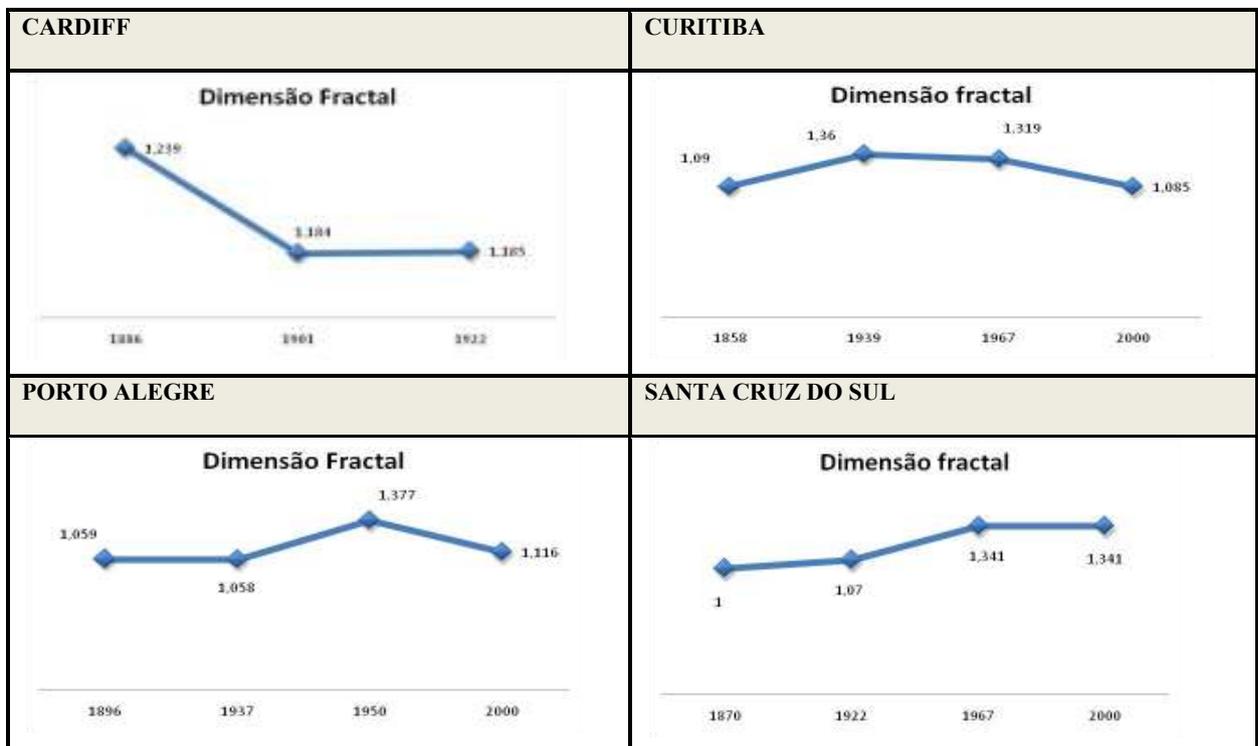
Como já definido o valor fractal de um quadrado é 1 e esse valor define a primeira área de colonização da cidade, que mantém forma bastante regular até 1922. Da mesma forma que Porto Alegre, a cidade se expande atingindo o valor de 1,341 em 1967 que se repete no ano 2000.

4.5.3.1.4 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS ESTUDOS DE CASO

As análises apresentadas aqui, incluindo Cardiff apresentada em 1991 por Batty e Longley, parecem apontar para alguns pontos de relação entre seus comportamentos mesmo se considerando as limitações inerentes ao método e disponibilidade de dados.

Cada cidade exibiu evolução de sua “borda externa” passando de uma linha mais irregular para, posteriormente, alcançar uma forma externa mais estável. Pode-se inferir que o sistema passou por uma transição em sua estrutura, alcançando outro patamar de organização e, por consequência, mudando a forma de seus limites de ocupação.

Gráfico 72. Gráfico de evolução da Dimensão Fractal de cada cidade analisada



Esse comportamento pode ser observado a partir da dimensão fractal que tem um súbito crescimento, mais impactante ou não, para depois estabilizar e até mesmo decair.

4.5.3.2 APLICAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL NOS PERÍMETROS RESULTANTES DOS SISTEMAS TOTAIS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO POTENCIAT

A dimensão fractal será utilizada para a análise dos resultados do Modelo Potenciat com o intuito de verificar a existência, ou não, de diferenças morfológicas entre as simulações tanto na borda externa do sistema total, quanto nos limites gerados pelas diferentes atividades a cada iteração.

As cidades apresentadas acima servem apenas como parâmetro para a discussão da forma alcançada pelas diferentes simulações aqui apresentadas. A comparação tem que levar em consideração que no modelo POTENCIAT não existem elementos como cursos d'água, topografia irregular, vales, etc.

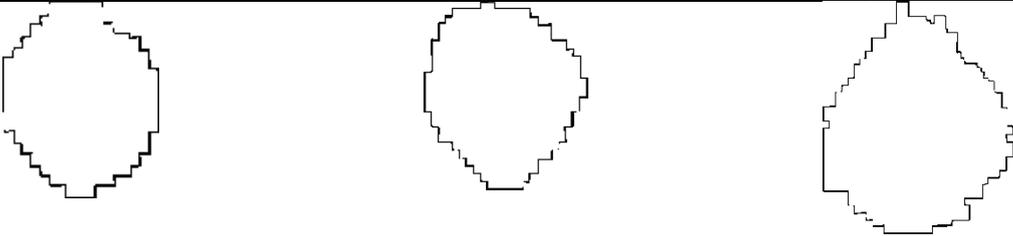
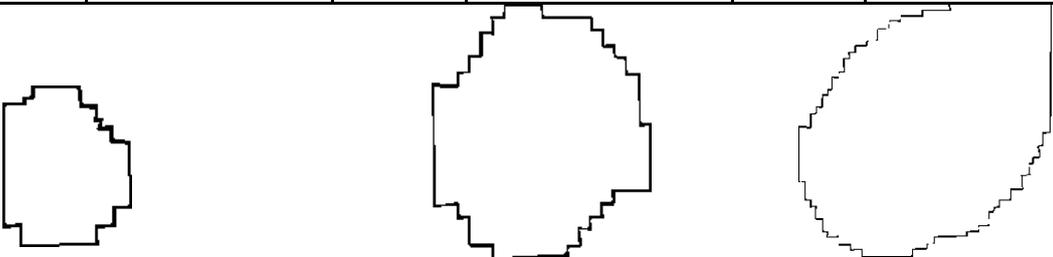
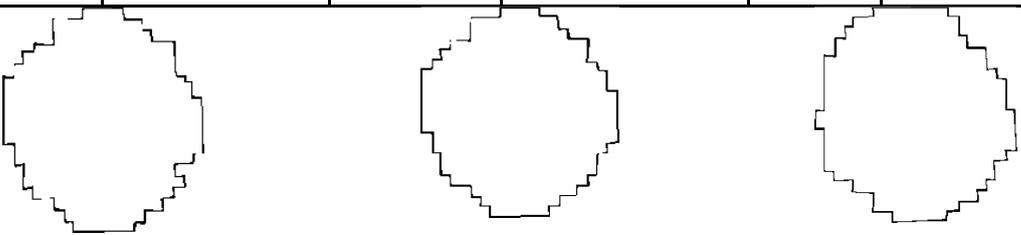
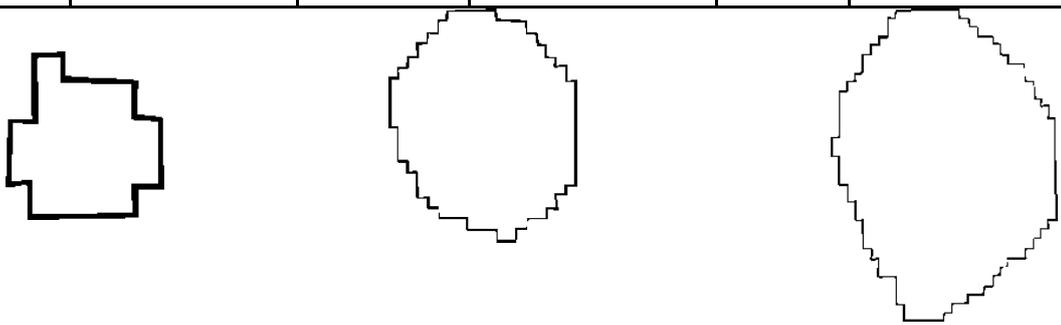
Esta limitação do modelo não permite que as avaliações sejam feitas de forma direta, mas induz a um tipo de avaliação que procure similaridades no comportamento dos resultados do modelo e das cidades analisadas. Os resultados demonstram a capacidade da análise fractal de diferenciar as fases da evolução de uma cidade através de sua forma. Dessa maneira, o mesmo tipo de análise será feito tendo como base a borda externa resultante das quatro simulações do modelo.

4.5.3.2.1 LIMITES EXTERNOS DOS SISTEMAS SIMULADOS NO MODELO POTENCIAT

A Simulação 1 apresentou uma ocupação uniforme desde as primeiras iterações. Seu conjunto formou um padrão homogêneo com dimensão fractal muito próxima de 1. Com o crescimento observa-se que a mudança na forma (mais alongada e irregular com 800 iterações) ocorre uma pequena ampliação do valor de Dimensão Fractal.

Esse comportamento demonstra homogeneidade na forma de ocupação do espaço ao longo das iterações. Sendo essa uma medida que detecta a “rugosidade de uma imagem”, valores baixos de dimensão fractal indicam formas regulares.

Tabela .23. Simulação 1, 2, 3 e 4: evolução da forma e dimensão fractal

| SIMULAÇÃO 1 | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,123 | 700 | 1,083 | 800 | 1,137 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 2 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 400 | 1,157 | 600 | 1,107 | 700 | 1,02 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 3 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,119 | 700 | 1,114 | 800 | 1,103 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 4 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 500 | 1,102 | 600 | 1,078 | 700 | 1,051 |
|  | | | | | |

A tabela acima demonstra essa regularidade da forma de ocupação ao longo dos passos do modelo. A dimensão fractal estimada fornece parâmetros que caracterizam o processo de expansão pela sinuosidade do perímetro, à medida que as áreas tendem a ser ocupadas de modo mais ou menos homogêneo.

Como já visto anteriormente, a Simulação 2 tem um caráter bastante peculiar em relação à distribuição de suas atividades. A extrema compactação de sua ocupação e a área de ocupação do espaço celular (a maior entre todas simulações) definiram a queda da Dimensão Fractal.

A Simulação 3 tem um desenvolvimento que se dá praticamente dentro da mesma área ao longo das iterações, mudando apenas na densidade e a localização interna de cada atividade. Isso levou a uma variação muito pequena nos valores de dimensão fractal do sistema que passa por um processo de redução e de aproximação do valor 1, que designa formas geométricas puras.

A dimensão fractal da simulação 4 apresenta um decréscimo entre o estado na altura de 500 para 800 iterações. Assim como na Simulação 2 aqui o serrilhado da imagem diminui entre as iterações e faz com que a dimensão fractal reduza com o crescimento da escala da ocupação.

4.5.3.2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DIMENSÃO FRACTAL DOS RESULTADOS DO MODELO POTENCIAT

Pode-se ver que a aplicação da dimensão fractal nos resultados das simulações do modelo POTENCIAT foi capaz de detectar as diferenças existentes entre as evoluções dos quatro sistemas gerados. Dessa forma, considera-se que equações de evolução e parâmetros diferentes levam a formas distintas que a dimensão fractal consegue captar.

Na simulação 1, a forma alcançada tem modificações importantes provocadas pela variação na direção de crescimento que levou a uma configuração mais “longilínea”, aumentando seu valor de dimensão fractal.

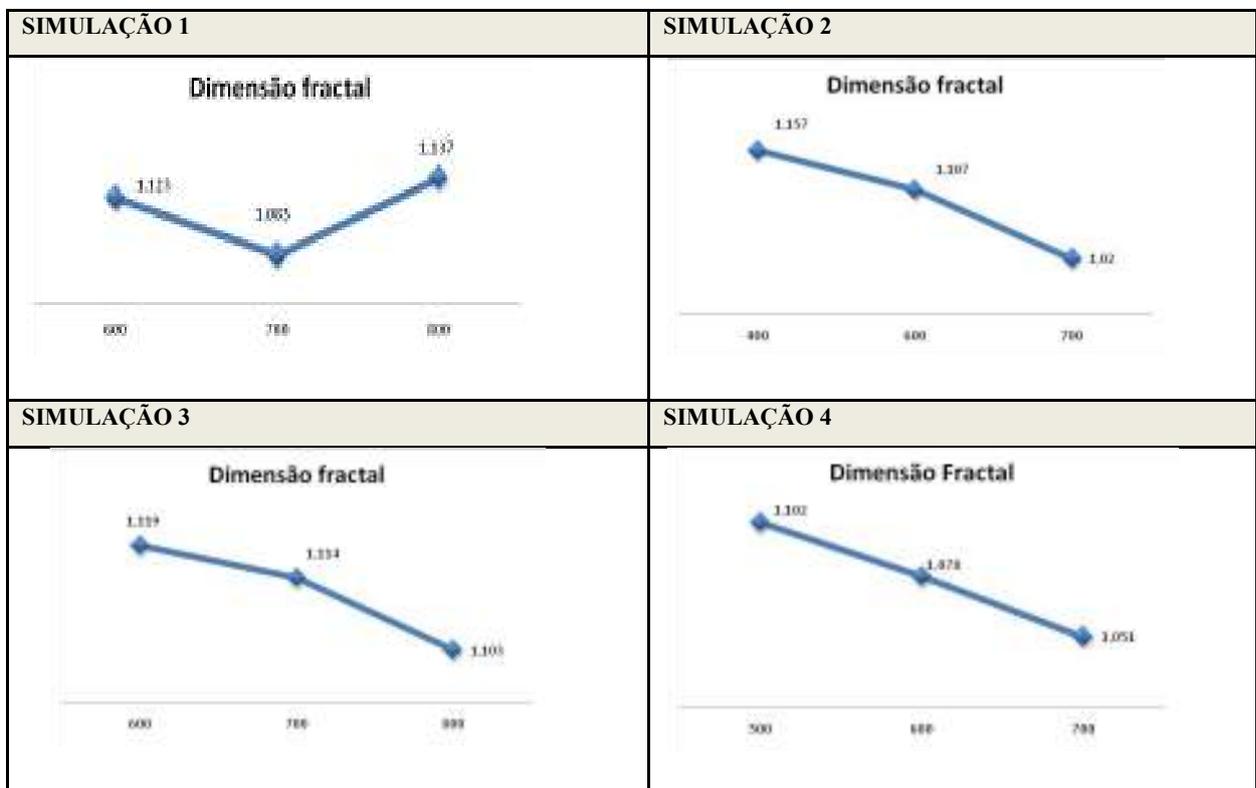
Comparando com os casos reais, Santa cruz do Sul passa por uma fase de crescimento que amplia sua dimensão fractal e depois tende a se estabilizar. Essa alteração se dá quando a cidade passa a se desenvolver no eixo norte-sul, alongando a forma urbana.

Já nos casos das simulações 2 e 3 existe uma situação de grande concentração de ocupação. No primeiro caso a População 2 cria um cluster que polariza a alocação das outras

atividades em seu entorno. No segundo, o comportamento das atividades reduz a necessidade de inovações na sua localização sofrendo apenas diferenças de densidade praticamente dentro da mesma área ao longo das iterações. Desta forma, a dimensão fractal tem clara tendência a decair com o passar do tempo.

Porto Alegre e Curitiba apresentam dimensão fractal com tendência a decair à medida que sua área é ocupada levando a uma configuração menos “dendrítica”. A estabilidade da borda externa das cidades pressupõe a modificação de densidades internas como forma de crescimento intra-urbano.

Gráfico 73. Gráficos de evolução da Dimensão Fractal dos Sistemas Simulados



As quatro cidades, assim como as simulações do Modelo POTENCIAT possuem dimensões fractais próximas de 1 ao longo do tempo, sem grande variabilidade. Como já dito aqui, não é nosso objetivo a comparação direta entre os estudos de caso e as simulações. Mesmo assim, as observações feitas aqui mostram que os sistemas simulados de alguma forma apresentam comportamentos possíveis de se aproximarem de um contexto urbano.

4.5.4 USO DO SOLO

Na análise de áreas urbanas uma das primeiras aplicações possíveis da geometria é o estudo do uso e ocupação da terra. Esta análise pode abordar características bem diferentes.

A aplicação da abordagem fractal para diferentes tipos de formas urbanas verificou a possibilidade de estabelecer relações entre os estudos de caso e os resultados obtidos nas simulações.

4.5.4.1 ESTUDOS DE CASO

A análise da morfologia urbana e de suas relações com o processo de distribuição das estruturas espaciais realizadas pela análise fractal pode ser empregada como subsídio para estudo de ocupações intra-urbanas, como se vê no trabalho de Frankhauser (2004).

