

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO URBANO E  
REGIONAL  
LINHA DE PESQUISA EM SISTEMAS CONFIGURACIONAIS URBANOS  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

EDUARDO SAURIM  
CRESCIMENTO URBANO  
SIMULADO PARA SANTA MARIA-RS



PORTO ALEGRE, 2005

**Autor:**  
**Eduardo Saurim**

**Título do trabalho:**

## **Crescimento Urbano Simulado Para Santa Maria-RS**

---

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de **Mestre em Planejamento Urbano e Regional** na área de concentração em Sistemas Configuracionais Urbanos.

---

**Orientador:**  
**Rômulo Krafta, PhD**

Porto Alegre, Junho de 2005

# Dados Catalográficos

SAURIM, E. **Crescimento urbano simulado para Santa Maria-RS**. Dissertação (Mestrado)-PROPUR-UFRGS, Porto Alegre, 2005. 140p.

# **Crescimento Urbano Simulado Para Santa Maria-RS**

---

**Britaldo Silveira Soares Filho, PhD, Universidade Federal de  
Minas Gerais**

-----

**Dra. Simone Zarpelon Leão, Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul**

-----

**Dr. Maurício Couto Polidori, Universidade Federal de Pelotas**

-----

## **Dedicatória**

*A MIH, parceira e cúmplice nessa jornada*

***agradeço a todos os que colaboraram e  
tornaram possível tanto o início, o meio quanto o  
fim deste trabalho...***

# Resumo

*Esta pesquisa é o resultado de uma busca por representações do fenômeno urbano que incorporem sua dinâmica de crescimento e possibilitem visualizações de suas transformações internas e da influência de seus componentes neste processo. Utiliza como ferramenta um modelo computacional de simulação de crescimento baseado em autômatos celulares estendidos, que incorporam as teorias de Potencial/Centralidade em um ambiente celular. Foi escolhida como estudo de caso a cidade de Santa Maria-RS e a diversidade de elementos que compõe o sistema urbano foi sintetizada, com o auxílio de técnicas de geoprocessamento, em atributos de input do modelo de natureza urbana, natural ou institucional. Após a montagem do cenário de simulação, que representou a cidade em um grid bidimensional de células de tamanho 285x285m, foi operada a calibração do modelo para que o crescimento realizado correspondesse aos padrões existentes na cidade, utilizando como base de comparação um intervalo de crescimento entre os anos de 1986 e 2002. Calibrado o modelo, foram realizadas simulações testando possíveis cenários de crescimento futuro para um período de 30 anos, e a análise dos resultados destes processamentos possibilitou especular sobre as propriedades e tendências de crescimento da cidade de Santa Maria.*

---

**PALAVRAS CHAVE:** *Crescimento Urbano, Modelos Configuracionais Urbanos, Autômatos Celulares, Geotecnologias*

# Abstract

*This dissertation is about the simulation of urban growth, by using as the central device a recently proposed extended cellular automata based model, supported by geographic information system techniques to input and output data and results. Its aim is to assess the model's usability and accuracy, as well as to expand its application to real cases. The referred model is called SACI and has been developed by Maurício Couto Polidori and transcript as a software by Juliano Granero, as a research conducted within the "Grupo de Pesquisa em Sistemas Configuracionais Urbanos" of the Federal University of Rio Grande do Sul. The simulation has used the city of Santa Maria, Brasil as the case-study, which was represented in the model as a 285X285 cell grid region. The simulation exercise, for calibration purpose, was carried out for the period between 1986 and 2002, to which relevant data was available. After adjusted, the model was run to generate different scenarios, corresponding to different development parameters and requirements. The results are meant to contribute both to the model further development and to the understanding of Santa Maria's possible future.*

---

**KEYWORDS:** *Urban Growth, Urban Modelling, Celullar Automata, Geotecnology*



# Sumário

<b>1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>16</b>
1.1.	Apresentação.....	16
1.2.	Objetivos do trabalho.....	17
1.3.	Estrutura da pesquisa.....	17
1.4.	Importância da pesquisa.....	18
<b>2.</b>	<b>Fundamentação teórica.....</b>	<b>20</b>
2.1.	Complexidade e auto-organização dos sistemas urbanos.....	20
2.2.	Condicionantes da distribuição espacial.....	22
2.3.	Modelando o crescimento urbano.....	25
<b>3.</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>28</b>
3.1.	Modelos de simulação do tipo Autômatos Celulares.....	28
3.2.	Adaptação dos modelos de Autômatos Celulares aos estudos urbanos....	32
3.3.	Integração entre SIGs e Autômatos Celulares.....	34
3.4.	O modelo SACI- Simulador do Ambiente de Cidade.....	36
<b>4.</b>	<b>Estudo de caso.....</b>	<b>47</b>
4.1.	A cidade de Santa Maria-RS.....	47
4.2.	Principais vetores de crescimento.....	48
<b>5.</b>	<b>Procedimentos.....</b>	<b>54</b>
5.1.	Cidade real x cidade representada.....	54
5.2.	Aquisição dos dados.....	56
5.3.	Montagem dos cenários no SACI.....	59
5.4.	Atributos utilizados.....	60
5.4.1.	Atributos Urbanos.....	61
5.4.2.	Atributos Naturais.....	64
5.4.3.	Atributos Institucionais.....	65
<b>6.</b>	<b>Calibração do modelo.....</b>	<b>75</b>
6.1.	Parâmetros de crescimento e horizonte de simulação.....	76
6.2.	Etapas da calibração.....	78
6.3.	Considerações sobre a calibração.....	87
<b>7.</b>	<b>Cenários de crescimento.....</b>	<b>91</b>
7.1.	Cenário de crescimento a partir de 1986.....	92
7.1.1.	Crescimento sem a presença da UFSM.....	92
7.2.	Cenários de crescimento com diferentes intensidades.....	96
7.2.1.	Crescimento com intensidades iguais a calibração.....	96
7.2.2.	Crescimento com intensidade superior.....	102
7.3.	Cenários de crescimento com a influência de pólos de atração.....	108

7.3.1. Crescimento com pólo de atração de alta intensidade instalado em localização de grande interesse imobiliário.....	108
7.3.2. Crescimento com pólo de atração instalado em área remota da cidade.....	115
7.4. Cenário de crescimento com os índices de aproveitamento estipulados pelo novo Plano Diretor.....	121
7.5. Considerações sobre os cenários de crescimento.....	126
<b>8. Conclusões.....</b>	<b>130</b>
<b>9. Considerações finais.....</b>	<b>137</b>
<b>10. Referências bibliográficas.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>143</b>

## Lista de figuras

<b>fig01:</b> exemplo de auto-organização nas moléculas de água mediante uma fonte de energia externa(calor). Fonte: PORTUGALI, J. (2000) Self-organization and the city. Berlin: Springer.p.10.....	21
<b>fig02:</b> Jogo da Vida- tendência de crescimento contínuo de comportamento caótico.....	30
<b>fig03:</b> Jogo da Vida- o crescimento atinge uma posição fixa e permanece assim durante todas as iterações.....	30
<b>fig04:</b> Jogo da Vida- a configuração encontra uma situação de estabilidade e segue oscilando entre as duas configurações indefinidamente.....	30
<b>fig05:</b> Jogo da Vida: situação de “morte” das células.....	30
<b>fig06:</b> tipos de vizinhança mais comuns em ACs.....	31
<b>fig07:</b> generalizações mais comuns dos conceitos básicos de ACs para adaptação aos estudos urbanos.....	33
<b>fig08:</b> exemplos de grafos representando relações topológicas entre pontos.....	34
<b>fig09:</b> Tipos de atributos e possibilidades de comportamento.....	38
<b>fig10:</b> tensões de crescimento que atuam no modelo: a) tensão entre duas célula; b)tensão axial nas células localizadas no caminho preferencial entre duas células; c) buffer da tensão axial entre 2 células; d) tensão do tipo polar para cada célula, com raio igual a 1 célula, e)mesmo caso com raio igual a 2 células; f) tensões difusas geradas por um par de células (do tipo 1 em laranja e tipo 2 em azul).....	40
<b>fig11:</b> janela de controle das distribuições de tensões.....	40
<b>fig12:</b> crescimento apenas com tensão axial.....	41
<b>fig13:</b> crescimento apenas com tensão axial de buffer.....	41
<b>fig14:</b> crescimento apenas com tensão polar.....	41
<b>fig15:</b> crescimento apenas com tensão difusa do tipo 1.....	41
<b>fig16:</b> crescimento apenas com tensão difusa do tipo 2.....	42
<b>fig17:</b> janela com os valores dos parâmetros de crescimento, com valores default.....	43

<b>fig18:</b> janela com escolha do nº de iterações, participação dos atributos e outputs a serem gerados pelo modelo.....	44
<b>fig19:</b> outputs do modelo.....	45
<b>fig20:</b> exemplo de outputs gráficos gerados pelo SACI para simulações de crescimento para a cidade de Pelotas-RS, sobre imagem do satélite Landsat7 ETM+. a) Fenótipo Urbano; b) Carregamento Urbano; c) Potencial de Crescimento; d) Centralidade Relativa tipo 1; e) Centralidade Relativa tipo 2; d)Centralidade Absoluta; e) Problemas Ambientais por Iteração; f) Problemas Ambientais Intra-Urbanos Acumulados; g) Resistências Ambientais.....	46
<b>fig21:</b> localização da cidade de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul.....	48
<b>fig22:</b> principais bairros e vias de Santa Maria.....	48
<b>fig23:</b> principais vetores de crescimento e resistência do município de Santa Maria-RS. Composição sobre imagem Landsat 7ETM+ para 2002.....	49
<b>fig24:</b> zona Leste da cidade, principais vetores de crescimento e resistência.....	50
<b>fig25:</b> zona Oeste de Santa Maria, principais vetores de crescimento e resistência.....	51
<b>fig26:</b> Centro de Santa Maria, principais vetores de crescimento e resistência.....	52
<b>fig27:</b> principais ocupações irregulares e vazios urbanos de Santa Maria. Fonte: Prefeitura Municipal de Santa Maria, Secretaria de Planejamento Urbano.....	53
<b>fig28:</b> cenas da cidade de Santa Maria.....	53
<b>fig29:</b> sobreposição do grid URBANO01, com células de 285x285m, ao uso do solo urbano extraído de imagem Landsat 7ETM+ para 2002. Na mudança de escala, as células que continham menos de 20% de uso urbano foram consideradas não urbanas, através da reclassificação da imagem.....	54
<b>fig30:</b> exemplo de grid com células de 150x150m sobre imagem de satélite Quickbird,e espaço posteriormente classificado em urbano ou não-urbano, demonstrando o grau de generalização que ocorre na mudança da escala do pixel.....	55
<b>fig31:</b> exemplos de tipos de dados utilizados na elaboração do trabalho: imagens de satélite, cartas geográficas, dados vetoriais e mapas infográficos.....	57
<b>fig32:</b> pontos utilizados no georreferenciamento em exemplo com imagem raster e vetorial.....	57
<b>fig33:</b> etapas do trabalho com imagens de satélite na preparação dos dados, utilizando o Idrisi3.2: classificação das imagens, reclassificação isolando cada atributo(neste caso o URBANO) e mudança no pixel para utilização de células de 285x285m.....	58
<b>fig34:</b> janela de criação dos atributos do SACI.....	59
<b>fig.35:</b> Esquema da sobreposição dos atributos urbanos URB01, URB02 e ATRADORES, com as possibilidades de valores finais para as intensidades do uso urbano do solo.....	63
<b>fig36:</b> índices de aproveitamento utilizados como resistências institucionais.....	67
<b>fig37:</b> atributo: URB01; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR INSTÁVEL.....	68
<b>fig38:</b> atributo: URB02; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR INSTÁVEL.....	68
<b>fig39:</b> atributo: SV; tipo: URBANO; comportamento:ATRATOR INSTÁVEL.....	68
<b>fig40:</b> atributo: UFSM03; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR FREEZING.....	69
<b>fig41:</b> atributo: VILABELGA; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR FREEZING.....	69
<b>fig42:</b> atributo ATRATOR01; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR FREEZING.....	69
<b>fig43:</b> atributo ATRATOR02; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR FREEZING.....	69
<b>fig44:</b> atributo: CAMPOS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL.....	70

<b>fig45:</b> atributo: MATAS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL.....	70
<b>fig46:</b> atributo: SOLO; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL.....	70
<b>fig47:</b> atributo: ÁGUAS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING.....	70
<b>fig48:</b> atributo: MORROS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL.....	71
<b>fig49:</b> atributo: CADENA; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL.....	71
<b>fig50:</b> atributo: RANDOMGRID; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL.....	71
<b>fig51:</b> atributo: MILITAR; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING.....	71
<b>fig52:</b> atributo: BASEAEREA; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING.....	72
<b>fig53:</b> atributo: UFSM01; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING.....	72
<b>fig54:</b> atributo: UFSM02; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING.....	72
<b>fig55:</b> atributo: LEIAMB; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL.....	72
<b>fig56:</b> atributo: RURAL; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL.....	73
<b>fig57:</b> atributo: PDDU; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL.....	73
<b>fig58:</b> esquema do processo de calibração do modelo.....	76
<b>fig59:</b> Santa Maria em 1986 em composição de imagem do satélite Landsat7 ETM+.....	77
<b>fig60:</b> Santa Maria em 20026 em composição de imagem do satélite Landsat7 ETM+.....	78
<b>fig61:</b> sobreposição dos grids representando a mancha urbana em 1986 e em 2002, com células de 285x285m.....	78
<b>fig62:</b> atributos urbanos para 1986.....	83
<b>fig63:</b> atributos naturais para 1986.....	83
<b>fig64:</b> atributos institucionais para 1986.....	83
<b>fig65:</b> comparação entre CellType de 2002 e a iteração 16 do Process31.....	85
<b>fig66:</b> comparação entre LoadU de 2002 e a iteração 16 do Process31.....	85
<b>fig67:</b> comparação entre CentrR1 de 2002 e a iteração 16 do Process31.....	85
<b>fig68:</b> sobreposição do output CellType existente em 2002 com o simulado na iteração 16 do Process31, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	86
<b>fig69:</b> evolução do CellType para o Process31, com cada iteração sobreposta a imagem Landsat7ETM+ para 2002.....	87
<b>fig70:</b> loteamentos não captados pela simulação do processamento 31.....	88
<b>fig71:</b> iteração 13,Process31, output de CentrR1, mostrando o surgimento de uma linha de centralidade no local aproximado onde futuramente seria implantada a BR287.....	89
<b>fig72:</b> atributos UFSM01, UFSM02 e UFSM03, retirados da simulação.....	93
<b>fig73:</b> comparação entre os outputs de CellType para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.....	93
<b>fig74:</b> comparação entre os outputs de LoadU para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.....	93
<b>fig75:</b> comparação entre os outputs de CentR1 para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.....	94
<b>fig76:</b> comparação entre os outputs de Potencial para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.....	94

<b>fig77:</b> gráficos representando a comparação da evolução do crescimento urbano e da conversão de território a cada iteração para simulações sem e com a presença do campus da UFSM.....	94
<b>fig78:</b> scattergramas correlacionado valores de CentR1 e Loadu, respectivamente. ....	94
<b>fig79:</b> evolução dos resultados de CellType sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	97
<b>fig80:</b> evolução dos resultados de LoadU sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	97
<b>fig81:</b> evolução dos resultados de Potencial sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	97
<b>fig82:</b> evolução dos resultados de CentR1 .....	98
<b>fig83:</b> evolução dos resultados de CentR2 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	98
<b>fig84:</b> evolução dos resultados de CentABS sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	98
<b>fig85:</b> evolução dos resultados de ResistE sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	98
<b>fig86:</b> gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.....	99
<b>fig87:</b> observações sobre a evolução de CellType, em imagem da iteração01 sobreposta à iteração30, com células de 85x85m sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	100
<b>fig88:</b> observações sobre a evolução de LoadU, em imagem da iteração30, com células de 85x85m sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002 .....	101
<b>fig89:</b> evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	103
<b>fig90:</b> evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002..	103
<b>fig91:</b> evolução dos resultados de Potencial a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	103
<b>fig92:</b> evolução dos resultados de CenR1 a cada 15 iterações.....	104
<b>fig93:</b> evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	104
<b>fig94:</b> comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com intensidade superior com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	104
<b>fig95:</b> comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com intensidade superior em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	105
<b>fig96:</b> comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com intensidade superior sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	106
<b>fig97:</b> comparações entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com intensidade superior.....	106
<b>fig98:</b> comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com intensidade superior sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	106
<b>fig99:</b> comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com intensidade superior sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	107
<b>fig100:</b> gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.....	107
<b>fig101:</b> pólo de atração.....	109
<b>fig102:</b> evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	109

<b>fig103:</b> evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	110
<b>fig104:</b> evolução dos resultados de Potencial a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	110
<b>fig105:</b> evolução dos resultados de CentR1 a cada 15 iterações.....	110
<b>fig106:</b> evolução dos resultados de CentR2 a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	110
<b>fig107:</b> evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	110
<b>fig108:</b> comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com pólo de atração com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	111
<b>fig109:</b> comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com pólo de atração em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	112
<b>fig110:</b> comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	113
<b>fig111:</b> comparação entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com pólo de atração.....	113
<b>fig112:</b> comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	113
<b>fig113:</b> comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	114
<b>fig114:</b> gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.....	114
<b>fig115:</b> pólo de atração remoto.....	115
<b>fig116:</b> evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	116
<b>fig117:</b> evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	116
<b>fig118:</b> evolução dos resultados de Potencial a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	116
<b>fig119:</b> evolução dos resultados de CentR1 a cada 15 iterações.....	116
<b>fig120:</b> evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	116
<b>fig121:</b> comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com pólo de atração com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	117
<b>fig122:</b> comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com pólo de atração em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	118
<b>fig123:</b> comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	118
<b>fig124:</b> comparação entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com pólo de atração.....	119
<b>fig125:</b> comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	119
<b>fig126:</b> comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	120

<b>fig127:</b> gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.....	120
<b>fig128:</b> atributo institucional PLANO DIRETOR.....	121
<b>fig129:</b> evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	122
<b>fig130:</b> evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	122
<b>fig131:</b> evolução dos resultados de Potencial a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	122
<b>fig132:</b> evolução dos resultados de CentR1 a cada 15 iterações.....	122
<b>fig133:</b> evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	122
<b>fig134:</b> comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	123
<b>fig135:</b> comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	124
<b>fig136:</b> comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	124
<b>fig137:</b> comparação entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR..	124
<b>fig138:</b> comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	125
<b>fig139:</b> comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.....	125
<b>fig140:</b> gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.....	125

## Listas de tabelas

<b>tabela01:</b> atributos utilizados nas simulações a partir de 2002.....	74
<b>tabela02:</b> células urbanas e de borda em 1986 3 2002.....	79
<b>tabela03:</b> evolução do número de células urbanas e de borda para o Processamento 31.....	80
<b>tabela04:</b> melhores resultados das correlações entre os outputs do Processamento 31 e do existente em 2002. ....	81
<b>tabela05:</b> processamentos com os melhores resultados nas correlações com a situação existente em 2002.....	82
<b>tabela06:</b> atributos utilizados na calibração para o processamento 31.....	84

# 1. Introdução

## 1.1. Apresentação

O rápido crescimento das áreas urbanas e suburbanas das cidades contemporâneas, principalmente as dos países em desenvolvimento, têm resultado em uma série de impactos sociais, econômicos e ambientais que desafiam cada vez mais os produtores e planejadores da cidade. Estudar o crescimento que já ocorreu e suas conseqüências possibilita prever estados futuros e seus possíveis impactos (O'SULLIVAN, 2001), e considerar os processos internos que dão forma à cidade como interligados e co-dependentes é fundamental para o sucesso de ações sobre a cidade. Entretanto, para a compreensão de um processo dinâmico como o crescimento, é necessário buscar ferramentas que possibilitem descrevê-lo e visualizá-lo de maneira adequada.

Representações estáticas como o mapa ou as representações do tipo vetorial ou raster possibilitadas pelos recursos computacionais descrevem de maneira satisfatória o fenômeno urbano quanto a seus estados em um tempo determinado, porém são insuficientes quando se busca a representação das forças que nele atuam e dos processos dinâmicos que desencadeiam suas mudanças. Para tanto, são necessárias “visualizações científicas” (BATTY, STEADMAN, XIE; 2004), que permitam representações da cidade como um fluxo de acontecimentos, como por exemplo, as representações realizadas através de modelos urbanos dinâmicos. Esses modelos são reproduções artificiais da cidade que a entendem como um processo emergente, com variáveis de input e dados de output que uma vez adequados à realidade que se pretenda representar, permitem especulações tanto sobre seus estados passados como prospecções de estados futuros.

O estudo aqui proposto é uma tentativa de demonstração do uso de modelos dinâmicos como ferramenta prática na investigação e representação de aspectos do crescimento urbano, considerando a complexidade existente em suas relações internas.



## **1.2. Objetivos do trabalho**

A realização do trabalho tem por objetivo principal simular a dinâmica de crescimento da cidade de Santa Maria-RS através do modelo configuracional urbano SACI-Simulador do Ambiente de Cidade, utilizando dados de natureza urbana, ambiental e institucional, para representar seu crescimento ocorrido nos últimos vinte anos, bem como explorar possibilidades de crescimento futuro visando contribuir para a ampliação do conhecimento sobre a cidade e sobre o modelo.

Como objetivos específicos, é possível destacar:

- a proposição de uma metodologia prática para a aquisição dos dados necessários para montar os cenários de simulação e para a calibração do modelo, que contribuam na utilização do modelo em pesquisas futuras;

- especular sobre a influência dos condicionantes naturais, urbanos e institucionais no crescimento de Santa Maria;

- identificar e discutir os padrões configuracionais que emergem do processo de crescimento urbano;

- testar em a influência de pólos de atração na dinâmica espacial urbana, com destaque para a Universidade Federal de Santa Maria;

- explorar, através de simulações, os efeitos dos índices de aproveitamento do uso do solo propostos pelo novo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Santa Maria, atualmente em estágio de desenvolvimento.

## **1.3. Estrutura da pesquisa**

A pesquisa situa-se no campo teórico dos estudos de Morfologia Urbana, centrada nas questões do crescimento urbano e nas possibilidades de representações visuais deste processo. Inicialmente trata da abordagem teórica a ser utilizada, introduzindo conceitos como auto-organização, complexidade e emergência adaptados aos estudos urbanos. Apresenta a modelagem urbana como ferramenta para descrever sistemas de cidades, suas aplicações e recursos para lidar com a dinâmica do

crescimento, como a utilização de técnicas de Autômatos Celulares, abordando a necessidade de adaptação destes à realidade urbana através do relaxamento e alteração de sua estrutura original.

O modelo utilizado é descrito, através da demonstração do seu esquema de funcionamento, seus inputs de dados e possibilidades de usos de diferentes tipos de tensões de crescimento, bem como os vários outputs gerados e as leituras urbanas que estes proporcionam. É tratada a adequação de um caso real para uma representação artificial de um sistema urbano e as limitações e possibilidades decorrentes deste processo. São descritos os critérios e procedimentos para a escolha e aquisição dos dados utilizados como variáveis nos processamentos, destacando o uso de técnicas de geoprocessamento, como a classificação de imagens de satélite e álgebra com mapas.

É demonstrado o processo de calibragem dos parâmetros de crescimento e pesos relativos dos atributos, etapa que exige um rigoroso processo de regulagens e simulações teste, que buscam uma aproximação com o padrão de crescimento apresentado pela cidade. Esta aproximação é feita através de correlações dos resultados obtidos nas simulações com os mesmos tipos de dados obtidos do cenário existente. Com o modelo calibrado, é possível testar possibilidades de crescimento com diferentes configurações, explorando cenários que recriam estados configuracionais passados e cenários de crescimento futuro. As especulações com diferentes variáveis, intensidades de crescimento e distribuições de tensões contribuem na elaboração das conclusões do trabalho.

#### **1.4. Importância da pesquisa**

Esse trabalho pretende ser uma colaboração aos estudos urbanos enquanto demonstra de maneira prática a utilização de um modelo configuracional para a exploração das características, particularidades e possibilidades de crescimento de um centro urbano. Pretende reforçar a idéia da modelagem como ferramenta de descrição urbana, onde o uso de tecnologia avançada, longe de levar a uma concepção tecnocrática de cidade, possibilita abordagens integradas e holísticas do processo de crescimento, que permitem a discussão sobre o impacto de políticas públicas, intervenções urbanas ou implantação de atividades indutoras de crescimento. Possuir

um modelo de simulação de crescimento futuro que ofereça possíveis cenários de desenvolvimento também permite a antecipação de problemas urbanos e ambientais que podem vir a ser ocasionados pelo crescimento, bem como observar o alcance futuro de estratégias de planejamento atuais.

Trata-se de um modelo de desenvolvimento recente e a sua utilização na pesquisa poderá contribuir para a sua popularização e a descrição dos procedimentos necessários para a sua aplicação a um de caso particular podem auxiliar futuros usuários do modelo. As especulações sobre o crescimento da cidade de Santa Maria irão contribuir para o maior entendimento da dinâmica espacial do município e proporcionar um relevante banco de dados para futuros estudos sobre a cidade.

## **2. Fundamentação teórica**

### **2.1. Complexidade e auto-organização dos sistemas urbanos**

A abordagem do fenômeno urbano que orienta a pesquisa considera a cidade como um sistema complexo. Isso significa afirmar que o fluxo de eventos que determina o crescimento urbano não se dá apenas por relações do tipo causa-efeito e que sua descrição não pode ser realizada com abordagens generalizantes, “de cima para baixo”. É entender que a cidade tem uma dinâmica própria não planejada, que emerge de uma relação “contraditória” entre forças globais que estruturam o espaço urbano e influenciam a sua apropriação e forças de caráter local, representadas pelas interações entre os múltiplos agentes produtores e consumidores do espaço. A incorporação desses conceitos para os estudos urbanos tem ocorrido com a assimilação de teorias provenientes dos campos da física e da matemática, podendo se destacar a aplicação de teorias de complexidade, como as da auto-organização proposta por Haken (1983) e das estruturas dissipativas apresentada por Prigogine (1980) aos sistemas urbanos, que abriram novas perspectivas de entendimento da cidade ao compará-la com alguns sistemas que se encontram na natureza.

Estes sistemas caracterizam-se por serem compostos por muitos elementos, por interações entre todos os componentes em diferentes graus de intensidade e por serem “abertos”, isto é, trocarem matéria, energia e informação com o ambiente onde estão. Sistemas arranjados dessa maneira possuem propriedades de auto-organização, o que significa que em certas situações uma força externa atuando sobre eles, mais do que um simples efeito de ação-reação, desencadeia novos processos internos e interdependentes pelo qual o sistema alcança um relativo equilíbrio, através de comportamento não-linear e aparentemente caótico.

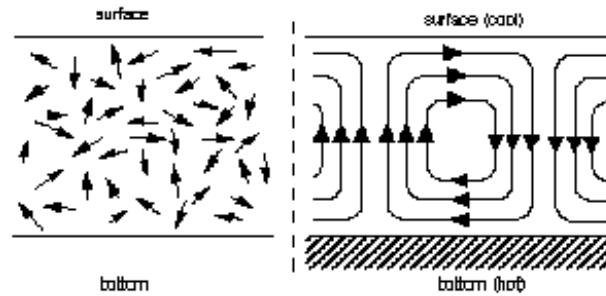


fig01: exemplo de auto-organização nas moléculas de água mediante uma fonte de energia externa (calor). Fonte: PORTUGALI, J. (2000) *Self-organization and the city*. Berlin: Springer.p.10

Desde seu surgimento o fenômeno urbano pode ser compreendido como um processo de auto-organização na busca de superação de desafios impostos tanto por fatores internos quanto externos, onde de um estado inicial caótico, emergiram determinadas regras e características configuracionais que de certa forma condicionam o crescimento urbano até os dias atuais. Para Portugali (2000) a auto-organização nos primeiros sistemas urbanos, ainda na pré-história, contribuiu para minimizar a instabilidade desses sistemas, que poderia facilmente destruir as frágeis estruturas pré-urbanas em formação.

A idéia de complexidade é dependente da noção de emergência. Em sistemas emergentes, um pequeno número de regras, aplicadas em um nível local e entre muitos objetos ou agentes, é capaz de gerar uma surpreendente complexidade na forma agregada. (TORRENS, 2000). Assumindo que a auto-organização emerge de uma combinação relativamente simples de regras, é possível especular sobre a natureza destas. Considerando as inúmeras necessidades humanas e anseios pessoais que surgiram no decorrer da história, é possível admitir que há certos conjuntos de regras espaciais as quais praticamente todos estão sujeitos. Necessidades primárias como consumir e estocar alimentos, proteção contra intempéries, deslocar-se com segurança, etc. se somaram a novas demandas espaciais criadas pela civilização. A maioria delas, porém, podem ser consideradas evoluções, especializações ou adaptações das necessidades espaciais elementares que deram origem à primeira cidade.

Como “regra configuracional” emergente desse processo que tem grande relevância para o entendimento da dinâmica espacial urbana atual e seus resultados morfológicos é possível destacar a que considera a proximidade do centro como fator de vantagem e que consiste na busca por melhores localizações e acessibilidade, que

se traduzem na busca por proximidade dos serviços e facilidades por parte do cidadão comum, e por melhores preços de venda para os promotores imobiliários. Para Torrens (2000) o fenômeno descrito pela teoria dos lugares centrais seria um exemplo claro de auto-organização.

## **2.2. Condicionantes da distribuição espacial**

Para operar representações do crescimento urbano, de acordo com uma abordagem sistêmica e considerando a complexidade de suas relações internas, como objetiva este trabalho, é necessário conhecer os condicionantes da dinâmica urbana e da distribuição espacial. Tanto as cidades como os paradigmas científicos evoluíram e se transformaram de maneira significativa, principalmente a partir da segunda metade do séc. XX. Descrições como o modelo monocêntrico de Alonso, adaptado das teorias neoclássicas de von Tünen, por muito tempo foram suficientes para descrever o uso e apropriação dos espaços urbanos (ANAS, 1998) porém são insuficientes para captar o crescente aumento da complexidade da forma urbana, que se reflete em fenômenos como policentralidade, *urban sprawl* e ocorrência de vazios urbanos. A cidade contemporânea tem cada vez se assemelhado mais a um complexo conjunto de retalhos que resiste a todo intento de generalização (CARTER, 1983).

À primeira vista, a observação do rápido crescimento das cidades aparenta uma dinâmica caótica, com uma vasta quantidade de eventos espaciais ocorrendo simultaneamente, sem aparente relação um com o outro. Porém uma observação mais atenta dos processos de ocupação e decadência dos espaços urbanos sugere que as formas construídas e suas posições relativas interagem de uma maneira não aleatória, e que resulta em um padrão de comportamento que pode ser observado e de certa forma, aferido e utilizado para fins de estudos e representações urbanas.

Analisando a evolução de uma cidade, é possível notar que em determinados momentos, o próprio crescimento e as vantagens do seu centro acabam ocasionando a sua saturação e neste processo, outras áreas da cidade acabam por concentrar atividades antes restritas apenas à região central. A presença de pólos de atração, menor custo da terra, economias de aglomeração e políticas de desenvolvimento

urbano são alguns dos fatores que ocasionam a formação de sub-centros dentro do tecido urbano. Mesmo possuindo regras próprias decorrentes de suas realidades locais, estes processos de descentralização são característicos de quase todas as grandes cidades. A policentralidade pode ser vista como uma resposta às demandas do crescimento urbano, garantindo sustentabilidade e rendimentos a diversos agentes e setores produtivos. Entretanto a polarização de atividades acaba por beneficiar certas áreas da cidade em detrimento de outras, ocasionando zonas de estagnação e decadência, as chamadas deseconomias urbanas.

Longe de serem aleatórias, as regras que regem o crescimento espacial das cidades são controladas por forças e tensões entre espaços construídos e espaços “a construir” e via de regra seguem uma lógica de procura por melhores localizações. Porém, se tivéssemos apenas a lógica da procura pelos lugares centrais operando na cidade, esta poderia ser facilmente descrita como uma simples sucessão de anéis concêntricos aonde a densidade de ocupação vai caindo gradualmente, como no modelo de Alonso (1964). As forças de atração e repulsão atuando entre os componentes do sistema urbano acabam por resultar em uma forma muito mais fragmentada, instável e contraditória, com uma geometria que se aproxima da geometria fractal, da qual tratam autores como Batty(1997), Saligaros (2000) e Portugali (2001). A ação isolada dos agentes produtores e consumidores do espaço tende a seguir regras de procura pelas melhores localizações e menores preços. Já a capacidade dos produtores da cidade em se apropriar, comercializar e criar vantagens locais é fruto de uma rede de Inter-relações e realidades econômicas e sociais em constante mutação.

Para Harvey (1985), as vantagens locais podem ser consideradas inovações tecnológicas que buscam o lucro excedente, fazendo parte desta busca a invenção de novas localizações. Essas possibilidades de inovação, apesar de seguirem uma lógica clara, agem em conjunto com outros fatores como agentes randômicos na distribuição espacial e contribuem para a fragmentação do tecido urbano. Em ambientes complexos, indivíduos não são totalmente capazes de analisar a situação e calcular sua melhor estratégia. Ao invés disso, pode-se esperar que eles adaptem sua estratégia com o passar do tempo baseados no que tem sido eficiente e o que não tem

sido eficiente (AXELROD, 1987). A procura pelas vantagens locacionais é feita de maneira isolada pelos agentes e com conhecimento parcial do sistema, mas o somatório dessas ações pode apresentar um padrão perceptível.

