

Universidade Federal de Pelotas
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Dissertação de Mestrado

Crescimento Urbano e Hidrografia:

dinâmicas morfológicas e articulação à paisagem natural.

Otávio Martins Peres

Pelotas, dezembro de 2010.

Universidade Federal de Pelotas
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Título do Trabalho:

**Crescimento Urbano e Hidrografia:
dinâmicas morfológicas e articulação à paisagem natural.**

Autor:

Otávio Martins Peres

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Linha de Pesquisa:

Arquitetura, Patrimônio e Sistemas Urbanos.

Orientador:

Maurício Couto Polidori, Dr.

Comissão de Avaliação:

Romulo Celso Krafta, PhD.

Programa de Pós-graduação em Planejamento urbano e Regional - UFRGS

Gustavo Daniel Buzai, Dr.

Programa de Estudios Geográficos - Universidad Nacional de Luján (Argentina)

André Luiz Lopes da Silveira, Dr.

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

Adriana Araújo Portella, PhD.

Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo - UFPel

Agradecimentos

em especial,

ao orientador Maurício Couto Polidori... pelo incentivo, motivação e inspiração. Incessável.

aos colegas do Laboratório de Urbanismo... que me acompanharam nesta trajetória.

aos colegas, professores e funcionários do PROGRAU... que juntos ingressaram no desafio de iniciar este programa.

à CAPES... pelos recursos de fomento ao estudo.

aos ex-colegas e professores da UFRGS... por ter possibilitado minha formação a partir dos princípios básicos e fundamentais da arquitetura e do urbanismo. Estarão sempre.

Dedicatórias

à minha namorada e esposa, Verônica, por possibilitar a *concentração*... suporte de carinho e amor.

aos meus pais, Wolmer e Rosilena, por viabilizar a *dispersão*... incentivo, motivação e apoio.

Resumo

A dinâmica do crescimento urbano tem sido recorrente objeto de estudo para compreensão dos sistemas configuracionais do ambiente urbano, onde o crescimento externo associado à descontinuidade espacial e à fragmentação morfológica tem sido fatores associados prioritariamente ao comprometimento da eficiência da forma urbana. Entretanto, a paisagem natural que de suporte à expansão urbana configura um campo de irregularidades e diferentes resistências à conversão urbana, contribuindo na formação de falhas e influenciando na sua configuração morfológica emergente. Este trabalho procura identificar relações entre a morfologia urbana e a paisagem natural, decorrentes do crescimento urbano articulado à escala da hidrografia. Inicialmente abordagens teórica e empírica procuram identificar como questões da hidrografia podem influenciar na dinâmica do crescimento urbano, indicando as linhas de drenagem dos recursos hídricos como pontos de convergência espaço-temporal entre a atratividade urbana e interesse do ambiente natural. Núcleos urbanos têm origem prioritariamente sobre terraços divisores de água, onde o crescimento externo ocorre em espaços imediatamente adjacentes, até se deparar com os recursos hídricos onde a continuidade da produção espacial é restrita. A partir destes locais a conversão urbana passa a ocorrer em áreas além das linhas de drenagem, surgem urbanizações remotas que replicam os critérios de localização inicial. Configura-se na escala espacial da paisagem definida pela hidrografia uma dinâmica morfológica do crescimento que alterna movimentos de compactação e fragmentação da forma urbana. Esta dinâmica de crescimento urbano está implementada em recursos de modelagem urbana do Simulador do Ambiente da Cidade – SACI, de modo a abstrair o enunciado teórico a partir da lógica dos autômatos celulares e da teoria dos grafos, possibilitando a validação a partir da realidade empírica para o caso Pelotas [1815-1965]. Percorridas abordagens empíricas, teóricas e metodológicas, com enquadramento de base sistêmica, os resultados do trabalho podem ser replicados em futuras simulações do crescimento urbano com especial atenção às relações entre a forma urbana e os atributos da paisagem natural.

Palavras-chave: crescimento urbano; morfologia urbana; modelagem urbana; hidrografia, recursos hídricos.

Abstract

Urban growth dynamics has been an important object to understand the urban phenomenon and configurational systems. Urban sprawl and morphologies associated to dispersal urban forms have been a recurring problem on urban science, a dynamic that extends interfaces between urban system and natural landscape. This work identify relationships between urban morphology and natural landscape that emerge from urban growth articulated to water resources spatial scale, presuming that in macro spatial and long-term, city and environment could be reduced spatial conflicts. The urban phenomenon has a tendency to occur in isotropic planes, landscapes without restriction of nature environment. Urban growth occurs in concentric forms until interfaces with water resources, where urban growth continuity is restricted. From these places, urban growth occurs in areas beyond the water resources, in dispersal forms, replicating the landscape location patterns and growth morphologies. In this sense, the urban growth configures in spatial scale of water resources, urban growth morphological dynamics, alternating compression and fragmentation of urban form. This dynamic of urban growth is implemented in urban model SACI - City Environmental Simulator, to abstract the theoretical results to cellular automata logic and graph theory; allowing numeric correlation for reality of Pelotas [1815-1965]. From approaches based on empirical, theoretical and methodological studies, and system theory framework, the results can be replicated in future urban growth simulations, in special to study relations between urban form and natural landscape.

Keywords: *urban growth; urban morphology; urban modeling; hydrography; water resources.*

Sumário.

1. Introdução	1
1.1. Apresentação do tema e justificativa de pesquisa.....	1
1.2. Objetivos de Pesquisa.....	4
1.3. Questões de pesquisa e lançamento de hipóteses.....	5
1.4. Delineamento de Pesquisa.....	6
1.5. Estrutura de Investigação.....	9
2. Revisão teórico-metodológica.....	11
2.1. Aproximação teórica: gestão dos recursos hídricos e planejamento urbano.....	11
2.2. Abordagem sistêmica do ambiente urbano.....	18
2.3. Crescimento urbano dinâmico e a convergência para a escala da paisagem natural.....	26
2.4. Marco Teórico.....	34
3. Método	36
3.1. Modelando crescimento por diferenciação espacial e integrando cidade-ambiente.....	36
3.2. Estudo piloto: demonstrando viabilidade metodológica.....	45
3.3. Construindo um mecanismo de auto-parametrização das tensões de crescimento.....	53
3.4. Epílogo do Capítulo 3.....	61
4. Crescimento Urbano e a Hidrografia: empirismo e modelagem urbana para o caso Pelotas [1815 – 1965].....	62
4.1. Evolução urbana, morfologia e hidrografia: descrição empírica e modelos urbanos.....	63
4.2. Simulação de crescimento urbano integrado com a paisagem da hidrografia: validando mecanismo de modelagem para o caso Pelotas [1815-1965].....	75
4.3. Conclusões do estudo: realidade e simulação do crescimento para Pelotas [1815-1965].....	95
5. Conclusões.....	98
5.1. Alcance dos objetivos, limitações e contribuição do trabalho.....	98
5.2. Conclusões e respostas às questões de pesquisa.....	99
5.3. Limitações e continuidades.....	105

6. Continuidades:	
avanzando nas discussões sobre um modelo urbano articulado à hidrografia.....	108
6.1. Enunciado locacional e dinâmica de expansão.....	108
6.2. Manejo contemporâneo das águas urbanas.....	111
6.3. Crescimento urbano e ciências complexas; mecanismo físico-químico e nanotecnologia....	114
6.4. Compacidade e fragmentação: simultaneidades e convergência urbana.	118
6.5. Modelo urbano policêntrico: conectividade e intensidade urbana.	121
7. Referências Bibliográficas.....	125

Lista de Figuras.

Figura 1.1: relações morfológicas entre crescimento urbano e recursos hídricos em cidades da metade sul do estado do RS, destacadas em imagens do Google Earth: a) Arroio Grande; b) Bagé; c) Camaquã; d) Cachoeira do Sul; e) Santana do Livramento; f) Santa Maria.	7
Figura 1.2: relações morfológicas entre crescimento urbano e recursos hídricos na cidade de Pelotas-RS, destacadas em imagens de satélite do Google Earth. (recursos hídricos em traço azul, núcleos urbanos em áreas vermelhas e vetores de crescimento em traço vermelho.	8
Figura 1.3: cidades em estágios de crescimento urbano inicial, com indícios de vir a ocorrer crescimentos futuros com morfologias articuladas à escala dos recursos hídricos: a) São Lourenço do Sul; b) Tapes	9
Figura 2.1: regime de não permanência de vazões dos recursos hídricos: a) em ambiente naturalmente preservado (MIT, 2009); b) ocupação urbana em áreas de cheia natural (Santos, 2004)..	12
Figura 2.2: cheias máximas anuais do arroio Dilúvio em Porto Alegre 1889-1994 (em azul), auxiliares para determinar níveis com tempos de retorno de 2, 10 e 50 anos (Tucci, 2001).	12
Figura 2.3: convergência CA e estudos urbanos: a) pela semelhança entre unidades espaciais: quadra e célula (Barcelona); b) pixels disponibilizados em imagens de satélite (Pelotas-RS em diferentes resoluções, Polidori, 2004).	24
Figura 2.4: possibilidade de simular crescimento urbano integrado ao ambiente natural através de CA: a) crescimento concêntrico, sem a influência do ambiente natural; b) morfologia emergente impedido em topografias sup. 300m (Liu, 2009).	25
Figura 2.5: convergência modelagem urbana CA com análises de: a) diferenciação morfológica (Las Vegas 1973-1992, USGS); b) resistência espacial (Torres-RS); c) limiares ambientais (Rio de Janeiro).	26
Figura 2.6: modelos urbanos concêntricos: a) Park e Burgess, 1925; b) Hoyt, 1939; c) Alonso, 1964; d) Christaller, 1933.	27
Figura 2.7: abordagem evolutiva da teoria urbana clássica na configuração da cidade latino-americana (Janoschka, 2002).	28
Figura 3.1: articulação entre a teoria dos grafos e CA: a) representação vetorial interligando todos os pontos de um grafo; b) CA, onde a cada célula pode ser atribuído um ponto; c) integração entre grafo e CA (Polidori, 2004). ...	39
Figura 3.2: diagramas em formato de CA, representado: a) células incluídas na distribuição axial (verde); b) células incluídas na distribuição axial de buffer (verde claro); c) células incluídas na distribuição de tensões do tipo polar (azul claro e rosa); d) hipótese de células incluídas na distribuição difusa do tipo 1 (laranja); e) hipótese de células incluídas na distribuição difusa do tipo 2 (azul claro) (Polidori, 2004).	39
Figura 3.3: a) célula com carregamento urbano e natural, simultâneos; b) par de células capazes de gerar uma tensão de crescimento; c) resistência ambiental ao crescimento dada por carregamentos naturais a partir do caminho mínimo.	41
Figura 3.4: Celltype; em marrom.	43
Figura 3.5: LoadU; paleta hierárquica em escala cor vermelha.	44
Figura 3.6: Potential; paleta hierárquica em escala cor laranja.	44
Figura 3.7: ValueU; paleta hierárquica em escala cor vermelha.	44
Figura 3.8: CentrABS; paleta hierárquica em escala cor azul claro.	44
Figura 3.9: EProbT; paleta hierárquica de cor vermelha ao amarelo.	45

Figura 3.10: ResistE; paleta hierárquica em escala de cor verde.....	45
Figura 3.11: ambiente abstrato construído para experimentos iniciais com o SACI composto por um núcleo urbano re- tangular, linhas de recursos hídricos e uma matriz ambiental.....	46
Figura 3.12: inputs individuais utilizados nas simulações, construídos em grid retangular regular de 30x40 células: a) núcleo urbano central; b) leitos menores dos recursos hídricos; c) diferenciação espacial pelas bacias hi- drográficas; d) resistências aleatórias da matriz ambiental.....	46
Figura 3.13: outputs da simulação de crescimento com tensões 100% axiais, mostrando 5 estados de 30 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.....	48
Figura 3.14: outputs da simulação de crescimento com tensões 50% difusas tipo1 e 50% difusas tipo2, mostrando 5 estados de 30 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.....	48
Figura 3.15: outputs da simulação de crescimento com tensões igualmente distribuídas 50% axial e 50% difusas, mos- trando 5 estados de 30 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.....	49
Figura 3.16: gráfico comparativo das velocidades de crescimento e taxas de conversão celular para os procedimentos simulatórios antes apresentados (laranja tensões axiais; verde tensões difusas; azul, ISOtensões).....	50
Figura 3.17: dados tabulares das medidas de fragmentação relativa e compactação relativa para os casos de cresci- mento axial (laranjas), difuso (verde) e isodistribuídas (azul).....	52
Figura 3.18: outputs da simulação com mecanismo ativo e velocidades de crescimento inferior ($\lambda A=3.0$; $\lambda D=1.5$) mostrando 5 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.....	56
Figura 3.19: outputs da simulação com mecanismo ativo e lambdas default; mostrando 10 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) CentrR2; c) Potential; d) ResistE.....	57
Figura 3.20: outputs da simulação com mecanismo ativo e velocidades de crescimento superior ($\lambda A=2.0$; $\lambda D=0.5$) mostrando 5 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.....	58
Figura 3.21: evolução linear da medida de medidas de compacidade relativa para simulações com o mecanismo ativo, explorando diferentes velocidades de crescimento: intermediário (linha azul), inferior (linha vermelha) e supe- rior (linha verde).....	58
Figura 3.22: gráficos comparativos da aplicação de parâmetros morfológicos “p” inferior a 1 (em vermelho) e superior a 1 (em verde): a) contagem de células e velocidade do crescimento; b) compacidade relativa.....	60
Figura 4.1 caracterização geográfica do estado do Rio Grande do Sul, a partir de mapa de altitudes (a); divisão das bacias hidrográficas; (b) recorte espacial das Lagoas dos Patos e Mirim.....	63
Figura 4.2: ilustrações do viajante alemão Hermann Rudolf Wendroth (1852) à região do estado do RS que retratam e evidenciam a importância dos atributos da topografia e dos recursos hídricos na configuração da paisagem.	64
Figura 4.3: primeiras plantas urbanas da cidade de Pelotas-RS, a) 1815; b) 1835; destacadas os estoques existentes e indicações de expansão da malha regular.....	65
Figura 4.4: estrutura da paisagem da cidade de Pelotas no ano de 1835; destacando área urbana; estradas, percursos e caminhos; topografia formada por terraços e áreas baixas; recursos hídricos.....	66
Figura 4.5: associação da forma urbana de Pelotas aos modelos concêntrico (a) e setorial (b).....	67
Figura 4.6: Pelotas (1911). a) planta da cidade; b) rede de abastecimento de água; c) rede de esgotos. (SANEP, 1988).....	68
Figura 4.7: loteamentos difusos ocorridos na cidade, além dos limites das linhas de drenagem: a) Vila São Francisco de Paula; b) Vila Treptow; c) Vila Princesa.....	69

<i>Figura 4.8: plantas de Pelotas elaboradas pelo eng. Saturnino de Brito nos planos de saneamento de a) 1926 e b) 1947 ...</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.9: imagem aérea da cidade de Pelotas no ano de 1965, aplicadas diferenciação de brilho (áreas altas) e contraste (áreas baixas) pela topografia, destacados em azul os recursos hídricos e em vermelho o curso do canal Santa Bárbara.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.10: evolução urbana da cidade de Pelotas, com área efetivamente urbanizada representada por pontos amarelos, sobre mapa de altitudes em tons de cinza (áreas baixas em tom escuro) e os recursos hídricos em azul. ...</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.11: gráficos construídos a partir de dados numéricos extraídos da historiografia urbana de Pelotas. a) linhas de tendência logarítma das taxas de crescimento; b) dinâmicas das densidades populacionais e unidades construídas.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.12: quadro demonstrativo da convergência entre a abordagem evolutiva da teoria clássica e a divisão temporal da análise empírica do crescimento para o caso Pelotas a) 1835 - concêntrico; b) 1911 - setorial; c) 1926 - multacentralidades.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.13: delimitação e desagregação espacial para as simulações de crescimento de Pelotas, sobre representação gráfica da paisagem de suporte ao crescimento urbano.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.14: inputs construídos a partir do ambiente da cidade de Pelotas sobre grid retangular regular de 60x40 células: a) núcleo urbano em duas intensidades; b) recursos hídricos, lóaticas em azul claro e lânticas em azul escuro; c) área não pertencente ao município de Pelotas; d) matriz das bacias hidrográficas; e) matriz das áreas alagáveis; f) matriz randômica.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.15: outputs de Celltype, CentABS, CentR1 e CentR2; grids de controle para anos: a) 1835; b) 1916; c)1926; d) 1965.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.16: sobreposição dos cenários de controle de Celltype correspondentes ao ano de 1835, inicial, e 1965, final.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.17: iteração final do processo com calibração indicada quando input urbano por intensidades, predomínio difuso.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.18: iteração final do processo com calibração default do modelo, tensões ISOdistribuídas.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.19: iteração final do processo com tensões axiais e difusas iguais.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.20: construção do atributo discreto do buffer dos recursos hídricos; linhas de drenagem em azul, águas lânticas em azul claro; buffer com raio de 250 metros em transparência vermelha e atributo discreto em pixels amarelos.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.21: outputs da simulação com mecanismo ativo mostrando 8 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentR1; c) Potential; d) ResistE.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.22: gráficos da evolução dos parâmetros do mecanismo, capturados pelo “fator rh”: a) distribuição das tensões axiais (vermelho) e difusas (azul); b) lambda externo (laranja).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.23: outputs gráficos do grid “fator rh”, mostrando 8 estados de 50 iterações.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.24: gráficos comparativos das curvas com resultados tabulares de contagem de células e compacidade relativa.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.25: correlações dinâmicas do output de centralidade absoluta.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.26: correlações dinâmicas do output de centralidade do tipo 1.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.27: correlações dinâmicas do output de centralidade do tipo 2.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.28: correlações dinâmicas do output de fenótipo urbano.....</i>	<i>88</i>

Figura 4.29: gráfico de dispersão de centralidade celular do tipo 1, sobrepostos os cenários de 1835, 1916, 1926 e 1965.	88
Figura 4.30: gráfico linear representando as variações das correlações numéricas no decorrer da simulação.	89
Figura 4.31: transformação dos resultados de fenótipo urbano (Celltype) a partir de análises de vizinhança de raio 5 células.	90
Figura 4.32: semelhanças visuais na forma urbana de 1835 (a), CentABS it_04 (b); adaptação do modelo concêntrico (c).	91
Figura 4.33: semelhanças visuais na forma urbana pelo: mapa urbano de 1926 (a); resultado de CentR1 iteração_15 (b); adaptação do modelo setorial (c). Em laranja destaques externos; em vermelho os internos; e verde destaque especial.	92
Figura 4.34: pontos de interface entre a cidade e os recursos hídricos: ponte entre núcleo urbano e a estrada à oeste (a, b); estação férrea às margens do curso sul do Santa Bárbara (c, d), representadas sobre o grid do "fator rh" it. 15. (e).	93
Figura 4.35: semelhanças visuais representada pelo: mapa urbano de 1995 (a); resultado de Celltype iteração_33 (b); adaptação á teoria do lugar central (c). Em laranja interfaces externos; em vermelho os internos.	94
Figura 6.1: cidades da metade sul do Rio Grande do Sul, ocorrendo dispersas sobre o território e bacias hidrográficas.	109
Figura 6.2: conjunto de técnicas de renaturalização das áreas adjacentes aos recursos hídricos naturais (extraído de Souza e Kobiyama, 2003).	112
Figura 6.3: estruturas da água formadas a partir da superficial: a) gota sobre plano; b) suspensão de sólidos de maior massa; c) fluidez e transferência de energia (fonte: http://commons.wikimedia.org/wiki/Surface_tension)	115
Figura 6.4: analogia entre: a) forma de rompimento da tensão superficial (extraídas do vídeo "Cracking Water" http://www.youtube.com/watch?v=nK72nEjrDJE); b) representação abstrata do crescimento de Pelotas.	115
Figura 6.5: a) cristais de gelo "aleatórios" de (Bentley (1922; em http://snowflakebentley.com/); e imagens do satélite Landsat7 de b) Beijin; c) Buenos Aires; d) Paris; e) São Paulo.	116
Figura 6.6: estruturas físico-químicas da tensão superficial: a) formação molecular; b) influência do plano de suporte; c) formações em nano escala associada ao lotus-effect	117
Figura 6.7: modelos urbanos polinucleados: a) Ecópolis, de Berkeley (Downton, 2009); b) Cities Dispersion do Vêneto italiano (Viganò, 2008); c) a descompactação da forma urbana (Jenks e Dempsey, 2005).	121
Figura 6.8: formações policêntricas urbanas em três escalas: a) global cities (Fuad-Luke, 2009); b) world city network (Hall e Pain, 2006); c) região urbana (Hall e Pain, 2006).	122
Figura 6.9: a) modelo concêntrico-polinucleado; b) modelo conectividade-policentralidade (adaptado Hall e Pain, 2006).	123
Figura 6.10: múltiplas e intensas conexões entre fragmentos urbanos e naturais que ocorrem na cidade policêntrica. a) conexão viária (Forman, 2008); b) conexão social (Rowland, 2007); c) viadutos ecológicos (Forman, 2008); d) conexão natural área (Margolis e Robinson, 2007).	124

Lista de Tabelas

<i>Tabela 4.1: números correlatos que definem a iteração relacionada a cada um dos estágios do cenário de controle.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 4.2: valores numéricos da correlação entre os resultados simulados e os cenários de controle.</i>	<i>90</i>

Lista de Equações

<i>Equações 1 e 2: tensões e centralidade gerada a partir de um par de células</i>	<i>38</i>
<i>Equação 3: centralidade celular calculada a partir das diferentes formas de distribuição de tensões</i>	<i>40</i>
<i>Equação 4: potencial de crescimento celular.....</i>	<i>51</i>
<i>Equação 5 e 6: fragmentação relativa do sistema</i>	<i>52</i>
<i>Equação 7: Compacidade absoluta do sistema.....</i>	<i>52</i>
<i>Equações 8, 9 e 10: "fator rh", transferência de potenciais sobre buffer para distribuições difusas.....</i>	<i>54</i>
<i>Equação 11: composição iterativa do lambda externo.</i>	<i>55</i>
<i>Equações 12 e 13: cálculo dos valores de D1 e D2 quando aplicados "fator X"</i>	<i>60</i>

1. Introdução

Este capítulo apresenta o tema, a justificativa e o delineamento do trabalho, o qual procura uma aproximação entre dinâmicas morfológicas do crescimento urbano e a paisagem natural definida pela hidrografia. Estudos dedicados à dinâmica do crescimento têm sido um importante objeto de estudo para compreensão do fenômeno urbano; afora as questões sociais, econômicas ou culturais, entende-se que os aspectos da paisagem também podem influenciar a configuração urbana. Na paisagem natural de suporte à urbanização, as bacias hidrográficas têm papel destacado por serem os atributos evidentes na formação geomorfológica da superfície terrestre. No contexto urbano, os recursos hídricos são locais onde se sobrepõem processos ecológicos e propriedades hidrológicas dos sistemas de saneamento urbano. Da aproximação entre crescimento urbano e os hidrografia o trabalho procura identificar articulações espaciais da forma urbana à escala da paisagem natural.

1.1. Apresentação do tema e justificativa de pesquisa.

O cenário da urbanização no planeta é crescente, onde o último século inicia com 13% da população residindo em áreas urbanas e no ano de 2008 a população urbana supera os 50% da população mundial. O relatório para o biênio 2008-2009 do Programa dos Assentamentos Humanos das Nações Unidas (*United Nations Human Settlements Programme – UN-HABITAT*, 2008) prevê que no ano de 2030 o planeta contará com 8 bilhões de habitantes, sendo que desses, 60% estarão concentrados em áreas urbanas. O fato é que continuamente as cidades aumentam tanto em população, quanto em tamanho, e os aspectos espaciais decorrentes do crescimento urbano são fatores importantes para a busca por um futuro urbano de equidade social e sustentabilidade ambiental (UN-HABITAT, 2008).

Recentemente o fenômeno das *shrinking cities* (cidades em encolhimento) tem atraído a atenção da ciência urbana às causas do decréscimo populacional que as grandes cidades vêm experimentando nas últimas décadas. Entretanto, o aumento das *shrinking cities* está ligado às perdas populacionais que tem ocorrido junto aos centros urbanos tradicionais, decorrentes da intensificação do processo de suburbanização e um produto da formação de novos núcleos urbanos, que funcionam em rede, como núcleos satélites às cidades globais (Sassen, 2001; Hall e Pain, 2006). De fato, o que se tem são cidades continuamente apresentando crescimento populacional e uma intensificação recente no processo de expansão urbana associada ao crescimento periférico, à descompactação urbana e a ampliação das interfaces entre o ambiente urbano e natural (UN-HABITAT, 2008).

Estudos da ciência urbana têm indicado o crescimento espacial, interno e externo, como um processo intrínseco ao fenômeno urbano, decorrente não apenas da demanda por novos lugares nas cidades,

mas pelo contrário, o fenômeno sócio-espacial urbano corresponde a um processo produtivo em si, uma verdadeira fábrica de lugares em constante produção de espaços (Wheaton, 1982; Harvey, 1985; Soja, 1989). Sob esta perspectiva, contemporaneamente, a ciência do espaço tem abordado a cidade e suas dinâmicas morfológicas como decorrentes desta fábrica urbana, um processo com certa autonomia das decisões individuais ou taxas de crescimento dos agentes sociais (Allen, 1997; Krafta, 1999; Portugali, 2000).

A concentração humana em núcleos urbanos é decorrente da necessidade por uma intensidade nas relações sociais, que espacialmente configuram a cidade econômica no entrono de um lugar central, reproduzindo prioritariamente formas urbanas compactas e concêntricas (Park e Burgess, 1925; Alonso, 1964; Christaller, 1933). Desta forma, a descontinuidade espacial não se refere de um produto direto e exclusivo das relações sociais no espaço (Portugali, 2000; Czamanski *et al.*, 2008; Batty, 2009), é resultante da sobreposição de fatores sociais, econômicos, ecológicos e culturais, onde a paisagem natural também apresenta influências (Alberti *et al.*, 2003; Czamanski *et al.*, 2008).

A superfície terrestre que serve de suporte ao processo de urbanização e ao crescimento urbano, de fato, não se apresenta como um absoluto plano. Ou seja, não se trata de uma formação isotrópica sem nenhuma forma de influência sobre os processos que configuram a forma urbana (Nystuen, 1968). O ambiente antecessor aos núcleos urbanos é configurado por inúmeros atributos, sejam estes econômicos, de infraestrutura ou da própria paisagem natural, que influenciam o processo de urbanização de forma diferenciada, como ocorrem os espaços de produção agrícola, os sistemas de transporte preexistentes e a paisagem definida pela hidrografia, por exemplo (Benguigui *et al.*, 2001; Czamanski *et al.*, 2008; Tjallingii, 2005). Diante das características da superfície terrestre, a expansão urbana se depara com os atributos da paisagem natural e configura áreas de interface, onde se sobrepõem o sistema urbano e o sistema natural. Estas interfaces ocorrem em diferentes intensidades de transição entre o ambiente urbano e não urbano, principalmente pelas propriedades e características dos atributos naturais (Liu *et al.*, 2007).

Dentre os atributos da paisagem natural que caracterizam o campo de suporte ao processo de urbanização, a hidrografia apresenta maior destaque (Desonie, 2008). A paisagem natural, sob o ponto de vista da hidrografia, é configurada por um conjunto de bacias definidas por divisores de águas e linhas de drenagem, resultantes da formação geomorfológica associada ao ciclo hidrológico natural. De modo geral, a geomorfologia e a hidrografia são atributos que diferenciam paisagens de suporte ao crescimento urbano. No contexto urbano, além de possibilitar o abastecimento de água, as propriedades hidrológicas dos recursos hídricos naturais são utilizadas para drenagem pluvial e limpeza dos dejetos. Por outro lado, os corredores formados por linhas de drenagem e áreas adjacentes, configuram locais

que possibilitam a manutenção das propriedades ecológicas da paisagem natural internas à cidade. Em suma, os sistemas de águas urbanas são locais onde se sobrepõem interesses dos sistemas urbano e natural.

O sistema de recursos hídricos definido por águas correntes ou paradas (lóticas ou lânticas, respectivamente), como arroios, rios e lagoas, são resistências diretas e evidentes ao processo de expansão urbana. Já a configuração de áreas alagadiças adjacentes aos recursos hídricos ou linhas de drenagem, não tão evidentes na paisagem, também são formas de resistência à urbanização que ocorrem em menor intensidade (Alberti *et al.*, 2003; Viganò, 2008). Desta forma, a descontinuidade espacial urbana e a formação de vazios internos à cidade podem coincidir com os atributos dos recursos hídricos, tanto por estarem intencionalmente preservados ou por oferecerem resistências diretas à urbanização. Entretanto, na dinâmica de expansão urbana, espaços que inicialmente se apresentam como desfavoráveis à urbanização ou intencionalmente preservados, ao renovar suas posições relativas no sistema urbano em expansão, podem vir a se tornar atraentes à conversão urbana. Espaços adjacentes aos recursos hídricos, onde coexistam o sistema urbano e o natural, devido a localização intraurbana privilegiada, podem ser convertidos em áreas urbanizadas.

Diversos trabalhos tem se dedicado a estabelecer possibilidades de compatibilização e coexistência das funções urbanas e ecológicas nas áreas de transição. Embora estes trabalhos contribuam para o reconhecimento deste tipo de interface e indiquem superar visões onde cidade e natureza são absolutamente divergentes, de modo geral, se resumem na busca por tipologias que diminuam densidades urbanizadas e empreguem tecnologias construtivas de menor impacto (Moskow, 2008; Roaf *et al.*, 2009; Sweringen Jr., 2010). De fato, são poucos os avanços e entendimentos efetivos para articular a morfologia urbana e a paisagem natural, que ampliem abordagens para a macro escala e mantenham o objetivo de compatibilizar cidade-natureza no tempo e no espaço.

Por outro lado, estudos contemporâneos da ciência urbana que se aproximam aos estudos da ecologia da paisagem têm indicado a descontinuidade espacial e a dinâmica do crescimento urbano como mecanismos que conferem a vitalidade e a permanência do sistema urbano ao longo dos tempos. É sob esta perspectiva que ocorre o paradigma da sustentabilidade para a ciência urbana, a qual indica a necessidade de abordagens que envolvam todos os sistemas que compõem o fenômeno urbano interessadas na forma que ocorrem as interações em uma perspectiva espaço-temporal (Krafta, 2008).

Portanto, este trabalho parte do pressuposto que se abordados sobre uma perspectiva macro espacial e em longo prazo, crescimento urbano e ambiente natural podem ter morfologias compatibilizadas. Se os aspectos espaciais decorrentes do crescimento urbano são fatores importantes para a busca por um futuro urbano de equidade social e sustentabilidade ambiental, os sistemas de águas urbanas estão

indicados como atributos que, se preservados no processo de crescimento urbano, permitem a manutenção das propriedades dos sistemas urbanos e dos sistemas naturais. Desta forma, o trabalho pretende contribuir para melhorar entendimentos sobre a dinâmica da forma urbana que indiquem caminhos para articular cidade e a paisagem natural.

1.2. Objetivos de Pesquisa.

A partir da apresentação do tema crescimento urbano e hidrografia pode ser indicado o objetivo geral da pesquisa:

Identificar relações entre morfologia urbana e paisagem natural, decorrentes do crescimento urbano articulado à escala da paisagem definida pelas bacias hidrográficas.

O objetivo do trabalho será perseguido através de três enfoques: um no campo do conhecimento empírico, através de experimentos e estudos de caso aplicados a uma realidade delineada (objetivo “a”); outro no campo teórico, com resultados mais conceituais sobre o fenômeno urbano (objetivo “b”); e outro de caráter metodológico, com resultados instrumentais associados à modelagem da dinâmica urbana (objetivo “c”). Para cada uma das abordagens, está indicado um objetivo específico (destacado em negrito) e objetivos secundários que descrevem o modo que pretende-se alcançar resultados.

a) objetivo de caráter empírico: **abordar de modo integrado o processo do crescimento urbano e a paisagem da hidrografia, de modo a capturar dinâmicas na forma da cidade associadas às irregularidades da paisagem natural.** Como objetivo empírico secundário, aprofundar as análises descritivas do histórico processo de crescimento urbano de uma cidade real, aplicando recursos de SIG e historiografia sistêmica, de modo a fornecer parâmetros e validar os estudos de modelagem urbana.

b) objetivo de caráter teórico: **enunciar uma dinâmica do crescimento da cidade diante da presença dos atributos dos recursos hídricos, de modo a contribuir para o entendimento da morfologia urbana articulada à paisagem natural.** Como objetivo teórico secundário, o trabalho busca revisar produções recentes dedicadas à dinâmica do crescimento urbano que aproximem conceitos da ecologia urbana, teoria de sistemas e modelagem urbana.

c) objetivos de caráter metodológico: **desenvolver um recurso de modelagem urbana que aplique os resultados dos objetivos teórico e empírico, dedicado a simulações de crescimento com especial atenção às relações morfológicas da cidade e a hidrografia.** Como objetivo metodológico secundário, pretende-se modelar as dinâmicas morfológicas identificadas no caso empírico de modo a validar o mecanismo de modelagem desenvolvido.

1.3. Questões de pesquisa e lançamento de hipóteses.

Para atingir os objetivos traçados para o trabalho, podem ser enunciadas três questões de pesquisa, que serão perseguidas ao longo do trabalho e estão abaixo indicadas:

Questão.1

Como abordar crescimento urbano integrado com a paisagem da hidrografia natural?

Questão.2

De que modo a paisagem configurada pelos recursos hídricos pode influenciar na produção espacial urbana?

Questão.3

Quais as possibilidades de ocorrerem morfologias urbanas articuladas à paisagem definida pela hidrografia, que mantenham a eficiência nas relações urbanas e a qualidade do ambiente natural?

Para estas questões que o trabalho pretende enfrentar, a seguir estão lançadas hipóteses que funcionam como respostas provisórias à investigação. Estas hipóteses permitem também indicar o delineamento e a estrutura da pesquisa, que na sequência estão apresentadas.

Hipótese.1

A abordagem integrada entre objetos que tradicionalmente ocorrem em campos disciplinares distintos pode ser alcançada mediante um enquadramento teórico-conceitual de base sistêmica. A teoria de sistemas aplicada ao urbanismo indica uma aproximação à ecologia urbana, à historiografia sistêmica, ao uso de sistemas de informações geográficas (SIG) e aos recursos de modelagem urbana.

Para identificar as influências da paisagem natural na produção espacial urbana, a investigação trabalha com a hipótese que a ocorrência de crescimento urbano sobre áreas adjacentes aos recursos hídricos indica uma alteração na forma que ocorre o crescimento, onde o sistema urbano passa a corresponder a uma nova lógica de crescimento externo que altera a morfologia urbana. Esta hipótese pode ser traduzida em um enunciado provisório de uma dinâmica do crescimento:

Hipótese.2

A partir de um núcleo urbano original, a cidade cresce até atingir áreas adjacentes aos recursos hídricos, onde ocorrem maiores resistências à urbanização que dificultam a continuidade da produção espacial urbana. Neste ponto, a cidade altera a forma do crescimento urbano,

ocorrendo a conversão urbana em áreas com menores resistências e maior capacidade de suporte à urbanização.

Sobre as possibilidades de serem mantidas a eficiência urbana e a qualidade ambiental em um modelo urbano articulado à paisagem natural, a hipótese converge com alguns enunciados contemporâneos de diferentes vertentes da ciência urbana, os quais podem ser adiantados:

Hipótese.3

Em termos da ecologia urbana, a hipótese converge com a ideia da resiliência urbana, a qual indica às cidades propriedades intrínsecas à dinâmica que possibilitam superar situações adversas e conferem um fator de permanência ao longo dos tempos (Vale e Campanella, 2005).

Sob a perspectiva da teoria urbana e da geografia econômica, a hipótese converge com uma “abordagem evolutiva dos sistemas urbanos clássicos”, onde a partir de uma releitura da trajetória dos modelos urbanos estáticos é possível melhorar entendimentos sobre alternâncias na forma do crescimento e a descontinuidade espacial urbana (Fujita e Mori, 1997).

Para a teoria urbana associada às ciências complexas, os recursos hídricos estão indicados como pontos de convergência do sistema urbano para a alternância na forma do crescimento, “tipping points” onde os inúmeros fatores que caracterizam o fenômeno urbano convergem para resultar na descontinuidade espacial da forma urbana (Batty, 2009b).

1.4. Delineamento de Pesquisa

Para validação da hipótese da alternância morfológica do crescimento urbano associada à escala espacial dos recursos, o estudo está delimitado e dedicado à realidade geográfica das cidades da metade sul do Rio Grande do Sul. As áreas planas e de baixas altitudes que configuram o bioma Pampa, estruturam uma paisagem fortemente relacionada com os atributos naturais da hidrografia. A topografia discreta e as inclinações suaves que configuram a metade sul do Estado contribuem para que ocorra uma maior indefinição dos leitos de drenagem dos recursos hídricos e a formação de áreas alagadiças adjacentes às linhas de drenagem (Valente, 2009).

Esta relativa homogeneidade geográfica e topográfica das cidades da metade sul do Estado é ainda mais evidente se comparada com as cidades da metade norte do Estado, composta por regiões serranas, planaltos e encostas litorâneas que configuram uma região de maiores declividades e altitudes. Desta forma, é possível pressupor que relações entre crescimento urbano e a paisagem configurada pela hidrografia, para a realidade delineada, são mais evidentes e possibilitam análises qualificadas sobre a hipótese em questão.

Foram realizadas observações iniciais em imagens de satélite, disponibilizadas pelo *Google Earth*, de cidades de diferentes portes e estágios de crescimento, todas localizadas na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul.

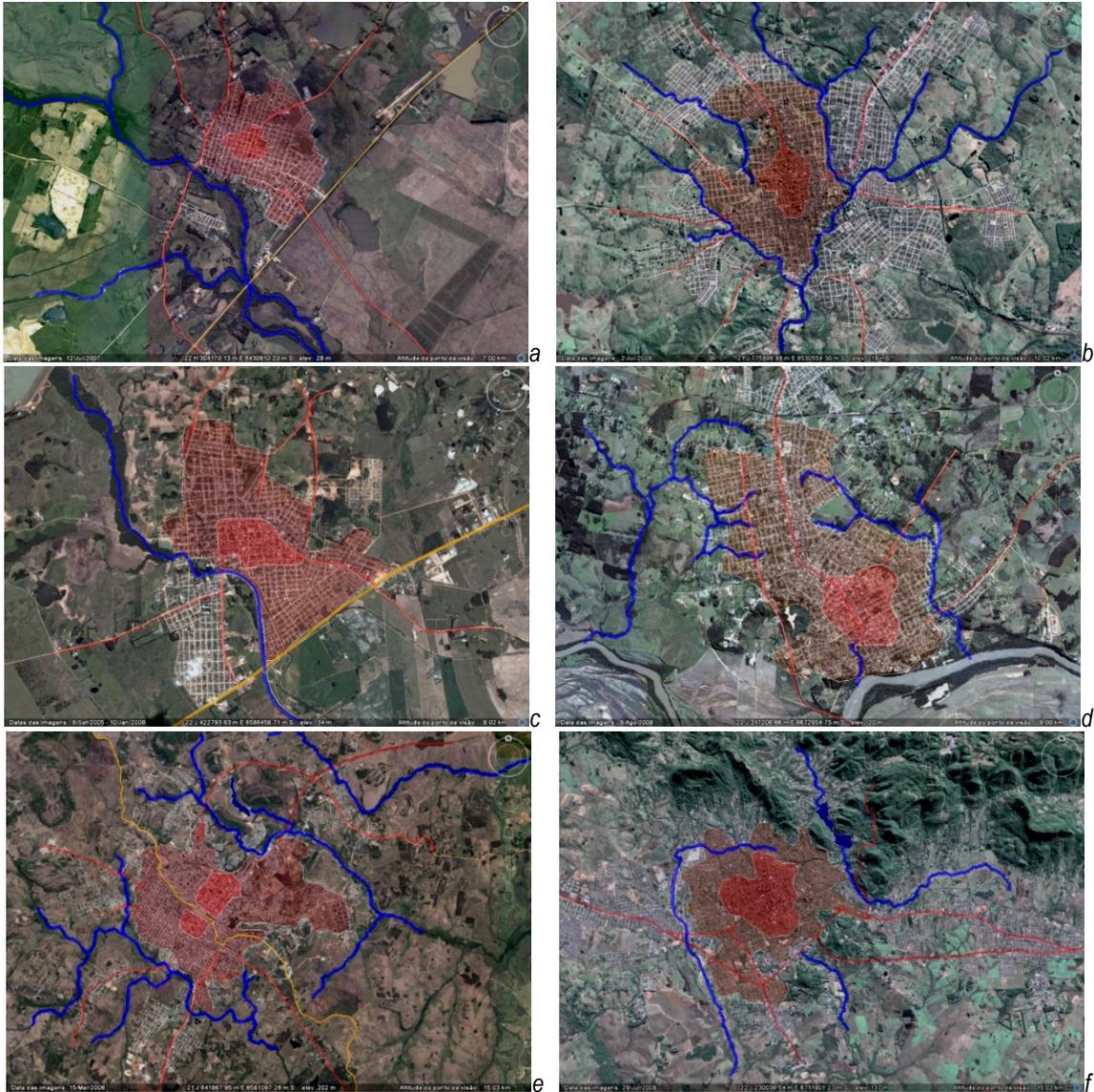


Figura 1.1: relações morfológicas entre crescimento urbano e recursos hídricos em cidades da metade sul do Estado do RS, destacadas em imagens do *Google Earth*: a) Arroio Grande; b) Bagé; c) Camaquã; d) Cachoeira do Sul; e) Santana do Livramento; f) Santa Maria (imagens elaboradas pelo autor, 2010).

Estão indicadas as cidades de Arroio Grande - 18.358 hab. (figura 1.1.a); Bagé - 112.550 hab. (figura 1.1.b); Camaquã - 60.563 hab. (figura 1.1.c); Cachoeira do Sul - 84.629 hab. (figura 1.1.d); Santana do Livramento - 83.479 hab. (figura 1.1.e) e Santa Maria - 263.403 hab. (figura 1.1.f) (dados populacionais IBGE, 2007). Em todos os casos é possível identificar evidências empíricas de relações entre a configuração da forma urbana, a topografia e as principais linhas de drenagem dos recursos hídricos.

São evidentes e conhecidas as relações de proximidade das cidades a importantes recursos hídricos. Por outro lado, os núcleos urbanos originais ocorrem com certa distância das linhas de drenagem, ins-

talando-se em locais mais altos e conseqüentemente mais bem drenados. A partir de um núcleo original, as cidades apresentam formação predominantemente concêntrica (áreas com sobreposição de vermelho) até confrontar-se com as linhas dos recursos hídricos (destacados em azul). Em áreas que ocorre a interface entre o núcleo urbano e os recursos hídricos, é possível verificar que a forma urbana apresenta significativas alterações, de onde partem eixos axiais que correspondem às avenidas, pontes e estradas de acesso (destacados em linhas vermelhas). Em todos os casos, a partir dos recursos hídricos, configuram-se morfologias de crescimento linear e/ou a formação de novos núcleos ao longo destes eixos, novamente distanciados das áreas adjacentes aos recursos hídricos.

A hipótese é ainda reafirmada se analisada a realidade da cidade de Pelotas (339.934 hab., figura 1.2 abaixo), onde são maiores as evidências de alternância na morfologia urbana associada à hidrografia. Na maior cidade da metade sul, o porte do sistema urbano e a existência de estudos da historiografia sobre o processo de crescimento urbano permitem reforçar as assertivas.

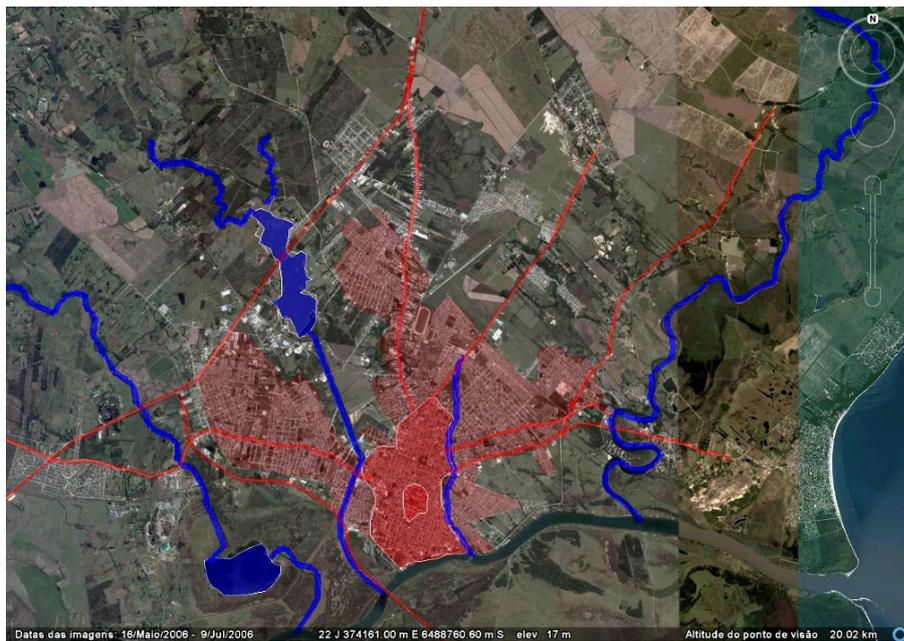


Figura 1.2: relações morfológicas entre crescimento urbano e recursos hídricos na cidade de Pelotas-RS, destacadas em imagens de satélite do Google Earth. (recursos hídricos em traço azul, núcleos urbanos em áreas vermelhas e vetores de crescimento em traço vermelho) (imagem elaborada pelo autor, 2010).

Conhecidamente, o primeiro loteamento da cidade de Pelotas foi implantado sobre o divisor de águas dos os arroios Santa Barbara e Pepino, adjacentes ao núcleo original sucederam-se um segundo e um terceiro loteamentos que configuram uma morfologia de crescimento concêntrico. Ao avançar sobre os recursos hídricos que limitam a cidade ao sul, leste e oeste (canal São Gonçalo, arroios Santa Bárbara e Pepino, respectivamente), a cidade aumenta a tendência de crescimento no sentido leste (bairro Areal), norte (bairro Três Vendas) e a oeste (bairro Fragata), alcançando novos divisores de águas e configurando um primeiro movimento de diferenciação morfológica do crescimento. Em um processo de

crescimento continuado, a cidade retoma o crescimento associado à morfologia concêntrica, avança em direção aos próximos limites hídricos, a leste e a oeste (arroio Fragata e Pelotas), e novos bairros ocorrem sobre novos divisores de água (bairros Laranjal e Jardim América), sugerindo uma dinâmica morfológica de crescimento em um segundo momento.

Em outras cidades na metade sul do Estado, talvez devido ao porte inferior, é possível identificar situações onde o fenômeno em questão ainda não ocorreu, porém, evidências indicam uma trajetória de crescimento semelhante, como é o caso das cidades de São Lourenço do Sul (42.339 hab. figura 1.3a) cidade planejada que já indica ocorrências de urbanizações axiais além do plano inicial; Tapes (16.557 hab. figura 1.3b) com a ocorrência de urbanizações difusas de baixa intensidade além dos recursos hídricos que escoam no sentido da Lagoa dos Patos.



Figura 1.3: cidades em estágios de crescimento urbano inicial, com indícios de vir a ocorrer crescimentos futuros com morfologias articuladas à escala dos recursos hídricos: a) São Lourenço do Sul; b) Tapes. (imagens elaboradas pelo autor, 2010).

Além dos casos apresentados, em outras cidades da região (como Alegrete, Barra do Ribeiro, Caçapava do Sul, Cerrito, Dom Pedrito, Herval, Pedro Osório e São Gabriel), também é possível identificar uma área efetivamente urbanizada inicial que sugere a ocorrência do fenômeno de diferenciação morfológica associada à hidrografia em breve horizonte temporal. Situações como essas vêm a reforçar a necessidade de pesquisas que contribuam para o entendimento de movimentos morfológicos do crescimento, permitindo à ciência urbana abordar com maior propriedade os cenários futuros frente aos condicionantes do ambiente natural.

1.5. Estrutura de Investigação

Capítulo 1. Introdução.

Apresenta o tema e a inserção da pesquisa; as justificativas e as questões de pesquisa. Constrói hipóteses de pesquisa e apresenta evidências empíricas que indicam relações entre a forma urbana e a paisagem definida pela hidrografia. Por fim, apresenta esta de estrutura de pesquisa.

Capítulo 2. Revisão teórico-metodológica.

O referencial teórico do trabalho está organizado em três partes: a primeira faz uma aproximação teórica entre as práticas do planejamento das cidades e a gestão dos recursos hídricos, identificando incompatibilidades, dilemas e práticas superadas. Outra parte faz uma revisão dos sistemas urbanos, modelagem urbana e ecologia urbana, como convergência teórica para que ocorram efetivas abordagens integradas cidade-ambiente. A terceira parte apresenta um conjunto de teorias sistêmicas a respeito de dinâmicas do crescimento urbano, indicando uma trajetória de crescente integração com o ambiente natural.

Capítulo 3. Método

Apresenta as orientações metodológicas que fundamentam o trabalho, a possibilidade de diferenciar o ambiente urbano pelo modelo Potencial-Centralidade e sua implementação no ambiente celular do SACI. Simulações de crescimento exploratórias estão indicadas e construído um mecanismo de modelagem urbana adicional ao modelo original, capaz de capturar alternâncias na morfologia do crescimento sensível à presença de atributos da hidrografia.

Capítulo 4. Crescimento urbano e hidrografia: empirismo e modelagem, Pelotas [1815-1965].

Capítulo que propõe uma abordagem empírico-descritiva do crescimento urbano da cidade de Pelotas, delimitado temporalmente entre 1815 e 1965. Procura validar o enunciado teórico e o recurso metodológico desenvolvido no trabalho através de correlações numéricas e semelhanças visuais com os dados da realidade empírica. Por outro lado, propõe uma releitura sistêmica do passado urbano de modo a evidenciar as relações entre crescimento urbano e paisagem configurada pelos recursos hídricos.

Capítulo 5. Conclusões.

O capítulo das conclusões recupera as principais contribuições do trabalho, retomando os objetivos, as questões e as hipóteses de pesquisa. Indica as limitações e possibilidades de continuidade da investigação.

Capítulo 6. Continuidades: avançando nas discussões sobre modelo urbano articulado à hidrografia.

Este último capítulo estão reservadas discussões que suscitam ao abordar o tema, crescimento urbano e hidrografia, organizadas de modo a consolidar o enunciado teórico sobre a dinâmica de crescimento sustentada ao longo do trabalho, além de indicar continuidades de pesquisas dedicadas a busca por um modelo urbano articulado à escala da paisagem natural.

2. Revisão teórico-metodológica.

Este capítulo percorre as bases teóricas e a fundamentação metodológica proposta para o trabalho. Inicialmente estão apresentadas algumas questões e dilemas da gestão dos recursos hídricos no contexto urbano, onde efetivas ações de planejamento urbano contemporaneamente convergem com o manejo não estrutural das águas urbanas. Na sequência, o trabalho percorre as bases teóricas dos Sistemas Urbanos, Modelagem Urbana e Ecologia Urbana, como campos disciplinares que contemporaneamente convergem para que ocorram abordagens integradas sobre o fenômeno urbano e a paisagem de entorno. São tratados de alguns conceitos e teorias sistêmicas a respeito da dinâmica do crescimento urbano e recentes abordagens integradas com o ambiente natural. Por fim, estão retomadas as questões mais relevantes desta revisão formando o marco teórico do trabalho.

2.1. Aproximação teórica: gestão dos recursos hídricos e planejamento urbano.

2.1.1. Sistemas de águas urbanas e a desarticulação com o sistema urbano.

Os sistemas de recursos hídricos localizados no contexto das cidades, também chamados de águas urbanas, correspondem a uma parte do sistema integrado de gestão dos recursos hídricos, composto pelos sistemas de mananciais, de abastecimento, de saneamento (coleta e tratamento), de drenagem urbana e o manejo das inundações (UNESCO, 2005). De modo geral, todos os sistemas de águas urbanas apresentam relações diretas com a forma em que ocorre o uso e ocupação do solo urbano, onde a drenagem urbana e as inundações ribeirinhas são componentes do sistema de gestão dos recursos hídricos que apresentam as maiores relações com a configuração urbana sobre a paisagem natural (Tucci, 2005).

Tradicionalmente a ocorrência de enchentes e aspectos da drenagem urbana têm sido tratadas prioritariamente associadas aos aspectos qualitativos da urbanização interna a uma determinada bacia hidrográfica, onde o aumento da superfície impermeável altera o ciclo hidrológico natural. Sob esta perspectiva, os efeitos da urbanização frente às questões de preservação e gerenciamento das águas urbanas têm sido abordados limitando-se a índices de área urbanizada e suas decorrentes alterações no escoamento natural (Alberti *et al.*, 2003).

Entretanto, as enchentes devido à urbanização estão associadas não só aos aspectos da drenagem urbana, mas também pela ocupação de áreas de inundação ribeirinha, áreas de cheias naturais ou leitos maiores dos cursos d'água (Tucci, 2005). Contrário ao modo que comumente é abordada, a ocorrência de cheias em áreas adjacentes às linhas de drenagem é um processo inerente ao ciclo hidroló-

gico natural, uma vez que todo curso d'água ou linha de drenagem é caracterizado por um regime de não permanência de vazões (Tucci e Villanueva, 1999). Isto é, os leitos de escoamento hídrico não são fixos e apresentam diferentes delimitações de acordo com a vazão e o volume a ser escoado, independentes da ocorrência da urbanização. Buscando facilitar o entendimento dos regimes de não permanência de um dado recurso hídrico, hidrólogos têm representado os limites de um corpo hídrico pelos seus leitos menor e maior, conforme ilustrado nas figuras 2.1a e 2.1b, diferentes cortes topográficos natural e urbano, respectivamente.



Figura 2.1: regime de não permanência de vazões dos recursos hídricos: a) em ambiente naturalmente preservado (MIT, 2009); b) ocupação urbana em áreas de cheia natural (Santos, 2004).

Porém, a delimitação dos leitos naturais das linhas de drenagem não são medições diretas de níveis ou áreas de inundações, são níveis de referência determinados por associação a fatores probabilísticos da ocorrência de cheias, traduzidos por sua correspondência em número de anos (Tucci e Bertoni, 2003). Ou seja, se o leito maior de um curso d'água for indicado para um tempo de retorno (TR) de 10 anos, significa que este nível de cheia provavelmente se repita a cada 10 anos, ou a cada ano esta enchente tem 10% de chance de voltar a ocorrer.