Os valores de Dimensão Fractal observados têm sido ligados a contextos históricos de organização da cidade. Em alguns casos as análises são formuladas na escala de distritos comparando estruturas planejadas a padrões emergentes de urbanizações menos controladas (Pierre Frankhauser, 2004).

4.5.4.1.1 ÁREAS METROPOLITANAS DA FRANÇA

A modificação de escala utilizando-se a geometria fractal permite identificar as fronteiras na organização espacial. Em função disso, a escala de distritos ou bairros pode apresentar fronteiras difusas e pode parecer com um conjunto formado por distritos de formas heterogêneas tendo valores diferenciados de dimensão fractal.

Tabela .24. Diferentes valores para cada tipo de ocupação⁴⁸:

| TIPOS DE BAIRROS | CARACTERISTICAS | ÍNDICE DE UNIFORMIDADE UI4 | ÍNDICE DE DENDRICIDADE” DI |
|---|--|----------------------------|----------------------------|
| Centros Urbanos | Homogeneidade, padrões com poucos contrastes | 1.8 a 1.95 | - |
| Áreas residenciais sem espaços públicos e com linhas de fronteiras suaves | Homogeneidade, padrões com poucos contrastes | 1.8 a 1.99 | 1.26 a 1.30 |

⁴⁸ Fonte: Frankhauser (2004)

| | | | |
|---|--|-------------|------------|
| Cidades novas, Planos “Corbusianos”, com diferentes tamanhos de espaços urbanos | Padrões planejadas com menos contrastes | 1.6 a 1.77 | - |
| Limites irregulares e contrastantes em formato de dendrinos | Crescimento progressivo com pouco controle | 1.64 a 1.85 | 1.3 a 1.55 |

Em outro trabalho Frankhauser (1994) considera que a interação socioeconômica entre os diferentes grupos de cidades por ele analisadas demonstram que o crescimento é fortemente ligado à migrações internas da população. Isso traz diferentes tipos de utilização da terra, ocasionado pela distribuição desigual da população. Quando um grupo populacional cresce, parte desta população busca nova residência gerando as invasões e sucessões.

Nesse trabalho a avaliação da ocupação dos diferentes usos de solo levará em consideração séries temporais para que se torne possível a captação da evolução e deslocamento interno a partir da dimensão fractal tanto nas cidades analisadas quanto nos resultados do modelo POTENCIAT. Para isso, utilizou-se nas cidades analisadas a mesma classificação de atividades do modelo: indústria, comércio e residência 1, 2 e 3, classificadas segundo seu poder aquisitivo.

4.5.4.1.2 CURITIBA

Neste exemplo, a cidade de Curitiba será avaliada segundo sua dimensão fractal desde 1900 a 2000 em séries temporais segundo os limites de ocupação das diferentes atividades aqui consideradas. A forma da ocupação de cada uso do solo aqui apresentada é proveniente do levantamento histórico de cada bairro que indica as atividades localizadas em cada um e o nível de renda de seus habitantes⁴⁹ e dos Mapas Históricos dos anos 1900, 1939, 1967 e 2000⁵⁰.

4.5.4.1.3 INDÚSTRIA

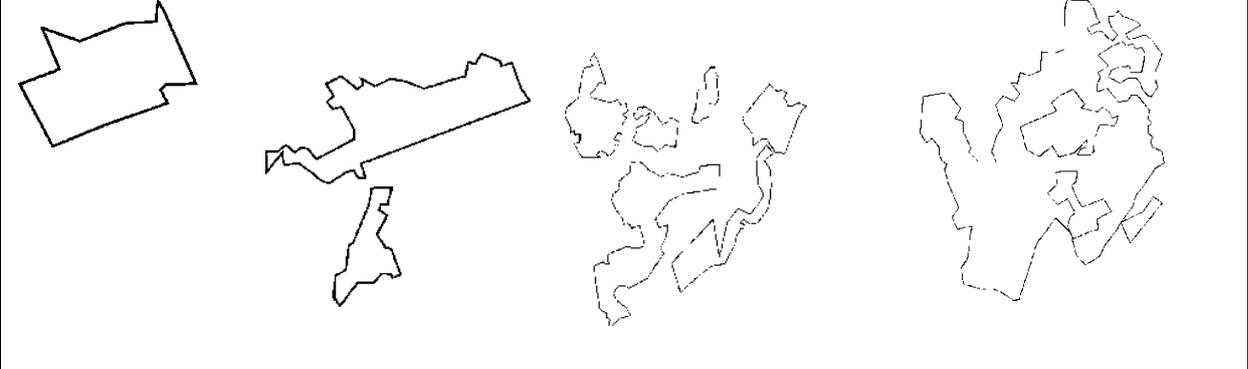
A atividade industrial na cidade de Curitiba passa por um processo de fragmentação a partir de 1939 e volta a se unificar entre 1967 e 2000.

⁴⁹ História dos Bairros de Curitiba, 1975 - www.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados

⁵⁰ Disponíveis no Endereço http://www.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados/Curitiba_em_dados_Pesquisa.asp

Tabela .25. Atividade Industrial Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1900 | 1,109 | 1939 | 1,327 | 1967 | 1,558 | 2000 | 1,648 |

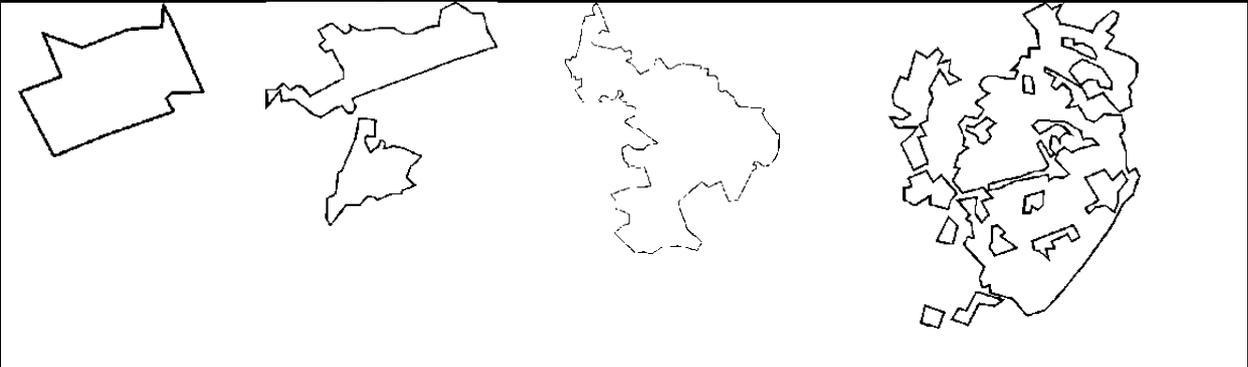


4.5.4.1.4 COMÉRCIO

A atividade comercial, assim como a industrial apresenta, ainda em 2000, tendência de fragmentação de sua forma, com alto valor de dimensão fractal.

Tabela .26. Atividade Comercial limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1900 | 1,109 | 1939 | 1,321 | 1967 | 1,315 | 2000 | 1,628 |



Ao longo do tempo a área ocupada pela atividade comercial vai se tornando cada vez mais complexa em virtude da descentralização e do surgimento de novas áreas ocupadas.

4.5.4.1.5 POPULAÇÃO 1

Ao contrário da atividade Industrial e Comercial, a atividade residencial População 1 mostra menores irregularidades de sua forma. O nível de preenchimento do espaço da borda de ocupação da População Residente 1 é muito menor do que para as atividades industrial e

comercial. Em função disso, os valores ficam mais próximos de 1, tendo pequeno decréscimo em 2000.

Tabela .27. População 1 limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1900 | 1,11 | 1939 | 1,235 | 1967 | 1,343 | 2000 | 1,331 |
| | | | | | | | |

4.5.4.1.6 POPULAÇÃO 2

A População 2 se diferencia da população 1 na área ocupada que é consideravelmente maior, se espalhando pela maioria da área de Curitiba. Mesmo assim, a forma mais sinuosa de sua borda permanece elevando os valores de dimensão fractal.

A interação entre as populações se torna evidente com o vazio interno à ocupação da População 2, que coincide com as áreas centrais tradicionalmente ocupadas pela População 1 que ocupa o território urbano causando segregação espacial.

Tabela .28. População 2- Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1900 | 1,212 | 1939 | 1,343 | 1967 | 1,374 | 2000 | 1,401 |
| | | | | | | | |

4.5.4.1.7 POPULAÇÃO 3

A população 3 ocupa praticamente toda a área de Curitiba. Mesmo que haja uma concentração maior desta população na periferia da cidade, quase toda sua área tem sua presença. Os vazios são resultado da interação de sistemas diferentes e se referem à desagregação espacial das áreas urbanas decorrentes de fatores socioeconômicos.

Assim como o sistema total de Curitiba, o valor da dimensão fractal em 2000 mostra um decréscimo provavelmente por acompanhar a estabilização da forma urbana configurada pela soma de todas as ocupações das atividades do sistema.

Tabela .29. População 3- Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1900 | 1,229 | 1939 | 1,325 | 1967 | 1,477 | 2000 | 1,373 |

4.5.4.2 PORTO ALEGRE

Em virtude da falta de informações mais precisas sobre a distribuição das “classes” sociais desta cidade ao longo do tempo, não haverá distinção entre os tipos populacionais sendo todos tratados como uma única designação: atividade residencial.

4.5.4.2.1 INDÚSTRIA

A Indústria em Porto Alegre teve seu início ainda no século XIX, ligada à colonização da cidade por italianos e alemães. Nos primeiros tempos as indústrias se localizavam próximas ao centro nos bairros Farrapos e Navegantes⁵¹.

Tabela .30. Atividade industrial - Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1896 | 1,033 | 1950 | 1,052 | 2000 | 1,419 |
| | | | | | |

Entre 1896 e 1950 existe pouquíssima variação sendo que a ocupação assume uma forma quase perfeita, com valores muito próximos de 1.

Atualmente a maioria das indústrias se encontra na região metropolitana, mesmo assim, ainda existem áreas de concentração desta atividade em Porto Alegre. Com a fragmentação da ocupação desta atividade, existe aumento significativo no valor da dimensão fractal.

4.5.4.2.2 COMÉRCIO

A vocação para o comércio na cidade de Porto Alegre vem desde sua colonização ligada com o Porto e criação da Alfândega. Da mesma forma que a Indústria, a atividade comercial inicia com a ocupação compacta em áreas localizadas na península do núcleo inicial da cidade que até hoje é o centro urbano.

⁵¹ Fonte: Souza (2007)

Tabela .31. Atividade Comercial - Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1896 | 1,033 | 1950 | 1,052 | 2000 | 1,419 |
| | | | | | |

Hoje o comércio se expande sobre toda a cidade sendo que os principais aglomerados se encontram ainda no centro histórico da cidade e nos principais corredores formados pelas avenidas de maior fluxo que compõem a estrutura principal da cidade. A dimensão fractal foi aplicada sobre as principais concentrações que configuram os pontos mais importantes da atividade comercial. O crescimento da dimensão fractal nesse caso provém da descentralização ocorrida depois da metade do século XX.

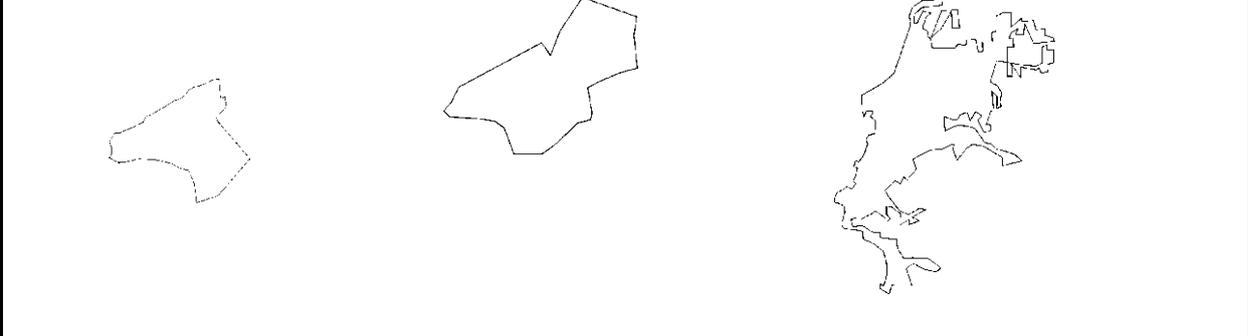
4.5.4.2.3 RESIDÊNCIAS

A distribuição da população em Porto Alegre é bastante densa nos primeiros tempos em função da existência da muralha que definia as áreas ocupáveis. Com o tempo a cidade ultrapassa este estágio inicial passando a apresentar uma formação mais complexa aumentando, com isso, a dimensão fractal.

A forma “dendrítica” nesse caso origina-se na existência de vazios e ocupações rarefeitas que foram desconsideradas para a aplicação da medida.

Tabela .32. Atividade Comercial - Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1896 | 1,048 | 1950 | 1,076 | 2000 | 1,46 |



4.5.4.3 SANTA CRUZ DO SUL

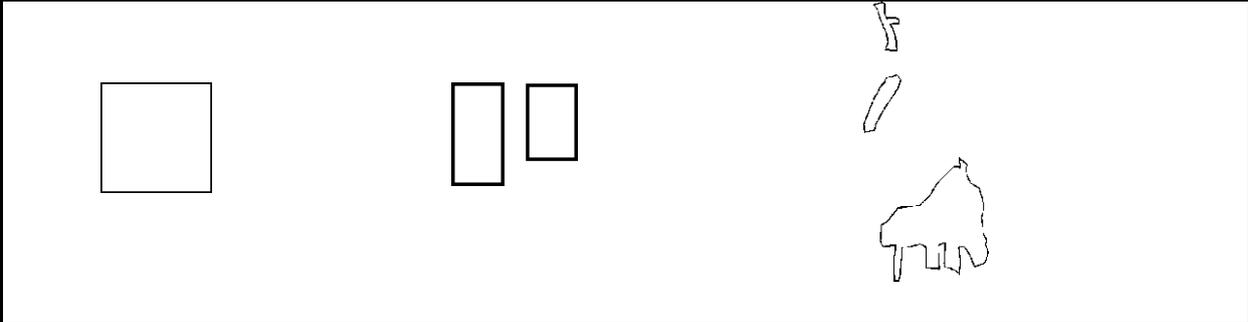
Assim como para a cidade de Porto Alegre, em Santa Cruz não haverá distinção entre os tipos populacionais sendo todos tratados como uma única designação: atividade residencial. Os limites de cada uso foram definidos através da consulta de mapas históricos, no trabalho de Wink (2002)

4.5.4.3.1 INDÚSTRIA

Como já dito anteriormente, a cidade de Santa Cruz do Sul tem como núcleo inicial uma área em formato de grelha ortogonal. Desta forma, as áreas ocupadas pelas atividades nos primeiros tempos da colonização da cidade também passam a apresentar formas ortogonais.

Tabela .33. Atividade Industrial - Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1870 | 1,000 | 1922 | 1,059 | 2000 | 1,368 |



Com o crescimento da Cidade em uma forma longilínea a atividade industrial acaba por sofrer também alteração em uma distribuição ao longo do eixo norte-sul. Essa situação é reforçada pela criação do “distrito industrial” ao sul da cidade que passou a abrigar tanto as novas indústrias de Santa Cruz do Sul, quanto as que se deslocaram do centro da cidade.

4.5.4.3.2 COMÉRCIO

A atividade comercial também adquire um caráter mais longilíneo seguindo claramente os principais eixos de crescimento da cidade e, ao mesmo tempo, mantendo o centro urbano com área de concentração desta atividade.

Tabela .34. Atividade Comercial - Limites adotados

| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1870 | 1,000 | 1922 | 1,369 | 2000 | 1,498 |

Novamente o processo de descentralização natural da cidade influencia o valor da dimensão fractal que até 2000 não apresenta sinais de estabilização.

4.5.4.3.3 RESIDÊNCIAS

A atividade Residencial ocupa praticamente todas as áreas de Santa Cruz do Sul ao longo do tempo.

Um ponto importante sobre essa cidade é que, com o passar do tempo e o crescimento urbano, a forma de ocupação se distancia do caráter estritamente ortogonal em todas as atividades analisadas. Segundo a hipótese dessa pesquisa, pode-se dizer que a interação entre as atividades naturalmente levaram à descentralização e à ocupação de novas áreas pelos diferentes usos.

Mesmo em 2000 essa atividade continua a ocupar a maior parte da cidade com vazios somente no Distrito Industrial ao sul da cidade.