Assim, representações dinâmicas das cidades devem estar apoiadas em teorias e práticas que consigam reproduzir suas irregularidades, como a utilização de modelos urbanos que incorporem complexidade e auto-organização. A teoria de Potencial/Centralidade (KRAFTA, 1994, 1999), que é a regra configuracional principal do modelo utilizado nesta pesquisa, pode ser considerada um avanço nesse sentido por incorporar em um mesmo modelo teórico conceitos de acessibilidade (Ingran, 1971, Hillier, 1984), o potencial de atratividade das formas construídas e os efeitos de mercado (Harvey, 1994) sobre a dinâmica urbana. A teoria de Potencial/Centralidade sugere que as localizações urbanas possuem potenciais diferenciados para o desenvolvimento, que variam segundo seus atributos espaciais e morfológicos e das formas construídas a elas relacionadas. Dessa forma, diferenciação tipológica é tida como um vetor de desenvolvimento, que seria tão mais intenso quanto maior for a diferença espacial entre as variáveis de um mesmo sistema.

Centralidade é uma medida morfológica de diferenciação espacial, gerada por tensões entre unidades de forma construída alocadas em parcelas espaciais discretas e conectadas pelo tecido urbano, sendo mais central a parcela que participa com maior intensidade da rota de ligação mais eficaz entre cada um dos espaços com todos os outros, considerando os caminhos preferenciais e atritos de percurso. A centralidade pode então representar as vantagens locacionais no sistema e conter uma implícita descrição do potencial de mudança (KRAFTA, 1994). As vantagens iniciais tendem a mudar com a dinâmica urbana, pois uma vez descobertas ou criadas, tendem a serem seguidas por todos os agentes do sistema, aumentando o valor do solo e diminuindo a margem de lucro, o que torna o processo iterativo e cada vez mais complexo. Assim, maiores potenciais de mudança se concentram onde houver maior diferença entre valores de centralidade entre um lugar e seu entorno, juntando vantagens de localização com menor custo do solo.



### 2.3. Modelando o crescimento urbano.

Entender a cidade como um sistema permite considerar todos seus componentes como inter-relacionados e sujeitos a regras que interferem nessas relações. O espaço urbano é um receptáculo carregado de informações e significado, onde a vida cotidiana se desenrola e que se permite a inúmeras leituras e interpretações. Modelar esse espaço é buscar a representação desse todo através de uma linguagem matemática, lógica, física, analógica, icônica, gráfica, etc, e segundo uma ou mais teorias (NOVAES, 1981), e requer uma definição de qual aspecto da realidade urbana se espera captar.

Inicialmente modelos urbanos consistiam em construções teóricas sobre as relações que ocorrem no interior da cidade e regiões, como os modelos de Von Thünen, Christaller ou Lösch. A aplicação da modelagem como ferramenta prática tem início nos EUA a partir da segunda metade do séc XX com a chamada “Revolução Quantitativa”, que incorporou técnicas e conceitos da matemática e da física nas descrições espaciais e os primeiros modelos dessa fase surgem como auxiliares no planejamento de redes de transporte automobilístico. Utilizavam basicamente o conceito Newtoniano de gravitação universal, considerando que a influência mútua entre dois corpos decai com a distância, como o modelo de Lowry, que foi um dos primeiros a relacionar transporte e uso do solo. Desenvolvido para a cidade de Pittsburgh em 1964, o modelo Lowry foi o percussor de uma série de modelos que utilizavam geração de empregos, fluxos de transporte e atividades de uso do solo como geradores de demanda espacial. Estes modelos urbanos, assim como os existentes nas demais áreas das Ciências Aplicadas (Ecologia, Geografia, Epidemiologia, etc.), por possuírem um caráter reconhecidamente quantitativo, estavam desvinculados de recursos que possibilitassem a representação espacial dos seus resultados (ALMEIDA, C.; CÂMARA, G.; VIEIRA, M., 2003).

A abordagem sistêmica e o desenvolvimento de tecnologias computacionais (BATTY, 1976), trouxeram novas possibilidades de representações espaciais do fenômeno urbano. A implementação de tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) à modelagem urbana contribuiu na busca por representações mais abrangentes por permitir a manipulação simultânea de inúmeras variáveis físicas e análises integradas dos estados do sistema urbano. A representação das

características físicas da expansão urbana, porém, permaneceu em segundo plano até o trabalho de Batty (1988, 1994), que através do uso de teorias provenientes da física, como os processos de “diffusion-limited aggregation” (DLA), conseguiu implementar a dinâmica espacial do crescimento à modelagem urbana. Estes processos matemáticos, entretanto, tinham dificuldades para captar os padrões existentes no crescimento urbano. Foi com o refinamento do instrumental matemático proporcionado pela integração de conceitos como os de Autômatos Celulares, os quais concebem o espaço como uma grade de células com relações de vizinhança, que a modelagem dinâmica conseguiu alcançar um nível satisfatório na representação do crescimento urbano (ALMEIDA, C.; CÂMARA, G.; VIEIRA, M., 2003).

Modelar o espaço está intimamente vinculado ao que se deseja encontrar. Para estudos de crescimento urbano que tentam captar os aspectos morfológicos da mudança e suas tendências, os modelos dinâmicos aparecem como os mais indicados. Estes modelos tendem a buscar a simplicidade para explorar a complexidade, e de modo geral, baseiam-se em regras de crescimento mediadas por variáveis de diversas naturezas, enfatizando as interações entre todos os componentes de um sistema (LAMBIN 1994, *appud* ALMEIDA *et al*, 2003). Pode-se afirmar que o objetivo geral dos modelos dinâmicos é realizar a simulação numérica de processos do mundo real em que o estado de uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadoras (BURROUGH, 1998).

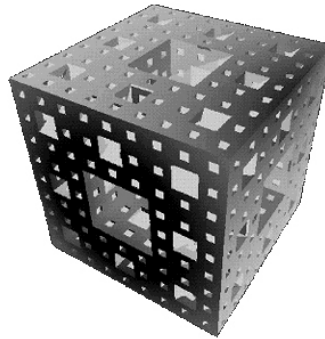
A utilização da computação na manipulação de modelos tornou possível o processamento de inúmeras variáveis paralelamente e também aplicar regras de crescimento na forma de algoritmos que permitem acrescentar, entre outros fatores, elementos randômicos aos processamentos. Modelos computacionais são estruturados de diferentes maneiras, mas sua operacionalização segue uma seqüência padrão através de um processo digital que envolve a manipulação de uma série de inputs que levam o modelo a uma série de outputs, que refletem a lógica subjacente por detrás da construção do modelo (BATTY, STEADMAN, XIE; 2004).

Modelos dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo e possibilitam observar o fenômeno urbano como um processo em

andamento, permitindo simulações de estados futuros. Estas simulações indicam possibilidades de acontecimentos, e sua aplicabilidade é dependente da comparação dos resultados de vários processamentos para um mesmo arranjo, baseados em um certo número de hipóteses e parâmetros. Simulações em modelagem surgem como uma estratégia de exploração dos efeitos do crescimento e da influência das variáveis que participam do processo. Não se trata da simples busca da previsão do futuro, o que seria uma tarefa infrutífera, ao contrario, é entender o futuro como um campo aberto de possibilidades, onde pequenas alterações no sistema podem provocar grandes mudanças.

O trabalho aqui desenvolvido é um exemplo prático da utilização da modelagem aliada a conceitos como complexidade e emergência na busca por representações dinâmicas do crescimento urbano. Utiliza um modelo híbrido de autômatos celulares e técnicas de grafos, que permite considerar tanto as relações de caráter local como as de caráter global. A descrição do território é realizada através do uso de operações de geoprocessamento e como variáveis podem ser incluídos tanto componentes urbanos como elementos do ambiente não construído, o que permite uma consistente adequação da realidade local ao modelo. A liberdade na escolha e valoração das variáveis pode ser considerada uma das características principais do modelo, pois permite uma particularização do objeto de estudo. Suas características dinâmicas permitiram operar simulações de crescimento para um centro urbano, e a partir delas, especular sobre as forças que atuam no sistema, o comportamento e a importância de seus componentes internos, o efeito de leis de uso e ocupação do solo e o consumo dos recursos naturais no processo de crescimento.

### 3. Metodologia



#### 3.1. Modelos de simulação do tipo Autômatos Celulares

A cidade é fluxo, e compreendê-la é poder enxergar a sua dinâmica. O crescimento de uma cidade é o resultado da inter-relação dos seus componentes, frente às tensões internas e externas de diversas naturezas, que compõem o “meio-urbano”. Sendo impossível lidar com todas essas variáveis, uma possibilidade é explorar as principais forças por detrás dos eventos, isto é, entender as regras do jogo. Nesse sentido, explorações de crescimento urbano utilizando modelos baseados em Autômatos Celulares (AC) têm conseguido suprir com bons resultados a necessidade de representações dinâmicas do espaço por aliarem conceitos de emergência e auto-organização às simulações de crescimento, e têm sido empregados na exploração de uma diversidade de fenômenos urbanos, inclusive para investigar como sistemas urbanos reais operam, utilizando para isso ambientes virtuais, na forma de softwares de modelagem urbana (O’SULLIVAN, 2002).

ACs básicos podem ser definidos como uma porção de espaço finita composta por um determinado número de parcelas ou células, organizadas em uma matriz ou grade. É um sistema espacial bastante simples, no qual o estado de uma célula em um arranjo, num determinado momento, depende do seu estado prévio, bem como do estado das células pertencentes a sua vizinhança, de acordo com um conjunto de regras de transição (WHITE & ENGELEN, 1997). Essas regras de transição atuam de forma local, isto, é, para cada célula em um período discreto de tempo, mas o efeito emergente dessas regras pode ser captado através de padrões de crescimento que tendem a aparecer após sucessivas iterações dos autômatos. São esses padrões de

crescimento que podem representar processos como crescimento urbano, desenvolvimento da cobertura vegetal ou propagação de incêndios florestais.

Os estudos pioneiros com ACs tiveram início na década de 40 com John Von Neumann e Stanislaw Ulam, que buscavam interpretações matemáticas para o comportamento auto-reprodutivo dos sistemas biológicos, a partir do conceito de computação universal, desenvolvido por Alan Turing, na década de 30. Um autômato pode ser considerado uma “máquina auto-operada”, que processa informação de maneira lógica, realizando a sua próxima ação após aplicar os dados recebidos de fora sob o comando de suas regras internas (LEVY, 1992 *appud* TORRENS, 2000). Este princípio permitiu a elaboração do “Jogo da Vida” por John Conway em 1970, que se tornou um exemplo clássico para demonstrar o funcionamento de ACs básicos. No Jogo da Vida, é dada uma regra simples de combinação entre as células do sistema, que podem estar ocupadas (vivas) ou vazias (mortas):

1-Regra da sobrevivência: uma célula ocupada, tendo dois ou mais vizinhos, permanece inalterada.

2-Regra de morte: uma célula ocupada vira uma célula vazia se tiver menos de duas vizinhas.

3-Regra de nascimento: se uma célula vazia tiver como vizinhas exatamente duas células ocupadas, torna-se ocupada também.

Dependendo das combinações feitas, o sistema pode permanecer iterando indefinidamente, com as células se reproduzindo de maneira caótica. Podem ocorrer também a emergência de padrões de combinações que uma vez alcançados, oscilam de maneira equilibrada. Podem ser encontradas configurações de estabilidade onde o número e a posição das células vivas permanecem inalterados indefinidamente, ou ainda, de todas as células vivas do sistema desaparecerem. Essa experiência simples pode demonstrar como nos ACs novas regras podem surgir ao longo das iterações, o que os qualifica como ferramentas ideais para se lidar com a complexidade e simular efeitos de auto-organização.

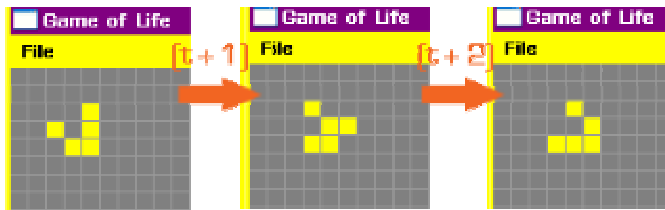


fig02: Jogo da Vida- tendência de crescimento contínuo de comportamento caótico.

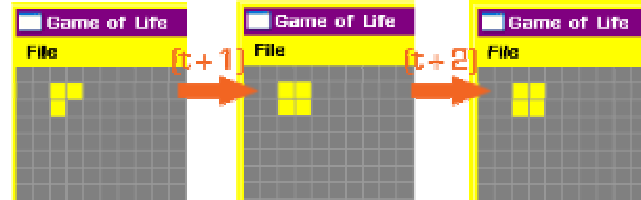


fig03: Jogo da Vida- o crescimento atinge uma posição fixa e permanece assim durante todas as iterações.

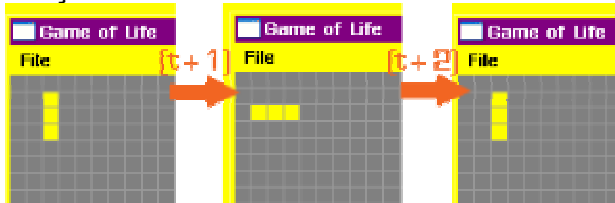


fig04: Jogo da Vida- a configuração encontra uma situação de estabilidade e segue oscilando entre as duas configurações indefinidamente.

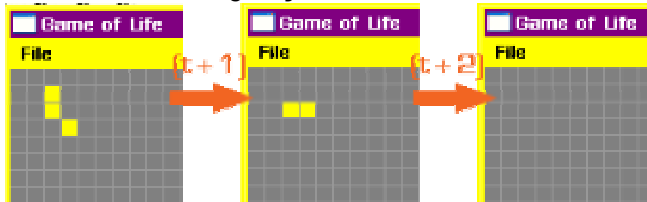


fig05: Jogo da Vida: situação de "morte" das células.

É marcante no caso dos ACs o fato de que pequenas mudanças nas regras ou nas condições iniciais podem fazer uma dramática diferença nos resultados finais. Nos AC o tempo é considerado uma grandeza discreta, pois os tempos anteriores não mantêm uma relação com os tempos posteriores, podendo ser dito que a evolução acaba com a dependência do estado inicial. Na descrição de Stephen Wolfran:

*Autômatos celulares são representações matemáticas de sistemas físicos nos quais o espaço e tempo são discretos, sendo as quantidades físicas assumidas dentro de um conjunto de valores também discreto. Um autômato celular consiste numa rede ou trama regular, usualmente infinita, com um valor discreto para cada lugar (célula). O estado de um AC é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada estado. Um AC envolve etapas discretas de tempo, nas quais os valores de cada variável num lugar são afetados pelos valores das variáveis da sua vizinhança, no tempo anterior. A vizinhança de um lugar é tipicamente representada pelos lugares imediatamente adjacentes ao seu redor. As variáveis de cada lugar são simultaneamente atualizadas, baseadas nos valores de sua vizinhança a cada passar do tempo, de acordo com o definido por um conjunto de regras locais (Wolfran, 1983: 55: 601-543)*

De acordo com Torrens (2000), um autômato celular elementar é composto basicamente por:

-**grid**, que é o espaço onde o AC se desenvolve.

-**a célula**, onde o autômato reside, que demonstra o seu estado.

-**a vizinhança do autômato**.

-**as regras de transição** que descrevem o comportamento do AC, e são geralmente formuladas no modo *IF, THEN, ELSE*.

-**o espaço temporal** em que o autômato existe. Em ACs, o tempo opera de maneira discreta, em passos iterativos.

Os tipos mais usuais de vizinhanças em ACs são a vizinhança de Moore e a vizinhança de Von Neumann, representadas a seguir. Entretanto, outros tipos de vizinhanças vêm sendo desenvolvidos, como vizinhanças hexagonais ou vizinhanças em três dimensões.

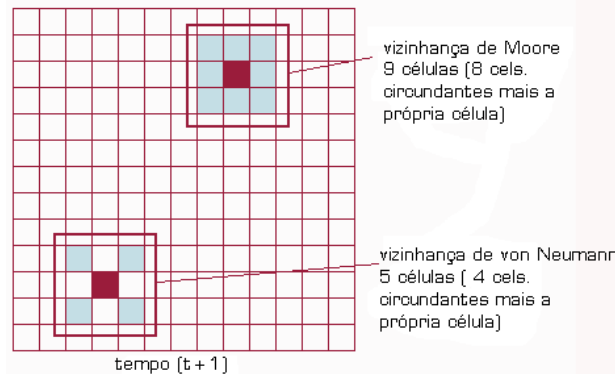


fig06: tipos de vizinhança mais comuns em ACs. Fonte: TORRENS, P. **How cellular models of urban systems work?** London: CASA, 2000. [disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers) ].p.15.

A grande vantagem do uso de ACs nos estudos urbanos é o seu caráter dinâmico, isto é, mais do que representar um estado do sistema urbano, representa um processo, onde conjuntos de regras e valores podem ser incorporados ao modelo, o que permite observar “reações” do sistema à influência dessas regras. Permitem também incorporar simultaneamente os conceitos de espaço absoluto ou Cartesiano,

isto é, o conceito de espaço como contêiner de eventos e coisas e onde pontos podem ser localizados em um sistema de coordenadas (COUCLELIS, 1997), bem como o conceito de espaço relativo ou Leibnitziano, que considera espaço como a relação entre objetos e eventos. Por se desenvolverem de maneira paralela, isto é, cada célula operando mudanças sob uma regra configuracional, em uma mesma iteração, os ACs permitem simulações de crescimento “de baixo para cima” (*botton-up*), o que traz mais realismo aos modelos e permite representar a emergência de padrões globais baseados no comportamento independente de suas partes. Outra vantagem trazida pelo crescimento relativamente independente de cada célula é a possibilidade de captar fenômenos de policentralidade, cada vez mais comuns nas cidades contemporâneas (TORRENS, 2000).

### **3.2. Adaptação dos modelos de Autômatos Celulares aos estudos urbanos**

Se o tipo de relação representada pelos ACs se assemelha ao que ocorre no interior da cidade, a aplicação do seu conceito original aos estudos urbanos apresenta certas limitações, já que o espaço urbano não é homogêneo e seu crescimento não segue apenas regras locais de vizinhança. A rede de inter-relações que atua no âmbito da cidade é transpacial e forças globais influenciam diretamente as relações locais, como por exemplo, a acessibilidade ou a centralidade de uma célula urbana em relação a todo o sistema. O solo possui particularidades inerentes que tornam algumas de suas parcelas mais “atrativas” do que outras. Dentro de uma região, a disponibilidade de solo exigida por cada atividade é fortemente determinada não apenas por fatores locais, mas pelas exigências da economia regional e nacional. ACs padrão são implicitamente formulados para maximizar sua generalidade, enquanto representações do usos do solo requerem especificações precisas. Para White & Engelen (1997) estas representações dependem de três tipos de fatores: as qualidades inerentes do solo, os efeitos de vizinhança gerados pelos tipos de atividades que nele se localizam e a demanda espacial gerada por estas atividades.



É necessário então relaxar algumas regras dos ACs padrão que não são compatíveis com o que acontece nas cidades ou regiões. Assim, o espaço não precisa ser homogêneo, tanto em suas propriedades ou estrutura, as vizinhanças não precisam ser uniformes, as funções de transição não precisam ser universais e o sistema não precisa ser fechado a influências externas (COUCLELIS, 1997). Para tanto, é possível realizar aproximações com outras teorias que incorporem regras globais de crescimento, como por exemplo, técnicas de grafos, que permitem relacionar todos os elementos do sistema através de suas relações topológicas, aplicando essas influências ao ambiente celular.

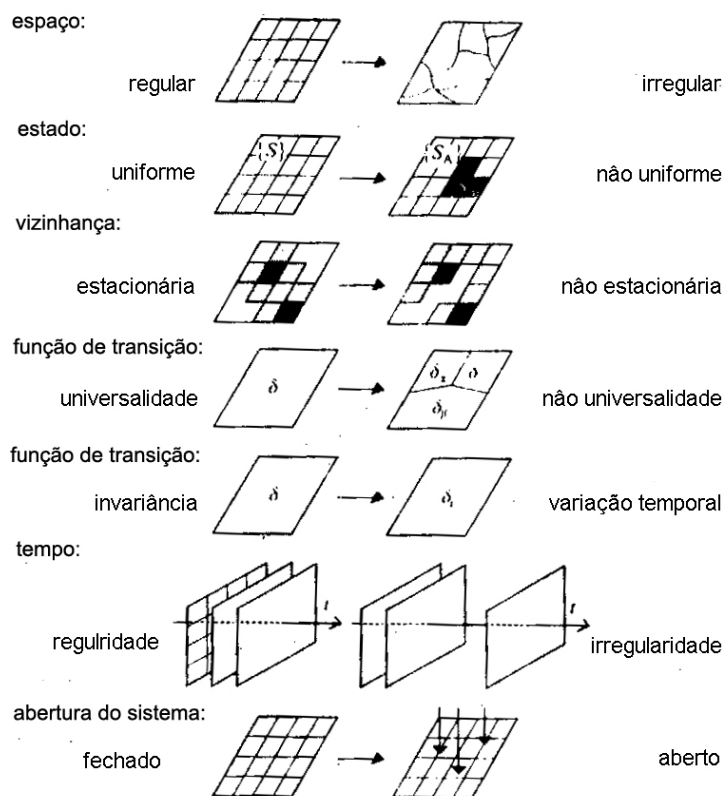


fig07: generalizações mais comuns dos conceitos básicos de ACs para adaptação aos estudos urbanos. Fonte: COUCLELIS, H. **From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation.** *Environment & Planning B*, vol 24, p. 165-174. London: Pion, 1997.p.12

Grafos são utilizados para representações topológicas, que mostram as conexões existentes no sistema. São formados por um número finito de elementos e pelas linhas que os conectam. Dos grafos podem ser tomadas várias medidas, como

conectividade, acessibilidade e sinuosidade. A teoria dos grafos é a base metodológica sobre a qual foi desenvolvido o modelo de Potencial/Centralidade.

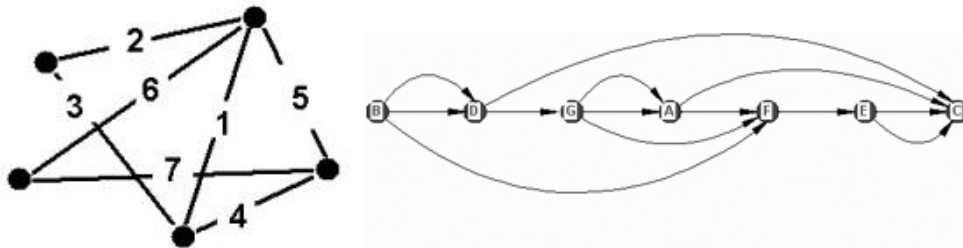
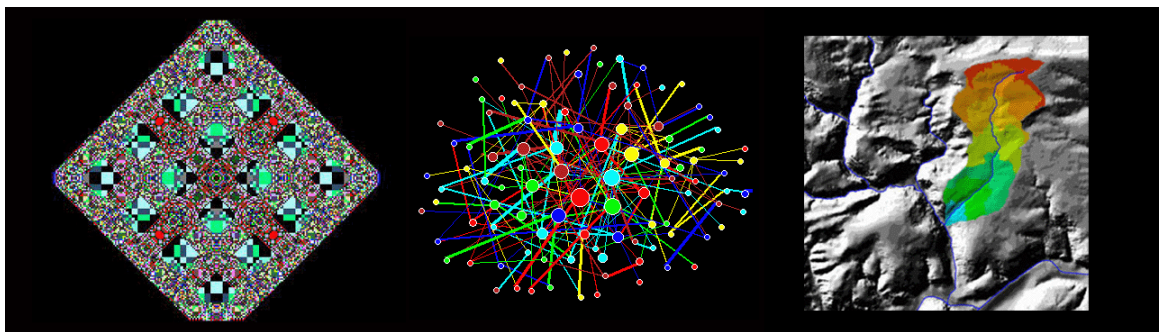


fig08: exemplos de grafos representando relações topológicas entre pontos.

Modelos com técnicas de grafos e ACs integrados têm conseguido superar a tradicional deficiência desses modelos de trabalharem em múltiplas escalas, quando usados separadamente (O'SULLIVAN, 2001). Enquanto grafos permitem apreensões da estrutura geral (ou na escala global) de um sistema, ACs têm operam nas relações de vizinhança (ou na escala local).

### 3.3. Integração entre SIGs e Autômatos Celulares



Geoprocessamento e Sistemas de informações Geográficas (SIG) são a base ferramental desta pesquisa, que utiliza um modelo de crescimento urbano implementado como um software de geoprocessamento. Além disso, a maioria das informações utilizadas para compor os cenários de simulação foram obtidas ou manipuladas em um ambiente de SIG. É possível definir um SIG como uma tecnologia

estabelecida para armazenar, organizar, recuperar e modificar informações sobre a distribuição espacial de recursos naturais, dados geo-demográficos, redes de utilidade pública e muitos outros tipos de dados localizados na superfície da terra (CÂMARA *et al.*, 2002).

É uma tecnologia que tem evoluído rapidamente e as possibilidades de uso dessas ferramentas têm sido cada vez mais ampliadas a áreas do conhecimento tão diversas como agricultura planejamento urbano, saúde pública, pesca, ecologia, entre outras. O corrente estágio tecnológico dos SIGs ainda enfatiza a representação de fenômenos espaciais de forma estática e isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em SIGs é o mapa. No entanto, um significativo conjunto de fenômenos espaciais, tais como escoamento de água da chuva, crescimento urbano e dispersão de sementes, entre outros, são inerentemente dinâmicos, e as representações estáticas não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios das Ciências de Geoinformação é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos dinâmicos (CÂMARA *et al.*, 2002).

Um SIG pode ser considerado o fundamento lógico de um modelo de AC porque funciona como o repositório para os dados espaciais utilizados pelo modelo. Um AC pode ser entendido como um SIG com uma dinâmica aplicada, com os estados celulares representando características do ambiente. O estado inicial de um AC pode ser estabelecido em um ambiente SIG através da manipulação e classificação de usos do solo, bem como pode ser operada a definição das escalas em que serão representadas as células do sistema (WHITE & ENGELEN, 1997). Como demonstra Wagner (1997), os requerimentos básicos de um AC podem ser providos pela linguagem *raster* representada nos SIGs, como a possibilidade de representação em múltiplos planos informação, análises de relações de vizinhança e a possibilidade de aplicação de conjuntos de regras de maneira sincronizada. Planos de informação representando passado, presente e futuro podem existir na forma de *layers* de um software de SIG.

O modelo que será apresentado a seguir é um exemplo da integração de geotecnologias com autômatos celulares e técnicas de grafos na busca por representações dinâmicas do crescimento urbano.

### 3.4.O modelo SACI- Simulador do Ambiente de Cidade



O modelo utilizado neste estudo é o SACI-Simulador do Ambiente de Cidade®, desenvolvido por Mauricio Couto Polidori (2003)<sup>1</sup>. O SACI funciona como uma extensão do software ArcView®<sup>2</sup>, aceitando *inputs* no formato *raster*. A saída de dados se dá no formato de *grids* temáticos que descrevem propriedades do sistema simulado quanto à centralidade celular, aos carregamentos urbanos, à classificação em urbano e não urbano, aos atributos naturais e aos problemas ambientais intra-urbanos, e ao desenvolvimento do ambiente natural. O modelo tem capacidade de simular crescimento espacial externo e intra-urbano simultaneamente, sendo possível estabelecer limiares de crescimento que quando ultrapassados acusam problemas intra-urbanos. Sua estrutura de funcionamento está baseada no uso de autômatos celulares estendidos (BATTY, 1998), que incorporam técnicas de grafos, implementadas em um ambiente de SIG.

Através dos grafos, é possível medir as relações topológicas entre todas as células do sistema, o que permite superar a dimensão local típica dos modelos AC e considerar relações remotas entre células (POLIDORI, 2004). Relações remotas constituem centralidade, que se traduz por hierarquia espacial e potencial de desenvolvimento (KRAFTA, 1994, 1999). Diferente do modelo original de

<sup>1</sup> O modelo SACI foi desenvolvido por Maurício Couto Polidori, sob a orientação de Rômulo Krafta e foi transcrito como software por Juliano Chaves Granero.

<sup>2</sup> ArcView é uma marca registrada da ESRI-Environment Systems Research Institute.

Potencial/Centralidade desenvolvido por Krafta, que analisa as relações do sistema a partir de medidas topológicas globais, no SACI o potencial é calculado através de relações de vizinhanças, e o raio de abrangência para o cálculo da centralidade é definido pelo usuário, sendo o *default* a vizinhança imediata, que pode ser estendido a todas as células do sistema. O potencial de crescimento é distribuído às células do sistema, que se transformam a partir de relações típicas de autômatos celulares. As características particulares de cada célula garantem que essas mudanças se dêem de maneira diferenciada pelo sistema.

A cidade é considerada como uma grelha bidimensional onde as células, de tamanho definido pelo usuário, representam porções de espaço de um sistema urbano. As células podem representar dois tipos de espaço, o *ambiente não-urbanizado*, que são as células do tipo **natural**, e o *ambiente urbanizado*, que são as células que possuem fenótipo **urbano**, que podem ser desde um vazio urbano até áreas de grande densidade.

As variáveis utilizadas podem ser de **espaço** e de **atributo**. As variáveis de espaço são as características das células quanto a suas dimensões e localização relativa no *grid*. As variáveis de atributos utilizadas pelo modelo podem ser de natureza urbana, natural e institucional, oferecendo **atração** ou **resistência** ao crescimento. Suas intensidades e pesos são definidos pelo usuário, o que permite adequar as simulações de acordo com as características locais das áreas de estudo e os interesses da pesquisa.

O esquema a seguir mostra como pode ser o comportamento dos atributos:

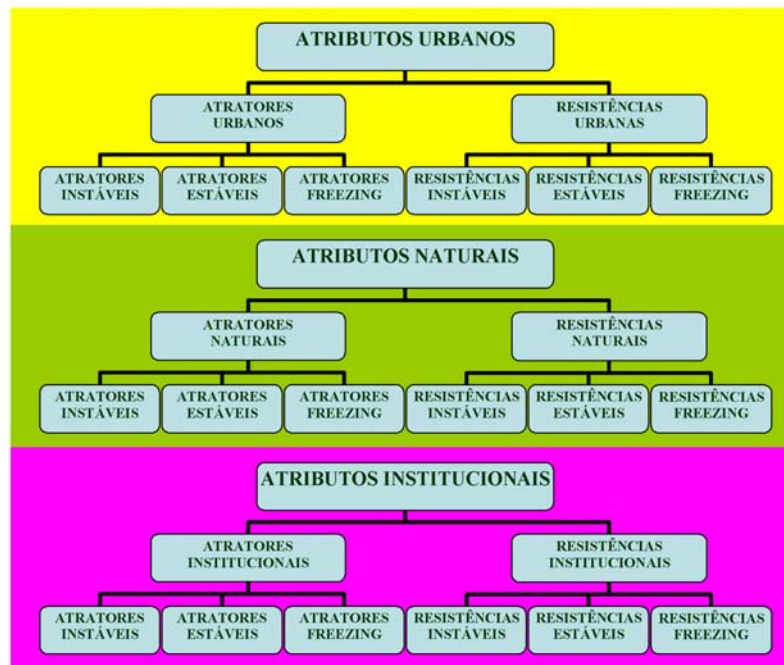


fig09: Tipos de atributos e possibilidades de comportamento. Fonte: POLIDORI, M. *Modelando crescimento com o SACI- Simulador do Ambiente de Cidade: O caso de Barra do Ribeiro*. Porto Alegre: PPGECO-UFRGS, 2004. 147p.

De uma maneira geral, Atributos **Instáveis** são os que participam da simulação, mudam de intensidades e podem ser consumidos ou transformados, como, por exemplo, matas, carregamentos urbanos ou imposto progressivo sobre o uso do solo. Atributos **Estáveis** participam da simulação, mudam de intensidades, mas não podem ser consumidos ou substituídos, como por exemplo, declividade, sistema viário ou índices de aproveitamento do solo. Atributos **Freezing** são os que interferem no processo, mas não são consumidos, não se transformam e nem alteram suas intensidades, como por exemplo, a água do mar, um aeroporto ou áreas militares. Estes padrões de comportamento dos atributos são válidos tanto para os atratores quanto para os resistentes do tipo urbano, natural ou institucional.

No SACI, entre cada par de células do sistema existe uma tensão dada pelos seus carregamentos. A tensão é calculada através do produto do carregamento total de cada célula pelo carregamento total de cada uma das outras que lhe são alcançáveis, de acordo com a formula:

$$T_{ij} = (\text{carregNi} + \text{carregUi} + \text{carregli}) \cdot (\text{carregNj} + \text{carregUj} + \text{carreglj})$$

Onde:

$T_{ij}$  = tensão entre as células i e j; **carregN** = carregamento natural; **carregU** = carregamento urbano; **carregl** = carregamento institucional

O produto das tensões é distribuído às células do sistema de três formas:

**-AXIAL:** considera os caminhos preferenciais entre as células do sistema, sendo maior em células que participam com maior intensidade das rotas de ligação entre outras células. Pode ser considerada como associada à circulação no sistema e aparece no modelo de duas maneiras: do tipo A1, referente ao caminho preferencial propriamente dito; e do tipo A2, ou Axial de buffer, referente às células na vizinhança do caminho preferencial.

**-POLAR:** associada ao carregamento próprio de cada célula, representa áreas de abrangência de elementos locais do sistema e é maior no entorno das células que geram maiores tensões. É possível considerar que representa uma diferenciação espacial de escala mais local.