Estudos hidrológicos são dedicados a determinar as probabilidades de inundação e o TR de um determinado rio. Estes cálculos geralmente são realizados com base em observação de consistentes séries históricas de vazão ou em dados de precipitação aplicados a modelos numéricos que convertam dados de precipitação em vazão (Tucci, 2005). No gráfico da figura 2.2 abaixo apresentado, estão plotados os níveis máximos de cheias anuais para o arroio Dilúvio em Porto Alegre, auxiliares para a definição de cheias com tempo de retorno de 50, 10 e 2 anos (linhas vermelha, laranja e amarela, respectivamente).

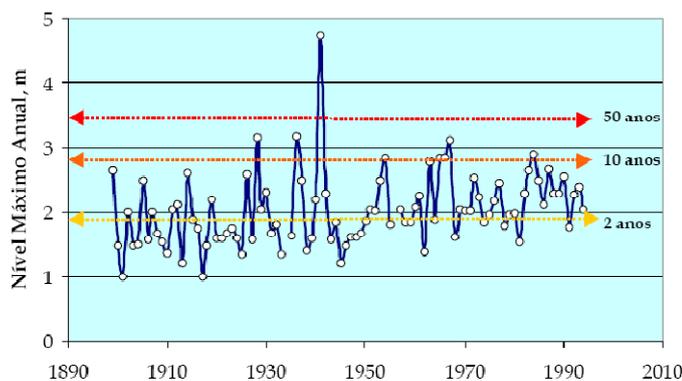


Figura 2.2: cheias máximas anuais do arroio Dilúvio em Porto Alegre 1889-1994 (em azul), auxiliares para determinar níveis com tempos de retorno de 2, 10 e 50 anos (Tucci, 2001).

Pela dificuldade de acesso a estas bases de dados, são muitas as indicações de TR de referência, que genericamente apresentam-se como auxiliares para delimitação de leitões maiores e menores dos recursos hídricos. Tucci (2005) indica que o tempo de retorno gira em torno de um a dois anos para sistemas de microdrenagem (associados a riscos menores) e entre 10 a 100 anos para sistemas de macrodrenagem (associados a riscos maiores).

Sendo os leitões maiores dos rios associados a um fator probabilístico e ocorrência com variações em décadas, surge uma grande defasagem temporal entre os diferentes sistemas, hídrico e urbano. Áreas naturalmente propensas a inundação são de difícil entendimento e percepção pelo senso comum e geralmente um dado descartado na elaboração de políticas do uso do solo urbano. É possível afirmar que a partir da diferença temporal entre o crescimento urbano e tempo de retorno dos recursos hídricos em cheias máximas, são decorrentes a maioria dos conflitos espaciais de uso e ocupação de áreas de fragilidade dos sistemas de águas urbanas (Tucci e Bertoni, 2003). Neste contexto, cada vez mais se faz necessária a inclusão da realidade urbana no processo de gestão integrada dos recursos hídricos e a valorização dos instrumentos de planejamento capazes de abordar cenários de crescimento urbano futuros; essenciais para a formulação de princípios e diretrizes aos sistemas gerenciais da tomada de decisão (Lanna, 1999).

2.1.2. Dilemas contemporâneos do planejamento e gestão das águas urbanas.

A (des)estruturação do manejo de águas urbanas.

Desde as primeiras formas de agrupamentos urbanos até cidades do início do século XIX, quando a sociedade ainda era de predominância agrícola, urbanistas, planejadores e pensadores urbanos tinham a água apenas como um desafio para manutenção das condições sanitárias no interior das cidades. Bastavam cuidados mínimos com sistemas de coleta e transporte dos esgotos domésticos e pluviais, para que condições de higiene urbana mínimas fossem mantidas. Somente ao fim da segunda Revolução Industrial, entre os séculos 19 e 20, com o aumento de populações convivendo nas cidades, questões de saneamento e saúde pública passam a ter um papel importante sobre a infraestrutura urbana. Intervenções urbanas de caráter higienista-sanitarista são inauguradas por volta de 1850 pelas reformas do Barão de Haussmann na cidade de Paris, passando a formar o paradigma dominante do manejo das águas urbanas até a metade do século 20. Neste período, cidades passam a investir em sistemas de coleta e transposição das águas urbanas baseando-se exclusivamente no paradigma higienista, realizando grandes intervenções estruturais sobre a hidrografia natural e possibilitando o processo de expansão urbana (Mumford, 1961).

Para a gestão dos recursos hídricos, medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema hídrico natural através de intervenções ocorridas na escala da bacia hidrográfica ou alterações nos leitos e linhas de drenagem. De modo geral, medidas estruturais visam prioritariamente reduzir o risco de enchentes e operam de três modos distintos: a) medidas que aceleram o escoamento, construindo diques e *polders*, retificando e canalizando as linhas de drenagem, visando o aumento da capacidade de descarga dos rios; b) medidas que desviam o escoamento, alterando a localização de linhas de drenagem natural; c) medidas que retardam o escoamento natural, através da construção de reservatórios e bacias de amortecimento (Paul e Meyer, 2001).

Somente a partir das décadas de 60 e 70, a sociedade passa a demonstrar preocupações com os impactos urbanos sobre o ambiente natural, contribuindo para uma reflexão sobre o modo em que ocorria a gestão das águas urbanas. A partir do marco da aprovação do “*Clean Water Act*” (Lei da Água Limpa) em 1970 nos Estados Unidos, passou-se a adotar medidas que visam corrigir os impactos das alterações estruturais nos ciclos hidrológicos naturais. A implantação de novas medidas estruturais visava a correção das estruturas já existentes, principalmente através da construção de sistemas de tratamento dos esgotos. Por outro lado, da necessidade de se preservar os recursos naturais remanescentes, o manejo das águas urbanas passa a ocorrer também a partir de medidas não estruturais, ou seja, medidas que não se utilizem de grandes intervenções e visem a redução da ocorrência de enchentes e adequada disposição das águas urbanas (Tucci, 2008).

A partir dos anos 90, com o aumento das preocupações com os impactos ambientais e a busca por meios de alcançar o “desenvolvimento sustentável”, diante da ineficácia dos sistemas não estruturais da gestão de águas urbanas, baseados exclusivamente por alertas de inundações, mapas de enchentes e zoneamentos ambientais normativos, o manejo de águas urbanas passa a resgatar o uso de medidas estruturais no controle de enchentes. Diferentes das medidas estruturais características do período higienista-sanitarista, medidas estruturais deste período estão dedicadas a diminuir velocidades de escoamento e manter os níveis de drenagem natural através da construção de bacias de retenção em diferentes escalas, ocorrendo desde grandes piscinões destinados a acumular conhecidas enchentes urbanas, até medidas de proteção individual (“*flood proofing*”) que viabilizam a implantação de novos empreendimentos em locais onde a rede de drenagem está situação de sobrecarga. (Tucci, 2005).

Contemporaneamente, a partir do documento chamado *World Water Vision* (Visão Mundial da Água, 2000, elaborado no fórum mundial da água ocorrido no ano 2000 na cidade Haia), gestores hídricos sugerem que as ações do manejo estejam cada vez com mais pautadas com ênfase na preservação do recurso, onde soluções para os sistemas de águas urbanas não estejam apenas no “*end of pipe*” (final dos condutos). A partir deste contexto, o manejo dos recursos hídricos deve priorizar medidas não es-

truturais, pautadas pela valorização das ações de planejamento urbano pró-ativo, onde se faz necessário trabalhar a forma em que ocorre o desenvolvimento urbano, gerenciando de modo integrado a infraestrutura, a morfologia urbana e as linhas de drenagem naturais (Tucci, 2005).

Em outras palavras, o manejo das águas urbanas nos dias atuais deve priorizar a adoção de medidas não estruturais, possibilitadas por práticas de planejamento urbano pró-ativas, capazes de induzir o crescimento urbano sobre áreas de menor fragilidade ambiental, compatibilizando a dinâmica do crescimento urbano e preservação dos recursos hídricos, valorizando áreas de maior importância do ambiente natural como leitos de drenagem, possibilitando que a água escoe o mais próximo de seu curso, velocidade e volume natural (Lanna, 1999; Tucci, 2008).

Em suma, o paradigma atual da gestão de águas urbanas está em ações que envolvam medidas estruturais de reduzidos impactos, mas prioritariamente ocorra por medidas não estruturais possibilitadas por efetivas ações de planejamento e controle do uso do solo.

Gestão das águas urbanas no Brasil.

Desde as primeiras manifestações mundiais com a preservação dos recursos hídricos (destaques para a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, Estocolmo 1972; Conferência das Nações Unidas sobre os Recursos Hídricos, Mar del Plata 1977; Conferência Internacional sobre Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Dublin 1992) estão pautados os princípios do manejo dos recursos hídricos no mundo, onde: a) água deve ser tratada como recurso finito e vulnerável; b) sua gestão deve estar baseada na participação dos usuários, dos planejadores e dos responsáveis políticos; c) o recurso deve ser tratado com um bem de valor econômico, a partir da livre disputa comercial entre seus usuários (Borsoi e Torres, 2008). É nesse contexto que está instituída a política de preservação dos recursos hídricos brasileira, adotando o modelo francês de gestão, definindo a bacia hidrográfica como unidade espacial básica e instituindo a figura dos Comitês de Bacias Hidrográficas como órgãos gestores dos recursos hídricos neste país (Lanna, 1999). Assim, os recursos hídricos no Brasil são geridos a partir de um órgão descentralizado politicamente, definido por limites naturais, com autonomia financeira e constituído de modo participativo entre diversos agentes que se relacionam na escala da bacia.

Entretanto, a Política Nacional dos Recursos Hídricos no Brasil foi implementada sob o contexto legal da Constituição Federal de 1988, a qual reduziu as atribuições políticas das municipalidades, impedindo que as cidades gerenciem diretamente os recursos hídricos contidos em seus territórios, enquanto mantém a gestão do uso do solo sob total atribuição dos municípios. Surge na escala urbana uma incompatibilidade entre a gestão do uso do solo e a gestão das águas, onde não existem mecanismos legais nem práticas de planejamento que busquem articular a gestão das águas, de competência dos

comitês de bacias participativos, e o planejamento do território, cuja competência e responsabilidade é dos municípios (Carneiro, 2004; Viegas F^o e Lanna, 2006). No mesmo caminho, Saraiva e Polidori (2007) indicam que bacias e sub-bacias urbanas não são determinantes no processo de zoneamento municipal na cidade de Pelotas, sugerindo que questões ambientais não têm sido relevantes no processo de planejamento urbano baseados no tradicional zoneamento normativo.

Ineficiência dos planos urbanos normativos.

Historicamente o planejamento das cidades frente às questões ambientais tem sido trabalhado apenas em termos do zoneamento funcional e da prática do planejamento normativo. A prática do planejamento urbano normativo supõe que todos os agentes sociais estejam empenhados na transformação urbana, obedecendo rigorosamente às regras em que a mudança urbana deveria ocorrer, supondo a cidade como um mero resultado direto de normas de uso do solo (Krafta, 2008). Mais ainda, a prática do zoneamento urbanístico tradicional tem sido utilizada com um caráter fundamentalmente econômico, limitando-se a índices de aproveitamento e taxas de ocupação do solo, não se mostrando eficiente em estabelecer uma política socialmente justa, acabando por contribuir no processo de degradação ambiental nas cidades.

No mesmo caminho, Portugali (2000) indica uma sucessão histórica de dilemas decorrentes de décadas de práticas de planejamento ineficazes, que atualmente dão as bases para repensarmos o modo em que ocorre processo de planejamento territorial contemporâneo. O primeiro dilema veio a tona com a revolução qualitativa na década de 70, através da ideia que procedimentos de planejamento de caráter exclusivamente racional mostravam-se falhos sobre o real problema da sociedade urbana. Um segundo dilema surge na década de 80, a partir de aproximações estruturalistas-humanistas, onde se percebe a cidade produz grandes externalidades que afetam a qualidade do ambiente. Um terceiro dilema do planejamento surge pela influencia do espírito pós-moderno dos anos 90, o qual atribuía à sociedade e seus produtos artificiais como a cidade, “ser o que elas tinham que ser: incontroláveis, imprevisíveis e inplanejáveis”, acabando por reduzir a credibilidade das ações de planejamento frente à sociedade em geral.

Para este enfrentamento, um caminho seria estabelecer diretrizes de controle de uso e ocupação do solo e normas de parcelamento urbanas mais rígidas e atentas ao ambiente natural urbano; adotando a unidade das bacias como unidade de planejamento das cidades (Santos, 2004), preservando áreas de fragilidade ambientais como fundos de vale, áreas inundáveis, cabeceiras de drenagem, áreas de alta declividade e manutenção de taxas de permeabilidade do solo urbano (Braga, 2003). Contudo, parece possível buscar métodos alternativos ao tradicional planejamento urbano normativo a partir do desenvolvimento de sistemas gerenciais de suporte a tomada de decisões, avançando assim em práticas que

se reduzem a constituir um conjunto de regras fixas de ocupação e uso do solo urbano, dedicando-se quase que exclusivamente ao zoneamento de atividades, índices, quotas e gabaritos.

2.1.3. Sistemas de suporte à tomada de decisões e cenários urbanos integradas às bacias.

Contemporaneamente, eficazes sistemas de suporte a decisão são demandados para elaboração de políticas urbanas e políticas de gestão de recursos hídricos, os quais têm sido amplamente ofertados pelo aumento da popularidade dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estes sistemas abrangem uma gama de possibilidades analíticas e preditivas que estão associadas a indicadores de desempenho, formação de bases de dados e ferramentas computacionais específicas para a resolução de determinados conflitos.

Segundo Koomen *et al* (2007), atualmente muitos sistemas de tomada de decisões estão dedicados a mitigar os conflitos entre uso do solo urbano e sistemas de recursos hídricos, aplicados em: a) análises de conflitos; b) avaliação de impacto; c) especulação de cenários de futuro. O autor destaca a possibilidade de explorar cenários de futuro por seu caráter inovador, estar dedicado ao planejamento de longo prazo, envolver grande quantidade de agentes e somar graus de incertezas no processo de planejamento. Entretanto, Hoering e Seasons (2005) alertam que para alcançar eficiência em ações de planejamento, sistemas de suporte a decisão devem ter aplicação continuada e monitoramento constante dos conflitos, somente assim se faz possível a verificação de padrões, tendências e conflitos referentes à dinâmica do uso do solo urbano.

A partir de diferentes cenários de futuro, análises comparadas têm sido realizadas por diversos autores possibilitando uma visão integrada e ampla dos impactos urbanos sobre os recursos hídricos. Destaca-se os trabalhos dedicados a capturar alterações no uso do solo urbano e impactos sobre os recursos hídricos decorrentes da influência dos sistemas de transportes (Tjallingii, 2005 e Viganò, 2009), aumento de densidades populacionais (Binford e Saarinen, 2009) e movimentos sociais urbanos (Ducrot, 2004).

De modo geral, grande parte dos trabalhos que utilizam cenários urbanos preditivos aplicados à gestão dos recursos hídricos, operam de modo semelhante ao trabalho de Campana e Tucci (2001) dedicado a realizar predições de enchentes no arroio Dilúvio na cidade de Porto Alegre. Neste trabalho, os autores relacionam cenários de crescimento urbano estabelecidos no Plano Diretor Municipal a dados hidrológicos-hidrodinâmicos de futuro possibilitados pelo modelo IPH IV. A partir da associação de cenários (urbanos e hidrológicos), hidrogramas de futuro são plotados e aplicados a um modelo numérico do terreno (DEM), possibilitando identificar áreas urbanas com riscos futuros de inundações causadas por chuvas com tempo de retorno de 25 anos.

Entretanto, parece possível avançar na aplicação de cenários urbanos de futuro associados exclusivamente às tradicionais alterações de impermeabilidade do solo e velocidade de escoamento, onde um campo a ser amplamente explorado está na abordagem sobre dinâmicas de crescimento urbano e as possibilidades de articulação morfológica da cidade à escala da paisagem natural. Neste caminho, devido destaque pode ser dado ao trabalho de Alberti *et al* (2003), aplicado a sub-bacia do *Puget Sound* em Seattle, busca identificar como relações morfológicas de concentração e dispersão (caracterizados por diferentes intensidades, composição, configuração e grau de conectividade) podem causar diferentes impactos sobre os recursos hídricos e as decorrentes alterações sobre populações de espécies, fluxos de energia e ciclo de nutrientes.

2.2. Abordagem sistêmica do ambiente urbano.

Nos últimos 30 anos a ciências da complexidade tem se desenvolvido para fazer sentido aos mais diversos sistemas, auxiliar no desenvolvimento das mais variadas teorias e métodos, rapidamente tem ganhado espaço nos mais diversos campos da ciência (Batty, 2007). Com trajetórias em campos disciplinares distintos, tanto as ciências sociais quanto as ciências naturais tem adotado às ciências complexas para estudar fenômenos emergentes (Alberti *et al.*, 2003). É a partir das bases conceituais da teoria de sistemas e das ciências complexas que o trabalho pretende abordar o fenômeno urbano integrado ao ambiente natural, mantendo suas bases teóricas principais na ciência sócio-espacial pretende avanços sobre as influências decorrentes da paisagem de suporte ao crescimento urbano.

A teoria de sistemas inicialmente proposta por Forrester (1968) indica que a partir do momento que uma determinada entidade apresenta muitos atributos, como é característico do fenômeno urbano, o referido sistema pode ser caracterizado como um sistema complexo. Sistemas complexos permitem ser manipulados a partir de uma quantidade reduzida de seus atributos, abstraindo do sistema o conjunto de subsistemas e relações realmente importantes para o problema em questão. Reif (1978) avança, indicando que um sistema é um conjunto definido por objetos com relações internas entre os próprios objetos e seus atributos e partir do reconhecimento das relações e fluxos decorrentes entre os objetos que compõem o sistema, estes passam a perder o interesse e a atenção é dirigida aos seus processos configuracionais. Se estes processos estão intimamente relacionados, de modo que um processo interfere nos demais, podemos considerar que este sistema além de complexo apresenta propriedades intrínsecas à sua dinâmica.

Esta forma de abordar os sistemas a partir de sua dinâmica procura superar a visão de equilíbrio e estabilidade interna, permitindo que sistemas urbanos possam ser entendidos como uma relação de entradas e saídas entre os seus componentes internos e os elementos do entorno. O entorno é consti-

tuído pelo conjunto dos objetos exteriores ao sistema, porém suas alterações modificam a estrutura interna do sistema e seus atributos podem ser modificados pelo funcionamento do sistema (Reif, 1978). Se estes sistemas de fluxos e tensões entre o sistema e o seu entorno opera de modo retroalimentado, permite que os sistemas urbanos passem a receber influências externas; e no sentido inverso, a diferenciação intraurbana é capaz de gerar tensões que indicam vetores de crescimento externo (Forrester, 1998).

Por fim, além da necessidade de abordar a cidade a partir de sua dinâmica e integrada ao entorno, as teorias sistêmicas contemporâneas indicam que estejam associados a mecanismos adaptativos, atualmente entendidos também como redes neurais ou inteligência artificial (Forrester, 1998). Indicados desde o trabalho de Reif (1978), sistemas adaptativos são aqueles que dispõem de propriedades de retroalimentação e através do próprio funcionamento são capazes de ajustar seus parâmetros para refinar o seu funcionamento.

2.2.1. Aproximação à ecologia urbana.

Segundo Portugali (2000), as ciências complexas possibilitaram à ciência urbana aproximar diferentes vertentes que a conduziram em campos disciplinares distintos desde os anos 70. Segundo o autor, as teorias da auto-organização inicialmente são absorvidas pela ciência urbana de base quantitativa (de abordagem positivista e influência pelas ciências exatas), posteriormente possibilitando aproximação à outra vertente, de base qualitativa (de abordagem estruturalista, anteriormente dominada por teorias sociológicas e abordagens hermenêuticas). De fato, abordagens sistêmicas da cidade configuram um corpo teórico que avança sobre os paradigmas excessivamente determinísticos da ciência urbana quantitativa das décadas de 50 e 60, simultaneamente que absorvem procedimentos aleatórios dos estudos sócio-espaciais urbanos, dominantes no urbanismo pós-moderno da década de 80, assim fortalecendo a associação do fenômeno urbano aos demais fenômenos complexos (Batty, 2009).

Além das possibilidades iniciais de aproximação do urbanismo de bases epistemológicas distintas (Portugali, 2000; Batty, 2009), contemporaneamente as ciências complexas tem possibilitado aproximação de campos disciplinares distintos, como ocorrem com a ecologia e o urbanismo (Alberti *et al.*, 2003). Desta forma, a retomada dos estudos integrados entre urbanismo e ecologia é possibilitada por uma abordagem conceitual mais ampla, superando meras relações de semelhança inauguradas na década de 20 pela escola de Chicago, ocorrendo através da convergência das ciências naturais e sociais aos conceitos comuns da teoria de sistemas e auto-organização (Alberti *et al.*, 2003; Buzai, 2003).

Conceitos da ecologia pioneiramente aplicados à realidade urbana por autores da escola de Chicago (Burgess, 1924; Park e Burgess, 1925), quando se utilizavam de analogias com os mecanismos de

competição e cooperação para compreender forças de organização intraurbana, em uma dinâmica que conduziria o fenômeno urbano a um estado de ordem sócio-espacial. Porém, o que existe hoje é um consenso que são justamente estes mecanismos de competição e cooperação que mantêm o sistema urbano em constante desequilíbrio, em tempos que ecologia e urbanismo simultaneamente passam a encarar a quebra no equilíbrio como uma forma de manutenção da vitalidade e dinâmica, intrínsecos aos seus respectivos sistemas.

A aproximação de base sistêmica dos campos do urbanismo e da ecologia ocorre a partir de uma série de vertentes disciplinares da ecologia urbana que surgem ao longo da segunda metade do século 20. Mesmo sem sistematização teórica, estas diferentes vertentes variam principalmente quanto ao tom naturalista em que ocorre a abordagem, ou seja, variando a quantidade dos atributos e relações naturais que compõem o sistema. Estas vertentes ocorrem desde os campos da Economia Urbana (Dendrinos, 1992), da Percepção Visual (Gibson, 1986), da Ecologia de Paisagem (Naveh, 1994), da Geografia Humana ou Social (Buzai, 2003), até abordagens de base predominante da ciência natural (Marzluf *et al.*, 2008).

A priori o estudo da ecologia urbana sugere aproximações às ciências naturais e é por esta perspectiva que se sucedem a maioria dos estudos da ecologia urbana contemporânea, onde Marzluf (2008) indica que a ecologia urbana é a ciência que tem o objetivo de compreender como os processos humanos e ecológicos podem coexistir no ecossistema urbano. Por outro lado, em tom menos naturalista, a ecologia de paisagem tem apresentado significativos avanços na tentativa de incluir o sistema humano e a cidade na paisagem natural, atuando como uma vertente de revitalização da geografia tradicional sobre aspectos de múltiplos campos disciplinares, onde as ciências naturais ocupam um lugar destacado, porém não dominante sobre as questões sócio-espaciais (Buzai, 2003). Deste modo, este trabalho propõe-se a se aproximar do conceito de ecologia urbana de forma aberta, sem associação específica com nenhuma das vertentes (nem na ecologia urbana de Marzluf, nem na ecologia da paisagem definida por Buzai), procura a partir de abordagens sistêmicas e propriedades emergentes dos sistemas complexos, estreitar relações entre os aspectos sócio-espaciais e a paisagem natural de suporte.

Emergência, auto-organização e resiliência urbana.

Até a metade do século 20, estruturas complexas, dentre estas a cidade, foram tratadas como se funcionassem como máquinas, ignorando o alto grau de determinação e aleatoriedade que ocorrem nos subsistemas e nas decisões individuais dos seus agentes. Atualmente, o que se percebe é uma mudança na forma de abordar cidades e sociedades, como organismos que crescem continuamente e suas modificações podem ser apenas direcionadas, induzidas e raramente projetadas no sentido *top-down* (de cima para baixo). O que se sustenta é que as cidades crescem como um fenômeno emergen-

te, a partir da ação de milhares de indivíduos, um comportamento capaz de gerar estruturas complexas, virtualmente impossíveis de serem geridas, controladas e planejadas de cima para baixo. O paradigma da complexidade dirige o foco de *top-down*, para *bottom-up*, concentrando-se em ações e decisões mais locais, ao invés de medidas globais (Johnson, 2003; Batty, 2007).

Estudos associados à auto-organização urbana têm indicado a cidade como o maior artefato produzido pela ação humana (Portugali, 2000) e ao longo de mais de 3.000 anos de história, demonstra fortes evidências de permanência ao longo dos tempos (Vale e Campanella, 2005). Neste sentido, os padrões de auto-organização da cidade não estão associados a arranjos geométricos visualmente atraentes (como ocorrem em outros sistemas complexos), mas seriam propriedades estruturais discretas que permitem que cidades como Jerusalém a.c., com cerca de mil habitantes, possa ser comparada com megalópoles contemporâneas composta por milhões de habitantes (Portugali, 2000). Deste modo o fator de permanência urbana seria uma propriedade associada ao fenômeno complexo, portanto intrínseco à dinâmica do crescimento urbano, que lhe confere capacidades de se auto-organizar em novas estruturas capazes de suportar situações adversas, o que tem sido referido pela ecologia urbana em termos da resiliência (Alberti *et al.*, 2003; Vale e Campanella, 2005).

A partir desta perspectiva ocorre o paradigma da sustentabilidade para a ciência urbana, o qual está em abordar os problemas urbanos pressupondo a cidade como um processo dependente de múltiplos fatores, extrapolando o universo estritamente urbano para abranger o contexto da região, onde um caminho possível para a busca de instrumentos analíticos da sustentabilidade urbana é o uso de séries temporais. Desde as primeiras indicações de abordar o ambiente urbano a partir das teorias de sistemas, os principais avanços estão associados com a forma em que ocorre a variável temporal. Atualmente, abordagens dos sistemas urbanos complexos ocorrem baseadas quase exclusivamente a partir de suas dinâmicas, onde sucessivas iterações relacionadas a um nível micro são responsáveis pela emergência de uma forma macro (Krafta, 2008). Neste contexto, estudos que buscam integrar crescimento urbano e o ambiente natural, um caminho é de reproduzir a cidade e a paisagem artificialmente a partir de modelos e simulações que possibilitem abordar as inúmeras interações urbano-ambientais (Alberti *et al.*, 2003; Polidori, 2004).

2.2.2. Modelagem de sistemas.

Modelos têm sido utilizados ao longo de todos os períodos da história e constituem uma das ferramentas intelectuais mais antigas da humanidade. Um modelo de uma determinada situação é uma representação simplificada da realidade concreta (Echenique, 1975). São ideais na medida em que incorporam alguma forma de abstração da realidade observada e conseqüentemente ferramentas que possibi-

litam operações sobre determinados fenômenos (Reif, 1978). A prática da modelagem envolve necessariamente um grau de subjetividade e a finalidade do modelo determina o critério das características a serem extraídas da realidade, somente sendo infiel em algum aspecto um modelo pode ser capaz de representar a realidade, se não, seria a realidade em si mesma (Batty, 2009).

A modelagem de sistemas ambientais é um procedimento teórico que envolve um conjunto de técnicas que dão as bases para a compreensão do ambiente natural (Christofoletti, 1999). O conceito de sistemas foi pioneiramente relacionado às ciências ambientais por Chorley (1962), o qual definiu sistemas ambientais como o conjunto de entidades conexas que ao relacionar-se espacialmente, configuram a superfície terrestre. Por muitos anos modelos têm sido utilizados no campo da gestão dos recursos naturais, onde modelos matemáticos têm sido amplamente aplicados na gestão quantitativa destes recursos. Entretanto, são recentes os esforços conduzidos na inclusão da variável urbana para resolução dos conflitos espaciais e ainda são inúmeras as dificuldades para encarar definitivamente o uso do solo como um dos múltiplos “usuários” na gestão integrada dos recursos hídricos (Ducrot, 2004).

Por sua vez, modelos urbanos são teorias abstratas capazes de representar os objetos ou sistemas que existem, existiram ou podem vir a existir no ambiente urbano. Segundo Echenique (1975) não basta compreender a cidade como um sistema, é preciso alguma forma de representá-la. Bons modelos e boas teorias convergem como diferentes maneiras de representar determinadas concepções dos sistemas urbanos, uma vez que ambos buscam maneiras simplificadas e eficientes de fazer esta representação (Batty, 2009).

Uma importante classificação dos modelos se dá de acordo com as capacidades exploratórias e a finalidade em que é aplicado. Echenique (1975) indica que modelos podem assumir finalidades: a) descritivas; b) exploratórias; c) preditivas; d) operacionais. Modelos descritivos visam simplificar a compreensão da realidade, sendo característica essencial a qualquer tipo de modelo. Modelos exploratórios possibilitam abordar realidades logicamente possíveis, alcançadas através da variação dos parâmetros estáticos já utilizados no modelo descritivo. Já modelos com finalidades preditivas são aplicados a um determinado horizonte temporal, dedicados a explorar cenários de passado ou de futuro, representam de forma dinâmica como a realidade é alterada. Por fim, modelos operacionais assumem propósito de avaliação e são aplicados ao planejamento, simulando os efeitos de diferentes tomadas de decisão; necessitam de um processo de descrição, validação e calibração, precisos e constantes, uma vez que os cenários desejados encontram-se em um ponto futuro associado a uma realidade possível.

A partir da classificação dos modelos quanto as suas possibilidades exploratórias, Batty (2009) indica uma trajetória evolutiva na aplicação dos modelos à realidade urbana. Anterior ao advento da computação digital modelos urbanos associavam-se principalmente de modelos icônicos, com finalidades des-

critivas, geralmente construídos através de materiais tradicionais visavam a simples compreensão ou explicação, eram amplamente utilizados na representação estática de projetos e planejamentos físicos da cidade. A partir da década de 60, modelos passam a estar ligados a plataformas computacionais e a possibilidade de representação abstrata através da linguagem lógico-matemática, o que possibilita que modelos assumam finalidades preditivas e possibilidades de prognosticar o futuro, representando a forma que a realidade está mudando (Batty, 2009).

Avanços recentes em técnicas de modelagem urbana se apoiam na não linearidade de processamentos computacionais sendo recorrentes na ciência urbana contemporânea. Atualmente, modelos servem como instrumentos que possibilitam cientistas e planejadores controlar o fenômeno e explorar cenários de futuro, servindo como assim como uma ponte entre a teoria e a prática. São ferramentas essenciais para articular o presente e o futuro das cidades, permitindo a ciência alocar teorias a serem testadas frente aos dados e planejadores explorar finalidades preditivas de padrões locais emergentes. Neste contexto, computadores atuam como verdadeiros laboratórios do fenômeno urbano, permitindo que a cidade seja reproduzida experimentalmente através de simulações (Batty, 2009).

Modelagem do ambiente urbano baseada em autômatos celulares.

No caminho da modelagem urbana sistêmica, dinâmica e integrada com o plano de suporte, autômatos celulares (CA – *cellular automata*) são procedimento que possibilitam a ciência urbana reproduzir as inúmeras interações espaço-temporais que ocorrem na realidade urbana. O ambiente de um CA é caracterizado espacialmente por um *grid* celular, onde o tempo é transcrito através de um procedimento iterativo. O estado do conjunto celular em um dado tempo é determinado por regras locais que dependem do seu próprio estado e do estado das células vizinhas. A dinâmica de um autômato celular é dada por múltiplas transições de fases, em um processo iterativo baseadas em regras locais, caracterizando um típico sistema complexo, de onde emergem padrões de auto-organização em escala global (Wolfram, 1984).

O uso de CA vem sendo desenvolvido desde na década de 1940, desde os primeiros trabalhos de John von Neumann e Stanislaw Ullman, os quais estão ligados ao desenvolvimento da inteligência e da vida artificial na ciência da computação e na teoria dos jogos. Entretanto, a primeira aplicação importante de CA foi enunciada por John Conway no chamado *Game of Life* (Jogo da Vida), publicado por Gardner (1972) no periódico *Scientific American*, que de imediato interessa a comunidade científica baseada nas teorias da complexidade e auto-organização (Torrens, 2000). CA foram primeiramente aplicados às ciências físicas e naturais, em campos disciplinares onde já havia avanços teóricos sobre estudos dos sistemas enquanto comportamento complexo. Somente na década de 90 surgem os primeiros estudos aplicados às cidades e suas relações sócio-espaciais (Batty 1997).



Figura 2.3 convergência CA e estudos urbanos: a) pela semelhança entre unidades espaciais: quadra e célula (Barcelona, elaborada pelo autor); b) pixels disponibilizados em imagens de satélite (Pelotas-RS diferentes resoluções, Polidori, 2004).

Para Portugali (2000), a atratividade de modelos CA ao estudo das cidades é praticamente evidente, tanto pela similaridade entre as unidades espaciais, lotes, quarteirões e células, conforme figura 2.3a, bem como a convergência com os pixels possibilitados por imagens de satélite amplamente utilizadas por técnicas de sensoriamento remoto, conforme figura 2.3b. Para esse potencial de utilização de CA em estudos da geografia e do urbanismo, Portugali (2000) sugere a utilização da expressão Geografia Celular (*Cellular Geography*), resgatando termo proposto por (Tobler, 1979), e ressalta o aumento de estudos que utilizam esse tipo de modelagem aplicada a ciência urbana, com destaque para a edição especial do periódico *Environment and Planning B: Planning and Design* 24, 1997, dedicada exclusivamente à aplicações de CA aos sistemas urbanos.

De acordo com Wolfram (1984), um CA pode ser definido por cinco elementos básicos: a célula, o estado, a vizinhança, as regras de transição e a variável temporal. A partir de múltiplas combinações possíveis, são capazes de configurar arranjos emergentes à dinâmica do sistema. Na sequência são apresentadas definições de cada um destes elementos e suas possibilidades de replicar a realidade urbana:

a) a célula: é a unidade espacial básica do sistema. CA aplicados a simular crescimento e capturar morfologia urbana geralmente são representados por um *grid* bidimensional. Entretanto outros arranjos podem ser explorados, como o caso de *grids* lineares utilizados na modelagem de tráfego e *grids* tridimensionais utilizados na modelagem de voo de pássaros e dissipação de fumaça. Modelos CA tridimensionais são potenciais para modelar os estoques construídos das cidades, porém são poucos avanços nesse sentido (Benguigui *et al.*, 2008).

b) o estado: define os atributos do sistema. Cada célula pode assumir apenas um estado em um dado tempo, o que tem sido traduzido na modelagem urbana a um tipo de uso do solo (se comercial, residencial ou industrial em Batty, Xie e Sun, 1999); determinada natureza de carregamento (se natural, urbano ou institucional em Polidori, 2004); ou diferentes padrões sociais (Portugali, 2000). A modelagem urbana avança sobre a prática tradicional de CA com associação numérica ao estado de uma célula, possibilitando diferenciação por intensidades de carregamentos como diferentes densidades de urbanização (Polidori, 2004).

c) a vizinhança: corresponde ao conjunto de células com as quais a célula em questão interage. CA clássicos baseiam-se em dois padrões de vizinhança: de von Neumann composta por 4 células, incluindo às células, norte, leste, sul e oeste; a vizinhança de Moore ampliada para um conjunto de 8 células, incluindo também as adjacentes a nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste. Outros tipos de vizinhança são aplicadas a realidade urbana ampliando o raio de interação da célula.

d) as regras de transição: definem como e quando o estado da célula modifica-se em resposta ao estado da suas vizinhas. Trata-se de um elemento essencial no processo de modelagem, pois as regras representam os processos do fenômeno em questão. Se dedicados a simular crescimento urbano, as regras devem traduzir a interação espacial e replicar as formas que ocorre o crescimento urbano.

e) o tempo: define a dimensão temporal do sistema, geralmente relacionada a intervalos temporais conhecidos. Simulações de crescimento urbano geralmente são traduzidas na variável anual, com horizontes que variam em torno de 50 anos. Embora tradicionais definições de CA estimem que todas as células interajam simultaneamente, avanços recentes indicam que CA podem operar com diferentes velocidades para diferentes células, o que aplicado a realidade urbana poderia replicar diferentes velocidades de crescimento em diferentes regiões da cidade.

Por fim, destaca-se que modelagem de processos dinâmicos do crescimento urbano integrados ao ambiente natural podem ser buscadas mediante o uso de técnicas de CA. Esta possibilidade está simplificada demonstrada no trabalho de Liu (2009), a partir de um ambiente celular regular, com um núcleo urbano central e uma regra de crescimento capaz de replicar crescimentos concêntricos, conforme está na figura 2.4a. Na sequência a autora apresenta um segundo experimento no qual é aplicada uma diferenciação na paisagem natural de suporte configurada por relevos superiores a 300m e sobre a regra de crescimento inicial é acrescentada uma restrição à conversão para o estado urbano células que incidem sobre áreas com relevos superiores a 300m, conforme está na figura 2.4b. De forma simplificada a autora demonstra possibilidade de capturar morfologias dinâmicas de crescimento urbano integradas a paisagem natural.

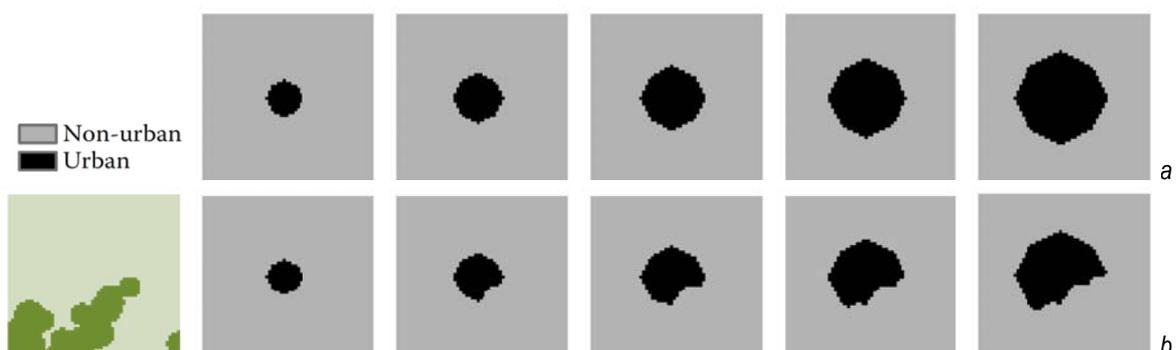


Figura 2.4: possibilidade de simular crescimento urbano integrado ao ambiente natural através de CA: a) crescimento concêntrico, sem a influência do ambiente natural; b) morfologia emergente impedido em topografias sup. 300m (Liu, 2009).

Avançando sobre as múltiplas possibilidades de modelar crescimento urbano integrado com o ambiente natural, destaca-se ainda as possibilidades de diferenciação morfológica de cenários históricos (figura 2.5a), diferenciação de resistências espaciais (figura 2.5b) e análise de limiares ambientais (figura 2.5c); conceitos de interesse nos campos da morfologia urbana, ecologia da paisagem e ecologia urbana, respectivamente (Polidori, 2004; Peres e Polidori, 2009)

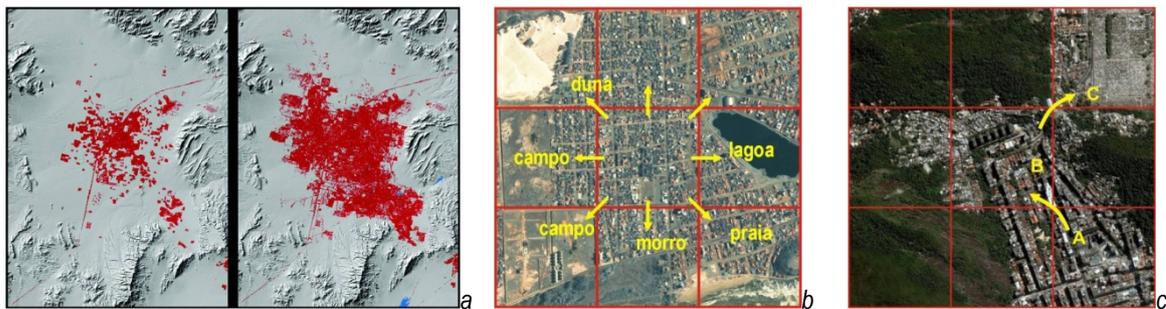


Figura 2.5: convergência modelagem urbana CA com análises de: a) diferenciação morfológica (Las Vegas 1973-1992, USGS); b) resistência espacial (Torres-RS, pelo autor); c) limiares ambientais (Rio de Janeiro-RJ, pelo autor).

2.3. Crescimento urbano dinâmico e a convergência para a escala da paisagem natural.

A cidade vem sendo reconhecida como um fenômeno dinâmico, com transformações permanentes e com resultados instáveis (Portugali, 2000), sendo diversas as teorias dedicadas a explicar a forma que ocorrem as dinâmicas do crescimento. Entretanto, para trabalhar com a mudança é preciso avançar na simples explicação das suas dinâmicas e melhor compreender os processos que a provocam, capturar os fatores que a condicionam e as regras e padrões espaciais emergentes à ocorrência de mudança (Torrens, 2000). Nos mais diversos campos da ciência sistêmica, são diversas as propriedades denotadas à dinâmica emergente dos sistemas complexos. Ao aproximar o fenômeno urbano e o ambiente natural a partir de abordagem sistêmica, o trabalho está dedicado sobre dinâmicas do crescimento urbano externos e as possibilidades desta dinâmica ocorrer de modo convergente à paisagem natural, pressupondo o processo do crescimento urbano associado aos princípios da auto-organização e da resiliência urbana (Portugali, 2000; Alberti *et al.*, 2003). Neste último título da revisão são discutidos alguns enunciados recentes da teoria urbana dedicados à dinâmica e a descontinuidade espacial do crescimento urbano, posteriormente são indicadas possibilidades de associar fatores do ambiente natural como pontos de convergência do sistema à ocorrência de mudança.

2.3.1. Dinâmica urbana e a descontinuidade espacial emergente.

O crescimento urbano é objeto de estudo desde as primeiras teorias locais surgidas na primeira metade do séc. XX, onde diversos autores buscam explicar a cidade baseados numa lógica causa-efeito e através de suas relações geográficas, econômicas e sociais (Park e Burgess, 1925; Hoyt, 1939;

Alonso, 1964). São recentes os enunciados à respeito da dinâmica do crescimento urbano à luz das ciências complexas e da auto-organização, sendo ainda mais recentes aproximações da descontinuidade espacial e morfologias urbanas integradas com a escala espacial da paisagem natural (Batty e Longley, 2004; Czamanski *et al.*, 2008; respectivamente).

NEG – Nova Geografia Econômica e a abordagem evolutiva da teoria urbana.

As primeiras aproximações que formam uma base consistente sobre as questões sócio-espaciais do fenômeno urbano surgem na primeira metade do século 20, onde diversos autores buscam explicar a cidade através de suas relações geográficas, econômicas e sociais. Neste contexto, uma sucessão de modelos e teorias tentam explicar a lógica da cidade como um fenômeno linear, baseadas em uma relação direta de causa-efeito do comportamento de seus agentes e visavam a cidade a partir de um único ponto de vista. Os primeiros enunciados locacionais urbanos foram lançadas por von Thünen, abordando o fenômeno baseados nos princípios econômicos de maximização dos lucros. Posteriormente resgatadas por Alonso (1964, figura 2.6c) no modelo da cidade econômica, inaugura a representação da cidade espacialmente a partir de uma sucessão de anéis concêntricos com maiores vantagens locacionais àquelas atividades econômicas capazes de obter a mais valia do uso do solo. Isto é, localizando mais próximo ao núcleo central (CBD – *central business district*) as atividades com maior capacidade de extrair lucros a partir do uso e ocupação do solo urbano.

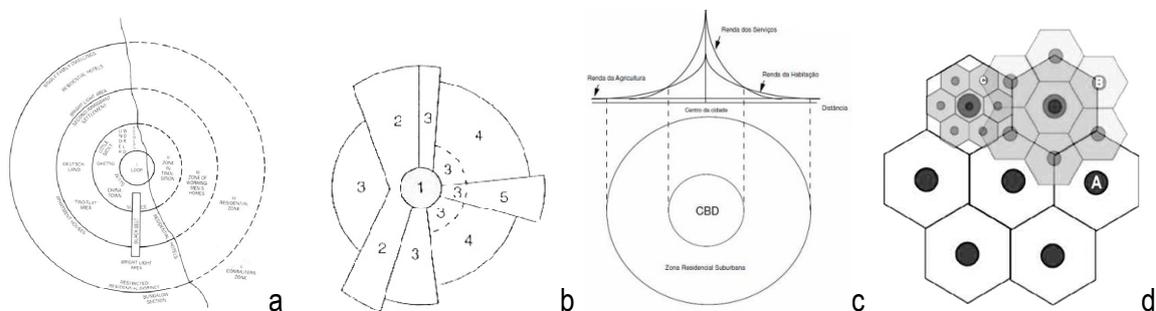


Figura 2.6: modelos urbanos concêntricos: a) Park e Burgess, 1925; b) Hoyt, 1939; c) Alonso, 1964; d) Christaller, 1933.

O princípio da configuração urbana concêntrica também foi interpretada associando às relações de competição ecológica, propostas pela escola de Chicago (Park e Burgess, 1925, figura 2.6a), bem como pelas posteriores adaptações setoriais propostas por Hoyt (1939; figura 2.6b). O mesmo pensamento concêntrico da cidade está no modelo proposto por Christaller (1933, figura 2.6d) na Teoria do Lugar Central, diferenciando-se dos demais modelos principalmente por abordar o território em escala regional. Em suma, a trajetória clássica da teoria urbana foi de extrema importância para lançar as bases da teoria urbana contemporânea, porém se mostraram ao longo do tempo, incapazes de forma isolada enfrentar os complexos problemas que surgiam nas cidades.

Partindo da trajetória dos modelos urbanos clássicos, alguns autores como Krugman (1996) e Fujita e Mori (1997) dedicaram-se a rediscutir as tradicionais teorias urbanas, integrando os campos da geografia e da economia urbana no contexto das teorias da complexidade e da auto-organização. Este movimento ficou caracterizado como a *New Economic Geography* (NEG - Nova Geografia Econômica), reúne geógrafos e economistas que dedicam-se a explicar dinâmicas espaciais a partir de uma releitura evolutiva e dinâmica das teorias locacionais clássicas, associando aos fenômenos da descentralização, da polinucleação e da suburbanização das cidades contemporâneas. A “abordagem evolutiva da teoria clássica” (Fujita e Mori, 1997) sugere que a validade da teoria urbana ocorre a partir de uma releitura de sua trajetória, relacionando-a com uma espécie de processo evolutivo.

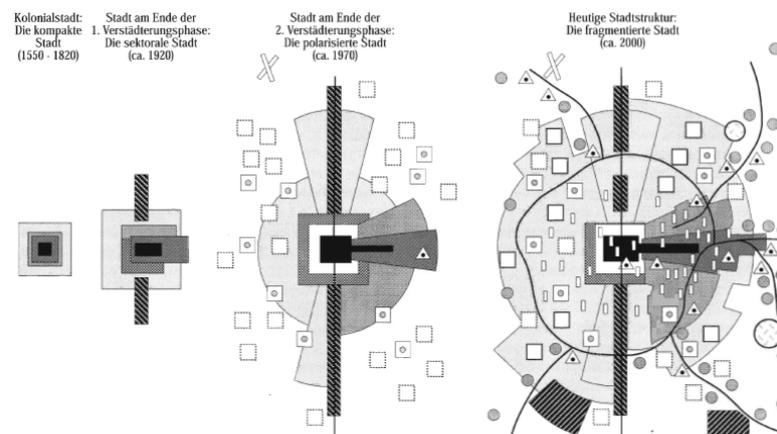


Figura 2.7: abordagem evolutiva da teoria urbana clássica na configuração da cidade latino-americana (Janoschka, 2002).

No contexto da NEG, Janoschka (2002) tenta explicar o surgimento dos condomínios fechados e a consequente fragmentação morfológica das cidades latino-americanas a partir de uma abordagem dinâmica e evolutiva das teorias locacionais, conforme apresentado na figura 2.7, acima. Segundo adaptação do autor, cidades latino-americanas apresentam uma defasagem temporal no processo de crescimento se comparadas às cidades do velho mundo, o que qualifica a aplicação das ideias de Fujita e Mori (1997). Deste modo, durante o período colonial as cidades da latino-america cresceram em torno de um lugar central, semelhantes às ideias de econômicas de von Thünen e ecológica da escola de Chicago (figura 2.6a, anterior). A medida que a cidade cresce, melhor define seus acessos viários, assemelhando-se ao modelo Setorial de Hoyt (figura 2.6b, anterior), até atingir escalas regionais e o surgimento de multicentralidades e descentralizações simultâneas, assemelhando-se com a Teoria do Lugar Central de Christaller, figura 2.6d, anterior (Buzai, 2003).

Dimensão fractal urbana.

Contemporaneamente aos enunciados da NEG, outra vertente da teoria urbana tenta explicar a descontinuidade espacial sob a lógica geométrica da dimensão fractal de Mandelbrot (1982). A Cidade Fractal (*Fractal City* – Batty e Longley, 1994) revelaria semelhanças geométrico-morfológica entre os

espaços construídos e abertos, quando observados tanto em baixas, quanto em altas resoluções; sugerindo que a auto-organização da macro e da microestrutura urbana estariam associadas a regras em escala local. Batty e Longley (1994) verificam empiricamente a dimensão fractal em diversas cidades pelo mundo enunciando um grande potencial de abordagem da sua dinâmica, o que logo atrai atenção de diversos pesquisadores nos últimos anos da década de 90.

Atualmente a dimensão fractal urbana cai em desuso, principalmente por certo descrédito científico e pelos alertas de Benguigui *et al.* (2000), quando os autores estudam a dimensão fractal da cidade de Tel Aviv e publicam importantes questionamentos sobre a aplicação da lógica fractal em estudos da dinâmica urbana. Primeiro comprovando que nem todas as áreas metropolitanas de Tel Aviv apresentaram correlação com a dimensão fractal e segundo, indicando que as semelhanças geométricas da escala fractal não eram dadas por mecanismos semelhantes para as diferentes escalas espaciais (Benguigui *et al.*, 2000).

Percolação em autômato celulares.

Com a emergência dos procedimentos científico-computacionais baseados na lógica dos autômato celulares (a lógica dos celular autômata está descrita ao final do item 2.2.2) e a rápida aceitação para aplicações em estudos urbanos (Torrens, 2000), dinâmicas oriundas de outros campos da ciência que aplicam à lógica dos CA são experimentadas no estudos da dinâmica urbana, como é o caso das ideias de percolação. A teoria da percolação tem origem nas ciências naturais associadas às ideias de transporte e transferência de energia, com grandes aplicações às ciências geológicas. Uma importante aplicação da teoria da percolação aos estudos urbanos está em Maske *et al* (1998), aplicando uma lógica estocástica no “*Correlated Percolation Model*”, associando fatores probabilísticos de adição de estoques construídos em uma determinada célula em função da densidade dos estoques das células imediatamente adjacentes. Aplicações de percolação capturam exclusivamente o crescimento urbano interno, com limitações à expansão urbana pela iteração ocorrer com células imediatamente adjacentes.

A teoria da Percolação também está aplicada por Polidori (2004) como uma regra de crescimento do modelo SACI (o modelo está melhor descrito no item 3.1.4 do capítulo do método), entretanto a regra de crescimento por Percolação foi parcialmente testada pelo autor, está dedicada exclusivamente ao crescimento dos atributos naturais (como matas nativas) e operam paralelamente as regras do crescimento urbano, permitindo simular crescimento urbano e dos atributos naturais simultaneamente.

Sprawl e periferização.

Outra vertente da teoria urbana diferencia o crescimento urbano de acordo com a localização geográfica do objeto de estudo, onde a expansão urbana tem sido tratada nos países de primeiro mundo em

termos do *sprawl* ou suburbanização, enquanto nos países de terceiro mundo este movimento estaria associado a um processo de periferização. Do modo em que tradicionalmente têm sido tratados, tanto o processo do *sprawl* quanto do fenômeno da periferização são formas de crescimento urbano caracterizado por movimentos de segregação sócio-espacial que avançam sobre a paisagem natural de forma indiscriminada (conforme está em Torrens e Alberti, 2000; Barros, 2004; respectivamente).

Mesmo separadas de acordo com o contexto geográfico, contrapondo-se à ideia que fenômeno urbano apresenta características similares e fundamentais desde suas origens (Portugali, 2000), os fenômenos do *sprawl* e da periferização estão dedicados a explicar movimentos de descentralização das cidades contemporâneas. Amplamente abordados pela ciência urbana ao longo desta primeira década do século 21, uma grande quantidade de formas de medir o *urban sprawl* estão apresentadas por Torrens e Alberti (2000). A partir deste contexto muito se reproduziu a ótica econômica e compacta da cidade, onde eram evidenciados os aspectos negativos do crescimento fragmentado, associado aos custos de viagem, a necessidade de investimentos em infraestrutura e ao aumento do consumo de recursos naturais (Czamanski *et al.*, 2008).

Contemporaneamente, grande parte dos estudos dedicados às dinâmicas do crescimento urbano e a descontinuidade espacial emergente ainda estão associado ao fenômeno do *sprawl*, entretanto são cada vez maiores estudos que indicam a descentralização como um processo inevitável do crescimento das cidades e até certo ponto um estado desejável da evolução natural do sistema urbano; com recentes associações a movimentos de adaptação a escala espacial da paisagem natural (Alberti *et al.*, 2003; Czamanski *et al.*, 2008).

Crescimento urbano como leapfrogging, orientado por redes hídricas e de transportes.

Após estudos dedicados ao *urban sprawl* e a dimensão fractal urbana da cidade de Tel Aviv, Benguigui, Benenson, Czamanski, Portugali dentre outros pesquisadores do Complex City Research Lab tem realizado importantes estudos sobre as possibilidades de compatibilizar a descontinuidade do crescimento urbano ao ecossistema natural, associando o crescimento urbano a uma dinâmica do *leapfrogging*. (Benguigui *et al.*, 2001). O termo que tem origem a partir de uma brincadeira infantil de realizar saltos impulsionados por obstáculos é absorvido pelas teorias econômicas para traduzir crescimentos ocorridos através de inovações (tecnologias produtivas de redução de perdas, por exemplo) em situações desfavoráveis (como crises econômicas globais, por exemplo). A expansão urbana associada ao movimento *leapfrogging* corresponde a uma dinâmica da morfologia urbana capaz de configurar uma sucessão de espaços abertos, quando a expansão urbana se depara com situações da paisagem desfavoráveis à urbanização. O crescimento urbano ocorrido como *leapfrogging* pode ser um caminho para

melhor articular a cidade à paisagem natural ou às atividades de produção rural (Czamanski *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2007, respectivamente).