Tabela .35. Atividade Residencial - Limites adotados

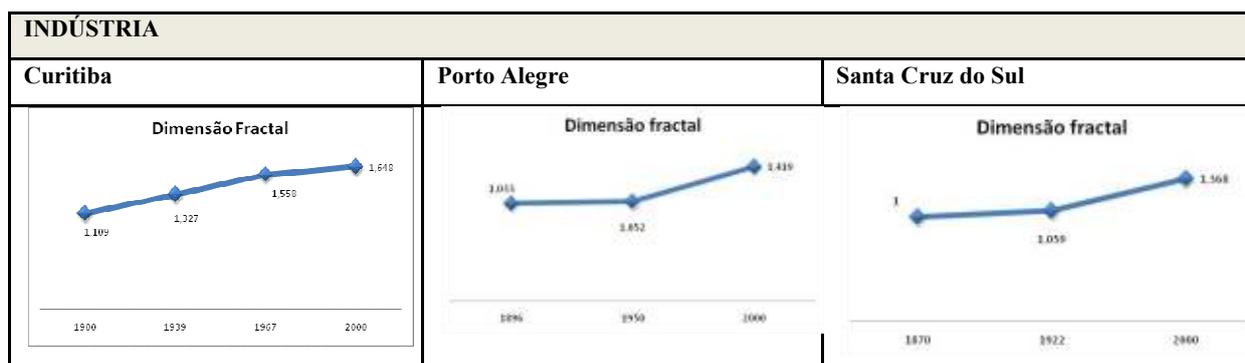
| ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL | ANO | DIMENSÃO FRACTAL |
|------|------------------|------|------------------|------|------------------|
| 1870 | 1,000 | 1922 | 1,000 | 2000 | 1,546 |

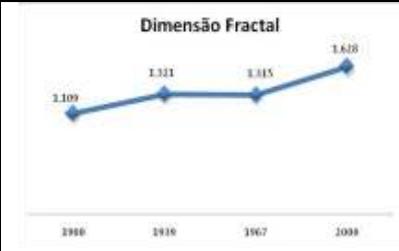
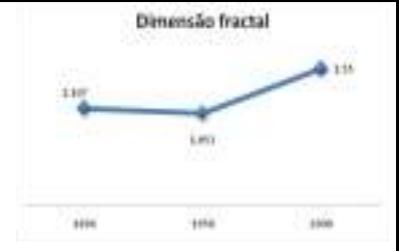
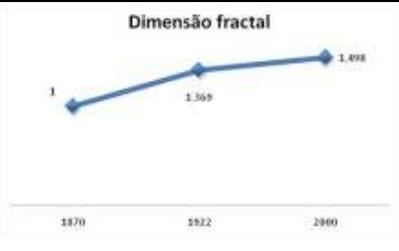
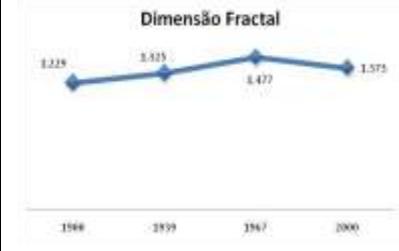
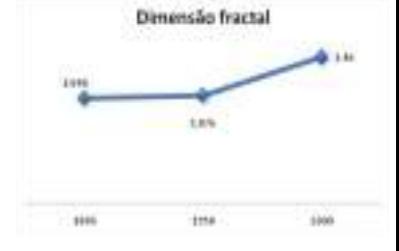
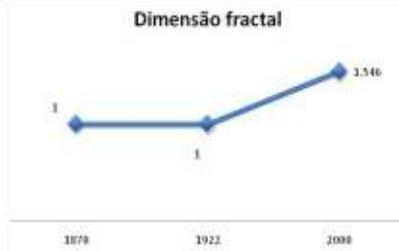
4.5.4.4 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS USOS DE SOLO - SISTEMAS REAIS

É interessante notar que quase em todos os casos aqui avaliados tendem a apresentar crescimento de sua dimensão fractal ao longo dos anos. As formas passam a se tornar mais complexas e fragmentadas à medida que as interações entre as atividades se tornam mais intensas em função da disputa pelo espaço e comportamentos segregadores.

Somente a População 3 de Curitiba mostra decréscimo de valor em função desta atividade assumir quase o total da forma urbana nessa cidade. Isso mostra que em sistemas reais pode-se detectar comportamentos inesperados através da Dimensão Fractal já que o comportamento esperado seria a ampliação da rugosidade de sua forma.

Gráfico 74. Evolução da dimensão fractal dos usos de solo de Curitiba, Porto Alegre e Santa Cruz do Sul



| COMÉRCIO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-------------------|------|-------|------|-------|------|-------|--|-------|--|------|------------------|------|-------|------|-------|---|-------|--|------|------------------|------|---|------|-------|------|-------|
| Curitiba | Porto Alegre | Santa Cruz do Sul | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  <table border="1"> <caption>Dimensão Fractal - Comércio Curitiba</caption> <thead> <tr><th>Ano</th><th>Dimensão Fractal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1980</td><td>1.109</td></tr> <tr><td>1988</td><td>1.311</td></tr> <tr><td>1997</td><td>1.315</td></tr> <tr><td>2008</td><td>1.618</td></tr> </tbody> </table> | Ano | Dimensão Fractal | 1980 | 1.109 | 1988 | 1.311 | 1997 | 1.315 | 2008 | 1.618 |  <table border="1"> <caption>Dimensão fractal - Comércio Porto Alegre</caption> <thead> <tr><th>Ano</th><th>Dimensão fractal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1988</td><td>1.107</td></tr> <tr><td>1998</td><td>1.493</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.315</td></tr> </tbody> </table> | Ano | Dimensão fractal | 1988 | 1.107 | 1998 | 1.493 | 2000 | 1.315 |  <table border="1"> <caption>Dimensão fractal - Comércio Santa Cruz do Sul</caption> <thead> <tr><th>Ano</th><th>Dimensão fractal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1870</td><td>1</td></tr> <tr><td>1922</td><td>1.305</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.498</td></tr> </tbody> </table> | Ano | Dimensão fractal | 1870 | 1 | 1922 | 1.305 | 2000 | 1.498 |
| Ano | Dimensão Fractal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1980 | 1.109 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1988 | 1.311 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997 | 1.315 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2008 | 1.618 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ano | Dimensão fractal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1988 | 1.107 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1998 | 1.493 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2000 | 1.315 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ano | Dimensão fractal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1870 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1922 | 1.305 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2000 | 1.498 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESIDÊNCIAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Curitiba – População 3 ⁵² | Porto Alegre | Santa Cruz do Sul | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  <table border="1"> <caption>Dimensão Fractal - Residências Curitiba</caption> <thead> <tr><th>Ano</th><th>Dimensão Fractal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1988</td><td>1.228</td></tr> <tr><td>1997</td><td>1.515</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.477</td></tr> </tbody> </table> | Ano | Dimensão Fractal | 1988 | 1.228 | 1997 | 1.515 | 2000 | 1.477 |  <table border="1"> <caption>Dimensão fractal - Residências Porto Alegre</caption> <thead> <tr><th>Ano</th><th>Dimensão fractal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1988</td><td>1.036</td></tr> <tr><td>1998</td><td>1.036</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.44</td></tr> </tbody> </table> | Ano | Dimensão fractal | 1988 | 1.036 | 1998 | 1.036 | 2000 | 1.44 |  <table border="1"> <caption>Dimensão fractal - Residências Santa Cruz do Sul</caption> <thead> <tr><th>Ano</th><th>Dimensão fractal</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1879</td><td>1</td></tr> <tr><td>1922</td><td>1</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.546</td></tr> </tbody> </table> | Ano | Dimensão fractal | 1879 | 1 | 1922 | 1 | 2000 | 1.546 | | |
| Ano | Dimensão Fractal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1988 | 1.228 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997 | 1.515 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2000 | 1.477 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ano | Dimensão fractal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1988 | 1.036 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1998 | 1.036 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2000 | 1.44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ano | Dimensão fractal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1879 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1922 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2000 | 1.546 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.5.5 APLICAÇÃO NOS RESULTADOS DO MODELO POTENCIAT

Da mesma maneira que se aplicou a medida para a avaliação das bordas externas dos resultados do Modelo POTENCIAT, considera-se que é possível utilizar a mesma metodologia para observar o comportamento da área de ocupação das diferentes atividades urbanas aqui simuladas.

Assim observa-se a evolução de forma de cada atividade para posteriormente definir a existência ou não de relações com os usos de solo nas cidades reais. Para isso os resultados do modelo passaram por um processo de definição de borda das áreas ocupadas pelas diferentes atividades e as imagens foram analisada pelo mesmo software Fractalyse já citado.

As simulações apresentam diferenciações importantes entre as atividades dentro da evolução de cada uma. A geometria fractal possibilita a caracterização da estrutura do uso do solo com um único parâmetro o qual retém a maioria das informações.

⁵² As demais populações de Curitiba estão detalhadas no Anexo 1

4.5.5.1.1 INDÚSTRIA

Nas simulações 1, 2 e 4 a atividade Industrial evolui para formas fragmentadas. Considera-se que este comportamento seja resultado da rápida queda de valores de potencial de atratividade na área central determinando um deslocamento mais rápido desta atividade para áreas mais periféricas. As Simulações 1 e 2 formam “ilhas” desconectadas das áreas mais centrais e a Simulação 4 apresenta vazios em seu interior chegando a uma forma “dendrítica”.

Tabela .36. Limites da atividade Industrial Simulações 1, 2, 3 e 4

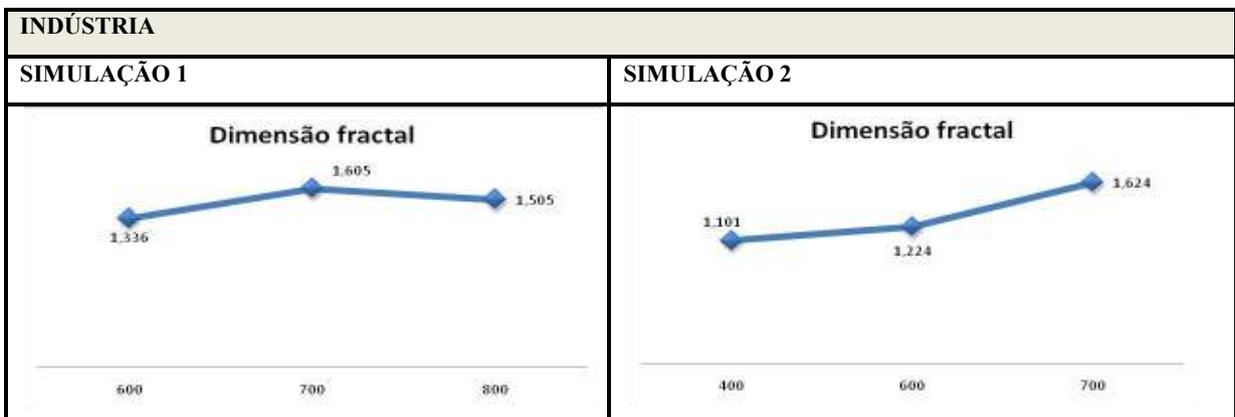
| SIMULAÇÃO 1 | | | | | |
|-------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,336 | 700 | 1,605 | 800 | 1,505 |
| | | | | | |
| SIMULAÇÃO 2 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 400 | 1,101 | 600 | 1,224 | 700 | 1,624 |
| | | | | | |

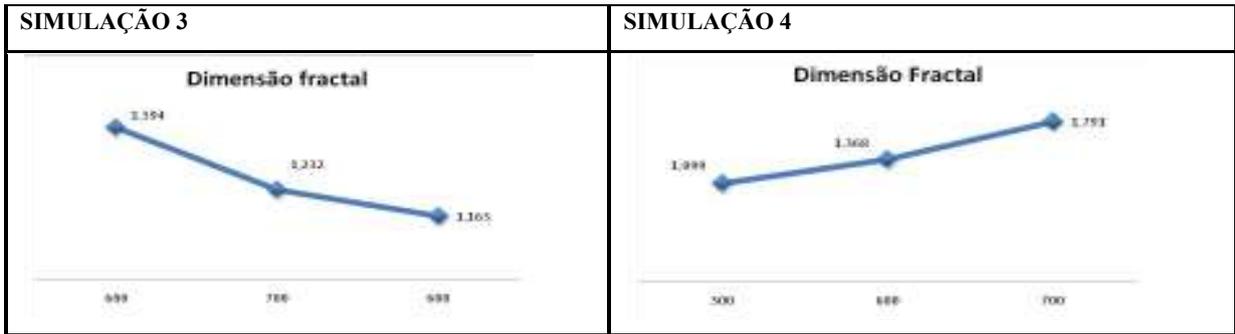
A exceção é a Simulação 3 na qual, em função da compacidade do sistema, a atividade industrial vai ao longo das iterações tendo o decréscimo da dimensão fractal. A forma vai se tornando menos irregular e os vazios internos são reduzidos entre 700 e 800 iterações.

| SIMULAÇÃO 3 | | | | | |
|-------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,394 | 700 | 1,232 | 800 | 1,163 |
| | | | | | |
| SIMULAÇÃO 4 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 300 | 1,099 | 600 | 1,368 | 700 | 1,791 |
| | | | | | |

A capacidade da Dimensão Fractal de captar essas diferenças pode ser exemplificada na evolução dos gráficos abaixo que mostram séries temporais da variação da Dimensão Fractal na atividade Industrial nas quatro simulações. Nessa primeira avaliação, se vê que regras de evolução e interação entre as atividades geram configurações diferenciadas espacialmente.

Gráfico 75. Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Industrial Simulações 1, 2, 3 e 4





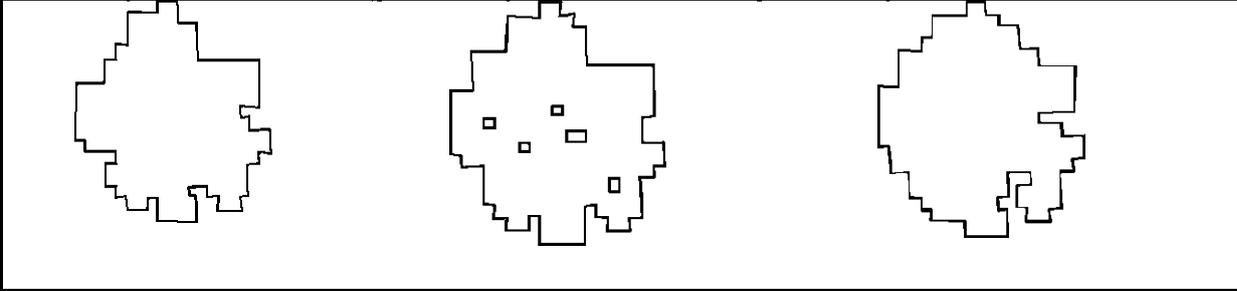
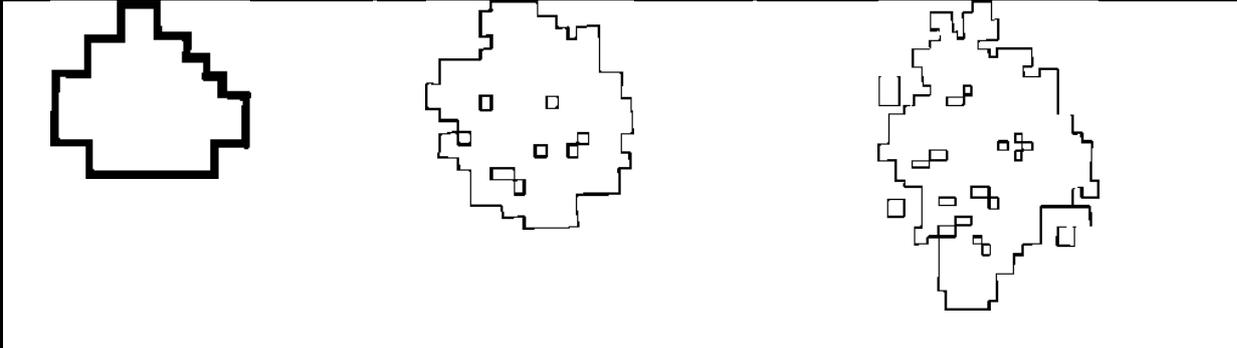
4.5.5.1.2 COMÉRCIO

A atividade Comercial se diferencia entre as demais em função desta ser a única a ter relações positivas com ela mesma.

Tabela .37. Limites da atividade comercial simulações 1 e 2

| SIMULAÇÃO 1 | | | | | |
|-------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,289 | 700 | 1,312 | 800 | 1,327 |
| | | | | | |
| SIMULAÇÃO 2 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 400 | 1,207 | 600 | 1,206 | 700 | 1,713 |
| | | | | | |

A concentração é resultado de sua equação de evolução, já apresentada no capítulo 3 do presente trabalho, que conduz a uma maior concentração dessa atividade.