**-DIFUSA:** relacionada a processos mais imprevisíveis da ocupação do espaço, gerando áreas de maior probabilidade para a ocupação. Pode ser de dois tipos: C1- que representa a promoção imobiliária formal que busca a ocupação de áreas de maior atratividade representadas pelas melhores localizações. No modelo, prioriza a ocupação aleatória de células com maiores centralidade e menores resistências, representando a demanda espacial de classes médias e altas. C2- que busca captar processos de autopromoção imobiliária e ocupações informais que reproduzem o comportamento de classes econômicas mais baixas, que acabam por ocupar localizações de menor valor do solo. No modelo, aumenta a probabilidade de ocupação de células com menores centralidades e maiores resistências.

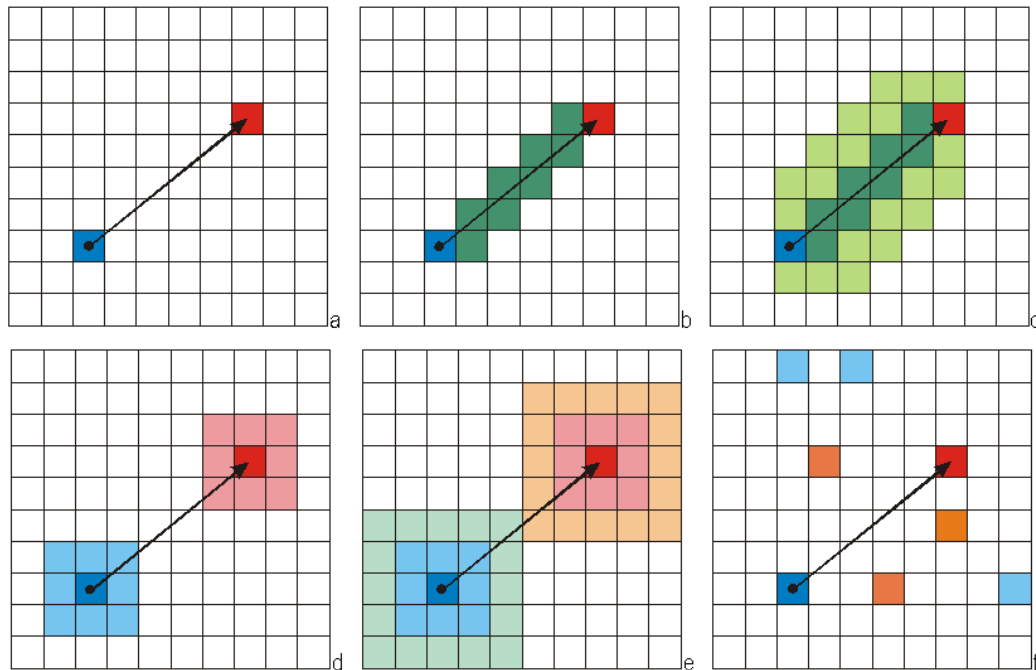


fig10: tensões de crescimento que atuam no modelo: a) tensão entre duas células; b) tensão axial nas células localizadas no caminho preferencial entre duas células; c) buffer da tensão axial entre 2 células; d) tensão do tipo polar para cada célula, com raio igual a 1 célula, e) mesmo caso com raio igual a 2 células; f) tensões difusas geradas por um par de células (do tipo 1 em laranja e tipo 2 em azul). Fonte: POLIDORI, M. *Simulação do Ambiente da Cidade*. Belo Horizonte: ANPUR, 2003. p.09.

No modelo, as distribuições das tensões podem ser escolhidas pelo usuário, através de porcentagens da tensão total de crescimento. No input *default* do SACI, apresenta-se da seguinte forma:

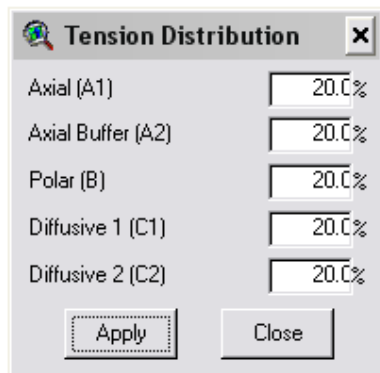


fig11: janela de controle das distribuições de tensões.

É esperado que cada tipo de distribuição de tensões resulte em um tipo de crescimento, e é a combinação da participação percentual de cada uma delas na simulação que irá caracterizar o crescimento no modelo. Essa escolha é um processo fundamental da etapa de calibração, como será demonstrado mais adiante no capítulo. 6. Polidori (2005) demonstra o padrão de crescimento para cada uma das



possibilidades de distribuição de tensão através dos exemplos<sup>3</sup> a seguir, que foram realizados utilizando-se apenas duas células em um grid sem resistências, com as mesmas intensidades de crescimento.

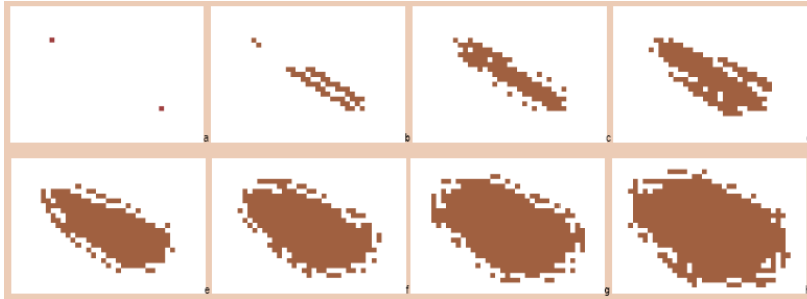


fig12: crescimento apenas com tensão axial.

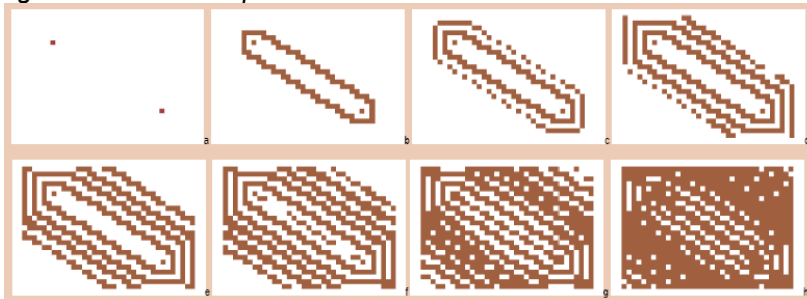


fig13: crescimento apenas com tensão axial de buffer.



fig14: crescimento apenas com tensão polar.

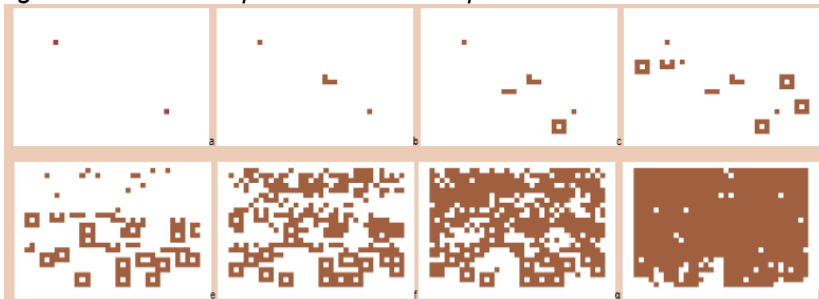


fig15: crescimento apenas com tensão difusa do tipo 1.

---

<sup>3</sup> Exemplos utilizados em: POLIDORI, M. **Crescimento Urbano e Ambiente: Um estudo exploratório sobre o futuro e o crescimento das cidades**. Tese (Doutorado em Ecologia de Paisagem) PPGECCO-UFRGS, Porto Alegre, 2005.p. 56-59

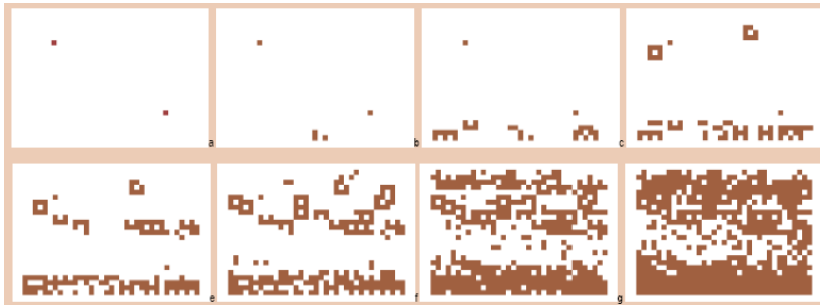


fig16: crescimento apenas com tensão difusa do tipo 2.

O modelo segue a lógica do modelo de Potencial/ Centralidade, o que permite considerar que o crescimento ocorre principalmente nas células com maior potencial de renda, possibilitado pela melhor localização, que é dado pelo valor de Potencial de Crescimento Celular (PotCel). Esse potencial é resultado dos valores de centralidade encontrados nas células, considerando os carregamentos do sistema e as resistências ao crescimento, e tende a ser maior em células ainda não ocupadas, porém próximas a células com carregamentos e alta centralidade.

O modelo incorpora vários parâmetros de controle e distribuição dos carregamentos e das tensões de crescimento. Simulações com o SACI possibilitam estudos de evolução urbana, o mapeamento dos efeitos de políticas de planejamento urbano, a exploração de processos como gentrificação e *urban sprawl* e a influência de pólos de atração de crescimento nos sistemas urbanos.

O transcorrer do tempo no modelo é definido pelas iterações e os resultados discretos para cada uma delas, como é característico nos processos de ACs. O modelo não possui entrada de tempo em valores reais, sendo que cada iteração ocorre em um intervalo de tempo  $t+1$  em relação à iteração anterior. A adequação a um período de tempo real pode ser feita pelo ajuste das intensidades de crescimento, e calibrações para casos específicos podem ser feitas através da comparação com índices de crescimento observados na evolução urbana da cidade. Em cada iteração, o número de células que atinge crescimento deve ser parametrizado por um valor  $\rho$  (rô), que é um percentual de células que poderão crescer, variando de 0 a 100% das células que têm algum potencial; esse parâmetro implica em diferentes intensidades de crescimento. As simulações também incorporam a depreciação dos bens construídos, e a cada iteração

os valores de carregamento urbano preexistentes diminuem, através de um parâmetro  $\mu$  (mi) de desvalorização imobiliária. O parâmetro  $\psi$  (phi) permite especificar a partir de quais valores de potencial de crescimento a urbanização efetivamente ocorre. No default do modelo é igual a zero, o que significa que vencidas as resistências, a célula assume o fenótipo urbano. A alteração desses valores indica que só quando o potencial alcançar o valor especificado é que de fato ocorrerá a urbanização, o que pode ser usado para simular cenários de especulação imobiliária na forma de retenção fundiária.

Os índices de crescimento externo e interno são regulados através dos parâmetros  $\lambda$  (lambda) externo e  $\lambda$  interno, ao qual está elevado o Potencial de Crescimento Celular. Diferentes valores para  $\lambda$  possibilitam simulações com crescimento mais acelerado ou mais lento, sendo esperado que para diferentes velocidades ocorram crescimentos morfologicamente diferentes (POLIDORI, 2003). O input default dos parâmetros no modelo é descrito pela figura a seguir, sendo que para as calibrações esses valores, em destaque o lambda, devem ser alterados e testados:

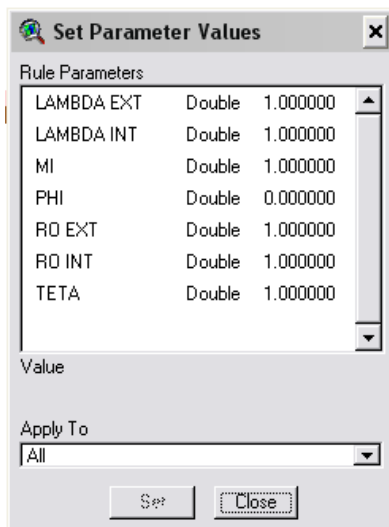


fig17: janela com os valores dos parâmetros de crescimento, com valores default.

Para cada processamento é possível escolher um número de iterações a serem realizadas e os outputs a serem gerados. Também existe a possibilidade de tornar inativo determinado atributo durante o processamento.

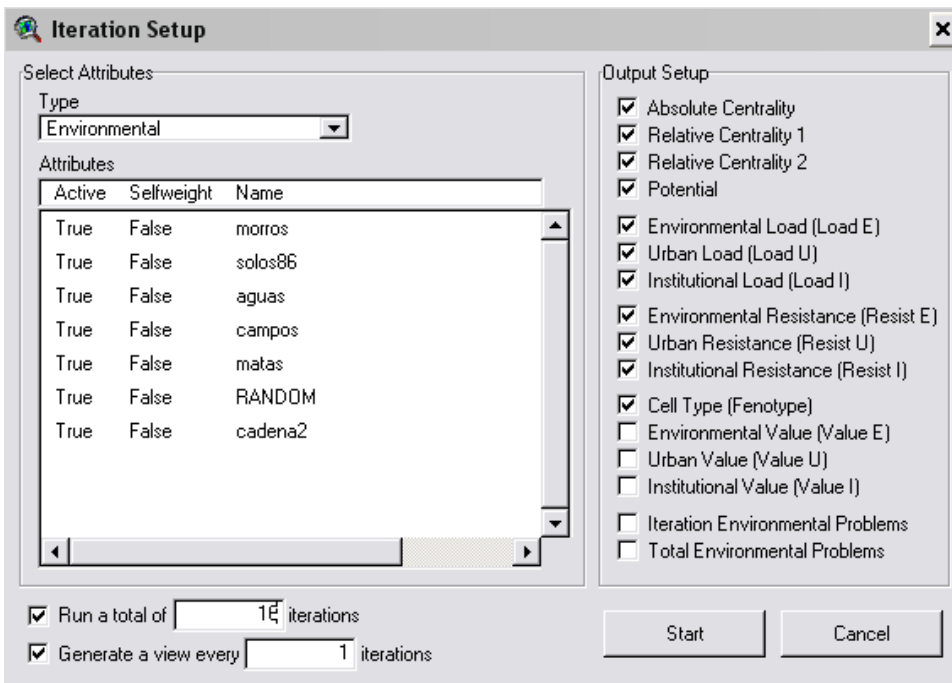


fig18: janela com escolha do nº de iterações, participação dos atributos e outputs a serem gerados pelo modelo.

Os resultados gerados pelo modelo podem ser de dois tipos: a) no formato de tabelas, que informam para cada iteração medidas de crescimento urbano, como quantidade total de células urbanas, quantidade de células de borda, índices de fragmentação e compacidade absolutas e relativas do sistema e b) no formato de grids temáticos, que são uma representação gráfica de diferentes tipos de medidas do sistema simulado. São os outputs do modelo, que permitem diversas leituras e interpretações das simulações realizadas pelo SACI. Dentre eles, podemos destacar:

1) Aqueles relacionados à centralidade do sistema configuracional, na forma de Centralidade Absoluta (CentABS), que são os valores globais de centralidade existentes no sistema; Centralidade Relativa1 (CentR1), que tem seu valor normalizado pelo valor da centralidade máxima do sistema e Centralidade Relativa2 (CentR2), que tem seu valor normalizado pelo somatório das centralidades de todas as células. 2) O output Potencial (Potential) que é o potencial de crescimento celular de cada célula e descreve quais células ainda não convertidas em urbanas tem maior potencial para o ser, O valor do potencial é o resultado da diferença entre a centralidade celular máxima da vizinhança e a centralidade celular de cada célula, que necessita inicialmente consumir as resistências naturais, institucionais e urbanas pra então realizar a

conversão de território. 3) O output Fenótipo Urbano (CellType), representa as células que vão adquirindo o características ao longo do processamento, mesmo que ainda sem carregamento e é demonstrado por um grid booleano de valores 1 ou zero. 4) Os possíveis problemas ambientais decorrentes do crescimento urbano exagerado podem ser visualizados nos outputs de Environmental Problems (EProbl) e Total Environment Problems (EprobT), que são dependentes de um limiar de crescimento, indicado pelo usuário do programa. 5) Environment Resistance (ResistE), Urban Resistance (ResistU) e Institutional Resistance (ResistI) indicam o comportamento das resistências do sistema durante a simulação e como algumas são “consumidas” no processo de crescimento. 6) Urban Load (LoadU) é o carregamento urbano, que descreve as intensidades de urbanização a cada iteração do modelo, que interferem na atratividade à urbanização e pode indicar, por exemplo a formação de novos centros ou a decadência de outros. A leitura desses resultados proporciona um entendimento do sistema simulado de maneira objetiva e possibilita o controle do comportamento das variáveis a cada iteração.

Resumo de outputs de tipo grid gerados pelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®						
Nome	Nome no modelo	Abreviatura no modelo	Conteúdo	Tipo de variável	Espectro	
Problemas Ambientais Totais (acumulados)	Total Problem	Environmental	EProbT	Grid de números reais contendo valores representando os problemas ambientais acumulados	Quantitativa	0 a ∞
Problemas Ambientais da iteração	Iteration Problem	Environmental	EProbl	Grid de números reais contendo valores representando os problemas ambientais gerados na iteração	Quantitativa	0 a 1
Valor Institucional	Institutional Value		ValueI	Grid de números reais contendo quantidades de valor institucional	Quantitativa	0 a 1
Valor Urbano	Urban Value		ValueU	Grid de números reais contendo quantidades de valor urbano	Quantitativa	0 a 1
Valor Natural	Environmental Value		ValueE	Grid de números reais contendo quantidades de valor natural	Quantitativa	0 a 1
Tipo de Célula	Cell Type		CellType	Grid booleano contendo indicando a presença de células urbanas	Qualitativa	0 ou 1
Resistência Institucional	Institutional Resist		ResistI	Grid de números reais contendo valores de resistência institucional	Quantitativa	0 a 1
Resistência Urbana	Urban Resist		ResistU	Grid de números reais contendo valores de resistência urbana.	Quantitativa	0 a 1
Resistência Natural	Environmental Resist		ResistE	Grid de números reais contendo valores de resistência natural	Quantitativa	0 a 1
Carregamento Institucional	Institutional Load		LoadI	Grid de números reais contendo valores de carregamento institucional	Quantitativa	0 a 1
Carregamento Urbano	Urban Load		LoadU	Grid de números reais contendo valores de carregamento urbano	Quantitativa	0 a ∞
Carregamento Natural	Environmental Load		LoadE	Grid de números reais contendo valores de carregamento natural	Quantitativa	0 a 1
Potencial	Potential		Potential	Grid de números reais contendo valores de potencial	Quantitativa	0 a 1
Centralidade Relativa 2	Relative Centrality 2		CentR2	Grid de números reais contendo valores de centralidade relativa do tipo 2	Quantitativa	0 a 1
Centralidade Relativa 1	Relative Centrality 1		CentR1	Grid de números reais contendo valores de centralidade relativa do tipo 1	Quantitativa	0 a 1
Centralidade Absoluta	Absolute Centrality		CentABS	Grid de números reais contendo valores de centralidade absoluta	Quantitativa	0 a ∞

fig19: outputs do modelo. Exemplos utilizados em: POLIDORI, M. **Crescimento Urbano e Ambiente: Um estudo exploratório sobre o futuro e o crescimento das cidades.** Tese (Doutorado em Ecologia de Paisagem) PPGECO-UFRGS, Porto Alegre, 2005.p. 56-59

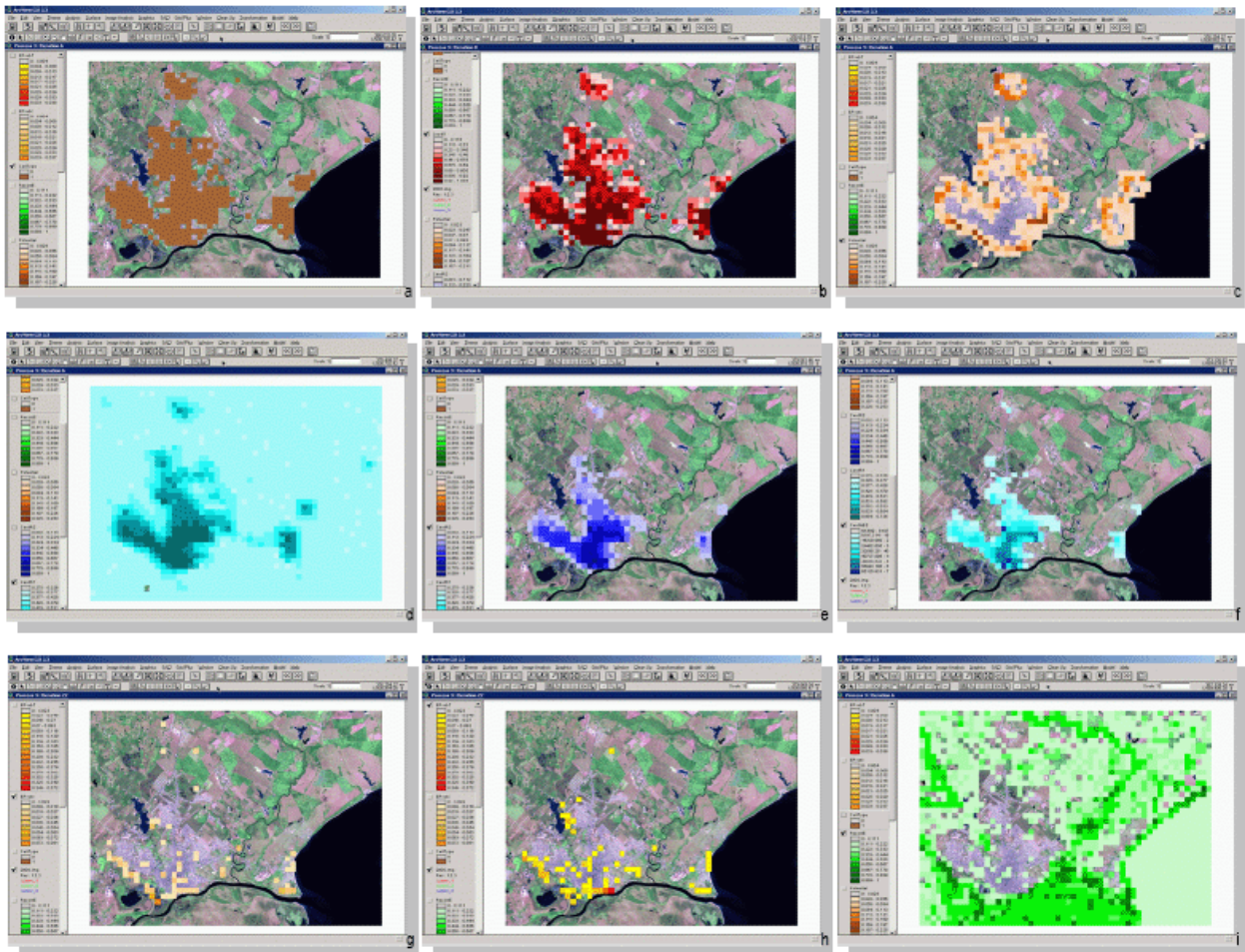


fig20: exemplo de outputs gráficos gerados pelo SACI para simulações de crescimento para a cidade de Pelotas-RS, sobre imagem do satélite Landsat7 ETM+. a) Fenótipo Urbano; b) Carregamento Urbano; c) Potencial de Crescimento; d) Centralidade Relativa tipo 1; e) Centralidade Relativa tipo 2; d)Centralidade Absoluta; e) Problemas Ambientais por Iteração; f) Problemas Ambientais Intra-Urbanos Acumulados; g) Resistências Ambientais. Fonte: POLIDORI, M. **Crescimento Urbano e Ambiente: Um estudo exploratório sobre o futuro e o crescimento das cidades**. Tese (Doutorado em Ecologia de Paisagem) PPGECCO-UFRGS, Porto Alegre, 2005. p. 90.

De maneira geral é possível descrever o SACI como uma adaptação do modelo de Potencial/Centralidade, reescrito para o ambiente celular que trabalha simultaneamente com crescimento urbano interno e externo à cidade preexistente, com a participação de atributos naturais, urbanos e institucionais; com seu mecanismo incluindo recursos de processamento matricial típico dos modelos baseados em ACs, integrados à técnicas de processamento do tipo vetorial, através de grafos (POLIDORI, 2004). Oferece-se como um modelo capaz de operar e de simular crescimento de modo adaptado à quantidade de conhecimento disponível em cada experimento, de modo interativo, possibilitando eleger as variáveis (ou dados descritivos do território) a participarem das simulações.

## 4. Estudo de caso

### 4.1. A cidade de Santa Maria-RS

Como estudo de caso para operar as simulações com o modelo SACI- Simulador do Ambiente de Cidade, foi escolhida a cidade de Santa Maria-RS. Trata-se uma cidade de porte médio, que possui aproximadamente 240 mil habitantes<sup>4</sup>, onde o setor terciário (comércio e prestação de serviços) absorve 80% da população ativa do município. Santa Maria teve início como um acampamento militar no final do séc. XVIII, ao longo da Rua do Acampamento, hoje uma das mais importantes da cidade e foi elevada à condição de município em 16 de dezembro de 1857. Está situada no centro do estado do Rio Grande do Sul, na latitude 29,68417 e longitude -53,80694, com distância de 300km de Porto Alegre. Possui uma área total de 1801,53 Km<sup>2</sup> e faz divisa com os seguintes municípios: **Norte:** Itaara, Júlio de Castilhos e São Martinho da Serra; **Sul:** São Gabriel e São Sepé; **Leste:** Silveira Martins, Restinga Seca e Formigueiro; **Oeste:** São Pedro do Sul, Dilermando de Aguiar.

A economia e o crescimento da cidade são fortemente influenciados pela presença da Universidade Federal de Santa Maria, que gera uma população flutuante de aproximadamente 30 mil pessoas, provenientes de cidades do interior gaúcho e também de fora do estado. A UFSM destaca-se por ter sido a primeira universidade federal do país implantada fora de uma capital, no ano de 1964, o que destaca sua função de pólo regional de ensino.

Pelo seu porte e devido ao fato de seu crescimento ser fortemente influenciado por condicionantes espaciais e pela polarização gerada pela UFSM, Santa Maria apresenta-se como uma escolha interessante para simular crescimento urbano com o modelo. A descrição da cidade de Santa Maria aqui apresentada identifica seus principais vetores de crescimento e condicionantes espaciais, que serão transcritos para o modelo na forma de atributos.

---

<sup>4</sup> Fonte: IBGE -Censo 2000 - Contagem Populacional

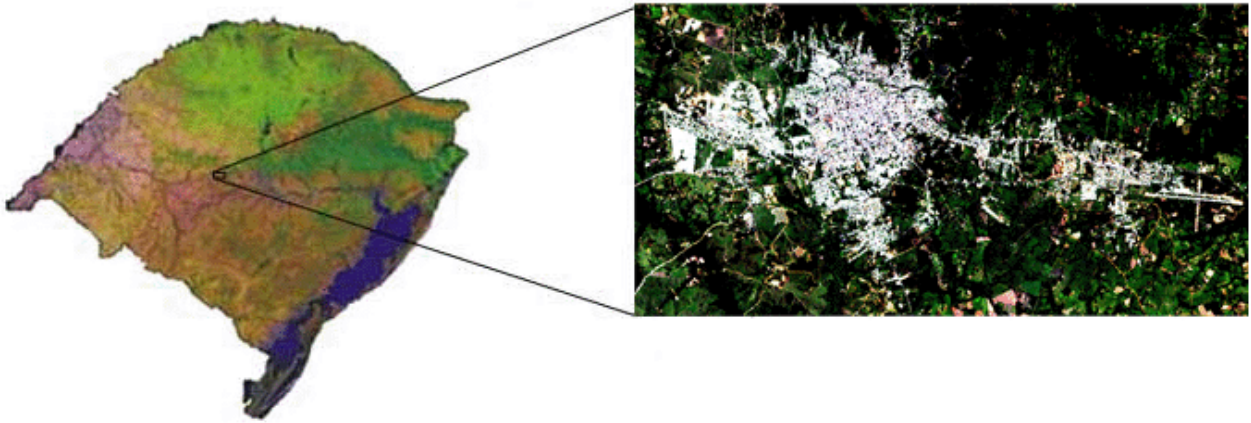


fig21: localização da cidade de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul.

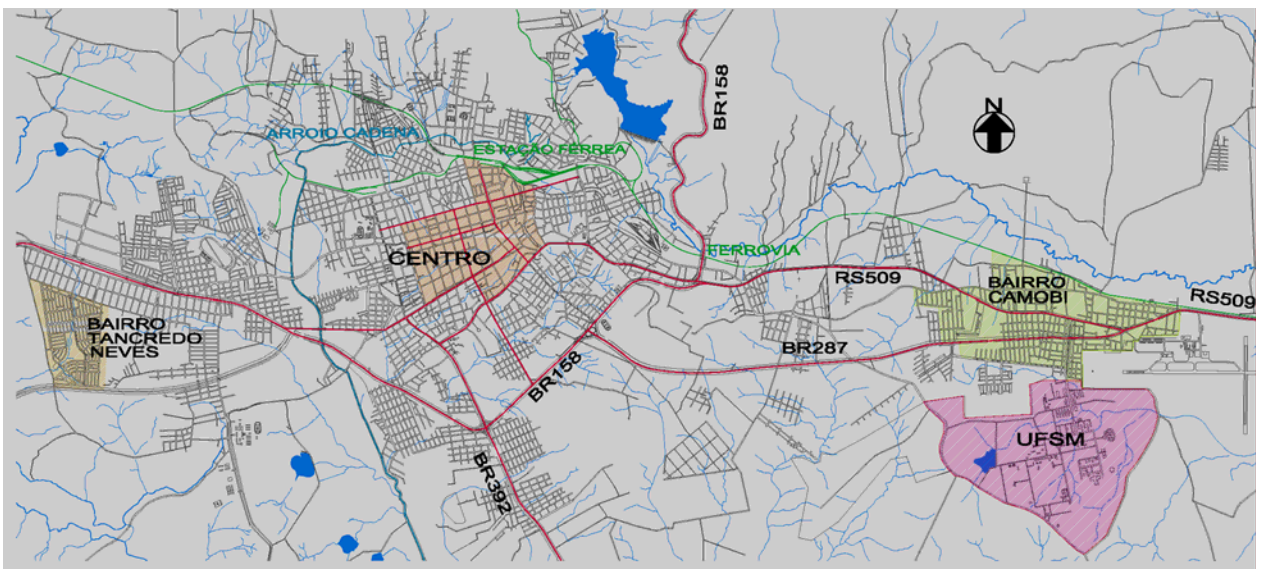


fig22: principais bairros e vias de Santa Maria.

## 4.2. Vetores de crescimento

O crescimento atual de Santa Maria segue uma tendência que se manifesta desde a década de 60, época de implantação do campus da Universidade Federal de Santa Maria, com expansão de maior intensidade nas direções Leste e Oeste. Esta característica de “cidade linear” é fortemente condicionada pela existência da cadeia de montanhas da Serra Geral ao Norte e pelas grandes faixas de terra pertencentes ao exercito à Sudoeste.



De um modo geral, a dinâmica de crescimento da cidade é de baixa intensidade, devido à fraca industrialização e a dependência econômica da UFSM, que gera poucos atrativos ao crescimento além da demanda de atendimento ao público estudantil, que se caracteriza por edificações de padrão médio e comércio de pequeno porte.

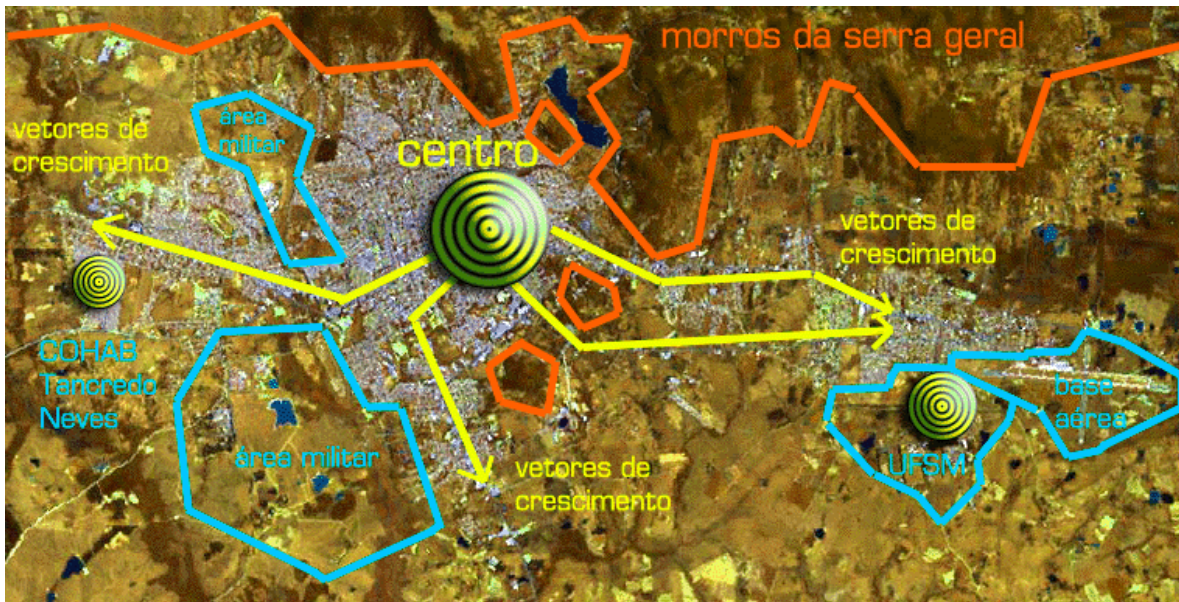


fig23: principais vetores de crescimento e resistência do município de Santa Maria-RS. Composição sobre imagem Landsat 7ETM+ para 2002.