No mesmo caminho, Tjallingii (2005) tem se dedicado a levantar estratégias que podem ser aplicadas para um desenvolvimento urbano adaptado a paisagem natural, indicando tanto a água como os transportes, fluxos essenciais aos processos urbanos. O autor propõe um modelo que articula espacialmente a rede de transportes e o sistema dos recursos hídricos com a finalidade específica para o planejamento urbano, dedicado a apoiar a tomada de decisão de investimentos em sistemas de transportes, escolha de locais para habitação e manutenção de áreas verdes. Segundo Tjallingii (2005), é tarefa urgente à teoria urbana alcançar consenso sobre a unidade espacial básica do crescimento urbano, onde um caminho está lançado tratando de compatibilizar investimentos na estrutura viária e na dimensão espacial das linhas de drenagem e divisores de águas da hidrografia.

2.3.2. Catalisadores da dinâmica, a descontinuidade urbana e convergência com os atributos naturais.

Recentemente, em um dos editoriais do periódico *Environment and Planning: B*, v.36, Batty (2009b) propõe um desafio à teoria urbana dedicada à dinâmica de mudança, onde apresenta a ideia de *catastrophic cascades* (efeito cascata). A dinâmica ocorrida em efeito cascata teria como principal desafio descobrir os elementos discretos presentes nos sistemas urbanos que catalisam a transição de fases (*phase transitions*), que segundo o autor ocorre através do referido efeito. A transição de fase é um padrão de dinâmica que ocorre em alguns sistemas complexos, capaz de transformar abruptamente o comportamento inicial do sistema. Ocorre a partir de um dado momento em que o sistema atinge um determinado limiar ou converge para situação de *tipping points*. Um exemplo clássico da transição de fases está na mudança de estados da água, que ocorrem em determinadas condições de temperatura e pressão, modificando substancialmente a sua estrutura (Batty, 2007).

Segundo propõe Batty (2009b), os *tipping points* (pontos de convergência) catalisadores da dinâmica urbana em efeito cascata seriam decorrentes não apenas de um ou poucos atributos, mas sim por uma infinidade de fatores que sobrepostos seriam capazes de influenciar a dinâmica na configuração espacial do sistema urbano. São estes múltiplos fatores associados às questões econômicas, sociais e ambientais, que configuram o fenômeno urbano enquanto sistema complexo e possibilitam a ocorrência de descontinuidades na configuração espacial emergente.

Este enunciado permite entender que o desafio da ciência urbana está em avançar sobre a definição de quais os fatores que compõem o sistema urbano enquanto sistema complexo, dedicando-se a estudar quais seriam os pontos onde o sistema converge para a transição de fases. Absorvendo as ideias de Batty (2009b), este trabalho procura abordar a morfologia urbana e suas relações com a paisagem

natural, dedicado a capturar a influência da hidrografia na dinâmica configuracional emergente, onde é possível pressupor que os recursos hídricos atuam como um ponto de convergência na dinâmica espacial urbana.

Planos não isotrópicos e a paisagem natural como campo de irregularidades.

Entretanto, para que ocorram abordagens desta natureza, é necessário reduzir o grau de abstração do plano de suporte à configuração espacial urbana; ou seja, abordar o ambiente natural como um campo de desiguais oportunidades espaciais à conversão urbana, e não como se fossem planos isotrópicos (Nystuen, 1968). O conceito de isotropia da paisagem é uma forma de abstração do ambiente que desconsidera os aspectos da paisagem natural nos processos urbanos, onde o ambiente natural não apresenta nenhuma forma de resistência ao crescimento urbano e todos os solos urbanos são considerados igualmente férteis. A partir de planos isotrópicos fundamentais teorias urbanas foram demonstradas com evidências nas relações sócio-espaciais. Neste sentido, a proposta de abordar a paisagem de suporte como planos não isotrópicos não vem a invalidar teorias enunciadas a partir deste fundamental conceito espacial, e sim acrescentar a possibilidade de ampliar as relações entre a morfologia do crescimento urbano e a paisagem natural definida pela hidrografia.

Comumente a teoria urbana tem indicado a fragmentação e a descontinuidade da forma urbana como fatores de comprometimento da sustentabilidade, principalmente devido a subutilização de infraestruturas e serviços, aumento dos custos de operação e consumo de território (Krafta, 2008). Neste contexto, a ocorrência de vazios urbanos tem sido associada exclusivamente a mecanismos de retenção imobiliária ou ausência de políticas sobre o território (Jenks e Burgess, 2000). Por outro lado, a paisagem natural e os seus atributos representam o ambiente antecessor da cidade, funcionando como um campo de irregularidades que impõem diferentes intensidades de resistência a urbanização, influenciando a forma do crescimento urbano em curto e em longo prazos, na micro e na macro escala (Polidori, 2004). Estas irregularidades são capazes de impor maiores ou menores restrições ao processo de urbanização, contribuindo na formação de falhas emergentes do crescimento urbano e geralmente correspondem às linhas de drenagem, locais propícios a inundações, à insalubridade e ocorrência de solos de baixa resistência (Alberti *et al.*, 2003). Portanto, é possível pressupor que os fragmentos ou vazios urbanos estejam associados espacialmente aos atributos do ambiente natural, emergentes da dinâmica do crescimento urbano frente às irregularidades do plano de suporte.

Diferenciação por centralidade, potencial de crescimento e efeito de borda.

Importantes abordagens dedicadas a descrever configurações espaciais urbanas a partir de sua morfologia têm ocorrido a partir de diferentes medidas de centralidade. De modo geral, centralidade é uma

relação espacial entre elementos polarizadores e áreas polarizadas do sistema urbano que permitem formas de diferenciação interna do sistema, descrevendo a morfologia em um dado instante, mas também indicando o desequilíbrio espacial do sistema. Diferenças de centralidade são locais de convergência e atratividade urbana para a ocorrência de mudança, o que pode ser traduzida como uma medida de potencial de crescimento (Krafta, 1999). A cidade enquanto fenômeno em constante desequilíbrio espacial e permanente potencial à ocorrência de mudança converge com teorias das ciências sociais que indicam a cidade como um fenômeno em constante produção do espaço (Harvey, 1985). Sob esta perspectiva é possível entender o crescimento urbano continuado como um aspecto intrínseco ao fenômeno, que lhe confere certa autonomia e auto-organização morfológica e permite amenizar visões excessivamente maléficas da expansão urbana (Krafta, 1999; Portugali, 2000; Buzai, 2003).

Retomando a articulação com a paisagem natural e o campo de irregularidades do plano de suporte, à medida que a cidade cresce, tende a deparar-se com locais de maior resistência e valorização do ambiente natural, concentrando potenciais de crescimento sobre estas áreas de interface urbano-naturais. A concentração de potenciais de crescimento nas interfaces do ambiente urbano e não urbano, demarcando frentes de expansão em formas lineares, está caracterizada por Polidori (2004) como a ocorrência de um efeito de borda urbano, configurando locais de tensão e ocorrência de conflitos ambientais. Segundo o autor, a ocorrência de efeito de borda estaria associada a um indicador de conflitos urbano-naturais e alternâncias na morfologia do crescimento urbano. Ou seja, a medida que a cidade cresce com predomínio concêntrico, a morfologia se depara com áreas de resistência à conversão urbana, onde concentra potenciais de crescimento e conforma efeitos de borda. Simultaneamente, o crescimento urbano passa a ocorrer em outras áreas do sistema, permitindo a manutenção do contínuo processo de produção espacial urbano (Polidori, 2004).

Em outras palavras, alternâncias de medidas de centralidade, ocorrência de potenciais de crescimento e o efeito de borda, podem ser associados a indicadores de alternância morfológica do crescimento urbano. Como a ocorrência do efeito de borda demarca frentes de expansão em forma de linha, se a paisagem natural for abordada a partir da hidrografia, configurados pelas linhas de drenagem e suas áreas adjacentes, a ocorrência do efeito de borda sobre os recursos hídricos é ainda mais evidente pela superposição de frentes de expansão urbana e resistências dos recursos hídricos em suas formas lineares.

Em suma, o efeito de borda sobre linhas de drenagem dos recursos hídricos pode ser tomado como indicadores de pontos de convergência de atratividade urbana e resistência do ambiente natural, que sobrepostos, reforçam a ideia da ocorrência de uma dinâmica urbana em efeito cascata.

2.4. Marco Teórico.

A partir da revisão teórico-metodológica apresentada podem ser resgatados alguns pontos fundamentais que configuram o marco teórico do trabalho, os quais se sucedem:

a) partir da diferença temporal que ocorre entre o crescimento urbano continuado e tempo de retorno (TR) das linhas de drenagem em cheias máximas, são decorrentes a maioria dos conflitos espaciais de uso e ocupação em áreas dos sistemas de águas urbanas (Tucci, 2002; 2005).

b) atualmente, é indicado que o manejo das águas urbanas ocorra priorizando medidas não estruturais possibilitadas por práticas de planejamento urbano pró-ativas, compatibilizando a dinâmica do crescimento urbano e preservação dos recursos hídricos (Lanna, 1999; Tucci, 2008).

c) parece possível buscar métodos alternativos ao tradicional planejamento urbano normativo, superando práticas que se reduzem a constituir um conjunto de regras fixas de ocupação e uso do solo urbano (Hoering e Seasons, 2005; Krafta, 2008).

d) parece possível avançar na aplicação de cenários urbanos de futuro associados exclusivamente às alterações no ciclo hidrológico, explorando também dinâmicas de crescimento urbano e a articulação morfológica da cidade à escala da paisagem natural (Alberti *et al.*, 2003; Czamanski, 2008).

e) as ciências complexas possibilitam aproximação dos campos da ecologia e o urbanismo, através da convergência teórico-conceitual à teoria de sistemas, complexidade e auto-organização (Portugali, 2000; Alberti *et al.*, 2003; Buzai, 2003).

f) abordagens dedicadas a capturar ou induzir arranjos emergentes do sistema urbano complexo, dirigem o foco de *top-down* para *bottom-up*, concentrando ações em escala local, ao invés de medidas globais (Portugali, 2000; Batty, 2007).

g) propriedades de auto-organização da cidade não estão associadas a arranjos geométricos visualmente atraentes, mas conferem ao sistema urbano capacidades de suportar situações adversas, o que tem sido referido pela ecologia urbana em termos da resiliência (Portugali, 2000; Alberti *et al.*, 2003).

h) o paradigma da sustentabilidade para a ciência urbana está em abordar a cidade como um processo dependente de múltiplos fatores, extrapolando o universo estritamente urbano, onde o uso de modelos e simulações possibilitam abordar as interações que ocorrem nos sistemas complexos (Alberti *et al.*, 2003; Krafta, 2008).

i) sistemas urbanos abertos e dinâmicos indicam abordagens que envolvam a variável temporal e integradas com o entorno imediato, dispondo de mecanismos adaptativos com propriedades de auto ajuste através do funcionamento do próprio sistema (Reif, 1975; Forrester, 1998).

j) dinâmicas morfológicas do crescimento urbano que associem a ocorrência de urbanização remota e a manutenção de locais de maior resistência e valorização natural podem ser entendidas mecanismos de resiliência urbana (Alberti *et al.*, 2003; Polidori, 2004; Czamanski, 2008).

k) abordagens efetivas sobre a dinâmica urbana não devem pautar meras explicações ou associações teóricas, avançando na compreensão dos fatores que a condicionam, capturando as regras e padrões espaciais emergentes à ocorrência de mudança (Torrens, 2000; Polidori, 2004; Batty, 2009).

l) a ocorrência de potenciais de crescimento e efeito de borda é indicada como ponto de convergência entre a atratividade urbana e as resistências naturais, os quais podem ser tomados como indicadores para a ocorrência de descontinuidades espaciais decorrentes de alternâncias na forma que ocorre o crescimento urbano. (Krafta, 1994; Polidori, 2004; Batty, 2009).

3. Método

Percorridas e apresentadas as bases teóricas que fundamentam o trabalho e contribuem para o refinamento da hipótese apresentada na introdução, neste capítulo são apresentadas as formas de abordar o problema em questão. As orientações metodológicas do trabalho estão inseridas no campo dos sistemas urbanos, especialmente dedicado aos estudos configuracionais de base morfológica, a possibilidade de diferenciação do ambiente urbano a partir do modelo de Potencial-Centralidade e sua adaptação à dinâmica celular implementada no modelo de crescimento urbano SACI – Simulador do Ambiente da Cidade. Este capítulo também está dedicado a realizar simulações de crescimento urbano de caráter exploratório e construir um adicional ao modelo, que opere sensível à presença dos atributos da hidrografia, capaz de auto-parametrizar as tensões de crescimento urbano de modo dinâmico e iterativo. O mecanismo está dedicado a capturar alternâncias na morfologia do crescimento a partir da ocorrência de efeitos de borda em áreas de *buffer* dos recursos hídricos. Pretende-se que este procedimento simulatório adicional ao SACI seja transcrito em uma nova regra de crescimento dedicada a futuras simulações com especial atenção aos atributos dos recursos hídricos e a valorização iterativa dos atributos do ambiente natural.

3.1. Modelando crescimento por diferenciação espacial e integrando cidade-ambiente.

3.1.1. Morfologia urbana e sistemas configuracionais urbanos.

Por sistemas configuracionais entende-se todos os sistemas que possuem uma arquitetura, uma configuração baseada na posição espacial relativa de seus elementos e informações das suas conexões. Um sistema configuracional urbano é todo o sistema urbano definido por muitos objetos, um conjunto de espaços relacionados entre si por posições ocupadas no solo e por adjacências. A estrutura ou configuração urbana corresponde a uma forma de ordenação funcional entre as formas construídas, os espaços abertos e a rede de fluxos, em um dado instante de tempo. Uma determinada configuração urbana corresponde a uma diferenciação e hierarquia entre as unidades espaciais do sistema, sugerindo que os sistemas urbanos possuem capacidades inerentes de integração e segregação espacial, além de propriedades de gerar valor do uso do solo de acordo com suas facilidades locais internas (Echenique, 1975; Krafta, 1994).

Dentro da linha dos sistemas configuracionais urbanos, o trabalho percorre suas possibilidades de análise morfológica, sendo a morfologia urbana o campo disciplinar que procura abordar a estrutura configuracional urbana a partir de suas características exteriores, físicas ou geométricas (Lamas, 1993;

Krüger, 1996). Estudos da morfologia urbana possibilitam, a priori, analisar o sistema configuracional urbano a partir da sua diferenciação da estrutura intraurbana, dedicando-se aos sistemas de espaços abertos, traçado viário, tecidos urbanos e tipologias edilícias. Esta vertente utiliza principalmente a teoria dos grafos para representação abstrata de sistemas reais através de pontos, linhas e superfícies. A partir de grafos urbanos importantes medidas puderam ser desenvolvidas pela ciência urbana como o caso dos modelos de conectividade, acessibilidade ou centralidade (Hillier, 1998; Krafta, 1994).

Contemporaneamente, estudos dos sistemas configuracionais de base morfológica apresentam avanços em análises urbanas a um nível macro, dedicando-se ao estudo de dinâmicas morfológicas associadas às teorias da complexidade e da auto-organização emergente. Deste modo, simulações de crescimento externo são possibilitadas a partir dos avanços operacionais em técnicas dos autômatos celulares, conforme ocorre a partir das medidas de potencial-centralidade, compacidade e fragmentação (Krafta, 1999; Polidori, 2004), as quais terão abordagem na seqüência do capítulo.

3.1.2. Modelo Potencial-Centralidade e a *Urban Fabric*.

Da necessidade de abordar o ambiente urbano diferenciado espacialmente, visando análises de dinâmicas morfológicas e o crescimento externo, é válido somar as possibilidades do modelo de centralidade (Krafta, 1994). Originadas a partir das ideias de crescimento desigual (Harvey, 1985), a medida de centralidade espacial trata da distribuição desigual de matéria urbana sobre o espaço, a qual conduz o sistema a um estado de desequilíbrio espacial. A partir do enunciado original do modelo de centralidade (Krafta, 1994) uma continuidade de esforços tem sido empreendida para melhorar a compreensão dos mecanismos de produção e reprodução da cidade, particularmente em estudos desenvolvidos pelo grupo de Sistemas Configuracionais Urbanos sediado junto ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR-UFRGS (Krafta, 2008).

As ideias originais de Krafta (1994) apresentam avanços em relação às possibilidades de estudos configuracionais urbanos propostos por Hillier *et al* (1993), onde o espaço é abordado de modo sintático. Isto é, abordagem da sintaxe espacial propõe o estudo do sistema configuracional urbano a partir das medidas primárias da morfologia, sem abordar a quantidade de estoques construídos e atividades adjacentes ao sistema. Uma situação onde o traçado viário é o único responsável pelo padrão de uso e movimentação espacial. Desta forma, pontos de maior acessibilidade e assimetria relativa dos movimentos tenderiam a concentrar ainda mais a quantidade de movimento natural, sugerindo ao sistema uma dinâmica absolutamente determinística.

Diferentemente, a medida centralidade (Krafta, 1994) possibilita integrar características configuracionais urbanas (estrutura viária, estoques construídos e espaços abertos) com características sociais

urbanas (população, demandas, atividades, fluxos), baseando-se nos conceitos de “*reachability e betweenness*”. A partir do produto dos carregamentos entre um par de espaços urbanos (estoques construídos, população, atividades) é gerada uma tensão, conforme enunciado na equação 1. O modelo procede distribuindo estas tensões igualmente através de todos os espaços localizados no caminho mínimo, conforme demonstrado na equação 2. Deste modo, a centralidade é construída a partir do acúmulo de tensões recebidas quando um determinado espaço localiza-se no caminho mínimo das inúmeras interações que ocorrem em um determinado sistema urbano.

Equações 1 e 2: tensões e centralidade gerada a partir de um par de células.

$$T_{ij} = (a_i \times a_j) \quad (1)$$

$$c_{ij} = T_{ij} / n_{ij} \quad (2)$$

Onde:

T_{ij}: tensão gerada entre os carregamentos urbanos dos espaços i e j.

a_i, a_j: carregamentos urbanos das células i e j.

n: quantidade de espaços localizados no caminho mínimo entre i e j;

c_{ij}: medida de centralidade entre um par de células i e j.

Conforme sugere Harvey (1985), produtores urbanos buscam permanentemente possibilidades de lucro excedente associadas a vantagens locacionais, procedendo assim suas inovações ou invenções de localização urbana, aliando vantagens de locacionais com menor custo do solo. Como essas descobertas locacionais são prontamente seguidas pelos demais competidores, o processo torna-se iterativo, permanente e complexo, pois locais vantajosos tendem a ocorrerem em novos lugares à medida que ocorre a iteração urbana. Portanto, ao assumir que o sistema urbano pode ser definido, além das medidas primárias da morfologia urbana, mas também pelos carregamentos dos estoques construídos e atividades, Krafta (1994) propõe no modelo de potencial-centralidade, um modo de diferenciar o sistema espacial urbano em uma situação de maior desequilíbrio.

Sendo assim, a medida de centralidade não deve ser tomada apenas como a descrição espacial de uma dada morfologia, mas sim como um indicador de desequilíbrio do sistema espacial, capaz de configurar um conjunto de forças que enunciam vetores de crescimento urbano futuros. Potenciais de crescimento ocorrem onde houver maior possibilidade de geração do lucro pelos promotores urbanos. Sendo a medida de centralidade um indicador locacional de facilidades urbanas, os potenciais tendem a ocorrer em locais onde ocorram maiores diferenças de centralidade com o entorno imediato (Polidori, 2004).

3.1.3. Centralidade celular e a morfologia do crescimento urbano.

A medida de centralidade, que inicialmente foi concebida por Krafta (1994) operando a partir da teoria dos grafos, pôde ser adaptada a um ambiente celular por Polidori (2004) de modo a operar associada

aos recursos de modelagem autômatos celulares (CA). O sistema urbano representado na teoria dos grafos de forma vetorial, por pontos e linhas (conforme figura 3.1a), foi traduzida para um ambiente celular regular representado por *grids*, semelhante a uma imagem *raster*, atribuindo a cada célula ou *pixel*, um ponto (figura, 3.1b). Assim, a integração entre grafos e CA é dada pela associação entre o ponto do grafo (vetorial) e o centro da célula (*raster*), conforme apresentado na figura 3.1c.

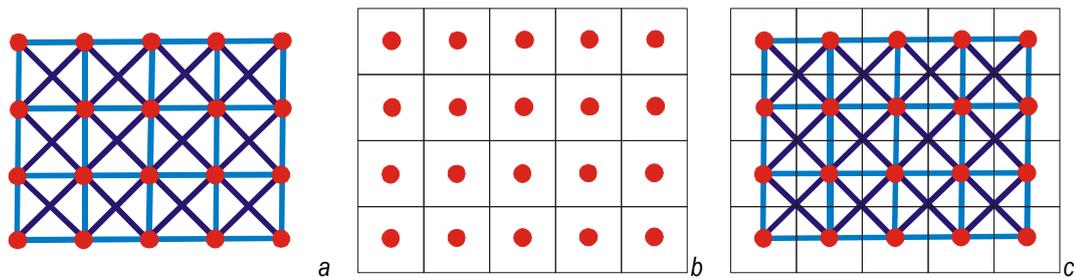


Figura 3.1: articulação entre a teoria dos grafos e CA: a) representação vetorial interligando todos os pontos de um grafo; b) CA, onde a cada célula pode ser atribuído um ponto; c) integração entre grafo e CA (Polidori, 2004).

Deste modo, a adaptação do modelo de centralidade ao ambiente celular (Polidori, 2004) apresenta avanços sobre o original do modelo de Krafta (1994), uma vez o procedimento da distribuição das tensões não ocorre apenas através dos caminhos mínimos do grafo. O modelo de crescimento de Polidori (2004) possibilita reproduzir morfologias através da distribuição de tensões de cinco modos distintos, conforme estão ilustrados na figura 3.2 e descritos a seguir: a) axial: ao longo de caminhos, estradas ou percursos; b) axial de *buffer*: ao redor dos caminhos e eixos; c) polar: concêntricas ao redor de um núcleo; d) difusa do tipo 1: dedicada a capturar a lógica da produção imobiliária formal, em locais com alto custo do solo e privilégios ambientais; e) difusa do tipo 2: dedicada a capturar a lógica informal, em locais de baixo custo do solo e fragilidades ambientais.

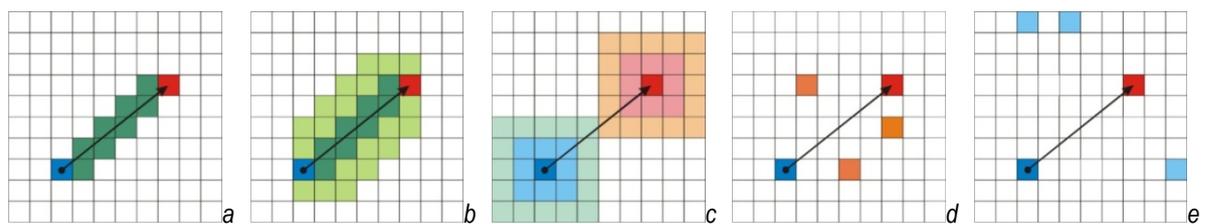


Figura 3.2: diagramas em formato de CA, representado: a) células incluídas na distribuição axial (verde); b) células incluídas na distribuição axial de buffer (verde claro); c) células incluídas na distribuição de tensões do tipo polar (azul claro e rosa); d) hipótese de células incluídas na distribuição difusa do tipo 1 (laranja); e) hipótese de células incluídas na distribuição difusa do tipo 2 (azul claro) (Polidori, 2004).

A partir de um ambiente celular a medida de centralidade de uma determinada célula ocorre através da soma dos carregamentos recebidos pela composição percentual das cinco diferentes formas em que ocorre a troca de tensões, conforme está indicada na equação 3 a seguir.

Equação 3: centralidade celular calculada a partir das diferentes formas de distribuição de tensões

$$\text{CentCel} = x.A + y.B + z.P + w.D1 + q.D2$$

Onde:

CentCel_i: centralidade celular da célula *i* na interação 1.

x, y, z, w, q: quantidades relativas dos modos de distribuição de tensões, sendo $\sum = 1$.

A, B, P, D1, D2: distribuição axial, axial de buffer, polar, difuso1 e difuso2.

Portanto, a estrutura urbana representada em um *grid* regular, onde cada célula é associada a um diferente grau de centralidade, semelhante a um mapa topográfico, os picos assinalam locais de convergência de interesse, movimento e valor urbano; enquanto os vales indicam regiões de baixo valor, interesse e atratividade. Em um processo que pode ser tomado como iterativo, a distribuição de centralidade celular configura uma paisagem de oportunidades espaciais de produção imobiliária, sobreposta a um campo de desiguais resistências do ambiente natural, produzindo assim uma dinâmica de crescimento urbano emergente, a partir de lógicas semideterminística e semiestocástica (Polidori, 2004).

Cabe destacar que as formas de crescimento difuso implementadas no modelo ocorrem a partir de uma lógica semi-probabilística, que associa valores do ambiente natural e valores econômicos do uso do solo, orientando sorteios a capturar tanto a lógica da produção formal (difuso tipo 1 – D1) quanto ocupações informais (difuso tipo 2 – D2). Portanto, a distribuição difusa das tensões de crescimento orienta a captura de crescimentos urbanos relacionados ao ambiente natural, com maiores probabilidades de ocorrer em áreas de privilégios locacionais (D1) ou em locais de fragilidade ambiental (D2).

3.1.4. O Modelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade.

Procurando avanços sobre a configuração espacial do crescimento urbano e suas relações com a paisagem natural, Polidori (2004) propõe um modelo de simulação de crescimento urbano que confronta a paisagem de oportunidades espaciais configurado pela medida de Potencial-Centralidade, com o campo de irregularidades e restrições ao crescimento configurado por atributos do ambiente natural.

O Simulador do Ambiente da Cidade (SACI) foi construído a partir do uso conjunto da teoria de grafos, autômato celular e geotecnologias. O uso conjunto de grafos e autômato celular permite que o modelo explore simultaneamente relações globais e locais do sistema urbano, pois enquanto CA trabalham com as relações espaciais e suas relações de vizinhança, grafos trabalham com as conexões entre diversas unidades espaciais. Da associação entre a teoria dos grafos e CA são fundamentais técnicas de representação que associem os sistemas vetorial e *raster*, o implica na operacionalidade a partir de recursos de SIG (Sistemas de Informações Geográficas). Os SIG facilitam a aquisição de informações por recursos de sensoriamento remoto, possibilitam diversas formas de ingresso e armazenamento de dados, bem como viabilizam o processamento do modelo de simulação (Longley *et al.*, 2004).

O modelo assume como base espacial um *grid* bidimensional regular com células quadradas de tamanho fixo, o qual pode ser arbitrado e se dará tanto a resolução para *input* de variáveis (entrada dos dados), quanto o nível de resolução dos *outputs* do modelo (obtenção dos resultados). A partir da delimitação do *grid* base, o modelo permite a livre inclusão de variáveis do tipo urbano, natural ou institucional, as quais podem assumir dois diferentes papéis no processo de crescimento: a) carregamentos; b) resistências. Assim, no ambiente celular do SACI cada célula representa uma espécie de caixa que carrega atributos do ambiente urbano, natural e institucional simultaneamente, conforme ilustrado na figura 3.3a anterior. A partir das ideias de crescimento desigual (Harvey, 1985) e diferenciação espacial (Krafta, 1994), um par de células com carregamento urbano (*LoadU*) é capaz de gerar uma tensão espacial, de forma análoga às trocas de tensões que provocam crescimento urbano (figura 3.3b).

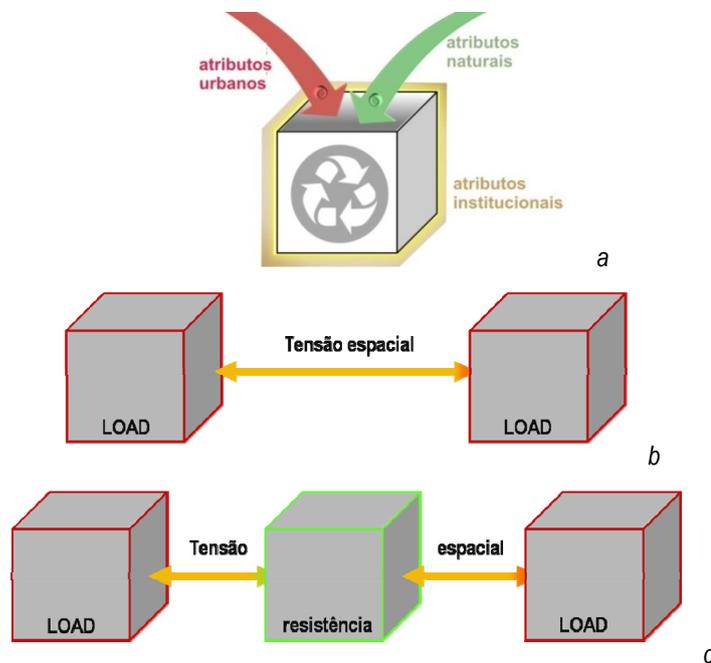


Figura 3.3: a) célula com carregamento urbano e natural, simultâneos; b) par de células capazes de gerar uma tensão de crescimento; c) resistência ambiental ao crescimento dada por carregamentos naturais a partir do caminho mínimo (imagens elaboradas pelo autor).

Entretanto, no modelo o processo de troca de tensões urbanas é acrescida a ideia de resistência mínima acumulada (*MCR – minimal cumulative resistance*), originadas dos estudos de ecologia de paisagem, onde o espaço que intermedeia tensões de crescimento urbano exerce papel de restritor ao crescimento de acordo com resistência dos atributos naturais (figura 3.3c). No processo iterativo de simulação, os carregamentos ambientais que exercem resistência ao crescimento consomem as tensões de crescimento à medida que reduzem a sua capacidade de resistência, procedendo de forma análoga ao processo de modificação e exploração do ambiente natural ocorrida pela ação do homem, replicando o assim o processo produção urbana e conversão do ambiente natural.

Breves descrições do modo em que ocorrem os processos de descrição ambiental, parametrização e obtenção dos resultados estão nos tópicos a seguir. Exemplos práticos da delimitação espacial, construção de *inputs*, possibilidades de parametrização e análises dos resultados estão descritos no item 3.2 a seguir, dedicado a demonstrar a viabilidade metodológica de simular crescimento urbano com a influência do campo de irregularidades configurados pelos atributos da hidrografia.

Descrição ambiental – Inputs

Para a definição dos *inputs* ou entrada dos dados da simulação de crescimento, as variáveis espaciais podem assumir três grupos de atributos: naturais, urbanos e institucionais, sendo o número de atributos em cada grupo arbitrário, onde basicamente deve ser considerada a importância do atributo como condicionantes do crescimento urbano e a disponibilidade de dados para que se possa configurar um *input* válido na simulação. Além de descrever o ambiente de simulação, os atributos assumem diferentes comportamentos durante o processo, *mutable* ou *freezing*; isto é, se o atributo pode ser removido ou não removido no processo de crescimento urbano.

Na sequência estão descritas as características e formas usuais de cada grupo de atributos:

- a) atributos naturais: geralmente assumidos como resistências ao crescimento urbano, representam os fatores do ambiente natural, modificados ou não pela ação antrópica, como é o caso dos subsistemas de águas superficiais (águas lóticas, lênticas e/ou canalizadas), cobertura do solo (banhados, campos, matas nativas e matas plantadas) e fatores geomorfológicos (dunas, praias e altitudes). Além destes, geralmente é também implantado um fator aleatório que representa fatores naturais não mapeados ou sem descrição específica para o local de estudo.
- b) atributos urbanos: geralmente assumidos como carregamentos que geram tensões de crescimento, representam o mapeamento do uso do solo urbano. O modelo possibilita diferenciar os atributos através de pesos, os quais podem representar diferentes índices de aproveitamento, custo do solo, etc.
- c) atributos institucionais: possibilitam representar os mecanismos legais ou práticas de planejamento urbano, como o caso de legislações ambientais, índices urbanos, do regime de usos e restrições a urbanização. Este grupo de atributos que não está utilizado no trabalho, dependendo do caso, podem atuar como indutores, restritores ou até impedindo à conversão urbana (*resistence*, *atrator*, ou *freezing*, no modelo).

Ajuste temporal e taxa de crescimento.

Como os objetivos das simulações de crescimento urbano com finalidade científica geralmente estão relacionados a capturar vetores de crescimento, compreender a dinâmica de mudança urbana e reali-

zar análises de diferenciação morfológica entre cenários de passado ou futuro, as regulagens e parametrizações do SACI mais importantes são a velocidade e forma em que ocorre o crescimento, calibrando o modelo a partir de aproximações quantitativas e qualitativas.

Neste processo, inicialmente os resultados passam por contagem de células e verificação de taxas de crescimento, posteriormente é feita uma análise visual e confrontação dos resultados com o conhecimento empírico da realidade local. No modelo, a taxa de crescimento pode ser ajustada a partir do parâmetro λ (lambda), que promove mudança exponencial na intensidade de crescimento e pode ser dirigido tanto ao crescimento interno como ao externo. Já a forma do crescimento urbano é ajustada tanto pela configuração dos *inputs*, representados pela quanto pela distribuição das tensões do crescimento.

Obtenção de resultados: outputs e medidas de crescimento celular.

O SACI é capaz de fornecer dois tipos de resultados: a) dados gráficos, nos formatos de *grids*; b) dados tabulares, no formato de tabelas ou gráficos. Os resultados gráficos através de mapas de *grids* podem ser considerados os tipos de resultados principais, uma vez que estes possibilitam um entendimento da dinâmica em que ocorre a mudança, aproximando os entendimentos da ciência qualitativa e quantitativa sobre a morfologia urbana. Análises qualitativas estariam relacionadas com informações de tipo (uma célula é de um tipo ou de outro) e locacional (uma célula com um tipo está em um local ou em outro). Na sequencia são de apresentadas os *outputs* usuais do SACI, com descrição do significado do resultado conforme proposto por Polidori (2004) e seguidos por figuras que representam a dinâmica do processo (representadas iterações 1, 13, 27 e 40 de uma simulação de crescimento para a cidade de Torres-RS em 40 iterações); além da paleta de cores sugeridas no *software*:

a) Tipo de célula (*Celltype*, figura 3.4): indica se a célula ou é ou não é urbana, através da predominância de fatores urbanos em relação aos fatores naturais, reproduz a produção espacial da cidade;



Figura 3.4: *Celltype*; em marrom (imagens elaboradas pelo autor).

b) Carregamento Urbano (*LoadU*, figura 3.5): indica a quantidade de fatores urbanos que atraem urbanização, sendo normalmente representados pelo uso do solo, tanto pela função que desempenham como por um indicador de intensidade de atividade;



Figura 3.5: *LoadU*; paleta hierárquica em escala cor vermelha (imagens elaboradas pelo autor).

c) Potencial (*Potential*, figura 3.6): representa a capacidade de transformação potencial das entidades espaciais, determinada pela diferença entre a centralidade de cada célula e a centralidade máxima das células do entorno;



Figura 3.6: *Potential*; paleta hierárquica em escala cor laranja (imagens elaboradas pelo autor).

d) Valor Urbano (*ValueU*, figura 3.7): representa a intensidade de fatores urbanos que incidem sobre as células, quer realizem papéis de atração ou de repulsa na dinâmica de crescimento urbano;



Figura 3.7: *ValueU*; paleta hierárquica em escala cor vermelha (imagens elaboradas pelo autor).

e) Centralidade Absoluta (*CentABS*, figura 3.8): mostra o somatório da distribuição de todos os tipos de tensões a que estão sujeitas as células a cada iteração, sem transformação escalar ou vetorial, tal como são obtidas pela interação entre os carregamentos de cada par de células geradas de tensões de crescimento. A partir desta o modelo apresenta duas medidas de centralidade, normalizadas pela centralidade máxima (*CentR1*) e outra normalizada por transformação logarítmica de base 10 (*CentR2*).



Figura 3.8: *CentRABS*; paleta hierárquica em escala cor azul claro (imagens elaboradas pelo autor).

f) Problemas Ambientais Totais Acumulados (*EProbT*, figura 3.9): referem-se aos problemas ambientais intra-urbanos, quando carregamentos superam determinado limiar de crescimento estabelecidos. Ocorrem a partir da soma dos resultados computados a cada iteração (*Eprobi*).



Figura 3.9: *EProbT*; paleta hierárquica de cor vermelha ao amarelo (imagens elaboradas pelo autor).

g) Resistência Natural (*ResistE*, figura 3.10): indica a intensidade de presença de fatores naturais que se opõem à urbanização, os quais precisam ser modificados e superados para que ocorra o crescimento urbano.

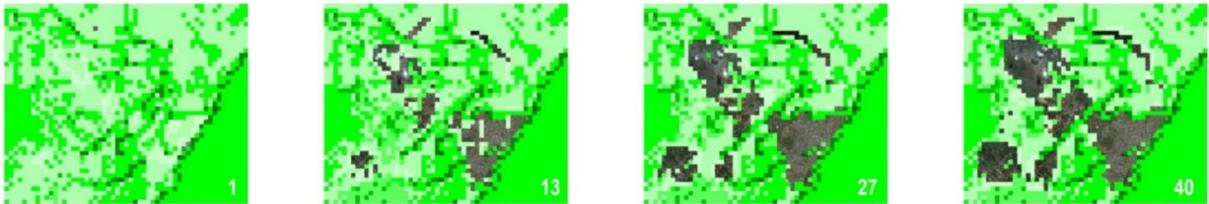


Figura 3.10: *ResistE*; paleta hierárquica em escala de cor verde (imagens elaboradas pelo autor).

Por fim, análises quantitativas ocorrem pela contagem de células que podem ser relacionadas ao sistema absoluto ou a uma determinada vizinhança de raio atribuído. O modelo SACI é capaz de tabular os dados de onde podem ser extraídos gráficos, permitindo análises comparadas através de gráficos bivariados. Cabe destacar a possibilidade das medidas de compacidade e fragmentação do SACI, pois estas são indicadores morfológicos amplamente discutidos pela ciência urbana contemporânea e potencial para capturar a movimentos de auto-organização da morfologia urbana. Medidas de compacidade e fragmentação estão na sequência do capítulo numericamente apresentadas e melhor discutidas, mas de imediato podem ser entendidas como uma medida de dispersão espacial, onde um *grid* bidimensional com células não contíguas ou descoladas seria a situação de máxima dispersão; enquanto células contíguas dispostas circularmente seria a situação de máxima compactação.

3.2. Estudo piloto: demonstrando viabilidade metodológica.

Na sequência do trabalho serão demonstrados alguns experimentos utilizando recursos de simulação de crescimento do SACI que demonstram a viabilidade de modelar morfologias de crescimento influenciadas pelo ambiente natural e a presença dos recursos hídricos, além de dar as bases para construção de um adicional ao modelo dedicado a modelagem dinâmica do crescimento a partir da ocorrência de efeito de borda sobre áreas adjacentes às linhas de drenagem das bacias hidrográficas.

3.2.1. Descrição do um ambiente abstrato – definição *inputs*.

Inicialmente foi concebido um ambiente abstrato de simulação, a partir de padrões espaciais que deram origem às cidades da metade sul do estado do Rio Grande do Sul, casos de verificação do problema empírico no capítulo 1. Estão representados os atributos entendidos como necessários para explicitar os padrões de resposta do modelo de crescimento urbano frente aos recursos hídricos. A figura 3.11 a seguir representa o ambiente de simulação delimitado por um recorte retangular de 7.500 metros no sentido norte-sul e 10.000 metros no sentido leste-oeste, onde contém apenas um núcleo urbano central de 1000 m² em duas intensidades de urbanização e a matriz natural configurada pelas linhas de drenagem e os divisores de água entre bacias hidrográficas.

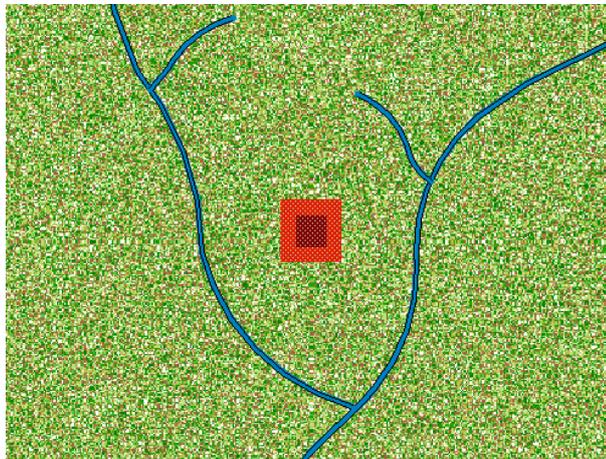


Figura 3.11: ambiente abstrato construído para experimentos iniciais com o SACI composto por um núcleo urbano retangular, linhas de drenagem e uma matriz ambiental (imagens elaboradas pelo autor).

Depois do ambiente de simulação ser representado de modo vetorial no ambiente de SIG, os atributos foram convertidos para o formato de um *grids* regular de 30 x 40 células, onde cada célula passa a corresponder a um recorte espacial de 250 x 250m, criando *inputs* individuais para o modelo conforme ilustrados na figura 3.12 abaixo e descritos na sequencia:

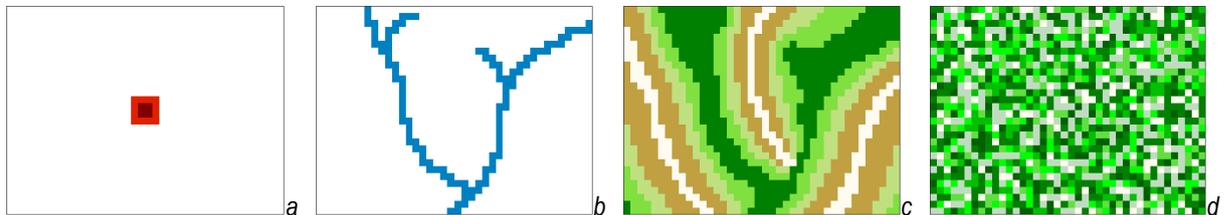


Figura 3.12: *inputs* individuais utilizados nas simulações, construídos em grid retangular regular de 30x40 células: a) núcleo urbano central; b) leitos menores dos recursos hídricos; c) diferenciação espacial pelas bacias hidrográficas; d) resistências aleatórias da matriz ambiental (imagens elaboradas pelo autor).

a) núcleo urbano original (atrator, *mutable*; figura 3.12a): carregados em dois níveis; um de 4x4 células com carregamentos intermediários (peso 0,5) e outro de 2x2 células representado núcleo com maior concentração de carregamentos urbanos (peso 1,0).

b) linhas de drenagem dos recursos hídricos (resistência, removível, peso 1; figura 3.12b); correspondentes as linhas de drenagem dos recursos hídricos, as quais exercem resistência e podem ser removidos durante o processo de crescimento urbano.

c) sub-bacias hidrográficas (resistência, removível, peso 1; figura 3.12c): matriz de resistência ao crescimento hidrográficas, que é permitido a remoção durante o processo de crescimento. Construído por interpolação entre as linhas de drenagem e divisores de água, diferenciado em cinco classes onde áreas mais próximas às linhas de drenagem ocorrem os locais de maior resistência (nível 4 em verde escuro na figura) e junto aos divisores de água os locais de menores resistências (nível 0, em branco na figura).

d) matriz ambiental randômica (resistência, removível, peso 1; figura 3.12d): *input* indicado a todas as simulações utilizando-se do SACI, onde a matriz ambiental é representada por um *grid* aleatório, que ao ser mapeado de modo randômico corresponde aos atributos naturais não representados e possibilita uma desejável dose de aleatoriedade nos experimentos simulatórios.

3.2.2. Explorando dinâmicas de crescimento.

Construído o ambiente e definido os *inputs* de simulação, experimentos foram realizados com a regra de crescimento default do modelo (*Threshold Potential*), dedicados a explorar dinâmicas do crescimento urbano possibilitadas pelo SACI, fundamentalmente para entender o padrão de resposta em dinâmicas de crescimento extremas e verificar velocidades de crescimentos a partir da parametrização *default*. Diferentes morfologias de crescimento estão a seguir representadas, obtidas através do modelo pela da variação na distribuição das tensões. A seguir estão apresentados nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15, cinco de um total de 30 interações dos casos de crescimento exclusivamente concêntrico, com tensões 100% axiais (SIM.1, figura 3.13); exclusivamente difuso, com tensões 50% difusa do tipo 1 (D1) e 50% difusa do tipo 2 (D2) (SIM.2, figura 3.14) e tensões igualmente distribuídas entre axiais e difusas, aqui chamado de ISOtensões, sendo 50% axiais, 25% difuso do tipo 1 e 25% D2 (SIM.3, figura 3.15).

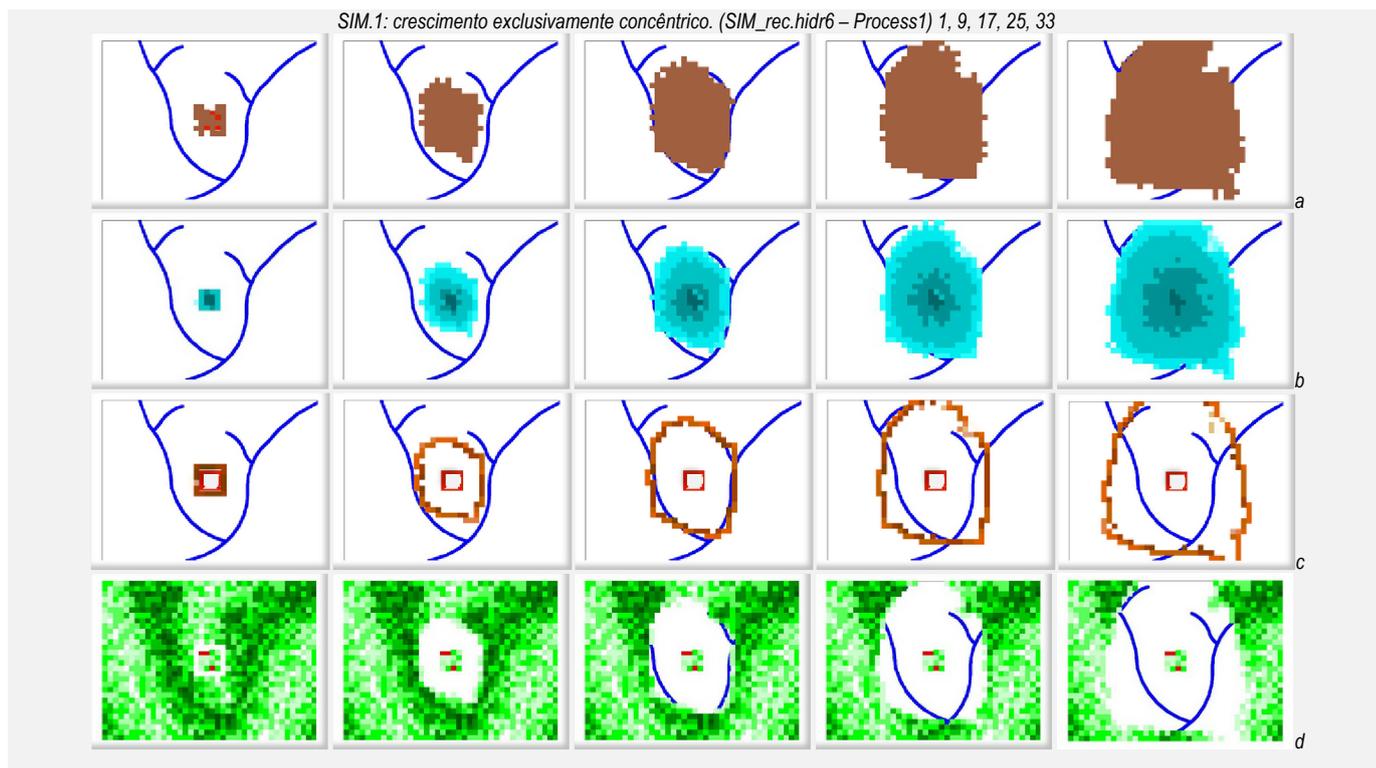


Figura 3.13: outputs da simulação de crescimento com tensões 100% axiais, mostrando 5 estados de 30 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.

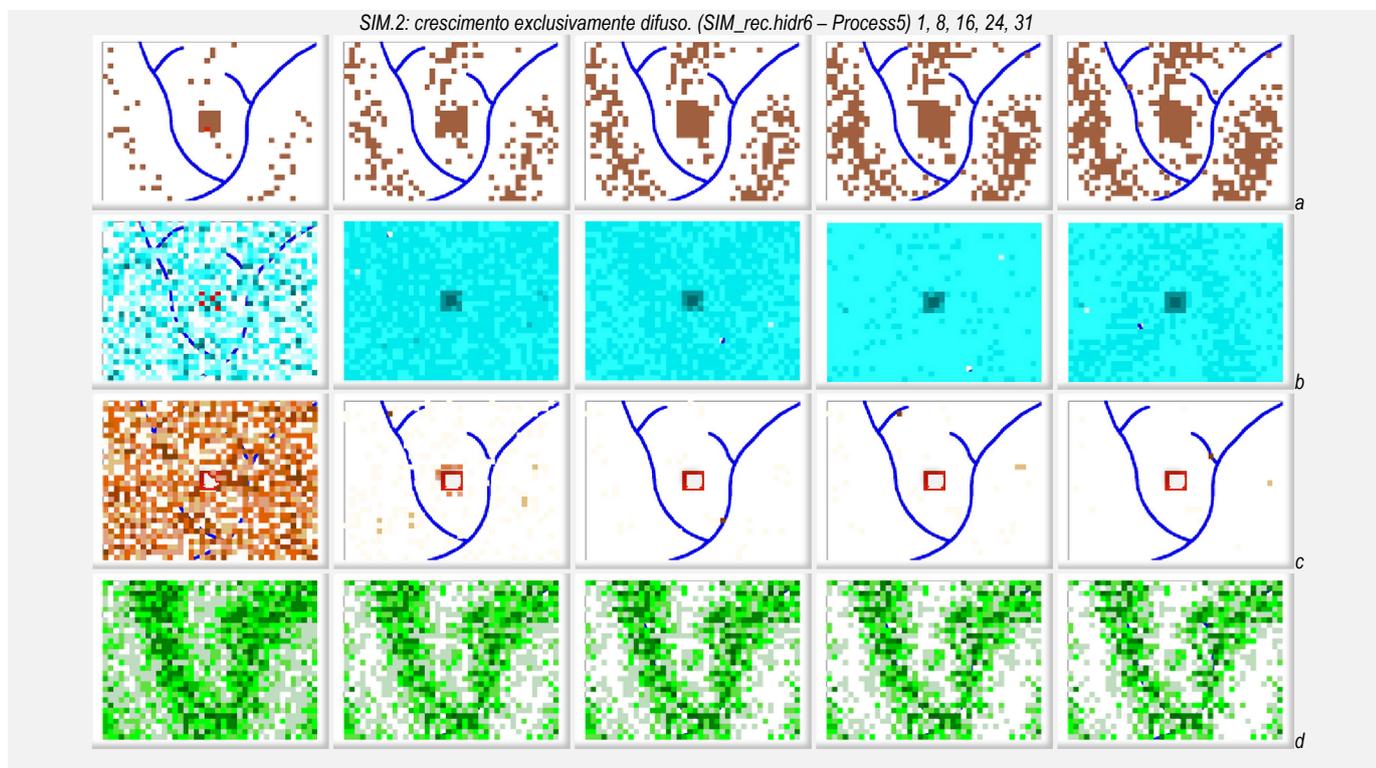


Figura 3.14: outputs da simulação de crescimento com tensões 50% difusas tipo1 e 50% difusas tipo2, mostrando 5 estados de 30 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.

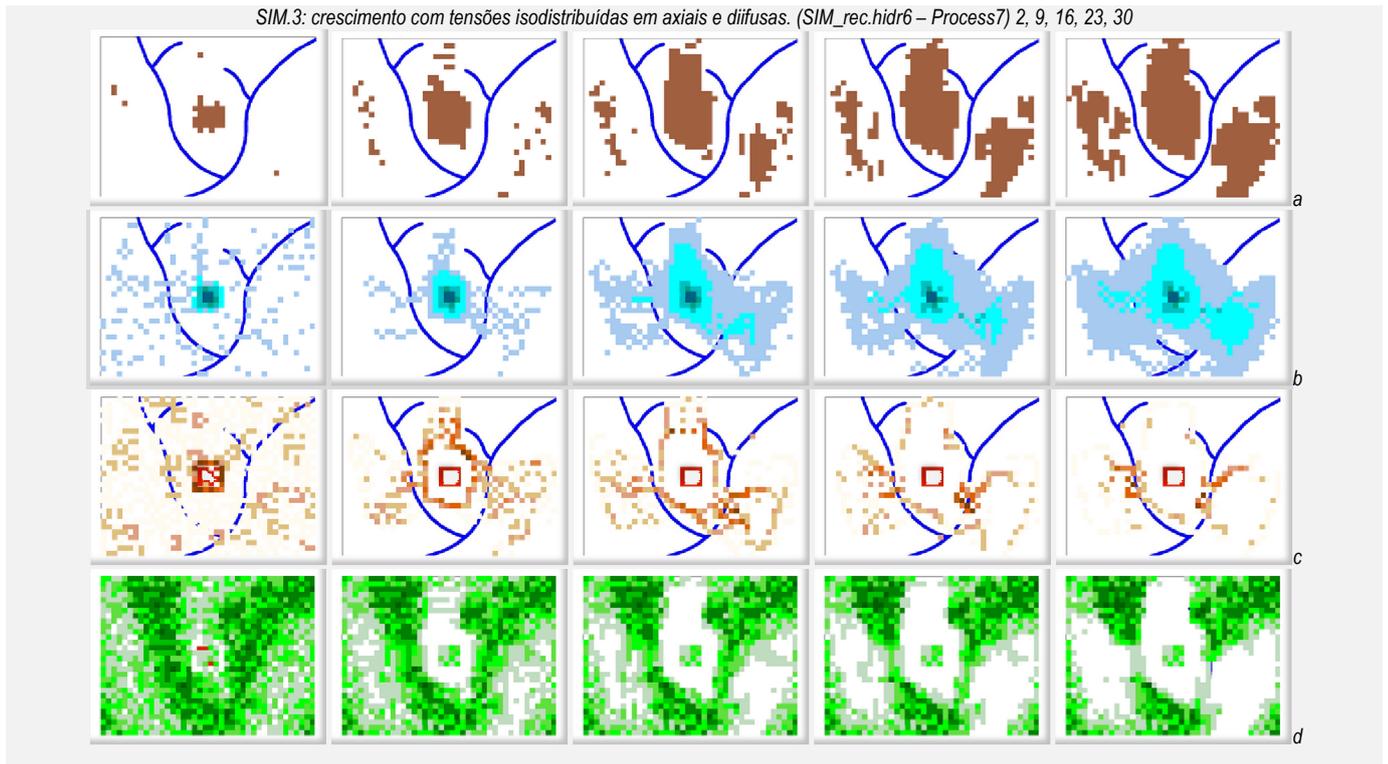


Figura 3.15: outputs da simulação de crescimento com tensões igualmente distribuídas 50% axial e 50% difusas, mostrando 5 estados de 30 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.