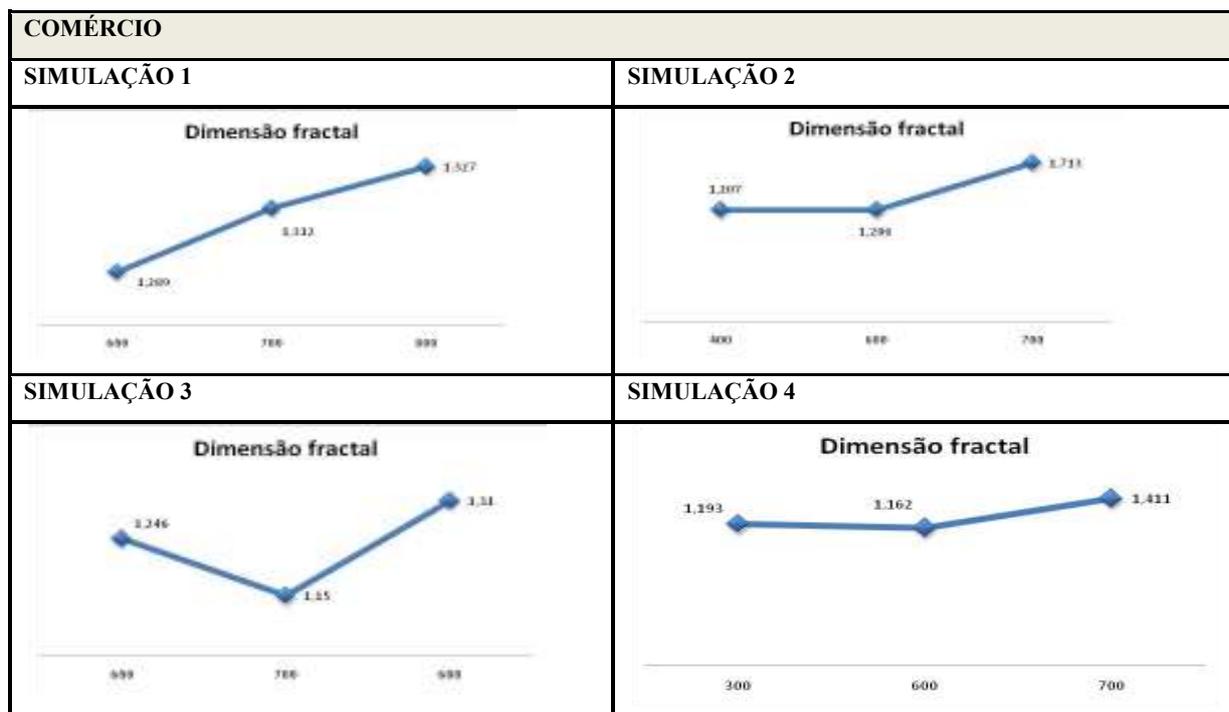
| SIMULAÇÃO 3 | | | | | |
|---|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,246 | 700 | 1,15 | 800 | 1,31 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 4 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 300 | 1,193 | 600 | 1,162 | 700 | 1,411 |
|  | | | | | |

Mesmo com a diferenciação prevista para essa atividade, propriedades que não foram a priori designadas na sua equação de evolução começam a surgir. Um exemplo disso é que a atividade comercial tende a desenvolver sub-centros no interior dos “clusters” formados pelas atividades residenciais.

Na Simulação 2, onde, á primeira vista, se comporta da mesma maneira que a industrial “formando ilhas”, em um estudo mais apurado de sua estrutura revela que existe continuidade na ocupação com uma série de vazios internos.

De qualquer forma, a evolução da atividade comercial tende a formar um núcleo inicial bem homogêneo, com áreas periféricas ocupadas de maneira rarefeita. Isso foi detectado tanto pela avaliação topológica e redes, quanto pela dimensão fractal aqui apresentada.

Gráfico 76. Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Comercial das Simulações 1, 2, 3 e 4



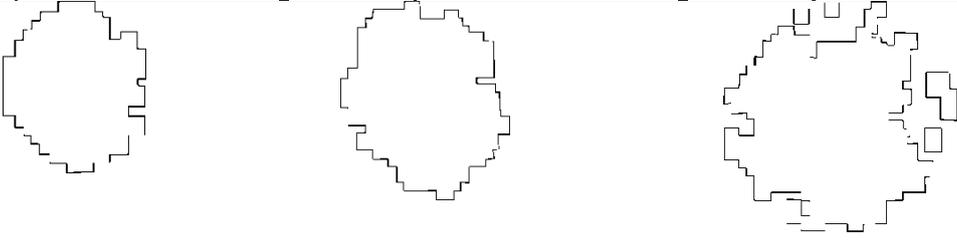
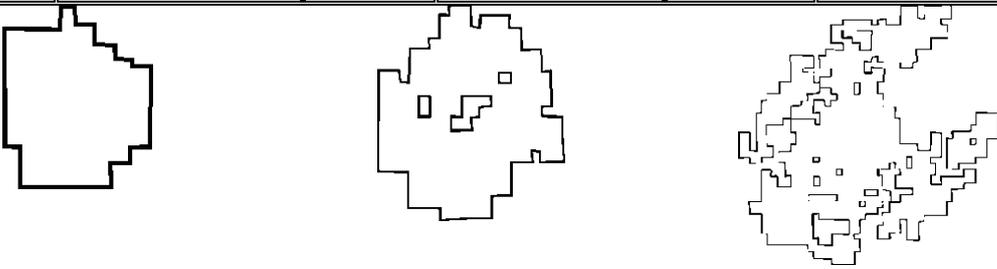
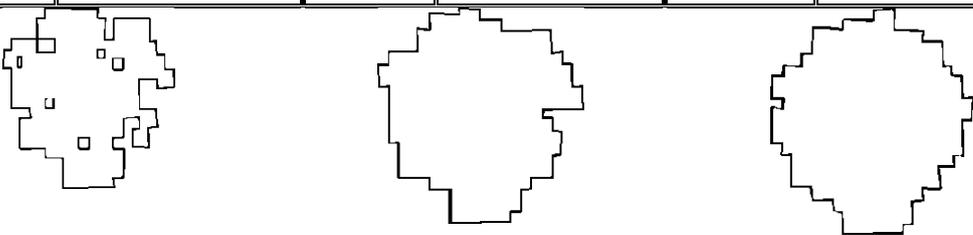
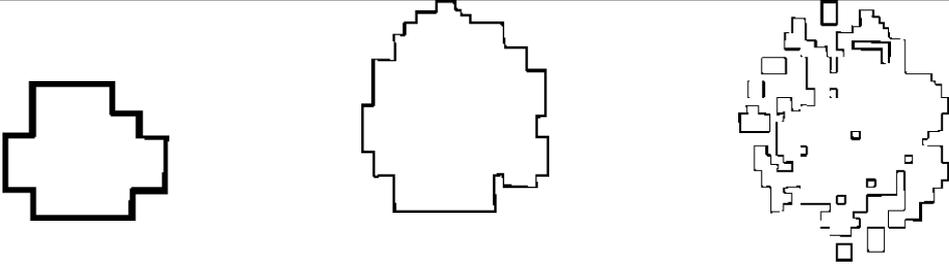
4.5.5.1.3 POPULAÇÃO 1

Como já visto, as populações residenciais não tiveram em sua equação de evolução relação positiva com elas mesmas como no caso do Comércio. Apesar dessa neutralidade aparecem “clusters” que representam a formação de comunidades na forma de ocupação. No caso da População 1 nota-se a formação de “clusters” compactos e maiores.

A formação de comunidades se daria então pelas preferências de cada população e pelas oportunidades de alocação que cada sistema apresenta.

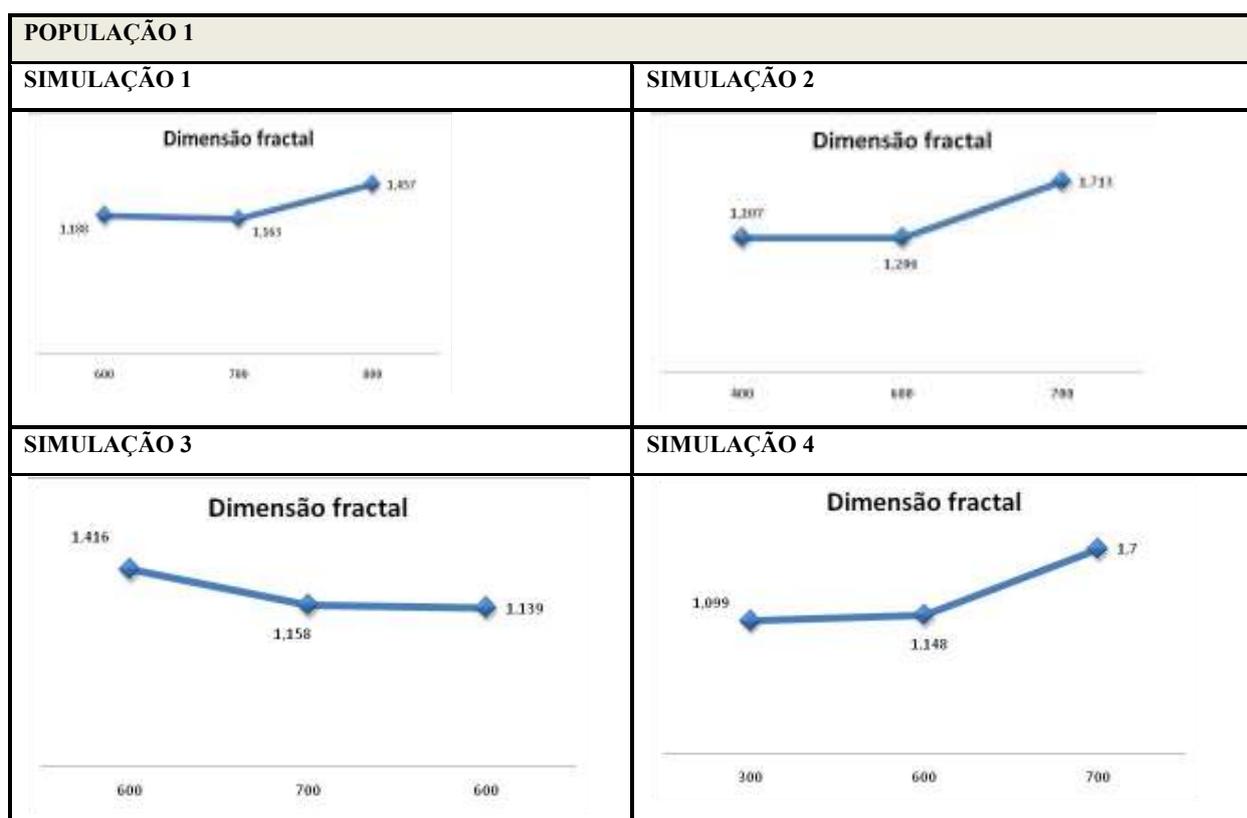
Para a População 1, que tem preferência por espaços maiores e não depende tanto das relações de acessibilidade, o agrupamento pode também ser entendido em função do caráter segregador dessa população em relação às demais que é traduzido na formação de áreas negativas no local de ocupação e arredores.

Tabela .38. Limites da atividade População Residencial 1 – Simulações 1, 2, 3 e 4

| SIMULAÇÃO 1 | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,188 | 700 | 1,163 | 800 | 1,457 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 2 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 400 | 1,203 | 600 | 1,236 | 700 | 1,696 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 3 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,416 | 700 | 1,158 | 800 | 1,139 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 4 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 300 | 1,099 | 600 | 1,148 | 700 | 1,7 |
|  | | | | | |

O comportamento da população 1 na Simulação 3 é diferenciado em relação às demais. Nesta equação de evolução a população 1 não procura maiores espaços e não tem muitas relações negativas em relação às outras atividades, como definido em sua equação de evolução apresentada no capítulo 3. Ao contrário das demais simulações, a população mantém sua posição no núcleo central e arredores de maneira estável.

Gráfico 77. Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Residencial População 1 das Simulações 1, 2 3 e 4



Tanto na simulação 2, quanto na simulação 4, os limites de cada sistema com 700 iterações nos remetem à imagem do Tapete Sierpinski, modelo fractal clássico com ocupação densa e geração de pequenos vazios internos.

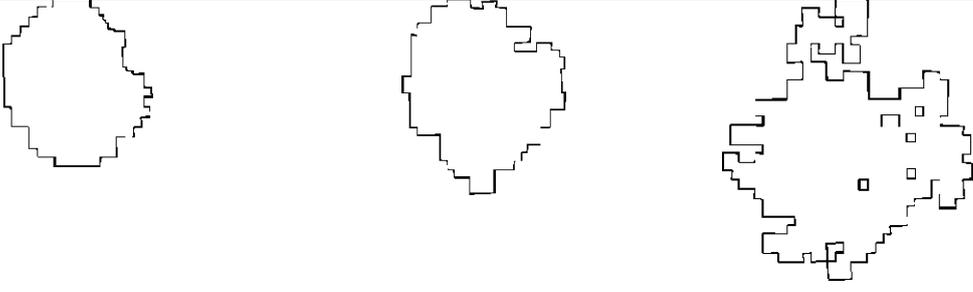
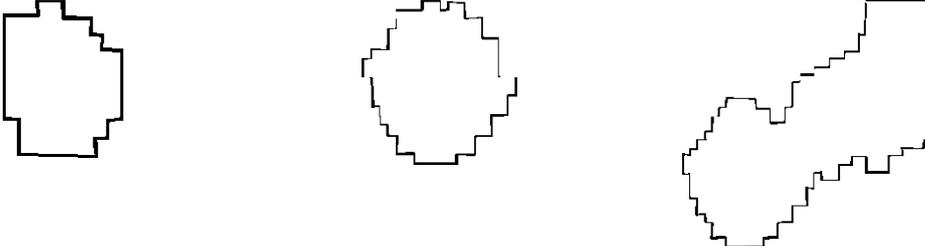
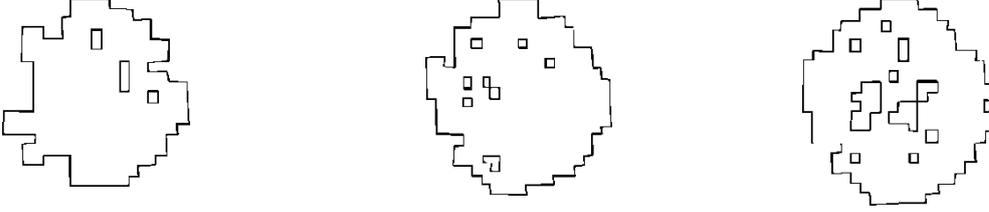
4.5.5.2 POPULAÇÃO 2

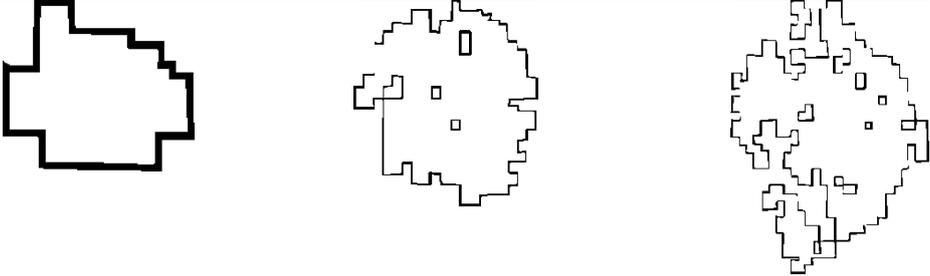
Nos Sistemas 1, 3 e 4 a População 2 apresenta crescimento em sua dimensão fractal. A forma “dendrítica” reaparece ampliando a fragmentação da forma de ocupação. As bordas, que nos estágios mais avançados das simulações é alvo de disputa por espaço, assumem grandes

valores de densidade tornam-se mais irregulares e formam agrupamentos poucos conectados com o núcleo inicial, como já visto na análise topológica destes sistemas.

Outro fenômeno a ser levantado é a falta de espaço em função do valor de saturação já ter sido ultrapassado nessas áreas. No caso do sistema 1, a população 2 que anteriormente foi expulsa do núcleo inicial, volta a se alocar no centro em função da expulsão das atividades anteriormente ali localizadas, gerando um fenômeno de sucessão. Mesmo assim, nas Simulações 1, 3 e 4 permanecem vazios nas áreas centrais da População 2.