Na direção **Leste**, o crescimento pode ser percebido de maneira mais clara no bairro de Camobi, próximo da Universidade Federal e ao longo das duas grandes vias de acesso que ligam o bairro à cidade. A densificação se dá principalmente pela substituição de residências unifamiliares simples, geralmente de madeira e com grandes lotes, por edifícios de apartamento com quatro pavimentos, em sua grande maioria destinados à moradia estudantil. Também se destaca a progressiva ocupação do vazio existente entre Camobi e o centro da cidade, principalmente por loteamentos dirigidos às classes média e alta.

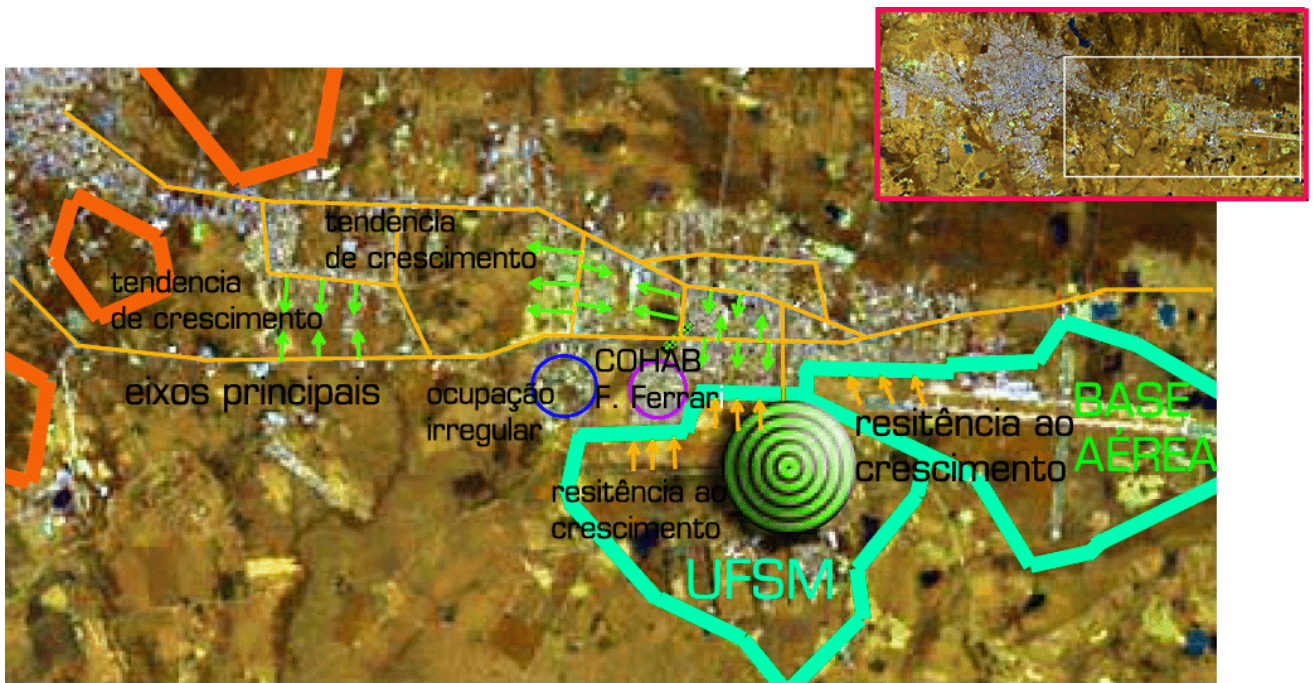


fig24: zona Leste da cidade, principais vetores de crescimento e resistência.

Na direção **Oeste** o crescimento se intensificou com a implantação da COHAB Santa Marta no fim dos anos 70 e da COHAB Tancredo Neves, na primeira metade dos anos 80, que atualmente são os maiores conjuntos residenciais da cidade. A zona Oeste recebeu uma nova onda de crescimento com a invasão de uma grande área pertencente ao Governo do Estado, no que veio a ser conhecido como o “Sem Teto”. Esta área cresceu rapidamente durante a primeira metade dos anos 90, e hoje se encontra mais estabilizada, devido à diminuição do espaço disponível e da regularização dos lotes, o que aumentou o valor da terra e inibiu novas ocupações, a despeito da situação de extrema pobreza da maioria das famílias que ali vivem. A recente instalação do campus da Universidade Luterana do Brasil -ULBRA nesta região poderá de ser um importante pólo de atração, inclusive para novos tipos de uso do solo, principalmente habitação estudantil. Ainda nesta região localiza-se o Distrito Industrial de Santa Maria, que apesar de ter sido implantado no início dos anos 90, ainda não apresenta ocupação substancial.



fig25: zona Oeste de Santa Maria, principais vetores de crescimento e resistência.

A maioria das indústrias tende a se localizar na zona **Sul** e **Sudeste** da cidade, principalmente ao longo da BR 392 e da BR 158. Além destes usos, a zona sul é caracterizada por uso residencial de baixa densidade e grandes áreas privadas onde se destacam o seminário dos padres Palotinos e o Clube Recreativo Dores. Um local que apresenta forte índice de crescimento são as áreas a **Sudoeste** da cidade, entre o centro da cidade e uma grande porção de terras pertencente ao Exército Brasileiro, onde têm sido construídos diversos condomínios horizontais destinados à classe media alta.

A zona **Norte** tem seu crescimento dificultado pela cadeia de montanhas da Serra Geral e a presença da via férrea também contribui para o isolamento dessa parte da cidade. Aqui se destaca o antigo bairro Itararé, de considerável densidade populacional e que conta com a existência de alguns serviços mais especializados. Recentemente o vale existente ao redor da Estrada do Perau, antigo acesso para os campos de cima da serra, tem apresentado um crescimento mais acelerado, com a formação de loteamentos destinados às classes média e alta, atraídos pela bela paisagem e o potencial turístico da região.

No **Centro** da cidade, destaca-se o forte o crescimento intra-urbano, que vem ocorrendo principalmente a partir do final da dec. de 80, baseado sobretudo na substituição de antigas residências das décadas de 20 a 50 por edifícios de 4

pavimentos em forma de fita (acompanhando as características dos terrenos do centro, na maioria com pequena testada e grande profundidade). A densificação maior ocorre no quadrante formado pela avenida Itaimbé, rua Silva Jardim, rua Duque de Caxias e avenida Presidente Getulio Vargas, onde se encontram a maioria dos edifícios em altura da cidade e o centro de serviços local. As áreas próximas à estação férrea de Santa Maria constituíam a parte mais nobre da cidade até o início da década de 60, apresentando ainda belíssimo conjunto de edificações de arquitetura eclética e pré-modernista. Com a decadência de rede ferroviária, essa parte da cidade também entrou em declínio e atualmente existe um esforço de setores da sociedade local no sentido de recuperação dessa área. Nessa região também se encontra a Vila Belga, um conjunto arquitetônico do fim do séc. XIX tombado pelo patrimônio histórico.

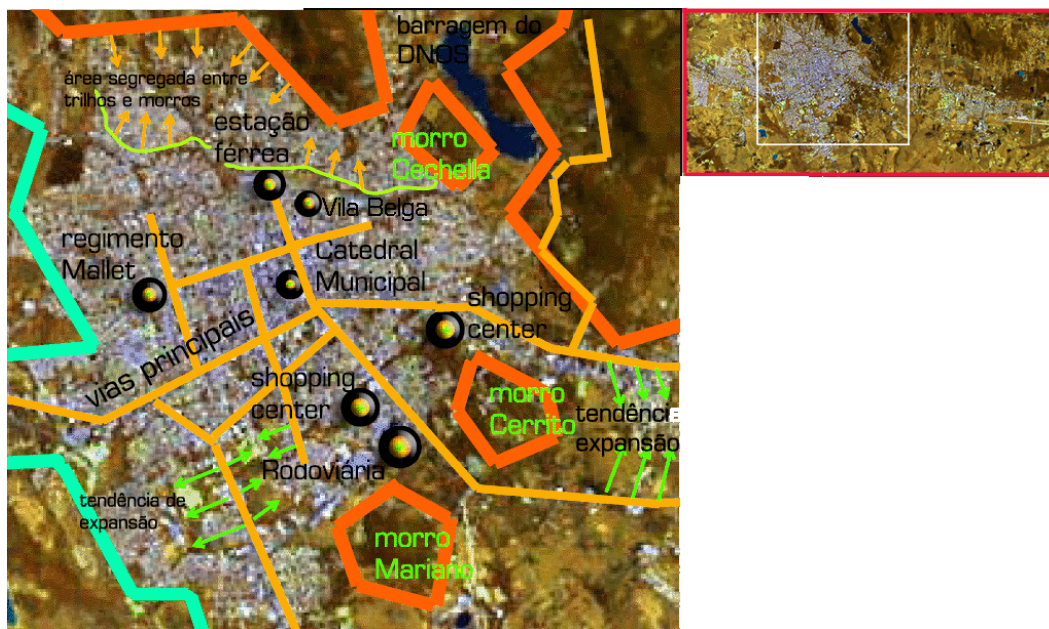
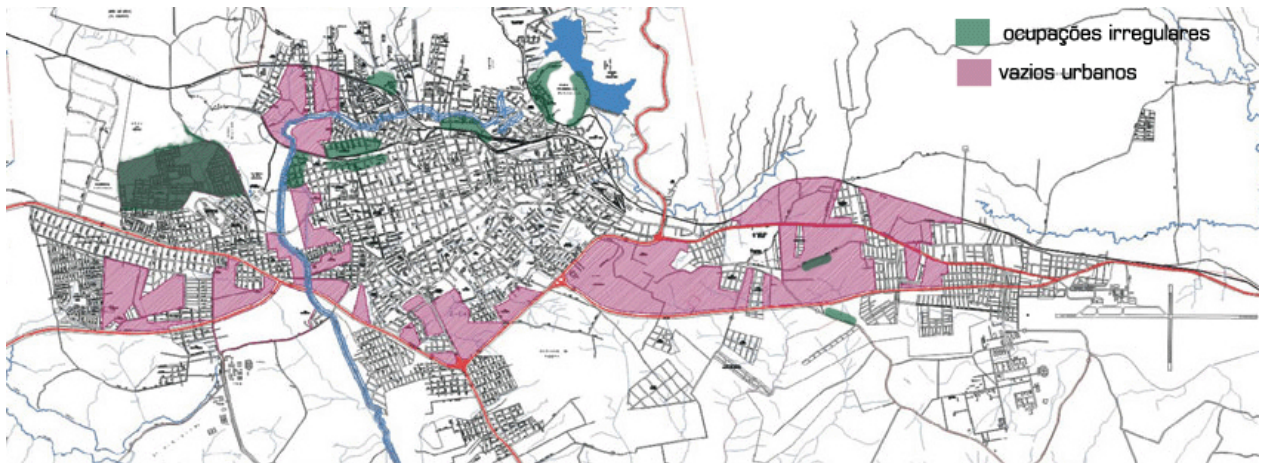


fig26: Centro de Santa Maria, principais vetores de crescimento e resistência.

É marcante em Santa Maria o crescimento da moradia informal, devido principalmente à ocupação das terras disponíveis ao longo das ferrovias e outras áreas outrora pertencentes à Rede Ferroviária Federal- RFFSA, que hoje estão abandonadas pela concessionária responsável pela rede, sendo também forte a ocupação informal de algumas áreas de encostas de morros. A presença de vazios urbanos é sentida mais intensamente na área entre o centro da cidade e o bairro Camobi, nas áreas urbanas próximas ao leito do arroio Cadena e em áreas próximas as grandes vias de ligação entre os bairros da cidade.



*fig27: principais ocupações irregulares e vazios urbanos de Santa Maria. Fonte: Prefeitura Municipal de Santa Maria, Secretaria de Planejamento Urbano.*

A seguir, algumas imagens da cidade de Santa Maria, onde é possível identificar a presença dos morros da Serra Geral em sua face norte e as concentrações de edifícios de maior altura do centro da cidade:

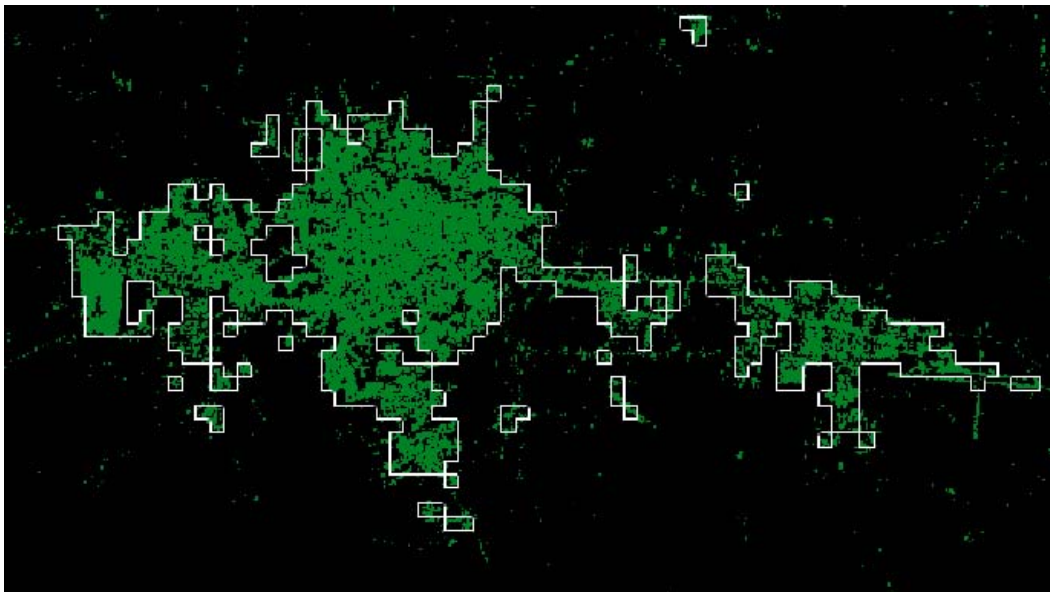


*fig28: cenas da cidade de Santa Maria*

## 5. Procedimentos

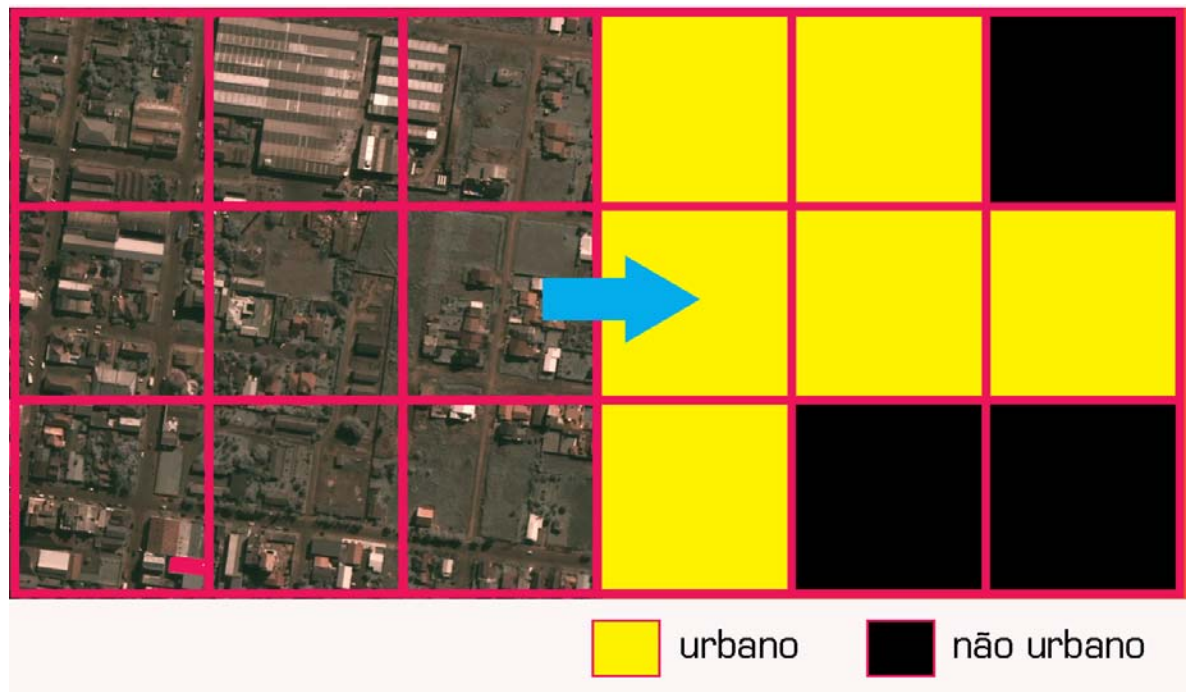
### 5.1. Cidade real X cidade representada

Apesar da liberdade na escolha do tamanho das células, o modelo favorece a exploração de escalas maiores, com células acima de 100x100m, já que o processo de cálculo do modelo relaciona todas as células entre si através de técnicas de grafos, o que requer um tempo de processamento considerável em sistemas com muitas células. Este padrão de escala tem sido freqüentemente utilizada em modelos de ACs, como os desenvolvidos por Clarke (1995), em estudo para a área da baía de São Francisco (300x300m), White & Engelen (1997) nas simulações para a ilha de Santa Lucia (250x250m) e Polidori, (2004) para Pelotas(500x500), utilizando o SACI. Para o estudo aqui descrito, serão utilizadas células de 285x285m, que correspondem a 10 vezes o tamanho do *pixel* do satélite Landsat7 ETM+, do qual foram extraídas a maioria das informações quanto à cobertura do solo. A perda de resolução ocasionada pelo emprego de células de maiores dimensões pode ser em certa parte compensada através de operações de geoprocessamento, como álgebra com mapas e reclassificações dos usos do solo, que permitem, através de comparações com os dados originais, equalizar a quantidade de determinado atributo.



*fig29: sobreposição do grid URBANO01, com células de 285x285m, ao uso do solo urbano extraído de imagem Landsat 7ETM+ para 2002 com resolução de 28,5x28,5m. Na mudança de escala, as células que continham menos de 20% de uso urbano foram consideradas não urbanas, através da reclassificação da imagem.*

É importante considerar as limitações de se transferir a dimensão real da cidade para uma realidade bidimensional em forma de grade como a de um modelo de autômatos celulares. A célula passa a ser a unidade mínima do sistema, onde se acumulam diferentes tipos de informação, e esta quantidade de informação relaciona-se com a quantidade de atributos (que no modelo funcionam como camadas) e com o tamanho das células. O emprego ou não de alguns atributos depende da escala utilizada para representar a cidade. Relações entre elementos do sistema urbano que são fortes em uma escala mais abrangente podem ter pouca importância em escalas mais ampliadas. Se considerarmos as sutis conexões que existem entre as diversas escalas do universo urbano, o trabalho de selecionar quais variáveis devem ser utilizadas e quais devem ser descartadas requer, além de conhecimento teórico, um profundo exercício de entendimento da realidade urbana específica a ser representada.



*fig30: exemplo de grid com células de 150x150m sobre imagem de satélite Quickbird, de resolução 0,6x0,6m, e espaço posteriormente classificado em urbano ou não-urbano, demonstrando o grau de generalização que ocorre na mudança da escala do pixel.*

Para Hakim Bey (2001) o mapa de um território é um instrumento abstrato, não podendo senão definir alguns consensos e generalizações sobre algumas características mensuráveis de algum lugar ou definir domínios e fronteiras. É

virtualmente impossível cobrir a Terra com a precisão 1:1. Dentro das complexidades fractais da geografia real, o mapa pode detectar apenas malhas dimensionais e imensidões embutidas e escondidas escapam da fita métrica. Além de todos os processos de aquisição de dados, que serão apresentados a seguir, é de fundamental importância conhecer a essência da cidade, que se manifesta das mais diversas maneiras, tanto na relação entre vizinhos de um mesmo bairro como nos valores observados em anúncios comerciais do mercado imobiliário. É um trabalho de percepção, bastante empírico e com pouco rigor científico, mas que pode fornecer dados fundamentais no trabalho e orientar a tomada de decisões no momento de escolher determinado atributo, bem como definir seu peso e intensidade em relação aos demais.

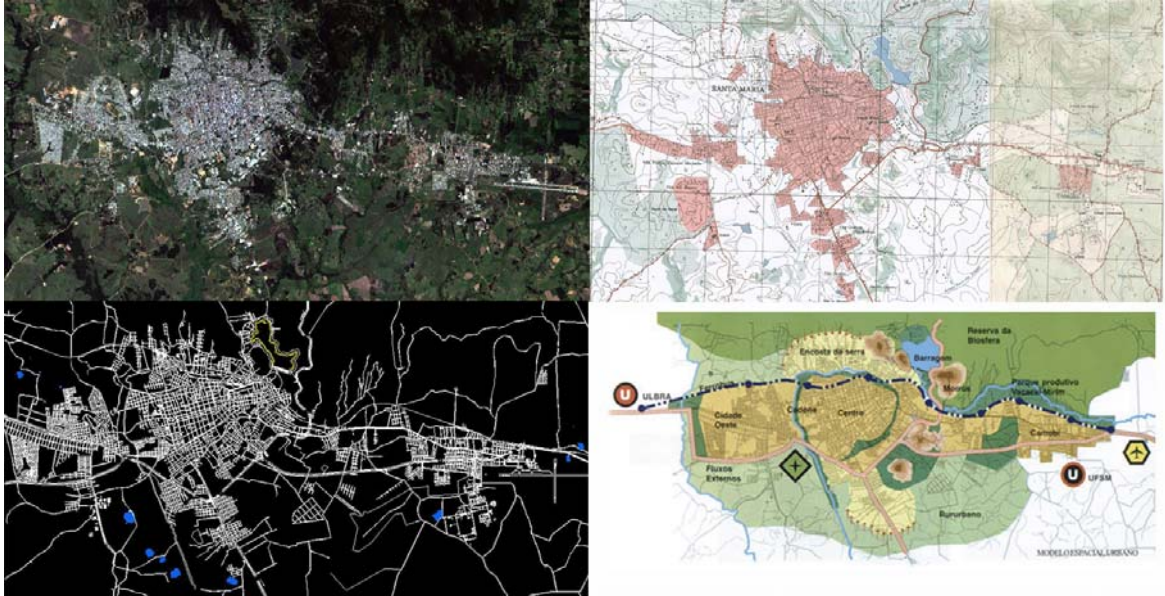
## **5.2. Aquisição dos dados**

A aquisição dos dados para a montagem do modelo foi realizada através da digitalização de mapas e cartas geográficas, consultas a documentos históricos, da classificação de imagens de satélite e de análises empíricas da distribuição espacial na cidade. Além de dados atuais, foram necessárias informações sobre épocas passadas para serem utilizadas na calibração do modelo.

A observação da distribuição espacial, apoiada em uma consulta ao Cadastro Municipal, serviu para definir as intensidades dos atributos de uso do solo urbano. Com a classificação das imagens de satélite foi possível extrair com grande precisão quase todos atributos naturais e a mancha urbana para varias épocas, inclusive as moradias informais, que não aparecem em mapas e registros oficiais. Os procedimentos de geoprocessamento das imagens de satélite de Santa Maria foram de importância decisiva na qualidade dos dados de input do modelo. Com o uso integrado dos softwares AutoCad, Idrisi e ArcView, a leitura quantitativa dos diversos tipos de usos do solo pôde ser realizada de maneira rápida e padronizada. Os dados provenientes da digitalização de mapas e arquivos do tipo vetorial, como por exemplo as informações sobre altitude, rede viária e hidrológica, foram trabalhados no AutoCAD2002 e em seguida exportados como vetores *.dxf* para o Idrisi, onde foram então convertidos em



arquivos de formato raster. No Idrisi foram também compostas e classificadas as imagens de satélite Landsat.



*fig31: exemplos de tipos de dados utilizados na elaboração do trabalho: imagens de satélite, cartas geográficas, dados vetoriais e mapas infográficos.*

Devido à diversa natureza dos dados e fontes de obtenção, todas as informações tiveram de ser georreferenciadas para ficarem na mesma proporção e serem sobrepostas para a posterior utilização no modelo. Esse procedimento foi realizado no Idrisi definido como padrão o sistema de coordenadas das imagens de 2002, escolhendo-se 10 pontos em comum a todas as imagens e identificadas suas coordenadas. Através do comando RESSAMPLE as coordenadas antigas foram convertidas para as coordenadas do sistema de referência (2002). O Idrisi resolve uma equação que descreve a relação entre dois sistemas de coordenadas, e fornece avaliação dos erros de posição por ponto e geral, permitindo correções e melhoramentos no processo. Quando uma equação atingiu os níveis desejados de precisão, o programa converteu o arquivo para o novo sistema de referência.

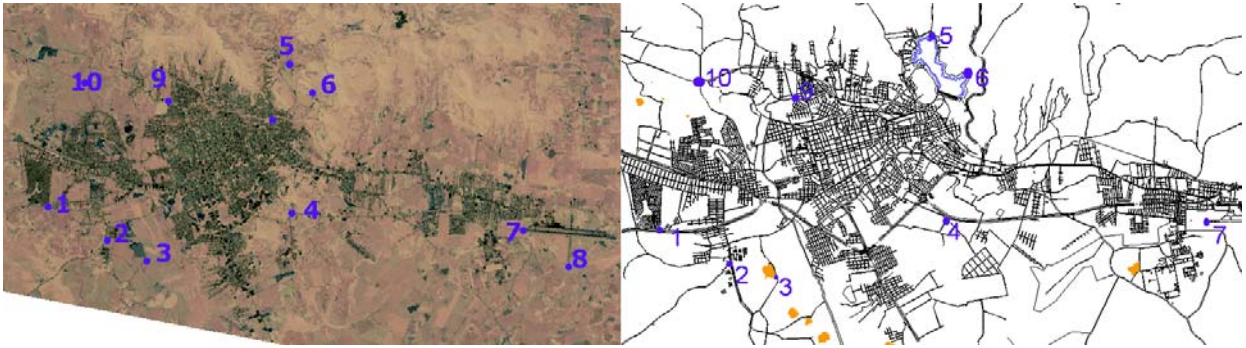


fig32: pontos utilizados no georreferenciamento em exemplo com imagem raster e vetorial.

Com todos os dados georreferenciados e no formato raster, operou-se a mudança na resolução das imagens, para que cada pixel correspondesse a 285m, através do comando REFORMAT do Idrisi. Em seguida os dados foram exportados em formato compatível com o ArcView. No ArcView os arquivos foram convertidos no formato grid utilizado pelo programa e iniciou-se a fase de montagem dos cenários do SACI. O tamanho final do grid utilizado na simulação corresponde a uma área de 263.339,00m<sup>2</sup> (11,58km x 22,74km) sendo composto por 2850 células distribuídas em um grid bidimensional de 38 linhas por 75 colunas

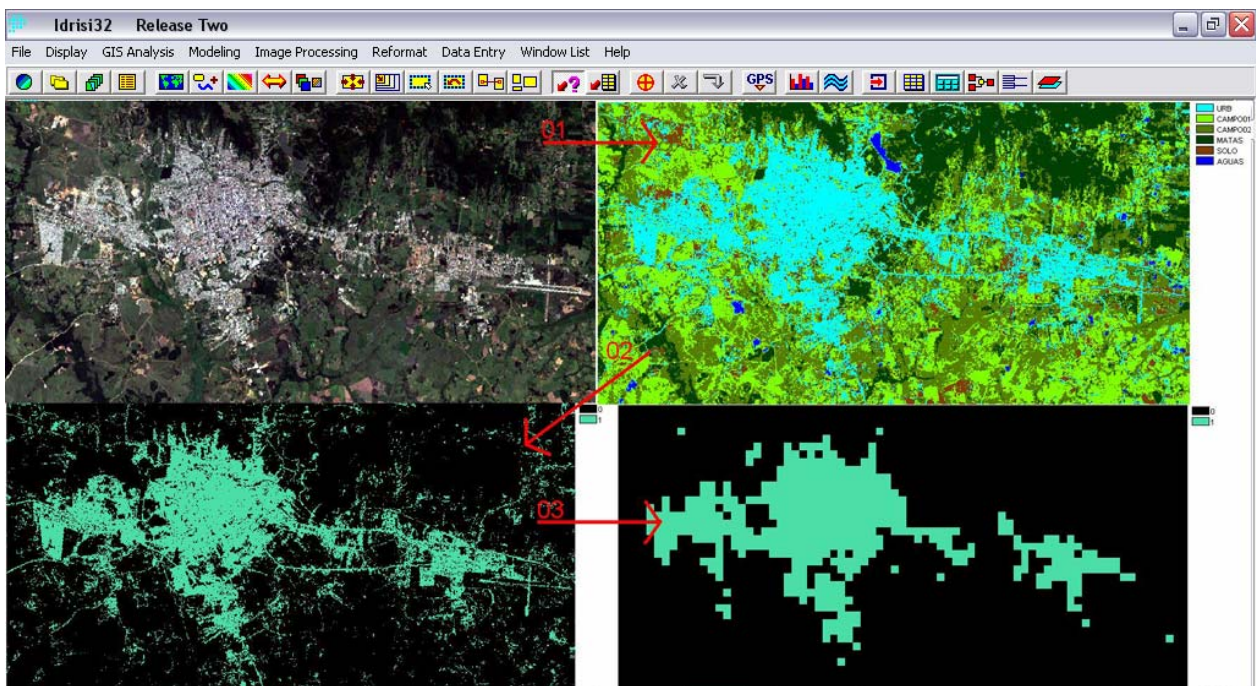


fig33: etapas do trabalho com imagens de satélite na preparação dos dados, utilizando o Idrisi: classificação das imagens, reclassificação isolando cada atributo (neste caso o URBANO) e mudança no pixel para utilização de células de 285x285m.

### 5.3. Montagem dos cenários no SACI

Realizadas as operações de geoprocessamento necessárias para a obtenção e formatação dos dados, o próximo passo do trabalho foi trabalhar diretamente com o modelo. O processo de montagem dos cenários no ArcView a serem simulados no SACI está brevemente descrito a seguir e trata-se de um procedimento bastante simples e direto, o que torna o modelo de fácil manipulação.

- através do SACI Project manager, é criado um novo projeto.
- clicando sobre o projeto criado, o programa ArcView é inicializado, sendo automaticamente criada uma *view* chamada SETUP, onde são inseridos os grids, através do comando ADD THEME.
- os atributos, previamente determinados são criados, onde são definidos o tipo(URBANO, NATURAL ou INSTITUCIONAL), seu peso na simulação e seu comportamento (MUTABLE ou FREEZING)

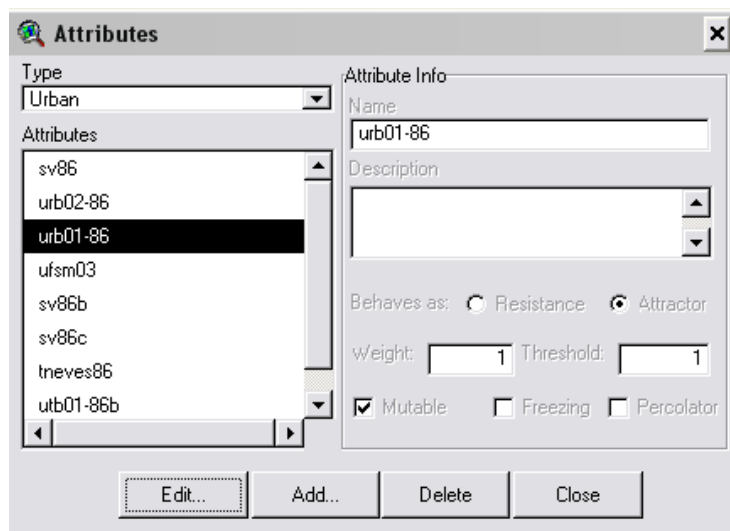


fig34: janela de criação dos atributos do SACI

- é criado um *base-grid* com o tamanho e o número de células a serem utilizadas na simulação, sobre esse grid os atributos criados são vinculados aos grids correspondentes, através do comando ASSIGN THEMES TO ATRIBUTES.

- são oferecidos então os diversos parâmetros para a regulação e tipificação do crescimento: RADIUS SETTING, COEFFICIENTS SETTING, IMPEDANCE SETTING, BUFFER LIMITS, DISTANCE EFFECT, DIFFUSIVE DRAWS E TENSION DISTRIBUTIONS.

- ajustados os parâmetros, passa-se para a janela *saci.apr*, onde se define o número de iterações desejado e quais atributos participam da simulação.

- no PLAY, inicia-se o processamento.

#### **5.4. Atributos utilizados**

Os atributos utilizados pretendem sintetizar os elementos que interferem de alguma maneira na configuração urbana da cidade de Santa Maria. Sua escolha e valoração devem estar sustentadas pelo conhecimento dos diversos aspectos da cidade e considerar a complexidade existente em suas relações internas. Trata-se de um passo determinante para garantir interpretações realistas do sistema urbano, e a sua escolha definitiva deve passar por uma série de experimentações e testes prévios para identificar a abrangência de seus efeitos no crescimento. O modelo possibilita “desligar” *grids* que representam um atributo antes ou durante o processamento, o que permite que se testem os efeitos de diferentes tipos de variáveis, tanto no processo de calibração do modelo como na exploração de efeitos de crescimento, permitindo inclusive a inserção de novos componentes em determinados momentos da simulação. Durante a calibração, o peso e as características de determinados atributos, bem como sua utilização ou não, devem ser testados na busca de uma melhor representação do sistema urbano.

No modelo, os atributos funcionam como camadas, podendo uma mesma célula conter vários atributos, como por exemplo, uma área de morros com cobertura florestal, ou um espaço urbano inserido dentro de uma zona de preservação de patrimônio cultural. A soma dos atributos de uma célula, que podem ser simultaneamente resistentes e atratores de crescimento, compõem a dimensão genotípica de uma célula,

que após o processamento e a aplicação das regras de crescimento, assumem uma determinada característica que pode ser interpretada como sua dimensão fenotípica.