Os resultados dos três diferentes procedimentos representados pelos *outputs* gráficos permitiram análises mais diretas e evidentes, de onde podem ser extraídas algumas observações e levantadas indicações para simulações futuras.

A partir de observações dos resultados de fenótipo urbano (*Celltype*, figuras 3.13a, 3.14a, 3.15a), nota-se que simulações dedicadas ao crescimento concêntrico ocorreram de modo concêntrico e processo dedicado ao crescimento difuso ocorrera de modo difuso. Ainda, através da distribuição por ISOtensões é possível capturar crescimentos no entorno do núcleo original e a emergência de núcleos urbanos juntos aos divisores de águas, indicado a viabilidade de simular morfologias de crescimento urbano articuladas à escala espacial das bacias hidrográficas, onde fragmentos urbanos emergentes tendem a ocorrer em locais de menor restrição do ambiente natural, simultaneamente em que o crescimento urbano concêntrico avança sobre as linhas de drenagem do ambiente natural.

A medida de centralidade celular (*CentrR1*, figuras 3.13b, 3.14b, 3.15b) permite uma forma de diferenciação do crescimento interno, com maior sucesso para crescimento axial e ISOtensões. O crescimento 100% axial, concêntrico, permite a associação ao tradicional modelo de sucessão de anéis urbanos concêntricos, semelhantes aos clássicos modelos concêntricos (apresentados no item 2.3.1 do capítulo anterior, nos modelos do CBD de Alonso e Ecológico da escola de Chicago). Já a distribuição por ISO-

tensões, permite a captura de formas axiais e vetores de crescimento, que permitem associação à formação de acessos viários e semelhanças com o modelo de setorial proposto por Hoyt (1939).

Já a partir das resistências ambientais (ResistE, figuras 3.13d, 3.14d, 3.15d), nota-se que a cidade concêntrica cresce e remove indiscriminadamente as resistências da paisagem natural, enquanto crescimentos com distribuições difusas apresentam uma morfologia logicamente difusa, com emergência em locais de menor resistência natural e manutenção de fragmentos da paisagem.

Ajustes temporais e velocidades do crescimento.

A partir de medições de crescimento celular, a contagem de células (*UrbanCount*) do fenótipo urbano (*Celltype*) permite que sejam calculadas taxas de crescimento e assim proceda a calibragem do modelo. Estão apresentados no gráfico da figura 3.16 a seguir, as curvas de crescimento e as respectivas taxas de crescimento para cada uma das simulações apresentadas (100% Axial em laranja; 100% Difuso em verde e ISOtensões em azul).

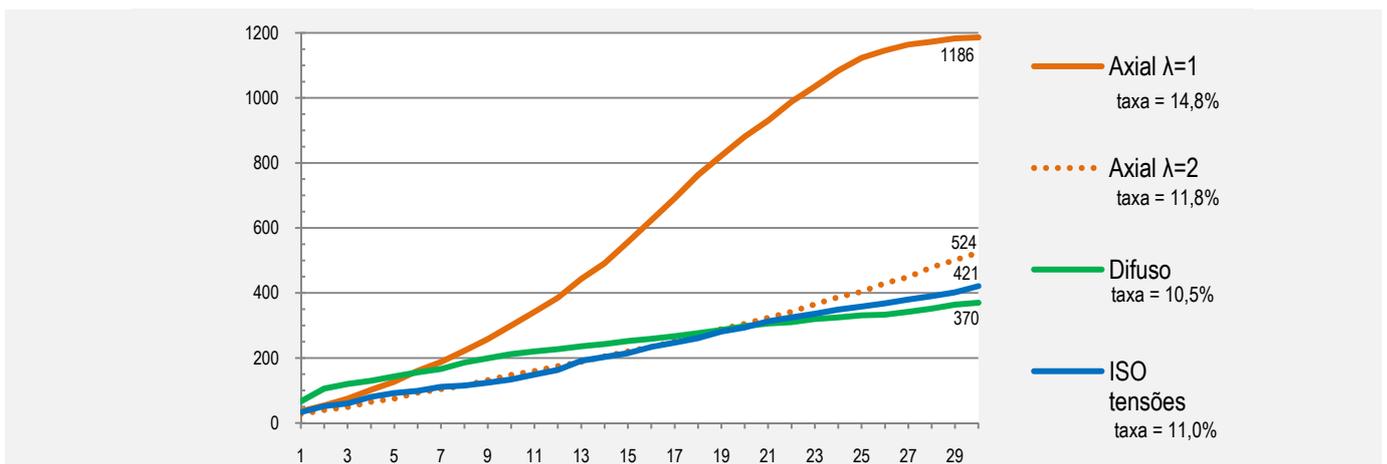


Figura 3.16: gráfico comparativo das velocidades de crescimento e taxas de conversão celular para os procedimentos simulatórios antes apresentados (laranja tensões axiais; verde tensões difusas; azul, ISOtensões).

Conforme pode ser verificado, tanto a partir das imagens dos *grids*, pelas taxas de crescimento e pelo gráfico com curvas de contagem de células; crescimentos axiais apresentam maiores velocidades de crescimento se comparados com crescimentos difusos, fato que ocorre devido ao modo em que se dá o cálculo do potencial de crescimento. Segundo concepção original do modelo de Potencial-Centralidade (Krafft, 1994) adotado no SACI (Polidori, 2004) o crescimento urbano ocorre em locais com maiores possibilidades de renda, consequentemente em locais com menor custo do solo e mais próximos às demais facilidades urbanas. Assim, a medida de potencial de crescimento de uma determinada célula é calculada a partir da diferença entre a máxima centralidade da vizinhança e a centralidade da própria célula, conforme equação 4, a seguir.

Equação 4: potencial de crescimento celular.

$$\mathbf{PoteCel}_i = (\mathbf{CentCel}_{\mathbf{MáxBuffer\ i}} - \mathbf{CentCel}_i)^\lambda$$

Onde se lê:

Potencial de crescimento celular da célula i é igual à centralidade máxima do buffer da célula i menos a centralidade celular da célula i, elevado ao coeficiente lambda

Como a distribuição de tensões difusas promove a distribuição de centralidades de modo igual no sistema, é menor a ocorrência de degraus de centralidade e conseqüentemente potenciais de crescimento, principalmente se comparados com casos que envolvam a distribuição axial de tensões (conforme pode ser verificado nas figuras 3.6b e 3.7b através de centralidades e 3.6c e 3.7c pelos potenciais). Portanto, como foi concebido o modelo SACI, distribuições difusas configuram cenários com menores taxas de crescimento se comparadas com cenários de distribuição axial, fato que pode ser corrigido através da aplicação do parâmetro lambda diferenciado para cada distribuição de tensões.

Conforme a equação do cálculo do potencial (equação 4), o parâmetro lambda incide exponencialmente sobre o valor do potencial de crescimento, que naturalmente variam valores de 0 a 1. Assim, o parâmetro lambda diminui ou aumenta o valor do potencial de crescimento, permitindo ajustar quantitativamente velocidades e taxas de crescimento, axiais e difusas. Deste modo, no gráfico da figura 3.14 anteriormente apresentado, em curvas laranja, em traço pontilhado está demonstrada a correção da diferença entre velocidades de crescimento axial a partir da aplicação de um parâmetro lambda de valor 2, possibilitando taxas de crescimento mais compatíveis com os casos de crescimento difusos.

3.2.3. Compacidade e fragmentação urbana.

Conforme indicado anteriormente, a continuidade ou a descontinuidade espacial urbana é contemporaneamente uma das principais questões de estudos morfológicos de crescimento, principalmente quando integrados ao ambiente natural (Alberti *et al* 2003; Czamanski, 2008; Jenks, 2008). Sendo a alternância morfológica associadas a compactação e fragmentação, padrões urbanos que mais se associam ao fenômeno da auto-organização (Portugali, 2000), um possível indicador de sua vitalidade (Polidori, 2004) e resiliência urbana (Vale e Campanella, 2005).

A medida de fragmentação aplicada no modelo é uma medida de dispersão espacial referida à micro-escala do sistema por estar construída a partir de uma relação de vizinhança (padrão a vizinhança de Moore de raio 1). A fragmentação fornece o grau de descolamento de uma célula em relação as suas vizinhas e permite que o raio de vizinhança seja regulado pelo operador. Assim, a fragmentação relativa do sistema ($Frag_{rel}$) é calculada iterativamente em função da quantidade máxima possível de células vizinhas e a quantidade de vizinhas que efetivamente ocorre, conforme enunciada na equação 5 e 6 a seguir.

Equação 5 e 6: fragmentação relativa do sistema

$$\mathbf{Frag}_{rel} = \mathbf{Frag}_{abs} / \mathbf{Frag}_{Max} \quad (5)$$

$$\mathbf{Frag}_{rel} = \sum \mathbf{Cel}_i \cdot (\mathbf{v}_{m\acute{a}x} - \mathbf{v}_{ef}) / \sum \mathbf{Cel}_i \cdot \mathbf{v}_{m\acute{a}x} \quad (6)$$

Onde se lê:

fragmentação relativa do sistema é igual a razão da fragmentação absoluta pela fragmentação máxima. a fragmentação relativa do sistema é calculada pelo somatório de todas as células multiplicado pela diferença entre o número máximo de vizinhos e o número efetivo de vizinhos de cada célula, dividido pelo somatório de todas as células vezes o número máximo de vizinhos.

Já a medida de compacidade é uma medida de dispersão espacial que se refere ao conjunto macro do sistema, construída a partir da composição do conjunto como um todo. Deste modo a compacidade é calculada pela razão entre área efetivamente urbanizada (*UrbanCount*) e perímetro do sistema urbano (*BorderCount*), conforme está na equação 7 a seguir. A medida de compacidade relativa é a medida de compacidade absoluta, normalizada pela medida de um círculo de mesma área.

Equação 7: Compacidade absoluta do sistema.

$$\mathbf{Comp}_{abs} = \mathbf{S}/\mathbf{P}$$

Onde se lê:

compacidade absoluta é igual à superfície dada pelo total de células do sistema, dividido pelo total de células do perímetro.

Os gráficos da figura 3.17 abaixo apresentam comparativos entre as medidas de compacidade e fragmentação para os casos de crescimento axial (curvas laranja), difusos (curvas verdes) e ISOtensões (curvas azuis), onde é possível afirmar que tensões igualmente distribuídas configuram um padrão de crescimento intermediário no que se refere às medidas de compacidade e fragmentação.

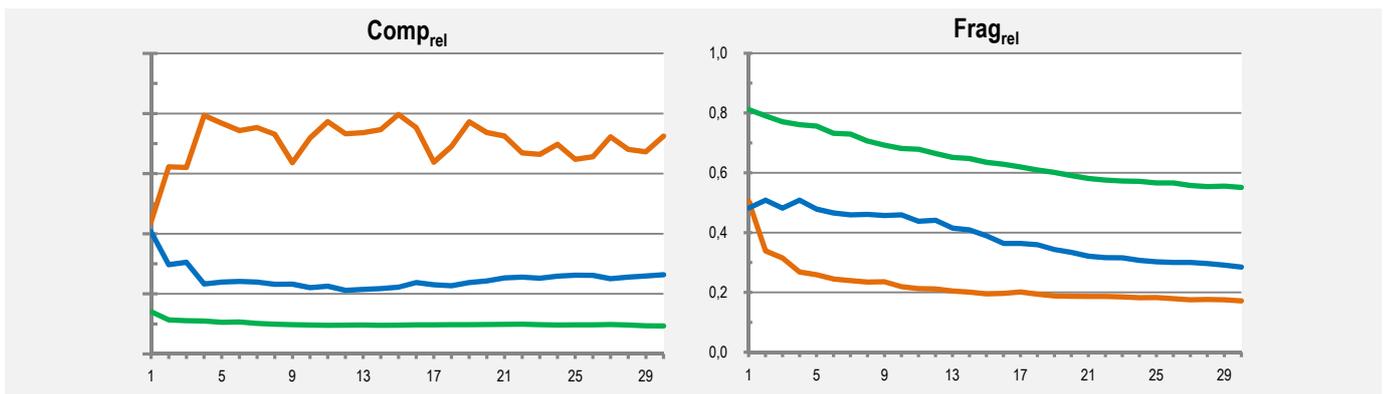


Figura 3.17: dados tabulares das medidas de fragmentação relativa e compactação relativa para os casos de crescimento axial (laranjas), difuso (verde) e isodistribuídas (azul).

Entretanto, embora visualmente sugiram semelhanças, cabe destacar a diferença entre as medidas de compacidade e fragmentação implementadas no SACI. A medida de fragmentação está associada a um raio de interação local, uma medida de vizinhança a nível micro do sistema, que captura a formação de vazios urbanos internos e discontinuidades espaciais nas bordas da cidade. Já a medida de com-

pacidade é uma medida global do sistema, que possibilita a captura de macro dinâmicas do crescimento, diferenciações morfológicas polares, axiais e a formação de polinucleação urbana. Assim, conforme estão implementadas, as medidas de compacidade e fragmentação diferem-se quanto à escala analítica, permitindo que uma cidade possa ser simultaneamente compacta e fragmentada, enquanto em outros casos possa ocorrer modo pouco compacto e pouco fragmentado.

3.3. Construindo um mecanismo de auto-parametrização das tensões de crescimento.

3.3.1. Retomada da hipótese e justificativa do mecanismo.

Após experimentos exploratórios, dedicados a capturar morfologias do crescimento através da alteração na distribuição das tensões de crescimento, os quais permitiram explorar também a influência dos atributos hídricos na forma urbana emergente enquanto restritores ao crescimento. Deste modo, é possível afirmar positivamente sobre a viabilidade de capturar movimentos morfológicos de crescimento relacionados com a presença da hidrografia. Mais ainda, é possível capturar núcleos difusos emergentes, adjacentes as linhas dos recursos hídricos, associados a locais com menor resistência do ambiente natural.

Entretanto, os três procedimentos apresentados obedecem a uma única lógica de crescimento, parametrizada no início do processo que é determinante na forma macro do sistema urbano em expansão. Por outro lado, na realidade a cidade cresce fundamentalmente de modo dinâmico, alterando diferentes lógicas de produção espacial configuradas pelo comportamento dos inúmeros agentes que a configuram enquanto sistema complexo. Conforme apresentado na hipótese, este trabalho é inicialmente provocado por uma dinâmica do crescimento que empiricamente pode ser verificado na introdução. A hipótese está a seguir retomada, acrescida de qualificadores da forma urbana associados à compactação e a fragmentação morfológica (termos sublinhados):

A partir de um núcleo urbano original, a cidade cresce até atingir áreas adjacentes aos recursos hídricos, onde ocorrem maiores resistências à urbanização que dificultam a continuidade da produção espacial urbana. Neste ponto, a cidade altera a forma do crescimento urbano, ocorrendo a conversão urbana em áreas com menores resistências e maior capacidade de suporte à urbanização.

A partir da revisão teórica, a hipótese pôde ainda ser refinada, a qual indica avançar em atribuições da hidrografia como mera restrição ao crescimento, onde:

os recursos hídricos podem ser indicados como pontos de convergência do sistema (tipping points), onde os múltiplos subsistemas influenciam (catastrophic cascades) na ocorrência de alternâncias na forma do crescimento e na descontinuidade espacial do sistema urbano (phase transitions).

Em termos da modelagem urbana, o trabalho busca um procedimento de simulação que opere de modo sensível aos atributos da hidrografia, capaz de auto-parametrizar a distribuição de tensões iterativamente a partir do funcionamento do próprio sistema. Deste modo, possibilitando que simulações junto ao SACI ocorram como mecanismos adaptativos, associados a inteligência artificial, permitindo simular não só a dinâmica do crescimento em si, mas também alternâncias de compactação e descompactação da forma urbana. Estas dinâmicas ocorrem quando o sistema converge para a conversão urbana das áreas dos recursos hídricos.

3.3.2. Potencial de crescimento sobre *buffer* dos recursos hídricos – “fator rh”

Metodologicamente, no modelo esta dinâmica está capturada a partir da ocorrência de potenciais de crescimento urbano, ou o referido efeito de borda (Polidori, 2004), sobre áreas adjacentes aos recursos hídricos. Depois de capturado o percentual do potencial de crescimento que ocorre sobre o efeito de borda, este corresponde a quantidade de tensões que originalmente eram distribuídas de modo axial e iterativamente passam a ocorrer de modo difuso.

A ocorrência de potenciais de crescimento sobre áreas adjacentes aos recursos hídricos, ou efeito de borda sobre os recursos hídricos, será chamada de “fator rh”, o qual corresponde a razão entre a medida do potencial de crescimento (*Potential*) incidente sobre uma área de *buffer* dos recursos hídricos (potencial sobre *buffer*, ou simplesmente *PotBuff*) e o potencial de crescimento total do sistema (Potencial total, ou simplesmente *PotTot*), conforme está na equação 7 a seguir. O “fator rh”, ocorrendo em valores percentuais, corresponde ao percentual de tensões que ocorrem de modo difuso do tipo 1 e do tipo 2, iterativamente, conforme equação 8 a seguir.

Equações 8, 9 e 10: “fator rh”, transferência de potenciais sobre buffer para distribuição tensões difusas.

$$rh^p = PotBuff / PotTot \quad (8)$$

$$rh^p = D1_i \quad (9)$$

$$rh^p = D2_i \quad (10)$$

Onde se lê:

“fator rh” é igual a razão entre o potencial de crescimento incidente no buffer dos recursos hídricos e o potencial total.

o “fator rh” é igual as tensões distribuídas de modo Difuso do tipo 1, a cada iteração.

o “fator rh” é igual as tensões distribuídas de modo e difuso do tipo 2, a cada iteração.

Área de influência dos recursos hídricos e compatibilização das velocidades de crescimento

Deste modo, uma nova característica de atributos é atribuída ao modelo SACI, uma vez que áreas adjacentes aos recursos hídricos não operam como os tradicionais restritores ou indutores ao crescimento. Este novo tipo de atributo opera de modo discreto no processo de crescimento, funcionando como uma espécie de máscara que captura a formação de efeitos de borda.

A ideia é que a área de influência de uma determinada linha de drenagem seja definida pelo operador do modelo, através de um procedimento de geoprocessamento de criação de *buffer* (*create buffer*). O referido *buffer* pode ser regulado tanto por distâncias geométricas, com unidades medidas em metros; ou pelo raio de influência topológica, a partir de um número de células. Deste modo, a área de influência dos recursos hídricos em um sistema é variável, possibilitando corresponder a um determinado ambiente que se deseja simular, podendo replicar características do sítio natural, como fatores topográficos ou hidrológicos; ou corresponder a políticas de controle do ambiente natural, como ocorre com *buffers* nas Áreas de Preservação Permanente (APP) e Zonas de Amortecimento (no Brasil, estabelecidas no Código Florestal e Sistema Nacional de Unidades de Conservação, respectivamente).

Como já demonstrado no título 3.2, do modo em que originalmente foi concebido o SACI, crescimentos axiais apresentam velocidades de crescimento superiores aos crescimentos difusos, fato que pôde ser corrigido aplicando diferentes parâmetros de lambda externos. Como o mecanismo aqui proposto opera alternando distribuições axiais e difusas, é de esperar que o lambda externo também ocorra iterativamente (λ_{ext_i}), de modo que o crescimento ocorra com velocidades semelhantes quando predomínio de tensões axiais ou difusas. Para isto, no modelo deve ser atribuído um lambda específico para crescimento axial (λ_A) e outro para crescimentos difusos (λ_D), os quais incidem na equação de composição do lambda externo iterativo (λ_{ext_i}), enunciado na equação 11 a seguir.

Equação 11: composição iterativa do lambda externo.

$$\lambda_{ext_i} = \lambda_D + A (\lambda_A - \lambda_D) \quad (11)$$

Onde se lê:

parâmetro lambda externo para uma dada iteração é igual ao lambda externo difuso somado diferença entre o lambda externo axial e lambda difuso, multiplicado pelo índice de tensões axiais na iteração.

Deste modo, quando tensões distribuídas exclusivamente axiais o lambda externo é igual ao lambda axial ($\lambda_{ext} = \lambda_A$), quando exclusivamente difuso o lambda externo é igual ao lambda difuso ($\lambda_{ext} = \lambda_D$). Um padrão default está implementado a partir de experimentos exploratórios, sendo lambda difuso indicado igual a um ($\lambda_D = 1.0$) e lambda axial indicado igual a dois e meio ($\lambda_A = 2.5$).

3.3.3. Explorando dinâmicas morfológicas e velocidades de crescimento partir do “fator rh”

Construído o mecanismo de auto-parametrização das tensões de crescimento a partir da ocorrência de efeito de borda sobre recursos hídricos, indicado a regulação da área de influência ou *buffer* das linhas de drenagem e enunciado o modo de compor lambdas externos diferenciados para crescimentos axiais e difusos. Na sequencia são explorados simulações de crescimento com o mecanismo ativo. Para isto, é utilizado o ambiente de simulação abstrato do item 3.2, acrescidos do atributo discreto do *buffer* dos recursos hídricos. O atributo foi construído a partir de um *buffer* com raio de influência das linhas de drenagem de 500m e posteriormente convertido para *grid* celular de resolução igual aos demais *grids* de *input* da simulação.

A figura 3.18, 3.19 e 3.20 apresenta os *outputs* de procedimentos com o mecanismo ativo, variando apenas os lambdas externos axiais e difusos. No procedimento da figura 3.18 o λA está aumentado para 3.0 e λD para 1.5, simulando velocidades de crescimento inferiores. Na figura 3.19 os lambdas são os default do mecanismo, sendo $\lambda A = 2.5$ e $\lambda D = 1.0$. Já e o procedimento da figura 3.20 o λA está reduzido para 2.0 e o λD para 0.5, velocidades superiores. Nos três procedimentos, a distribuição de tensões inicia 100% de modo axial e a redistribuição para o modo difuso ocorre a partir do “fator rh”.

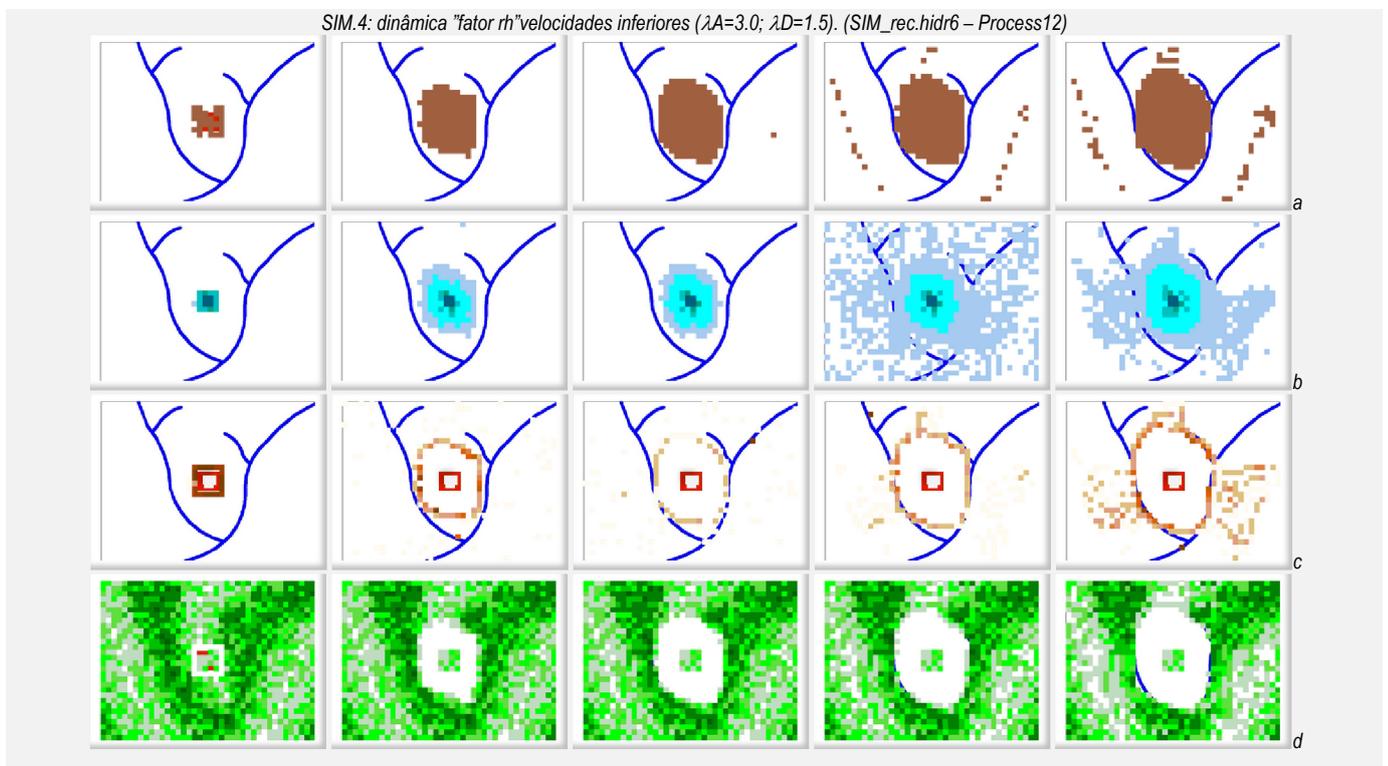


Figura 3.18: outputs da simulação com mecanismo ativo e velocidades de crescimento inferior ($\lambda A=3.0$; $\lambda D=1.5$) mostrando 5 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.

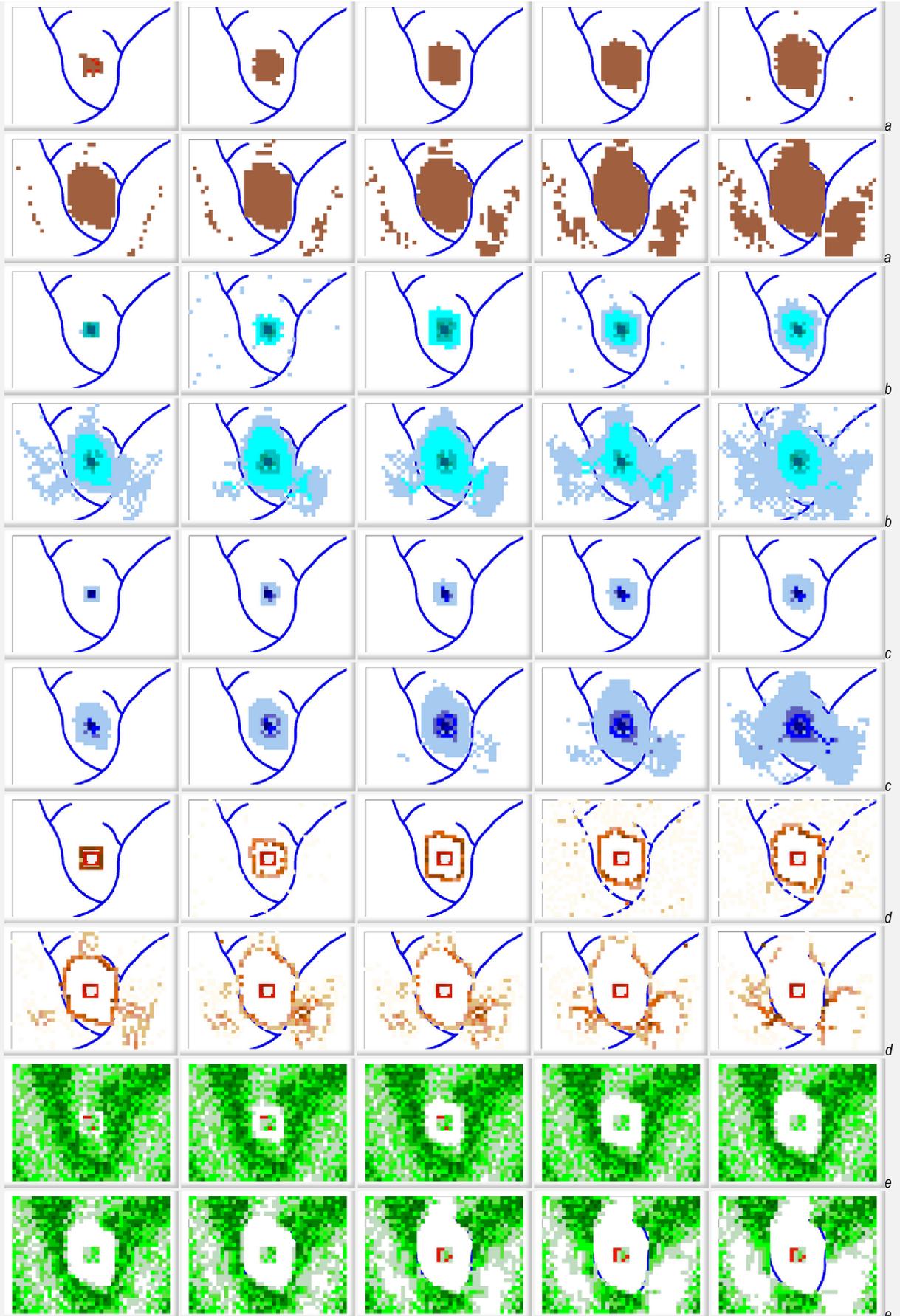


Figura 3.19: outputs da simulação com mecanismo ativo e lambdas default ($\lambda A=2.5$; $\lambda D=1.0$); mostrando 10 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) CentrR2; c) Potential; d) ResistE (SIM_rec.hidr6_Process 16).

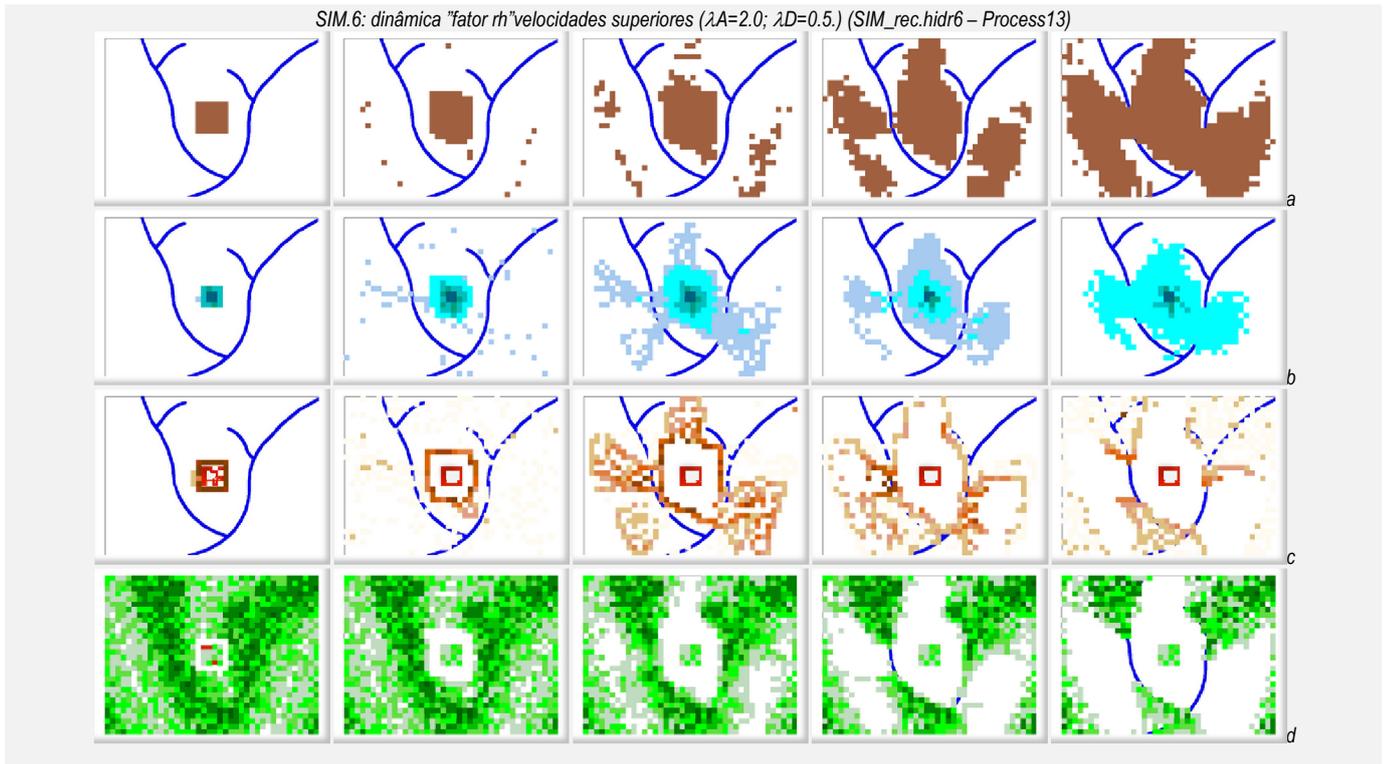


Figura 3.20: outputs da simulação com mecanismo ativo e velocidades de crescimento superior ($\lambda A=2.0$; $\lambda D=0.5$) mostrando 5 estados de 50 iterações: a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.

Os resultados apresentados no formato de *grids*, também podem ser representados a partir de gráficos lineares da medida de compacidade relativa do sistema (figura 3.21, a seguir), onde nos três procedimentos, explorando diferentes velocidades está demonstrada uma efetiva dinâmica na medida morfológica de compacidade dada suas múltiplas curvaturas, principalmente se comparadas com gráfico apresentado na figura 3.17 do título anterior, onde a linha aproxima-se de uma reta. O gráfico da figura 3.21 permite também demonstrar que alterações no parâmetro lambda alteram o procedimento apenas quantitativamente, ao apresentar semelhanças na forma em que ocorrem a linhas de compacidade, mantendo aspectos qualitativos semelhantes aos procedimentos em questão.

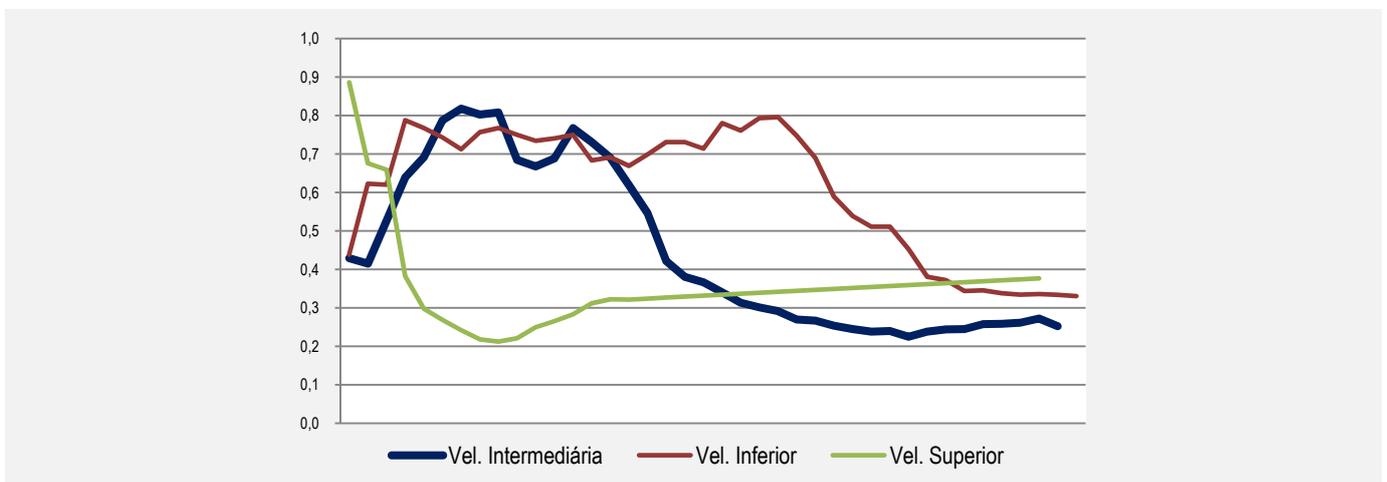


Figura 3.21: evolução linear da medida de compacidade relativa para simulações com o mecanismo ativo, explorando diferentes velocidades de crescimento: intermediário (linha azul), inferior (linha vermelha) e superior (linha verde).

A referida alternância na morfologia do crescimento é ainda mais evidente se destacada a curva da medida de compacidade do procedimento com velocidade intermediário, default do modelo (destacada em linha azul escuro). Neste caso, a curva da medida de compacidade converge diretamente ao enunciado descrito na hipótese de pesquisa, que abaixo está retomado e acrescida dos termos que se referem à compactação urbana, sublinhados,

A partir de um núcleo de origem a cidade cresce com predomínio concêntrico até atingir áreas adjacentes aos recursos hídricos, onde ocorrem maiores resistências à urbanização que impedem a continuidade da produção espacial urbana. Neste ponto, a cidade altera a forma do crescimento urbano, diminui a medida de compacidade, ocorrendo a conversão urbana em áreas com menores resistências e maior capacidade de suporte à urbanização. Após consolidar núcleos difusos adjacentes aos recursos hídricos, volta a apresentar crescimentos concêntricos, indicando retomada na medida de compactação.

3.3.4. Outras possibilidades de parametrização.

Além das possibilidades de parametrização associadas ao mecanismo acima apresentadas, que terão aplicação na continuidade do trabalho, estão implementados no mecanismo outras possibilidades de parametrização que foram parcialmente testadas e a seguir apresentadas, porém não serão aplicadas na sequência do trabalho.

Parâmetro morfológico “p”

Ao “fator rh” está aplicado exponencialmente um parâmetro “p”, conforme está nas equações 7 e 8 anteriormente apresentadas. O expoente “p” facilita ou dificulta a distribuição de tensões do modo difuso, podendo replicar a predisposição do sistema urbano à ocorrência de crescimento difuso e a fragmentação urbana. Ao incidir exponencialmente sobre o “fator rh”, o qual varia de 0 a 1, o parâmetro “p” opera de modo semelhante ao parâmetro lambda, onde valores menores que zero aumentam tendências e velocidades de fragmentação, enquanto valores maiores que 1 procedem o aumento da compactação urbana.

Aplicações deste parâmetro possibilitam que ocorra uma calibragem qualitativa do crescimento, uma vez que não altera a velocidade e nem a taxa de conversão do solo. O gráfico da contagem de células (figura 3.22a) demonstra que a aplicação parâmetros não altera a velocidade de crescimento e conversão urbana. Por outro lado, a ocorrência a medida de Compacidade Relativa (figura 3.23b) é qualitativamente alterada quando aplicado parâmetro “p” igual a 0.8, que aumenta a predisposição à fragmen-

tação (em vermelho); por outro lado, valor de “p” igual a 1.2 aumenta propriedades de manutenção da compactação (em verde).

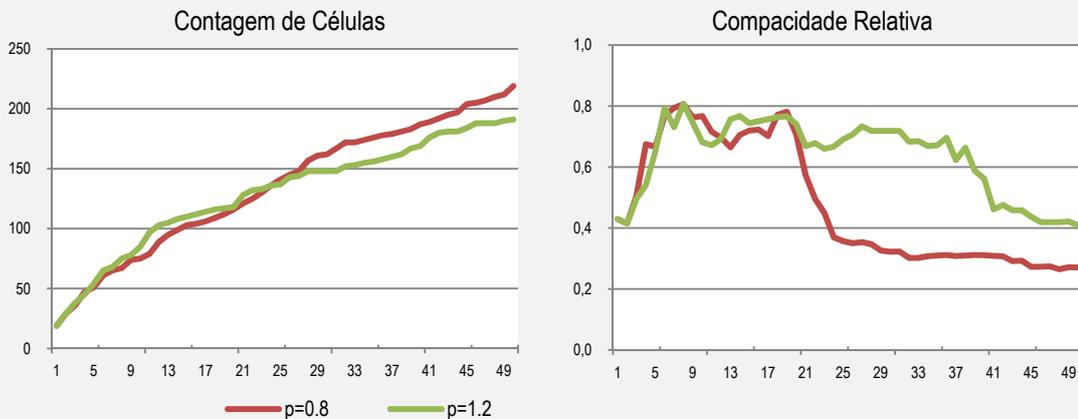


Figura 3.22: gráficos comparativos da aplicação de parâmetros morfológicos “p” inferior a 1 (em vermelho) e superior a 1 (em verde): a) contagem de células e velocidade do crescimento; b) compactação relativa.

Perfil agentes promotores do crescimento difuso – “fator X”.

Outro parâmetro de calibração que está indicado e parcialmente testado diferencia o perfil dos agentes de promoção de crescimento, quando crescimento ocorre de modo difuso. O “fator X” corresponde ao número de vezes que o crescimento difuso do tipo 1 (D1, definido na equação 12) ocorre superior (valores de 1 a 10) ou inferior (valores de 0 a 1) ao crescimento difuso do tipo 2 (D2, definido na equação 13).

Quando “fator X” for diferente de 1, para obter a relação entre distribuições de tensões do tipo 1 e do tipo dois devem ser aplicadas as equações apresentadas a seguir, as quais indicam numericamente os valores entre 0 e 1 para D1 e D2.

Equações 12 e 13 cálculo dos valores de D1 e D2 quando aplicados “fator X”

$$D1_i = 2 \cdot rh^p \cdot [1 - (1+X)^{-1}](10)$$

$$D2_i = 2 \cdot rh^p \cdot (1+X)^{-1} \quad (11)$$

Onde:

“X”: fator de desequilíbrio do perfil sócio-econômico dos agentes de promoção imobiliária.

“rh”: percentual do potencial de crescimento incidente no buffer dos recursos hídricos.

“p”: parâmetro morfológico de indução ou restrição à distribuição das tensões de modo difuso.

D1, D2: percentual de tensões distribuídas iterativamente pelo modo difuso do tipo 1 e difuso do tipo 2, respectivamente.

Desta forma, ocorrência de valores do fator “X” entre 1 e 10, o crescimento difuso é orientado pela promoção imobiliária formal, caracterizando loteamentos desconexos das áreas efetivamente urbanizada por movimentos de especulação fundiária e a formação de vazios urbanos de retenção imobiliária. Por outro lado, quando aplicados valores menores que 1 e maiores que zero, o crescimento urbano

difuso está predominantemente orientado pela lógica informal, ocupando áreas de baixo valor do uso do solo e maiores fragilidades ou resistências ambientais.

3.4. Epílogo do Capítulo 3.

Neste capítulo, estão apresentadas as bases metodológicas do trabalho e construído o mecanismo de simulação de crescimento adicional ao Simulador do Ambiente da Cidade, o qual converge diretamente às indicações do marco teórico do trabalho. A sequência do trabalho está dedicada a retomar a abordagem do problema sobre caso empírico, aplicando o mecanismo para replicar crescimentos urbanos reais, possibilitando comparações visuais e correlações numéricas, validando o mecanismo para futuras simulações aplicadas à realidade delineada. Antes, o crescimento urbano e suas relações com a hidrografia terão abordagem empírico-descritiva, de modo a evidenciar relações convergentes entre a expansão urbana e o manejo das águas urbanas; além de permitir um conjunto de dados gráficos e numéricos serve para construção de *inputs*, cenários de controle e parametrização do modelo de simulação.

4. Crescimento Urbano e a Hidrografia:

empirismo e modelagem urbana para o caso Pelotas [1815 – 1965].

Conforme está delineado no capítulo da introdução, o trabalho está dedicado aos padrões espaciais das cidades da metade sul do Estado do Rio Grande do Sul, dada sua relativa homogeneidade geográfica e topográfica, onde evidências empíricas indicam relações entre a morfologia urbana e os atributos da hidrografia. Neste contexto, a continuidade do trabalho está dedicada para o caso da cidade de Pelotas-RS, tanto por sua condição de maior cidade da região, quanto pela existência de uma consistente base de estudos sobre a historiografia urbana (Cunha, 1928; Cruz, 1984; Soares, 2002; Gutierrez, 2004).

Este capítulo está organizado em dois subtítulos; o primeiro (subtítulo 4.1) apresenta um aprofundamento da abordagem empírica sobre o histórico crescimento urbano de Pelotas e as relações com os atributos da paisagem natural. O segundo (subtítulo 4.2) procura aplicar o mecanismo de simulação de crescimento desenvolvido no método à realidade da cidade de Pelotas, com o objetivo de validação e correlação com os dados e cenários de controle construídos a partir do estudo empírico.

Para o capítulo está proposta uma abordagem sistêmica da historiografia urbana (Jansen, 2001) da cidade de Pelotas, mantendo o quadro teórico conceitual proposto no trabalho e incorporando aspectos espaciais relativos ao ambiente natural, da hidrografia e fatos do histórico do saneamento da cidade. Este título procura também estabelecer relações entre a forma urbana de períodos passados e os modelos configuracionais da teoria urbana, propondo a leitura do processo de crescimento urbano a partir de uma “abordagem evolutiva da teoria clássica” (Fujita e Mori, 1997).

As abordagens no caso de Pelotas, tanto empíricas como simulatórias, estão delimitadas a um intervalo temporal de 150 anos, com origem no ano de 1815 e definido o ano de 1965 como cenário final. O ano de 1815 é quando ocorre a elaboração da primeira planta do núcleo urbano, já a definição do ano de 1965 ocorre pela convergência de três fatores:

a) a partir deste período a disponibilização dos dados sobre o crescimento urbano de Pelotas passa a ocorrer não apenas por mapas, desenhos e relatos da historiografia tradicional, mas também por fotografias aéreas capturadas nos voos de 1953, 1965 e imagens aerofotogramétricas ou capturadas por satélite, que posteriormente se sucedem, o que possibilitaria um maior detalhamento nos dados e redução na escala de abordagem;

b) no ano de 1965 a cidade de Pelotas já se encontra em estágio de crescimento que ultrapassa os limites oeste, norte e leste dos recursos hídricos, com a consolidação dos novos núcleos urbanos nos

bairros Fragata, Três Vendas e Areal (respectivamente). Também estão definidos os eixos viários de conexão entre estes bairros e o núcleo central da cidade.

c) o processo de evolução urbana da cidade de Pelotas entre os anos 1965 e 2000 já foi objeto de estudo com o SACI no trabalho de Polidori (2004), estabelecendo uma calibragem e parametrização específica ao modelo para este intervalo temporal.

4.1. Evolução urbana, morfologia e hidrografia: descrição empírica e modelos urbanos.

4.1.1. Descrição do território, ocupação e o ambiente natural.

Sob o ponto de vista geográfico, a cidade de Pelotas situa-se na Encosta do Sudeste, ao sul do Estado do Rio Grande do Sul (RS), distante cerca de 250 km da capital Porto Alegre e às margens do estuário da Lagoa dos Patos. Encontra-se em uma latitude $31^{\circ} 46' 10''$ e longitude $52^{\circ} 20' 25''$, ponto que corresponde no sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) ao fuso 22 sul, 373.081 metros a leste e 6.484.343 metros ao sul. Sob o ponto de vista dos recursos hídricos e das divisões hidrográficas do Estado, a cidade se situa na bacia hidrográfica Mirim – São Gonçalo, a qual compartilha águas internacionais com o Uruguai e tem o canal São Gonçalo como a principal linha de drenagem. A bacia Mirim – São Gonçalo se caracteriza por seu regime de escoamento que sazonalmente tem o sentido invertido em função dos períodos de seca na Lagoa Mirim e influência do nível do mar sobre a Lagoa dos Patos.

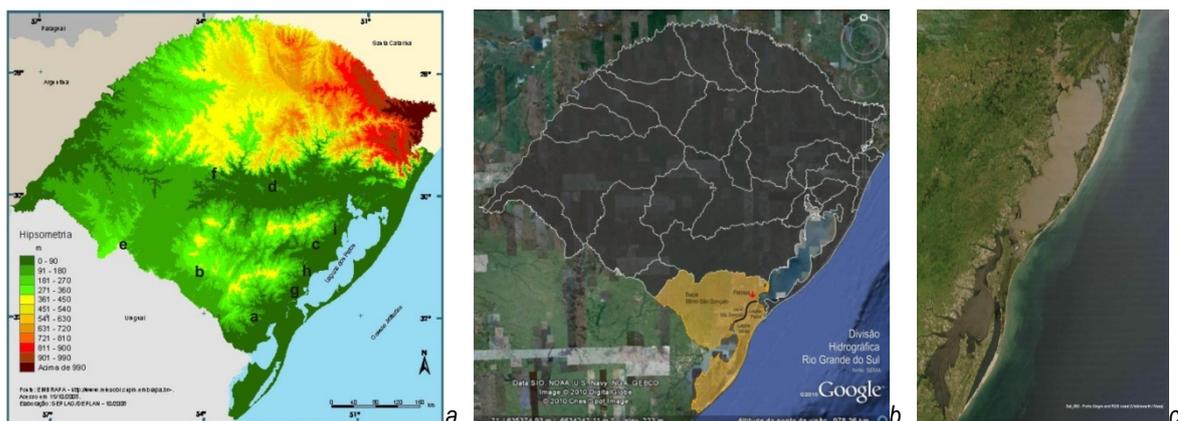


Figura 4.1: caracterização geográfica do estado do Rio Grande do Sul: a) mapa de altitudes (Sema-RS); b) divisão das bacias hidrográficas (Google Earth); c) recorte espacial das Lagoas dos Patos e Mirim (Landsat7).

O território onde se desenvolve a cidade é caracterizado por duas formações geológicas. O quadrante noroeste ocupa uma porção final do Escudo Cristalino, os quadrantes nordeste, sudeste e sudoeste do território ocupam parte da Planície Costeira, composta por camadas sedimentares arenosas e argilosas. A topografia da região configura uma paisagem de planícies baixas formadas por estreitos cordões

arenosos decorrentes de transgressões e regressões marítimas, caracterizando áreas de terraços secos com transições de baixas declividades para áreas de várzeas. Estas áreas baixas, de modo geral, são regiões com grande tendência a ocorrência de alagamentos que correspondem aos leitos maiores dos principais recursos hídricos; os arroios Fragata, Santa Bárbara, Pepino e Pelotas, os quais escoam no sentido do canal São Gonçalo (Rosa, 1985).

O Estado do Rio Grande do Sul teve o seu processo de ocupação territorial e formações urbanas ocorrido de modo diferenciado entre regiões das serras do norte e os campos do sul. Nas cidades da região sul, os sistemas de rios, lagos e lagoas foram fatores decisivos no processo de ocupação territorial, onde as baixas altitudes, a ausência de declividades e a ocorrência de áreas alagadiças configuravam um cenário de dificuldades à urbanização e deslocamentos pelo território (Souza, 2000). A importância das condições da paisagem, da topografia e a presença dos recursos hídricos estão representadas a seguir no mapa (figura 4.2a) e nas aquarelas (figuras 4.2b e 4.2c) elaboradas pelo viajante alemão Wendroth (1852), que retratam a dificuldades impostas pela hidrografia na travessia e deslocamentos pelo território.

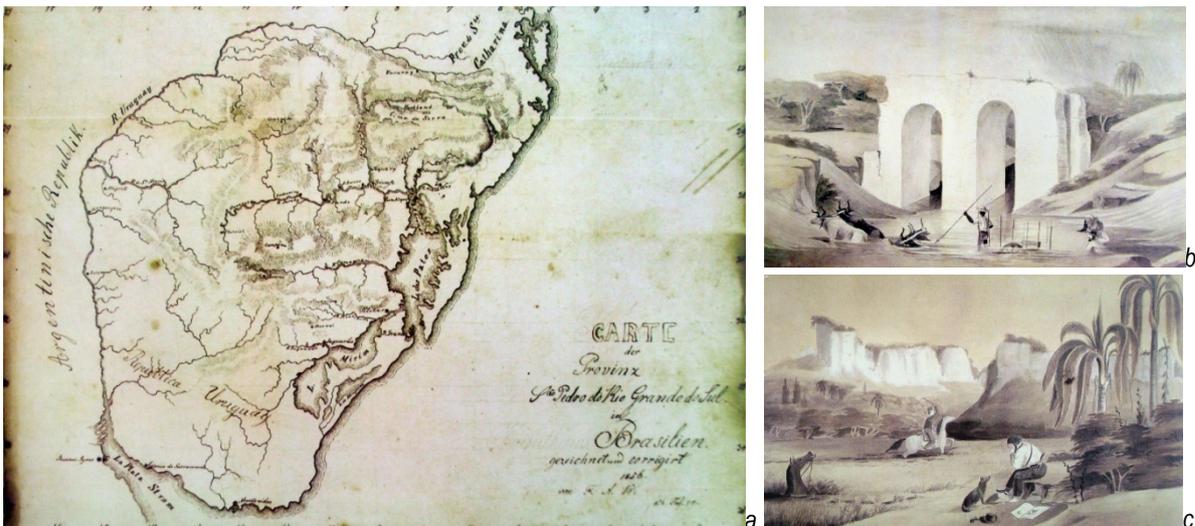


Figura 4.2: ilustrações do viajante alemão Hermann Rudolf Wendroth (1852) à região do Estado do RS que retratam e evidenciam a importância dos atributos da topografia e da hidrografia na configuração da paisagem.

Não diferente das demais cidades do sul do Estado, na região de Pelotas os padrões da paisagem natural foram dominantes desde a primeira doação de terras ocorrida no ano de 1758, constando no acervo do Arquivo do Estado Maior do Exército como “terras desde o Rio Santa Bárbara, Rio das Pelotas, até a ponta de *Cangussu*, limitando-se a sudeste pela barra do Canal São Gonçalo” (Cruz, 1984). Neste local, as primeiras divisões de terras correspondem ao trecho do Escudo Cristalino do final da Serra do Mar, com altitudes variadas entre 100 e 400m, onde os morros e a topografia ligeiramente elevada do final da Serra de Tapes de imediato são atrativos para as atividades de pecuária. Já a porção da Planície Costeira, áreas baixas da planície sedimentar, naturalmente configuradas e delimitadas

pelos recursos hídricos, em um segundo momento configuram um local propício à implantação do sítio charqueador, que ao final do século XVIII é atraído para a região pelas possibilidades de escoamento dos dejetos e da produção, instalando-se às margens do arroio Pelotas e do canal São Gonçalo. Por este período a região de Pelotas passa a ter todo o seu território partilhado por propriedades particularmente interessadas nas margens dos recursos hídricos (Gutierrez, 2004).

4.1.2. Núcleo urbano central: de concêntrico a setorial. [1815 – 1865]

No ano de 1815, para implantação da capela de São Francisco de Paula e localização do primeiro núcleo urbano, mesmo levando em conta os *arraias* de casas preexistentes, localizados próximos aos recursos hídricos, foi escolhido o planalto margeado pelo arroio Santa Bárbara a oeste, o canal de São Gonçalo ao sul e o arroio Pelotas a leste (Gutierrez, 2004). Neste “*terreno ligeiramente levantado para se pudesse esgotar e assear as ruas*”, na “*lomba não alagadiça até a caída para o Santa Bárbara*” (Cunha, 1928), foram traçadas 12 ruas em uma área aproximada de 53 ha (Osório, 1922). No ano de 1835, ano em que a vila de São Francisco de Paula é elevada a condição de cidade, foi apresentada uma segunda planta urbana (figura 4.3b, a seguir), um plano de expansão da primeira planta da cidade (figura 4.3a, abaixo) com ruas que se prolongavam em direção ao sul até as margens do canal São Gonçalo e eram acrescentadas outras 15 ruas transversais. No ano de 1844, são redefinidos os limites urbanos pela Câmara Municipal, compreendidos entre o arroio Santa Bárbara e a rua das Fontes (atual Almirante Barroso), desde o canal São Gonçalo até a rua do Passeio (atual av. Bento Gonçalves) (Gutierrez, 2004).