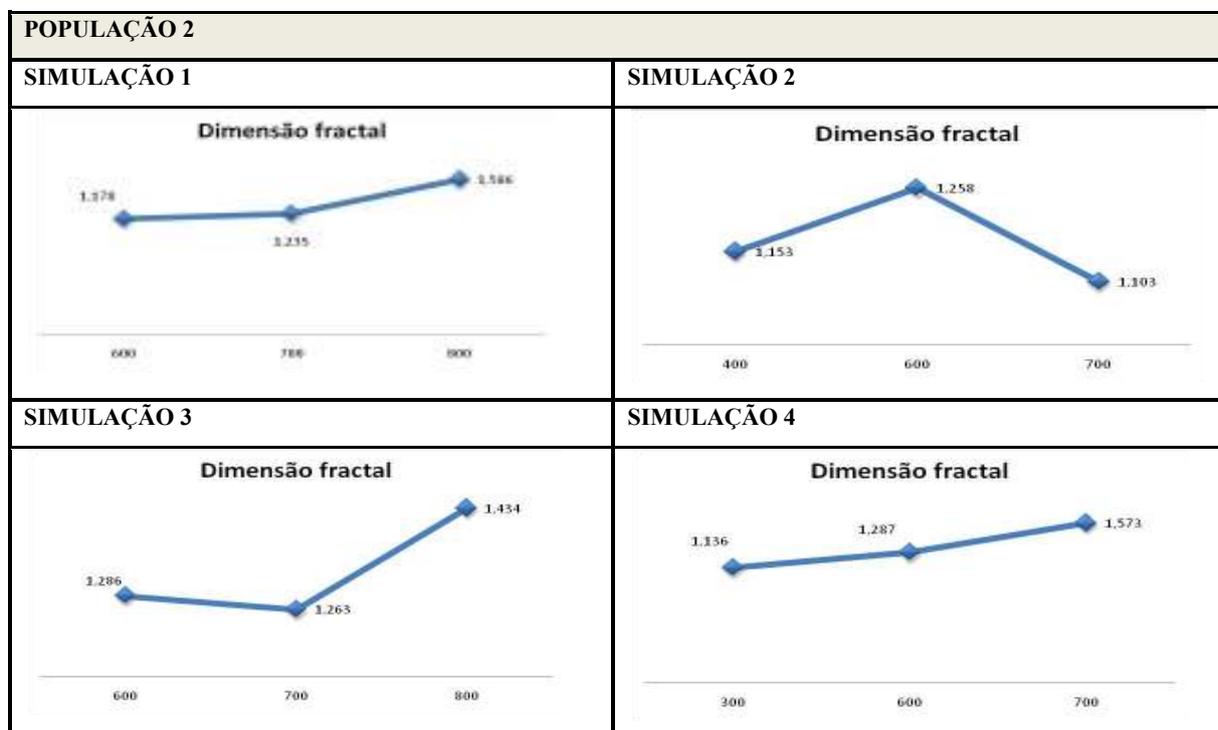
Tabela .39. Limites da atividade População Residencial 2 – Simulações 1 e 2

| SIMULAÇÃO 1 | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,178 | 700 | 1,235 | 800 | 1,586 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 2 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 400 | 1,153 | 600 | 1,258 | 700 | 1,103 |
|  | | | | | |
| SIMULAÇÃO 3 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,286 | 700 | 1,263 | 800 | 1,434 |
|  | | | | | |

| SIMULAÇÃO 4 | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 300 | 1,136 | 600 | 1,287 | 700 | 1,573 |
|  | | | | | |

A exceção na forma de ocupação é a Simulação 2 onde essa atividade ocupa o espaço de forma extremamente compacta. Essa concentração não ocorre em nenhum outro caso e acaba por gerar áreas negativas para as outras atividades que formam vazios nas áreas ocupadas pela População 2.

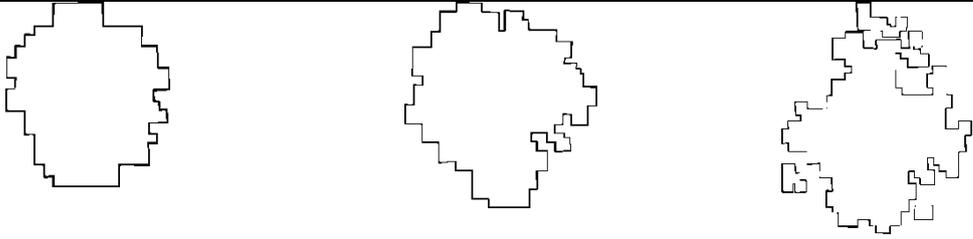
Gráfico 78. Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Residencial População 2 das Simulações 1, 2 3 e 4



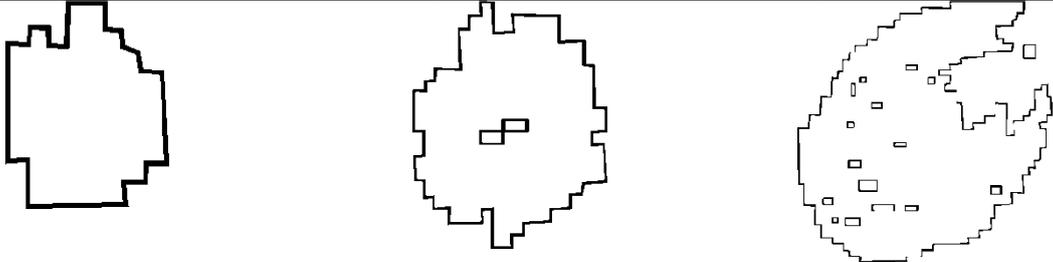
4.5.5.3 POPULAÇÃO 3

Com a concentração de diferentes atividades nas bordas do sistema, a forma “dendrítica” aparece aumentando os valores de dimensão fractal, principalmente nas simulações 1 e 4. A Simulação 2, como já dito aqui, possui características diferenciadas na sua forma de ocupação. No caso da População 3 isso não é diferente pois, ao contrário das demais atividades, ela consegue se alocar em quase todo a área formada pelo Sistema 2.

Tabela .40. Limites da atividade População Residencial 2 – Simulações 1 e 2

| SIMULAÇÃO 1 | | | | | |
|---|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,174 | 700 | 1,321 | 800 | 1,57 |
|  | | | | | |

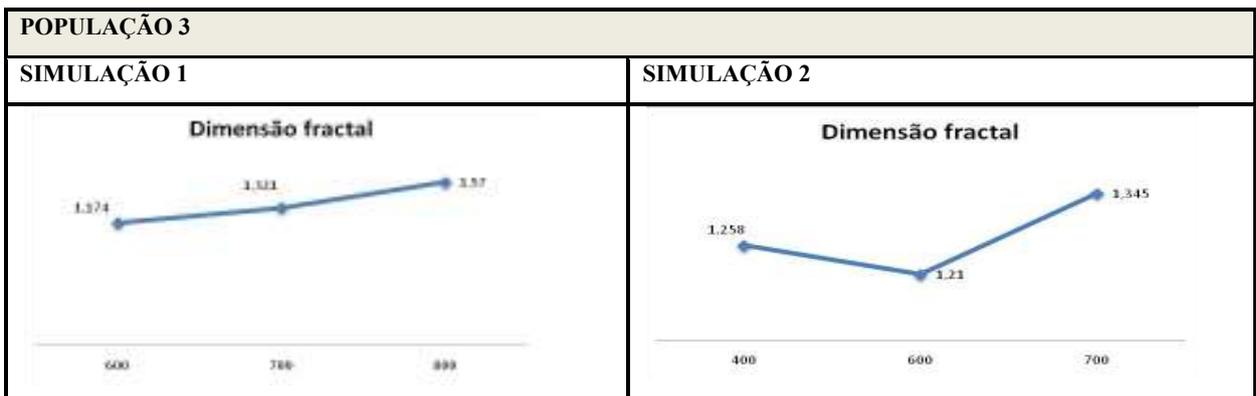
A extrema compacidade de sua ocupação na Simulação 2 concede a essa atividade características que podem ser comparadas ao caso da figura 6, Tapete Sierpinski, como já visto na alocação de outras atividades. Existe deslocamento dessa atividade das áreas mais centrais mas os vazios internos gerados são diminutos se comparadas às outras simulações.

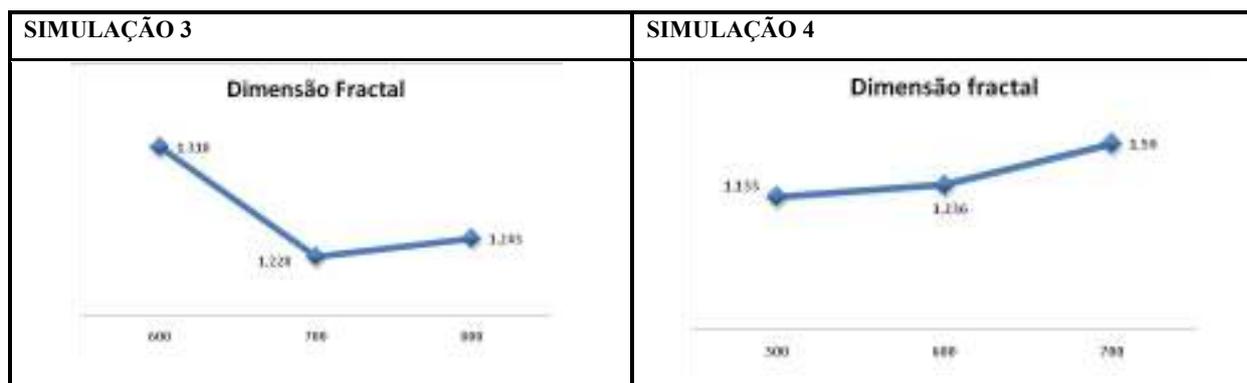
| SIMULAÇÃO 2 | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 400 | 1,258 | 600 | 1,21 | 700 | 1,345 |
|  | | | | | |

| SIMULAÇÃO 3 | | | | | |
|-------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 600 | 1,318 | 700 | 1,228 | 800 | 1,243 |
| | | | | | |
| SIMULAÇÃO 4 | | | | | |
| Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal | Iterações | Dimensão Fractal |
| 300 | 1,133 | 600 | 1,236 | 700 | 1,59 |
| | | | | | |

Em todos os casos a interação com as demais atividades torna as áreas centrais negativas tanto pela saturação ultrapassada nessas áreas, quanto pela pouca capacidade de competição por espaço perante às demais atividades.

Gráfico 79. Evolução da Dimensão Fractal na Atividade Residencial População 3 das Simulações 1, 2 3 e 4.





Mesmo tendo preferência por áreas mais acessíveis e com mais facilidades (comércio e serviços) a relação entre as atividades acaba por “forçar” a População 3 uma nova forma de ocupação mais periférica. Isso causa deslocamento e, conseqüentemente, a elevação da dimensão fractal até mesmo na Simulação 3, a mais compacta do sistema.

Um ponto importante a ser levantado é que essa busca da População 3 por novas áreas, leva a um processo de “periferização” que modifica as relações de acessibilidade do sistema influenciando a alocação das demais populações.

4.5.6 ANÁLISE

O tipo de análise aqui apresentado tem o objetivo de elencar possíveis relações entre o comportamento de sistemas reais e os 4 sistemas simulados pelo modelo POTENCIAT

Os valores de dimensão fractal, quando aplicados sobre os limites externos das cidades como um todo, tendem a reduzir ao longo do tempo demonstrando uma estabilização no que se refere à borda externa dos sistemas, tanto reais quanto simulados,

Por outro lado, a observação das atividades individualmente e de seus valores de dimensão fractal nos permite dizer que, assim como nos estudos de caso apresentados, a dimensão fractal de cada atividade tende a aumentar ao longo do tempo. Essa característica é uma propriedade emergente do sistema que surge em função da contínua interação entre as atividades e da forma como elas influenciam umas às outras. Algumas modificações se referem a uma borda mais irregular e outras em formação de “ilhas” desconectadas do núcleo inicial, como nos casos da atividade industrial de Curitiba e Porto Alegre.

Apesar disso, os valores da dimensão fractal para as Populações 1 e 3 em Curitiba têm tendência a cair depois da metade do século XX. Esse tipo de comportamento, onde atividades agem de forma inversa ao esperado, pode ser visto nas Simulações 2 e 3 que apresentam extrema densificação de suas atividades residenciais.

A avaliação da dimensão fractal dos resultados nos permite a observação do momento de mudança de um tipo de organização a outro, ou seja, o momento em que uma estrutura se transforma evoluindo para uma nova.

Uma característica distinguível nesse momento de transição nos sistemas espaciais, como no nos casos apresentados, é a abrupta mudança em uma ou mais propriedades físicas, aqui consideradas como a forma e a borda da ocupação.

Como se pôde observar nos estudos de caso e nas simulações, os diferentes usos de solo iniciam sua evolução com uma forma simples, que se mantêm ao longo do tempo. Depois, em tempos diferentes, acabam por ter sua estrutura e forma modificada passando a apresentar outro comportamento uns em relação aos outros.

Isso ocorre nos estudos de caso, como Porto Alegre e Santa Cruz do Sul onde cada uma cresce de formas auto-semelhantes e depois, rapidamente, passam a apresentar novas estruturas desde o final do século XX e início do XXI.

Essa mudança abrupta aparece também na Simulação 2 que tem um núcleo extremamente denso definindo ao seu redor a alocação das demais atividades em um processo que define-se como a escravização de seus comportamentos.

Como se viu aqui, os valores de dimensão fractal isolados não são definitivos para a classificação do tipo de ocupação de cada atividade, tanto nos sistemas reais, quanto nos simulados. As análises efetuadas nesse item se mostram mais eficazes com a combinação de outros tipos de avaliação como, por exemplo:

- topologia em redes: de onde se tiram as formações estrutura e de agrupamentos;
- distribuição da densidade: que ajudou a compreender a forma de distribuição das atividades e sua correlação espacial;

- observação da forma: que permite, com base na distribuição de valores de dimensão fractal, investigar e elencar as causas de desenvolvimento de cada forma de ocupação.

Dessa forma considera-se que os comportamentos dos sistemas simulados com o modelo POTENCIAT são condizentes com os estudos de caso apresentados. Além disso, a análise da dimensão fractal é capaz de obter importantes características de forma que podem ser utilizadas em pesquisas e análises posteriores.

A seguir será apresentada a discussão dos resultados obtidos nessa pesquisa no que se refere a seu arcabouço teórico, desenvolvimento do modelo POTENCIAT, e a avaliação dos resultados obtidos até aqui.

5 CONCLUSÃO E CRÍTICAS

5.1 ATIVIDADES URBANAS EM UM CONTEXTO DE TRANSFORMAÇÃO ESPACIAL E DE USO DO SOLO

O início desse trabalho se deu de forma empírica, a partir da observação da transformação espacial e de uso do solo que ocorre diariamente em áreas urbanas. A preocupação com esse problema em particular provém da sua capacidade de causar impactos urbanos como: dificuldade de acessibilidade, esgotamento ou subutilização da infraestrutura, liberação de resíduos, conflitos sociais e culturais, etc.

A população urbana convive com esse processo que muitas vezes ocorre sem controle e planejamento. A transformação espacial e de uso do solo acabam, nesses casos, sendo o produto das relações e facilidades existentes em determinadas áreas para diferentes atividades. Essas vantagens, quando interessam a mais de uma atividade urbana, podem levar a uma situação de competição e conflito que tende a perdurar até que algum dos participantes seja deslocado, como ocorreu no caso do Bairro Anchieta de Porto Alegre.

As Atividades Urbanas não se referem apenas às funções essenciais para o funcionamento e produção da cidade. Referem-se também à forma como os indivíduos coexistem e satisfazem suas necessidades como moradia, trabalho, educação, lazer, etc. Essas são funções que evoluem e se transformam ao longo do tempo em velocidades cada vez maiores criando novos usos e demandas por espaço.

Dessa forma a compreensão das relações e da evolução da cidade como um sistema contínuo e em constante evolução se torna fundamental para que se possa delinear as características urbanas e a melhor forma de gerenciar seu futuro. Vista sob essa ótica, a transformação espacial e de uso do solo torna-se não apenas um problema teórico e conceitual, mas um fato elementar para a compreensão do fenômeno urbano e suas implicações nas vidas de seus habitantes.

O “casco” espacial urbano aparece como mediador das relações funcionais conferindo um caráter de perenidade à organização da cidade através do estoque construído, espaços abertos e estrutura viária. Por outro lado a demanda de crescimento de suas atividades, as contínuas mudanças causadas na forma de organização do trabalho, o surgimento de novas atividades e mudanças tecnológicas conferem à estrutura urbana uma característica de constante mudança e

readaptação que nos dirige novamente ao foco inicial desse trabalho que é a transformação espacial e de uso do solo.

Esse processo que à primeira vista pode ser considerado apenas por mudanças de volume, qualidade das edificações, desenvolvimento e inserção de novas atividades em áreas pré-existentes, se torna um problema com maior complexidade em função das relações e das conseqüências que gera.

Essa demanda foi responsável pela procura de teorias que pudessem trazer à tona as relações e os elementos que levaram às modificações observadas empiricamente, com o objetivo de reconstruir conceitualmente as estruturas desse fenômeno a fim de compreendê-lo e explicá-lo.

5.2 DISCUSSÃO SOBRE ARCABOUÇO TEÓRICO

Nessa etapa da formulação conceitual do problema, buscou-se uma unificação de vertentes teóricas para que fosse possível lançar uma sistematização de conteúdos diferentes considerando-se que esses pudessem complementar uns aos outros.

Considerando as atividades urbanas e suas relações funcionais e espaciais, a primeira ideia que veio à mente não era exatamente nova, pois desde a década de 60 a interação espacial e a atratividade urbana vêm sendo trabalhadas em modelos gravitacionais. A diferença surgiu na desconstrução da atratividade urbana através da identificação de subsistemas coexistindo na cidade, mantendo ou trazendo modificações intra-urbanas.

Essa premissa permite identificar quais subsistemas atuam em cada parte e as possíveis modificações desses que por sua vez iriam influenciar áreas urbanas, causando transformação espacial e de uso do solo. As atratividades geradas pela alocação de atividades são consideradas como elementos catalisadores de transformação ou manutenção das relações funcionais entre as áreas urbanas. Desse modo, interfeririam na geração de transformações espaciais e de uso do solo numa perspectiva temporal, e não apenas imediata como vinham sendo usados.

O universo da física clássica mecanicista passa agora a ser ocupado pela física quântica em sistemas longe do equilíbrio. Além disso, a auto-organização substitui a normatividade trazendo desequilíbrios e comportamentos emergentes e inesperados.