Os atributos aqui descritos variam quanto à intensidade de ocorrência no sistema e quanto ao peso relativo que possuem na simulação, e o valor de um atributo em uma célula é o somatório da sua intensidade multiplicada pelo peso atribuído, normalizado entre 0 e 1. O peso atribuído a um atributo na simulação pode estar associado a fatores como, por exemplo, importância na geração de carregamentos urbanos; hierarquias, para o caso do sistema viário; expectativa de geração de externalidades ou capacidade de resistir a urbanização. Cabe ao usuário considerar estas características como capacidades de atração ou repulsão. Como descrito no capítulo 3.4, quanto ao seu comportamento na simulação, os atributos podem ser considerados como instáveis, estáveis ou *freezing*. Atributos instáveis são os que participam da simulação, mudam de intensidades e podem ser removidos; estáveis participam da simulação, mudam de intensidades, mas não podem ser removidos; *freezing* são os que interferem no processo, mas não se transformam nem alteram suas intensidades (POLIDORI, 2003).

Entre os atributos utilizados alguns foram criados exclusivamente para a calibração, que parte de um estado configuracional de uma época anterior para ajustar os valores dos parâmetros atuais. Como exemplo, temos os atributos os que representam a mancha urbana ou a cobertura florestal para a época do início da calibração, que sofreram consideráveis transformações até a data presente. Outros como relevo, cursos d'água ou áreas militares, puderam ser utilizados tanto na calibração como para simulações de crescimento futuro.

#### **5.4.1. Atributos urbanos**

Os atributos urbanos (AtribU, no modelo) representam as características do espaço urbano que interferem no crescimento. Podem representar o espaço construído com suas diferentes intensidades de urbanização, que de acordo com o modelo de Potencial/Centralidade, participam no sistema como carregamentos que geram tensões de crescimento, ou como elementos facilitadores da urbanização, como a preexistência de um sistema viário. Também podem caracterizar elementos urbanos que oferecem

resistência à urbanização, como por exemplo, um aterro sanitário ou zonas com algum tipo de impedimento à urbanização.

As células de características urbanas que participam da simulação para Santa Maria são representadas por 7 atributos. O atributo URB01 foi escolhido para representar toda a área urbana de maneira uniforme e tem intensidade igual a 1, sendo um atributo do tipo instável. Para representar as áreas com maiores concentrações urbanas foi criado o atributo URB02. Este atributo procura acrescentar no modelo a diferenciação espacial ocasionada pela maior densificação e representa áreas como o centro da cidade, os sub-centros e conjuntos habitacionais. Este atributo funciona como um incremento do atributo anterior, isto é, está sobreposto ao atributo URB01, sendo que as intensidades finais são as somas desses dois atributos. Possui valores de 1 a 2, podendo então o resultado final das intensidades urbanas variar de 1(onde o valor do atributo URB02 é igual a zero) a 3 (onde os atributos se sobrepõem). Opera como um atributo instável e sua intensidade é baseada na ocupação do solo, dada pela predominância de determinadas tipologias construtivas, seguindo o esquema a seguir:

- predominância de edificações unifamiliares térreas com baixa densidade de ocupação do lote: valor de URB02= sem valor
- predominância de edificações com dois pavimentos e uso misto, incluindo conjuntos habitacionais de alta densidade: valor de URB02=1
- predominância de edificações de 4 pavimentos ou mais: valor de URB02=2

Para representar a influência do sistema viário no crescimento urbano, foi criado o atributo Sistema Viário (SV). Para não exagerar os carregamentos urbanos, destacou-se apenas os principais eixos de ligação entre áreas da cidade, tomando o cuidado de efetuar a subtração do sistema viário da mancha urbana, evitando assim a sobreposição desses dois atributos. De baixo peso na simulação o atributo SV pretende funcionar como indutor da urbanização. Devido ao tamanho das células, representa também o entorno das vias, podendo ser considerado uma área de influência destas. Por essa razão, é considerado um atributo instável (e não estável, como poderia ser considerado se representasse apenas o espaço ocupado pelas vias).

Um atributo especial, representando a Universidade Federal de Santa Maria foi concebido na tentativa de captar a sua influência no processo de crescimento da cidade (UFSM03). Foi tomado o cuidado de se considerar os dois tipos de influência que o Campus possui no sistema urbano. Um é seu valor como pólo de atração, representado por este atributo de maneira pontual. Outro é o comportamento de resistência urbana, devido à grande área que ocupa na cidade e que não pode ser urbanizada, que será descrito a seguir como atributo de resistência institucional. Seu comportamento na simulação é do tipo *freezing*.

Para as especulações de crescimento futuro, são propostos dois atributos representando pólos de atração (ATRATOR01 e ATRATOR02). São elementos pontuais do grid, sobrepostos ao atributo URB01 e de comportamento *freezing*. Serão utilizados em simulações à parte, na tentativa de identificar os efeitos de pólos de atração no crescimento de Santa Maria.

Também para as simulações futuras, é proposto um atributo urbano representando a Vila Belga (VILABELGA), um conjunto habitacional do fim do séc.XIX construído para abrigar os funcionários da Rede Ferroviária, que foi recentemente tombado como patrimônio histórico. Consiste em 3 quarteirões próximos a zona central da cidade, ao lado da estação ferroviária de Santa Maria. Por não admitir urbanização interna mas influenciar no crescimento da cidade, é um atributo atrator do tipo *freezing*.

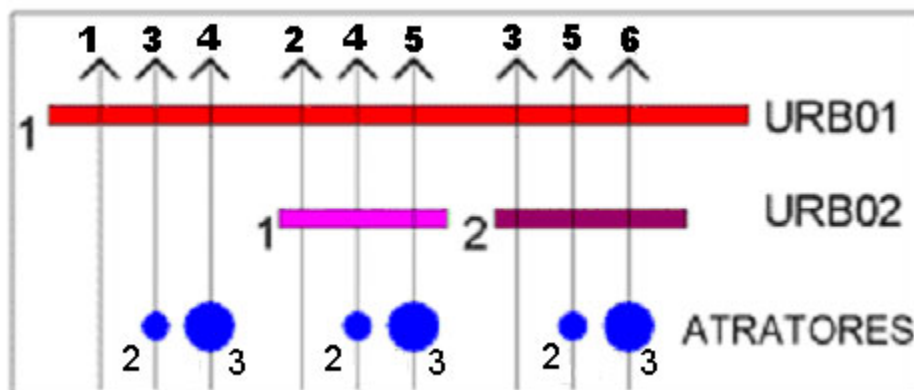


fig.35: Esquema da sobreposição dos atributos urbanos URB01, URB02 e ATRADORES, com as possibilidades de valores finais para as intensidades do uso urbano do solo.

#### 5.4.2. Atributos naturais

Os Atributos Naturais (AtribN) representam os fatores ambientais que participam do crescimento da cidade. Podem ser resumidos pelos diferentes tipos de cobertura do solo, como campos, matas, banhados, plantações ou águas, bem como representarem características do ambiente, como declividade ou potencial turístico. Assim como os atributos urbanos, os atributos naturais podem ser de resistência ou de atração e cabe ao usuário definir o comportamento de algumas dessas variáveis. Uma praia, por exemplo, constitui uma resistência à urbanização, pois não pode ser urbanizada, mas ao mesmo tempo pode ser alvo de interesse turístico com forte potencial de atração. Uma característica importante do SACI é a utilização de variáveis ambientais de maneira ativa na simulação. Isso significa que além do crescimento urbano, o modelo considera o ambiente natural não estável, com a possibilidade de algumas variáveis se desenvolverem por percolação ao longo do processamento.

Entre os condicionantes naturais escolhidos para compor o cenário de simulação estão os principais tipos de cobertura do solo, identificados através da classificação de imagens de satélite. São constituídos por: Campos (CAMPOS), onde são descritos tanto os campos naturais que constituem grande parte da paisagem natural da região como as áreas de plantações. Solo descoberto (SOLO) que são áreas de solo exposto, muitas delas representando terrenos já preparados para a urbanização e que por isso possuem resistência menor em relação aos outros atributos de cobertura do solo. O atributo Matas (MATAS) descreve a cobertura florestal da área de estudo, na sua grande maioria concentrada nas áreas de morros. A existência de águas paradas nas células, como lagos, barragens e açudes é representada pelo atributo Águas (AGUAS). Com exceção do atributo Águas, que é do tipo *freezing*, os demais descritos acima são do tipo instáveis, isto é, podem ser consumidos pela urbanização. A rede hidrográfica que aparece na área de trabalho é composta por arroios de pequena dimensão, que podem ser desconsiderados ao se utilizar células de 285x285m. É possível destacar como atributo apenas o arroio Cadena (CADENA), que além da maior dimensão, possui uma área de influência relativamente grande, devido aos desmoronamentos que ocorrem em suas margens e alagamentos que ocorrem em alguns de seus trechos. O arroio Cadena é canalizado em algumas partes da cidade e sofre sérios problemas de



assoreamento e poluição, sendo que urbanização dessas áreas na simulação constituem problemas ambientais. Por representar o rio e também seu entorno, seu comportamento é do tipo estável.

Como estes atributos se modificam ao longo do tempo, os dados de entrada são de épocas distintas para a calibração para as simulações de estados futuros. Estes atributos funcionam como resistências à urbanização, e os diferentes pesos arbitrados nos processamentos consideram que alguns possuem maior facilidade de serem modificados e substituídos do que outros.

Um forte condicionante natural de Santa Maria é a cadeia de montanhas da Serra Geral ao norte de município, que funciona como barreira natural para o crescimento nesta direção. Comparece na simulação como o atributo Morros (MORROS). Para a composição deste atributo foram consideradas as áreas com inclinações maiores de 30% ou altitudes maiores que 150m. É um atributo que dificulta, mas não impede a ocupação. Considerando que as áreas de encostas encontram-se cada vez mais ameaçadas pela urbanização irregular, o uso deste atributo na simulação pode indicar futuros problemas ambientais. Por permitir a urbanização, mas não poder ser removido, é um atributo estável.

Para representar condicionantes não descritos pelas análises de uso do solo e componentes aleatórios do sistema, é proposto um atributo de caráter randômico (RANDOMGRID), segundo a metodologia sugerida por Polidori (2004). O grid randômico é gerado pelo recurso random grid do ARCVIEW e possui 4 níveis de intensidade (1 a 4), cobrindo toda a área de estudo e funcionando como uma resistência instável.

#### **5.4.3. Atributos institucionais**

Diferente dos atributos anteriores, que constituem elementos materiais do sistema urbano, os Atributos Institucionais (AtribI) buscam representar a ação de condicionantes legais e políticas públicas sobre o crescimento urbano. Estão vinculados então a uma “idéia” que se tem ou que se quer de uma cidade, como leis de zoneamento e uso do solo, e sua influência é condicionada à capacidade do poder

publico de implementá-las ou controlá-las. Podem representar também áreas públicas não urbanizáveis, que influenciam positivamente ou negativamente o crescimento, como áreas militares, universidades, reservas florestais e etc.

As áreas militares são representadas por dois atributos, um como as áreas pertencentes ao Exército Brasileiro (MILITAR), que constituem grandes porções de terra destinadas a quartéis, parques de máquinas e campos de treinamento. O outro atributo representa a Base Aérea de Santa Maria (BASEAEREA), implementada nos anos 60 e que é hoje uma das mais importantes do país. Devido a sua localização estratégica, no centro do estado, Santa Maria foi um importante centro militar desde a sua fundação, e as áreas militares tiveram importante papel na configuração urbana do município. São consideradas resistências que não podem ser urbanizadas, do tipo *freezing*.

Se o potencial de polarização urbana da UFSM foi representado como atributo urbano, seu espaço físico é aqui considerado como uma resistência do tipo institucional, pois constitui uma grande porção de terra pertencente à União que não pode ser “tomada pela cidade”. As áreas da universidade foram divididas em dois atributos, um representando o Campus da Universidade (UFSM01) e outro representando a grande área rural constituída pela fazenda da UFSM (UFSM02), onde se localizam as plantações experimentais do curso de Agronomia. Como as áreas militares, são atributos do tipo *freezing*.

Representando as áreas não edificáveis ao longo da via férrea, o atributo Ferrovia (FERROVIA) tenta trazer para a simulação a influência histórica da rede ferroviária de Santa Maria, que por muito tempo foi a atividade mais importante do município. A localização dos trilhos de ferro serviu como marco divisório da cidade, isolando as áreas entre os trilhos e os morros, ao norte da cidade. Atualmente, devido ao atual estado de abandono do patrimônio ferroviário, as áreas ao longo dos trilhos e os antigos galpões de máquinas, também representados no atributo, tem sido alvo de forte ocupação irregular. Funciona como um atributo de resistência de comportamento estável.

O atributo Lei Ambiental (LEIAMB) representa as áreas de interesse ambiental protegidas por leis federais, estaduais e municipais, como altitudes acima de 150m,

zonas de encosta, parques, reservas florestais e as áreas não edificáveis as margens de cursos d'água. A maioria dessas áreas localiza-se ao norte da cidade e atualmente encontram-se ameaçadas pela urbanização irregular, devido à falta de controle do poder público sobre essas áreas. Assim, apesar de ser um atributo institucional de resistência, ele pode ser consumido pela urbanização e participa da simulação como atributo estável.

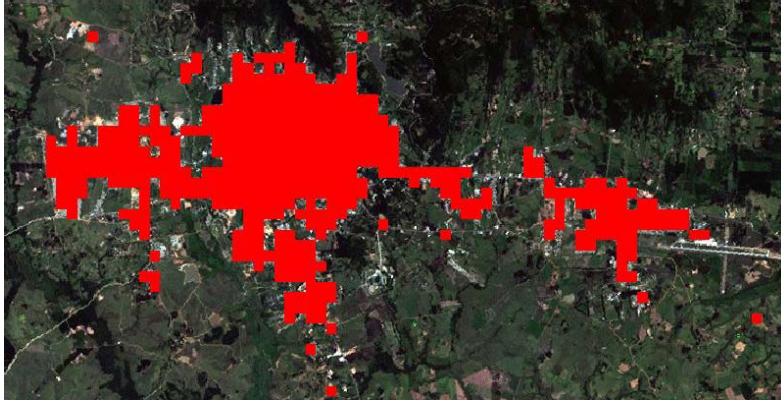
Como diferenciador entre o espaço urbano e rural, foi proposto o atributo Zona Rural (RURAL) que consiste em uma resistência que dificulta, mas não impede a urbanização em áreas fora do perímetro urbano. De baixo peso na simulação, é um atributo de comportamento estável.

Para as simulações de crescimento futuro, foi proposto o atributo Plano Diretor (PLANODIRETOR) tenta sintetizar as aspirações quanto à intensidade do uso do solo do novo Plano Diretor de desenvolvimento Urbano de Santa Maria, que se encontra em fase de aprovação pelos órgãos públicos. O atributo busca demonstrar os efeitos no crescimento dos índices propostos para a ocupação do solo, e como os planos diretores expressam intenções dos administradores e não necessariamente as tendências de crescimento, optou-se por utilizar este atributo como resistência ao crescimento. A variável escolhida para representar a resistência à urbanização foi o índice de aproveitamento permitido pelo Plano. Foram criadas 5 intensidades de resistência, de acordo com a quantidade de aproveitamento permitida para a área. Essa intensidade é igual a zero em áreas com previsão de maiores densidades e vai crescendo nas áreas mais restritivas à ocupação. O atributo foi utilizado em um processamento à parte, e comparações com outras simulações possibilitam explorar os efeitos dos índices propostos pelo plano.

<b>Índice de aproveitamento</b>	<b>Intensidade da resistência</b>
5 a 4,5	0
3,5 a 3	1
2,5 a 2	2
1,65 a 1,2	3
1 a 0,55	4
0,2	5

*fig36: índices de aproveitamento utilizados como resistências institucionais.*

A seguir, os atributos utilizado nas simulações de crescimento para a cidade de Santa Maria:



*fig37: atributo: URB01; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR INSTÁVEL*



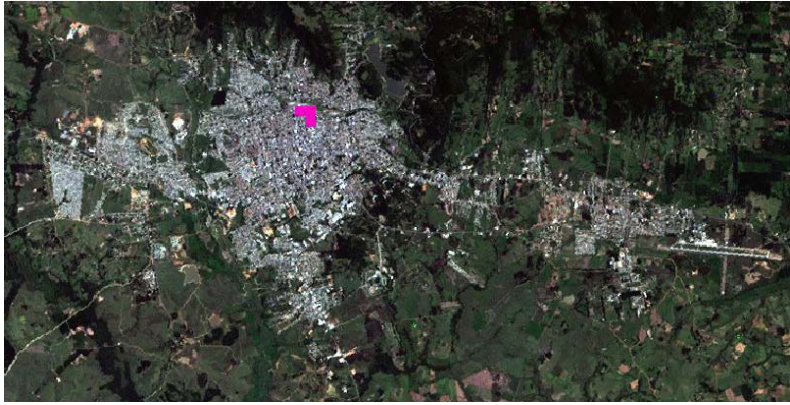
*fig38: atributo: URB02; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR INSTÁVEL*



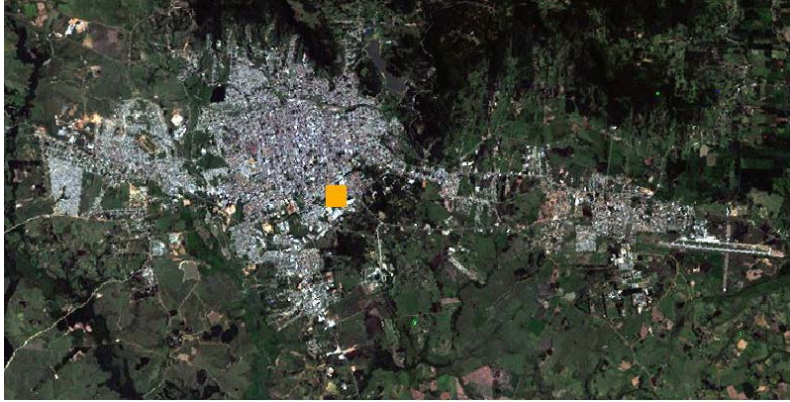
*fig39: atributo: SV; tipo: URBANO; comportamento: ATRATOR INSTÁVEL*



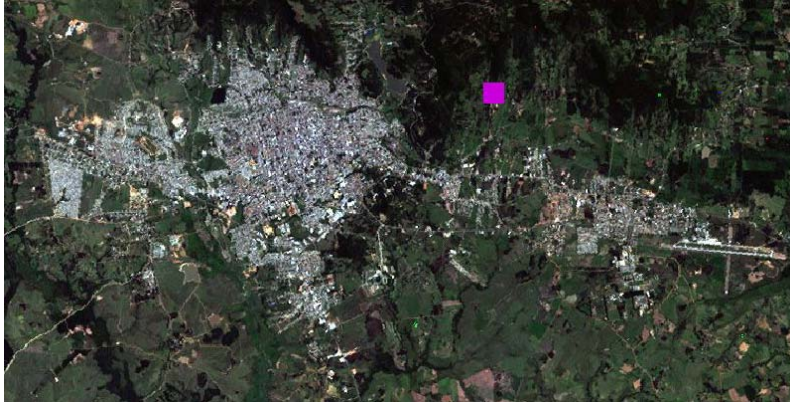
*fig40: atributo: UFSM03; tipo: URBANO; comportamiento: ATRATOR FREEZING*



*fig41: atributo: VILABELGA; tipo: URBANO; comportamiento: ATRATOR FREEZING*



*fig42: atributo ATRATOR01; tipo: URBANO; comportamiento: ATRATOR FREEZING*



*fig43: atributo ATRATOR02; tipo: URBANO; comportamiento: ATRATOR FREEZING*

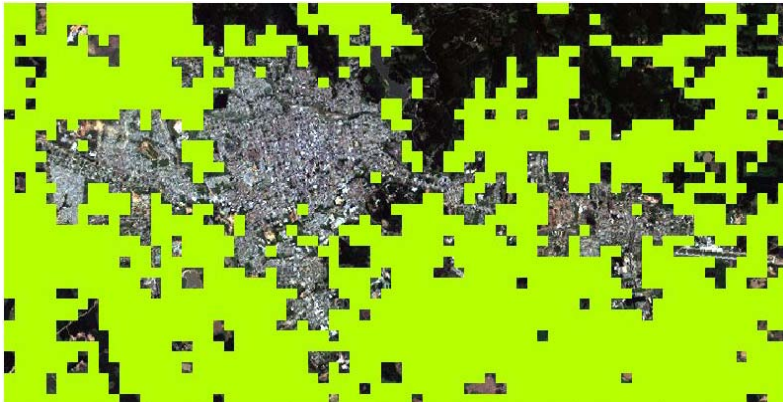


fig44: atributo: CAMPOS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL

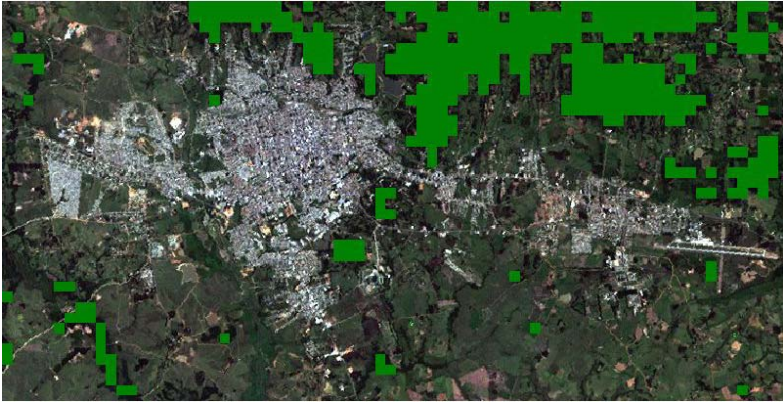


fig45: atributo: MATAS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL



fig46: atributo: SOLO; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL

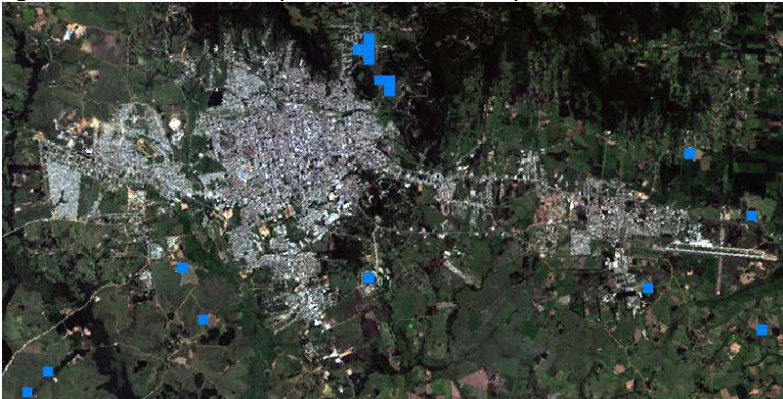


fig47: atributo: ÁGUAS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING



fig48: atributo: MORROS; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL

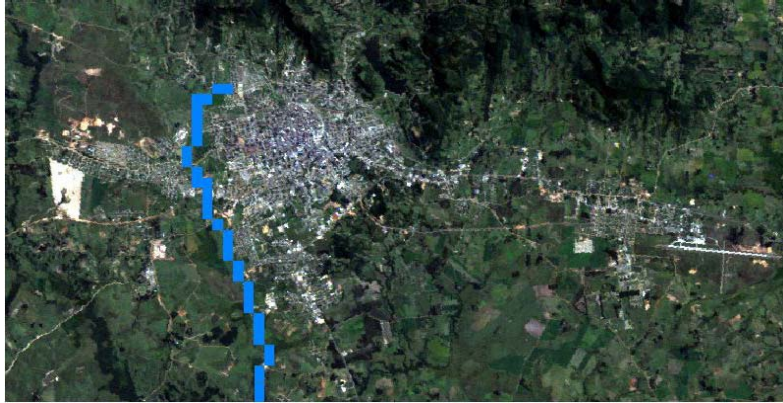


fig49: atributo: CADENA; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL

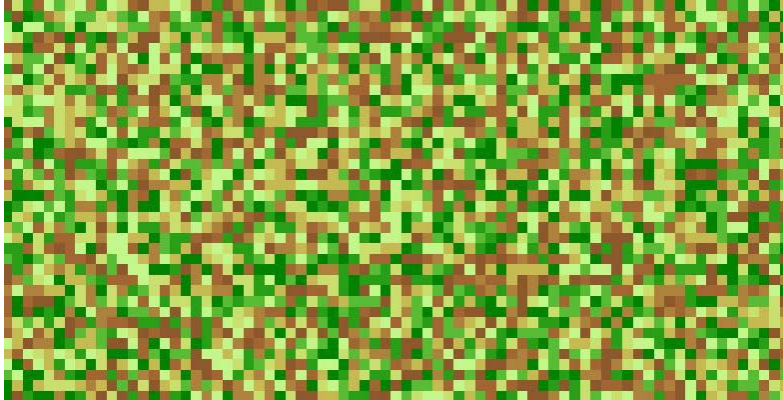


fig50: atributo: RANDOMGRID; tipo: NATURAL; comportamento: RESISTÊNCIA INSTÁVEL



fig51: atributo: MILITAR; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING

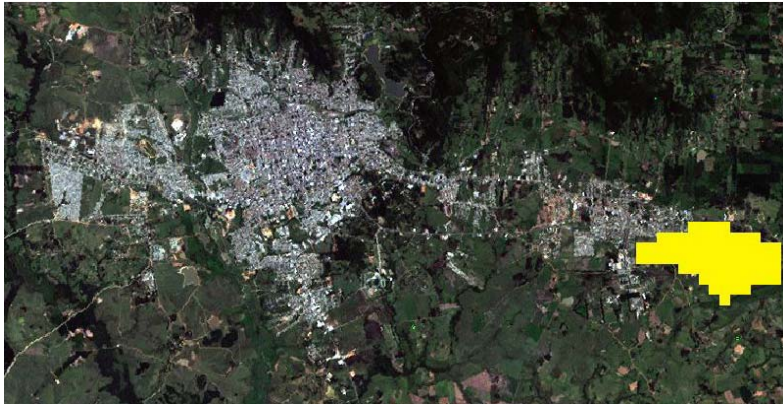


fig52: atributo: BASEAEREA; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING



fig53: atributo: UFSM01; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING



fig54: atributo: UFSM02; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA FREEZING



fig55: atributo: LEIAMB; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL





fig56: atributo: RURAL; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL

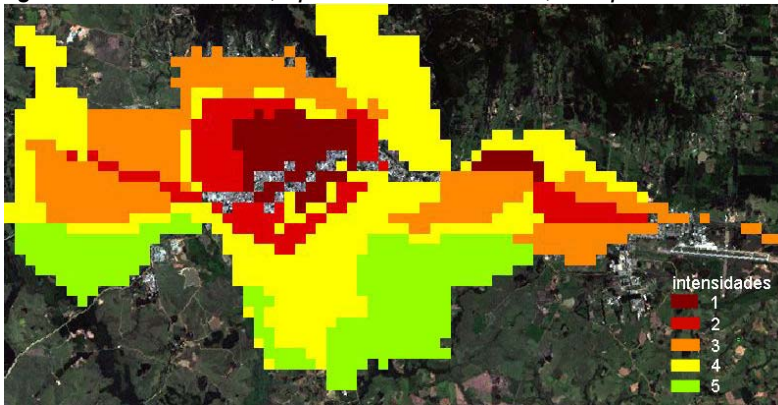


fig57: atributo: PLANODIRETOR; tipo: INSTITUCIONAL; comportamento: RESISTÊNCIA ESTÁVEL

RESUMO DOS ATRIBUTOS					
Atributo [Attribute]	Descrição	Categoria [Type]	Comportamento [Behave]	Característica	Peso[Weight]
URB01	mancha urbana em 2002	urbano	atrator	instável	1
URB02	maiores concentrações urbanas em 2002	urbano	atrator	instável	1
SV	principais eixos do sistema viário em 2002	urbano	atrator	instável	0,4
UFSM03	atributo pontual representando a UFSM	urbano	atrator	freezing	1,5
VILABELGA	área de preservação de patrimônio histórico	urbano	atrator	freezing	0,4
ATRATOR01	pólo de atração	urbano	atrator	freezing	3
ATRATOR02	pólo de atração	urbano	atrator	freezing	2
AGUAS	lagos, barragens e açudes	ambiental	resistência	freezing	1
CADENA	arroio cadena e sua área de influência	ambiental	resistência	estável	1
SOLOS	solos descobertos	ambiental	resistência	instável	0,5
CAMPOS	campos naturais e plantações	ambiental	resistência	instável	1
MATAS	áreas de cobertura florestal	ambiental	resistência	instável	1,2
MORROS	áreas com inclinações maiores que 30° ou altitude maior que 150m	ambiental	resistência	estável	1,2
RANDOM	grid randômico com intensidades entre 1 e 4	ambiental	resistência	instável	0,4
FERROVIA	área de abrangência da legislação referente à rede ferroviária	institucional	resistência	estável	0,7
UFSM01	atributo representando a área do Campus da UFSM	institucional	resistência	freezing	1
UFSM02	atributo representando a área da Fazenda da UFSM	institucional	resistência	freezing	1
BASEAEREA	área pertencente à Base Aérea de Santa Maria	institucional	resistência	freezing	1
MILITAR	áreas militares	institucional	resistência	freezing	1
LEIAMB	abrangência das legislações ambientais	institucional	resistência	instável	0,5
RURAL	áreas fora do perímetro urbano	institucional	resistência	estável	1
PLANODIRETOR	índices de ocupação previstos pelo Plano diretor	institucional	resistência	estável	1

tabela01: atributos utilizados nas simulações a partir de 2002.

## 6. Calibração do modelo

Definidas as dimensões da área de estudo e os atributos a serem utilizados na simulação, surge a necessidade de operar ajustes no modelo para que a dinâmica espacial urbana de Santa Maria seja representada da maneira esperada. Para tanto, é necessário que os resultados simulados estejam em concordância com dados históricos obtidos da observação da evolução urbana. Trata-se, segundo Clarke (1997) de prever o presente através do passado, para então especular sobre o futuro, permitindo que o modelo continue interagindo com as mesmas regras. É uma adequação dos parâmetros internos de um modelo para que, alteradas a intensidade, o peso e a importância de determinado elemento, uma dinâmica de crescimento seja captada e aspectos do que se considera o “real” possam ser representados. Geralmente calibrações em modelos de autômatos celulares consistem em processos heurísticos de experimentação e comparação de resultados, podendo também ser empregados processos estatísticos baseados na evolução da relação entre cada variável do modelo, sendo este processo mais indicado para modelos que possuem variáveis fixas, que não é o caso do SACI.

O ajuste do conjunto de parâmetros e das tensões de crescimento oferecidos pelo SACI permite realizar a sintonia fina do processo. Como descreve Polidori (2003), estes parâmetros controlam a influência dos fatores exógenos que integram o sistema, regulando sua dinâmica, e podem estar vinculados aos procedimentos de input de dados ou diretamente às regras de processamento. Um dos pressupostos de todo procedimento de calibração é a independência dos parâmetros, o que permite experimentar valores separadamente para cada um, mantendo os demais inalterados, e assim sucessivamente. Para a pesquisa foi utilizado um procedimento hierárquico, isto é, testaram-se primeiro os parâmetros considerados mais importantes, inicialmente com grandes variações evoluindo para variações cada vez menores.

## 6.1. Parâmetros de crescimento e horizonte de simulação

Foram escolhidos inicialmente os parâmetros que influenciam estruturalmente a simulação para com eles buscar as primeiras aproximações com a situação existente. Assim, a calibração foi realizada utilizando dois parâmetros fundamentais: a) regulação do tipo de crescimento (TENSION DISTRIBUTION), que é determinado pela percentagem de distribuição de tensões, considerada uma variação qualitativa; b) a regulação da intensidade de crescimento, que é determinada pelo parâmetro  $\lambda$  (lambda) que permite ajustar o potencial de crescimento externo ( $\lambda_{ext}$ ) e interno ( $\lambda_{int}$ ). Os demais parâmetros foram inicialmente deixados em suas posições padrão, para permitir um melhor controle das modificações.

Outro fator importante a ser observado na calibração é o peso relativo dos atributos, onde pequenas mudanças podem resultar em drásticas transformações. Ao fim de cada processamento o programa gera um arquivo *history.txt*, onde constam todos os atributos, pesos e valores de parâmetro utilizados, facilitando o controle do procedimento.