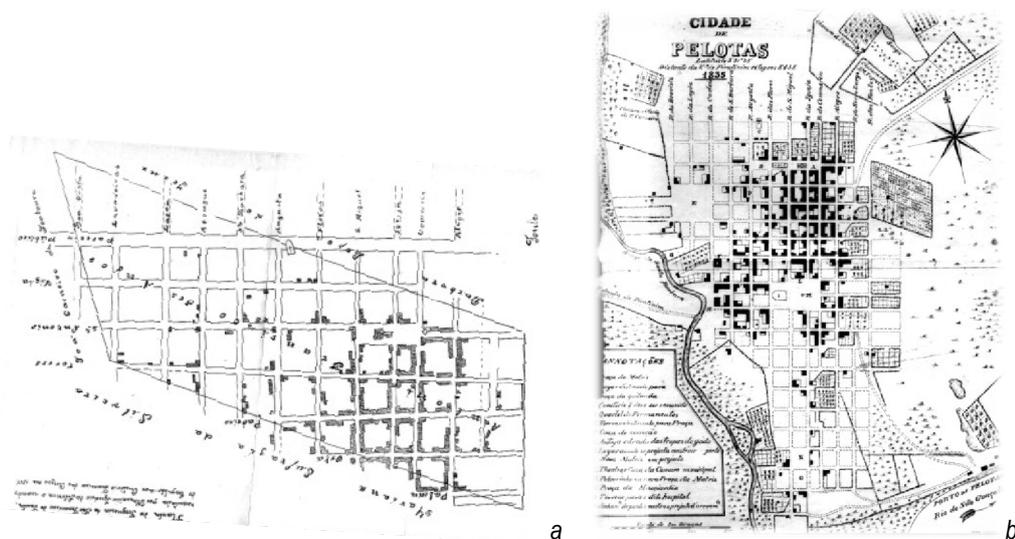


Figura 4.3: primeiras plantas urbanas da cidade de Pelotas-RS, a) 1815; b) 1835; destacadas os estoques existentes e indicações de expansão da malha regular.

Portanto, se pode afirmar que desde a primeira doação de terras, nas primeiras partilhas de terras, na implantação do sítio charqueador, na escolha do sítio para implantação do núcleo urbano e nos movi-

mento iniciais de expansão; a cidade Pelotas tem sua estrutura espacial ligada às questões ambientais, principalmente relacionadas com a hidrografia e as possibilidades de saneamento do ambiente. Áreas adjacentes aos recursos hídricos, que inicialmente são deixadas como “sobras” da primeira divisão de terras, passam a atrair os espaços de produção econômica do charque. No sentido inverso, a insalubridade e o ambiente desfavorável que caracterizavam o entorno das charqueadas, passam a repulsar o processo de urbanização, que elege locais altos, planos e bem drenados, com a devida salubridade e distância dos rios e arroios para instalar suas casas.

A figura 4.4 a seguir apresenta a estrutura da paisagem da região de Pelotas por volta do ano 1835. Nota-se a área urbana configurada por uma malha regular, ao final do cordão arenoso de altitudes médias entre os arroios Santa Bárbara e Pepino. A partir da malha regular xadrez, partiam estradas e caminhos preexistentes no território desde as primeiras divisões de terras. Por estes caminhos percorriam os tropeiros que traziam o gado para fornecimento às charqueadas e configuram-se os principais acessos ao núcleo urbano central. São estes as estradas de Cima e de Baixo à leste; o prolongamento da Praça das Carretas e a estrada de Piratini à oeste, o logradouro público e o matadouro da Tablada ao norte; o ponto de travessia do São Gonçalo pelo Passo dos Negros, ao Sul.

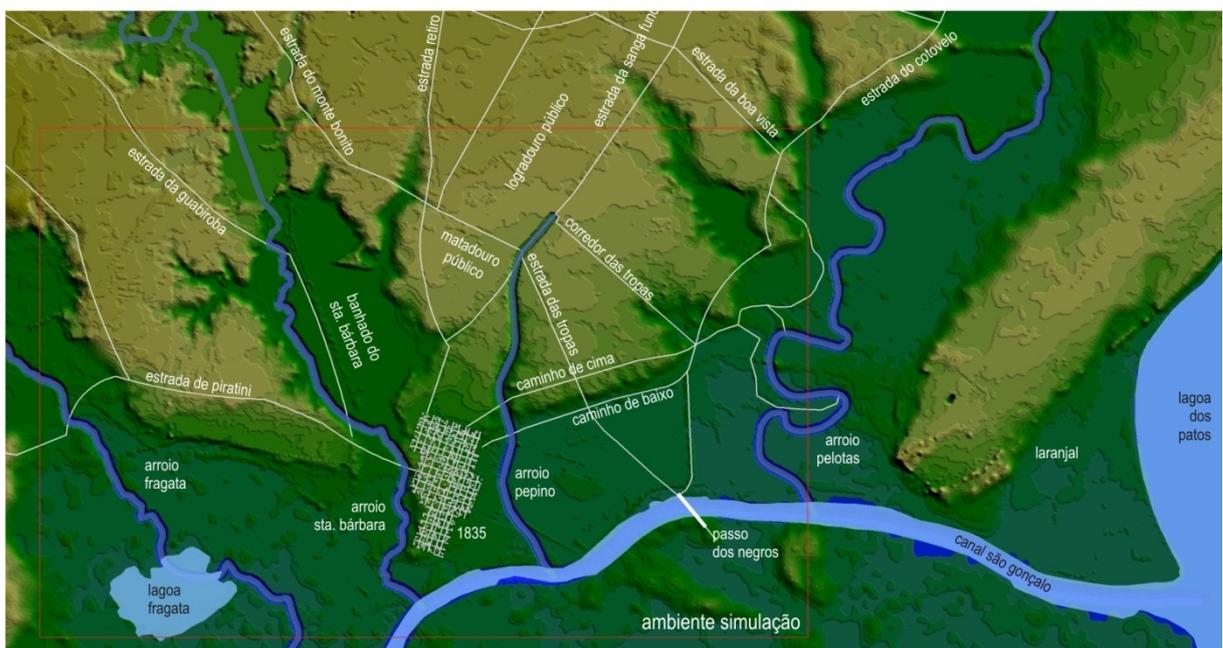


Figura 4.4: estrutura da paisagem da cidade de Pelotas no ano de 1835; destacando área urbana; estradas, percursos e caminhos; topografia formada por terraços e áreas baixas; recursos hídricos (imagem elaborada pelo autor, 2010).

Localizada sobre o terraço plano e elevado, a área urbana não ocupava áreas baixas junto aos leitos dos recursos hídricos, locais onde eram maiores as restrições da paisagem à conversão urbana. Por este período o crescimento associava-se a forma concêntrica, ligeiramente alongada que acompanhava o sentido dos arroios Pepino e Santa Bárbara. Esta ideia de cidade concêntrica que caracteriza a expansão da cidade de Pelotas no período entre 1815-1865 pode ser relacionada aos modelos concên-

tricos da teoria clássica, como os modelos ecológicos da escola de Chicago (1921) e lugar central (CBD) de Alonso (1964) (apresentadas no capítulo 2), associação que está ilustrada na figura 4.5, a seguir.

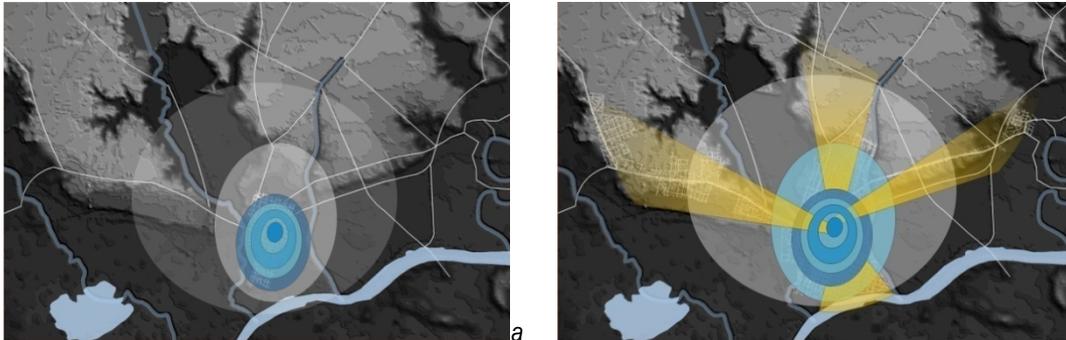


Figura 4.5: associação da forma urbana de Pelotas aos modelos concêntrico (a) setorial (b) (imagens pelo autor).

Por outro lado, se abordados sobre uma perspectiva mais ampla, a estrutura da paisagem já apresentava estradas e caminhos que configuravam os principais acessos ao núcleo urbano central. A diferenciação urbana a partir da definição dos acessos viários, simultaneamente em que se mantém o crescimento concêntrico, permite associar a forma urbana da cidade de Pelotas ao fim deste período ao modelo proposto por Hoyt (1939), conforme figura 4.5b, antes apresentada. O modelo setorial indica a ocorrência de diferenciações intraurbanas por setores e vetores de crescimento em função da definição dos acessos viários, modelo urbano que no subtítulo 4.1.3 a seguir, se sucede.

4.1.3. A cidade invade os rios: expansão e limiares ambientais. [1865 – 1915]

À medida que a cidade cresce, avança em direção aos locais baixos, ocupando cada vez mais os leitos maiores dos recursos hídricos. Mesmos com a diferenciação interna e vetores de crescimento axiais definidos, o crescimento continua a ocorrer imediatamente adjacente a área já urbanizada, replicando morfologias de crescimento concêntrico. Ocupam-se áreas de várzeas do banhado do Santa Bárbara (noroeste), junto à foz deste referido arroio (sudoeste) e na região do porto (sudeste). Além destas áreas de várzea, o crescimento urbano ocorre junto ao curso alto e as nascentes do arroio Pepino (nordeste) (Silva e Polidori, 2004).

Ao ocupar áreas alagadiças e imediatamente adjacentes às linhas de drenagem, como a cidade ainda não apresenta um sistema de coleta e tratamento de esgotos, por este período ocorre também um aumento na taxa de mortalidades relacionadas às doenças de veiculação hídrica, transmitidas por deficiências no saneamento e na drenagem urbana (SANEP, 1988). Não de forma casual, é por este período que surgem as primeiras manifestações com as questões de saneamento urbano na cidade de Pelotas. A mais remota informação sobre abastecimento de água data de 1861 quando ocorre a contratação de um serviço de sondagem e perfuração de um poço artesiano que acabou por não

ser realizado. Somente no ano de 1874 é inaugurada a primeira obra de abastecimento de água na cidade, quando esta contava com 2.487 casas e uma população em torno de 12 mil habitantes (SANEP, 1988).

Também é possível especular sobre a convergência cronológica do crescimento urbano ocorrendo em áreas de fragilidade ambiental, a ocorrência de doenças de veiculação hídrica e intervenções estruturais (retificação e canalização) sobre o arroio Santa Bárbara. Em 1880, o terreno situado junto ao arroio Santa Bárbara, entre as pontes de Pedra e de Madeira (entre as ruas Floriano e Lobo da Costa) foi doado ao município para implantação de uma praça, quando o arroio foi imediatamente desviado e o seu leito natural aterrado, desfazendo sua forte inflexão em direção a leste. Já no ano de 1881 foi apresentada uma primeira proposta de canalização total do arroio Santa Bárbara (Gutierrez, 2004). Mais do que aumentar a área da praça entre as pontes de Pedra e Madeira, estas primeiras intervenções sobre o curso natural do arroio Santa Bárbara são demonstrações diretas do paradigma higienista-sanitarista e do manejo das águas urbanas baseadas em intervenções estruturais, como está apresentado no título 2.1 do capítulo 2. Antes mesmo de ser implementado um sistema de coleta de esgotos no interior da cidade, estas medidas estruturais visavam principalmente acelerar a velocidade de escoamento das águas e afastar águas contaminadas das populações que ali se instalavam.

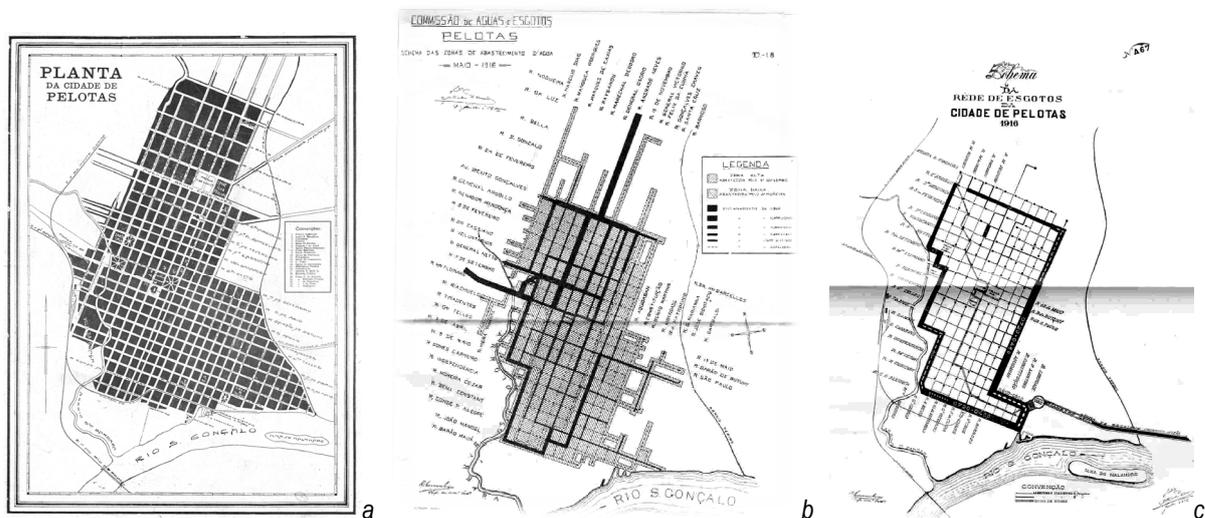


Figura 4.6: Pelotas (1911). a) planta da cidade; b) rede de abastecimento de água; c) rede de esgotos. (SANEP, 1988).

Em 1911 foi construído um sistema de coleta de esgotos, quando Pelotas contava com 37 mil habitantes e 7.100 unidades construídas, destas apenas 2.000 com abastecimento de água encanada e a mortalidade girava em torno de 1.400 pessoas por ano. O sistema de esgotos inaugurado tinha capacidade para coletar 4.600 unidades centrais, compreendia a área entre as atuais ruas Almirante Barroso e Manduca Rodrigues, no sentido leste-oeste; a avenida Bento Gonçalves e a rua Conde de Porto Alegre, no sentido norte-sul. O esgoto coletado, sem nenhuma forma de tratamento, era despejado *in natura* no canal São Gonçalo, junto a foz do arroio Pepino (SANEP, 1988). Na elaboração destas medidas

de saneamento, foram elaboradas plantas da cidade apresentadas na figura 4.6, onde a rede de coleta de esgoto reforça ainda mais a ideia concêntrica da cidade (figura 4.6c), embora a rede de abastecimento de água (figura 4.6b) e a planta da cidade (figura 4.6a), ambas indicassem o prolongamento dos eixos e a existência de urbanizações remotas.

4.1.4. Expansão urbana: difusão, fragmentação; captura e transposição. [1915 – 1965]

Partindo do núcleo original, a forma urbana passa a ocupar toda a área definida desde as margens do arroio Pepino até as margens do arroio Santa Bárbara. A partir deste período, do ano de 1915, os loteamentos na cidade passam a ocorrer pontualmente, em pequena escala e de modo fragmentado, além dos limites dados pela hidrografia e localizados próximos às vias de acesso da cidade (Silva e Polidori, 2004). É por este período que ocorre a efetiva industrialização da cidade, contribuindo para que a questão do crescimento urbano passe a estar associada à promoção de moradia para classe trabalhadora, ocorrendo basicamente a partir do parcelamento de pequenas glebas de propriedade individual e a venda de lotes desmembrados (Moura, 2007). São os casos, dentre inúmeros outros, da Vila São Francisco de Paula (1923, figura 4.7a) e Vila Hilda (1924) no eixo oeste; Vila Treptow (1953, figura 4.7b) e Vila Princesa 1953, figura 4.7c) no eixo norte; e dos bairros Bom Jesus (1930) e Jardim Europa (1954) no eixo leste (Silva e Polidori, 2004).

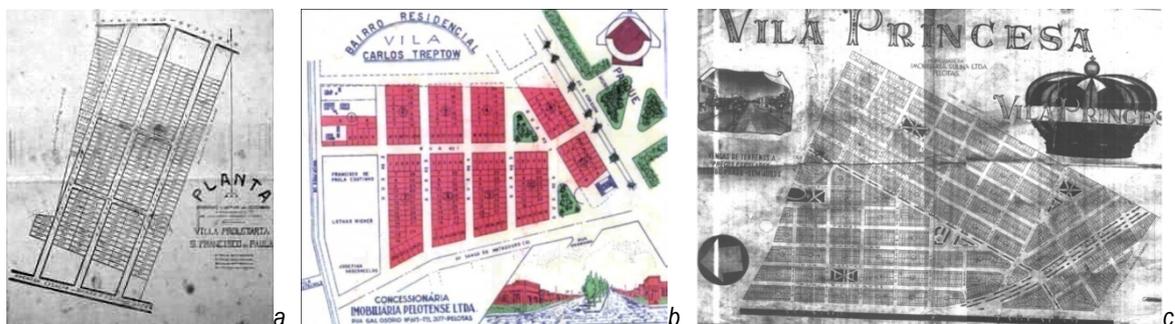


Figura 4.7: loteamentos difusos ocorridos na cidade, além dos limites das linhas de drenagem:
a) Vila São Francisco de Paula; b) Vila Treptow; c) Vila Princesa (Silva e Polidori, 2004).

Desses, cabe destacar que o primeiro loteamento urbano de iniciativa individual, o Bairro Augusto Simões Lopes [1914], ainda localiza-se imediatamente adjacente a área urbana, à oeste do arroio Santa Bárbara. Neste caso, é possível pressupor que as péssimas condições do terreno e os originais problemas de falta de acessibilidade tenham sido dominantes para que ainda hoje apresente sérios problemas de segregação espacial. Posteriormente, os demais loteamentos que se sucedem ocorrem fragmentados e difusos em relação à área urbana preexistente.

A respeito desta forma de crescimento que caracteriza o terceiro momento da evolução urbana da cidade de Pelotas, podem ser identificadas duas principais questões. A primeira é a convergência tempo-

ral com o período que o crescimento concêntrico definitivamente passa a ocupar áreas junto aos leitos de drenagem dos recursos hídricos, onde certos limiares ambientais são atingidos, provocando um colapso no saneamento urbano e o aumento das taxas de mortalidades por doenças de veiculação hídrica. Outra questão é que a ocorrência deste padrão de crescimento, difuso e fragmentado, mesmo promovidos por agentes urbanos individuais (investidores, industriários ou prefeitura), repetirem os mesmos critérios de escolha do sítio para implantação do núcleo urbano original; ou seja, ocorrem sobre novos divisores de água, em terraços planos e bem drenados, longe dos problemas de insalubridade que haviam junto aos recursos hídricos. Sob os aspectos levantados, pode-se pensar que, além dos aspectos sócio-espaciais da produção do espaço urbano, no processo de produção espacial continuada da fábrica urbana existam aspectos locacionais relacionados às condições do ambiente natural de suporte.

Também por este período, mesmo após a implantação do primeiro sistema de coleta de esgotos [1911], permaneciam altas as taxas de mortalidade relacionadas às questões do saneamento, quando em 1926 foi contratado o eng. Saturnino de Brito para elaborar um plano de saneamento da cidade. O estudo entregue em 1927 ampliava os sistemas de abastecimento de água para os novos bairros e a coleta de esgotos prolongada ao norte. Para drenagem das águas pluviais foi proposta a canalização das águas da “Sanga do Norte” (canaletes abertos nas atuais ruas Marechal Deodoro e General Argolo) e indicada a transposição do arroio Santa Bárbara, desde a Ponte de Pedra (atual Marechal Floriano) até desembocadura no São Gonçalo. No ano de 1947, o engenheiro foi novamente contratado para realizar um novo projeto, o qual previa um plano de expansão urbana para 31 mil casas, onde foram traçadas avenidas de contorno da cidade, consolidando e indicando o crescimento ao longo dos eixos oeste, norte e leste em direção aos bairros da cidade (SANEP, 1988). Por outro lado, o plano representava a proposta de transposição do arroio Santa Bárbara, insistindo na visão do crescimento urbano concêntrico, que neste momento só se tornaria viável se tomadas este tipo de medidas estruturais.

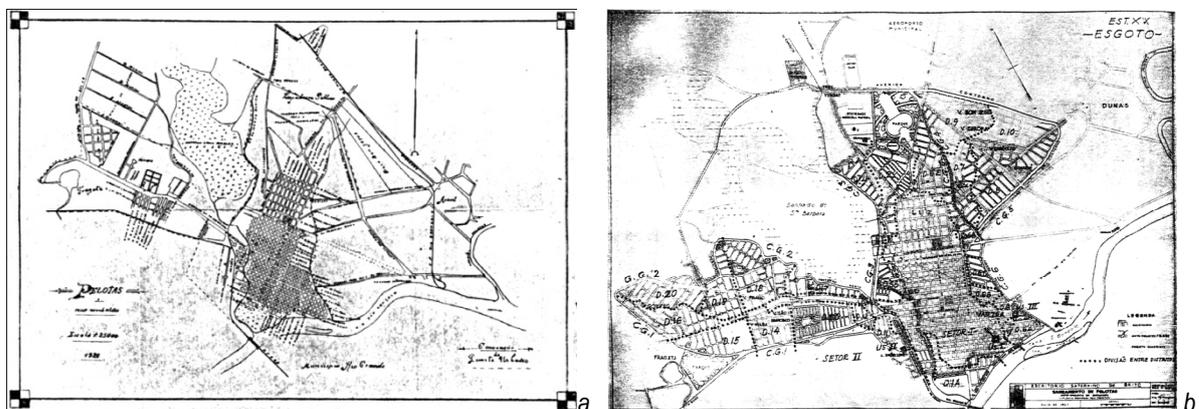


Figura 4.8 plantas de Pelotas elaboradas pelo eng. Saturnino de Brito nos planos de saneamento de a) 1926 e b) 1947 (SANEP, 1988).

Plantas da cidade de Pelotas dos anos 1926 (figura 4.8a) e 1947 (figura 4.8b), elaboradas pelo mesmo autor e representadas a partir de recortes espaciais semelhantes, permitem um panorama de como ocorre o crescimento urbano por este período. Mesmo com a definição dos vetores de crescimento ao longo dos eixos viários e a ocorrência de loteamentos difusos para além das linhas de drenagem dos recursos hídricos, a cidade mantém a forma de crescimento concêntrico, preenche os vazios intraurbanos ainda existentes e adota medidas estruturais sobre a hidrografia natural que ainda resistia ao processo de expansão urbana.

Em suma, o pensamento higienista-sanitarista que se tornou dominante nas decisões de manejo das águas urbanas e a forma em que ocorria o crescimento urbano neste período são determinantes para que, enfim, ocorram as sempre desejadas obras de canalização do arroio Pepino e a transposição do Santa Bárbara. Nas imagens aéreas capturadas em voo no ano de 1965 está registrado o momento que ocorre a captura e transposição do leito natural do arroio Santa Bárbara, a qual coincide temporalmente com o cenário final proposto para o trabalho. Na figura 4.9 anteriormente apresenta, sobre a composição das fotografias aéreas [1965] estão levemente destacados o sistema viário e a topografia em tons de cinza; e com mais destaque, em azul os leitos naturais dos recursos hídricos e em vermelho o curso do canal do Santa Bárbara.



Figura 4.9: imagem aérea da cidade de Pelotas no ano de 1965, aplicadas diferenciação de brilho (áreas altas) e contraste (áreas baixas) pela topografia, destacados em azul os recursos hídricos e em vermelho o curso do canal Santa Bárbara. (imagem elaborada pelo autor, 2010).

4.1.5. Da evolução urbana de Pelotas: dados numéricos e cenários de controle.

Paralelamente à análise empírica do crescimento do caso de Pelotas [1815 – 1965], os dados levantados estão compilados em um novo sistema de informações geográficas da evolução urbana de Pelotas (SIG_evolução2). Este conjunto de dados em SIG é continuidade de outro, elaborado por Silva e Polidori (SIG_evolução, 2004), paralelamente ao trabalho “A forma urbana em Pelotas: evolução morfológica e análises espaciais”. A partir dos dados em um ambiente de geoprocessamento, dois conjuntos de dados foram construídos, os quais possibilitaram a construção de múltiplos cenários de controle e correlações numéricas dos processos de simulação que na sequência do capítulo serão retomados e a seguir estão apresentados.

Um conjunto de dados é referente aos gráficos no formato de mapas, construídos a partir de dados vetoriais e *raster*, que possibilitam comparações visuais e correlações com os *grids* dos procedimentos simulatórios. A figura 4.10 a seguir, apresenta uma sequência de mapas que ilustram a forma urbana de Pelotas, para os anos de 1815, 1835, 1882, 1911, 1926 e 1965. Estes mapas serão retomados no título 4.2 a seguir, para construção de cenários de controle às simulações.

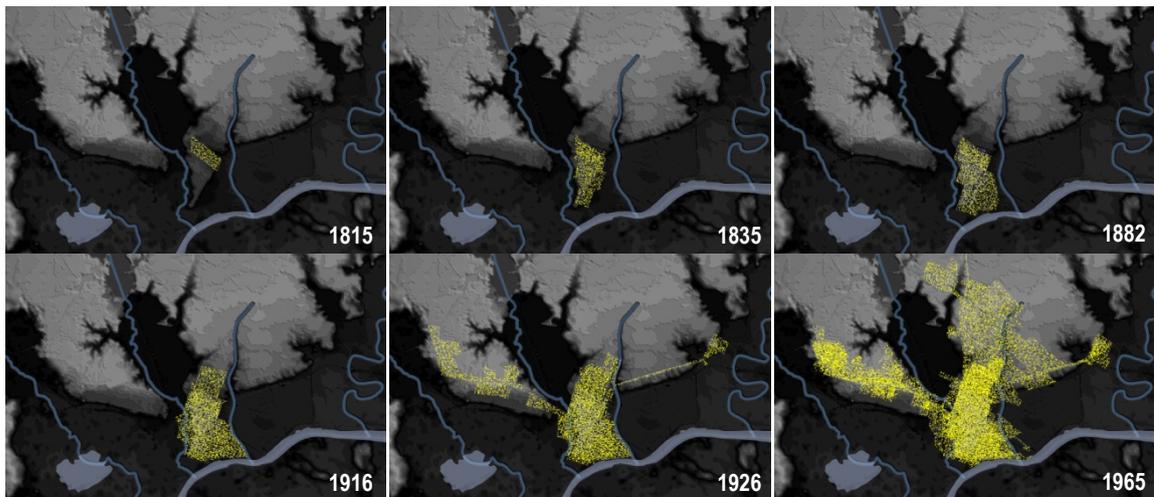


Figura 4.10: evolução urbana da cidade de Pelotas, com área efetivamente urbanizada representada por pontos amarelos, sobre mapa de altitudes em tons de cinza (áreas baixas em tom escuro) e os recursos hídricos em azul (imagens elaboradas pelo autor).

Outro conjunto de dados ocorre na forma numérica, a partir de dados quantitativos extraídos dos trabalhos da historiografia urbana de Pelotas. Estes dados que se referem a anos específicos, com intervalos temporais variados, ao serem tabulados e excluídos desvios maiores, permite o cálculo de taxas de crescimento e uma continuidade analítica dos dados. A partir dos dados de população, número de unidades habitacionais e área efetivamente urbanizada (AEU), foram calculadas taxas de crescimento e respectivas densidades: populacional e dos estoques construídos.

O gráfico comparativo entre as curvas de densidades, apresentado na figura 4.11a, a seguir, indica maior variação ou descontinuidade na demografia urbana (linha laranja), se comparadas com a densidade dos estoques construídos (linha lilás). Por sua vez, taxas de crescimento podem ser comparadas a partir de linhas de tendência logarítma, conforme apresentadas na figura 4.11b, onde o crescimento populacional (linha azul) e da AEU (linha verde) apresentam semelhanças e a horizontalidade indica ocorrerem com valores constantes, enquanto a taxa de crescimento do número de unidades construídas (linha vermelha) apresenta tendência a diminuição ao longo do tempo.

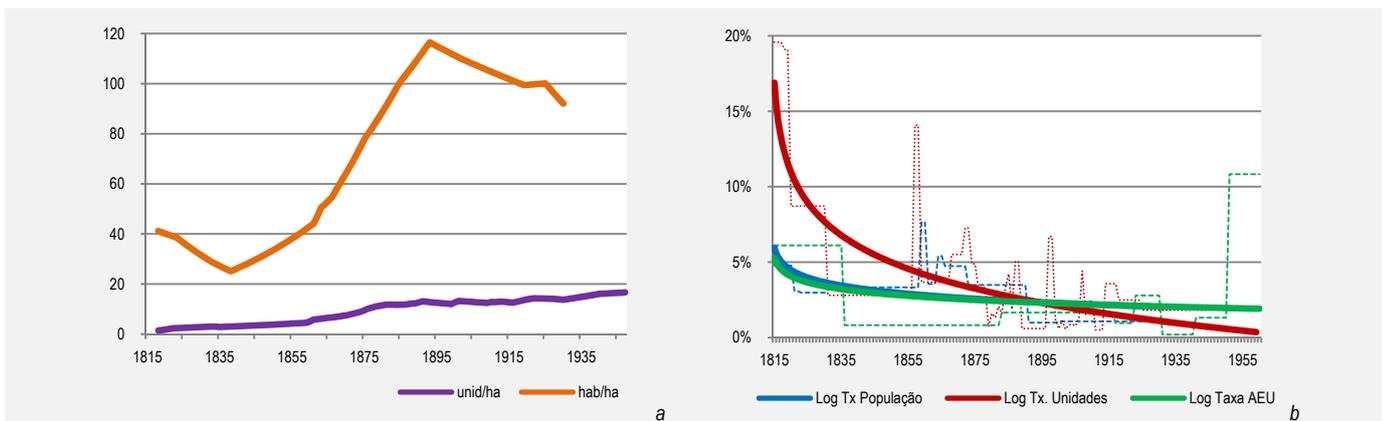


Figura 4.11: gráficos construídos a partir de dados numéricos extraídos da historiografia urbana de Pelotas. a) linhas de tendência logarítma das taxas de crescimento; b) dinâmicas das densidades populacionais e unidades construídas.

Em geral, os gráficos construídos a partir de dados numéricos indicam que o constante crescimento espacial urbano de Pelotas ocorre de forma desarticulada às variações na densidade populacional (linha laranja) ou às taxas decrescentes de adição de estoques construídos (linha vermelha). Esta assertiva converge com enunciados da teoria urbana contemporânea, que o crescimento urbano não é um processo que exclusivamente viabiliza novos espaços de suporte aos processos urbanos, é um processo produtivo em si, uma fábrica de lugares novos por excelência (*a urban fabric*), que confere certa autonomia da forma urbana sobre decisões e comportamentos dos demais agentes e processos intraurbanos (Krafta, 1999).

Por fim, cabe ressaltar a já indicada correlação da análise empírica da evolução urbana da cidade de Pelotas com uma “abordagem evolutiva dos modelos da teoria urbana clássica”, proposta por autores da Nova Geografia Econômica, como Krugman (1996), Fujita e Mori (1997) e aplicado por Janoschka (2002) para o caso da cidade de Buenos Aires. No caso da cidade de Pelotas, o crescimento urbano em um primeiro momento (1815-1865, abordado título 4.1.2) ocorre de forma concêntrica, promovendo a conversão urbana em territórios imediatamente adjacentes, permitindo associação aos modelos e teorias concêntricas da escola de Chicago (Park e Burgess, 1925) e Alonso (1964), conforme apresentado na coluna “a” da figura 4.12. Simultaneamente em que são definidos os acessos viários, a expansão urbana avança sobre as linhas de drenagem naturais da hidrografia e o porte do sistema urbano

permite uma forma de diferenciação intraurbana, a morfologia urbana do período está associada ao modelo setorial de Hoyt (1939). Neste período (1865-1915, descrito no título 4.1.3), os acessos urbanos indicam futuros vetores de crescimento, em um momento que o crescimento urbano deixa de ocorrer exclusivamente concêntrico e passa a ocorrer de modo difuso, fragmentado, adjacentes a estas vias de acesso, conforme estão na coluna “b” da figura 4.12. Por fim, ao consolidar novos núcleos urbanos além dos limites definidos pela hidrografia, em novos visores de águas, configurando uma forma urbana mais fragmentada, indicando a ocorrência de multicentralidades, a morfologia urbana (1915 -1965, no título 4.1.4) permite associação à Teoria do Lugar Central de Christaller (1933), estes relacionados na coluna “c” figura 4.12.

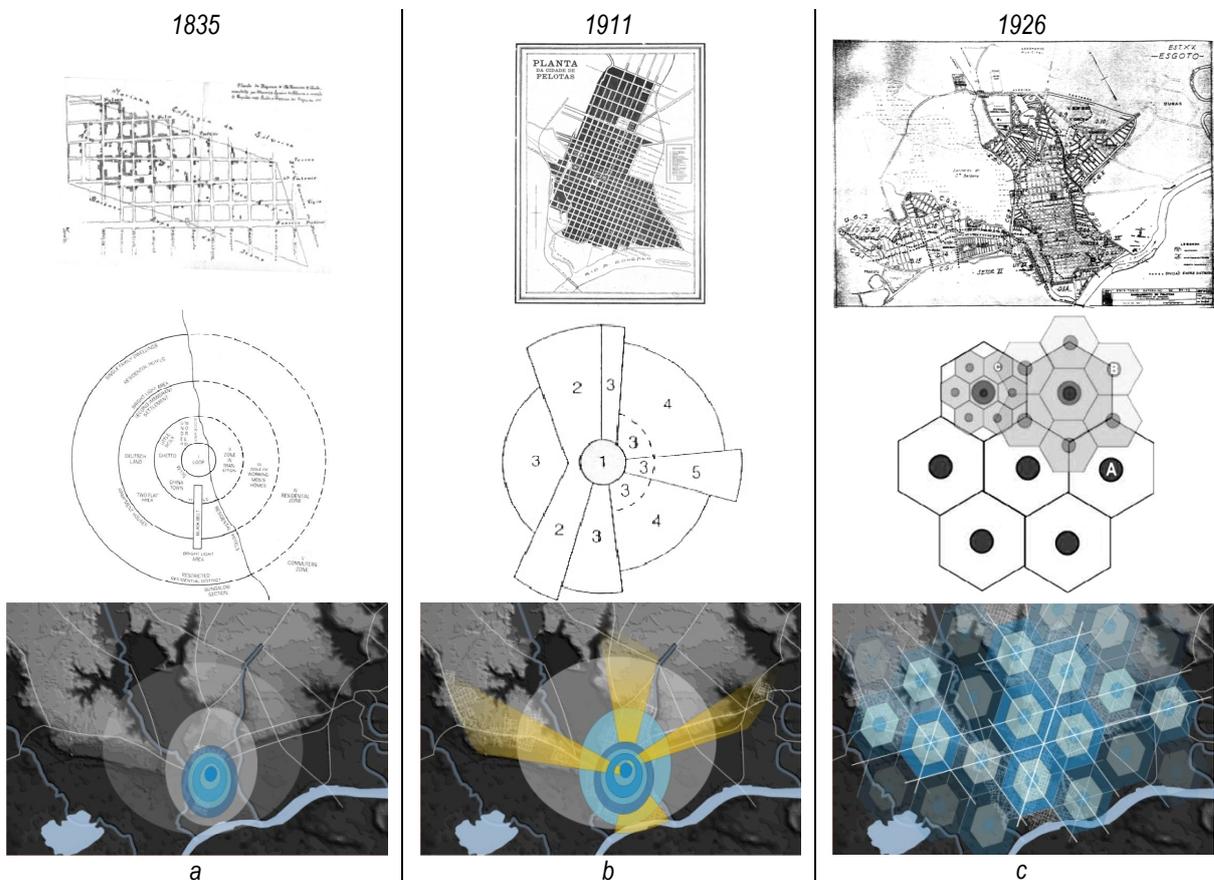


Figura 4.12. quadro demonstrativo da convergência entre a abordagem evolutiva da teoria clássica e a divisão temporal da análise empírica do crescimento para o caso Pelotas a) 1835 x concêntrico; b) 1911 x setorial; c) 1926 x multicentralidades.

De fato, a forma em que se deu o crescimento urbano da cidade converge diretamente a um processo evolutivo dos modelos concêntricos, setoriais e a teoria do lugar central, o que não só reforça a validade da releitura evolutiva da teoria urbana do século 20, mas também indica que a dinâmica de crescimento urbano ocorrida em Pelotas, qualifica o delineamento do caso proposto ao trabalho.

4.2. Simulação de crescimento urbano integrado com a paisagem definida pela hidrografia: validando mecanismo de modelagem para o caso Pelotas [1815-1965].

4.2.1. Delineamento e configuração dos estudos em Pelotas.

Na sequência, o estudo procede na aplicação e validação do mecanismo de simulação teoricamente enunciado e metodologicamente desenvolvido. Os estudos estão aplicados ao crescimento urbano ocorrido no caso de Pelotas [1815-1965], o qual está no título anterior delimitado temporalmente e descrito empiricamente. Ao procedimento de simulação que segue restam as definições indicadas a seguir e posteriormente apresentadas:

- a) delimitação da área de estudo e definição do nível de resolução espacial;
- b) construção dos atributos de *input* ao modelo de simulação;
- c) definição dos cenários de controle, das velocidades e das taxas de crescimento;
- d) procedimentos de calibragem e parametrização do modelo.

Delimitação espacial e nível de resolução.

A delimitação espacial do ambiente de simulação se deu a partir de análises dos dados levantados na descrição empírica e compilados no sistema de informações geográficas da evolução urbana da cidade de Pelotas (SIG_evolução2). A partir destes dados, foi definindo um ambiente retangular de simulação e a resolução celular, que serve tanto de base para construção dos *inputs* ao modelo, quanto para desagregação espacial dos *outputs* gráficos.

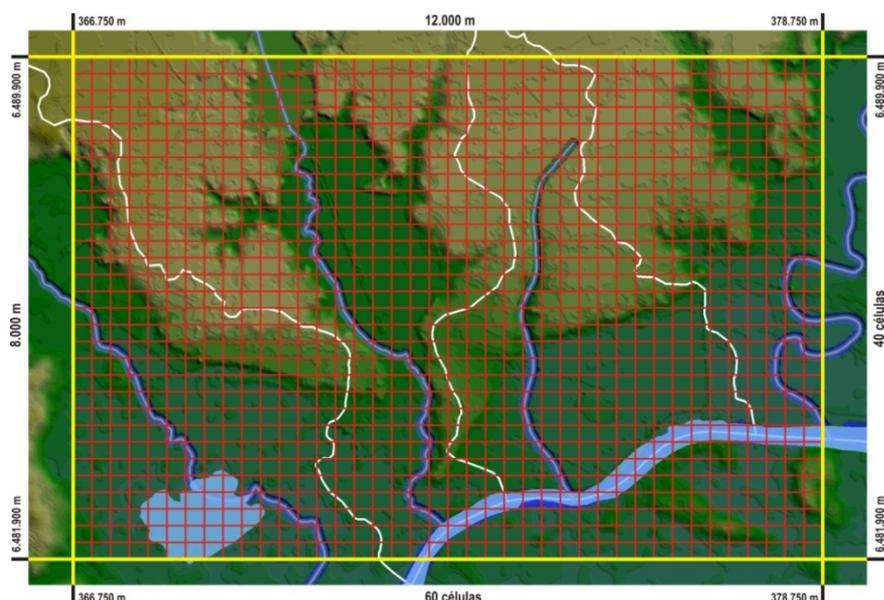


Figura 4.13: delimitação e desagregação espacial para as simulações de crescimento de Pelotas, sobre representação gráfica da paisagem de suporte ao crescimento urbano (imagens elaboradas pelo autor).

A figura 4.13, anterior, apresenta o ambiente de simulação (linhas amarelas) definido sobre a paisagem da região de Pelotas, delimitado de modo a incluir a área efetivamente urbanizada do ano de 1965 e uma área de entorno, resultando nas seguintes coordenadas geográficas em sistema UTM, para o fuso 22 sul: a) limite norte: 6.489.900; b) limite sul: 6.489.900; c) limite oeste: 666.750; d) limite leste: 378.750. A superfície é de 96 km², o que corresponde a um retângulo de 8 km na direção norte-sul, por 12 km na direção leste-oeste. O nível de desagregação espacial está definido mediante o uso de um *grid* regular (linhas vermelhas) com 40 linhas por 60 colunas que definem 2.400 células quadradas de 250m de lado. Destaca-se que o nível resolução adotado está reduzido se comparado aos trabalhos acadêmicos anteriores aplicados ao SACI; Polidori (2004) quando desenvolve o modelo para ao caso de Pelotas [1965-2000] utiliza células de 500m e Saurim (2005) ao simular crescimento urbano para Santa Maria aplica uma resolução espacial celular de 285m.

Construção de inputs

A partir da definição espacial do ambiente de simulação, em posse de dados vetoriais foram construídos *inputs* individuais ao modelo. Os *inputs* são semelhantes aos construídos para as simulações abstratas do capítulo do método, adaptados às particularidades do ambiente da cidade de Pelotas, os quais estão ilustrados na figura 4.14 a seguir e descritos na sequência:

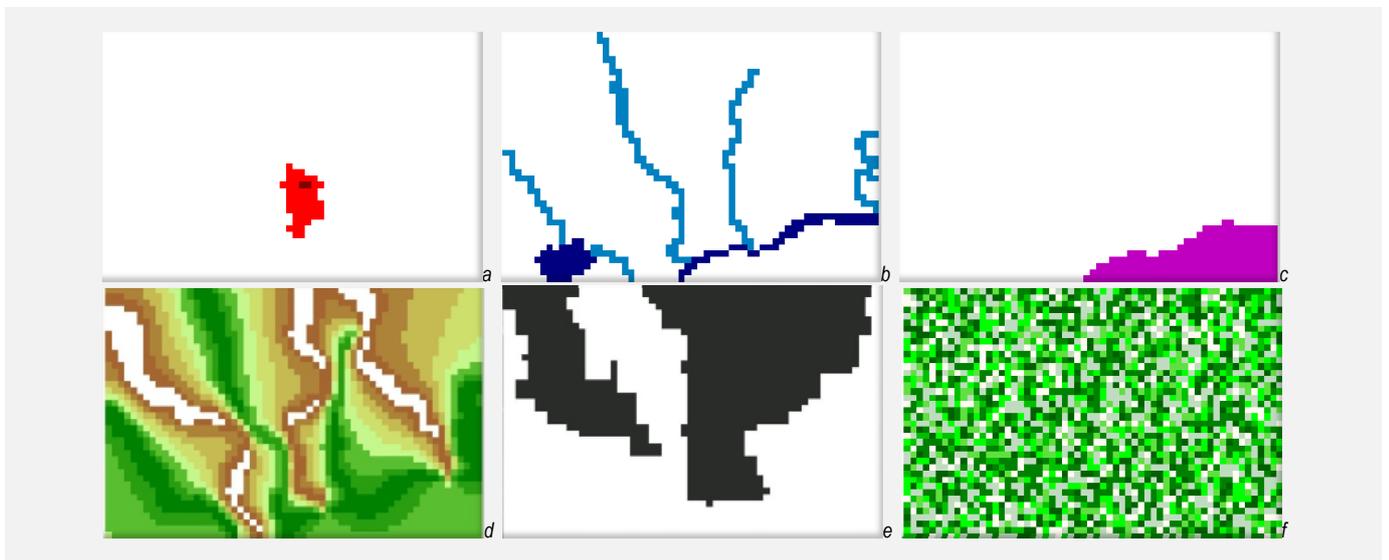


Figura 4.14: *inputs* construídos a partir do ambiente da cidade de Pelotas sobre grid retangular regular de 60x40 células: a) núcleo urbano em duas intensidades; b) recursos hídricos, lóaticas em azul claro e lânticas em azul escuro; c) área não pertencente ao município de Pelotas; d) matriz das bacias hidrográficas; e) matriz das áreas alagáveis; f) matriz randômica.

a) núcleo urbano original (atrator, *mutable*; figura 4.14a): atributo urbano carregado em dois níveis; um com duas células indicando a localização dos primeiros estoques construídos no ano de 1815 (peso 1,0), outro indicando o plano de expansão do ano de 1835 (peso 0,5).

b) recursos hídricos: águas lóticas (resistência, removível, peso 1; células em azul claro da figura 4.14b) atributo natural correspondentes às linhas de drenagem dos arroios Fragata, Santa Bárbara, Pepino e Pelotas, exercem resistência à conversão urbana, porém podem ser removidos durante o processo; águas lênticas (resistência, *freezing*, peso 1; células azul escuro da figura 4.14b) atributo natural que corresponde a lagoa do Fragata e o canal São Gonçalo, definindo células impedidas à urbanização.

c) área do município de Rio Grande: (resistência, *freezing*, peso 1; figura 4.14c) atributo institucional que impede a urbanização da área não pertencente ao município de Pelotas.

d) sub-bacias hidrográficas: (resistência, removível, peso 1; figura 4.14d): atributo ambiental, matriz de resistência natural diferenciado em cinco classes por interpolação entre as linhas de drenagem e os divisores de água, onde áreas mais próximas às linhas de drenagem ocorrem os locais de maior resistência (nível 4 em verde escuro na figura) e junto aos divisores de água os locais de menores resistências (nível 0, em branco na figura).

e) áreas alagáveis (resistência, removível, peso 1; figura 4.14e): atributo ambiental, matriz de resistência natural que diferencia de modo binário (valores 0 e 1) a tendência à inundações.

f) ambiente randômico (resistência, removível, peso 1; figura 4.14f): atributo ambiental, matriz de resistência diferenciada de forma randômica com valores entre 1 e 3; *input* indicado a todas simulações com o SACI, que ao ser mapeado de modo randômico corresponde aos atributos naturais não representados e possibilita uma desejável dose de aleatoriedade nos experimentos simulatórios.

Cenários de controle.

A partir do conjunto de dados empíricos da evolução urbana foram escolhidos estágios do crescimento urbano representativos da alternância na forma urbana de Pelotas, formando um cenário de controle dinâmico, porém simplificado por quatro estágios. Estes estágios correspondem: a) a área efetivamente urbanizada (AEU) do ano de 1835 (figura 4.14a); b) AEU do último ano que a forma urbana ainda ocorre de forma concêntrica, limitada pelos arroios Santa Bárbara e Pepino (1916, figura 4.14b); c) AEU do primeiro estágio em que a forma urbana apresenta crescimentos difusos, além dos limites dos recursos hídricos (1926, figura 4.14c); d) AEU do cenário final proposto para o estudo (1965, figura 4.14d).

Para cada estágio, definido por um ano e sua correspondente área efetivamente urbanizada (AEU), foram realizadas simulações no SACI com uma única interação e sem ocorrência de crescimentos (λ externo e interno igual a 100), obtendo um conjunto de *outputs* de controle. Destes cenários, estão abaixo apresentados o fenótipo urbano (*Celltype*), a medida de centralidade celular absoluta

(*CentABS*), centralidade normalizada do tipo 1 (*CentR1*) e centralidade normalizada do tipo 2 (*CentR2*); os quais serão posteriormente retomados para proceder às correlações numéricas das simulações.

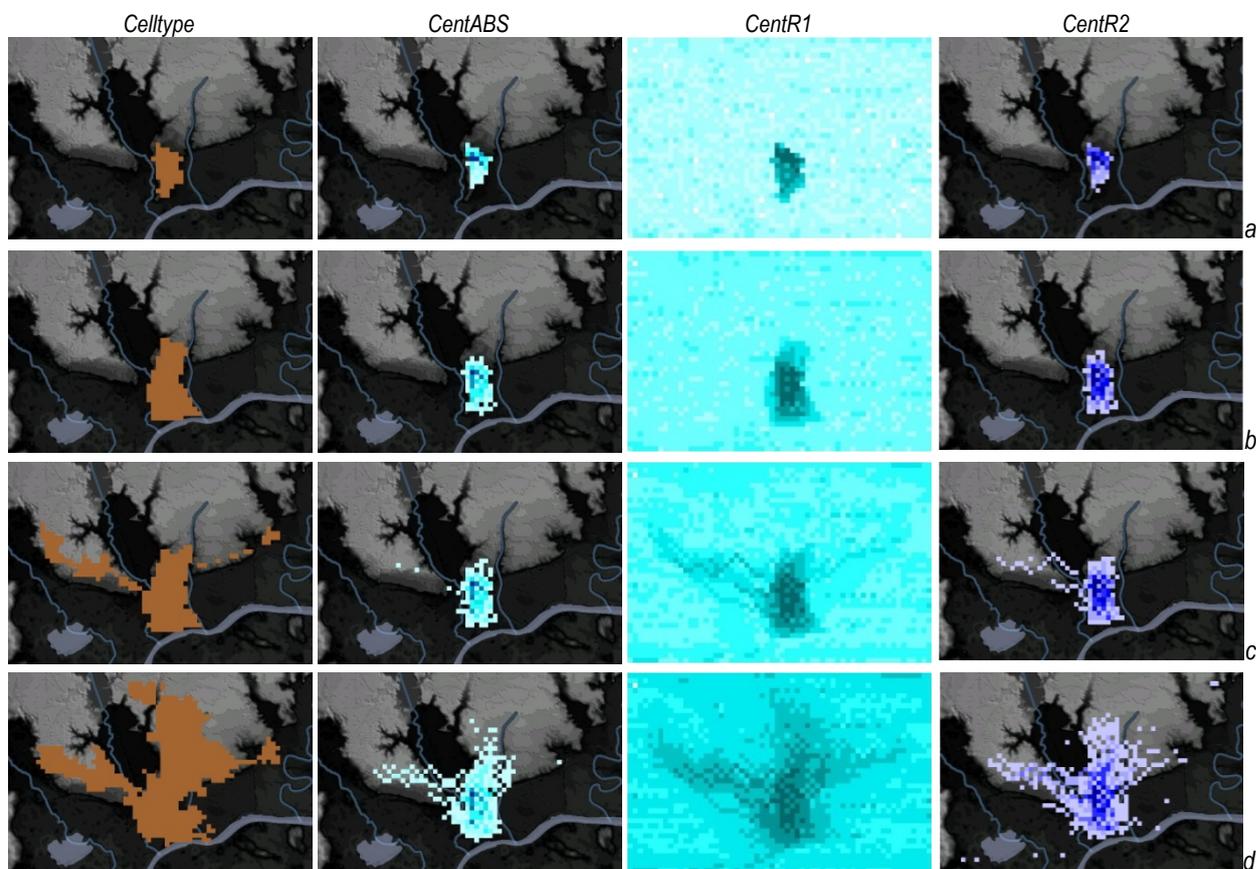


Figura 4.15: outputs de *Celltype*, *CentABS*, *CentR1* e *CentR2*; grids de controle para anos: a) 1835; b) 1916; c) 1926; d) 1965.

Velocidades crescimento.

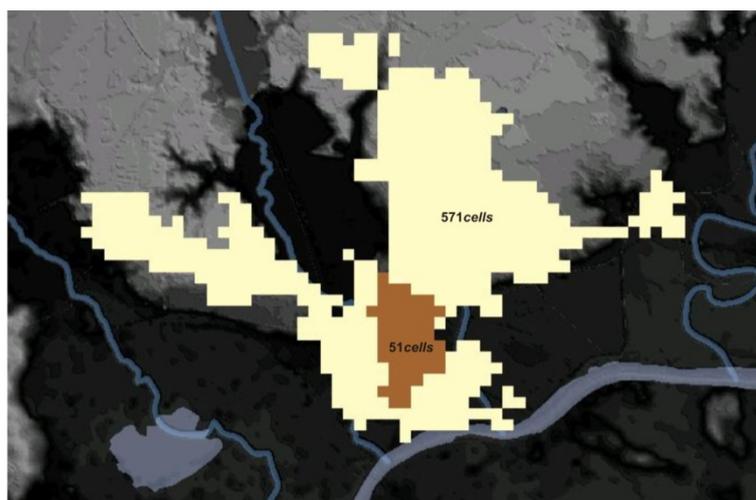


Figura 4.16: sobreposição dos cenários de controle de *Celltype* correspondentes ao ano de 1835, inicial, e 1965, final.

Definidos os cenários de controle, a partir da medida de contagem de células (*UrbanCount* no modelo) de fenótipo urbano (*Celltype*) é possível calcular também a taxa de conversão celular anual e por iteração da simulação, destinadas ao ajuste da velocidade do crescimento. Na figura 4.16 anterior, está

sobreposto o estado inicial (*Celltype* de controle para o ano de 1835) composto de 51 células urbanas, e o cenário final (*Celltype* de controle para o ano de 1965) composto por 571 células de fenótipo urbano. Estes valores aplicados no cálculo da taxa de crescimento composto correspondem a uma taxa de crescimento de 1,88% ao ano, calculada para o intervalo de 130 anos, e para os procedimentos simulatórios que estão definidos para 50 iterações, é indicada a taxa de 4,95% o crescimento celular por iteração.

4.2.2. Threshold Potential e casos com distribuições estáticas das tensões....contra exemplos.

Definido o ambiente de simulação, construídos os *inputs* e os cenários de controle, além de estabelecidas as velocidades que deve ocorrer a conversão urbana, o próximo passo do processo de modelagem urbana estaria em acertar os parâmetros que ajustam qualitativamente o crescimento. No trabalho de Polidori (2004), onde o modelo de crescimento SACI foi desenvolvido aplicando o caso Pelotas (1965-2000), o processo de calibração se deu de três modos, diferenciados pela forma dos carregamentos dos atributos urbanos de *input*. No caso 1, o *input* urbano não apresentava diferenciação interna; no caso 2 o atributo urbano era diferenciado por intensidades; e o caso 3 a área urbana inicial era carregada de modo aleatório. Para cada um destes casos o autor do modelo identifica uma forma de distribuição das tensões mais adequada.

Neste trabalho, como o *input* dos atributos urbanos está construído diferenciado em duas intensidades, ao procedimento de simulação estaria indicada a distribuição de tensões do caso 2 de Polidori (2004), com predomínio difuso, sendo 47% difuso do tipo 1; 47% difuso do tipo 2 e 2% para as demais tensões. Deste modo Polidori alcança 0,87 na média das correlações dos resultados de *Celltype*, *LoadU* e *CentR1*.