Esse conceito traz uma característica dinâmica a um sistema visto tradicionalmente de forma estática, como nos primeiros modelos baseados na lei gravitacional de Newton. Inserido em um campo ligado aos sistemas complexos a interação espacial passa a fazer parte de um arcabouço teórico que não procura a chegada a um ponto de equilíbrio dos sistemas estudados, mas sim à compreensão de um fenômeno ativo e contínuo.

A estrutura urbana é então o resultado de um processo de coevolução, que surge da interação entre componentes diferentes em um mesmo sistema. Esse sistema urbano passa agora a ser considerado dentro de uma visão de mundo auto-organizada onde a ordem surge a partir de relações que se estabelecem tanto espaciais, quanto funcionais como propriedades emergentes que permanecem sendo alteradas ao longo do tempo.

A própria definição de atratividade é mais uma vez modificada, pois pode se referir à atratividade das atividades que causam fluxos entre áreas urbanas e, além disso, a um estado para o qual o sistema estudado irá evoluir. Ou seja, cada sistema tem uma série de possibilidades de estados locais em seu desenvolvimento, que também podem ser considerados como atratores do sistema.

Os estados locais dentro de um sistema urbano trazem ainda a característica competitiva. A diferenciação espacial e o acesso limitado a vantagens locais por muitas vezes são atraentes a diferentes atividades. Em alguns casos a competição pode levar à modificação dos subsistemas urbanos vigentes trazendo transformação espacial e de uso do solo. Em outros casos a cooperação permite a existência de dois ou mais subsistemas co-existindo na mesma área através de cooperação.

O arcabouço teórico que foi levantado nesse trabalho permitiu a formulação de um modelo capaz de descrever e simular a formação e transformação da estrutura urbana baseado na concepção de um sistema dinâmico e auto-organizado para descrever e simular a dinâmica urbana no que se refere a seu crescimento, ordenação e transformações internas.

O comportamento emergente surge a partir de atividades que se alocam formando comportamentos complexos no coletivo. Os diferentes subsistemas apresentam formação de estruturas a partir da interação com os demais, ou seja, da mesma forma como cada subsistema de variáveis coletivas ligadas à estrutura global, essa também é modificada pela formação e evolução em níveis mais baixos de organização.

5.3 MODELO POTENCIAT

O desenvolvimento de um modelo que pudesse descrever o processo de formação da estrutura urbana a partir dos conceitos apresentados acabou surgindo de forma natural dentro da pesquisa. Após o levantamento e descrição dos elementos principais que seriam levados em consideração para o estudo de transformação espacial e de uso do solo, a construção do modelo veio para sistematizar as informações apresentadas no arcabouço teórico desse trabalho.

O modelo POTENCIAT foi desenvolvido a partir de um algoritmo básico a fim de simular a evolução da estrutura urbana através de relações espaciais e funcionais que promovem a geração de diferentes atratividades, mediados pela distância.

Assim, considerou-se o Sistema Urbano e suas relações de modo desagregado com subsistemas interagindo uns com os outros, de modo a formar Sistemas mais amplos em escalas e com propriedades emergentes. No Modelo POTENCIAT, esse processo ocorre em escalas progressivamente mais amplas. Dessa forma, define-se que as escalas são correlacionadas, de modo que se alterando uma, as outras modificam-se de maneira não-linear.

Estímulos causados pela transformação espacial e de uso do solo, causam reações dos subsistemas influenciados por essas alterações. Em situações de instabilidade o comportamento de um subsistema pode mudar abruptamente, podendo causar variações nos demais. Fala-se de uma causalidade circular, onde a interação dos componentes causa uma ordem global, no plano mais geral, e o padrão global subjuaga os componentes no plano mais específico.

As atratividades díspares aparecem criando impactos positivos ou negativos determinando o que se definiu como a “topografia de atratividades”. Essa topografia é gerada para cada atividade individualmente, através da interação entre as atividades do sistema e influencia a formação a continuidade da estrutura espacial e funcional. Tanto a alocação das atividades quanto sua expulsão afeta continuamente a topografia de atividades recriada a cada iteração do modelo.

Elementos ligados ao consumo de espaço como a ocupação e diferenciação espacial também foram incluídos como a medida de acessibilidade, saturação, coeficiente de ocupação e distância. Os vínculos propostos no desenvolvimento do Modelo POTENCIAT, foram modificados com o intuito de apresentar quatro simulações que evidenciaram que modificações

sutis relação nas equações de evolução levaram a configurações diferenciadas nos resultados do modelo.

A diferenciação, apesar de ser fruto de pequenas alterações, se manifestou na maneira como as atividades se relacionaram e nas formas de ocupação. Assim, foi possível a emergência de diferentes formas de organização que geraram padrões espaciais diversos, pois as diferenciações não se limitaram à comparação dos resultados finais das quatro simulações, mas também ocorreram ao longo da evolução de cada uma.

O desenvolvimento do modelo a partir de um A.C. proporcionou uma plataforma interessante de simulação e avaliação dos resultados, permitindo o delineamento da dinâmica de transformação espacial e de uso do solo de forma descentralizada. A escolha da abordagem baseada em autômato celular também veio da possibilidade de se tratar com o espaço de forma mais desagregada, além da aproximação de dados existentes em imagens de satélites em formato “raster” que, no futuro da pesquisa, pode trazer informações importantes para a aproximação do modelo a situações reais.

A formação de redes, presentes no arcabouço teórico desse trabalho, trouxe à tona a ideia de sistemas interagindo com outros sistemas, de modo a formar Sistemas mais amplos em escalas e com propriedades emergentes. Dessa forma, o tratamento das relações de atratividade intra-urbana é desagregado, sem deixar de influenciar na estrutura global do sistema. Dessa forma essa metodologia poderia ser utilizada para contextualizar, simular e analisar as redes socioeconômicas que influenciam na formação da estrutura urbana.

A opção por apresentar simulações diferenciadas pelas equações de evolução deve-se à necessidade de compreensão das estruturas geradas a partir das relações estabelecidas dentro do modelo antes da aplicação em sistemas reais. Dentro dessa necessidade de compreensão dos resultados, uma série de medidas e análises foi aplicada sob forma de indicadores que pudessem explicitar em que medida as estruturas simuladas poderiam se assemelhar a sistemas reais.

5.4 DISCUSSÃO SOBRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Com o objetivo de explicitar em que medida os resultados provenientes de cada simulação teriam relações com qualidades presentes em sistemas reais, cinco métodos de avaliação foram aplicados analisando diferentes aspectos das estruturas geradas pelo modelo. São eles:

distribuição de densidades, estatística espacial, análise de redes complexas, agrupamentos em análise multivariada e geometria fractal.

A análise de densidades nas diferentes áreas das ocupações simuladas surgiu da necessidade de apresentação de um parâmetro de ordem que fosse capaz de indicar o comportamento dos diferentes subsistemas ao longo das iterações do modelo. Assim como na água, a densidade das moléculas é utilizada para detecção de mudanças de fase entre estadosólido, líquido e gasoso, a densidade das atividades seria capaz de descrever as interações entre subsistemas que fizerem parte de uma mesma área.

Esse tipo de avaliação não constitui uma medida como as posteriores apresentadas aqui. Na verdade o que se pode apreender dessa informação é a existência de padrões que surgem a partir do processo de competição, cooperação e escravização que aparecem nos gráficos como o comportamento da concentração de densidade de cada atividade.

Note-se que as informações contidas nesses gráficos não são medidas diretas e exatas, mas sim, elementos indicadores sobre comportamentos das atividades em dados sistemas. Esses dados, que aparecem no gráfico de densidades de forma conjunta, forneceriam informações sobre as tendências de evolução das diferentes atividades e as possibilidades de futuros desenvolvimentos.

Dessa forma, a utilização das densidades como parâmetro de ordem permite uma compreensão mais acurada sobre o sistema de estudo já que pode representar ao mesmo tempo as transformações em cada subsistema e as conseqüências que essas mudanças trazem aos demais.

Além disso, o estudo das densidades sobre os resultados do Modelo POTENCIAT permite a confirmação de comportamentos diferenciados nas diversas áreas urbanas ao invés da formação de anéis de ocupação como tradicionalmente ocorre nos modelos baseados em Economia Neoclássica. Certamente essa medida deverá ser alvo de refinamentos que permitam a aplicação em casos reais já que os resultados do modelo POTENCIAT são ainda bastante abstratos.

Essa avaliação se complementa com a apresentada a seguir, onde o software OpenGeoDa 0.9.8.14 foi utilizado para detectar propriedades relacionadas à formação de grupos de cada atividade individualmente.

Como já dito, a dependência espacial é uma premissa do modelo. Apesar disso, considerou-se necessária a aplicação de uma análise que confirmasse essa propriedade. Além disso, a formação de grupos significativos oferece também a possibilidade de se visualizar espacialmente o comportamento de cada atividade, permitindo a comparação com os resultados da avaliação das densidades citada anteriormente.

Ao contrário do estudo de densidades que apresenta uma descrição local, a identificação dos grupos mais significativos fornece uma visão global do sistema. A estatística espacial permite a visualização e, ao mesmo tempo, a distribuição de densidades urbanas sobre todo o território.

Se aplicado e uma seqüência histórica, pode-se observar também a evolução do comportamento do sistema urbano no que se refere à formação e migração dos grupos mais significativos de cada atividade individualmente, configurando comportamentos esperados ou surpreendentes em cada simulação.

Essa análise demonstrou a formação de grupos em cada subsistema analisado. Também foi possível visualizar a “migração” desses grupos mais significativos e a diferenciação nas áreas de maior concentração, assim como os dados preliminares sobre Santa Cruz do Sul/RS, que serviram como referência para a comparação dos dados fornecidos pelo modelo.

Até esse momento, as avaliações se deram a partir da distribuição das densidades levando em consideração o sistema espacial como um todo. Após a confirmação da geração de estruturas onde a alocação das atividades cria dependência espacial e comportamentos diferenciados em áreas diversas das ocupações, surge a necessidade de compreensão das relações espaciais que se estabeleceram em cada simulação.

Com essa preocupação, a análise se dirigiu para a avaliação de relações espaciais difíceis de serem apreendidas pela simples observação, principalmente se tratando da apresentação em formato raster. Dessa forma a redução da rede para os vértices e as ligações realmente ocupados por cada subsistema serviu para revelar os tipos de estruturas que se desenvolveram nas simulações do Modelo POTENCIAT.

Em um Sistema Complexo cada subsistema possui um processamento interno de informações, de modo que ocorre uma relação funcional entre os subsistemas. E, assim, geram-se propriedades coletivas complexas. Pode-se então considerar que um Sistema Complexo é um

conjunto de partes ou subsistemas com processamentos internos singulares, conectadas entre si, de modo que formam uma unidade coletiva com uma dinâmica própria e com propriedades emergentes. Essas características apareceram como propriedades emergentes nas estruturas geradas no que se refere à ocupação de cada atividade individualmente.

Dessa forma foram aplicadas medidas de centralidade que pudessem trazer à tona elementos considerados fundamentais para identificação dos subsistemas urbanos como redes não-aleatórias, ou seja, com organização e formação de estruturas.

Foram captadas características como, por exemplo, a informação mútua da estrutura entre os passos discretos do modelo, formação de comunidades, geração de centralidades relacionadas à proximidade, grau de intermediação e detecção de centros. Esses elementos foram avaliados com base na teoria dos grafos e a utilização do software PAJEK (1996, 2010 V. Batagelj, A. Mrvar).

Nessa fase da avaliação dos resultados, foi possível identificar as estruturas formadas individualmente por cada subsistema ou atividade, ou seja, além da estrutura e funcionamento global de cada sistema simulado.

A informação mútua foi confirmada na análise, principalmente pela manutenção do núcleo original de ocupação com valores altos de centralidade, por proximidade, grau de intermediação e detecção de centros, mesmo nas ocupações mais rarefeitas. Além disso, pôde-se observar a formação de comunidades em todos os subsistemas analisados. Mesmo que o Sistema total apresentasse uma forte unidade, os subsistemas formados por cada atividade individualmente apresentaram estruturas típicas de redes não aleatórias.

A teoria dos grafos ainda serviu como base para uma avaliação da formação de grupos, agora levando em consideração todas as atividades ao mesmo tempo em uma análise multivariada onde as propriedades espaciais também foram levadas em consideração.

Dessa avaliação pôde-se definir a existência de áreas urbanas com várias atividades alocadas ao mesmo tempo em uma situação de cooperação, normalmente localizadas no centro urbano, ou núcleo inicial de ocupação. Também foi possível identificar áreas especializadas com

o predomínio de uma atividade sobre outras, como ocorreu com o exemplo real de Santa Cruz do Sul, onde também foi aplicada a análise através do software SKATER⁵³ (REIS, LAGE E ASSUNÇÃO, 2003)

Por último, foi aplicada uma medida de forma para a comparação dos resultados das simulações com a análise feita em sistemas reais tanto em sua borda externa, quanto nas áreas ocupadas pelas diferentes atividades. A avaliação da forma de ocupação, distribuição e evolução espacial foi efetuada através de uma medida que levou em consideração as irregularidades, fragmentação e a auto-similaridade ao longo do tempo.

A dimensão fractal aplicada em uma perspectiva histórica permitiu a observação de momentos de transição em sua estrutura e o alcance de patamares diferentes de organização. Algumas características relacionadas à forma de ocupação foram encontradas tanto nas cidades analisadas, quanto nos resultados do Modelo POTENCIAT.

Com relação à borda externa dos sistemas totais, a tendência ao longo do tempo é a homogeneização da forma, com os valores de dimensão fractal se ficando cada vez mais próximos de 1, considerado como o valor das formas perfeitas. Por outro lado, identificou-se fragmentação das formas quando as atividades foram levadas em consideração individualmente. Dessa forma, os valores acabaram, com poucas exceções, crescendo à medida que os sistemas foram de desenvolvendo e as interações entre os subsistemas se tornaram mais contundentes. Foi possível identificar assim o caráter contraditório da estrutura urbana que se fizeram presentes nos casos reais e nos sistemas simulados.

Todas as medidas e avaliações foram aplicadas nos sistemas simulados e reais indicando alguns pontos de identificação entre eles. As análises se mostraram complementares trazendo à tona características variadas como a organização interna, dependência espacial, comportamento dos sistemas, estrutura espacial, agrupamento e forma.

⁵³ Spatial 'K'luster Analysis by Tree Edge Removal

5.5 CRÍTICAS E POSSIBILIDADES DE ESTUDOS POSTERIORES

Dentro de um contexto de sistemas complexos e auto-organização dos subsistemas urbanos, as relações de atratividade, a formação da estrutura espacial e dos seus processos de mudança leva à necessidade compreensão do fenômeno com o objetivo de gerar métodos de descrição, compreensão e simulação de cenários futuros.

Um simulador é um algoritmo ou procedimento que representa o comportamento de um sistema em uma escala de tempo. A simulação de processos urbanos permite a geração de cenários, a partir dos quais se pode: orientar o processo de tomada de decisão, proceder a análises e avaliações de sistemas e propor soluções para a melhoria de desempenho. Todos estes procedimentos podem ter por conotação parâmetros técnicos e, ou, sócio-econômicos.

Em um sistema de planejamento a utilização de modelos eficientes sobre os problemas urbanos, especialmente em relação às possibilidades de transformação espacial e de uso do solo, forneceria um valioso sistema de suporte à decisão capaz explorar aspectos dinâmicos do fenômeno. Dessa forma cada decisão de planejamento estaria baseada em uma leitura acurada da situação real e das relações afetadas por cada decisão, assim como seus impactos sobre a estrutura urbana tanto em seu aspecto global quanto local.

O Modelo POTENCIAT trata de dinâmicas do uso do solo urbano e poderia ser utilizado para a identificação vetores de crescimento urbano e de suas tendências gerais de uso do solo. A utilização de modelos baseados em A.C., como no caso desse trabalho, são um meio promissor para se trabalhar com sistemas não lineares e longe do equilíbrio.

Uma qualidade buscada nesse modelo urbano seria a capacidade de reunir, de uma forma operacional, aspectos da realidade com o objetivo de trazer à tona a forma como os mecanismos de várias áreas atuam em conjunto. Essa integração seria aplicada a diferentes características da simulação de sistemas urbanos a fim de tratar de problemas como o crescimento, alocação e distribuição de atividades. Dentro desse conceito, o modelo ainda exige uma melhor formalização do estoque construído servindo como mediador dessas transformações espaciais e de uso de solo em função de sua perenidade na estrutura urbana.

Até esse momento, porém, o modelo POTENCIAT ainda está em um ponto abstrato de seu desenvolvimento. Informações importantes como condicionantes ambientais, infraestrutura e topografia ainda não foram adicionadas às variáveis consideradas. A integração com um SIG é

fundamental para vincular ao modelo essas variáveis, sofisticando as simulações e trazendo-as mais próximas de situações reais.

Tradicionalmente, o Geoprocessamento ainda enfatiza a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. Isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é o mapa. A integração entre modelos tipo A.C. e um modelo dinâmico como o POTENCIAT viria compensar as limitações de cada abordagem.