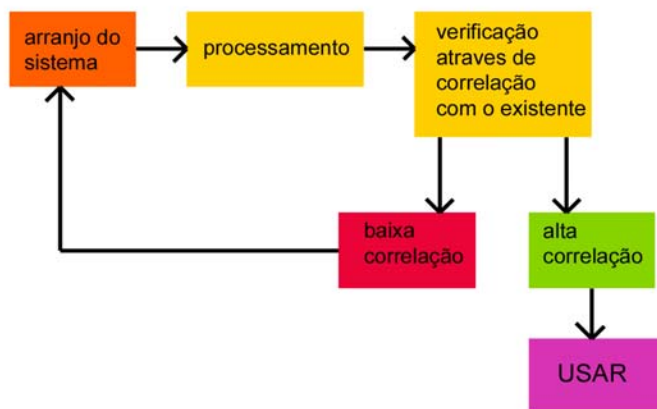


fig58.: esquema do processo de calibração do modelo

Com o objetivo de capturar a dinâmica espacial de Santa Maria, foi estabelecido um horizonte de 16 anos para simulações teste, onde através do ajuste dos parâmetros e da distribuição das tensões de crescimento, os resultados das simulações foram se aproximando do esperado. Assim, a data inicial para as simulações de calibragem foi 1986 e a configuração espacial da cidade para essa época foi obtida através de

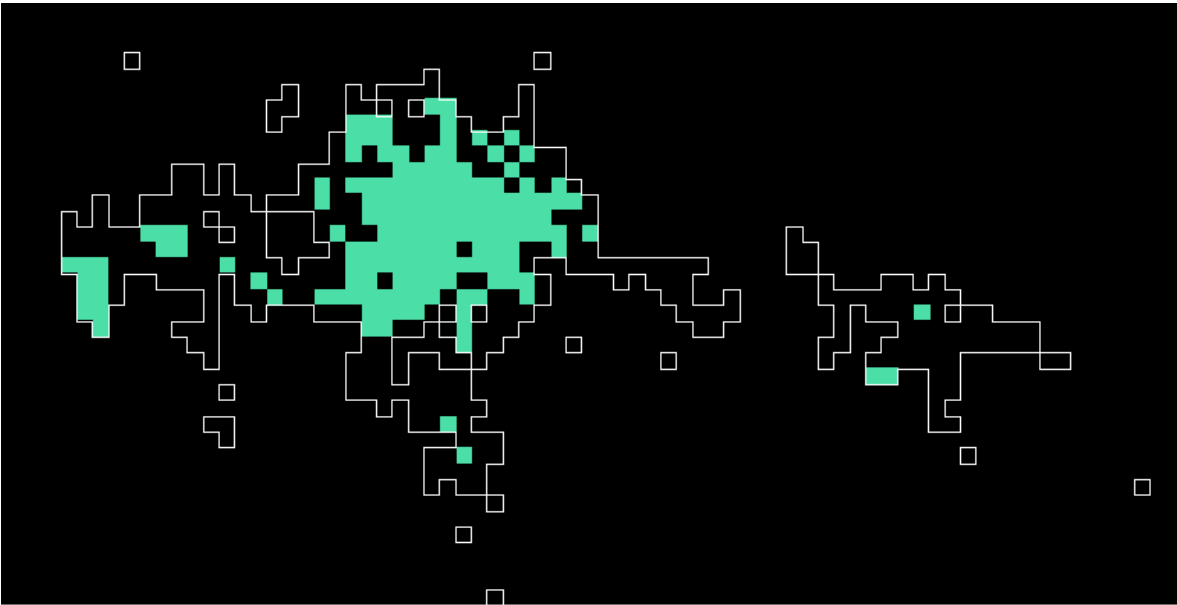
classificação de imagens do satélite Landsat7 ETM+ e levantamento de dados cadastrais em arquivos da Prefeitura Municipal de Santa Maria. A data de controle estabelecida foi 2002 e as simulações tentaram se aproximar da configuração espacial existente nessa data. A comparação entre os resultados das simulações e o existente, bem como entre os próprios outputs do modelo foi facilitada com a utilização da extensão GRIDPlus do ARCVIEW, que possibilita gerar tabelas com o valor de cada célula para os diversos outputs do modelo. De posse desses valores, foi possível realizar correlações entre os dados obtidos nos processamentos com os dados de 2002, utilizando o programa Excel.



*fig59: Santa Maria em 1986 em composição de imagem do satélite Landsat7 ETM+*



*fig60: Santa Maria em 20026 em composição de imagem do satélite Landsat7 ETM+*



*fig61: sobreposição dos grids representando a mancha urbana em 1986 e em 2002, com células de 285x285m.*

## **6.2. Etapas da calibração**

A calibração do modelo foi operada através de tentativas, sendo necessário estabelecer um método de controle e análise dos resultados. Para tanto foram utilizadas correlações espaciais entre os grids, comparações entre a quantidade de

células urbanas geradas a cada iteração e análises visuais dos resultados. O procedimento para a calibração do modelo para Santa Maria pode ser resumido na descrição a seguir:

1-Foi realizado um processamento sem tensões de crescimento para o ano de 2002, gerando outputs do modelo para este estado configuracional, que foram utilizados como parâmetro de comparação com as simulações posteriores. Os outputs escolhidos para comparação foram carregamento urbano (LoadU, que representa a distribuição dos estoques construídos), fenótipo urbano (CellType, que indica a conversão de território não urbanizado em urbanizado) e centralidade relativa (CentR1, que é um indicador sintético de qualificação locacional (ver capítulo 3.4.).

2- Para cada processamento o SACI gera uma tabela (CELLCNT) com a contagem do total de células urbanas (URBANCNT) e das células de borda (BORDERCNT) em cada iteração. Para 2002 foram contadas 486 células urbanas e 322 células de borda.

Células urbanas em 1986	Células de borda em 1986	Células urbanas em 2002	Células de borda em 2002
174	138	486	322

*tabela02: células urbanas e de borda em 1986 e 2002.*

3- Foram então realizados vários processamentos com modelo com a configuração de 1986, experimentando diferentes intensidades de crescimento através da mudança dos valores dos parâmetros lambda externo e lambda interno e diferentes composições de distribuição de tensões (axial, axial de buffer, polar, difusa1 e difusa2). De posse dos resultados, foi possível escolher os mais aproximados com o encontrado em 2002 e partir para correlações mais aprofundadas.

A aproximação com os valores de URBANCNT e BORDERCNT foi o critério inicial para a escolha das iterações a serem observadas. A seguir, pode-se observar a tabela CELLCNT gerada para o Process31, onde foram escolhidas as iterações mais aproximadas dos valores de 2002:

PROCESS	ITERATION	URBANCNT	BORDERCNT
31	1	178	142
31	2	199	160
31	3	222	182
31	4	251	200
31	5	291	226
31	6	323	240
31	7	345	246
31	8	368	252
31	9	388	242
31	10	408	246
31	11	432	257
31	12	457	269
31	13	468	276
31	14	481	280
31	15	496	284
31	16	512	285
31	17	526	288
31	18	539	284

*tabela03: evolução do número de células urbanas e de borda para o Processamento 31*

Neste processamento, a iteração 15 foi a que apresentou melhor valor para URBANCNT e BORDERCNT, sendo então escolhida conjuntamente com a iteração anterior e posterior para a comparação de seus resultados de CellType, LoadU e CentR1 com 2002. Foi dada preferência aos processamentos em que os melhores resultados estivessem próximos da iteração 16, para que cada iteração pudesse ser considerada como 1 ano. Esse ajuste na velocidade do crescimento foi feito utilizando os parâmetros lambda externo e interno.



4- Os outputs gerados pelo SACI para as iterações escolhidas foram exportados como tabelas *.dbf* para o Excel, onde foi realizada a correlação entre o simulado e o existente para os resultados de CellType, LoadU e CentR1, sendo escolhida a iteração com melhor média de resultados, conforme o exemplo a seguir:

ITERAÇÃO	CellType	LoadU	CentR1	média
P31IT14	0,705	0,768	0,810	0,761
P31IT15	0,710	0,770	0,810	0,763
P31IT16	0,709	0,771	0,812	<b>0,764</b>

*tabela04: melhores resultados das correlações entre os outputs do Processamento 31 e do existente em 2002.*

5- Depois de algumas simulações iniciais, os resultados mostraram que os melhores valores de correlações com o existente ocorriam com tensões de crescimento próximas de 1,6 para o lambda externo e 1,8 para o lambda interno. As composições de tensões com melhores resultados foram as de predomínio axial e sem predomínio, o que permitiu fechar um pouco mais o foco das simulações. Com os valores ajustados para os lambdas e para as distribuições de tensões, operou-se a sintonia fina da calibração, que consistiu em mudanças sutis nos pesos e nas intensidades de alguns atributos. Podem-se destacar as mudanças nos atributos urbanos, onde foi criado um atributo especial representando a COHAB Tancredo Neves (TNEVES-86), com peso um pouco menor que o atributo URB01, com a intenção de diminuir sua influência no crescimento, pois apesar de a COHAB já se apresentar como uma grande mancha urbana em 1986, ainda estava sendo implementada e escolheu-se não considerá-la como cidade já consolidada. Entre os atributos naturais testaram-se diversos valores para o grid randômico (RANDOM GRID) que representa as irregularidades do ambiente e fatores desconhecidos. A influência do atributo institucional de resistência FERROVIA, que representa as áreas não edificáveis em torno das estradas de ferro também necessitou de algum ajuste, já que, apesar da legislação impedir sua urbanização, apresenta considerável potencial para a ocupação informal.

Os processamentos que obtiveram os melhores resultados estão resumidos na tabela a seguir:

<b>MELHORES RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:</b>															
processo	tipo de crescimento	distribuições de tensões, em %					melhores resultados								
		A1	A2	P	D1	D2	iteração	n <sup>o</sup> total de células	n <sup>o</sup> total de células de borda	% de acertos do n <sup>o</sup> total de células simuladas	% de acertos do n <sup>o</sup> total de células de borda simuladas	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média das correlações
<b>melhores resultados da calibração utilizando lambda externo=1,6 e lambda interno=1,8*</b>															
P18	predomínio axial	80	5	5	5	5	16	476	286	97,94	88,82	0,687	0,766	0,806	0,753
P19	sem predomínio	20	20	20	20	20	19	483	295	99,38	91,61	0,690	0,775	0,796	0,754
P20	predomínio polar	5	5	80	5	5	6	491	342	98,97	93,79	0,668	0,782	0,767	0,739
P21	predomínio composição axial e polar	48	2	48	1	1	4	452	337	93,00	95,34	0,661	0,767	0,769	0,732
P23	axial	100	0	0	0	0	10	493	359	98,56	88,51	0,589	0,739	0,778	0,702
<b>melhores resultados da calibração utilizando lambda externo=1,55 e lambda interno=1,75*</b>															
P28	sem predomínio	20	20	20	20	20	18	490	300	99,18	93,17	0,690	0,778	0,796	0,755
<b>melhores resultados da calibração utilizando lambda externo=1,6 e lambda interno=1,8 E RANDOM=0,4</b>															
P30	sem predomínio	20	20	20	20	20	17	492	284	98,77	88,20	0,706	0,778	0,796	0,760
P31	predomínio axial	80	5	5	5	5	15	496	276	97,94	85,71	0,710	0,770	0,809	0,763
P31	predomínio axial	80	5	5	5	5	16	512	285	94,65	88,51	0,709	0,771	0,812	0,784

tabela05: processamentos com os melhores resultados nas correlações com a situação existente em 2002.

É possível observar que com o avanço da calibração as médias dos melhores resultados apresentaram valores muito próximos, com diferenças na terceira casa decimal. Assim, como critério de desempate, escolheu-se utilizar a configuração que apresentava melhores resultados na iteração 16, o que permite considerar cada iteração como um ano. Por esse critério foi escolhida a iteração 16 Processamento 31, que utiliza a distribuição de tensões com predomínio axial (80%, 5%, 5%, 5%, 5%), lambda externo=1,6 e lambda interno=1,8. Nota-se que nas correlações com o existente, a iteração 15 e 16 do Processamento 31 apresentam desempenhos semelhantes, porém na iteração 16 o numero de células de borda, que é uma medida de carácter mais qualitativo, é mais aproximado com o existente.

As imagens representando a configuração inicial utilizada para 1986 e os resultados do processo 31 (P31) estão representados a seguir:

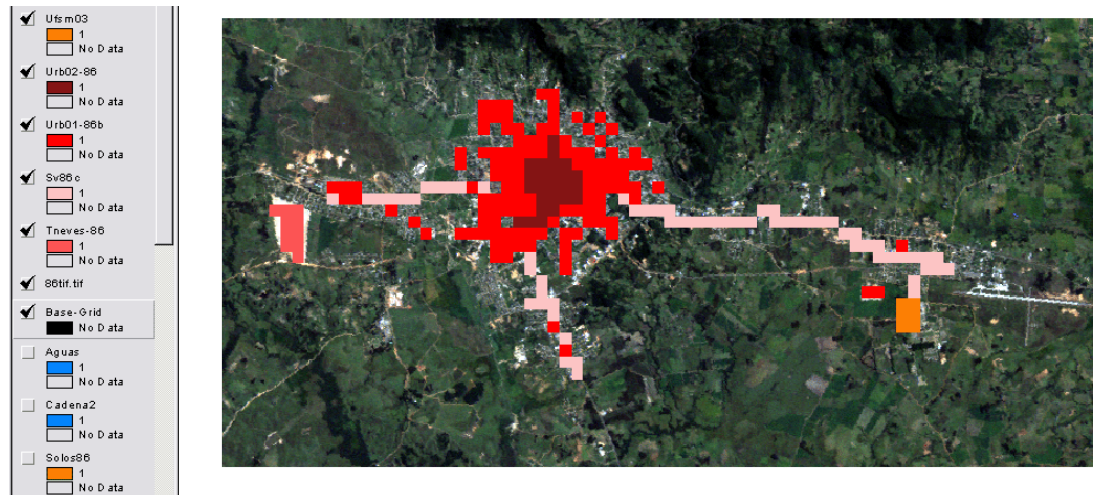


fig62: atributos urbanos para 1986

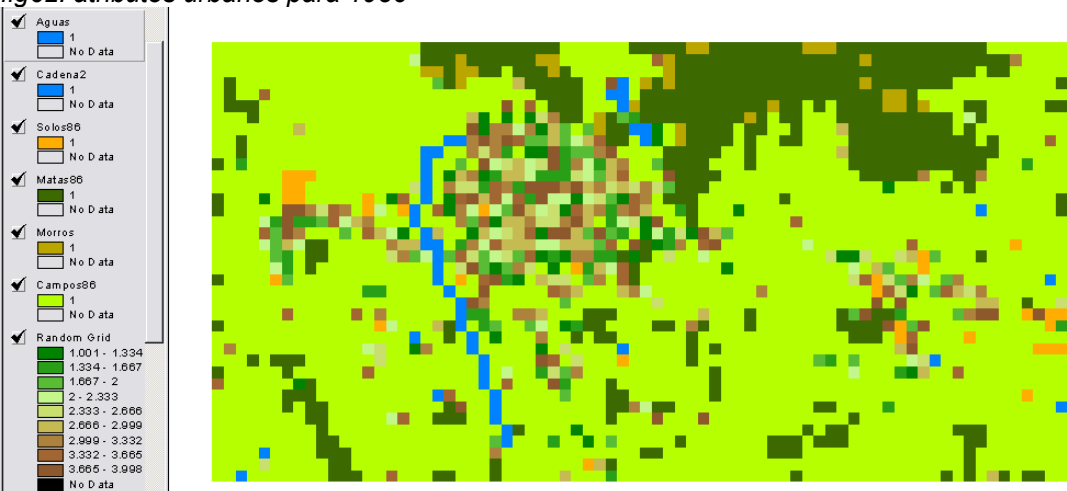


fig63: atributos naturais para 1986



fig64: atributos institucionais para 1986

RESUMO DOS ATRIBUTOS UTILIZADOS NO PROCESS 31					
Atributo/[Attribute]	Descrição	Categoria [Type]	Comportamento [Behave]	Característica	Peso [Weight]
URB01-86	mancha urbana em 1986	urbano	atrator	instável	1
URB02-86	maiores concentrações urbanas em 1986	urbano	atrator	instável	1
TNEVES-86	atributo específico representando a COHAB Tancredo Neves em implantação	urbano	atrator	instável	0,7
SV-86	principais eixos do sistema viário em 1986	urbano	atrator	instável	0,4
UFSM03	atributo pontual representando a UFSM	urbano	atrator	freezing	1,5
AGUAS	lagos, barragens e açudes	ambiental	resistência	freezing	1
CADENA	arroyo cadena e sua área de influência	ambiental	resistência	estável	1
SOLOS-86	solos descobertos em 986	ambiental	resistência	instável	0,5
CAMPOS-86	campos naturais e plantações em 1986	ambiental	resistência	instável	1
MATAS-86	áreas de cobertura florestal em 1986	ambiental	resistência	instável	1,2
MORROS	áreas com inclinações maiores que 30° ou altitude maior que 150m	ambiental	resistência	estável	1,2
RANDOM	grid randômico com intensidades entre 1 e 4	ambiental	resistência	instável	0,4
FERROVIA	área de abrangência da legislação referente à rede ferroviária	institucional	resistência	estável	0,7
UFSM01	atributo representando a área do Campus da UFSM	institucional	resistência	freezing	1
UFSM02	atributo representando a área da Fazenda da UFSM	institucional	resistência	freezing	1
BASEAEREA	área pertencente à Base Aérea de Santa Maria	institucional	resistência	freezing	1
MILITAR	áreas militares	institucional	resistência	freezing	1
LEIAMB	abrangência das legislações ambientais	institucional	resistência	instável	0,5
RURAL	áreas fora do perímetro urbano	institucional	resistência	estável	1

tabela06: atributos utilizados na calibração para o processamento 31.

A seguir, é possível visualizar as comparações entre o existente em 2002 e os resultados dos outputs CellType, LoadU e CentR1 da iteração nº16 do Processamento 31:

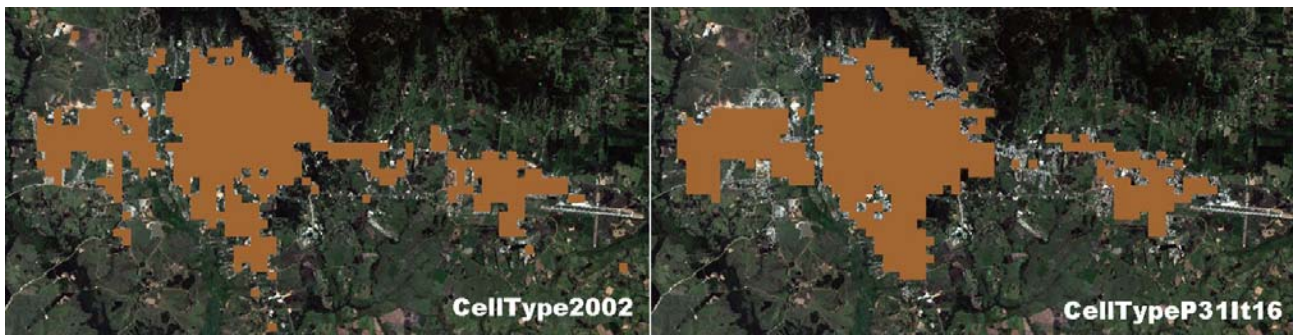


fig65: comparação entre CellType de 2002 e a iteração 16 do Process31

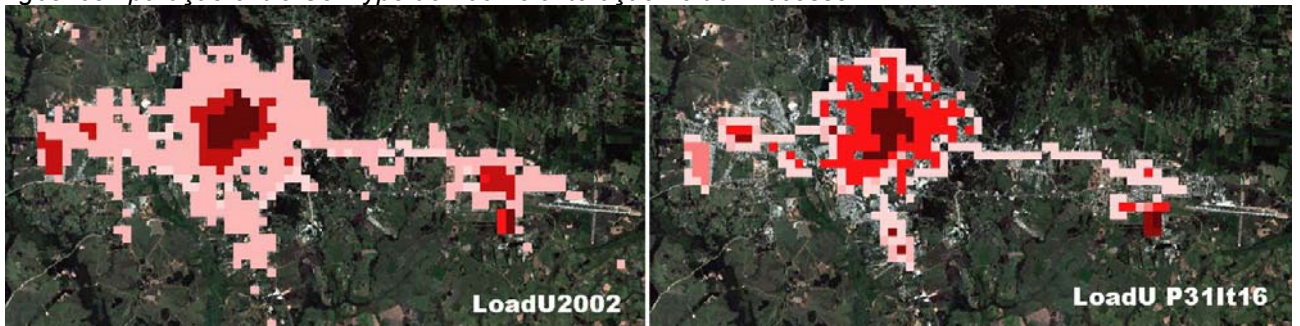


fig66: comparação entre LoadU de 2002 e a iteração 16 do Process31

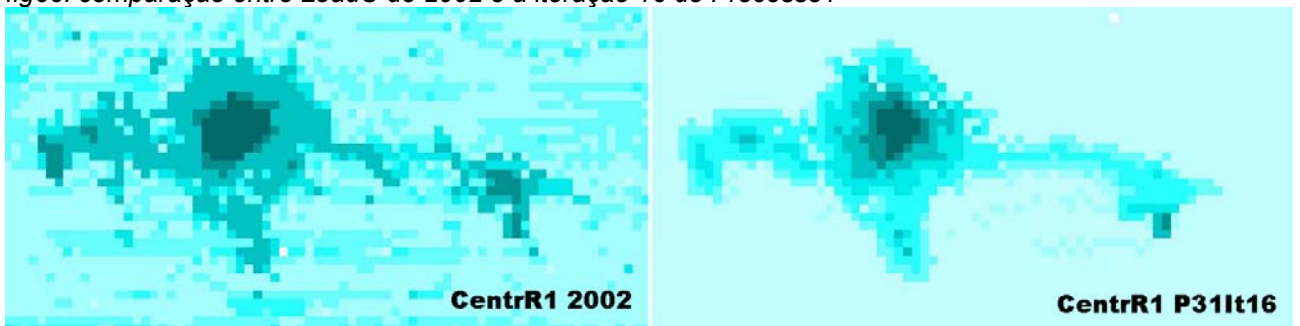
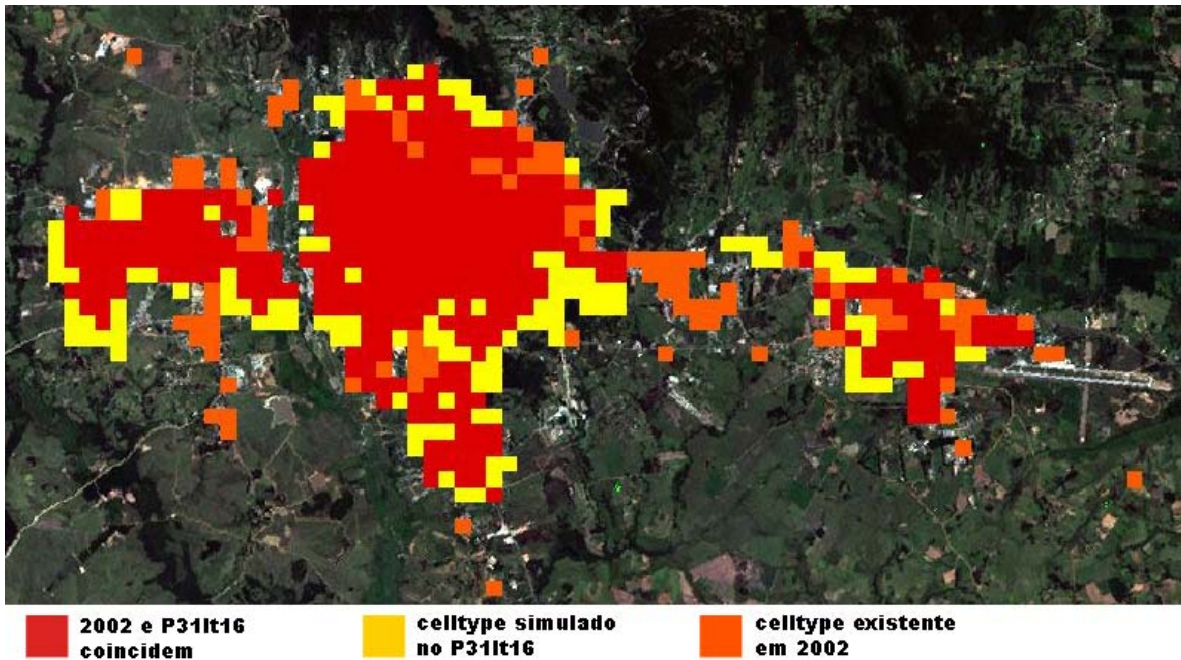


fig67: comparação entre CentrR1 de 2002 e a iteração 16 do Process31

A sobreposição dos resultados para CellType do Process31, iteração 16 (P31It16) com os de 2002, mostrada a seguir, foi realizada através do comando *map calculator* do ARCVIEW e permite observar onde a simulação urbanizou onde deveria (vermelho), onde urbanizou onde não deveria (amarelo) e onde não urbanizou onde deveria ter urbanizado (laranja). Recursos de geoprocessamento como a álgebra com mapas são ferramentas de grande importância nas calibrações com o modelo, pois permitem a realização de uma série de comparações visuais que dão maior agilidade na escolha dos melhores resultados.



*fig68: sobreposição do output CellType existente em 2002 com o simulado na iteração 16 do Process31, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002*

A análise da seqüência de crescimento do cenário simulado é importante para demonstrar a evolução do sistema urbano de Santa Maria e possibilita realizar comparações com datas intermediárias, melhorando a qualidade da análise. O exemplo a seguir mostra a evolução do fenótipo urbano no Process31.

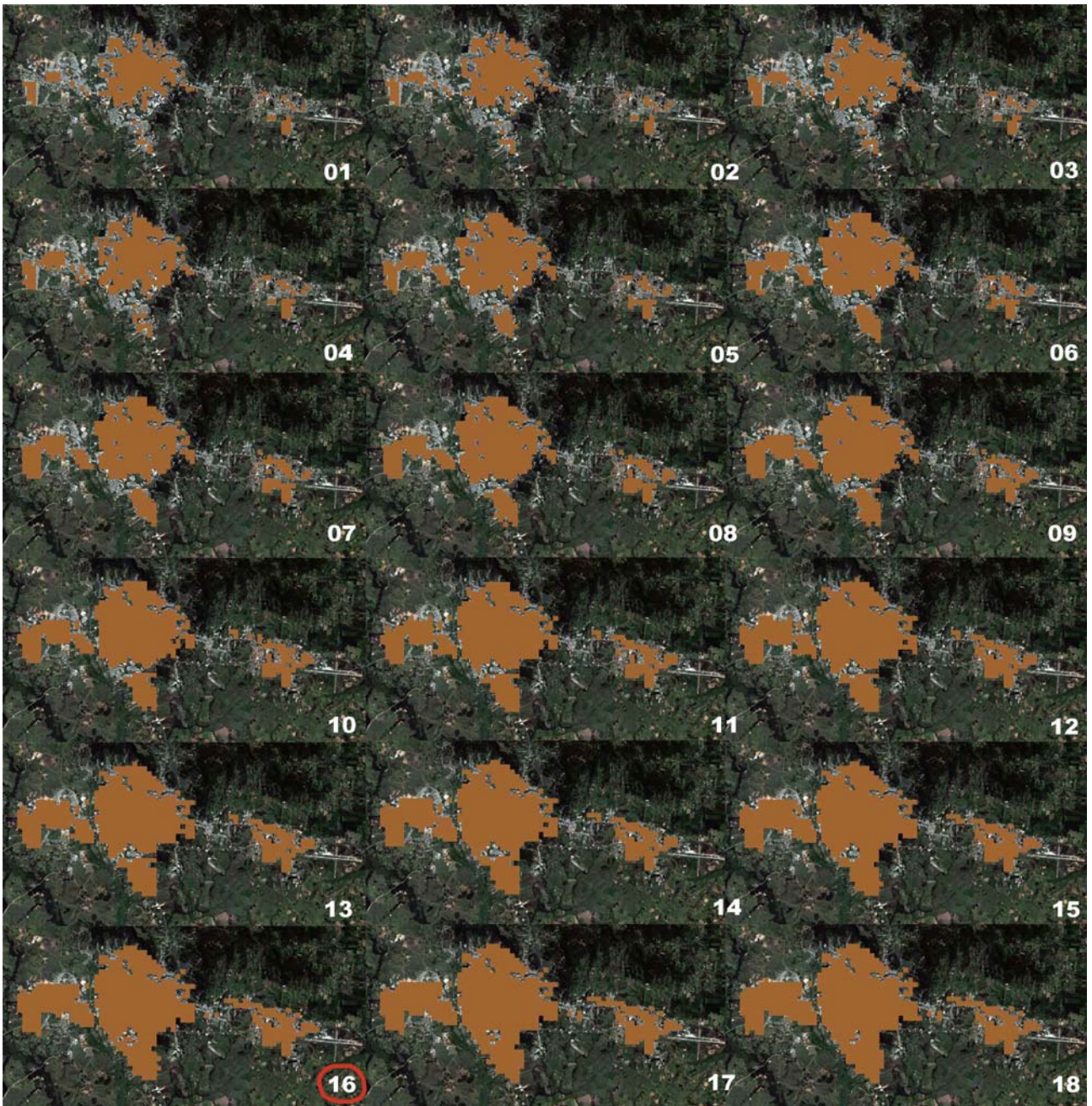


fig69: evolução do CellType para o Process31, com cada iteração sobreposta a imagem Landsat7ETM+ para 2002.

### 6.3. Considerações sobre a calibração

Os valores encontrados nas correlações entre o simulado e o existente permitem considerar os resultados da calibração satisfatórios, possibilitando afirmar que o modelo conseguiu captar o padrão configuracional de Santa Maria. Após os ajustes iniciais, os

resultados se mantiveram em valores acima de 70%, e bastante homogêneos para os diferentes outputs. A partir da sintonia fina para os lambdas interno e externo, as diferenças entre os melhores resultados foram se tornando cada vez mais sutis. Foi dada preferência aos resultados mais homogêneos, sendo descartados processamentos com ótimos valores para um output e muito baixos para outro. No processamento escolhido (P31), os melhores valores foram encontrados para a Centralidade Relativa Tipo 1 (0,81), o que significa que a distribuição do somatório das tensões que incide sobre cada célula ficou bastante semelhante com 2002, demonstrando a adequação dos carregamentos e resistências utilizados na simulação. O Fenótipo Urbano (CellType) apresentou as correlações mais baixas (0,71). Pelas análises visuais, nota-se que os pontos de crescimento onde houve divergência para CellType, em grande parte são constituídos por conjuntos habitacionais, concebidos como empreendimentos imobiliários em locais de baixa centralidade, que são mais difíceis de serem previstos. A evolução dos valores de Carregamento Urbano (LoadU), apresentou boa correlação com o existente (0,77), apesar do output simulado ser visivelmente mais fragmentado e possuir uma quantidade menor de células com algum carregamento do que 2002.

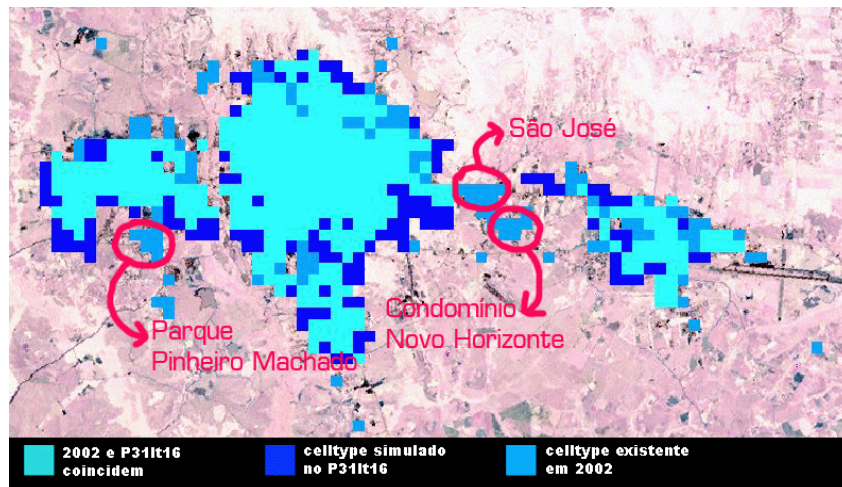
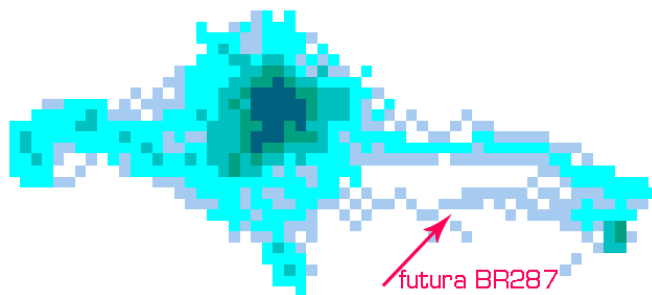


fig70: loteamentos não captados pela simulação do processamento 31



A ocorrência de melhores resultados para os processamentos com distribuição de tensões com predomínio axial<sup>5</sup> pode ser creditado à importância das grandes vias estruturais no crescimento da cidade, que se identifica no forte vetor de crescimento Leste-Oeste e no eixo que sai do centro da cidade em direção ao Sul. Em especial é possível destacar a boa representação do crescimento da região Oeste da cidade, na área entre os bairros Santa Marta e Tancredo Neves, bem como da região Leste representada pelo bairro Camobi, este sob influência da Universidade Federal de Santa Maria. O crescimento da parte Sul, apesar de um pouco exagerado, seguiu o padrão configuracional encontrado para 2002. Devido ao baixo índice de crescimento interno adotado na calibração, a parte central da cidade não apresentou um desenvolvimento muito satisfatório pra os valores de LoadU. Uma curiosidade pode ser reparada na análise da evolução dos resultados para CentR1, onde parece que a simulação “captou” a futura implementação da BR287, que ligaria o centro da cidade ao bairro de Camobi.



*fig71: iteração 13, Process31, output de CentrR1, mostrando o surgimento de uma linha de centralidade no local aproximado onde futuramente seria implantada a BR287*

As modificações que foram realizadas nos atributos durante a calibração demonstraram que os inputs iniciais não devem ser considerados como definitivos, sendo necessário o aprimoramento e até a criação ou decomposição de alguns atributos ao longo do processo, como no caso do atributo representando a COHAB Tancredo Neves. As operações com álgebra de mapas foram decisivas para a representação gráfica das correlações entre o simulado e o existente, pois considerando o caráter heurístico das calibrações no modelo, o componente visual

<sup>5</sup> Tensão AXIAL=80%; Tensão AXIAL BUFFER= 5%; Tensão POLAR= 5%; Tensão DIFUSA1=5%; Tensão DIFUSA2=5%.

deve estar sempre aliado às interpretações dos valores de correlação na busca por ajustes nos parâmetros de crescimento.