Entretanto, a calibragem indicada por Polidori (2004) para o caso 2, aplicado no procedimento de simulação aqui delineado, a forma urbana simulada ocorre excessivamente fragmentada com a ocorrência de urbanizações difusas desde o início do processo, conforme está ilustrada na figura 4.17 a iteração final do processo.

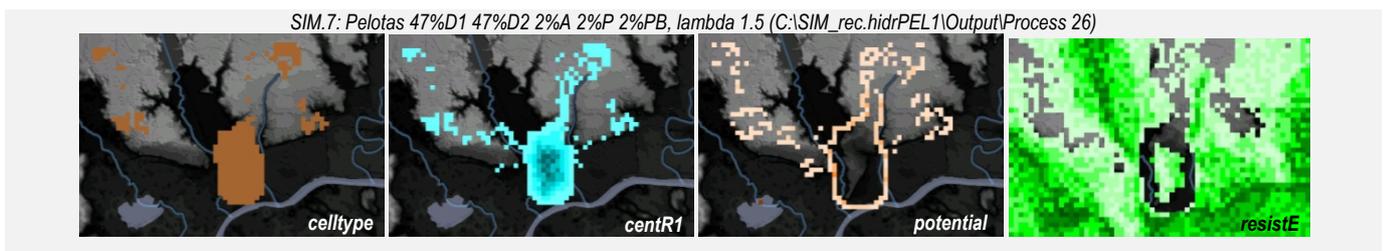


Figura 4.17: iteração final do processo com calibração indicada quando *input* urbano por intensidades, predomínio difuso.

Outra forma de distribuir tensões indicada ao delineamento proposto seria o padrão *default* do modelo, sem predomínio nenhum ou 20% para todas as formas de tensões de crescimento. Na figura 4.18 a seguir, está representada a iteração final da simulação com as tensões *ISOdistribuídas*, os resultados indicam uma forma urbana exclusivamente concêntrica, não ocorrendo a desejada fragmentação.

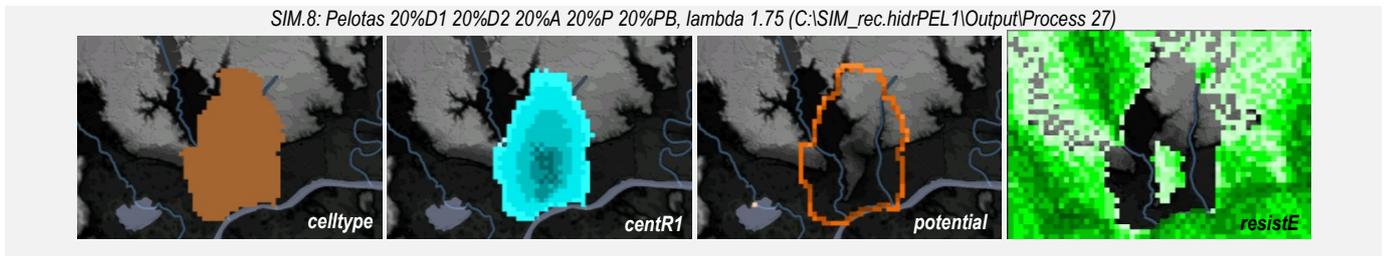


Figura 4.18: iteração final do processo com calibração default do modelo, tensões *ISOdistribuídas*.

Como o mecanismo desenvolvido procede na distribuição de tensões pelas formas axiais e difusas, outra tentativa de insucesso com parametrização estática está realizada de forma igualmente distribuída entre tensões axiais e difusas (50%axiais e 25% para cada tipo de difuso). Abaixo, na figura 4.19 estão os resultados da iteração final do procedimento que também ocorre de forma concêntrica.

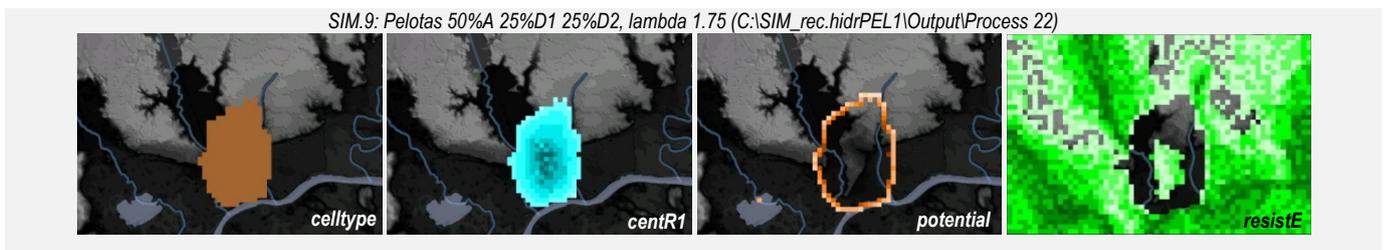


Figura 4.19: iteração final do processo com tensões axiais e difusas iguais.

Enfim, processos realizados com a regra *Threshold Potential* (*default* do modelo) e a parametrização das tensões de forma estática – tanto o indicado por Polidori (2004) para o caso 2 (figura 4.17); o padrão *default* do SACI (figura 4.18) e a distribuição igual entre axiais e difusas (figura 4.19); em nenhum destes casos é possível alcançar resultados satisfatórios para o caso Pelotas [1815-1965]. Nos procedimentos apresentados, como era de se esperar, o que se tem é o crescimento urbano obedecendo a uma única lógica de crescimento, replicando uma única morfologia urbana e nenhum dos casos capaz de capturar alternâncias na forma em que ocorre o crescimento urbano. Como vem sendo afirmado ao longo do trabalho, na dinâmica de crescimento de longo prazo (150 anos) torna-se ainda mais evidente que o crescimento urbano não obedece a uma única lógica de crescimento, está indicado que a descontinuidade espacial e a alternância na forma da cidade podem ser capturadas pelas relações entre a morfologia urbana e as irregularidades impostas do plano de suporte do ambiente natural, construído o aplicativo que captura a ocorrência de efeitos de bordas sobre os recursos hídricos e procede a auto-parametrização da distribuição de tensões, axiais e difusas.

4.2.3. Simulação de crescimento urbano com o mecanismo de modelagem desenvolvido.

A definição inicial para simular crescimento urbano de modo sensível a ocorrência de efeito de borda sobre os recursos hídricos é a construção de um novo tipo de atributo, com comportamento discreto no processo de simulação de crescimento, que corresponde a área adjacente às linhas de drenagem. Este atributo opera como uma espécie de “máscara” que captura os potenciais de crescimento incidentes e define numericamente o “fator rh”. Como indicado no método, a delimitação dos *buffers* das linhas de drenagem deve corresponder às características do ambiente de simulação, associado às condições da topografia, da geomorfologia, existência de matas ciliares, pluviometria do local, dentre outros fatores que configuram a áreas de fragilidade ambiental adjacentes às linhas de drenagem. No procedimento a seguir, a delimitação está baseada em conhecimentos empíricos do ambiente da cidade de Pelotas, definido um raio de 250m a partir da linha de drenagem dos recursos hídricos. Os *buffers* obtidos em formato vetorial (áreas transparência em vermelho, na figura 4.20 a seguir) foram convertidos a um *input* celular discreto, com a mesma resolução e delimitação dos demais *inputs* (células amarelas da figura 4.20 a seguir).

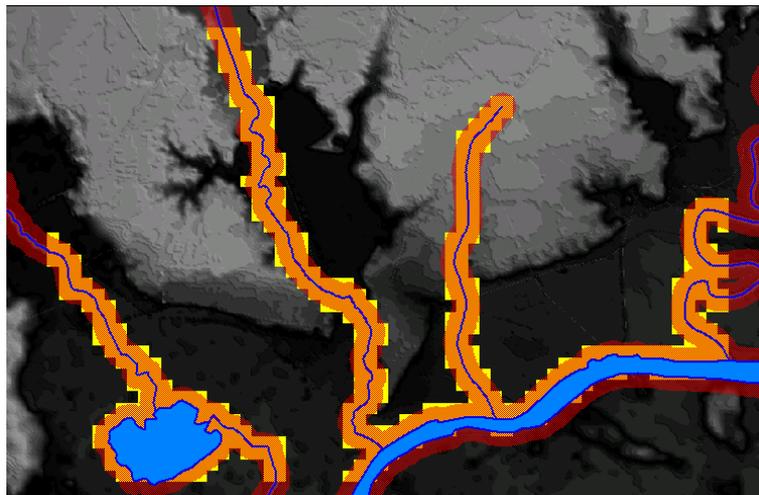


Figura 4.20: construção do atributo discreto do buffer dos recursos hídricos; linhas de drenagem em azul, águas lânticas em azul claro; buffer com raio de 250 metros em transparência vermelha e atributo discreto em pixels amarelos.

No SACI, a calibragem quantitativa das simulações e o ajuste da velocidade de crescimento ocorrem mediante o ajuste dos parâmetros lambda externo (λ_{ext}) e lambda interno (λ_{int}). No mecanismo desenvolvido, o lambda externo é definido com valores diferenciados para as distribuições axiais (λ_A) e difusas (λ_D), o qual é composto iterativamente proporcional à distribuição de tensões capturadas pelo “fator rh”. No procedimento a seguir, os lambdas externos axiais e difusos serão aplicados os valores propostos como *default*, $\lambda_A = 2.5$ e $\lambda_D = 1.0$. O lambda interno está definido igual a 100, valor tão alto que desconsidera crescimentos intraurbanos.

Parâmetros de segunda ordem que também estão implementados no mecanismo, indicados no capítulo do método, porém aqui não serão aplicados. O parâmetro morfológico “p” facilita ou dificulta a distribuição de tensões do modo difuso, incide exponencial ao “fator rh” e se igual a 1 não tem influência no procedimento. Outro, trata por diferenciar o perfil social dos agentes de produção espacial difusa (fator X), se valor igual a 1 a distribuição difusa do tipo 1 é igual a distribuição difusa do tipo 2.

Em suma, a parametrização do procedimento aplicando o mecanismo de simulação desenvolvido está definida pelas seguintes condições:

- a) 100% das tensões são auto-parametrizadas iterativamente pelo mecanismo;
- b) λ externos axiais e difusos *default*, $\lambda_A = 2.5$ e $\lambda_D = 1.0$;
- c) λ interno igual a 100, sem a simulação de crescimento interno;
- d) *buffer* dos recursos hídricos com raio de 250m, correspondente a distância de uma célula;
- e) parâmetros de segunda ordem do mecanismo estão inativos, “p” e “X” com valores iguais a um;
- f) parâmetros de segunda ordem do SACI estão inativos, valores *default do modelo*;

Na figura 4.21 a seguir estão apresentados *outputs* gráficos de fenótipo urbano, centralidade celular do tipo 1, potenciais de crescimento e resistências naturais (*Celltype*, *CentR1*, *Potential* e *ResistE*, respectivamente), representadas 8 de um total de 50 iterações (iterações 1, 8, 15, 22, 29, 36, 43 e 50).

C:\SIM_rec.hidrPEL1\Output\Process 21 – mecanismo ativo, $\lambda A = 2.5$ $\lambda D = 1.0$, $p0.9$

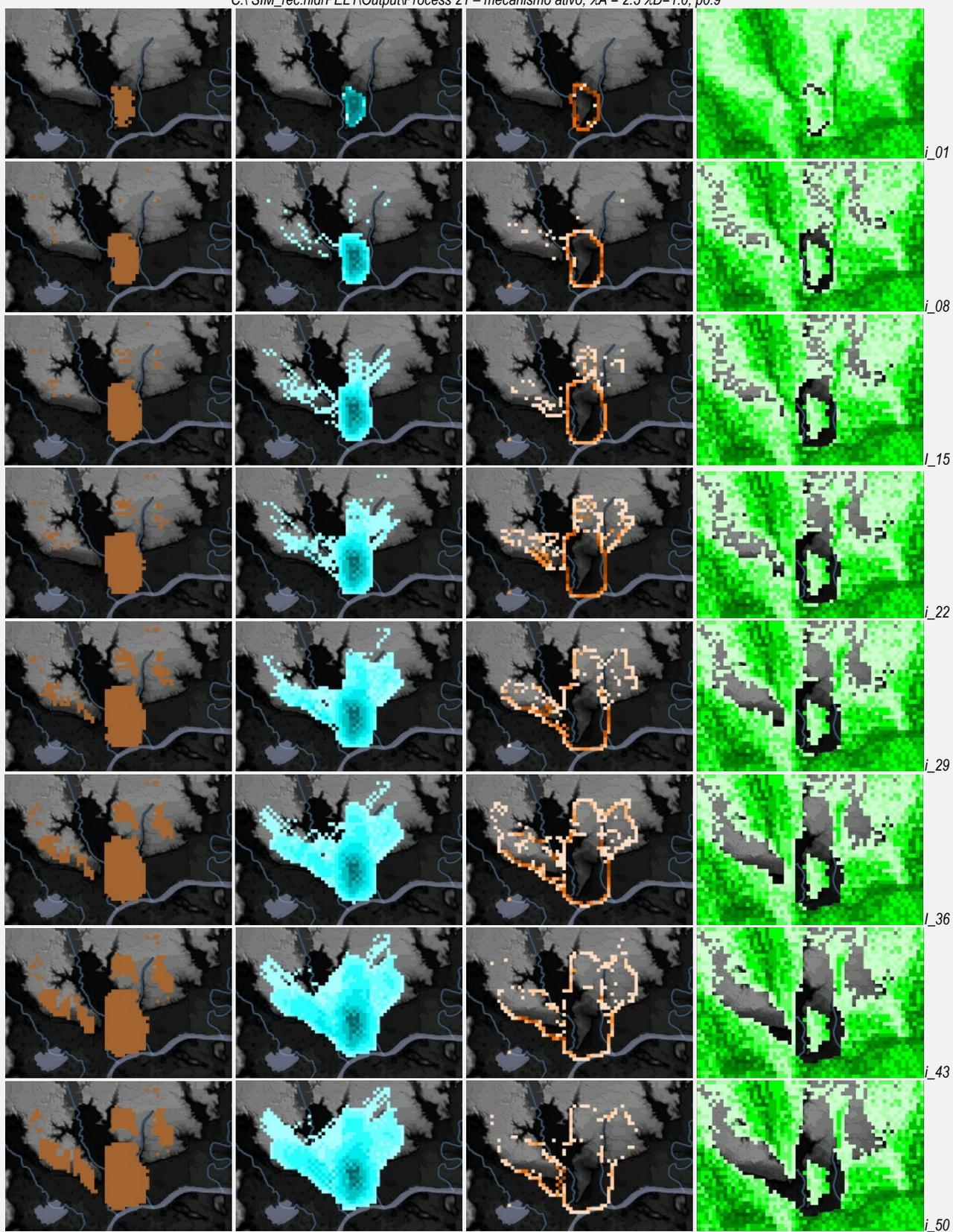


Figura 4.21: outputs da simulação com mecanismo ativo mostrando 8 estados de 50 iterações:
a) Celltype; b) CentrR1; c) Potential; d) ResistE.

Os resultados gráficos indicam semelhanças entre os resultados da simulação, a dinâmica do crescimento enunciada teoricamente, o crescimento real do caso empírico de Pelotas e os resultados capturados no ambiente de simulação abstrato no capítulo do método. A alternância morfológica está capturada pelo “fator rh”, que corresponde numericamente ao efeito de borda sobre os recursos hídricos, ou mais especificamente, o valor percentual do potencial de crescimento que incide sobre o atributo discreto do *buffer* dos recursos hídricos. A seguir, o gráfico “a” da figura 4.22, apresenta a evolução numérica dos valores percentuais do “fator rh” (linha preta) e a distribuição dinâmica das tensões axiais (área vermelha) e difusas (área azul). O gráfico “b” apresenta a composição iterativa do lambda externo (linha laranja contínua) e a linha de tendência com valores próximos a 1,70, obtida por transformação logarítma (linha pontilhada).

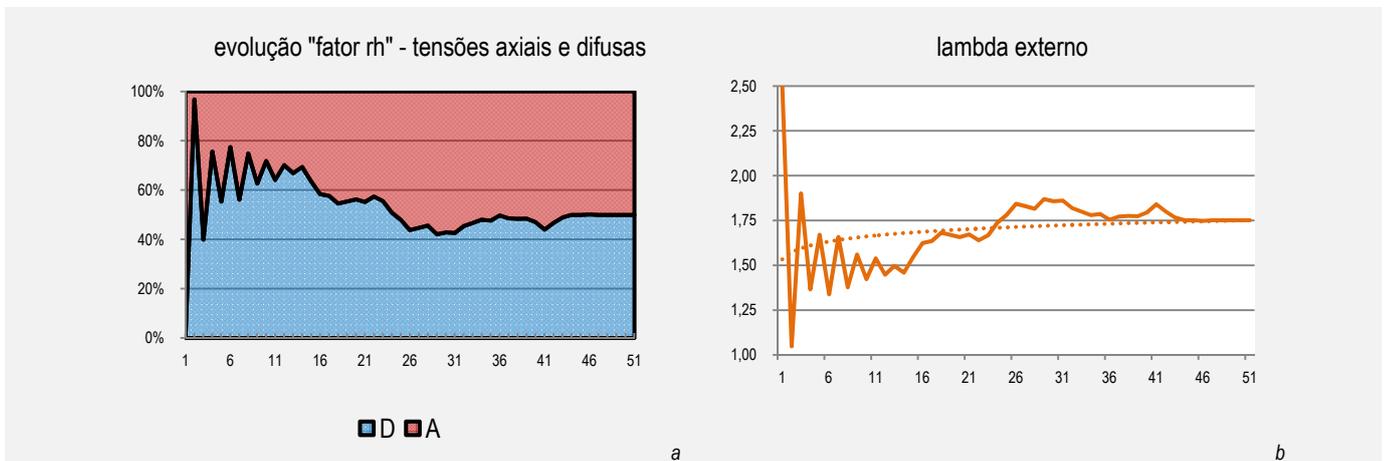


Figura 4.22: gráficos da evolução dos parâmetros do mecanismo, capturados pelo “fator rh”: a) distribuição das tensões axiais (vermelho) e difusas (azul); b) lambda externo (laranja).

O “fator rh”, que é fundamentalmente um resultado numérico, também permite um novo *output* gráfico ao modelo. A figura 4.23 apresenta os resultados gráficos do “fator rh” para as mesmas oito iterações que anteriormente foram apresentados os *outputs* originais do SACI, representando no ambiente celular a área de influência adjacente aos recursos hídricos (azul claro) e a ocorrência de efeitos de borda (paleta cores vermelha) a cada iteração.

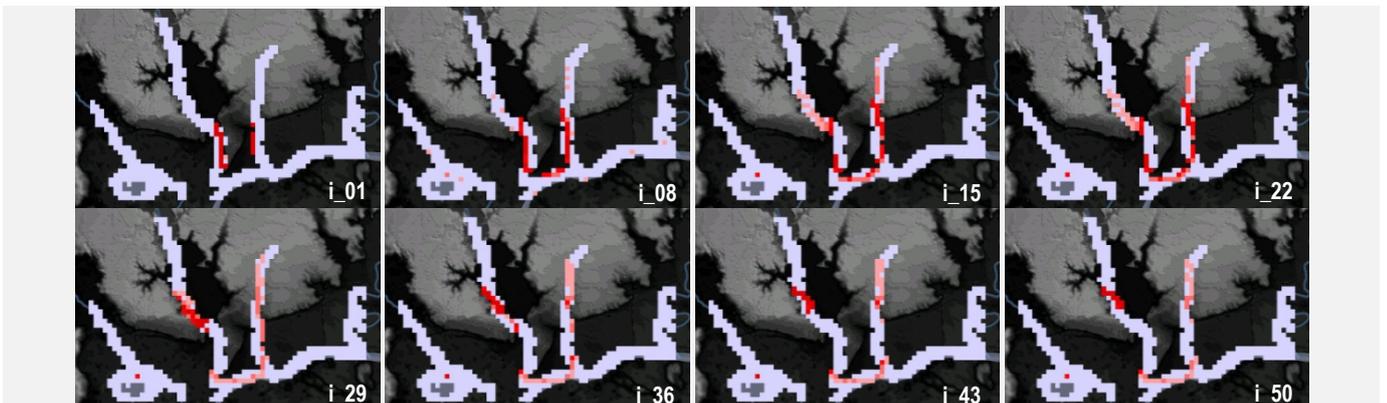


Figura 4.23: *outputs* gráficos do “fator rh”, mostrando 8 estados de 50 iterações.

4.2.4. Correlações numéricas, dinâmicas.

Realizado o procedimento de simulação que captura alternâncias na forma do crescimento urbano, alcançando semelhanças visuais com a realidade da evolução urbana da cidade de Pelotas [1815-1965], o encaminhamento do processo de modelagem urbana está na correlação dos resultados numéricos e a efetiva validação do mecanismo desenvolvido. As correlações do procedimento simulado ocorrem a seguir, a partir de dois modos distintos. Inicialmente estão comparadas a evolução linear dos gráficos construídos a partir de resultados tabulares do SACI, possibilitando um *approach* qualitativo e dinâmico do processo de validação. Posteriormente ocorrem as correlações lineares dos dados numéricos dos *grids*, associando quantitativamente os resultados simulados e os cenários de controle construídos.

Correlação a partir de linhas de tendência evolutiva.

A partir dos resultados de segunda ordem do SACI, dados tabulares representados em gráficos lineares, podem ser feitas comparações entre as dinâmicas evolutivas de cada processo. Na figura 4.24, estão representadas as medidas de contagem de células (*urbancount*) e compacidade relativa (*CompREL*), as quais permitem a comparação entre as dinâmicas simulada pelo mecanismo de auto-parametrização desenvolvido (“fator rh” em laranja nos gráficos da figura 4.24) e os cenários de controle construídos no título anterior (“controle” em azul nos gráficos da figura 4.24). Neste caso, os dados também estão comparados com uma das tentativas de simulação com distribuição das tensões estáticas (50%axial e 50% difuso), antes apresentado no título 4.4.2 (“contra-exemplo” em cinza nos gráficos da figura 4.24).

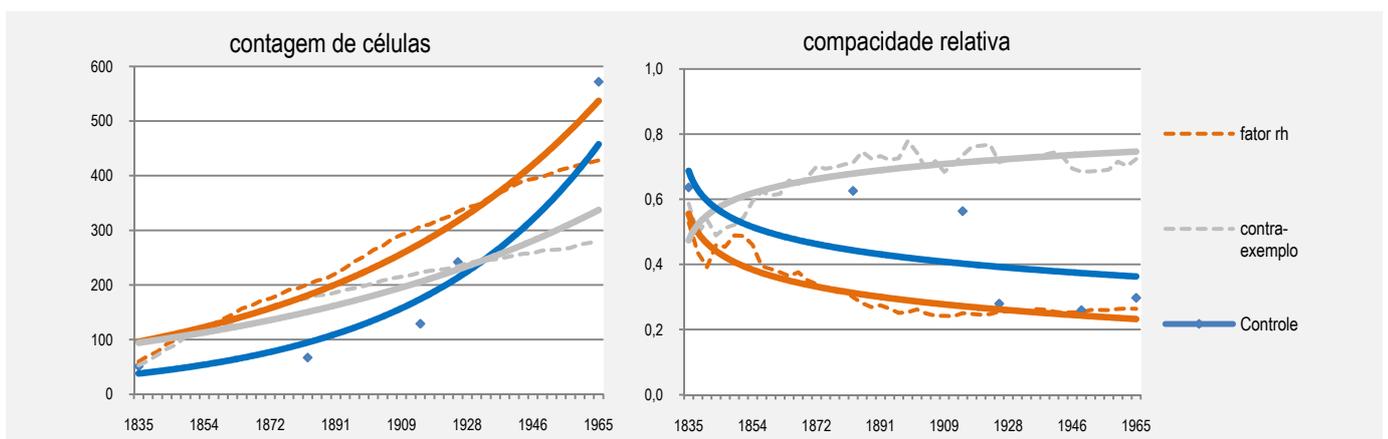


Figura 4.24: gráficos comparativos das curvas com resultados tabulares de contagem de células e compacidade relativa.

O gráfico de contagem de células (lado esquerdo) representa em linhas contínuas a transformação exponencial dos dados originais (tracejados ou pontos), onde é possível identificar uma semelhança nas curvas dos processos com o “fator rh” (laranja) e o cenário de “controle” (azul), principalmente se

comparada com a curva do “contra-exemplo” (cinza). O procedimento simulado pelo “fator rh” (laranja) tende a intensificar a conversão urbana ao final do processo, semelhante ao que ocorre com os dados de controle, o que pode ser verificado pela verticalização na linha de tendência ao final do processo. Já o “contra-exemplo”, concêntrico, a taxa de conversão urbana é constante (mesma inclinação durante o processo). Esta diferença ocorre pelo fato do mecanismo de simulação com o “fator rh” transferir os potenciais de crescimento que incidem em efeito de borda de modo difuso na paisagem, promovendo a conversão urbana em locais de menor resistência natural e permitindo a continuidade no processo de produção espacial do fenômeno urbano. Assim, resultados da simulação mantêm semelhanças com a hipótese do crescimento urbano que ocorre na realidade teórica.

Com mais evidências está a comparação das medidas morfológicas de compactidade relativa (*CompREL*) representadas em linhas de tendência contínuas por transformação logarítma. A medida de compactidade, conforme está no capítulo do método, relaciona a área urbana (contagem de células) com o perímetro (células de borda), normalizando o resultado pela mesma medida de um círculo com a mesma área. Tanto o crescimento urbano do procedimento simulado com o “fator rh”, quanto o cenário de “controle”, ambos indicam uma dinâmica com tendência a descompactação, ou fragmentação da forma urbana. Por outro lado, o “contra-exemplo” que já havia sido demonstrado de forma gráfica na figura 4.18 ocorrendo exclusivamente concêntrico, como esperado, a curva indica tendência ao aumento da compactação ao longo do processo.

Em suma, a partir das análises dos dados de segunda ordem do SACI, o que se têm indicado é uma aproximação, quantitativa e qualitativa, da dinâmica simulada e a realidade empírica. Para validação do mecanismo, o trabalho prossegue a correlação dos dados aprofundando estas duas formas de abordagem. A seguir estão uma seqüência de correlações numéricas e no título 4.2.5 que segue, estão indicadas semelhanças visuais entre os *grids* simulados e a evolução urbana empírica.

Correlação numérica.

Para proceder às correlações numéricas dos resultados dos *grids* de *output*, a associação entre os cenários de controle e as iterações simuladas ocorre através do número de células urbanas (*urbancnt*). Ou seja, a partir do número de células de *Celltype* de cada um dos cenários de controle (apresentados na figura 4.14), está indicada uma iteração com número de células urbanas semelhante e assim procede às demais correlações. Deste modo, a correlação para o ano de 1835 ocorre com a iteração 01; para o cenário de 1916 com a iteração 09; para 1926 a iteração 38 e o ano de 1965 é correlacionado com a iteração 50. A tabela 4.1 a seguir apresenta os valores da contagem de células efetivamente urbanas (*urbancnt*) e a contagem de células de borda (*bordercnt*) para cada par correlato (ano - iteração).

		1815		1916		1926		1965	
<i>urbancnt</i>	<i>bordercnt</i>	51	34	129	59	342	149	572	132
		<i>i_01</i>		<i>i_09</i>		<i>i_38</i>		<i>i_50</i>	
<i>urbancnt</i>	<i>bordercnt</i>	60	49	129	61	356	188	428	217

Tabela 4.1: números correlatos que definem a iteração relacionada a cada um dos estágios do cenário de controle.

As figuras apresentadas a seguir representam a dinâmica de mudança das correlações a partir dos grids de centralidade absoluta (figura 4.25), centralidade do tipo 1 (figura 4.26), centralidade do tipo 2 (figura 4.27) e fenótipo urbano (figura 4.28).

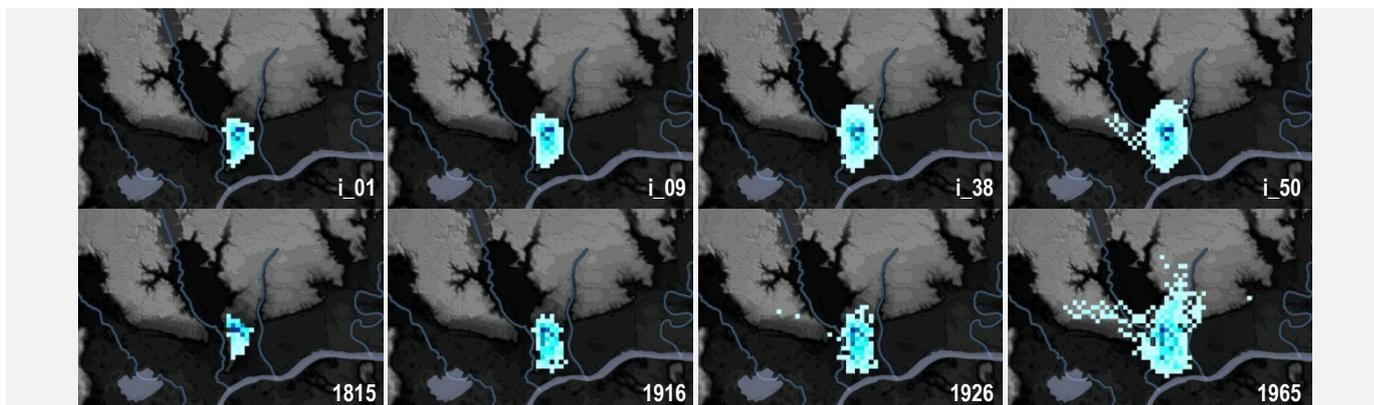


Figura 4.25: correlações dinâmicas do output de centralidade absoluta.

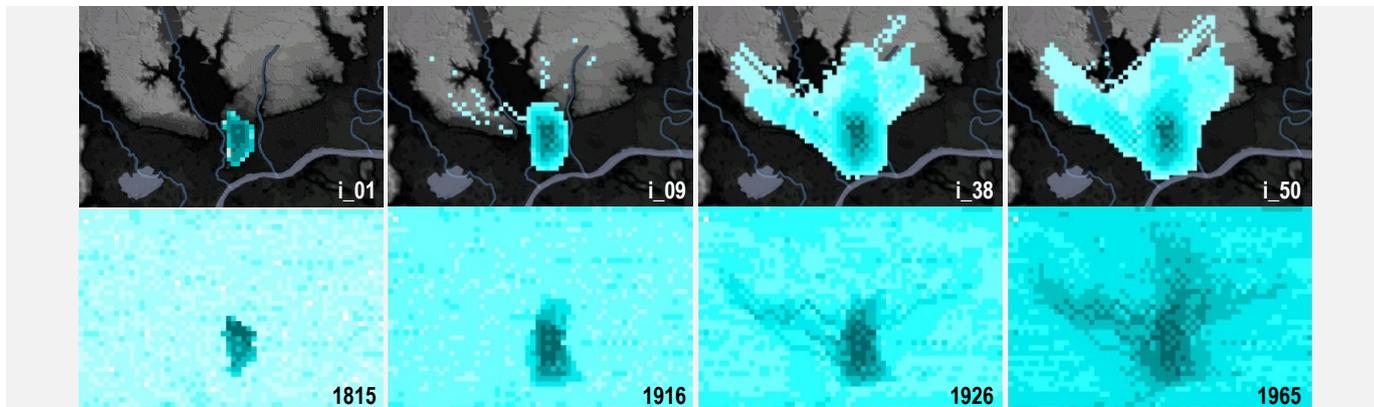


Figura 4.26: correlações dinâmicas do output de centralidade do tipo 1.

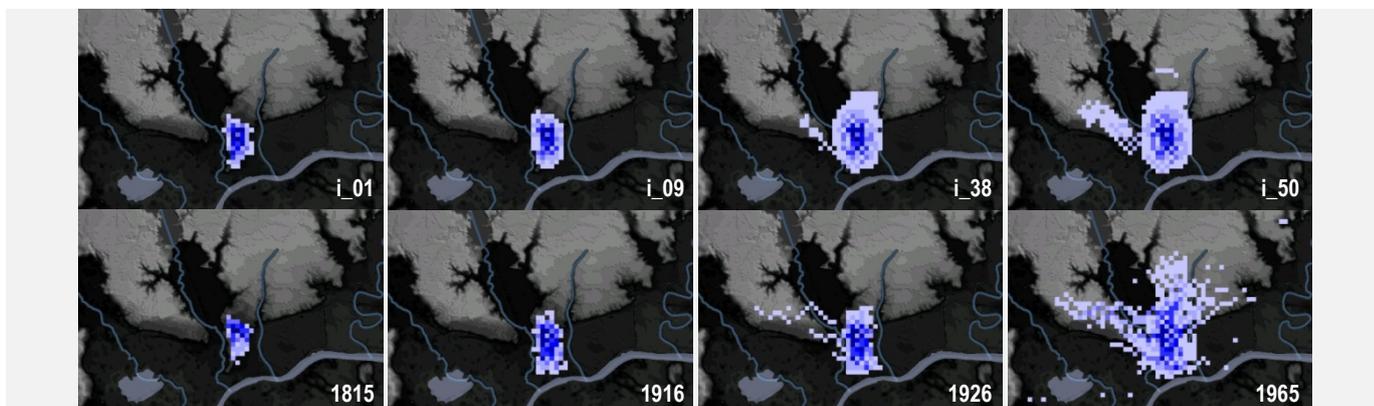


Figura 4.27: correlações dinâmicas do output de centralidade do tipo 2.

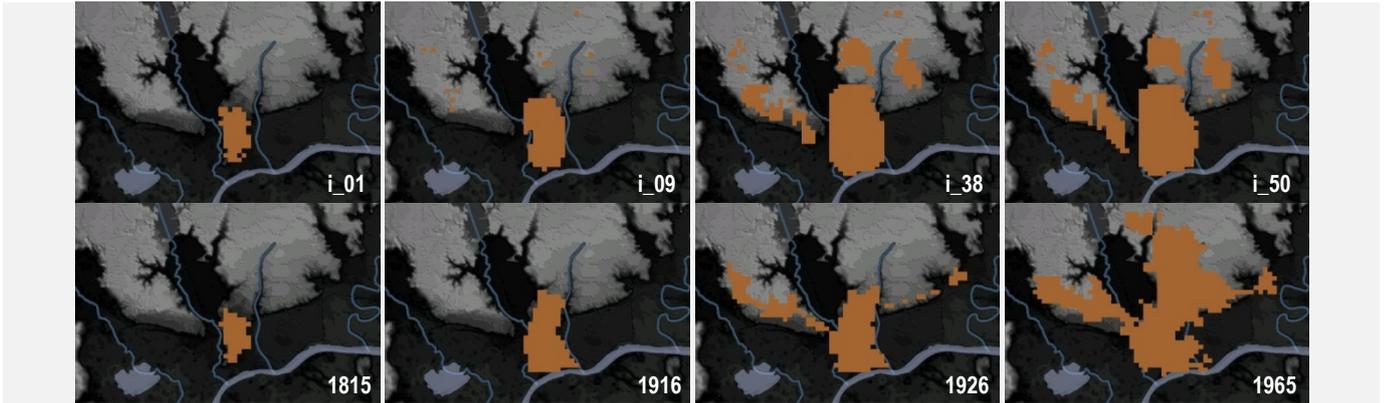


Figura 4.28: correlações dinâmicas do output de fenótipo urbano.

Além das correlações gráficas, visuais, os *grids* que contêm dados numéricos podem ser comparados a partir do cálculo da correlação linear (R^2) e a construção de diagramas de dispersão (*scatter diagrams*). No gráfico da figura 4.29 a seguir, estão plotados os pontos de dispersão dos dados numéricos de centralidade do tipo 1, para os quatro cenários de controle sobrepostos em escala de cores azul. Em diagramas de dispersão (*scatter diagrams*), a proximidade entre os pontos e a linha de tendência indicam os melhores resultados, sendo 0,79 a média dos resultados de correlação da centralidade do tipo 1, o que pode ser considerado um valor significativo.

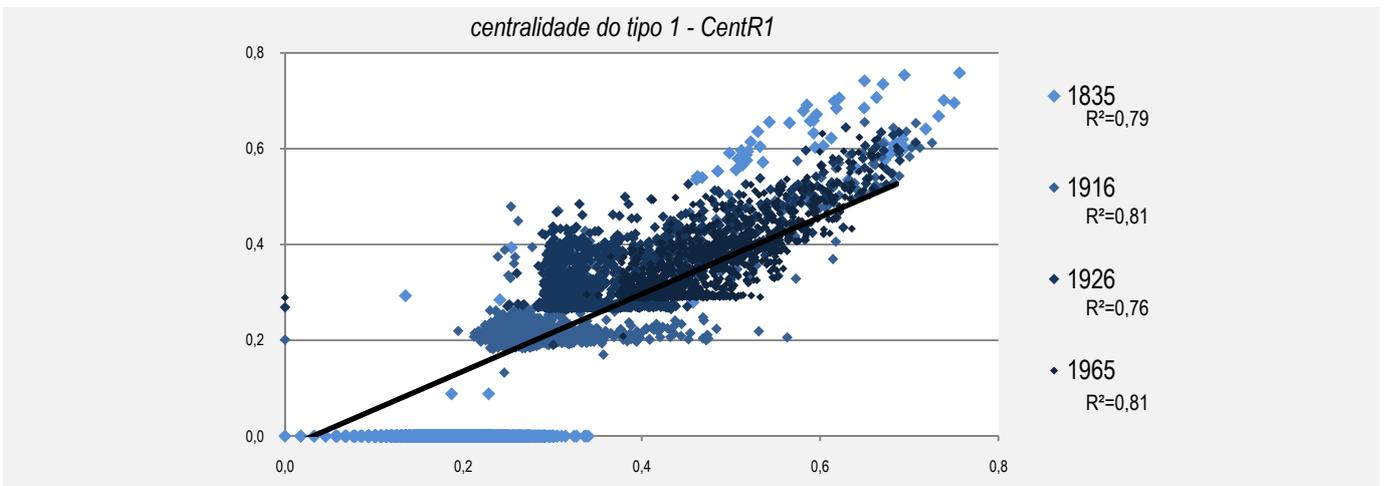


Figura 4.29: gráfico de dispersão de centralidade celular do tipo 1, sobrepostos os cenários de 1835, 1916, 1926 e 1965.

A tabela 4.2 a seguir apresenta os demais resultados das correlações numéricas para os *outputs* de centralidade absoluta (*CentABS*), centralidade do tipo 1 (*CentR1*), centralidade do tipo 2 (*CentR2*) e área efetivamente urbana (*Celltype*); para os quatro estágios determinados, possibilitando um entendimento dinâmico e comparado dos resultados. Na tabela 4.2, para cada ano estão destacados em azul os valores máximos e em vermelho os mínimos, além de indicado um cenário formado com os valores médios e outro com valores máximos (destacados em negrito nas 2 últimas linhas). Nota-se que a maioria dos valores máximos ocorrem na medida de centralidade absoluta (*CentABS*, média 0,85) e os resultados inferiores ocorrem para a fenótipo urbano (*Celltype*, média 0,66).

R^2	1835 x i_01	1916 x i_09	1926 x i_38	1965 x i_50	Média
CentABS	0,81	0,90	0,87	0,82	0,85
CentR1	0,79	0,81	0,76	0,81	0,79
CentR2	0,86	0,90	0,84	0,80	0,85
Celltype	0,90	0,53	0,52	0,48	0,66
médio	0,84	0,78	0,75	0,73	0,79
máximo	0,90	0,90	0,87	0,82	0,85

Tabela 4.2: valores numéricos da correlação entre os resultados simulados e os cenários de controle.

Os dados tabulados foram representados em gráficos lineares que permitem demonstrar a evolução das correlações numéricas para cada um dos *outputs* (centralidades em variações de azul e fenótipo urbano em vermelho). O gráfico da figura 4.30 indica melhores resultados para as medidas de centralidade, que além de ocorrerem com valores superiores (médias, 0,85; 0,79; 0,85), a relativa horizontalidade das linhas indicam uma tendência a ocorrerem constantes ao longo do tempo. Isto é, no decorrer do processo de simulação, (quanto maior o horizonte simulado, menor o controle sobre os dados), as correlações nas medidas de centralidade estão praticamente mantidas.

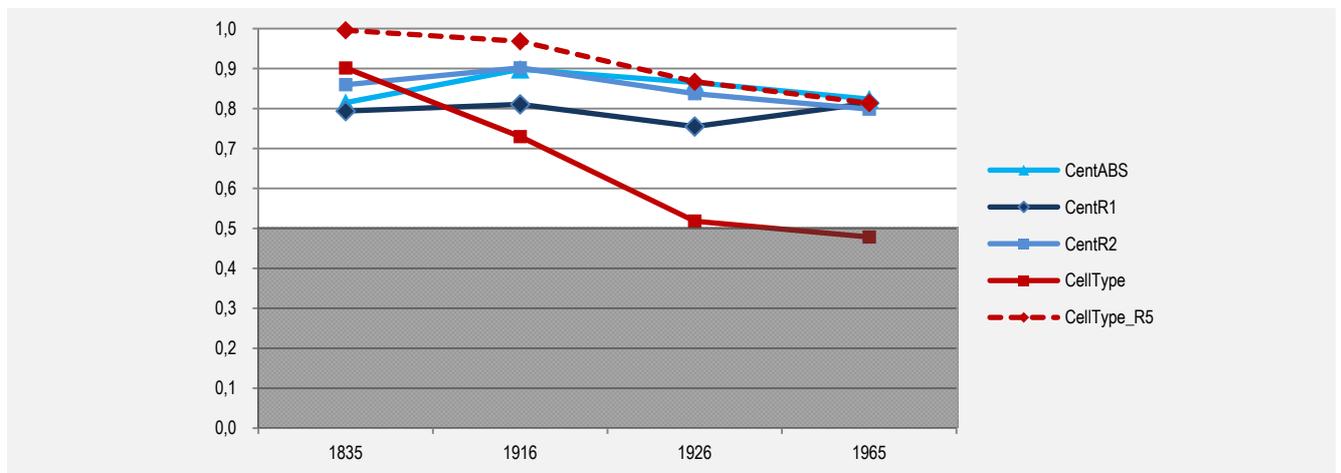


Figura 4.30: gráfico linear representando as variações das correlações numéricas no decorrer da simulação.

A natureza booleana dos dados de fenótipo urbano, reduzindo uma célula ao fato de ser ou não ser urbana (1 ou 0), dificulta a medida dos dados de *Celltype*. Uma forma de melhoria nas correlações do fenótipo urbano pode ser alcançada a partir de procedimentos de geoprocessamento de análises espaciais por raios de vizinhança (*neighborhood statistics*), os quais transformam a natureza dos dados booleanos. Os resultados de *Celltype* foram transformados por valores médios da análise de vizinhança com raio de 5 células, configurando uma interface entre o urbano e o não urbano em diferentes intensidades, conforme estão ilustrados na figura 4.31 em escala de cores do vermelho (mais urbano) ao amarelo (menos urbano).

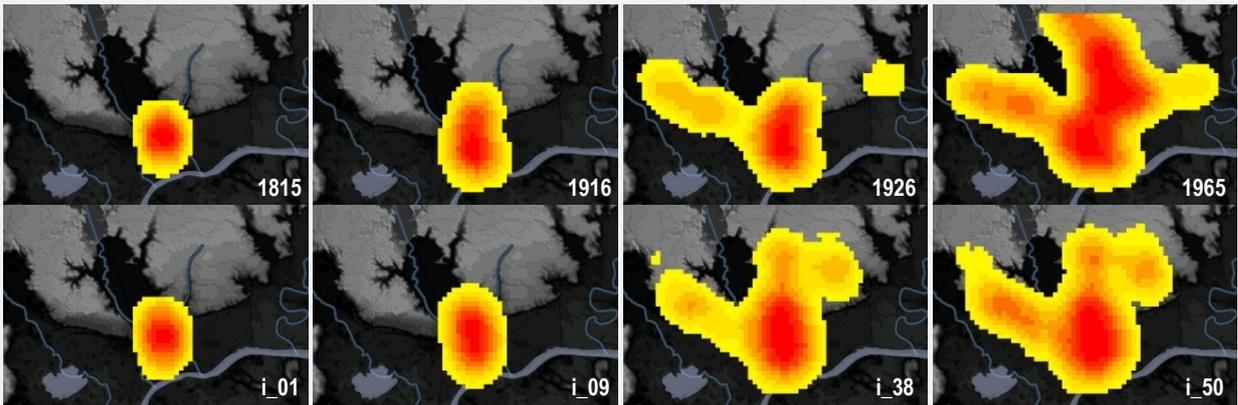


Figura 4.31: transformação dos resultados de fenótipo urbano (*Celltype*) a partir de análises de vizinhança de raio 5 células.

Os *grids* de área efetivamente urbanizada transformada por raio de 5 células permitem melhores semelhanças visuais (figura 4.30), o aumento nos valores de correlação (1,00; 0,97; 0,87 e 0,81 para cada cenário e valor médio 0,91) e diminuição das variações ao longo da evolução do procedimento, dada a horizontalidade da linha vermelha tracejada no gráfico da figura 4.29, na página anterior.

4.2.5. Semelhanças locais, visuais.

Além da validação do procedimento de simulação para o caso Pelotas [1815-1965] através de correlações numéricas, estão indicadas semelhanças visuais, estáticas, entre a realidade empírica e os resultados simulados. Deste modo, estão evidenciadas semelhanças locais que ocorrem internas e externas à cidade, tanto nos cenários simulados, quanto na realidade empírica. Estas semelhanças estão destacadas por desenhos que são repetidos nos mapas urbanos e nos *grids* simulados, mantidas as mesmas posições relativas. De modo a contribuir com as relações visuais, também estão resgatadas algumas referências da historiografia urbana que descrevem o território urbano de Pelotas.

Os destaques apresentados a seguir estão divididos em três títulos, que repetem a periodização da evolução urbana de Pelotas proposta no título 4.1, cada uma com intervalo de 50 anos (1815-1865; 1865-1915; 1915-1965), procurando evidenciar as relações entre a alternância da forma urbana e a paisagem natural. De modo geral, estão representadas por linhas contínuas na cor laranja evidências nas frentes de expansão externas e locais de interface entre o urbano e o não urbano. Linhas pontilhadas em vermelho indicam semelhanças entre a realidade e a simulação pelas configurações intraurbanas, apontando vetores de crescimento, indicando vazios urbanos ou espaços de resistência do ambiente natural internos à cidade.

Núcleo urbano central: de concêntrico a setorial. [1815 – 1865]

A primeira semelhança visual que pode ser indicada ocorre no período que a cidade apresenta crescimento com predomínio concêntrico, destacadas a planta urbana do ano de 1835 (figura 4.32a), no *grid* de centralidade absoluta da iteração 4 (figura 4.32b) e na adaptação do modelo concêntrico ligeiramente alongado (figura 4.32c).

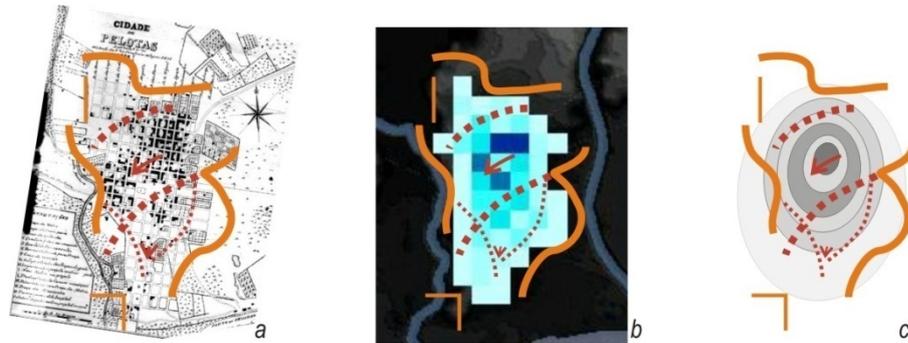


Figura 4.32: semelhanças visuais na forma urbana de 1835 (a), CentrABS it_04 (b) e adaptação do modelo concêntrico (c) (imagens elaboradas pelo autor).

As semelhanças na forma externa à cidade são evidentes, configurando frentes de expansão caracterizadas por locais de poucos estoques construídos (no mapa) e células de baixa centralidade (no *grid*). A configuração intraurbana assemelha-se pela maior concentração de estoques e centralidades junto ao núcleo original, que também aparecem com menores intensidades no sentido sudoeste, em direção ao local onde a topografia configurava margens mais definidas ao arroio Santa Bárbara (partindo do núcleo original na direção noroeste, o Santa Bárbara conformava uma área de banhados e dificuldades no acesso ao curso d'água). Uma frente de expansão intraurbana secundária também pode ser identificada no sentido ao sul (pela atual rua Felix da Cunha), apontando para a configuração da forma urbana concêntrica e alongada no sentido norte-sul.

Além das semelhanças visuais, estes destaques convergem com relatos da historiografia urbana sobre a localização e a diferenciação interna existente na cidade de Pelotas:

“localizada na lomba não alagadiça até a caída para o Santa Bárbara” em um “terreno ligeiramente levantado para se pudesse esgotar e assear as ruas” (Cunha, 1928); “as condições do sítio contribuem para a configuração de uma hierarquia interna ao traçado xadrez, nas ruas no sentido norte-sul estavam os lotes principais devido as condições de escoamento das águas pluviais que mais facilmente escorriam no sentido leste-oeste em direção aos Arroios Santa Bárbara e Pepino” (Cruz, 1984).

A cidade invade os rios: expansão e limiares ambientais. [1865 – 1915]

No seguinte período a cidade concêntrica passa a ocupar áreas adjacentes às linhas de drenagem e por outro lado define seus acessos viários axiais a oeste, ao norte e a leste. Neste período estão indicadas semelhanças a partir do mapa de 1926 (figura 4.33a), o *output* de centralidade do tipo 1 para a iteração 15 (figura 4.33b) e a adaptação do modelo urbano setorial de Hoyt (figura 4.33c). É por este período que a cidade entra em situação de colapso no sistema de saneamento, com altas taxas de mortalidade e passa a investir em sistemas de drenagem e coleta de esgotos.

Frentes de expansão externas (linhas laranja) estão indicadas além dos limites dos recursos hídricos. Ao norte, sem grandes resistências naturais da paisagem de suporte, a expansão ocorre pelo alongamento da forma concêntrica, com pequena indicação de axialidade. A oeste, o arroio Santa Bárbara que antes atraía os estoques construídos passa a ter seus leitos de drenagem urbanizados e o crescimento a ocorrer com predomínio axial. Já o limite leste, áreas adjacentes ao arroio Pepino ainda apresentam restrições à expansão urbana e a interface entre o urbano e o não urbano acompanha o seu curso natural do arroio (linha laranja). Internamente, a cidade ainda apresenta configuração concêntrica, de onde partem os eixos viários e os respectivos vetores de crescimento. Uma evidente semelhança entre o simulado e o mapa urbano de 1926 é a definição de dois eixos paralelos que indicam o sistema viário de expansão na direção leste, mesmo sem exata coincidência locacional (representados em linhas verdes), os caminhos de cima e de baixo da realidade sugerem relação com os eixos paralelos que o modelo pôde capturar apontados à nordeste.

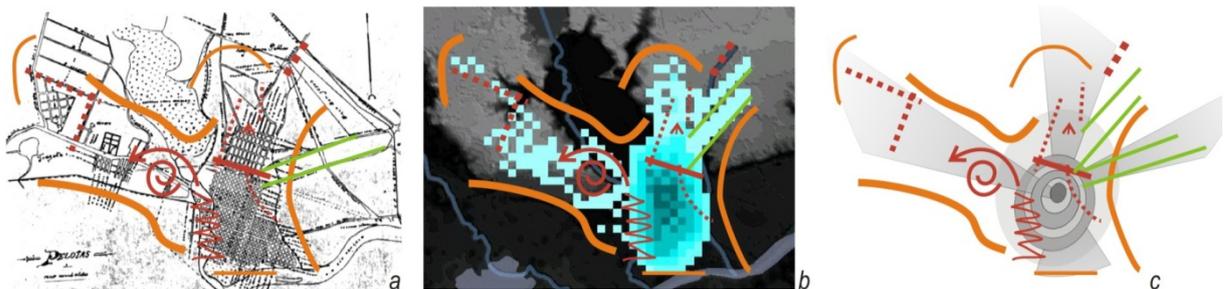


Figura 4.33: semelhanças visuais na forma urbana pelo: mapa urbano de 1926 (a); resultado de CentR1 iteração_15 (b); adaptação do modelo setorial (c). Em laranja destaques externos; em vermelho os internos; e verde destaque especial (imagens elaboradas pelo autor).

Outra semelhança visual positiva para o período está no resultado do novo *output* gráfico do “fator rh”, onde a ocorrência de efeitos de borda (células em paleta de cor vermelha na figura 4.34e) indicam locais que o crescimento urbano ainda tende a ocorrer sobre áreas dos recursos hídricos, como ocorre sobre o arroio Pepino (leste) e o canal São Gonçalo (sul). Por outro lado, a ausência de efeito de borda indica o local onde o crescimento concêntrico já supera o limite do curso baixo do arroio Santa Bárbara a sudoeste. Na direção noroeste, células com “fator rh” baixo (tons rosado) indicam o local onde o

crescimento ocorre de modo axial, ao longo ddos eixo viários de ligação ao bairro Fragata (pelas referidas pontes de pedra e de madeira, pela Praça das Carretas e ao longo da atual avenida Duque de Caxias).

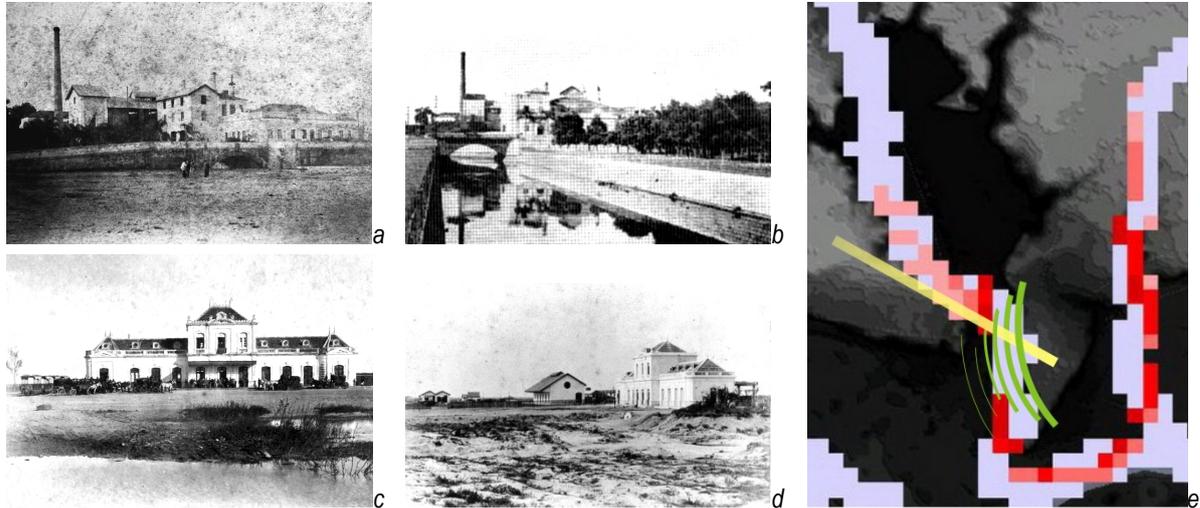


Figura 4.34: pontos de interface entre a cidade e os recursos hídricos: ponte entre núcleo urbano e a estrada à oeste (a, b); estação férrea às margens do curso sul do Santa Bárbara (c, d), representadas sobre o grid do “fator rh” it.15.(e).