Outro ponto importante a ser desenvolvido na continuidade desse trabalho é o aperfeiçoamento do sistema de avaliação dos resultados apresentados no capítulo 4. Nesse trabalho, os resultados das simulações forma submetidos aos mesmos testes aplicados a sistemas reais para verificar possíveis pontos de coincidência entre os comportamentos dos sistemas simulados a obtidos do sistema real em um mesmo formato.

Dentro desse conceito, a forma de avaliação dos resultados aqui apresentada, mereceria também uma continuidade para o desenvolvimento de sistemas de avaliação capazes de lidar com diferentes aspectos de um mesmo objeto, sendo ele um bairro, uma cidade, ou uma região metropolitana. Esse seria um importante campo de desenvolvimento do trabalho para construir indicadores de desempenho urbano e dirigir o planejamento urbano em direção de cidades com mais eficiência, equidade e sustentabilidade.

6 BIBLIOGRAFIA

ABLER, R.F., ADAMS, J., GOULD P (1971). “Spatial Organization: The Geografer’s View of the World”. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

ABRAMO, P. (2001). “Mercado e Ordem Urbana. Do Caos à Teoria de Localização Residencial”. BCD União de Editoras S.A. Rio de Janeiro, RJ. Brasil.

ALBERTI, M. (1999). “Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework.” Environment and Planning B; Planning and Design 26:605-630.

ALLEN, SANGLIER (1981), “Urban Evolution, Self-organization, and decision making.” Environment and Planning A 13:169-183.

ALLEN, P. M., (1982) " Cities and regions as evolutionary, complex systems". (Geographical Systems 4, p. 103-130)

ALLEN, P. M., (1997) " Cities and regions as Self-Organizing Systems, Model of Complexity". (Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, Netherlands).

ALONSO, W. (1961) “Location and Land Use”. Cambridge, MA: Harvard University Press.

ALVARENGA, B., MAXIMO, A. (2005) “Curso de Física Volume 2” Editora Scipione. São Paulo,

ASSUNÇÃO R.M., LAGE J.P. E REIS E.A. (2003) “Análise de Conglomerados Espaciais via Árvore Geradora Mínima”. Submetido a *Revista Brasileira de Estatística*.

ASSUNÇÃO R.M., LAGE J.P. e REIS E.A. (2003) “Análise de Conglomerados Espaciais via Árvore Geradora Mínima”. *Revista Brasileira de Estatística*.

BARNES, J. A. (1954). “Class and Committees ina Norwegian island parish. Human Relations. 7. 39-58.

BARRA, t. De La (1989). “Integrated Land Use and Transport Modelling.” Cambridge, MA: University Press.

BATTY M., LONGLEY P. A. (1986). “The Fractal simulation of urban structure”. Environment and Planning A 18:1143-1179.

BATTY M., XIE Y. (1997). “Possible urban Automata”. Environment and Planning B; Planning and Design 26:605-630.

BATTY, M. (1976). “*Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions*”. Cambridge, UK:Cambridge University Press,. 381 p.

BATTY, M. (2003). “AGENT-Based Pedestrian Modelling” in Advanced Spatial Analysis, The CASA Book of GIS.” Longley, P. And Batty, M. Eds. ESRI Press,

Redlands, USA.

BATTY, M. (2003). Agents, Cells and Cities: New Representational Models for Simulating Multi-Scale Urban Dynamics. University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis. http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper65.pdf

BATTY, M., COUCLELIS, H. E EICHEN, M. (1997). Special Issue: urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B* 24.

BATTY, M., LONGLEY, P. A., (1991). “Fractal cities: A Geometry of Form and Function” (Academic Press, London).

BENENSON, I., OMER, I. e HATNA, E. (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B; Planning and Design* 29:491-512.

BENIGUI, L. , BLUMENFELD-LIEBERTHAL, E. , and BATTY, M. . Macro and micro dynamics of city size distributions: The case of Israel. *CASA Working Paper 139, UCL, 2008*

BERLIANT, M., PAPAGEORGIOU , Y. e WANG,P. (1990). “On Welfare Theory and Urban Economics”. *Regional Science and Urban Economics*”, 20.

BERTALANFFY, L. V, (1975). Teoria Geral dos Sistemas - Fundamentos, Desenvolvimento e Aplicações – SP. Ed. Vozes.

BERTUGLIA, C.S, Wilson. A.G. (1987) "Urban Systems: Contemporary Approaches to Modeling". Cro Helm, USA, -Cap 1 e 2

BRIASSOULIS, H. (2000).“Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches”. Lesvos, Greece. - University of Aegean.

BURGESS, E. (1925) “The City”, Chicago, University of Chicago Press, EEUU.

BURROUGH, P. (1998) “Dynamic Modelling and Geocomputation. Geocomputation: A Primer”. P Longley, M Batty and R. McDonnell. London, John Wiley & Sons.

BURROUGH, P.A.; MCDONELL, R. (1998) “Principles of Geographical Information Systems.” Oxford University Press,

CHAPMAN, G. P. (1977) Human and Environment Systems: A Geographer’s Appraisal (Academic Press, London).

CHRISTALLER, W., (1933). "Central Places in Southern Germany". Tradução Inglesa por C. W. Baskin. Londres: Prentice Hall, 1966.

CHRISTOFOLETTI, A . (1998) “Perspectivas para el análisis de la complejidad y la autoorganización en sistemas geomorfológicos”, In: MATTELUCCI, S. D., BUZAI, G.D. (orgs) (1998). “Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial”, Buenos Aires, Eudeba, Centro de Estudios Avanzados.

CHRISTOFOLETTI, A. (1999). "Modelagem de Sistemas Ambientais". Edgard Blücher Ltda, S. Paulo, 1ª Edição.

CLARKE et al (1997). "A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area." *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp. 247 – 261.

CLIFF, A. D., ORD, J. K. (1973). "Spatial Autocorrelation". Pion, London. UK

COLIN, L. (1973). "Models in Planning: An Introduction to the Use of Quantitative Models in Planning." *Urban and Regional Planning Series ed., Vol. 4. Urban and Regional Planning Series.* Oxford: Pergamon Press.

COUCLELIS, H. (1985). "Cellular worlds: a framework for modelling micro-macro dynamics," *Environment and Planning A*, 17 585-596.

COUCLELIS, H. (1997). "From Cellular Automata to Urban Models: New principles for Model Development and Implementation." *Environment and Planning B; Planning and Design* 24:165-174.

COUCLELIS, H. (1999). "Space, Time, Geography. Geographical Information Systems." P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire and D. Rhind. New York, John Wiley: 29-38.

CRESSIE, N. (1991). "Statistics for Spatial data, Chichester, John Wiley.

CROWTER, D. ECHENIQUE, M. (1975) "Desarrollo de un modelo de estructura urbana espacial" in MARTIN, L.; MARCH, L. ECHENIQUE, M "La Estructura del Espacio Urbano". Barcelona, Editorial Gustavo Gili S. A., Espanha.

DAFFERTSHOFER A., HAKEN H., PORTUGALI J.(2001). " Self-organized settlements". *Environment and Planning B; Planning and Design* 28:89-102.

DAVID A. HENSHER, KENNETH BUTTON (Eds.), (2004). "*Transport Geography and Spatial Systems*". Handbook 5 of the *Handbook in Transport*. Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, 127-146.

De KEERSMAECKER M.-L., FRANKHAUSER P., THOMAS I. (2003). "Using Fractal Dimensions for characterizing intra-urban diversity. The example of Brussels", *Geographical Analysis* [35], 310-328

DE KEERSMAECKER, M. FRANKHAUSER, P. THOMAS, I (2003). "Using fractal dimensions for characterizing intra-urban diversity. The example of Brussels". ERSA Congress September 2003. Jyväskylä, Finland.

ECHENIQUE, M. (1968). "Models: a discussion". Cambridge, UK: University of Cambridge. *Land Use and Built Form Studies*, WP 6.

EPSTEIN, J. M., E AXTELL, R. (1996) *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Brookings/MIT Press, Cambridge, MA.

FALCONER, K.J. (1990). "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and

Applications". John Wiley & Sons, Inglaterra.

FAO/IIASA (1993). "Agro-ecological assessments for national planning: the example of Kenya". Rome: FAO,. (FAO Soils Bul, n. 67).

FENG J, CHEN Y (2010). "Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: evidence from fractals" *Environment and Planning B: Planning and Design* **37(5)** 838 – 856

FRANKHAUSER P. (1997). "Fractal Analysis of urban structures", in: E. Holm, ed. *Modelling Space and Networks, Progress in Theoretical and Quantitative Geometry*, Gerum Kulturgeografi, 145-181

FRANKHAUSER P. (1998). "The Fractal Approach : A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations". In *Population : An english selection, special issue New Methodological Approaches in the Social Sciences*, p. 205-240.

FRANKHAUSER P. e VUIDEL G. (2002). *Fractalyse 2.12*. Software disponível em (THEMA, Besançon, France)

FRANKHAUSER, P. (2004). "Comparing the morphology of urban patterns in Europe a fractal approach". Report COST Action 10 Urban Civil Engineering, Vol. 2, Structures, edited by A. Borsdorf and P. Zembri, Brussels, 79-105

FURTADO A; (1973) "Teoria dos Grafos" - Algoritmos; Editora Harper & Row do Brasil Ltda. Rio de Janeiro.

GATRELL, A. C.(1979) "Autocorrelation in Spaces". *Environment and Planning A.*, 1979, volume 11, (p 507-516).

GIBBONS, A; (1985) "Algorithmic Graph Theory"; Cambridge University.

GIBSON, J.J. (1979). "The Ecological Approach to Visual Perception". Houghton-Mifflin, Boston.

GOODAL, B., (1974), "The Economics of Urban Areas". (Pergamon Press, New York, USA).

HAKEN, H (1991). "Synergetic Computers and Cognition". Berlin, Springer.

PORTUGALI, J., HAKEN, H. (1995) "A Synergetic Approach to the Self-Organization of Cities and Settlements" (*Environment and Planning B*, volume 22, pages 35-46).

PORTUGALI, J., HAKEN, H. (1996) "Synergistics, Interrepresentation Networks and Cognitive Maps", (**PORTUGALI, J. (ed).** "The Construction of Cognitive Maps", Kluwer Academic Publishers,. Netherlands., p. 45-68)

HAKEN. H. (1983). "Synergetics: A Introduction". New York, Springer-Verlag, Orrin.

HARVEY, D., (1974). "Class monopoly rent, finance capital and the urban revolution".

(International Journal of Urban and Regional Research. 8, pages 101-131)

HILLIER, B. e HANSON, J. (1984). “The social logic of Space. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

<http://guiapoa.biz/anchieta/empresas?next=46>

<http://labgeo.blogspot.com/2007/10/apostilas-de-estatstica.html>

http://www.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados/Curitiba_em_dados_Pesquisa.asp

<http://www.quimica.ufsc.br/minatti>

<http://www.uasnet.mx/dcs/revista/No4-5/santos.htm> – **SANTOS L.** (1999) "Teoría Económica de La Innovación Tecnológica". (La Revista del Doctorado, Año II. N° Doble 4-5, Cualicán, México).

<http://www-ceel.gelso.unitn.it/events/giugno96/CopyOflangois.html> –**MARTENS, B.** (1996) "Towards a Generalised Coase Theorem"(Paper apresentado na conferência Otto Niemeyer "Commerce, complexity and evolution" na University of New South Wales, Sydney.

ISSERMAN, A. M. (1977). The Location Quotient Approach to Estimating Regional Economic Impacts. AIP Journal. January, 1977. USA

JACOBS, J. (1961). “The Death and Life of Great American Cities”(2001). Nova York: Vintage (Trad. bras. “Morte e Vida nas Grandes Cidades”. Martins Fontes; São Paulo; Brasil.

JONES, A.; CLARK, J. (1997). “Driving forces behind European land use change: an overview. In: The user needs for more harmonized land use information at the national and EU level”. Report on the CLAUDE (Coordinating Land Use and Cover Data Analyses in Europe) Workshop. Wageningen: CLAUDE, Concerted Action, EC. v. DGXII, p. 24-31.

KRAFTA R., (1999). "Spatial Self-Organization & the production of the city" (Urbana, volume 24).

KRAFTA R., (1995). "Simulador de Cidades: horizontes e problemas". Brasília, Anais do VI Encontro Nacional da ANPUR, p. 137-146.

KRAFTA, R. (1994): “Modelling intraurban configurational development”, Environment and Planning B: Planning and Design, 21, pp. 67-82.

KRÜGER, M. J. T. (1989). “On node and axial maps: distance measures and related topics - Unit for Architectural Studies”. Bartlett School of Architecture and Planning, University College London.

KRÜGER, M. J. T. (1990). “Representation and Understanding Urban Maps in Pedestrian Movement Analysis”; Bartlett School of Architecture and Planning, University College; Londres.

KRUGMAN, P. (1991). “Increasing Returns and Economic Geography.” *Journal of Political Economy*; vol 99, n°3, p483-499.

KRUGMAN, P. (1996). “The Self-Organizing Economy”. Blackwell Publishers; Oxford; Reino Unido.

KRUGMAN, P. (1997). “Development, geography, and economic theory”. Cambridge, Massachussets; MIT Press, USA.

KRUGMAN, P. (1997). “Geography, and trade”. Cambridge, Massachussets; MIT Press, USA.

KRUGMAN, P. VENABLES, A. (1997). “The seamless world: a spatial model of international specialization.”. Cambridge, Massachussets; MIT Press, USA.

KRUGMAN, P., FUJITA, M. e VENABLES, A. (1999). “The Spatial Economy: cities, regions, and International Trade.”. Cambridge, Massachussets; MIT Press, USA.

L. BENGUIGUI, E. BLUMENFELD-LIEBERTHAL, M. BATTY (2008). “Macro and Micro Dynamics of City Size Distributions: The Case of Israel”. July 2008 Centre for Advanced Spatial Analysis University College London

LAMBIN, E. F. (1994). “Modeling Deforestation Processes - A Review, Trees”, Series B: Research report. European Commission, Luxembourg.

LEÃO, S. Z. (2002). “Spatial-Temporal Model for Demand and Allocation of Landfills in Growing Urban Regions” A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Departament of Geomatics, Faculty of Engineering. University of Melbourne.

LLOYD, D., HAKLAY, M., THURSTAIN-GOODWIN, M., e TOBÓN, C. (2003), “Visualising Spatial Structure in Urban Data” in *Advanced Spatial Analysis, The CASA Book of GIS.* Longley, P. And Batty, M. Eds. ESRI Press, Redlands, USA.

LOWRY, (1964) A Model of Metrópolis. Santa Mônica, C. A.: Rand Corporation

LYNCH, K. (1981). “A Boa Forma da Cidade”. Edições 70, Lisboa/Portugal.

MANDELBROT, B. (1977). “Fractals”. Universidade da Califórnia, São Francisco

MUTH, R. F. (1969) “Urban Residential Land and Housing Markets”. In *Issues in Urban Economics*, Baltimore, Jonh Hopkins, EEUU.

NELSON, R; WINTER, S. (1982) An evolutionary theory of economic change. Harvard University Press, Cambridge –MA.

NOOY W., MRVAR A., BATAGELJ V(2005). “Exploratory Social Network Analysis with Pajek”, Cambridge University Press; UK.

NOVAES, A. G. “Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes.” São

Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.

O'SULLIVAN, D (2001). Graph-cellular automata: A Generalised Discrete Urban and Regional Model. *Environment and Planning B; Planning and Design* 28:687-705.

PAPINI, L. et al. (1998) "Learning cellular automata in a real world: the case study of the Rome metropolitan area". In BANDINI, S.; SERRA, R.; LIVERANI, F. S. (Ed.). *Cellular automata: research towards industry. Proceedings of the Third Conference on Cellular Automata for Research and Industry*. London: Springer-Verlag., p.165-183.

PEPONIS, J., (1996) "User friendly hospital lay-outs. The contributions of space syntax". In *Journal of Healthcare Design* n° 32

POLIDORI, M. C. KRAFTA, R. GRANERO, J. (2001). "Medidas Urbanas® software versão 1.15" Pelotas: Laboratório de Geoprocessamento da UFPel.

PORTUGALI, J. (1990) "Social Synergetics, cognitive maps. Em *Geography, Environment and Cognition*" (Haken, H e Stadler, M. eds, Berlin, Springer. p. 379-392)

PORTUGALI, J. (ed). (1996) "The Construction of Cognitive Maps", Kluwer Academic Publishers., Netherlands., p. 11-44)

PORTUGALI, J., (1997). "Self-Organizing Cities" (Elsevier Science, Ltd., Great Britain).

PORTUGALI, J., BENENSON, I., OMER, I., (1994). "Sociospatial Residencial Dinamics: Stability and Instability within a Self-Organizing City." (*Geographical analysis*, volume 26, pages 321-340. Ohio State University Press)

PORTUGALI, J., BENENSON, I., OMER, I., (1997). "Spatial Cognitive Dissonance and Sociospatial Emergence in a Self-Organizing City" (*Environment and Planning B*, volume 24, pages 263-285)

PRIGOGINE, I. (1977). "Self organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations"; New York, Wiley.

PRIGOGINE, I. (1980). *From being to becoming: time and complexity in the physical sciences*. New York: W. H. Freeman.