Diferente dos modelos configuracionais onde é necessário estabelecer relações matemáticas entre cada variável do modelo pra operar as calibrações, as características próprias da regra de crescimento geral e as relações entre as variáveis do modelo SACI induzem a um método de calibração por tentativas e comparações com uma situação existente. A calibração de modelos baseados em autômatos celulares constitui ainda um dos grandes desafios da área da modelagem urbana por estarem sujeitos a grandes transformações a partir de pequenas mudanças locais (TORRENS, 2000; BATTY, 1997) o que requer um rígido controle dos parâmetros e variáveis utilizados. A liberdade na criação das variáveis e na escolha do seu peso e comportamento na simulação torna o SACI um modelo versátil para representar diferentes cenários de crescimento, podendo ser adaptado a diversos tipos de cidades e escalas de exploração. No esforço para modelar a complexidade e servir de ferramenta prática de planejamento urbano, é possível considerar que um modelo eficiente deve ser o mais genérico possível e ao mesmo tempo permitir que a calibração o torne o mais específico possível.

Com o modelo considerado calibrado, foi possível partir para os testes de alguns cenários de crescimento que possibilitaram entender melhor a estrutura espacial de Santa Maria e suas principais tendências de crescimento, onde os parâmetros utilizados no Process31 serviram como base para as simulações.

## 7. Cenários de crescimento

Tendo como base a calibração realizada a partir do crescimento ocorrido entre 1986 e 2002, são apresentados diferentes cenários de crescimento para a cidade de Santa Maria. Estas especulações são divididas em quatro grupos de simulações. O primeiro representa uma hipótese teórica de crescimento a partir de 1986 sem a Universidade Federal de Santa Maria. O segundo apresenta explorações dos efeitos do crescimento com diferentes intensidades. O terceiro explora o crescimento sob a influência de pólos de atração de crescimento e o quarto busca identificar se as taxas de aproveitamento do solo propostas pelo novo Plano Diretor de Santa Maria têm alguma influência no crescimento futuro.

Dada a natureza instável do comportamento do crescimento urbano, para poder se aproximar de uma possível tendência real de crescimento é necessário especular com diferentes possibilidades, como o a presença de novos pólos de atração ou índices mais elevados de crescimento do que os apresentados até então. Assim, as simulações dos diferentes cenários de crescimento apresentadas a seguir, que representam casos específicos, fazem parte de um busca maior pelo provável comportamento real da cidade e suas forças internas para os próximos anos. Da série de outputs gerados pelo SACI, foram escolhidos alguns considerados os mais representativos para serem realizadas observações, interpretações e comparações que explicitem características do crescimento urbano de Santa Maria.

As configurações a serem testadas são as seguintes:

### **Grupo 1:**

-crescimento sem a presença da UFSM, a partir de 1986.

### **Grupo 2:**

- crescimento com intensidades iguais à calibração, a partir de 2002.

- crescimento com intensidades superiores à calibração, a partir de 2002.

**Grupo 3:**

- crescimento com pólo de atração de grande intensidade instalado em localização de grande interesse imobiliário.

- crescimento com pólo de atração de grande intensidade instalado em área remota da cidade.

**Grupo 4:**

- crescimento com os índices de aproveitamento estipulados pelo novo plano diretor

**7.1. Cenário de crescimento a partir de 1986**

A simulação a partir de 1986 busca testar a influência da Universidade Federal de Santa Maria, um elemento urbano historicamente considerado fundamental no crescimento da cidade, descrito no modelo na forma de 3 atributos. A metodologia utilizada para testar os efeitos dos atributos foi realizar processamentos sem a sua presença, utilizando as mesmas configurações e intensidades de crescimento da calibração, comparando então os resultados dos outputs gerados no processamento com os resultados do Processo31, que obteve os melhores valores na calibração.

**7.1.1. Crescimento sem a presença da UFSM**

Na data da sua implantação, em 1964, o local onde foi instalado o Campus da Universidade Federal de Santa Maria consistia em uma área basicamente rural, afastada do centro da cidade e a urbanização do bairro Camobi era praticamente inexistente. O acesso era restrito a RS 509, e em seus primeiros anos o crescimento do bairro se apresentou bastante reduzido. A partir da segunda metade dos anos 80 houve investimentos por parte da Prefeitura Municipal em abertura de estradas e a implantação de loteamentos que levaram a uma aceleração do crescimento. No início da década de 90 foi implantada a BR 287, que possibilitou uma nova ligação entre o centro da cidade e o bairro Camobi. A implantação da “Faixa Nova” e também o início da duplicação da RS 509 estimulou consideravelmente o crescimento da região que

passou a contar com um maior número de serviços e atividades comerciais. Atualmente as áreas próximas à Universidade começam a se desenvolver com grande intensidade, principalmente com a construção de edificações de 4 pavimentos que buscam suprir a demanda gerada pela UFSM.

A simulação proposta busca representar um cenário de crescimento a partir de 1986 sem a presença da UFSM, sendo retirados da simulação tanto o atributo UFSM03, que representa a polarização exercida pela universidade, como os atributos institucionais de resistência UFSM01, que representa a área do Campus universitário e UFSM02, que representa a área ocupada pela fazenda da UFSM. A distribuição das tensões de crescimento axial, axial de buffer, polar difusa1 e difusa2 é a mesma utilizada na calibração (80%, 5%, 5%, 5%, 5%) bem como as intensidades de crescimento dadas pelos parâmetros lambda externo (1,6) e lambda interno (1,8).



fig72: atributos UFSM01, UFSM02 e UFSM03, retirados da simulação



fig73: comparação entre os outputs de CellType para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.



fig74: comparação entre os outputs de LoadU para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.

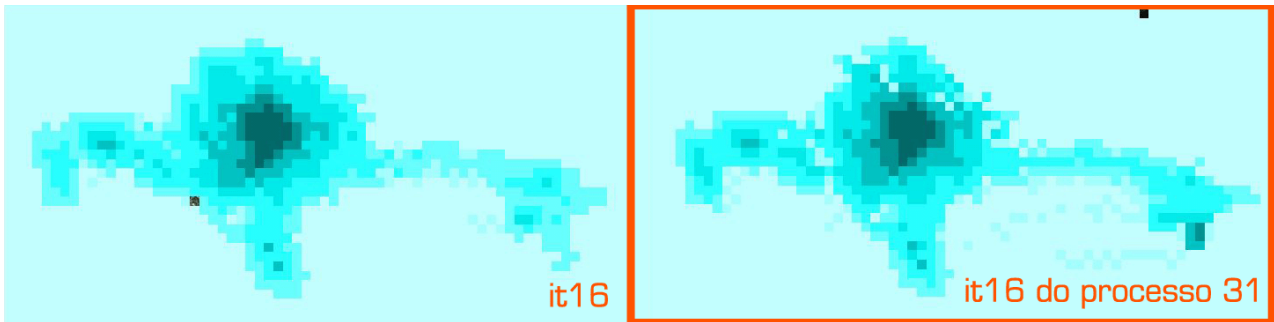


fig75: comparação entre os outputs de CentR1 para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.



fig76: comparação entre os outputs de Potencial para simulações sem e com a presença do campus da UFSM, na iteração nº 16.

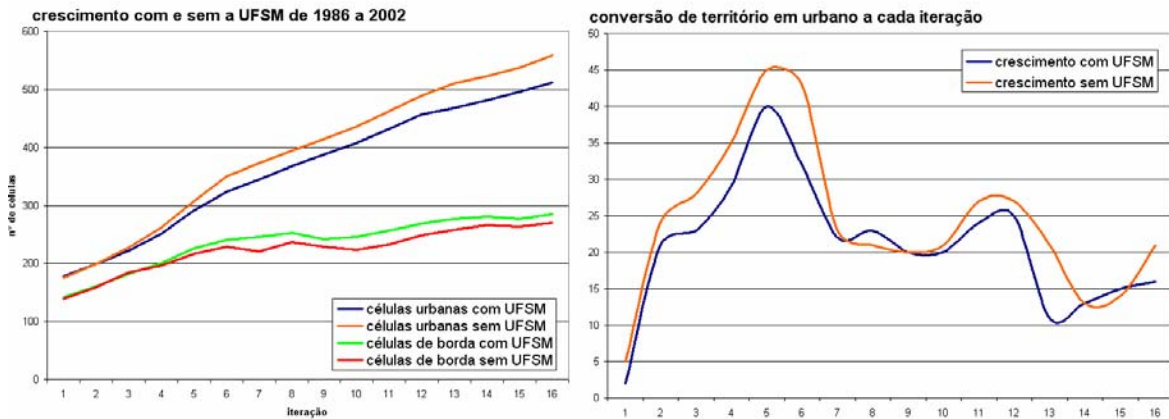


fig77: gráficos representando a comparação da evolução do crescimento urbano e da conversão de território a cada iteração para simulações sem e com a presença do campus da UFSM.

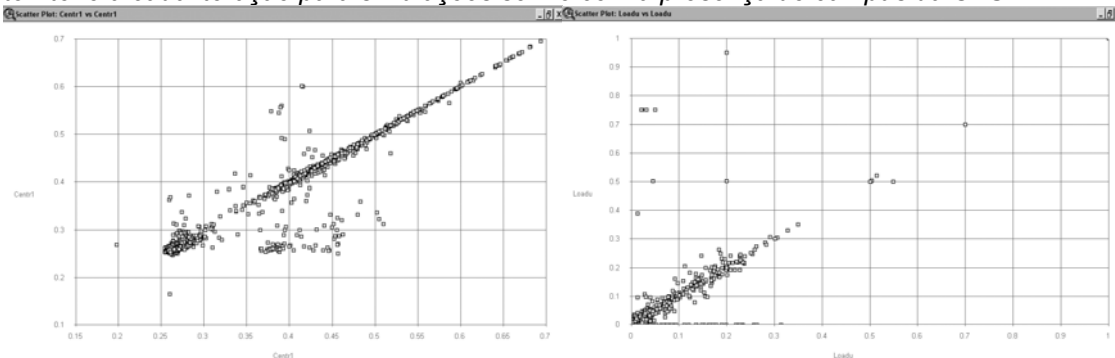


fig78: scattergramas correlacionado valores de CentR1 e Loadu, respectivamente.

Observando a comparação entre os outputs de CellType e LoadU obtidos na simulação sem a presença da UFSM com os resultados do Processo 31, é possível constatar que as diferenças entre as duas configurações podem ser percebidas principalmente nas áreas próximas ao Campus, ocorrendo uma conversão em território urbano de áreas que seriam pertencentes à universidade, ressaltando a importância do Campus como uma resistência ao crescimento do bairro Camobi. O crescimento deste bairro no cenário sem a UFSM aparece mais fragmentado, com a ocorrência de alguns vazios urbanos. É possível interpretar que se o crescimento inicial do bairro pode ser creditado em grande parte à implantação da Universidade, as tensões de crescimento geradas apenas pelos carregamentos urbanos são suficientes para resultar na configuração atualmente encontradas, o que se verifica também ao serem analisados os resultados para a Centralidade Relativa<sup>1</sup>.

Analisando o output de Potencial verifica-se que o pólo de atração representado pela UFSM concentra grande parte do potencial de crescimento no modelo, sendo que na simulação sem o Campus maiores potenciais surgem em outras áreas, em especial nas áreas próximas aos quartéis e ao bairro Tancredo Neves, distribuindo-se de maneira mais uniforme pelas bordas urbanas. O gráfico representando a evolução do crescimento urbano reforça o papel de resistência da área do Campus universitário ao mostrar um ligeiro aumento na conversão de território em urbano sem a sua presença. A diminuição do número de células de borda sugere que sem a presença da UFSM o crescimento se torna mais compacto no sistema como um todo, e a conversão do território em urbano a cada iteração demonstra que o padrão de conversão é mantido apesar de uma maior conversão de território no cenário sem a UFSM.

De um modo geral, a simulação indica que apesar da importância da Universidade Federal de Santa Maria nos aspectos econômicos, políticos e sociais do município, quanto a seu papel na dinâmica de crescimento urbano sua influência se faz sentir de modo contraditório. Ao mesmo tempo em que gera fortes potenciais de crescimento em seu entorno, devido a sua extensa área funciona também como um impedimento à urbanização do bairro Camobi, que demonstrou ter um vigor de crescimento próprio considerável. A Universidade parece consumir os esforços de urbanização de seu entorno, tornando-os mais concentrados nesta área ao mesmo

tempo em que os tornam mais difusos no restante da cidade. Para um aprofundamento no conhecimento do papel da UFSM no crescimento urbano, mais explorações de caráter específico devem ser realizadas, através de diferentes calibrações e prospecções de crescimento em escala intra-urbana, um campo interessante para futuras pesquisas com o SACI.

## **7.2. Cenários de crescimento com diferentes intensidades**

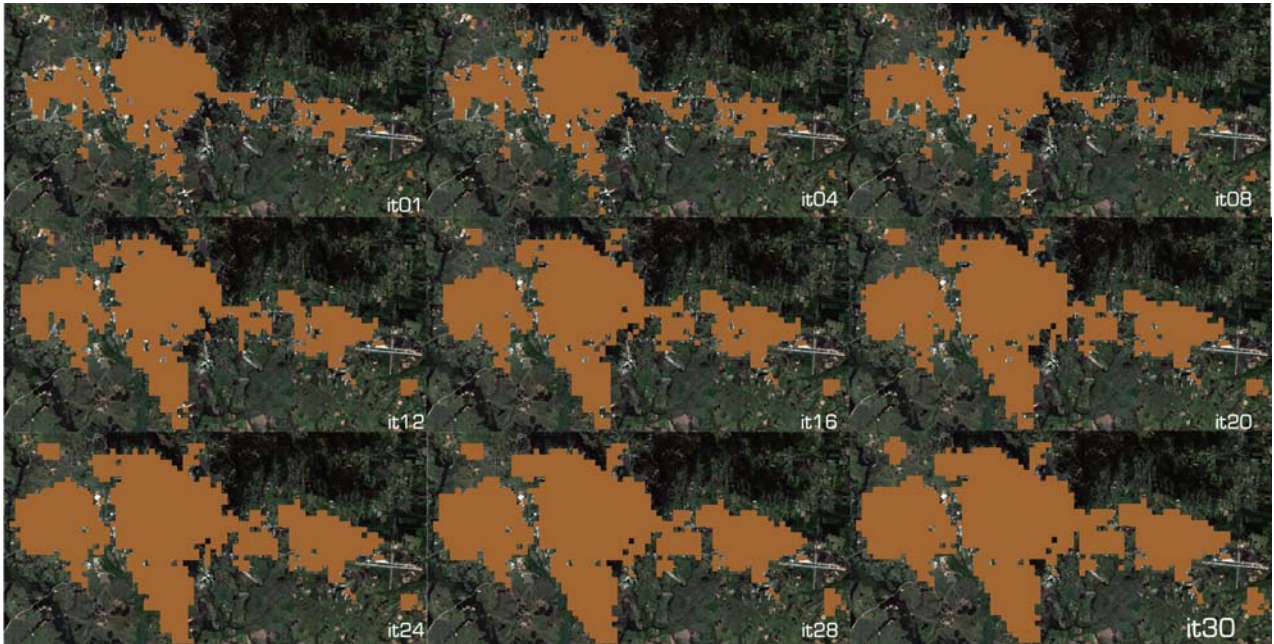
As simulações descritas neste capítulo buscam explorar possíveis cenários de crescimento futuro em um horizonte de 30 anos, a partir de um estado inicial montado para o ano de 2002. A maioria dos atributos utilizados teve seu peso e intensidade de distribuição no sistema testados na calibração, porém em situações reais, é de se esperar que ocorram mudanças na intensidade e velocidade do crescimento da cidade bem como surjam novas variáveis relevantes no processo. Assim, além do crescimento com as intensidades obtidas na calibração, são propostas outras situações, como um cenário de crescimento com potencial superior e com a presença de novos pólos de atração influenciado o sistema. Tratam-se de simulações de caráter especulativo e uma compreensão das tendências configuracionais futuras para Santa Maria deve estar baseada na análise e comparação dos vários resultados obtidos e dos padrões de crescimento que se sobressaem nos processos.

### **7.2.1. Crescimento com intensidades iguais à calibração**

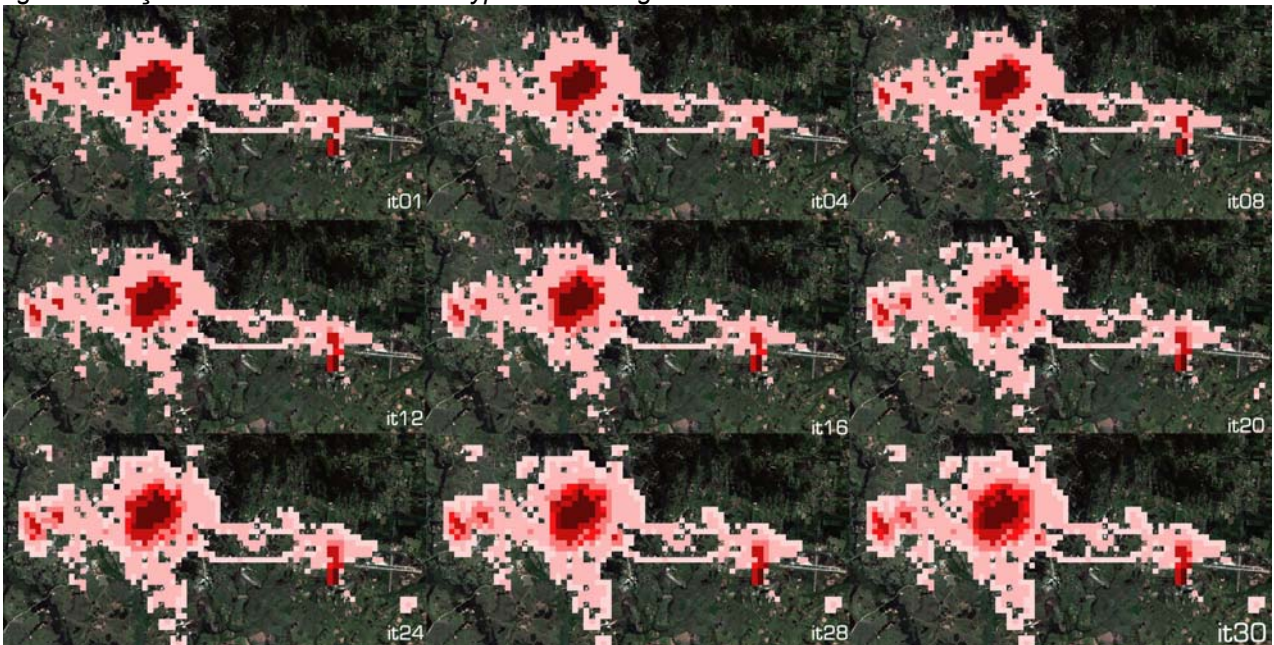
Essa simulação usa a configuração de parâmetros e atributos obtida na calibração, porém com alguns atributos devidamente atualizados para a data de 2002, como é o caso da maioria dos atributos naturais e dos atributos urbanos. Seus resultados serão utilizados como base de comparação para os resultados de outros cenários de crescimento, para testar os efeitos das mudanças nas configurações das simulações, motivo pelo qual será chamado “cenário padrão”. Para as comparações serão utilizados os outputs gerados pelo modelo e gráficos representando a evolução do crescimento e das taxas de conversão de território em urbano a cada iteração.



O cenário apresentado conta com 473 células urbanas em 2002 e ao final da simulação, na data de 2032, alcança 965 células urbanas. A seguir, a seqüência de crescimento futuro para os outputs de Fenótipo Urbano (CellType), Carregamento Urbano (LoadU) e Potencial de crescimento (Potential) em intervalos de 4 anos e para Centralidade Relativa tipo1 (CentR1), Centralidade Relativa tipo2 (CentR2), Centralidade Absoluta e Resistência Natural (ResistE) em intervalos de 15 anos :



*fig79: evolução dos resultados de CellType sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*



*fig80: evolução dos resultados de LoadU sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

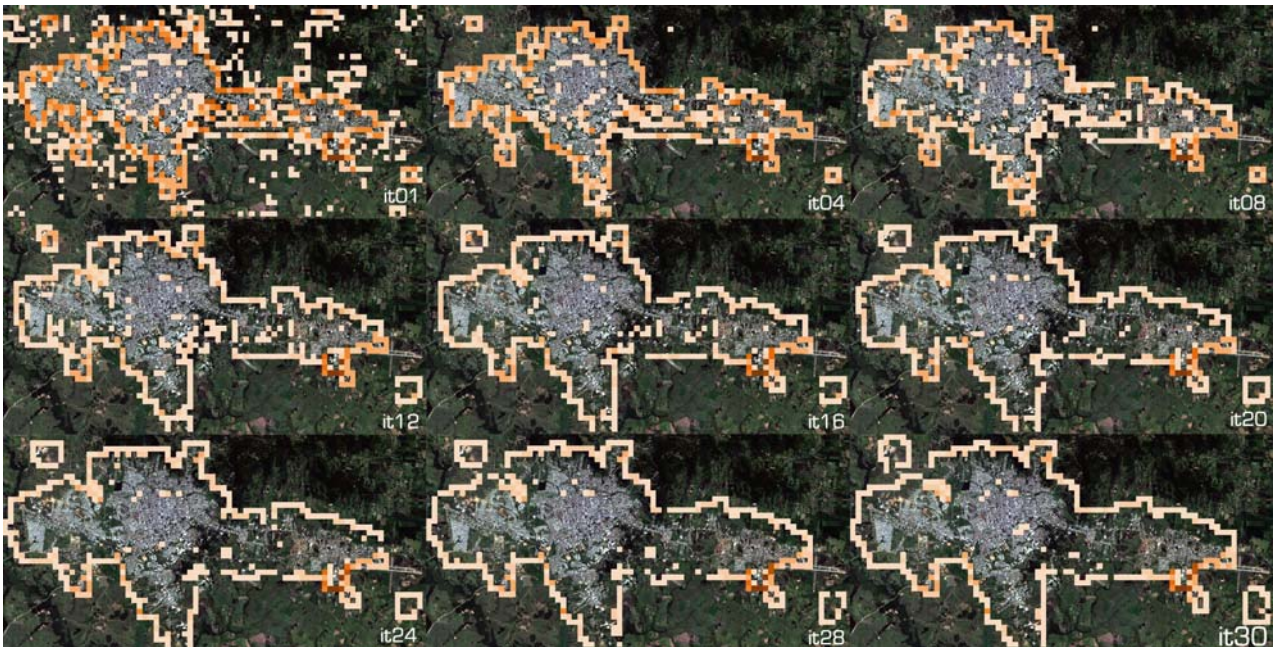


fig81: evolução dos resultados de Potencial sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

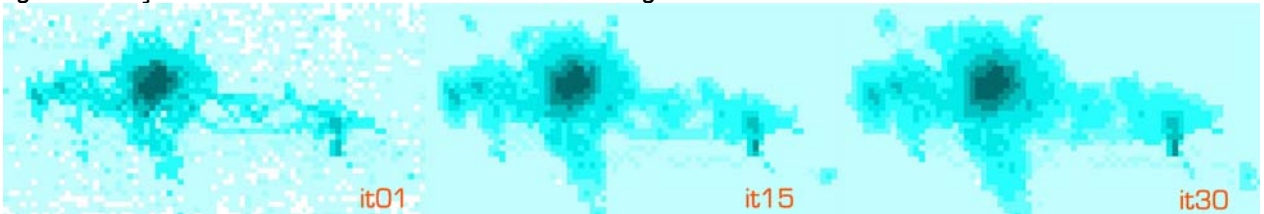


fig82: evolução dos resultados de CentR1

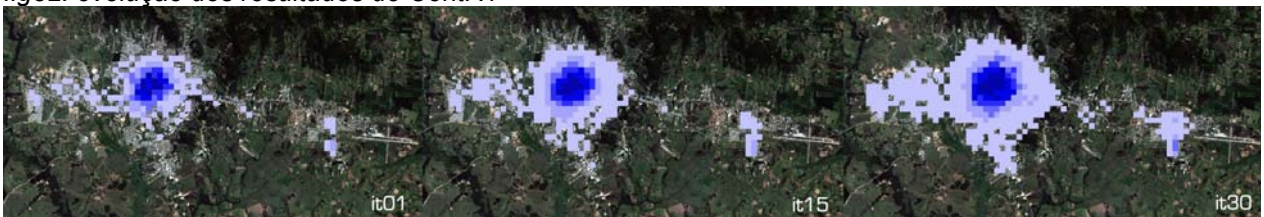


fig83: evolução dos resultados de CentR2 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

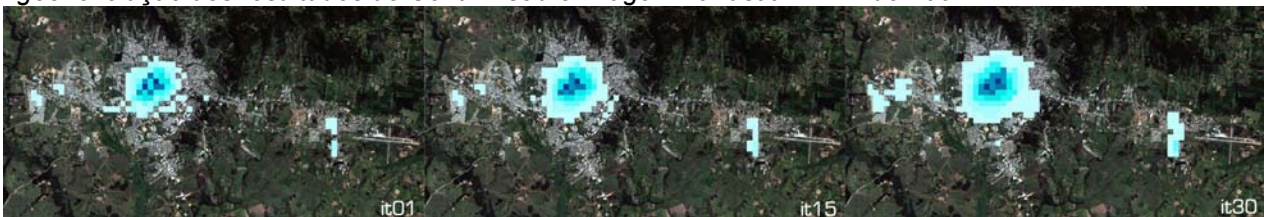


fig84: evolução dos resultados de CentABS sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.



fig85: evolução dos resultados de ResistE sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

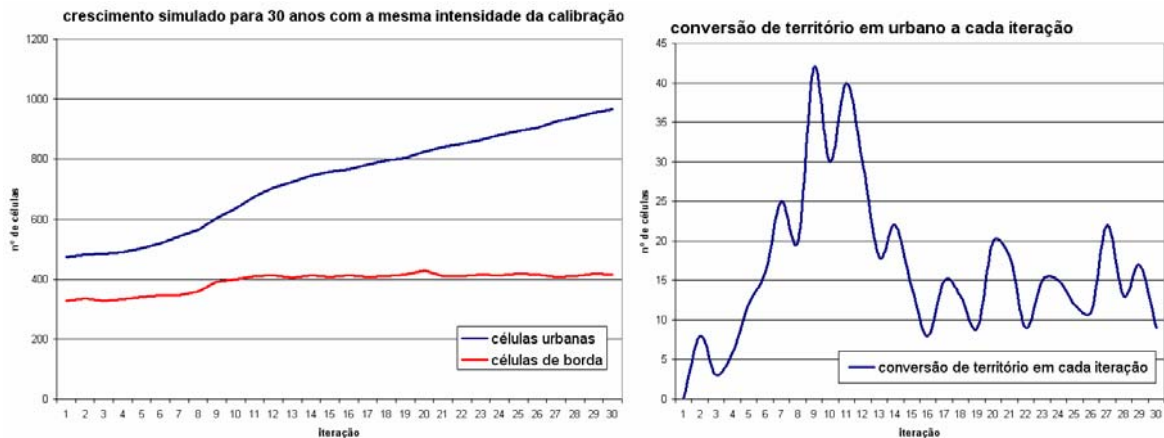


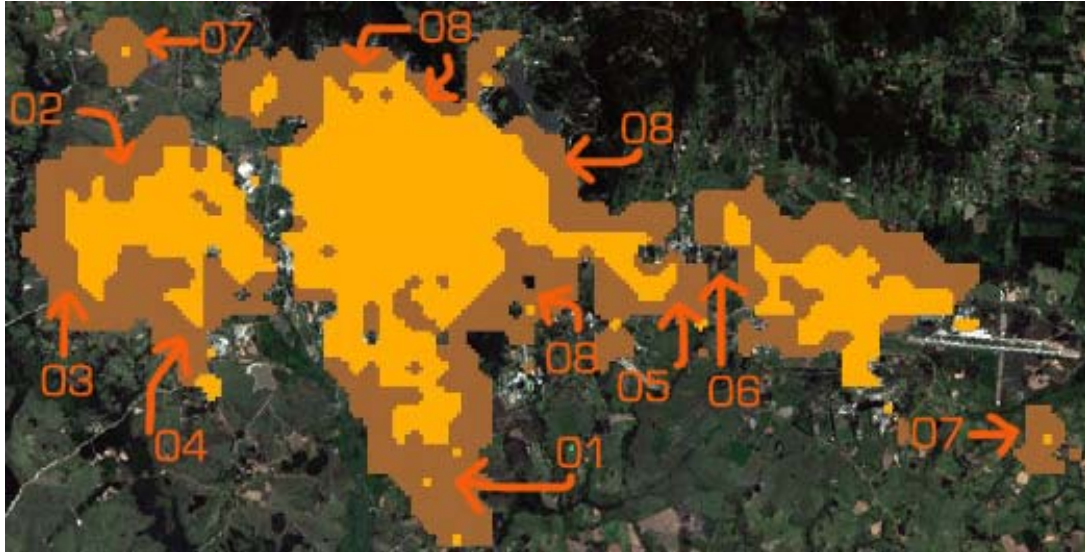
fig86: gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração

Para melhorar a visualização dos resultados, é possível aplicar o comando *ressample* oferecido pela extensão Spatial Tools do ArcView, subdividindo o tamanho das células das imagens através de interpolação bilinear, que determina o novo valor da célula baseado na média ponderada dos valores das quatro células mais próximas, suavizando a aparência dos resultados. Assim, para os outputs de Fenótipo Urbano (CellType) e Carregamento Urbano (LoadU), cada célula de 285x285m foi dividida em células menores de 85x85m<sup>6</sup>. Esse tipo de mudança é apenas um refinamento visual dos resultados, já que a simulação foi realizada considerando um ambiente descrito através de células de 285x285.

Analisando a evolução de CellType é possível notar que ocorre uma considerável conversão de território em urbano principalmente nas áreas ao sul da cidade (01) e em áreas a oeste, acima do bairro Santa Marta, na região conhecida como “Vila dos Sem Teto” (02). Ainda a oeste, é intenso o crescimento do bairro Tancredo Neves (03) e do Parque Pinheiro Machado (04). Observa-se a gradativa ocupação da área entre o centro da cidade e a UFSM (05), apesar da predominância de um vazio urbano entre estas áreas (06). Os núcleos isolados que aparecem no início da simulação (07) têm considerável crescimento ao longo do processamento, não chegando, porém, a serem incorporados à cidade. Nota-se que as áreas na base dos morros (08) são rapidamente

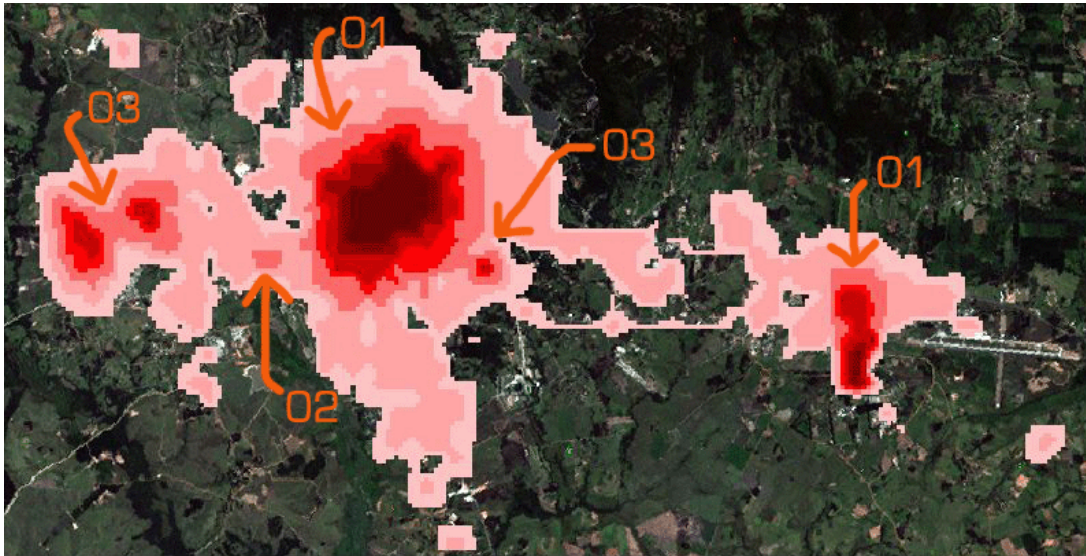
<sup>6</sup> Como o pixel das imagens Landsat representa uma porção de 28,5 x 28,5m, no ArcView cada célula possui um tamanho relativo igual a 10. Assim, através do comando *ressample*, o tamanho das células foi transformado de 10x10 para células de 3x3, resultando em células de 85,5 x 85,5m.

convertidas em urbanas, chamando atenção para possíveis problemas ambientais gerados pelo crescimento.



*fig87: observações sobre a evolução de CellType, em imagem da iteração01 sobreposta à iteração30, com células de 85x85m sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002 .*

A seqüência de crescimento dos carregamentos urbanos a seguir demonstra que houve uma evolução das distribuições originais (01), não havendo o surgimento de outros carregamentos mais significativos, a não ser em uma área entre o centro e a zona oeste da cidade, em um ponto de maior centralidade (02). As porções de solo que se tornaram urbanas em geral apresentam um baixo carregamento, e muitas áreas de fenótipo urbano ainda não possuem carregamento significativo e não aparecem no output de LoadU. Uma tendência que pode ser percebida é uma intensificação dos valores de LoadU nas áreas entre os maiores carregamentos (03), o que revela a ação das tensões axiais de crescimento.