Esta situação que identifica diferenciação no efeito de borda sobre o arroio Santa Bárbara também pode ser relacionada com situações locais identificadas na historiografia urbana. Na porção mais ao sul, além dos limites definidos pelo referido arroio localizava-se a a estação férrea da cidade (ilustrada na figuras 4.34c; 4.34d e destacado em verde na 4.34e), onde a indefinição de uma conexão com o núcleo urbano central possa ter influenciado na manutenção do crescimento urbano concêntrico nesta direção. Por outro lado, na porção mais ao norte do arroio Santa Bárbara, preexistente ao núcleo urbano estava definida a conexão com a estrada do Piratini (conexão regional à oeste, atual av. Duque de Caxias), local formou-se a Praça das Carretas (atual Praça 20 de Setembro), entre os prolongamentos das ruas São Jerônimo (Floriano) e a rua Hércules (atual Lobo da Costa), onde no ano de 1855 e 1858 são construídas as pontes de pedra e de madeira, respectivamente (figuras 4.34a; 4.34b e destacado em amarelo na figura 4.34e) (Gutierrez, 2004).

Em suma, a preexistência de um eixo axial e a imediata construção de pontes de conexão entre a estrada e o núcleo urbano na porção trecho norte do arroio Santa Bárbara, indicam o local onde define-se o vetor de crescimento axial à oeste, local onde posteriormente ocorrem o maior número de urbanizações fragmentadas e o maior crescimento efetivo. Por outro lado, a localização da estação férrea além do limite hídrico natural e o verdadeiro descampado que configurava o acesso conforme ilustrado nas figuras 4.33c e 4.33d são fatores que podem ter contribuído para a configuração de um local de grandes conflitos entre a cidade e os recursos hídricos, área urbana onde posteriormente ocorrem inúmeras enchentes e trecho do arroio que posteriormente teve curso natural desviado. O fato é que esta

diferencialção está capturada pelo *output* do “fator rh” (destacados em linhas verde e amarela na figura 4.33e).

Expansão urbana: difusão, fragmentação; captura e transposição. [1915 – 1965]

Por fim, relações visuais estão indicadas para a estrutura urbana ao final do processo, no período que o crescimento urbano ocorre com predomínio difuso, através de loteamentos fragmentados e descontínuos do núcleo urbano original, adjacentes aos eixos viários oeste, norte e leste. Estão indicadas na figura 4.35 a seguir, semelhanças entre configurações externas (linhas laranjas) e internas (pontilhada vermelha), sobre a área urbana de 1695 (figura 4.35a), os resultado de *Celltype* da iteração 33 (figura 4.35c) e centralidade absoluta da iteração 50 (figura 4.35d). Os destaques gráficos também estão demonstrados sobre uma representação de hexágonos do modelo de multacentralidades da Teoria do Lugar Central (figura 4.35b).

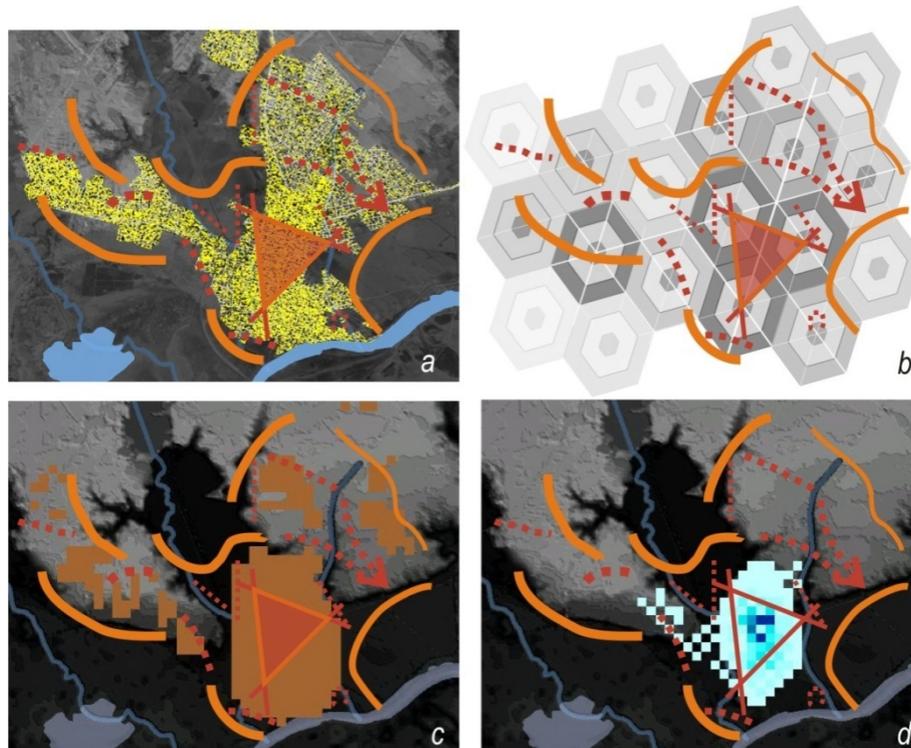


Figura 4.35: semelhanças visuais representada pelo: mapa urbano de 1995 (a); resultado de *Celltype* iteração_33 (b); adaptação à teoria do lugar central (c). Em laranja interfaces externos; em vermelho os internos (imagens elaboradas pelo autor).

Nota-se que as interfaces externas (linhas laranjas) ocorrem parcialmente fragmentadas e desconexas, a maioria definida sobre locais de maior resistência do ambiente natural. Estão sobre o banhado do Santa Bárbara à noroeste, no banhado do Fragata à sudoeste e na área alagadiça do São Gonçalo à sudeste. Define-se também uma interface de expansão sobre o terraço plano da direção norte-nordeste, local aparentemente atrativo à urbanização, mas onde ocorrem as nascentes do arroio Pepino. Internamente, a justaposição hexagonal adaptada da Teoria do Lugar Central, na escala que

está poposta (figura 4.35b), indica a configuração do núcleo urbano central composto por três subnúcleos (dois ao norte e outro ao sul) e da conexão entre estes uma forma triangular que aponta ao sul (em vermelho). Esta configuração triangular intra-urbana se assemelha à formação geomorfológica da porção final do terraço divisor de águas das bacias do arroio Pepino e Santa Bárbara, onde foi implantada a cidade. A forma triangular também ocorre na disposição das células que concentram as maiores centralidades absolutas na iteração 50, ao final do processo de simulação (*CentABS*, figura 4.35d).

Por outro lado, se interpretados conjuntamente os dados de *Celltype* (figura 4.35c) e centralidade absoluta (figura 4.34d), células definidas com fenótipo urbano e baixa ou nenhuma centralidade refletem locais com poucas facilidades urbanas da realidade empírica (locais com ausência de pavimentação, dificuldade de acesso aos serviços públicos, deficiências no saneamento). Desta forma a ocorrência de fragmentos urbanos desconexos ao núcleo urbano central capturada nos resultados simulados de fenótipo urbano e representados nos hexágonos, não ocorrem nos resultados de centralidade absoluta, indicando que a associação visual à Teoria do Lugar Central e as multcentralidades não ocorram efetivamente na cidade de Pelotas até o período. Pelo contrário, o que os resultados evidenciam é a configuração concêntrica das distribuição de centralidades, desconsiderando a ocorrência de núcleos urbanos difusos e a fragmentação urbana. Sobre esta perspectiva ocorrem os investimentos com saneamento e manejo das águas urbanas, onde os bairros que surgem no período apresentam insuficiência nos serviços de abastecimento de água e esgotos. Mesmo com a alternância morfológica indicada e a formação dos núcleos urbanos difusos, medidas estruturais de grande porte, que demandam grandes investimentos, ocorrem sobre os leitos naturais de drenagem de modo a viabilizar a manutenção do crescimento concêntrico e concentração das facilidades urbanas.

4.3. Conclusões do estudo: realidade e simulação do crescimento para Pelotas [1815-1965]

Historiografia urbana sistêmica.

A primeira conclusão que pode ser indicada no capítulo que aborda o crescimento urbano de modo empírico descritivo e a partir de recursos de modelagem urbana, está na validade de leitura da *historiografia urbana sistêmica*, pela qual Jansen (2001) indica a validade de reconstruir o passado urbano pelas narrativas tradicionais e uso de modelos e teorias urbanas. Esta aproximação entre a historiografia e a modelagem urbana, não passa de mais uma aproximação entre as diferentes vertentes epistemológicas do urbanismo de base qualitativa e quantitativa; a primeira baseada em abordagens estrutu-

ralistas e influenciada pelas teorias sociológicas, a segunda pautada por abordagens positivistas e influenciada pelas ciências exatas (Portugali, 2000; Batty, 2009).

Abordagens sistêmicas da historiografia urbana tradicional são possibilitadas pelos recursos de SIG, os quais permitem a sobreposição (*overlay*) de informações de naturezas distintas, como gráficos vetoriais, gráficos em *grids*, gráficos estatísticos, dados numéricos, narrativas e descrições espaciais. Este conjunto de dados, somados com análises espaciais e modelos urbanos, são auxiliares na construção de hipóteses espaciais sobre o passado da cidade, bem como cenários de controle para validar processos de simulação. De fato, uma prática convergente entre a historiografia tradicional e a modelagem urbana.

Indícios de um enunciado locacional.

A abordagem empírica e simulatória apresentada neste capítulo permite também um refinamento do enunciado teórico, locacional e estático apresentado na introdução. O enunciado indicava semelhanças nos padrões de implantação dos núcleos urbanos sobre a paisagem, bem como formas que indicavam crescimento urbano articulado aos atributos naturais. A partir do estudo empírico apresentado no título 4.1, os tradicionais aspectos sócio-espaciais da produção do espaço urbano foram relacionados com aspectos da paisagem natural e medidas de saneamento urbano da cidade. O que ocorre é uma clara convergência espaço-temporal entre as formas do crescimento urbano e medidas de manejo das águas urbanas. Esta convergência teórica está implementada no mecanismo de simulação de crescimento urbano desenvolvido e aplicado, o qual captura alternâncias na forma de crescimento a partir da ocorrência de efeito de borda em áreas adjacentes às linhas de drenagem, redistribuindo os potenciais de crescimento de forma aleatória e semiprobabilística na paisagem.

Esta alternância das formas de crescimento, onde a cidade é capaz de superar maiores restrições da paisagem natural viabilizando a produção continuada de lugares novos, está indicada como um mecanismo intrínseco à dinâmica urbana. A descontinuidade espacial tem sido tratada cada vez mais pela teoria urbana como uma propriedade inerente ao fenômeno urbano, o que tem sido evidente nas últimas décadas a partir do *urban sprawl*, da formação de condomínios fechados (*gated communitys*), do fenômeno das *shrinking cities* e outras formas de descentralização urbana. Entretanto, a descontinuidade da forma urbana não é um fato novo, ocorre desde os subúrbios promovidos nas cidades utópicas, nas cidades jardins do amanhã ou pela política do *american way of life* iniciado na década de 1920. A descontinuidade urbana não passa de uma mudança de escala sob o ponto de vista do fenômeno urbano, o que se torna evidente quando se passa a abordar a cidade a partir de sua dinâmica de expansão.

O que está indicado é que os atributos da hidrografia são sistemas que compõem a configuração da dinâmica urbana, operando de modo semelhante às condicionantes sociais e econômicas, podendo variar a intensidade e o grau de influência sobre relações espaciais. Simultaneamente que a conversão urbana ocorre em territórios adjacentes às linhas de drenagem naturais da hidrografia, o crescimento passa a ocorrer de modo difuso, fragmentado, indicando a formação de multacentralidades. Este enunciado dinâmico, assim como o enunciado locacional estático, estão retomados nas discussões do capítulo 5, a seguir.

Manejo das águas urbanas e a influência sobre a forma urbana.

A convergência cronológica entre os momentos que o crescimento urbano ocorre em áreas adjacentes aos recursos hídricos, a ocorrência de doenças de veiculação hídrica e intervenções estruturais (retificação e canalização) sobre as linhas de drenagem naturais; refletem diretamente o pensamento higienista-sanitarista dominante nas decisões de manejo das águas urbanas e na promoção do crescimento concêntrico, dominantes ao longo dos séculos 19 e 20. Na cidade de Pelotas, mesmo com o surgimento de núcleos urbanos difusos, o núcleo central em expansão ocupa áreas adjacentes às linhas de drenagem e a cidade sofre as consequências de um colapso no sistema de saneamento, deficitário e sem nenhuma forma de tratamento dos esgotos. A solução adotada é a retificação e transposição do curso natural dos Arroios Pepino e Santa Bárbara, respectivamente, visando a aceleração das águas contaminadas e viabilizando o crescimento urbano concêntrico. Neste turno, os núcleos difusos junto aos terraços dos divisores de água eram desconsiderados na alocação de recursos e na implantação de um sistema de tratamento de esgoto, configurando locais de segregação sócio-espacial e problemas de infraestrutura urbana.

A partir desta perspectiva, outro ponto que pode ser levantado nas relações entre o crescimento urbano e a hidrografia é que a forma que ocorre o manejo das águas urbanas influencia na configuração urbana emergente. Embora a dinâmica do crescimento e a descontinuidade espacial são processos que podem ser considerados como intrínsecos ao fenômeno urbano, medidas estruturais sobre os a hidrografia natural viabilizam o crescimento concêntrico a partir do núcleo central. Por outro lado, ações não estruturais de planejamento e indução da urbanização difusa, que tratem por distribuir as facilidades urbanas entre os núcleos emergentes e definir as conexões da polinucleação podem vir a promover o modelo urbano fragmentado.

5. Conclusões.

Na introdução do trabalho estão apresentados o tema e a justificativa da investigação, configurando um objetivo geral e outros específicos; estão indicadas também questões de pesquisa e hipóteses que servem para conduzir o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo, estão recuperados da introdução os objetivos e apresentadas conclusões referentes a cada uma das questões de modo a ressaltar os principais resultados alcançados, a validação das hipóteses, as limitações e propostas de continuidades da investigação.

5.1. Alcance dos objetivos, limitações e contribuição do trabalho.

Ao tratar do tema *crescimento urbano e a paisagem hidrográfica*, o enfrentamento geral do trabalho está em aproximar objetos tradicionalmente abordados por campos epistemológicos distintos, a configuração urbana e a paisagem natural. A partida inicial do trabalho está no pressuposto de que, se abordados sobre uma perspectiva macro espacial e em longo prazo, crescimento urbano e ambiente natural podem ter morfologias compatibilizadas, contribuindo para redução dos conflitos espaciais entre cidade e natureza. Portanto, o trabalho tem o objetivo principal de *identificar relações entre morfologia urbana e paisagem natural, decorrentes do crescimento urbano articulado à escala espacial da paisagem definida pela hidrografia*.

Pode-se considerar que o objetivo geral do trabalho foi satisfatoriamente atingido, com destaque de ter sido enfrentado a partir de três bases científicas distintas: teórica, empírica e metodológica. Os resultados decorrentes destas três formas de abordagem são de certa forma, convergentes a um resultado comum, o que reforça as assertivas e enunciados alcançados ao longo do trabalho. Outro destaque a respeito do objetivo geral está em como foram exploradas relações entre a forma do crescimento e a paisagem hidrográfica. A partir da perspectiva ampliada para uma abordagem sistêmica, a influência da hidrografia sobre a dinâmica do crescimento urbano não ocorre a partir de uma simples relações diretas, de causa e efeito. Pois os atributos da paisagem não operam como meras resistências à urbanização ou atributos que apenas constroem a forma urbana, estão indicados como pontos onde o sistema urbano converge para a descontinuidade da forma urbana.

Entretanto, algumas limitações podem ser também destacadas, as quais ao serem assimiladas indicam possibilidades de continuidade ao trabalho. Estas limitações estão descritas no título 5.3, na sequência deste capítulo e servem como base para os desdobramentos que estão indicados no capítulo 6.

Em suma, entre destaques e limitações do trabalho, a principal contribuição está na indicação da descontinuidade espacial da forma urbana como um movimento inerente ao crescimento, porém discreto e

pouco evidente, onde os recursos hídricos são pontos onde naturalmente ocorre a fragmentação urbana. Este resultado sugere reconhecer os vazios urbanos como componentes estruturais da cidade, onde dinâmicas morfológicas urbanas que associem a ocorrência de urbanização remota e a manutenção de locais de resistência natural, podem indicar uma possibilidade de preservação das propriedades ecológicas dos recursos hídricos, simultaneamente que é mantida a devida intensidade nas interações sócio-espaciais. Assim, o trabalho contribui para amenizar visões exclusivamente malélicas sobre o fenômeno urbano e pessimistas sobre o futuro das cidades, que tradicionalmente têm-se resumidos a evidenciar os impactos negativos das cidades sobre os recursos naturais. Pelo contrário, os resultados do trabalho possibilitam contribuir com visões da cidade como o mais rico artefato humano, com propriedades intrínsecas à sua dinâmica, associadas à resiliência e a permanência ao longo dos tempos.

5.2. Conclusões e respostas às questões de pesquisa.

A partir do objetivo geral do trabalho, estão indicados objetivos específicos que conduzem a investigação através das distintas abordagens. Cada um destes objetivos indica uma questão de pesquisa que o trabalho procurou responder. Nesta trajetória, uma série de observações foram indicadas que podem ser assumidas como conclusões do trabalho. A seguir, estas conclusões estão agrupadas como respostas às questões de pesquisa, apresentadas na ordem inversa que foram apresentadas no capítulo da introdução, assim as conclusões partem desde uma perspectiva geral, até conclusões específicas sobre as formas de abordagem e sobre o recurso de modelagem desenvolvido.

5.2.1. Conclusões que respondem a questão 3.

Quais as possibilidades de ocorrerem morfologias urbanas articuladas à paisagem dos recursos hídricos, que mantenham a eficiência nas relações urbanas e a qualidade do ambiente natural?

As hipóteses indicadas na introdução adiantavam que, abordagens sobre a descontinuidade espacial urbana ocorreriam a partir da associação de diferentes vertentes da ciência urbana, adiantando as ideias da resiliência urbana, da releitura evolutiva da teoria urbana e da dinâmica urbana associada à transição de fases. Embora as hipóteses mostraram-se válidas para conduzir o encaminhamento do trabalho e permitem as duas conclusões a seguir indicadas, a questão de pesquisa foi parcialmente respondida, principalmente pela limitação do trabalho estar dedicado exclusivamente ao crescimento urbano externo. A hipótese da ocorrência de uma descontinuidade espacial urbana coincidente com os atributos da paisagem natural, para que efetivamente ocorra, demanda análises intraurbanas, mensurações da eficiência das conexões e verificação da real sustentabilidade da cidade polinucleada. Em

suma, embora indicado o modelo da cidade policêntrica, este demanda verificações intraurbanas não exploradas no trabalho.

Descontinuidade espacial intrínseca ao fenômeno urbano.

Os resultados do trabalho indicam a fragmentação da forma urbana como intrínsecas ao fenômeno urbano, decorrente da auto-organização morfológica do sistema urbano. Esta descontinuidade espacial independe de um único fator urbano específico, ocorre a partir da convergência de inúmeros subsistemas que convergem para uma dinâmica associada à transição de fases, semelhante ao que ocorre nos demais fenômenos complexos. Uma propriedade discreta que confere às cidades propriedades de permanência ao longo dos tempos, o que na ecologia urbana tem sido referido-se em termos da resiliência.

Entretanto, a fragmentação da forma urbana não anula a tendência natural das cidades a ocorrer de forma compacta e concêntrica. Pelo contrário, indica que as cidades crescem por movimentos de compactação e fragmentação, sincronicamente, caracterizando uma dinâmica que a define essencialmente como fenômeno complexo. O fato é que se na cidade coexistem a fragmentação e a concentração morfológica, de onde decorrem a segregação e a interação sócio-espacial, a artificialidade urbana e os conflitos de natureza ambiental; cabe à teoria urbana definir um modelo que de fato garanta a sustentabilidade e a permanência do fenômeno urbano. Campo da teoria urbana ainda a ser aprofundado.

Fragmentação urbana e coincidência com a paisagem natural.

A ocorrência da forma urbana fragmentada permite que os vazios urbanos possam coincidir espacialmente com locais de interesse do ambiente natural. Desta forma, a dinâmica do crescimento e a descontinuidades espacial podem ser de fato um caminho para melhor coexistirem sistemas urbanos e ecossistemas naturais. Entretanto, para que de fato ocorra a cidade articulada à paisagem natural, antes é preciso indicar uma escala para induzir a ocorrência da fragmentação urbana e os vazios urbanos efetivamente coincidam com locais de interesse da ecologia da paisagem. Neste sentido, alguns autores têm-se antecipado e indicado a articulação entre sistemas de transporte e as bacias hidrográficas como uma possibilidade para reduzir custos de implantação de infraestrutura e reduzir os impactos do crescimento urbano sobre a paisagem natural. É nesta perspectiva e escala espacial que se associa o trabalho.

Contudo, a possibilidade de um modelo urbano fragmentado e eficiente, que articule crescimento urbano à escala das bacias hidrográficas, ocorre somente se as facilidades urbanas foram equanimente distribuídas entre o núcleo principal e núcleos satélites, o que demanda eficiência nas conexões entre os fragmentes urbanos. Como a manutenção da cidade policêntrica e a preservação da paisagem natu-

ral dependem do desempenho e da intensidade das conexões entre os fragmentos urbanos e naturais, volta-se a atenção às relações espaciais que ocorrem internas às cidades, extrapolando a delimitação inicial do trabalho.

5.2.2. Conclusões que respondem a questão 2.

De que modo a paisagem configurada pelos recursos hídricos pode influenciar na produção espacial urbana?

A partir desta questão de pesquisa ocorre o principal resultado do trabalho, o enunciado teórico sobre os padrões de localização e a dinâmica de expansão urbana frente à hidrografia, para a realidade delimitada. A hipótese basicamente indicava os recursos hídricos como espaços que restringem a expansão urbana, a qual pôde ser continuamente refinada à medida que o trabalho avança sobre a revisão teórica e as análises empíricas. À hipótese inicial, foram acrescentadas uma forma de influência da hidrografia na produção espacial urbana e qualificadores referentes à morfologia do crescimento urbano: compactação-fragmentação; axialidade-difusão. As principais conclusões a respeito desta questão de pesquisa estão a seguir.

Águas urbanas e a influência na forma urbana.

Os sistemas de águas urbanas referentes à drenagem e ao manejo das inundações apresentam relações diretas com a configuração urbana sobre a paisagem natural. Estes sistemas não estão relacionados apenas aos aspectos qualitativos ou quantitativos da urbanização interna às bacias hidrográficas, são decorrentes também da ocupação urbana das áreas de cheias naturais, adjacentes às linhas de drenagem, e do regime de não permanência de vazões. A partir da diferença temporal que ocorre entre o retorno de cheias naturais e a dinâmica de expansão urbana são decorrentes grande parte dos conflitos espaciais entre a cidade e o sistema de águas urbanas, onde a expansão urbana tende a ocupar áreas naturalmente alagáveis durante o intervalo do escoamento em regime de não permanência.

As superfícies dos recursos hídricos são resistências diretas e evidentes da expansão urbana. Contudo, áreas adjacentes aos recursos hídricos que configuram leitos naturais em tempos de cheias máximas, também são formas resistências ou locais de conflitos não evidentes, que acabam por influenciar a forma urbana emergente.

Embora a dinâmica e a forma urbana estejam indicadas pela teoria a ocorrer com certa autonomia dos agentes e processos individuais, a forma que ocorre o manejo das águas urbanas pode ser indicada com um fator que influencia a configuração urbana. Intervenções estruturais sobre a hidrografia natural,

que alteram o ciclo hidrológico e o escoamento natural, são medidas para possibilitar a ocupação dos vazios urbanos e viabilizar a expansão urbana a partir de formas concêntricas. Medidas de renaturalização das águas urbanas são medidas estruturais que induzem uma propriedade dinâmica da paisagem natural de reverter situações de artificialidades e morfologias urbanas concêntricas. Ainda, as chamadas medidas não estruturais de planejamento, podem vir a promover um modelo urbano fragmentado, induzindo a descontinuidade espacial urbana associada à preservação das linhas de drenagem. O fato é que, independente do paradigma que ocorre o manejo das águas no contexto das cidades, estes podem vir a influenciar a forma que ocorre o crescimento urbano, viabilizando sua concentração ou induzindo à fragmentação.

Descontinuidade urbana e o papel da hidrografia.

A teoria urbana tem dedicado esforços para compreender a ocorrência da descontinuidade espacial da forma urbana. Neste contexto, enunciados da *New Economic Geography* possibilitam entendimentos da dinâmica do crescimento e a descontinuidade espacial a partir de uma abordagem evolutiva da trajetória da teoria urbana (Fujita e Mori, 1997). Esta forma de abordar o processo de evolução urbana está aplicada com sucesso na cidade de Buenos Aires (Janoschka, 2002), devido a defasagem histórica que as cidades da América apresentam em relações às cidades europeias. Conforme está aplicado no trabalho, esta forma de abordagem também é válida para o caso da cidade de Pelotas, onde o crescimento urbano está associado à evolução dos modelos concêntricos, setorial e formação de multicentralidades.

A ocorrência de uma descontinuidade espacial na forma urbana está indicada pela teoria urbana como uma dinâmica associada à transição de fases (*phase transitions*), ocorrendo como um efeito cascata (*catastrophic cascades*), semelhante aos demais sistemas complexos. Desta forma, não cabem mais à ciência urbana meras verificações sobre quais os atributos que caracterizam a cidade enquanto sistema complexo, sendo necessário indicar quais seriam os *tipping points* que o sistema converge para promover a dinâmica e a descontinuidade espacial (Batty, 2009).

Embora o processo fragmentação urbana também possa ser explicado através de outros fatores urbanos, como questões sociais (industrialização, formação de bairros proletariados, etc.) ou a preexistência de infraestrutura (sistema viário), a morfologia urbana também está associada aos aspectos da paisagem natural. No processo de produção espacial continuada da fábrica urbana, os recursos hídricos estão indicados como locais de convergência do sistema para a descontinuidade espacial urbana, *tipping points* para da alternância morfológica do crescimento urbano, onde os múltiplos subsistemas influenciam na descontinuidade espacial urbana.

Enunciado locacional e dinâmica de expansão articulados com as bacias hidrográficas.

Na escala das sub-bacias hidrográficas, a paisagem natural é configurada por áreas alagadiças adjacentes às linhas de drenagem, que definem locais de restrições à urbanização, contrastando-se com as facilidades que se apresentam junto aos terraços divisores de águas. A partir da escala das sub-bacias hidrográficas, para o delineamento proposto ao trabalho, núcleos urbanos ocorrem com a devida proximidade e distanciamento das linhas de drenagem, procurando locais que mais se assemelhem a planos isotópicos.

Núcleos urbanos que procuram formações isotrópicas para promover o crescimento espacial sem restrições do ambiente natural, ao se expandirem com predomínio concêntrico se deparam com locais de maior restrição da paisagem, como ocorre junto às linhas de drenagem. Nestes locais configuram-se interfaces que impedem a expansão urbana na lógica concêntrica. Para continuar a produção espacial da fábrica urbana, superam as restrições da paisagem promovendo urbanizações remotas que tendem a ocorrer em áreas além dos recursos hídricos, não adjacentes às linhas de drenagem. Neste ponto a cidade tende a repetir os critérios locacionais estáticos dos núcleos de origem, procurando locais na paisagem próximas a formações isotrópicas. Repetido o critério locacional estático, repete-se a forma de expansão e configura-se um processo iterativo e dinâmico.

5.2.3. Conclusões que respondem a questão 1.

Como abordar crescimento urbano integrado com a paisagem da hidrografia natural?

A hipótese indicava a abordagem integrada entre cidade e ambiente ocorrendo a partir do enquadramento sistêmico, o que pôde ser confirmado. A partir da abordagem sistêmica, três desdobramentos foram percorridos: da ecologia urbana; da historiografia sistêmica e da modelagem de sistemas. O principal resultado desta questão de pesquisa é a construção de um mecanismo de modelagem urbana que efetivamente aborda crescimento urbano integrado com a paisagem definida pela hidrografia, associado aos resultados teóricos do trabalho.

Abordagem integrada sob uma perspectiva sistêmica; ecologia, historiografia e modelagem urbana.

As possibilidades de capturar relações entre a configuração de um determinado sistema e o ambiente de entorno estão indicadas desde os primeiros trabalhos da teoria de sistemas e dos sistemas urbanos. A teoria de sistemas indica também a necessidade de se identificar mecanismos adaptativos internos aos sistemas complexos, que refinam o funcionamento do próprio sistema e permitem melhor compreensão da sua dinâmica. Ambas estas perspectivas estão aplicadas no trabalho, procuram superar relações diretas de causa-efeito (atrações-resistência), e a partir de abordagens sistêmicas, identificar

comportamentos emergentes da dinâmica urbana decorrentes da relação com a paisagem natural de suporte. Este comportamento opera no sistema urbano como uma espécie de mecanismo adaptativo.

A abordagem do trabalho procura também uma aproximação da ecologia urbana aos estudos da configuração espacial urbana, uma reaproximação entre os estudos do urbanismo e da ecologia em tempos que ambos os campos disciplinares assumem a quebra no equilíbrio dos seus respectivos sistemas, de onde emergem dinâmicas responsáveis pela manutenção e vitalidade dos organismos vivos e das cidades. Dentre as diferentes vertentes da ecologia urbana contemporânea, as quais basicamente variam o tom naturalista, a abordagem do trabalho ocorre de forma aberta, integrando aos conhecidos fatores sócio-espaciais, as irregularidades da paisagem natural de suporte.

A abordagem sistêmica está aplicada também na aproximação entre a historiografia tradicional e a modelagem urbana. A *historiografia urbana sistêmica*, conforme proposto por Jansen (2001), é possibilitada pelo *overlay* de informações de naturezas distintas através dos SIG, que fomentam a construção de hipóteses espaciais sobre o passado urbano.

A prática de modelagem urbana está associada à vertente configuracional urbana do modelo de Potencial-Centralidade (Krafta, 1994), o qual possibilita diferenciar o sistema urbano em situação de desequilíbrio interno e configura uma paisagem de oportunidades espaciais de produção imobiliária. A adaptação ao ambiente celular, aplicado no SACI (Polidori, 2004), permite sobrepor o modelo original a um campo de desiguais resistências do ambiente natural, possibilitando reproduzir e capturar morfologias emergentes de uma lógica semideterminística e semiestocástica da configuração urbana articulada aos atributos naturais.

A descontinuidade espacial decorrente da hidrografia: abstrações da modelagem.

A hipótese teórica de um crescimento urbano articulado à escala da paisagem dos recursos hídricos, intrínseco ao fenômeno urbano e decorrente da convergência locacional entre a atratividade urbana e resistências ambientais, está traduzida em um mecanismo de modelagem urbana. A ocorrência de potenciais de crescimento que configuram o efeito de borda sobre os recursos hídricos são indicadores da alternância da forma do crescimento urbano, representam locais da convergência do potencial urbano para promover a mudança e locais de interesse da paisagem natural.

A dinâmica ocorrida a partir do “fator rh” envolve atributos discretos e uma lógica absolutamente não determinística, pois atributos não ativos no sistema tratam por redistribuir os potenciais indiretamente através das tensões difusas, em uma lógica semi-probabilística sorteada em todo o sistema. O mecanismo que induz a ocorrência de dinâmicas a partir do “fator rh” pôde ser validado a partir de dados da

realidade empírica, alcançando semelhanças visuais e correlações numéricas para o caso Pelotas [1815-1965].

A partir de simulações de crescimento com o mecanismo desenvolvido, a dinâmica do crescimento indica alternâncias entre a compactação e a descompactação da forma urbana. Um resultado que reforça assertivas que o crescimento urbano é caracterizado sincronicamente por movimentos de compactação e fragmentação urbana. O que está indicado são os espaços dos recursos hídricos como componentes da configuração da dinâmica urbana, onde a alternância nas formas de crescimento é um mecanismo que viabiliza a produção continuada de lugares novos da fábrica urbana diante de resistências da paisagem natural. Por outro lado, esta dinâmica pode ser entendida como um mecanismo que indica a possibilidade de preservação das linhas de drenagem natural, se esta for compreendida, antecipada e induzida a ocorrer.

5.3. Limitações e continuidades.

Ao longo do processo de investigação, alguns objetivos e motivações traçados na projeção inicial da pesquisa, enfrentaram certas limitações. A partir destas limitações são indicadas possibilidades e caminhos para a continuidade da investigação, a seguir apresentadas:

a) dedicação ao crescimento externo: uma limitação do trabalho está na dedicação aos processos de crescimento urbano externo. Embora o crescimento externo tenha correspondido para abordagem das dinâmicas, movimentos e formas que ocorre o crescimento urbano, esta delimitação impede a verificação da eficiência e desempenho da configuração urbana fragmentada resultante.

Sobre esta limitação ocorre a principal indicação de continuidade para o trabalho. Para que efetivamente se supere tradicionais visões sobre a “boa forma” da cidade, associadas às tradicionais perspectivas da sustentabilidade urbana, para a continuidade do trabalho estão indicadas abordagens intraurbanas dedicadas à análise e monitoramento da eficiência das relações intraurbana e sobre o desempenho da forma urbana.

b) recursos de representação e visualização: outra limitação do trabalho é quanto aos recursos de representação e visualização dos resultados. Embora modelos urbanos demandem abstrações da realidade, os recursos de representação e visualização do trabalho estão limitados em relação às técnicas de representação e resolução espacial.

Para esta limitação podem ser indicados dois caminhos: um mais longo e incerto; outro mais direto e evidente. O primeiro está no desenvolvimento de investigações para melhorar o entendimento dos resultados de modelagem urbana, traduzindo os resultados abstratos da modelagem urbana (centralida-

de, carregamentos, resistências), para indicadores da realidade urbana (índices construídos, infraestrutura). A segunda indicação está na necessidade continuada de aumentar o grau de resolução espacial que ocorrem as representações urbanas no ambiente celular. Embora neste trabalho a resolução celular tenha sido diminuída em comparação e trabalhos anteriores, este enfrentamento não foi diretamente enfrentado e permanece a limitação quanto a capacidade de processamento do *software* que implementa o SACI.

Além destes, outros avanços de visualização e representação podem ocorrer a partir da vertente da modelagem gráfico-visual, onde recursos de autômato celular indicam associação direta aos recursos tridimensionais (3D). Há a perspectiva de associar à resolução celular a uma unidade definida, por exemplo, lotes urbanos; e aplicar recursos de representação e visualização 3D. A modelagem gráfico-visual dos autômatos celulares associada aos recursos de SIG 3D integrados com a web possibilitaria a disponibilização de resultados acadêmicos com as redes digitais de computadores.

c) avanços sobre a configuração urbana: outra limitação do trabalho está no enfrentamento sobre aspectos da configuração espacial urbana. O trabalho basicamente se utiliza de recursos de modelagem urbana existentes, para inclusão da realidade dos atributos do ambiente natural de suporte.

Possibilidades não enfrentadas pelo trabalho, ainda em ambiente celular, relacionadas ao desenvolvimento de novas medidas aos limiares urbanos relacionados com a capacidade de suporte da paisagem; avanços em medidas de segregação espacial; avanços nas medidas morfológicas de compactação e fragmentação; dentre outras. Outra possibilidade de avanços nos sistemas configuracionais urbanos, seria avançar sobre recursos de modelagem de crescimento urbano através de recursos com grafos dinâmicos. Este enfrentamento possibilitaria avanços na articulação ente grafos e autômatos celulares, refinamentos nas práticas de simulação de crescimento urbano e representações mais próximas à realidade urbana pela associação dos eixos dos grafos à rede viária e outros vetores de crescimento.

d) dinâmica do ambiente natural: o trabalho fundamentado nas ciências sócio-espaciais não apresenta nenhuma forma de representação e modelagem das dinâmicas que ocorrem na paisagem natural. Nos sistemas de águas urbanas, embora esteja indicada a hidrodinâmica associada ao regime de não permanência das vazões, esta não está efetivamente aplicada ao modelo. A área de influência das linhas de drenagem é dada por uma medida estática e contínua durante o processamento.

Talvez, este tipo de enfrentamento e continuidade esta indicados na aplicação dos recursos de modelagem urbana existentes, como o caso do SACI e o mecanismo desenvolvido, por outros campos da ciência como da Hidrologia, da Ecologia, da Biologia, dentre outros capazes de abordar as dinâmicas das ciências naturais com maior propriedade.

e) algoritmos computacionais: o desconhecimento e a dificuldade de trabalhar com a lógica dos algoritmos e a linguagem da programação computacional apresentam-se como uma das maiores limitação dos trabalhos com modelagem urbana, conduzidos pela ciência sócio-espacial. Uma lógica não presente na formação tradicional de arquitetos, urbanistas e demais pensadores sobre o fenômeno urbano. Desta forma, o lançamento de hipóteses de pesquisa a partir do enquadramento sistêmico, sem recursos que apliquem testes algoritmos preliminares, torna-se um processo que limita a abordagem científica.

O desconhecimento da lógica de programação computacional impede ao pesquisador urbano lançar hipóteses sobre uma determinada relação espacial, sobre um determinado problema de pesquisa e testar as configurações urbanas emergentes. Devido ao alto grau de esforço que demandam, estas hipótese tornam-se reduzidas e pouco refinadas durante o processo de implementação. Uma indicação para continuidade ou recomendação a partir deste trabalho está na necessidade de arquitetos e urbanistas se apropriar dos fundamentos de programação computacional para melhor enfrentar questões espaciais urbanas baseadas em lógica algorítmica.

6. Continuidades:

avançando nas discussões sobre um modelo urbano articulado à hidrografia.

Partindo da justificativa que se abordadas as relações espaciais que ocorrem entre crescimento urbano e a hidrografia, articulando a descontinuidade espacial da forma urbana e a paisagem de suporte, estariam indicados caminhos para melhor compatibilizar cidade e natureza no longo tempo e espaço. Deste modo, o trabalho aproxima teorias a respeito do manejo das águas urbanas e práticas do planejamento urbano, indica possibilidades de articulação entre estas diferentes disciplinas e percorre as bases teórico-científicas que permitem uma abordagem efetivamente integrada entre cidade e ambiente. Posteriormente a hipótese de pesquisa está aplicada em recursos de modelagem urbana, construído um mecanismo de crescimento que se assemelha ao enunciado teórico e captura alternâncias na morfologia do crescimento pela influência discreta dos atributos da paisagem natural. A hipótese associada a um recurso computacional permite que seja validada por experimentos que a relacionam com dados do crescimento de uma determinada realidade empírica. Assim, o trabalho está fundamentado por três bases científicas, cercando o problema de pesquisa por bases empíricas, teóricas e metodológicas.

Com a hipótese aceita, na sequência do trabalho estão propostas algumas discussões que suscitam ao abordar: crescimento urbano e hidrografia. O capítulo está organizado em subtítulos que vão desde: um refinamento do enunciado teórico sobre o crescimento urbano percorrido pelo trabalho; indicações de algumas medidas contemporâneas do manejo das águas urbana que se associam aos resultados do trabalho; indicações de avanços no processo de modelagem urbana original do SACI associados às ciências complexas; propõe uma analogia entre a descontinuidade espacial urbana ao ocorrido em outros fenômenos complexos; por fim, indica caminhos para um modelo urbano fragmentado e eficiente, em um contexto que é possível vislumbrar a articulação da gestão do uso do solo e a preservação das áreas adjacentes aos recursos hídricos, para o presente e o futuro das cidades.

6.1. Enunciado locacional e dinâmica de expansão.

As evidências levantadas no decorrer do trabalho indicam semelhanças, sob o ponto de vista da paisagem natural e aplicadas à realidade geográfica delineada, nas características locacionais e nas dinâmicas que ocorrem nas cidades. A proximidade das urbanizações a importantes recursos hídricos não é novidade, sendo a maioria das cidades pelo mundo dependentes das propriedades hídricas para o escoamento e o abastecimento de água. Entretanto, a localização dos núcleos urbanos, em alguns casos, ocorre também com um devido distanciamento dos corpos hídricos, bem como a forma que

ocorre o crescimento espacial também está relacionada com a configuração da paisagem natural. Estes enunciados teóricos sobre a localização e a dinâmica do crescimento, estão a seguir explicitados.

Enunciado locacional: estático.

Sob uma perspectiva espacial ampla, abrangendo toda a uma região e suas divisões hidrográficas, a emergência das cidades pode ser encarada com certa aleatoriedade e grau de incerteza, sendo inúmeros os fatores que determinam a localização e a concentração humana em núcleos urbanizados. No caso da metade sul do Rio Grande do Sul, cidades (destacadas em pontos vermelho) ocorrem sobre a paisagem com certa aleatoriedade espacial, (representada na figura 5.1a abaixo pela configuração das bacias hidrográficas destacadas por cores aleatórias), concentradas ou dispersas, junto aos divisores de água ou às linhas de drenagem. Por outro lado, se encarado sob o ponto de vista da paisagem natural em uma escala mais específica, por exemplo, das sub-bacias hidrográficas com áreas de drenagem inferiores a 10.000 ha, esta dose de aleatoriedade pode ser reduzida, onde é possível enunciar um padrão locacional das cidades, ocorrendo com a devida proximidade e distanciamento dos recursos hídricos naturais (representado na figura 5.1b, abaixo na cidade de Pelotas no ano de 1965 sobre sub-bacias hidrográficas com área drenagem de 5.000 ha).

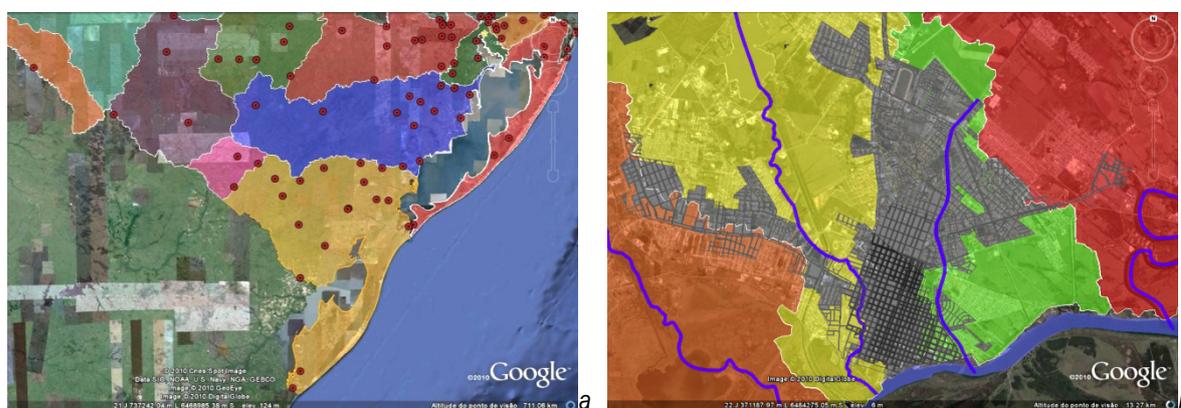


Figura 6.1: cidades da metade sul do Rio Grande do Sul, ocorrendo dispersas sobre o território e bacias hidrográficas. (imagens elaboradas pelo autor sobre imagens do Google Earth).

O fato é que o fenômeno urbano apresenta tendências a ocorrer em locais que mais se assemelhem a verdadeiros planos isotrópicos (Nystuen, 1968), procurando configurações na paisagem que permitam a dinâmica urbana ocorrer sem a restrição dos atributos naturais. Entretanto, na região do bioma pampa gaúcho, as sutis inclinações da topografia que configuram bacias hidrográficas quase imperceptíveis contribuem para que ocorra uma espécie de dilema locacional interno às cidades, que dependem dos atributos e propriedades dos recursos hídricos, simultaneamente que buscam formações isotrópicas longe dos recursos hídricos para definição locacional de onde irão ocorrerem. Neste dilema que se expressa espacialmente na localização e na dinâmica do crescimento, é possível indicar que os atributos da hidrografia apresentam-se com duplo papel.

Em um primeiro momento, urbanizações ocorrem próximas aos recursos hídricos devido às propriedades e possibilidades de abastecimento, escoamento e limpeza. Por outro lado, a indefinição dos leitos de drenagem, a configuração de áreas de várzeas e locais propensos a inundações, contrastadas às facilidades que se apresentam junto aos terraços divisores de água das bacias hidrográficas, são fatores determinantes para que os núcleos urbanos ocorram também com o devido distanciamento das linhas de drenagem, buscando as melhores condições de saneamento urbano que se apresentam nos divisores de água.

Alternância na morfologia de expansão: dinâmica urbana.

O urbanismo contemporâneo tem indicado as cidades como um fenômeno em constante produção espacial, onde o crescimento urbano e as dinâmicas decorrentes são processos que ocorrem com relativa autonomia dos agentes e subsistemas internos. Sob esta perspectiva, a produção de lugares novos e a expansão urbana são processos inerentes ao sistema urbano e as relações entre cidade e os recursos hídricos que ocorrem no enunciado locacional, estáticas, também podem ser identificadas nas dinâmicas intrínsecas ao fenômeno urbano.

Se os núcleos urbanos que dão origem às cidades ocorrem em locais da paisagem que mais se assemelhem a planos isotrópicos, o crescimento espacial em expansão, sem restrições do ambiente natural, tende a ocorrer com predomínio da forma concêntrica a partir da conversão de áreas não urbanas pela lógica econômica nos territórios imediatamente adjacentes a cidade preexistente. Ao se expandir espacialmente e avançar sobre os atributos da paisagem, a cidade tende se deparar com locais de maiores restrições à urbanização, como o caso das linhas de drenagem da hidrografia. Nestes locais configuram-se interfaces entre o sistema urbano e o sistema natural, onde os recursos hídricos e as linhas de drenagem, a priori, impedem a continuidade da expansão urbana na lógica econômica da conversão de territórios imediatamente adjacentes. Porém, como a *urban fabric* necessita continuar a dinâmica de produção espacial, superam-se às restrições impostas pela paisagem e a conversão do território passa a ocorrer em áreas além dos limites dos recursos hídricos.

Entretanto, de modo geral, a margem oposta ao curso d'água natural apresenta as mesmas restrições à urbanização que a cidade vinha superando ao se deparar com as linhas de drenagem. Exatamente neste ponto que o trabalho identifica um novo padrão locacional da conversão urbana. Conforme está desenvolvido ao longo do trabalho, a urbanização além das linhas de drenagem não ocorre em áreas imediatamente adjacentes aos recursos hídricos. Ao transpor o recurso hídrico, a cidade concentra esforços na construção de pontes e outras estruturas que morfologicamente definem um vetor axial de superação do corpo d'água. Definido este vetor, a conversão urbana tende a ocorrer com o mesmo critério locacional em que ocorrera o núcleo de origem, em locais mais próximos a formações isotrópi-

cas, para onde o vetor de crescimento é prolongado até atingir áreas com menor restrição ambiental e neste ponto surgem novos núcleos urbanos difusos, geralmente junto aos novos divisores de água.

Em um novo momento, consolidado o núcleo urbano emergente que replica os critérios de localização do núcleo original, este replica também a forma concêntrica que ocorrera o crescimento, promovendo a conversão de territórios adjacentes até atingir novamente os limites das linhas de drenagem, sugerindo um processo iterativo. Assim, na macro escala da cidade, está definida uma dinâmica de alternâncias na morfologia do crescimento urbano, alternando a forma concêntrica inicial, para outra difusa e axial, sucessivamente.

6.2. Manejo contemporâneo das águas urbanas.

Embora o trabalho no capítulo do método esteja correlacionado com dados do passado urbano, os interesses e motivações desta pesquisa estão no presente e no futuro das cidades, dedicados a reverter situações de conflitos existentes entre cidade e ambiente e na perspectiva de um futuro urbano, social e ambiental, de melhor qualidade. Portanto, este subtítulo reúne algumas discussões de caráter mais prático, que tratam por atualizar o manejo estrutural das águas urbanas, os quais ocorrem associados ao enunciado teórico, ao modelo urbano fragmentado, a preservação dos recursos hídricos e coexistência com as dinâmicas urbanas.

Medidas (des)estruturais e a renaturalização das linhas de drenagem.

Conforme apresentado no título 2.1, em um breve histórico dos paradigmas do saneamento urbano, o manejo das águas urbanas contemporaneamente tem sido pautado com ênfase na preservação dos recursos hídricos, buscando medidas que possibilitem que a água escoe o mais próximo de seu curso, velocidade e volume natural. Neste contexto, medidas estruturais do saneamento urbano contemporâneo visam principalmente a reestruturação dos grandes sistemas de drenagem urbana. Construídas para reverter situações de conflitos causados por décadas de manejo baseados no paradigma higienista-sanitarista, estas intervenções podem ocorrer sobre as estruturas tradicionais do saneamento urbano das mais diversas formas, promovendo a substituição de componentes, a manutenção das estruturas, modernização de técnicas, ou em uma vertente mais radical, induzindo a renaturalizando as linhas de drenagem e áreas ciliares dos recursos hídricos (Mendonça, 1999; Booth e Bledsoe, 2010).

É cada vez mais frequente na gestão ambiental a utilização deste tipo de solução, uma forma de medida estrutural que procura desestruturar ou reverter situações de rios e arroios canalizados ou deslocados do seu curso natural. São obras que envolvem um conjunto de técnicas específicas que agregam múltiplas disciplinas em um campo definido como *Geobiohydrology* (geobiohidrologia, Kobayama *et al.*,

1998). Práticas de renaturalização avançadas vêm sendo realizadas principalmente pela Europa, com destaque para a Alemanha, país pioneiro e maior dedicado na reconversão das propriedades naturais dos seus recursos hídricos (Mendiondo, 1999). No contexto brasileiro, outras práticas de renaturalização já ocorrem na recuperação de dunas junto às orlas marítimas ou na reprodução de áreas florestais, com poucas iniciativas de caráter acadêmico para a renaturalização das linhas de drenagem.

Embora possa parecer simples, a renaturalização não é uma tendência absolutamente natural dos atributos da paisagem, depende de uma série de medidas para induzir o processo de reconversão natural, como a destruição de estruturas existentes, a remoção dos materiais artificiais, além da construção novas estruturas de contenção biológicas e o plantio de espécies primárias. A figura 5.2 a seguir apresenta um conjunto de medidas para induzir os recursos hídricos a reverter o processo de artificialidade e retomar boa parte das propriedades naturais (Souza e Kobiyama, 2003).

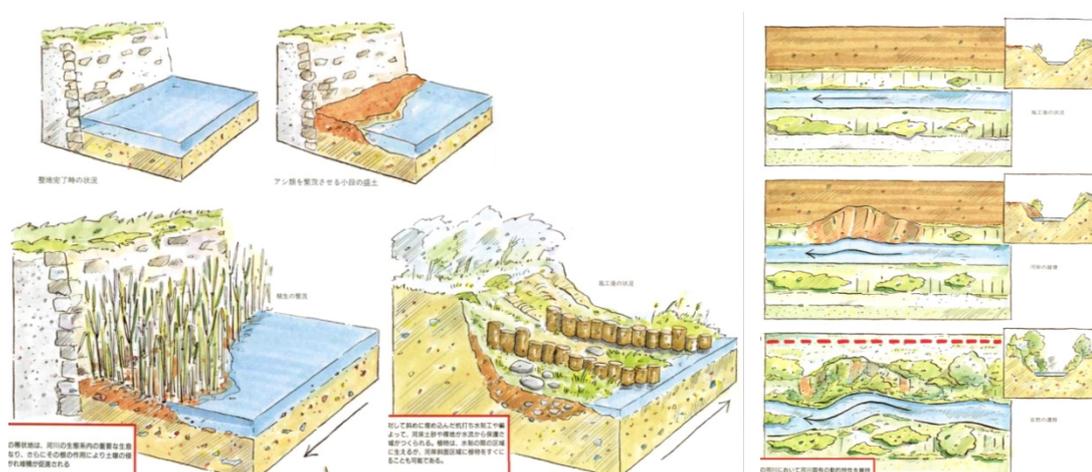


Figura 6.2: conjunto de técnicas de renaturalização das áreas adjacentes aos recursos hídricos naturais (imagens extraídas de Souza e Kobiyama, 2003)

Por outro lado, se comparadas com estruturas tradicionais de saneamento ou estruturas do processo de urbanização, obras de renaturalização demandam menor quantidade de energia e trabalho, além de utilizar recursos materiais extremamente simples. Assim como toda a medida estrutural do manejo das águas, para alcançar eficiência, necessariamente deve ocorrer associada com medidas não estruturais, com alto grau de controle, que impeçam qualquer tipo de intervenção ou influência antrópica sobre as áreas em recuperação (Souza e Kobiyama, 2003)

Neste trabalho, mais do que divulgar ou defender medidas de renaturalização dos recursos hídricos, a principal intenção está em evidenciar uma propriedade dinâmica da paisagem natural, capaz de se recuperar de situações de conflito com a urbanização, uma propriedade de resiliência. Entretanto, cabe ressaltar que para alcançar eficiência, devem ocorrer paralelamente ao planejamento urbano pró-ativo, que promova urbanização em locais de menor resistência ambiental. Desse modo, é possível pensar na possibilidade de reverter cenários urbanos com graves problemas ambientais internos, onde fre-

quentemente ocorrem inundações e são inúmeras as perdas associadas ao saneamento urbano ineficiente.

Modelo fragmentado: saneamento e drenagem urbana.

Se por um lado as ações de renaturalização podem ser consideradas medidas estruturais de saneamento em uma grande escala, contemporaneamente novos sistemas de drenagem e esgotos ocorrem prioritariamente e com maior eficiência, intervindo em menor escala. Semelhante a cidade policêntrica e fragmentada que ocorre articulada à escala das sub-bacias hidrográficas, sistemas de águas urbanas descentralizados e multiescalares também ocorrem articulados às sub-bacias, assim ganhando em eficiência e viabilidade operacional.