ROMER (1986). "Endogenous Technological Change." *Journal of Political Economy*, v.98, n°5, p.S71-S102.

SCHELING, T. C. (1978) *Micromotives and Macrobehavior*, W. W. norton and Company, New York.

SCHUMPETER, J. (1976) "Teoría del desenvolvimento económico". Editora FCE, México, 4ª Edição

SEMBOLONI, F. (1997). "An urban and regional model based on cellular automata." *Environment and Planning B-Planning & Design*, 24 (4) 589-612.

SHANNON, C. E. (1948). "A mathematical theory of communication," *Bell System*

Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October

SKILLING , H (1997). “An operational view”. American Scientist v.52, p. 145-166.http://www.usp.br/fau/docentes/deprojeto/c_deak/CD/4verb/usodosolo/index.html

SMITH, N., (1982) "Gentrification and uneven development".(Economic Geography 58, pages 138-55)

SOUZA, C. F. de; MÜLLER, D. M. (1997). “Porto Alegre e sua evolução urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade”.

SOUZA. C.F. (2007). “Porto Alegre e sua Evolução Urbana”. Editora: UFRGS – Univ. Fed Rio Grande do Sul.

STEADMAN J.P. (1983) “Architectural Morphology”. Pion. Londres.

TIEBOUT, C. (1965) Exports and Regional Economic Growth. Journal of Political Economy 64, April. USA

TOBLER W., (1970) “A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region” Economic Geography, 46.

TORRENS, P. M. (2001). “New advances in urban simulation: cellular automata and multi-agent systems as planning support tools”, (Working Paper Series).

TORRENS, P. M. (2003). “Automata-Based Models of Urban Systems” in Advanced Spatial Analysis, The CASA Book of GIS.” Longley, P. And Batty, M. Eds. ESRI Press, Redlands, USA.

TORRENS, P.M. (2001). “Can Geocomputation save Urban Simulation? Throw Some Agents into the Mixture, Simmer and Wait”. CASA working paper. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London. www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.

VYGOTSKY, L.S. (1978). “Mind in Society”, Cambridge University Press, Cambridge Mass.

WADDELL, P. (2003). “UrbanSim: modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning”. Journal of the American Planning Association, v. 68, n. 3, p. 297-314, 2002.

WAGNER, P., WEGENER, M. (2007). “Urban land use, transport and environmental models: Experiences with an integrated microscopic approach”. *disP* 43(170):45–56.

WEBER, A . (1909) “Über den Standort der Industrien”, Tübingen, tradução para o inglês (1929) “Alfred Weber’s Theory of the Location of Industries”. Chicago, University of Chicago Press.

WEGENER, M. (1986). “Integrated forecasting models of urban and regional systems”. In: Integrated Analysis of Regional Systems (P.W.J. Batey, M. Madden, eds.). London Papers in Regional Science 15, 9-24.

WEGENER, M. (1994) Operational Urban Models: state of art, Journal of the American Planning Association, vol 60, nº 1, p. 17 – 29.

WEGENER, M. (1995). “Current and future land use models.” In: Travel Model Improvement Program Land Use Modeling Conference Proceedings (G.A. Shunk, P.L. Bass, A.C. Weatherby, L.J. Engelke, eds.), 13-40. US Department of Transportation, Washington, DC

WEGENER, M. (2004). Overview of land use transport models. in: Hensher, D.; Button, K.J.; Haynes, K.E.; Stopher, P.R. (eds.): Handbook in Transport, Vol. 5. Transport, Geography and Spatial Systems. Oxford: Pergamon/Elsevier, pp. 127–146.

WEIDLICH, W. (1987). Synergetics and Social Science, In: Grahan, R. Wunderlin, A. (eds) (1987). Laser and Synergetics, Springer-Verlag.

WEIDLICH, W. (2000). *Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modelling in the Social Sciences*. Dover.

WEISE, P. (1996) “Evolution and Self-Organization” in Journal of institutional and theoretical economics, vol 152, nº 4.

WILLUNSEM, O . (1994) “Modelling Transport”. West Sussex, Jonh Wiley & Sons Ltd. Uk

WILSON, A. e DEARDEN, J (2010). From the issue entitled "Special Issue: Complexity, Evolution and Spatial Phenomena “Phase transitions and path dependence in urban evolution” Journal of Geographical Systems Volume 13, nº 1, 1-16

WILSON, A.G., (1970) "Entropy in Urban and Regional Modelling" (Monographs in Spatial and Environmental Systems Analyses. London: Pion)

WINGO, L., (1961). "Transportation and Urban Land". Baltimore: Jonh Hopkins for resources for the future.

WINK, R. (2002). “Santa Cruz do Sul: urbanização e desenvolvimento”. Santa Cruz do Sul: EDUNISC.

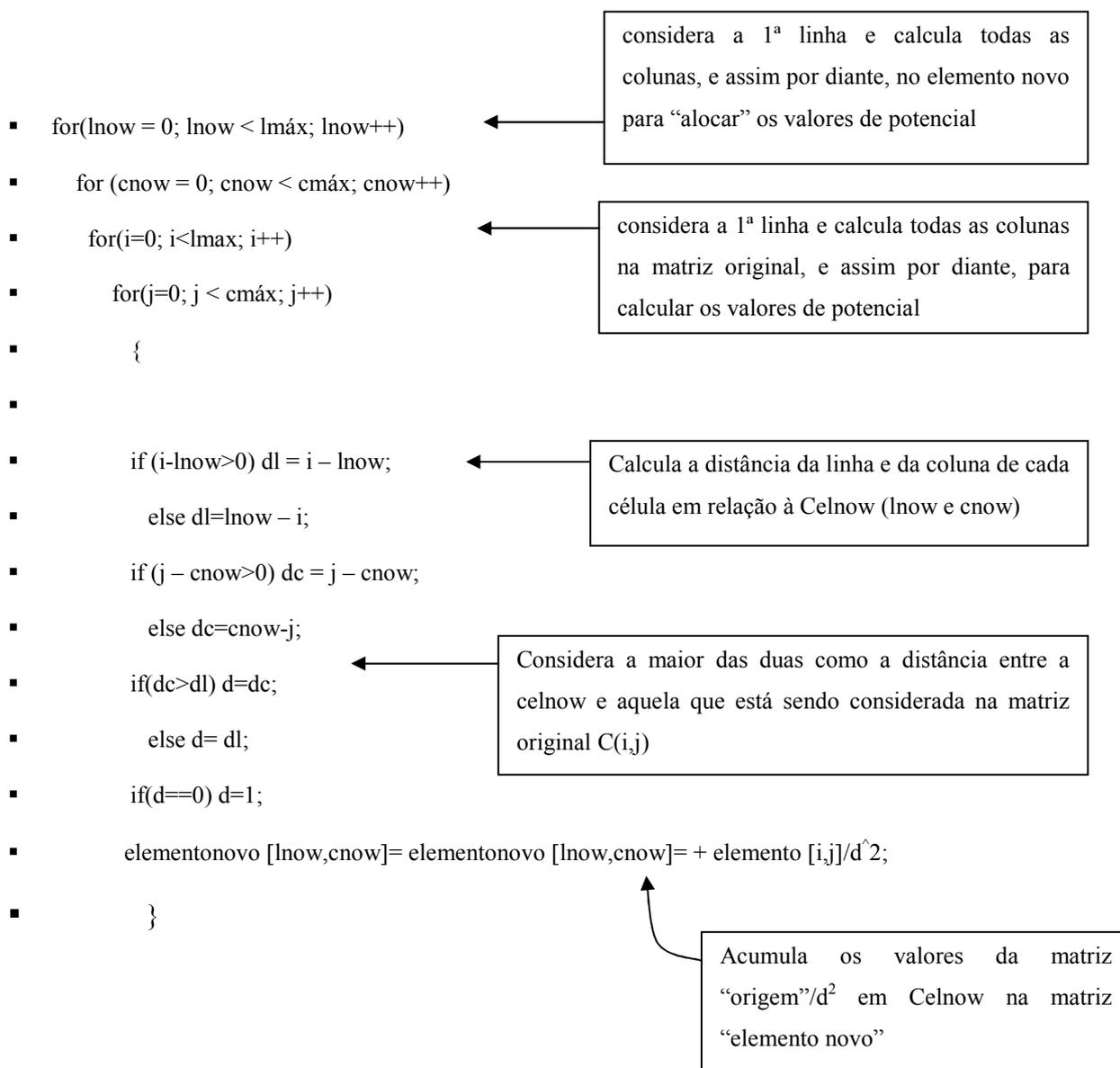
WOLFRAM S. (1983). “Statistical mechanics of cellular automata” Rewiew of Modern Physics. 55:601-643.

WU, F. (1998). “An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city”. (Environment and Planning B: Planing and Design, Volume 25 p. 731.

6.1 ANEXO 1

ALGORITMO DE CÁLCULO DE DIFERENÇA DE POTENCIAL

- **dc** (distância da coluna considerada para o cálculo)
- **dl** (distância da linha considerada para o cálculo)
- **d** (distância da célula)
- **lmáx** (número máximo de linhas do sistema)
- **cmáx** (número máximo de colunas do sistema)
- **lnow** (linha da célula que está sendo calculada)
- **cnow** (coluna da célula que está sendo calculada)



Matriz “origem” com valores reais (quantidade de agentes localizados em cada célula que exercem a mesma atividade)

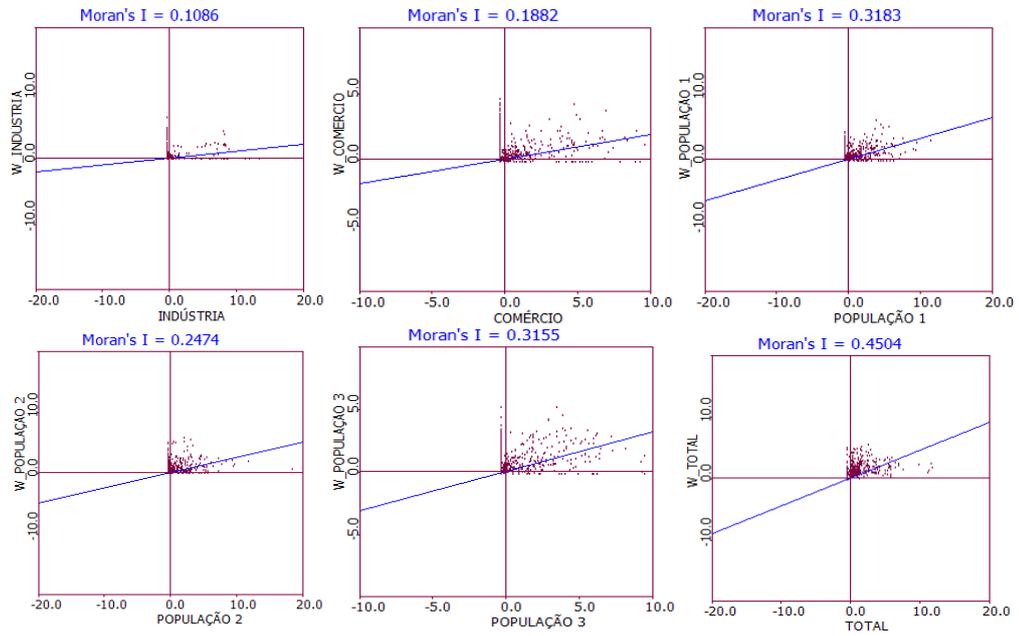
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Matriz “elemento novo”⁵⁴ com valores de potencial de atratividade

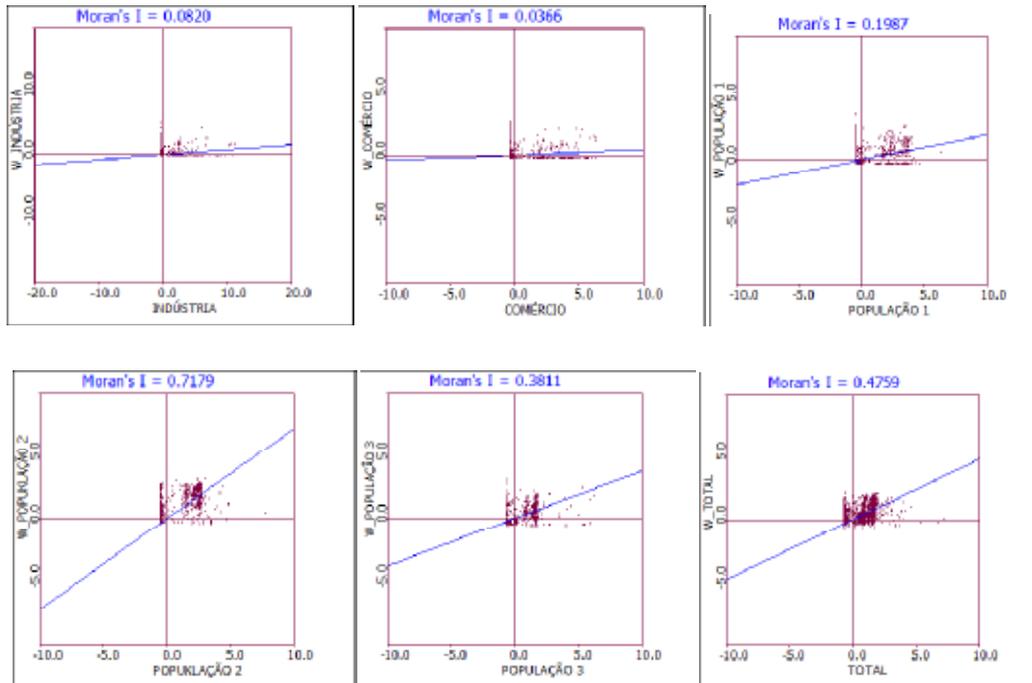
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1,451 | 1,868 | 1,868 | 1,590 | 1,076 |
| 2 | 1,5 | 4,111 | 4,861 | 2,333 | 1,125 |
| 3 | 1,5 | 2,75 | 6,5 | 2,472 | 1,125 |
| 4 | 1,222 | 2,055 | 2,805 | 2,055 | 1,125 |
| 5 | 0,979 | 1,118 | 1,118 | 1,118 | 0,979 |

⁵⁴ Esta matriz traz os resultados da equação 4 (P_{calc}) para cada célula do sistema.

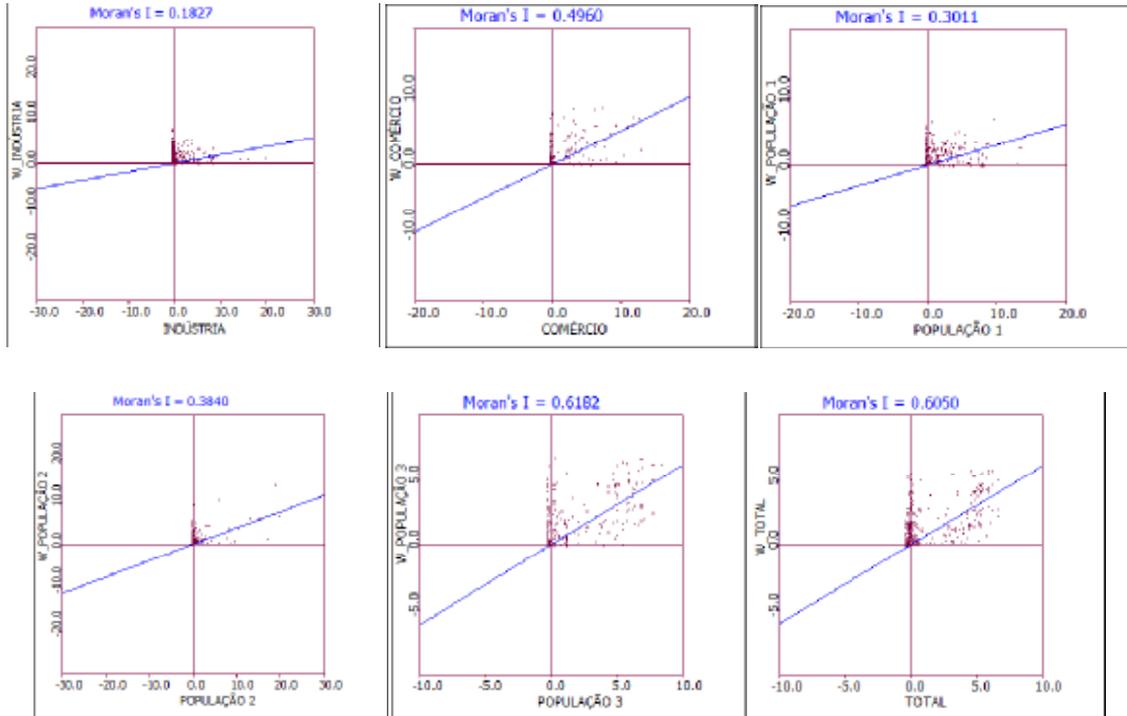
Simulação 1: Gráficos Resultantes da aplicação do Índice de Moran



Simulação 2: Gráficos Resultantes da aplicação do Índice de Moran



Simulação 3: Gráficos Resultantes da aplicação do Índice de Moran



Simulação 4: Gráficos Resultantes da aplicação do Índice de Moran