Atualmente, para os sistemas de coleta e tratamento de esgotos domésticos, a solução indicada é a implantação de múltiplas e pequenas estações de tratamento de esgotos que se aproveitam da topografia configurada pelas sub-bacias hidrográficas para ocorrerem de forma descentralizada. Em pequena escala, estações de tratamento de esgotos (ETE) são mais viáveis de ser implementadas, permitem emprego de tecnologias de tratamento que facilmente ultrapassam 90% de eficiência (como ocorre em sistemas de filtros anaeróbicos, por exemplo), demandam baixo custo de energia, geram pouca massa de resíduos e ocupam pouca área para implantação. São alternativas às antigas ETE centralizadas, de grande porte, difícil operação, limpeza e grande volume de resíduos produzidos no processo de tratamento.

Por seu turno, a drenagem urbana em sua vertente contemporânea procura alternativas às tradicionais visões higienistas baseadas no aumento da velocidade do escoamento. Pelo contrário, estão prioritariamente dedicadas ao amortecimento de cheiras, redução das velocidades de escoamento e manutenção dos hidrogramas o mais semelhante aos naturais. Para ganhar eficiência, a drenagem urbana ocorre de modo fragmentado e em múltiplas escalas que vão desde medidas de retenção individual, áreas de amortecimento em escala intermediária, até a manutenção dos leitos naturais do regime de não permanência no escoamento dos recursos hídricos principais.

As medidas de proteção individual ocorrem internas aos lotes urbanos, onde cisternas particulares capturam águas pluviais para o amortecimento do volume escoado pelas redes públicas. Estes reservatórios que também permitem o reuso das águas pluviais, são dimensionados para armazenar água pelo período que a rede de drenagem se ocupa com as águas que incidem sobre áreas públicas. Devem ser calculados em função dos picos de precipitação da região e do dimensionamento da rede de drenagem existente. Este tipo de medida possibilita viabilizar novos empreendimentos ou impermeabilizações adicionais em situações que a rede de drenagem já encontra seu limiar de descarga.

Uma segunda escala de detenção da drenagem urbana tem sido usual articulada com áreas verdes ou institucionais urbanas, onde se aproveita quadras esportivas, escadarias, ou até mesmo piscinas públicas, para armazenar águas pluviais durante picos de cheia e situações que os recursos hídricos encontram-se cheias máximas. Por fim, a última escala de manejo da drenagem urbana trabalha com o amortecimento de cheias nas áreas adjacentes aos recursos hídricos naturais, dependem da preservação das propriedades naturais da vegetação ciliar e da sinuosidade natural dos recursos hídricos para redução das velocidades e ajuste do volume de escoamento pluvial.

6.3. Crescimento urbano e ciências complexas; mecanismo físico-químico e nanotecnologia.

Como é de praxe nas ciências complexas, dinâmicas emergentes de um determinado sistema são relacionadas de forma análoga às dinâmicas que ocorrem em outros fenômenos complexos, de origem de outros campos da ciência. Desta forma, reduzidos aos conceitos comuns da teoria de sistemas, novos enunciados teóricos são corroborados a partir do outros já aceitos pela comunidade científica. Na ciência urbana contemporânea não é diferente, o mesmo ocorre nas associações urbanas às geometrias fractais inauguradas por Batty e Longley na *Fractal City* (1994); no modelo de crescimento por Percolação (Maske *et al.*, 1998); nas teorias da criticalidade das *Sand-pile Cities* (Portugali, 2000); na dinâmica de adaptação à paisagem do movimento *Leapfrogging* (Benguigui *et al.*, 2001); até as ideias do efeito de borda urbano (Polidori, 2004), originadas a partir da ecologia dos ecossistemas naturais, as quais estão absorvidas no desenvolvimento metodológico deste trabalho.

As relações dinâmicas entre o crescimento urbano e a configuração do plano de suporte a partir dos atributos dos hídricos que estão identificadas neste trabalho, podem ser feitas analogias às propriedades físico-químicas da água que formam a tensão superficial e as influências de substâncias surfactantes em superfícies de suporte ou as propriedades nanotecnológicas dos materiais auto-limpantes associadas ao *lottus effect* (efeito lótus), as quais estão apresentadas a seguir.

Propriedade intrínseca à cidade associada à tensão superficial.

A tendência a promover prioritariamente o crescimento urbano concêntrico, o que já foi indicado por fatores econômicos (Alonso, 1964) ou ecológicos na escola de Chicago (Park e Burgess, 1925), aqui está associada a uma propriedade físico-química presente na água capaz de formar a tensão superficial (*surface tension*).

A ausência de moléculas de água além da superfície do líquido configura uma tensão superficial formada por forças de coesão intermolecular superiores as que ocorrem nas moléculas internas ao líquido, onde existem adjacências em todos os sentidos, como está representada na figura 5.3a. Trata-se

da propriedade físico-química responsável pela formação de estruturas que conferem as mais importantes propriedades da água, como a formação de gotas, a flutuação de corpos mais pesados na superfície do líquido (figura 5.3b), além das inúmeras propriedades ligadas a fluidez e a transferência de energia que ocorre nos sistemas hidráulicos (figura 5.3c). O fato é que a tensão superficial identificada a um nível macro do sistema, perceptível pela visão humana, é emergente das interações moleculares que ocorrem a na micro escala, indicando um claro fenômeno associado às ciências complexas.



Figura 6.3: estruturas da água formadas a partir da superficial: a) gota sobre plano; b) suspensão de sólidos de maior massa; c) fluidez e transferência de energia (fonte das imagens: http://commons.wikimedia.org/wiki/Surface_tension)

Uma semelhança que ocorre entre as estruturas emergentes da água e as configurações urbanas, além das próprias forças de coesão dominantes, está na forma que se rompem as estruturas de tensão. A seqüência de imagens da figura 5.4a, extraídas de um vídeo, representa a dinâmica que ocorre o rompimento das forças de coesão sobre a superfície da água quando o sistema recebe uma perturbação física externa no centro da superfície. Configura-se uma forma concêntrica-axial, com vetores de expansão que replicam a estrutura definida desde o momento do impacto.

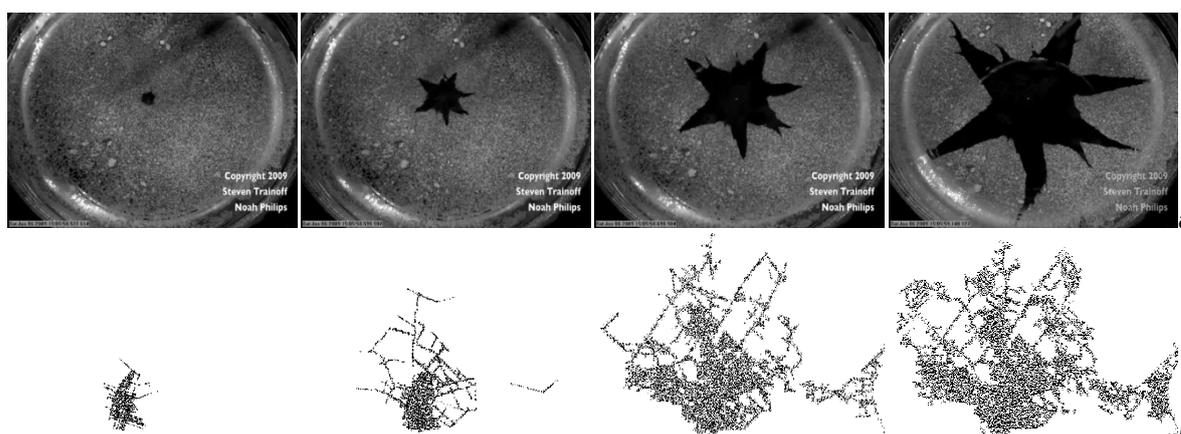


Figura 6.4. analogia entre: a) forma de rompimento da tensão superficial (imagens extraídas do vídeo “Cracking Water” <http://www.youtube.com/watch?v=nK72nEjrDJE>); b) representação abstrata do crescimento urbano da cidade de Pelotas (elaboradas pelo autor)

Esta dinâmica de expansão em que a estrutura do sistema é prioritariamente definida por eixos que rompem a resistência superficial, pode ser associada ao crescimento urbano ocorrido na cidade de Pelotas (caso empírico abordado no capítulo 4), onde a partir do núcleo urbano original, vetores de crescimento prioritariamente definem a estrutura do sistema e posteriormente se sucedem crescimentos adjacentes, conforme está na sequencia de imagens da figura 5.4b.

A tensão superficial, assim como os demais fenômenos complexos, também é influenciada na micro escala pelas condições externas do sistema entorno. Estas evidências ocorrem, por exemplo, na formação de cristais de gelo sob diversas condições ambientais, conforme foi fotografado por Bentley (1922) e ilustrado na figura 5.5a, a seguir. Ao capturar uma grande quantidade de imagens da água no estado sólido, o autor indica que nunca dois cristais de gelo são iguais devido aos inúmeros fatores externos que influenciam as propriedades físico-químicas responsáveis pela dilatação anômala da água na solidificação. Estas influências do ambiente a nível microscópico são capazes de gerar cristais de água com as mais diversas estruturas e arranjos, porém um fenômeno imperceptível na macro estrutura do gelo.

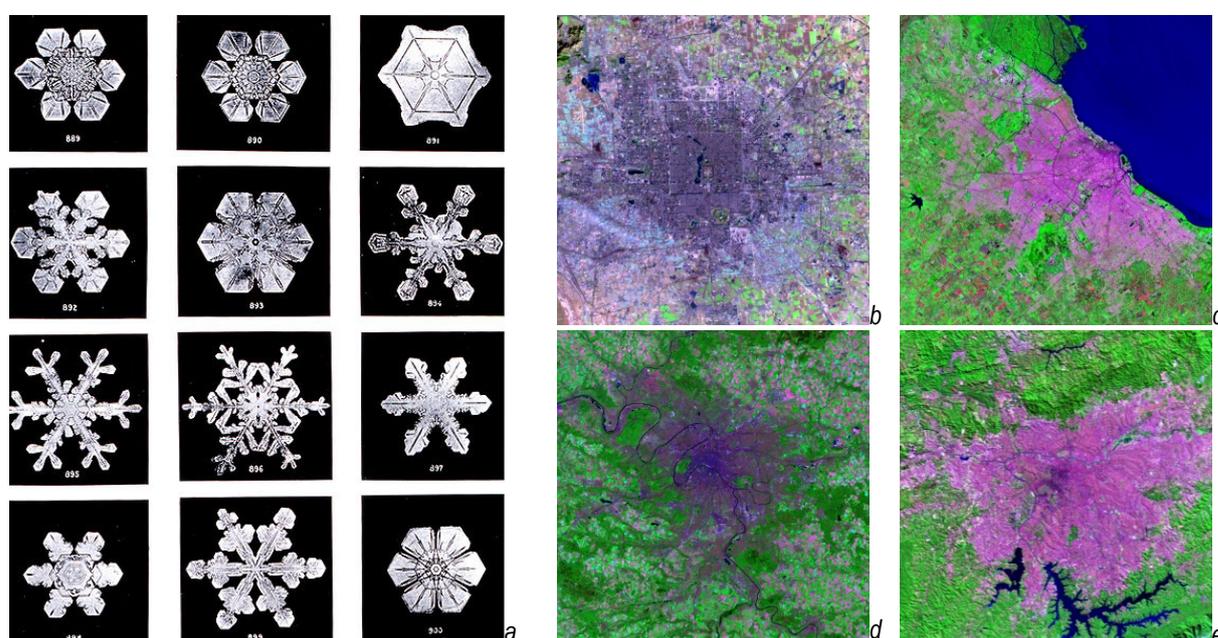


Figura 6.5: a) cristais de gelo “aleatórios” de (Bentley (1922; em <http://snowflakebentley.com/>); e imagens do satélite Landsat7 de b) Beijim; c) Buenos Aires; d) Paris; e) São Paulo, (em <http://www.ldeo.columbia.edu/~small/Urban.html>)

Semelhantes à formação dos cristais de gelo, cidades também ocorrem prioritariamente com morfologias concêntricas e por forças de coesão, mas as influências do ambiente de entorno são responsáveis pela configuração de estruturas diversas, que a definem como um claro exemplo de fenômeno emergente. A analogia entre as estruturas espaciais dos cristais de gelo fotografados por Bentley (1922) e a configuração urbana das cidades de Beijim, Buenos Aires, Paris e São Paulo, capturadas pelo satélite Landsat7, estão na figura 5.5, onde todos os sistemas ilustrados apresentam morfologias e estruturas espaciais com influências do ambiente de entorno.

Superfícies surfactantes, nanotecnologias e as irregularidades da paisagem de suporte.

A partir da perspectiva da influência do plano de suporte, ocorrem outras analogias entre o fenômeno urbano e a formação de gotas de água sobre superfícies. Pequenas quantidades de moléculas de água dispostas sobre um plano com certa proximidade, forças de coesão associadas à tensão superficial são

responsáveis pela formação de gotas que permanecem aderidas sobre a superfície. O mesmo ocorre no fenômeno urbano, onde iterações sócio-espaciais tendem a convergir e definir formações urbanas concêntricas. O fato é que, tanto na formação de gotas, quanto no fenômeno urbano, operam forças de coesão que configuram a essência destas estruturas, as quais inexistiriam se estas não ocorressem.

Entretanto, o quanto compacta e concêntrica é uma gota d'água (figura 5.6a) depende, além da tensão superficial, da configuração do plano em que está disposta, onde diferentes superfícies apresentam-se com diferentes propriedades ou capacidades de suporte. Uma forma de diferenciar a capacidade de suporte à formação de estruturas de gotas ocorre a partir da aplicação de substâncias surfactantes (como detergentes), quimicamente responsáveis por romper as forças de tensão superficial do líquido junto ao plano de suporte. Diferentes superfícies surfactantes configuram diferentes ângulos de contato entre a água e o plano, e conseqüentemente diferenciam o porte que ocorrem a formação de gotas, conforme apresentado na figura 5.6b.

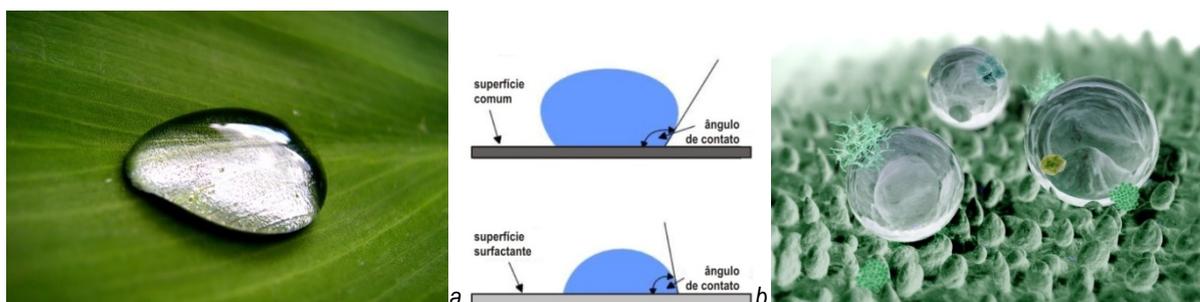


Figura 6.6: estruturas físico-químicas da tensão superficial: a) formação molecular; b) influência do plano de suporte; c) formações em nano escala associada ao lotus-effect (fonte: http://commons.wikimedia.org/wiki/Surface_tension).

Outra forma de alterar a capacidade de suporte à formação de gotas em um determinado plano está associada a uma propriedade que ocorre em nanoescala nas folhas da flor-de-lótus, denominada *lotus-effect* (Leydecker, 2008). A formação de nanorugosidades que podem ser desenvolvidas a partir de nanotecnologias, confere aos materiais capacidades hidrofóbicas ou água-repelentes que impedem a formação de gotas estagnadas sobre o plano e conferem propriedades auto-limpantes aos nanomateriais, conforme ilustrado na figura 5.6c.

Portanto, a diferenciação das superfícies de suporte à formação de gotas e a paisagem do ambiente natural de suporte à urbanização ocorrem de forma análoga. O fato de inexistir paisagens naturais como formações isotrópicas e o plano de suporte à urbanização se apresentar como um campo de irregularidades seria como se ocorressem áreas com maiores ou menores concentração de substâncias surfactantes, caracterizando locais com maiores ou menores capacidades de suporte à urbanização como ocorrem nos divisores de águas e em áreas adjacentes às linhas de drenagem.

De forma um pouco diferente, a analogia às propriedades nanotecnológicas e auto-limpantes do *lotus-effect* permite associação à transferência dos potenciais de crescimento que ocorrem na forma de um efeito de borda, conforme está na hipótese de pesquisa e implementado no mecanismo de simulação. A analogia às propriedades hidrofóbicas dos nanomateriais indicaria a existências de uma propriedade “urbano-repelente” nas áreas adjacentes aos recursos hídricos, com capacidades de transferir as tensões de crescimento incidentes para áreas com maior capacidade de suporte, ou menores nanorugosidades, como ocorrem os terraços planos junto aos divisores de água.

Por fim, as irregularidades em nanoescala presentes das folhas de lótus são evidentes mecanismos de resiliência do organismo vegetal, a qual permite ao organismo manter-se límpido e vivo, suportando situações que a sujeira impediria a realização da fotossíntese. Se a capacidade resiliente do *lotus-effect* está associada à capacidade de transferir potenciais de crescimento sobre fragilidades ambientais, permite também reforçar a associação da alternância morfológica do crescimento urbano a um mecanismo de resiliência urbana.

6.4. Compacidade e fragmentação: simultaneidades e convergência urbana.

A dinâmica urbana explorada neste trabalho permite associar às cidades, simultaneamente, conceitos considerados opostos pela ciência tradicional. Embora estes conceitos a seguir discutidos não sejam novidades aplicados aos sistemas urbanos, podem ser indicados avanços no processo de modelagem do crescimento urbano em relação às forças configuracionais urbanas, aos mecanismos de *feedback*, aos vetores de instabilidade interna e as resultantes alternâncias na forma urbana emergente, as quais estão a seguir descritas.

atração e repulsão urbana.

A hipótese de pesquisa aceita como válida permite ampliar a representação do ambiente urbano reduzido a um palco onde competem forças de atração e resistência, conforme indicado por Polidori (2004). Os resultados do trabalho foram alcançados aplicando uma nova força de repulsão, que contribui para descontinuidade espacial do sistema urbano, a qual ocorre quando convergem em um mesmo local, forças de atração e resistência.

No mecanismo de modelagem construído, o efeito de borda urbano sobre áreas adjacentes aos recursos hídricos é indicador da convergência locacional entre a atratividade urbana e resistência do ambiente natural, *tipping point* para a transição de fases do sistema, onde passam a atuar forças de repulsão discretas capazes de transferir tensões de crescimento de forma aleatória no sistema, de modo semiprobabilístico a ocorrer em função da centralidade urbana e dos atributos naturais.

Desta forma, o ambiente natural não é um atributo ativo do sistema, ou seja, não produz tensão e não é determinante para o crescimento, mas também não ocorre como uma mera resistência capaz apenas de constranger a forma urbana. As influências do ambiente natural são responsáveis por um evento discreto (*discrete event*), antes inexistente no modelo de crescimento SACI, catalisador da transição de fases (*phase transitions*) entre movimentos concêntricos e difusos na dinâmica do crescimento urbano. Um comportamento característico dos demais sistemas complexos, onde os recursos hídricos naturais de destacado valor ou importância ao sistema atuam com duplo papel na dinâmica do crescimento, promovendo tanto a restrição quanto a repulsão urbana.

feedback positivo e negativo

A assertiva do trabalho converge também com enunciados que indicam aos sistemas complexos operarem com mecanismos de *feedback* ou retroalimentação internas, permitindo o auto ajuste a partir do funcionamento do próprio sistema (Forrester, 1968; 1998; Reif, 1978). Segundo proposto por Polidori (2004), os mecanismos de *feedback* positivo diferenciam de forma crescente os espaços urbanos internos e caracterizam o crescimento em um primeiro momento; ao encontrar limiares de crescimento intraurbanos, mecanismos de *feedback* negativo operam na auto regulação do sistema, porém limitados a corrigir os problemas ambientais urbanos internos.

Como continuação da ideia dos mecanismos *feedback* originais do SACI, o trabalho propõe um novo mecanismo de *feedback* negativo, dedicado ao crescimento externo, uma vez que o auto ajuste do sistema não ocorre apenas quando os estoques construídos superam valores previamente estabelecidos na parametrização. Como está proposto, a partir da concentração de potenciais em áreas de borda dos recursos hídricos, o mecanismo auto ajusta o modelo redistribuindo as tensões de crescimento. Assim, o trabalho reforça a ideias que a dinâmica urbana, tanto interna quanto externa, de fato não pode ser explicada nem por retroalimentação positiva nem negativa isoladamente, mas pela composição entre eles. Neste jogo, a hidrografia atua com duplo papel, restringindo o crescimento onde operam *feedbacks* positivos, mas também como indicadores da repulsão onde crescimento opera em *feedbacks* negativos. Esta assertiva reforça ainda mais a ideia que o crescimento urbano não é mediado somente pelos condicionantes sociais, históricos, econômicos, tecnológicos e culturais, mas também pelos fatores naturais e suas transformações ao longo do tempo (Polidori, 2004).

forças centrípetas x centrífugas

Ao estreitar relações entre crescimento urbano e ambiente natural, indicando que além dos vetores de atração urbana operam também vetores de repulsão cidade-ambiente, o trabalho reforça também a ideia que a instabilidade interna do sistema é composta por forças centrípetas e centrífugas, resultantes

da quebra no equilíbrio dos sistemas complexos (Prigogine, 1996; Forrester, 1998). O crescimento que diferencia a forma urbana por um núcleo principal e núcleos difusos satélites, ocorre de forma análoga, por exemplo, às estruturas orbitais do sistema solar ou química dos átomos, onde a combinação de forças centrípetas e centrífugas mantém o sistema em permanente instabilidade.

Estes vetores da instabilidade urbana também estão associados por Polidori (2004), onde a tendência de concentrar centralidades e o crescimento lento é caracterizado por forças centrípetas, enquanto forças centrífugas são evidentes apenas no crescimento rápido e nos vazios urbanos que surgem nas bordas em expansão. Para este entendimento, a contribuição do trabalho permite que forças centrífugas e centrípetas sejam mais evidentes e simultâneas, independentes da velocidade que ocorre o crescimento. Forças centrífugas são também destacadas e prolongadas para áreas além das bordas da cidade, responsáveis por ampliar a área de interface urbano-natural e promover o crescimento difuso.

eficiência, equidade e qualidade ambiental; desempenho e sustentabilidade urbana.

Em suma, ao assumir que a cidade opera simultaneamente por forças de atração e repulsão, é definida por mecanismos de *feedback* positivo e negativo e as instabilidades internas evidenciam vetores centrípetos e centrífugos; como resultado morfológico de toda esta convergência teórica, a principal contribuição do trabalho é que a cidade ocorre simultaneamente por movimentos de compactação e fragmentação, caracterizando uma dinâmica que a define em essência como um fenômeno complexo. Se as características que definem os fenômenos complexos são responsáveis pela perpetuação do sistema ao longo dos tempos, o trabalho sustenta a tese que a ocorrência de formas compactas e fragmentadas pode ser associada a um mecanismo de resiliência e sustentabilidade urbana. Entretanto, para de fato ocorra, a permanência do fenômeno urbano depende também da eficiência do seu próprio funcionamento e das restrições e dificuldades que sua estrutura impõe ao desempenho das relações sociais e ambientais.

Não há dúvidas que a cidade concêntrica tem seu desempenho facilitado por possibilitar que internamente ocorram infinitas interações, promovendo a acessibilidade a todos os espaços e a devida intensidade das relações entre os agentes com compõem a forma urbana compacta. Porém, o modelo da cidade compacta, por muito perseguido pela teoria urbana, não tem se mostrado responsável por reduzir as custas sociais que ocorrem internas à cidade, não resolvendo os problemas de exclusão e segregação sócio-espacial urbano. Mais ainda, modelos concêntricos não permitem articulação morfológica à paisagem natural, urbanizando de forma indiscriminada os atributos do ambiente natural e contribuindo para a ocorrência de problemas ambientais intraurbanos.

Por outro lado, a fragmentação urbana que a priori se apresenta com maiores restrições à eficiência urbana, permite reduzir a conversão indiscriminada dos atributos da paisagem natural, facilitando práticas de preservação dos atributos de maior valor e interesse ecológico. Embora não sirva como um modelo de segregação sócio-espacial, evidências indicam que o modo que naturalmente ocorre a descontinuidade espacial da forma urbana fragmentada tende a manter a distribuição desigual das facilidades urbanas e a promover a segregação espacial. O fato é que, assim como a tendência a promover crescimento urbano difuso, a tendência à desigualdade espacial é intrínseca ao fenômeno urbano e precisa ser melhor compreendida pela teoria urbana. Ou seja, se na cidade contemporânea coexistem: a segregação e interação sócio-espacial; a artificialidade urbana e a natureza ambiental; a fragmentação e a concentração morfológica; cabe a teoria urbana indicar um modelo que envolva simultaneamente as ideias de eficiência, equidade e qualidade ambiental, em um novo paradigma da ciência que garanta de fato a sustentabilidade e permanência do fenômeno urbano (Krafta, 2008).

6.5. Modelo urbano policêntrico: conectividade e intensidade urbana.

Como está sustentado ao longo do trabalho, a dispersão da forma urbana é um fenômeno característico das cidades contemporâneas, ocorre simultaneamente nas grandes cidades do primeiro mundo pelos movimentos de suburbanização e do *urban sprawl*, mas também ocorre nos países do terceiro mundo na favelização e na formação de comunidades fechadas (*gated communitys*). No mesmo caminho, trabalhos que aproximam cenários urbanos e a paisagem da hidrografia são unânimes em indicar a emergência de formas urbanas polinucleadas, conforme estão nas imagens da figura 5.7 a seguir.

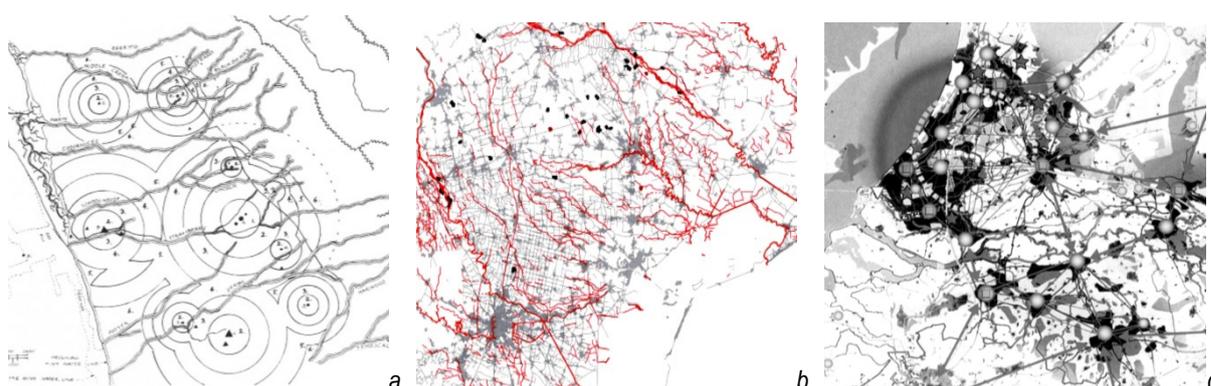


Figura 5.7: modelos urbanos polinucleados: a) Ecópolis, de Berkeley (Downton, 2009); b) Cities Dispersal do Vêneto italiano (Viganò, 2008; c) a descompactação da forma urbana (Jenks e Dempsey, 2005).

Ao levantar estratégias espaciais para a Ecópolis-Berkeley (Downton, 2009, figura 5.7a), para o crescimento da região metropolitana do Vêneto na Itália (Viganò, 2008, figura 5.7b) ou na busca por uma forma urbana futura sustentável (Jenks e Dempsey, 2005, figura 5.7c); todos são unânimes também ao indicar que a eficiência da forma polinucleada necessita de medidas que induzam a distribuição de

facilidades urbanas de modo a consolidar a descontinuidade espacial, a ocorrência dos vazios urbanos e a preservação de locais de maior valor do ambiente natural.

No mesmo caminho, os resultados capturados pelo mecanismo de simulação desenvolvido neste trabalho também indicam a formação de morfologias polinucleadas com forte tendência a concentrar as facilidades urbanas. De fato, o que está indicado é a possibilidade de se pensar em um modelo urbano fragmentado e eficiente, somente se as facilidades urbanas foram equanimente distribuídas entre o núcleo principal e núcleos satélites, induzindo a formação de policentralidades simultaneamente que a morfologia se articula à paisagem natural.

A cidade policêntrica é um produto da descentralização dos núcleos urbanos monocêntricos, transferindo as facilidades urbanas de modo natural ou induzido na dinâmica urbana, onde as cidades passam a conviver em trocas permanentes entre o núcleo principal e os núcleos urbanos adjacentes menores (Hall e Pain, 2006). A formação urbana policêntrica ocorre em três diferentes escalas, representadas na figura 5.8 a partir da cidade de Londres. Segundo Hall e Pain (2006), a policentralidade pode ocorrer desde uma rede hierárquica com as demais cidades globais (figura 5.8a; *global cities*; Sassen, 2001); em uma segunda escala de rede de cidades que conjuntamente configuram os centros globais (figura 5.8b; *world city network*), ou a policentralidades gerada a partir de um entorno urbano, com um núcleo central bem definido e reconhecida a existência de outros pequenos núcleos urbanos. Esta última escala se assemelha à proposta deste trabalho e não se refere às visões monocêntricas da cidade e reconhecer os aspectos da paisagem natural de suporte (figura 5.8c; *global city regions*).

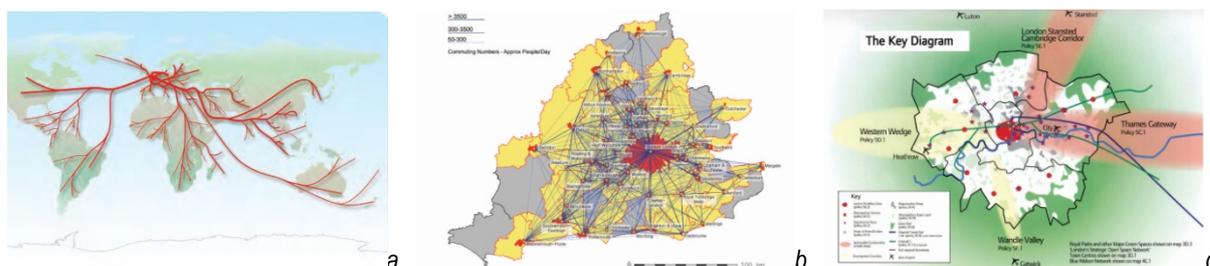


Figura 5.8; formações policêntricas urbanas em três escalas: a) global cities (Fuad-Luke, 2009); b) world city network (Hall e Pain, 2006); c) região urbana (Hall e Pain, 2006).

Nas três escalas indicadas para a policentralidade, os múltiplos núcleos urbanos ocorrem fisicamente separados, mas intimamente ligados por uma espécie de rede com alto grau de conectividade. Pode-se considerar que o modelo da policentralidade não passa da ideia da monocentralidade vista de outra escala (Hall e Pain, 2006). A figura 5.9 a seguir, representa esta alternância de escalas e a dependência da configuração do núcleo original, onde um modelo urbano polinucleado tende a reproduzir a essência que ocorre no modelo concêntrico inicial. Ou seja, se o núcleo central tende a concentrar a distribuição de facilidades urbanas, o modelo polinucleado mantém o predomínio concêntrico (figura 5.9a).

Por outro lado, se o núcleo central ocorre com a devida conectividade, a forma urbana emergente é efetivamente policêntrica definida por uma infinidade de conexões com tendência a melhor distribuir as facilidades urbanas (figura 5.9b).

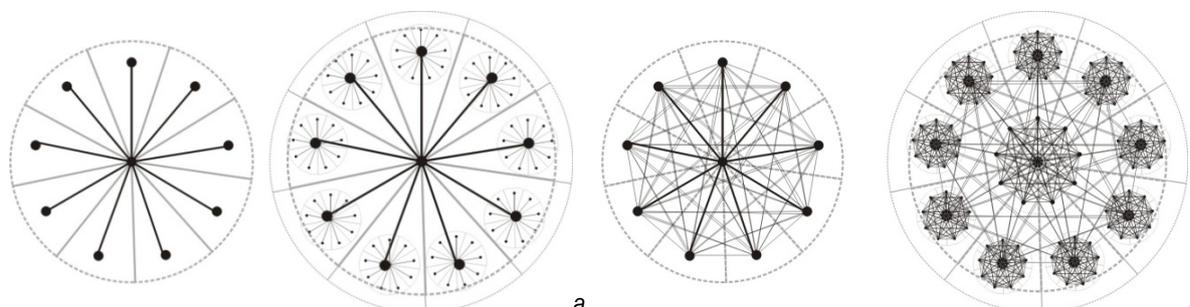


Figura 5.9: a) modelo concêntrico-polinucleado; b) modelo conectividade-policentralidade (adaptado de Hall e Pain, 2006).

Se a policentralidade ocorre articulada a paisagem das sub-bacias hidrográficas, as conexões intraurbanas coincidem com as áreas adjacentes às linhas de drenagem e no sentido inverso configura-se uma paisagem natural também polinucleada, onde são igualmente importantes as conexões entre os fragmentos dos atributos naturais. Da sobreposição entre a rede de conexões intraurbanas e os corredores ecológicos naturais que conectam os fragmentos da paisagem, definem-se pontos de interseção entre a rede urbana e a rede natural. Portanto, o ponto chave para manutenção do modelo urbano policêntrico e a preservação dos atributos da paisagem natural está no desempenho e na intensidade das conexões entre os fragmentos urbanos e naturais. Para a eficiência e coexistência entre cidade e ambiente, podem ser indicados aspectos importantes:

a) primeiro, as conexões urbanas devem operar efetivamente como ligações e não como vetores de crescimento para posterior urbanização adjacente, contribuindo para que a forma urbana retome seu estado de compactação e coesão inicial. A figura 5.10a representa uma conexão viária tão imponente quanto o recursos hídrico ao qual transpõe, contribuindo para a preservação das adjacências das redes viárias e hídricas (Forman, 2008).

b) a eficiência das conexões sobre os atributos da paisagem demandam o sentido mais amplo do termo, possibilitando todas as formas de ligação física (transportes, deslocamentos e transferências) ou virtuais (comunicação, informação, dados, sons), mantendo a interação sócio-espacial que define a essência do fenômeno urbano. A figura 5.10b representa um parque para olimpíada de Londres, junta a uma linha de drenagem, onde ocorrem múltiplas conexões que impedem a segregação entre ambas as margens do curso d'água (Rowland, 2006).

c) o modelo policêntrico pode vir a promover também novas estruturas de conexão natural, complementares aos corredores junto às linhas de drenagem para que ocorra manutenção das operações ecológicas entre os fragmentos naturais. As conexões naturais podem ocorrer superiores ou subterrâ-

neas a rede viária, como a figura 5.10c ilustra viadutos ecológicos próximo a Barcelona (Forman, 2008) ou conexões áreas sobre percurso interno aos centros urbano da figura 5.10d (Margolis e Robinson, 2007).



Figura 5.10: múltiplas e intensas conexões entre fragmentos urbanos e naturais que ocorrem na cidade policêntrica. a) conexão viária (Forman, 2008); b) conexão social (Rowland, 2007); c) viadutos ecológicos (Forman, 2008); d) conexão natural área (Margolis e Robinson, 2007).

Em suma, a proposta de um modelo da cidade policêntrica não ocorre de forma natural, não é intrínseca ao fenômeno urbano e para que efetivamente ocorra demanda de ações de planejamento que distribuam as facilidades urbanas, promovam as conexões necessárias e preservem atributos da paisagem natural. O fato é que, conexões eficientes em nome da policentralidade são capazes de manter a forma urbana fragmentada com a devida intensidade nas relações sócio-espaciais, simultaneamente que são preservados as funções ecológicas dos atributos da paisagem natural. No sentido inverso, se as conexões intraurbanas forem deficientes, além de diretamente causarem impactos na paisagem, permitem a cidade a reverter o processo e retomar a forma compacta inicial.

7. Referências Bibliográficas

ALBERTI, Marina (1999) **Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework**. Environment and Planning B – Planning and Design v. 26. London: Pion. p. 605-630.

ALBERTI, M; Marzluff J. M; SHULENBERGER, E; BRADLEY, G; RYAN, C; ZUMBRUNNEN, C. (2003) **Integrating Humans into Ecology: Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems**. BioScience 53(12), 2003:1169–1179

ALLEN, Peter (1997). **Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 275 p.

ALONSO, W. (1964). **Location and Land Use**. Cambridge, MA: Harvard University Press.

BARROS, Joana. (2004) **Urban Growth in Latin American Cities: Exploring urban dynamics through agent based simulation**. PhD Thesis. Londres: Casa.UCL.

BATTY, Michael (1997) **Cellular automata and urban form: a primer**. Journal of the American Planning Association 63: 266–74.

BATTY, Michael (2007) **Complexity in City Systems: Understanding, Evolution, and Design**. CASA Working Paper 117. 36 p.

BATTY, Michael (2009) **Urban Modeling**. In: International Encyclopedia of Human Geography.

BATTY, Michael (2009b) **Catastrophic cascades: extending our understanding of urban change and dynamics**. Editorial Environment and Planning B: Planning and Design 36

BATTY, Michael; LONGLEY, Paul (1994) **Fractal Cities: geometry of form and function**. Academic Press, London.

BATTY, Michael; XIE, Y.; SUN, Z. (1999). **Modeling Urban Dynamics Through GIS-Based Cellular Automata**. Computers, Environments, and Urban Systems, Vol. 23. p. 205-233.

BRASIL (2001) **Estatuto da cidade: Lei n. 10.257 de 10 de julho de 2001, que estabelece diretrizes da política urbana**. Brasília: Câmara dos Deputados/Coord. de Publicações.

BENGUIGUI, Lucien; CZAMANSKI, D.; MARINOV, M.; PORTUGALI, J. (2000) **When and Where is a City Fractal?** Environment and Planning B: Planning and Design 27: 507–519.

BENGUIGUI, Lucien; CZAMANSKI, D.; MARINO, M.; (2001) **City Growth as a Leapfrogging Process: An Application to the Tel Aviv Metropolis**. Urban Studies 38(10): 1819–1839.

BENGUIGUI, Lucien; CZAMANSKI, D.; ROTH, R. (2008) **Modeling cities in 3D: a cellular automaton approach**. Environment and Planning B: Planning and Design, Pion Ltd, London, vol. 35(3), pages 413-430, May.

- BENTLEY, Wilson A. (1922) **Photographing Snowflakes**. Popular Mechanics Magazine, Vol. 37, pag. 309-312.
- BINFORD, Michael W.; SAARINEN, J. A. (2009) **Hydrologic Consequences Associated with the Alternative Futures**. In: Shearer, A. W. *et al* (2009) Land Use Scenarios: Environmental Consequences of Development. CRC Press Taylor & Francis Group. p 107-135.
- BOOTH, Derek B.; BLEDSOE, B. P. (2010) **Streams and Urbanization**. In: Baker L.A. (ed.), The Water Environment of Cities Springer Science+Business Media
- BORSOI, Z. Ferrão, TORRES, S. (2008) **Política de Recursos Hídricos no Brasil**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/revista/rev806.pdf>>. Acesso em 10 junho 2008.
- BRAGA, Roberto (2003) **Recursos hídricos e planejamento urbano e regional**. Rio Claro: Laboratório de Planejamento Municipal - IGCE-UNESP.
- BURGESS, Ernest W. (1924) **The growth of the city: an introduction to a research project**. Publications of the American Sociological Society, 18:85-97
- BUZAI, Gustavo D. (2003) **Mapas Sociales Urbanos**. Buenos Aires: Lugar Editorial 384.p.
- CAMPANA; TUCCI, C. E. M. (2001) **Predicting Floods from Urban Development Scenarios: case study of of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil**. Elsevier: Urban Water 3: 113-124
- CARNEIRO, Paulo C. (2004) **Dos Pântanos à Escassez: uso da água e conflito na baixada dos Goytacazes**. Ed. Annablume / Coppe-UFRJ. 138 p.
- CHORLEY, R.; HAGGETT, P. (1967). **Models in Geography**. Methuen. London. (Trad. Español: La Geografía y los modelos socioeconómicos. IEAL, Madrid, 1971).
- CHRISTALLER, W. (1933) **Die zentralen Orte in Suddeutschland**., Gustav Fischer. Trans. C. Baskin, Bureau of Population and Urban Research, University of Virginia, 1954. (p. 28)
- CHRISTOFOLETTI, A. (1999) Modelagem de Sistemas Ambientais. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- CRUZ, Glenda (1984) Espaço construído e a formação econômico-social do Rio Grande do Sul: **uma metodologia de análise e o espaço urbano de Pelotas**. Dissertação de Mestrado. PROPUR-UFRGS. Porto Alegre, 1984
- CUNHA, Alberto.C. (1928) **Antigualhas de Pelotas**. A opinião pública. Pelotas.
- CZAMANSKI, Daniel; BENENSON, I.; MALKINSON, D.; MARINOV, M.; ROTH, R.; WITTENBERG, L. (2008) **Urban Sprawl and Ecosystems - Can Nature Survive?** International Review of Environmental and Resource Economics, 2008, 2: 321–366

- DENDRINOS, Dimitrios (1992) **The Dynamics of Cities: ecological determinism, dualism and chaos**. Routledge Taylor & Francis. London.
- DESONIE, Dana (2008) **Our Fragile Planet; Geosphere: The Land and Its Uses**. Chelsea House. New York.
- DOWNTON, Paul F. (2009) **Ecópolis: architecture and cities for a changing climate**. Springer Science+Business Media B.V.
- DUCROT, Raphaële (2004) **Articulating Land and Water Dynamics With Urbanization: an Attempt to Model Natural Resources Management at the Urban Edge**. Computers, Environment and Urban Systems, Pergamon, p. 85-106.
- ECHENIQUE, M. (1975) **Modelos: una discussion**. In. Martin, L.; March, L.; Echenique, M. La Estructura del Espacio Urbano. Barcelona: Ed. GG.
- FORMAN, Richard org. (2008) **Urban Regions Ecology and Planning Beyond the City**. Cambridge University Press. 478 p.
- FORRESTER, Jay W. (1968) **Principles of Systems**. Cambridge, Massachusetts.
- FORRESTER, Jay W. (1998) **Designing the Future**. Universidad de Sevilla, Spain 11p.
- FUAD-LUKE, Alastair (2009) **Design Activism**. Earthscan, USA. 270p.
- FUJITA, Masahisa; MORI, Tomoya (1997) **Structural stability and evolution of urban systems**. Regional Science and Urban Economics, 27. 399-442.
- GIBSON, James J. (1986) **The Ecological Approach to Visual Perception**. Psychology Press. 174p.
- GUTIERREZ, Ester J. B. (2004) **Barro e Sangue: mão-de obra, arquitetura e urbanismo em Pelotas [1777-1888]** Editora da UFPel. 549 p
- HALL, Peter; PAIN, Kathy (2006) **The Polycentric Metropolis**. Earthscan, London.
- HARVEY, David. (1985) **The urbanization of capital**. Oxford: Blackwells.
- HILLIER, Bill (1998). **The common language of space: a way of looking at the social, economic and environmental functioning of cities on a common basis**. London: UCL/Bartlett School of Graduate Studies. 23 p.
- HILLIER, Bill *et al.* (1993). **Natural movement**. Environment & Planning B 20. P. 29-66
- HOERING, Heidi; SEASONS, Mark (2005) **Understanding Indicators**. In. PHILLIPS, Rhonda (ed.) Community Indicators Measuring Systems, p-3-32. Ashgate.
- HOYT, H. (1939) **The structure and growth of residential neighborhoods in American cities**. Washington DC; Federal Housing Administration.

- IBGE (2007) **Contagem da População 2007** - População recenseada e estimada, segundo os municípios - Rio Grande do Sul – 2007.
- JANOSCHKA, Michael (2002) **El nuevo modelo de la ciudad latinoamericana: fragmentación y privatización**. EURE (Santiago) v.28 n.85 Santiago. 15 p.
- JANSEN, Harry (2001) **The Construction of an Urban Past: Narrative and System in Urban History**. Traduzido do Alemão para o Inglês Feike de Jong. Oxford New York. 383 p.
- JENKS, Mike; BURGESS, Rod (2000) **Compact Cities: Sustainable Urban Forms for Developing Countries**. London, Spon Press.
- JENKS, Mike; DEMPSEY, Nicola (2005) **Future Forms and Design for Sustainable Cities**. Elsevier's Science. Oxford, UK.
- JENKS, Mike; JONES, Colin (2010) **Dimensions of the Sustainable City**. Springer Science+Business. London
- JOHNSON, D.E. (2000). **Métodos multivariados aplicados al análisis de datos**. International Thomson Editores. México.
- JOHNSON, Steven (2003). **Emergência: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades, softwares**. Tradução de Maria C. P. Dias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed. 231 p.
- KOBYAMA, Masato; GENZ, Fernando; MEDIONDO, Eduardo (1998) **Geo-Bio-Hidrologia**. In: I Fórum Geo-Bio-Hidrologia: estudo em vertentes e microbacias hidrográficas (1: 1998: Curitiba) Curitiba: FUPEF, Anais, 1998. p.1-25.
- KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H. J. (2007) **Modelling Land-Use Change: Theories and Methods**. Springer, Netherlands
- KRAFTA, Romulo (1994). Modelling Intraurban configurational development. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 21. London: Pion. p. 67-82.
- KRAFTA, Romulo (1999). **Spatial self-organization and the production of the city**. Urbana 24. Caracas: IFA/LUZ. p. 49-62.
- KRAFTA, Romulo (2008) **Numerópolis: Mapeamento do Desempenho Urbano**. Projeto de Pesquisa do Grupo Sistemas Configuracionais Urbanos. UFRGS-PROPUR. 14p.
- KRÜGER, Mário J. T. (1996). **Definição de morfologia urbana**. Coimbra: Universidade de Coimbra., Departamento de Arquitetura. 12 p.
- KRUGMAN, P. (1996). **Confronting the mystery of urban hierarchy**. Journal of the Japanese and International Economics, 10, 399–418.
- LAMAS, José M. R. G. (1993). **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa: Dinalivro. 563 p.

LANNA, Antonio E. L. (1999). **Gestão das Águas**. Texto da disciplina de Gestão de Recursos Hídricos. IPH-UFRGS. (não publicado). 235p.

LEYDECKER, Sylvia (2008). **Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design**. Birkhauser, Berlin.

LIU, Jianguo *et al* (2007) **Complexity of Coupled Human and Natural Systems**. Science 317, pag.1513-1516

LIU, Yan (2009) **Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata**. Taylor & Francis Group. 204 p.

LONGLEY, Paul *et al.* (2004) **Geographic Information Systems and Science**. John Wiley & Sons, Ltd. 539 p.

MANDELBROT, B. (1982). **The Fractal Geometry of Nature**. W. H. Freeman. San Francisco.

MARGOLIS, Liat; ROBINSON, Alexander (2007) **Living Systems: Innovative Materials and Technologies for Landscape Architecture**. Birkhauser, Berlin.

MARZLUF, John M. *et al.* (2008) **Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature**. New York: Springer. 807 p.

MAKSE, Herna'h; ANDRADE JR., J.; BATTY, M.; HAVLIN, S.; STANLEY, E. (1998). **Modeling urban growth patterns with correlated percolation**. Physical Review Vol. 58 Number 6. The American Physical Society. p. 7054-7062.

MENDIONDO, Eduardo M. (1999) **Towards the Renaturalization of Riparian Areas in South America Through an Interdisciplinary Approach: Management Opportunities**. In: Deutscher Tropentag, 2000, Berlin. Proceedings. Bonn, Alemanha : ATSAF, 1999. v. 1.

MOSKOW, Keith (2008) **Sustainable Facilities: Green Design, Construction and Operations**. McGraw-Hill eBooks. 250 p.

MOURA, Rosa M. G. R. (2007) **Moradia Popular e Expansão Urbana – as vilas proletárias pelotenses**. História em Revista, Pelotas, 79 - 96, v. 12, v. 13.

MUMFORD, Lewis (1961). **A Cidade na História**. São Paulo: Martins Fontes, 2004.

NAVEH, Zev (1994). **Landscape Ecology – Theory and Application**. 2nd ed. New York: Springer-Verlag. 360 p.

NEWMAN, Paul; JENNINGS, I, (2008) **Cities as sustainable ecosystems: principles and practices**. Washington: Island Press,

NYSTUEN, J. (1968) **Identification of some fundamental spatial concepts**. In: BERRY J (ed) Spatial analysis. N Jersey, Prentice Hall

OSÓRIO, Fernando (1922) **A cidade de Pelotas**. Pelotas, Prefeitura Municipal. 20 p.

PARK, Robert E.; BURGESS, Ernest W. (1925). **The City: suggestions for Investigation of human behavior in the urban environment**. The University of Chicago Press.

PAUL, Michael J.; MEYER, Judy L. (2001) **Streams in the Urban Landscape**. In. MARZLUF, John M. *et al.* (2008) *Urban Ecology*. New York: Springer. 807 p.

PERES, Otávio M.; POLIDORI, Maurício (2009) **Modelagem Urbana e Cidades Visuais: fundamentos e convergências**. Anais do XIII Encontro Nacional da ANPUR. Florianópolis: ANPUR. 18 p.

POLIDORI, Maurício C. (2003). **Digitalização e mosaico de aerofotos da área urbana de Pelotas, RS, 1965**. A partir do cadastro de Sudesul Cartografia – SGC – Tombo 30206, disponível na Agência da Lagoa Mirim. Pelotas: UFPel. 9 fotos em escala 1/60.000.

POLIDORI, Maurício C. (2004) **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**. Tese Doutorado UFRGS PPGECCO. 352p.

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

PRIGOGINE, Ilya (1996). **Fim das certezas, o tempo, caos e as leis da natureza**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp. 199 p.

REIF, Benjamin (1978) **Modelos en La Planificación de Ciudades y Regiones**. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local.

ROAF, Sue; CRICHTON, David; FERGUS, Nicol (2009) **Adapting Buildings and Cities for Climate Change: a 21st Century Survival Guide** Second Edition. Elsevier Architectural Press. 400 p.

ROSA, Mario (1985). **Geografia de Pelotas**. Pelotas: UFPel.

ROWLAND, Jon (2006). **Urban Design Futures**. Routledge Taylor & Francis.

SANEP (1988) **Histórico do Saneamento de Pelotas [1871-1987]**. Prefeitura Municipal de Pelotas: Serviço Autônomo do Saneamento de Pelotas. 47 p.

SANTOS, Rosely (2004) **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos. 184p.

SARAIVA, Marcus; POLIDORI, Maurício C. (2007) **Bacias Urbanas: O Caso de Pelotas-RS**. Anais do XVI Congresso de Iniciação Científica da UFPel.

SASSEN, Saskia (2001) **The Global City: New York, London, Tokyo**. Princeton: Princeton University Press.

SASSEN, Saskia (2007) **A Sociology of Globalization**. Princeton: Princeton University Press.

- SAURIM, Eduardo (2005) **Crescimento urbano simulado para Santa Maria – RS**. Dissertação de Mestrado – PROPUR.UFRGS. Porto Alegre.
- SILVA, Juliana G.; POLIDORI, Maurício C. (2004). **Evolução urbana e parcelamento do solo em Pelotas, RS**. Pelotas: UFPel - FAUrb. [mídia digital]
- SOARES, Paulo R. R. (2002) **Del proyecto urbano a la producción del espacio: morfología urbana da cidade de Pelotas, Brasil, 1812-2000**. Barcelona: Universidade de Barcelona. Tese de Doutorado.
- SOJA, Edward (1989) **Post-modern Geographies**. London, Verso.
- SOUZA, Célia F. (2000) **Contrastes Regionais e Formações Urbanas**. Coleção Síntese Rio-grandense v.14. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS.
- SOUZA, Daniel; KOBAYAMA, Masato (2003) **Ecoengenharia em Zona Ripária: renaturalização de rios e recuperação de vegetação ripária**. In. I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias – Alfredo Wagner/Santa Catarina.
- SWERINGEN Jr, William Scott (2010) **Environmental City: People, Place, Politics, and the Meaning of Modern Austin**. University of Texas Press, Austin.
- TJALLINGII, S. (2005) **Carrying Structures: Urban Development Guided by Water and Traffic Networks** In Hulsbergen, E.D.; Klaasen, I.T.; Kriens I. (eds) *Shifting Sense Looking back to the future in Spatial Planning*. Techne Press, Amsterdam.
- TORRENS, Paul (2000). **How cellular models of urban systems work**. London: Casa, UCL. 68 p. Disponível em 18.novembro.2009 em http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm
- TORRENS, Paul; ALBERTI, Marina (2000). **Measuring Sprawl**. London: Casa, UCL. 43 p. Disponível em 18 de novembro de 2009 em http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm
- TUCCI, Carlos E. M.; VILLANUEVA, Adolfo O. N. (1999). **Flood control measures in União da Vitoria and Porto União: structural vs. non-structural measures**. Elsevier, Urban Water: 177-182
- TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (2003) **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 156 p.
- TUCCI, Carlos E. M. (2005) **Gestão das Inundações urbanas**. Unesco. Global Water Partnership: South America. 197p.
- TUCCI, Carlos E. M. (2008). **Águas Urbanas**. Estudos Avançados 22 (63); 97-112.
- UNESCO (2000). **Water Resources Systems Planning And Management**: Capítulo 13. Urban Water. 34p.
- UN-HABITAT (2008) **State of the World's Cities 2008/2009: Harmonious Cities**. United Nations Human Settlements Programme, Earthscan.

VALE, L. J.; CAMPANELLA, T. J. (2005) **The Resilient City: How Modern Cities Recover from Disaster**. Nova York: Oxford University Press.

VALENTE, Osvaldo F. (2009) **Reflexões hidrológicas sobre inundações e alagamentos urbanos**. Portal Vitruvius. ano 10, vol. 01, agosto 2009, p. 270. Cidades do Brasil.

VIEGAS Fº, João. S., LANNA, Antônio. E. (2006) **Gestão das Águas: Uma abordagem introdutória**. Texto da Disciplina de Planejamento de Recursos Hídricos e Bacias Hidrográficas – CGRRH-UFPEL. (não publicado). 103p.

VIGANÒ, Paola (2008) **Water and Asphalt: the project of isotropy in the metropolitan region of Venice**. In. Architectural Design Vol 78 John Wiley & Sons Ltd. England.

WENDROTH, Hermann R. (1852) **Obras de Herrmann Rudolf Wendroth – 1852**. Disponível em: <http://www.google.com/search?hl=en&q=Wendroth%2C+Hermann+Rudolf> Acesso: 24.agosto.2010.

Wheaton, W. (1982) **Urban Spatial Development with Durable but Replaceable Capital**. Journal of Urban Economics vol. 12, pp 53-67

WOLFRAM, Stephan (1984) **Cellular automata as models of complexity**. Nature. 311: 419–24.