*fig88: observações sobre a evolução de LoadU, em imagem da iteração30, com células de 85x85m sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002 .*

O potencial de crescimento (fig81) aparece bastante disperso no início da simulação, para em seguida ir se concentrando nas bordas urbanas. Ao longo da simulação a área urbana vizinha ao campus da UFSM assume os maiores potenciais de crescimento. Esse comportamento ocorre em função das características do atributo que representa a universidade, que possui uma grande capacidade de atração ao mesmo tempo em que não admite urbanização interna. A isso soma-se o crescimento próprio do bairro Camobi, que se mostrou bastante intenso mesmo sem a presença da UFSM (ver capítulo 7.1.1). Além dessas áreas, pode ser percebido um maior potencial nas bordas próximas às áreas militares e aos morros, decorrentes de um potencial de crescimento que vai se acumulando e não pode ser realizado devido às resistências.

A análise das centralidades(fig82, fig83 e fig84) evidencia o caráter monocêntrico do sistema urbano. O centro original da cidade, devido a sua localização e aos carregamentos urbanos mais intensos, concentrou fortemente as centralidades celulares, que ficaram mais homogêneas em outros pontos do sistema, onde é possível destacar as áreas dos bairros Tancredo Neves e Santa Marta a oeste e Camobi a leste. Os outputs para as resistências naturais (ResistE; fig85) possibilitam acompanhar a evolução da transformação do ambiente natural em urbano, aparecendo bastante irregulares devido ao grid randômico que foi criado para representar as imprevisibilidades do terreno e que cobre todo o sistema. À medida que os atributos

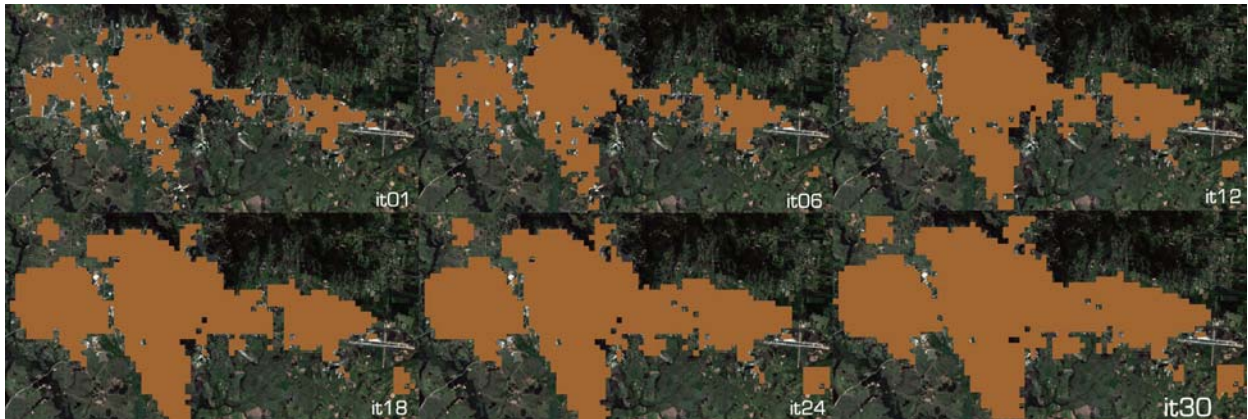
naturais vão sendo consumidos pela urbanização, seu valor relativo aumenta (o que pode ser observado pela intensificação dos tons de verde da figura), se aproximando de situações reais onde a diminuição de alguns recursos naturais os tornam mais importantes no contexto urbano geral, como é o caso de reservas de vegetação nativa. As principais resistências naturais do sistema localizam-se nas áreas montanhosas ao norte, que possui boa parte coberta por florestas. É possível observar que as resistências naturais oferecidas pelo arroio Cadena são gradualmente consumidas, evidenciando possíveis problemas ambientais futuros.

De modo geral é possível considerar que a simulação de crescimento com os valores utilizados na calibração segue as tendências atualmente encontradas na cidade, como o crescimento das áreas próximas ao bairro Tancredo Neves e a ocupação das áreas vazias entre Camobi e o centro da cidade. O crescimento intenso da zona sul, ao longo da BR 392 e das áreas ao norte da cidade, próximas aos morros apontam novas tendências de expansão que merecem uma atenção especial. A observação da evolução da conversão de território a cada iteração (fig86) mostra um comportamento instável na ocupação do território, indicando que entre as iterações 8 e 11 acontece uma ocupação mais intensa, seguida de uma relativa estabilização do crescimento, o que pode também ser observado na mudança da curva de crescimento do número total de células para esse período. O número de células de borda apresenta um fraco crescimento em comparação com o crescimento do número total de células urbanas, revelando uma tendência ao aumento da compactidade do sistema urbano.

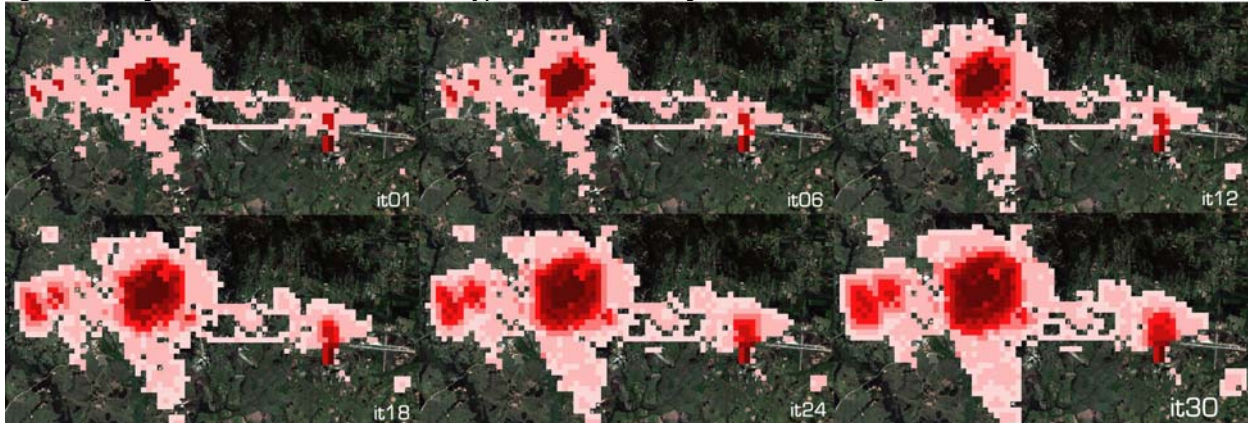
### **7.2.2. Crescimento com intensidade superior**

Este cenário de crescimento utiliza os mesmos atributos e distribuição de tensões da simulação anterior, porém as intensidades de crescimento representadas pelos valores de  $\lambda$  foram elevadas para demonstrar os resultados configuracionais de um crescimento com taxas superiores às atualmente encontradas para Santa Maria. Assim, o  $\lambda$  interno utilizado foi 1,4 e o  $\lambda$  externo ficou em 1,3.

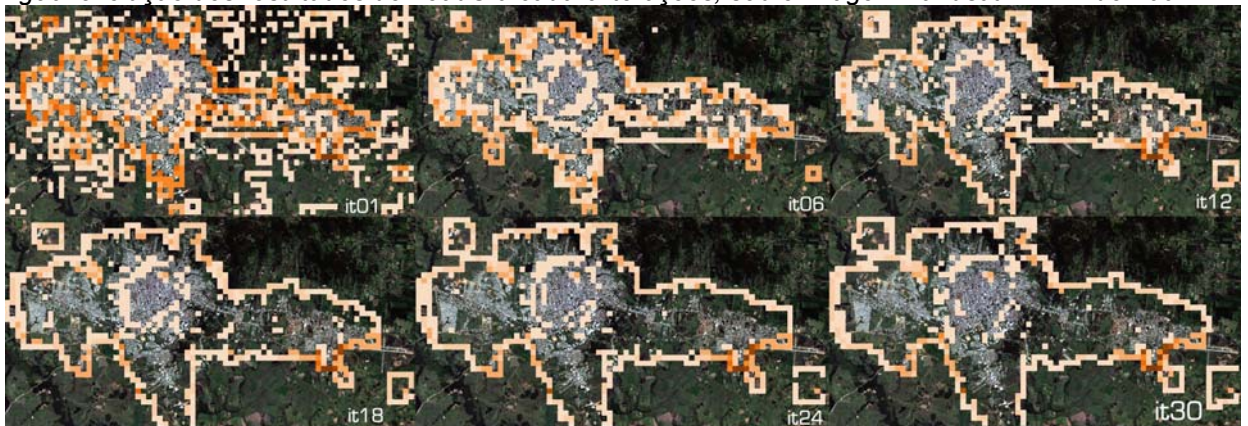
A simulação inicia-se com 473 células urbanas, chegando a 1148 células urbanas ao fim de 30 anos. A seguir, a seqüência de crescimento para os outputs de Fenótipo Urbano, Carregamento urbano, Potencial, Centralidade Relativa tipo 1 e Resistências Naturais.



*fig89: evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*



*fig90: evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*



*fig91: evolução dos resultados de Potencial a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

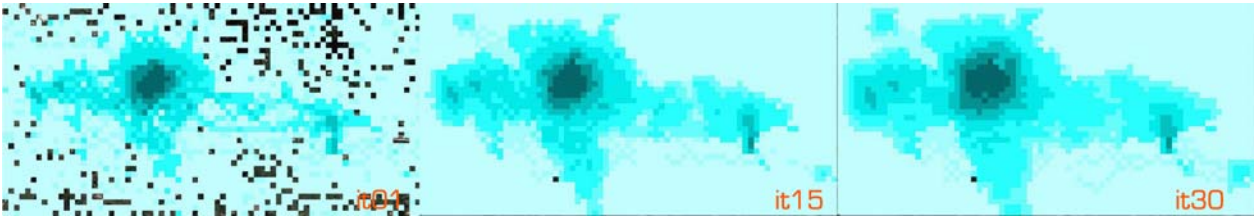


fig92: evolução dos resultados de CenR1 a cada 15 iterações.



fig93: evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

Observando a evolução do crescimento com intensidade superior, é possível notar que ao final da simulação, apesar de uma porção consideravelmente maior de território ser convertida em urbano, a geometria dos contornos das bordas urbanas muda pouco em relação à situação anterior, o que sugere que a configuração da cidade tende a persistir com o aumento quantitativo do crescimento.

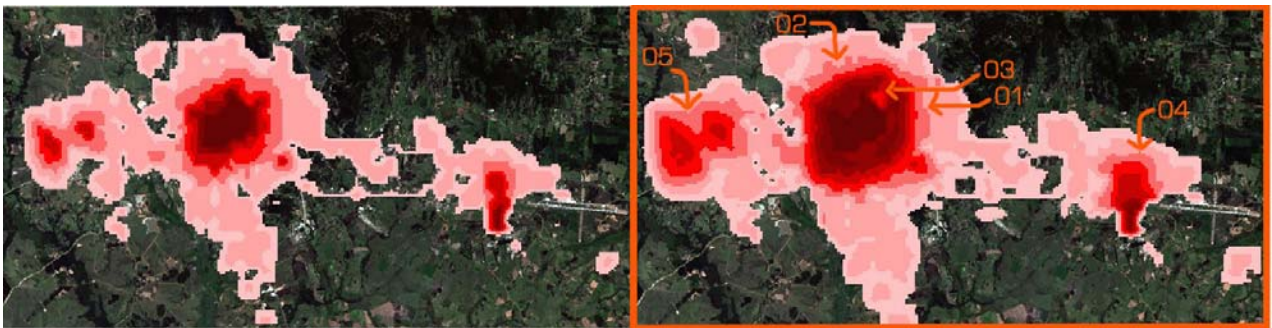
Os resultados de CellType mostram que com essa intensidade de crescimento o centro da cidade e o bairro Camobi acabam se unificando como áreas de fenótipo urbano (01). Na zona oeste também ocorre essa tendência, que é dificultada pela resistência oferecida pela área militar e pelo arroio Cadena, sendo que áreas próximas do rio acabam por ser parcialmente ocupadas (02). As áreas ao sul demonstram um forte crescimento, espalhando-se de maneira perpendicular ao eixo da BR 392 (03). É notável o desenvolvimento das áreas urbanas isoladas, que no entanto, não chegam a se integrarem com a área maior.



fig94: comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com intensidade superior com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.



Para os resultados dos carregamentos urbanos também se destaca a continuidade da hierarquia dos centros iniciais, que se desenvolvem com maior intensidade. Os carregamentos mais elevados do centro da cidade expandem-se de maneira marcadamente concêntrica (01), enquanto os menores distribuem-se de modo mais fragmentado (02). As células correspondentes a Vila Belga, tombada pelo patrimônio histórico, acabam por serem envolvidas por células de carregamentos maiores (03). No bairro Camobi os maiores carregamentos aparecem nas áreas próximas a Universidade Federal de Santa Maria, demonstrando o surgimento de um sub-centro de importância considerável (04), porém é a oeste que surge um sub-centro de maior destaque, formado pela unificação dos maiores carregamentos dos bairros Tancredo Neves e Santa Marta(05).



*fig95: comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com intensidade superior em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

É notável a concentração dos potenciais de crescimento nas bordas das áreas militares ao norte e da base aérea a leste (01), demonstrando que com esta intensidade de crescimento as áreas militares começam a ser pressionadas pelo crescimento, o que para a simulação anterior é sentido de maneira bem mais sutil. Maiores potenciais também aparecem internamente (02), demonstrando a força do centro da cidade. A pressão do crescimento aparece muito forte ao norte da cidade, onde encontra resistências oferecidas pela ferrovia e pelos morros (03). O crescimento mais intenso faz com que células com alto potencial apareçam nas bordas do sistema simulado (04), o que pode distorcer um pouco os resultados, sendo necessário maior cautela ao se analisar células nessas localizações.



fig96: comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com intensidade superior sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

A análise dos outputs de Centralidade Relativa Tipo 1 e Tipo 2 demonstra que a estrutura monocêntrica se reforça ainda mais que no cenário anterior, porém com uma clara tendência de concentração de maiores centralidades entre o centro e a região oeste(01) apontando para a formação de um eixo de crescimento predominante no sistema urbano simulado.

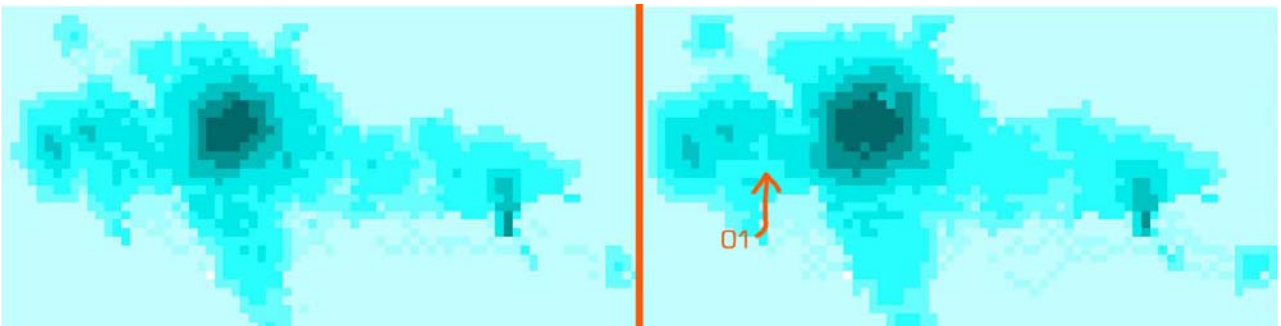


fig97: comparações entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com intensidade superior.

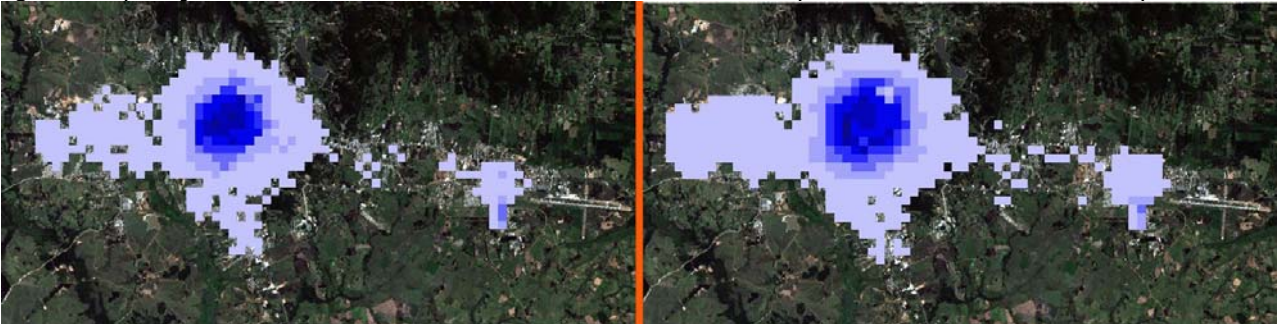


fig98: comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com intensidade superior sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

Devido ao crescimento superior, houve um rápido consumo dos recursos naturais para este cenário. As áreas de morros dentro da área urbana (01), que mantiveram-se no caso anterior, são ocupadas parcialmente apesar das altas resistências. A área do arroio Cadena (02), apesar de ainda permanecer, apresenta uma diminuição da sua intensidade de resistência.

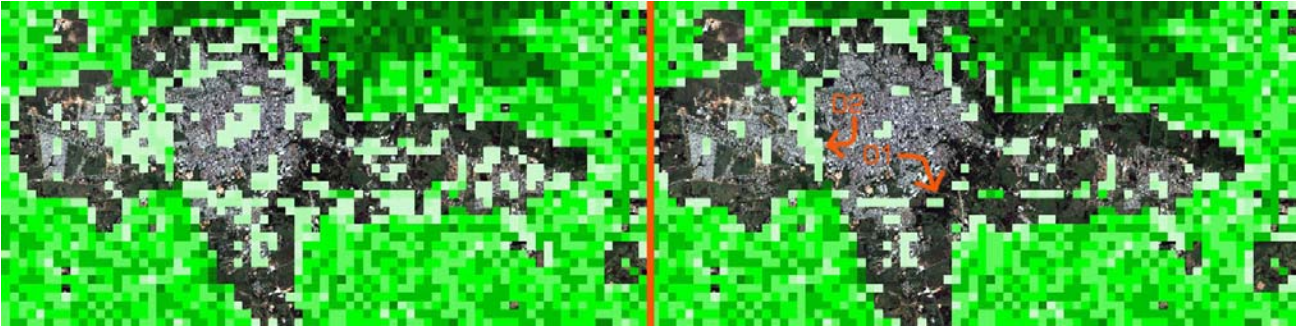


fig99: comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com intensidade superior sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

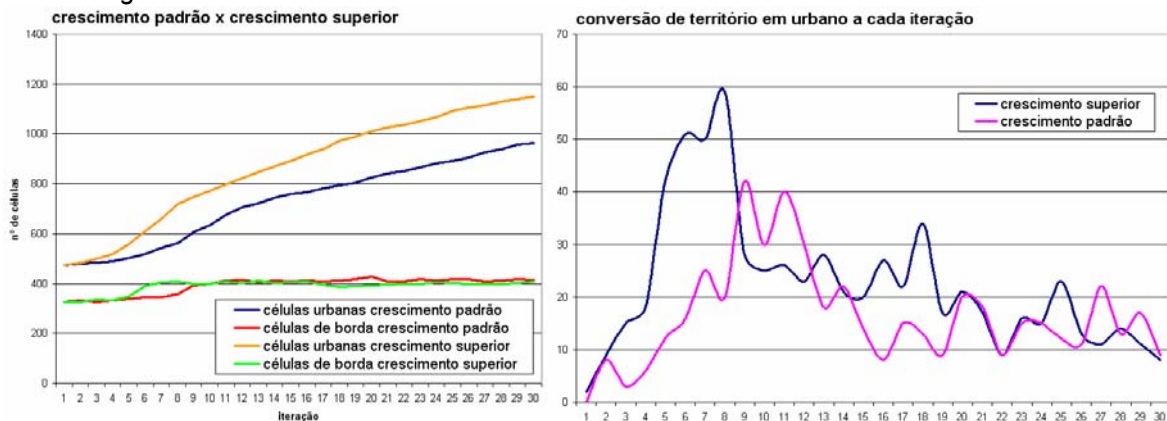


fig100: gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração

O gráfico da evolução do número de células urbanas mostra que houve um crescimento inicial bastante superior para este cenário, seguido de uma relativa estabilização, o que também se evidencia pela conversão de células por iteração, que ao final da simulação torna-se mais semelhante ao caso padrão. A tendência do sistema à compactação aparece ao se observar o comportamento das células de borda, que se manteve quase inalterado na comparação entre os dois casos, apesar do aumento do número total de células. De modo geral, a simulação revelou que a estrutura de crescimento permaneceu apesar da maior intensidade, o que permite especular sobre a perenidade da forma urbana de Santa Maria e da força de seu centro. O forte crescimento da zona oeste permite chamar a atenção para o potencial de crescimento dessa região, que apesar de sofrer sérios problemas como ocupações irregulares e carência de infra-estrutura, tende a desenvolver uma maior autonomia quanto ao centro do que as outras regiões da cidade.

### **7.3. Cenários de crescimento com a influência de pólos de atração**

Por ser uma cidade fracamente industrializada e com sua economia basicamente dependente do pequeno comércio e da demanda gerada pela UFSM, Santa Maria não apresenta outros elementos urbanos, além da Universidade Federal, que possam ser caracterizados como fortes polarizadores do crescimento. É possível observar alguma polarização em torno de um shopping center recentemente construído, porém suas dimensões e influência são insuficientes para caracterizá-lo com um pólo de atração no modelo. Também existe uma expectativa quanto ao campus da Universidade Luterana Brasileira-ULBRA, recentemente implantada na zona oeste da cidade, próximo ao bairro Santa Marta, porém atualmente ainda não se observa algum efeito significativo no crescimento das áreas urbanas vizinhas.

Os cenários de crescimento testados a seguir buscam especular sobre o comportamento da dinâmica espacial urbana de Santa Maria na presença de outros pólos de atração de crescimento urbano. Estes pólos serão representados por atributos urbanos do tipo atratores *freezing*, isto é, que geram tensões de crescimento mas não podem ser transformados ou removidos. O modelo não permite maiores especificações do pólo de atração, seja uma indústria, um shopping center ou uma instituição de ensino, por exemplo, apenas o considera um elemento urbano que não permite urbanização interna.

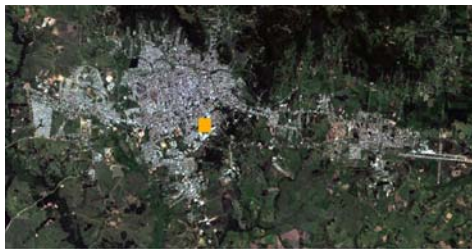
Serão testadas 2 possibilidades de crescimento: a primeira apresenta um pólo de crescimento localizado em área de grande interesse imobiliário, dentro da área urbana e a segunda apresenta um pólo de atração localizado em uma zona remota da cidade. Os cenários utilizam os dados e as regulagens do caso padrão, mais o atributo representando o pólo de atração.

#### **7.3.1. Crescimento com pólo de atração de grande intensidade instalado em localização de grande interesse imobiliário**

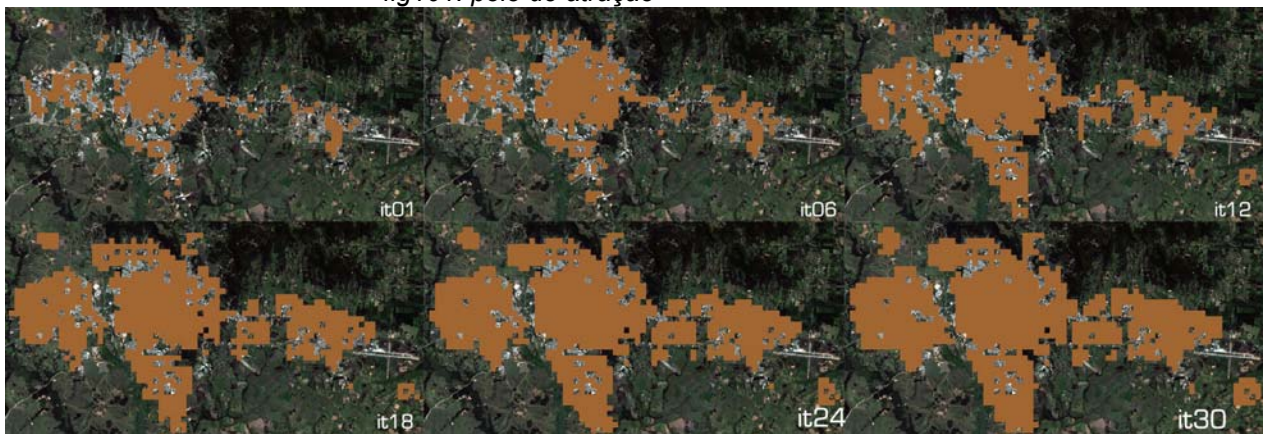
Este cenário de crescimento busca explorar os efeitos da implantação de um pólo da atração de crescimento em uma área próxima do centro da cidade e que atualmente possui considerável valor imobiliário, localizada entre um shopping center e

o Bairro Nossa Senhora de Lourdes. Trata-se uma área já urbanizada, de uso misto, onde predominam habitações de padrão A (bairro Lourdes) e usos de serviços e comércio de grande porte, como lojas de peças automotivas e de material de construção. Está ainda próxima da Rodoviária Municipal e dos acessos a BR 287 e RS 509.

O pólo de atração é representado pelo atributo ATRATOR01, e para tornar mais evidentes seus efeitos, foi utilizado com um peso igual a quatro, ficando acima dos valores utilizados para representar o centro da cidade (peso máximo= 3) e a UFSM (peso=2). O resultados para 30 anos de simulação, para os valores de Fenótipo Urbano, Carregamento Urbano, Potencial, Centralidade tipo 1, Centralidade tipo 2 e Resistências naturais estão representados a seguir:



*fig101: pólo de atração*



*fig102: evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

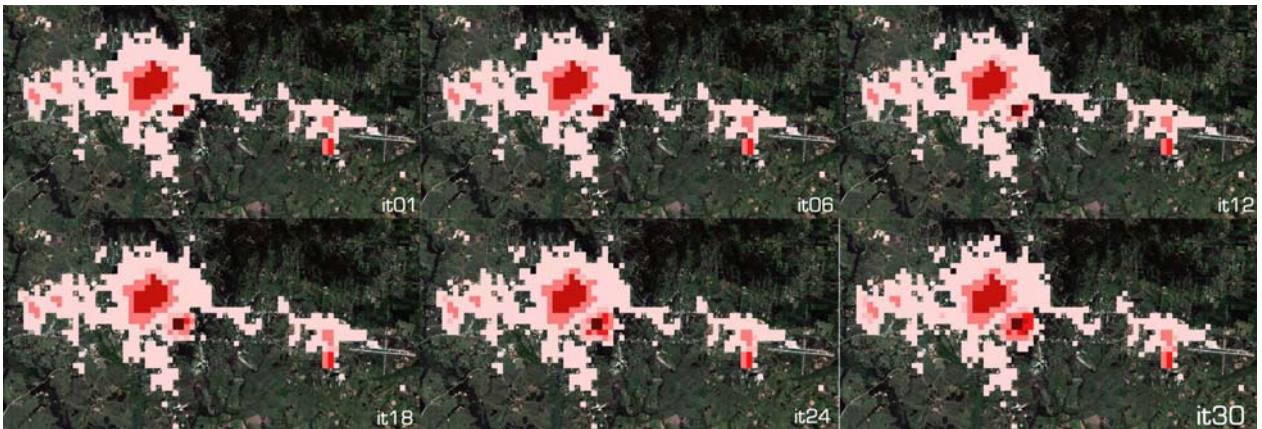


fig103: evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.



fig104: evolução dos resultados de Potencial a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

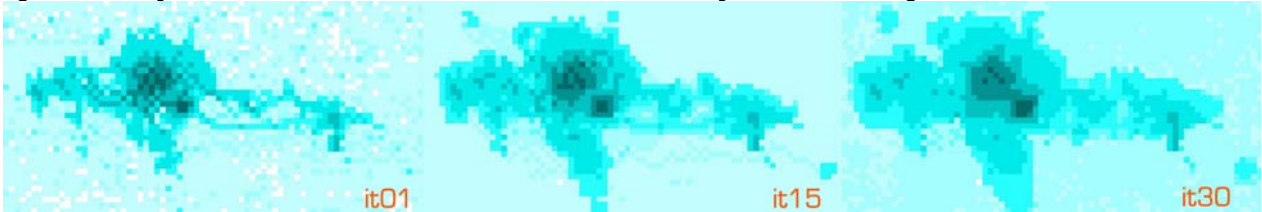


fig105: evolução dos resultados de CentR1 a cada 15 iterações.

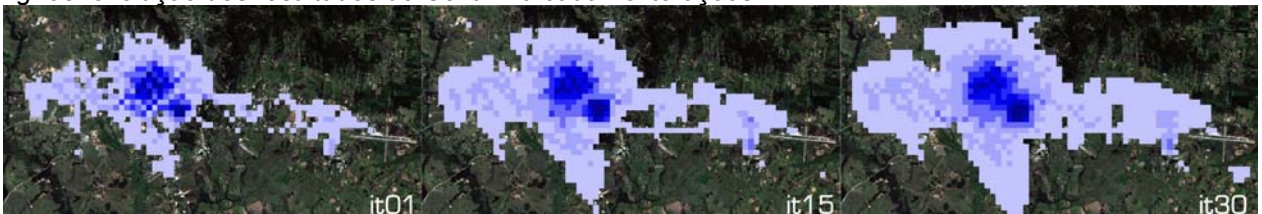


fig106: evolução dos resultados de CentR2 a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

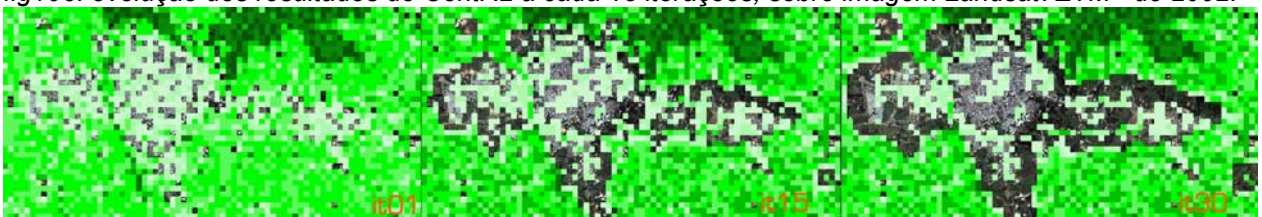


fig107: evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

A seqüência de crescimento de CellType indica que devido ao alto peso do atributo que representa o pólo de atração, na primeira iteração o modelo acabou por desconsiderar como urbanas algumas partes da cidade de menor carregamento, pois um maior carregamento aumenta o espectro de diferenciação entre urbano e não-urbano e como os resultados são normalizados de 1 a 0, em valores absolutos alguns

carregamentos urbanos são superados pelos fatores naturais. É possível notar que o crescimento se mostrou menos compacto e mais fragmentado, com a permanência de núcleos que não se integraram e de vazios urbanos ao longo da simulação.

Os resultados dos Carregamentos Urbanos (LoadU) mostram que, semelhante ao caso de CellType, os menores valores não aparecem devido ao elevado valor para o pólo de atração, como é o caso dos carregamentos do sistema viário. A concentração do crescimento em torno do pólo também impediu que outras áreas desenvolvessem maiores carregamentos e é possível notar uma evolução dos carregamentos na direção oposta ao centro, que assumem valores similares a este, demonstrando, ao fim da simulação, uma certa independência da cidade do centro original.

Os potenciais de crescimento permaneceram altos nas zonas próximas ao pólo, principalmente nas de maior dificuldade de urbanização devido às resistências. As áreas com sistema viário e sem urbanização, apesar de não aparecerem nos outputs iniciais de LoadU, aparecem diferenciadas na análise das iterações iniciais para Centralidade do tipo 1 e nos valores acumulados ao final da simulação para a centralidade tipo 2. O consumo dos atributos naturais próximos ao pólo de crescimento foram consideráveis se comparados aos de outras áreas.

A observação comparada entre os valores de CellType do crescimento padrão e com o pólo de atração mostra como o crescimento ocorreu de maneira fragmentada e menos compacta. Apesar dos maiores carregamentos, o crescimento nas áreas não urbanizadas próximas ao pólo não foi muito diferente do cenário padrão (01), evidenciando que os maiores efeitos no crescimento ocorreram no interior da cidade.



fig108: comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com pólo de atração com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

A comparação dos resultados de LoadU mostra uma intensa polarização em torno do atributo ATRATOR01(01) e a conseqüente diminuição da influência do centro da cidade no crescimento, além de um fraco desenvolvimento dos carregamentos por todo o sistema urbano. A tendência de crescimento mostra-se maior na direção oposta ao centro (02), avançando inclusive sobre as áreas de morros, o que reforça a mudança da hierarquia dos carregamentos e suas influências. O atributo representando porções de solo com sistema viário ainda não urbanizadas (SV), que possui baixo peso na simulação (peso=0,4), não gerou carregamentos suficientes para constarem nos resultados de LoadU nesta configuração(03).



*fig109: comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com pólo de atração em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

Na iteração 30, os valores dos maiores potenciais de crescimento aparecem mais distribuídos pelo sistema na simulação com o pólo de crescimento do que para o crescimento padrão, onde os maiores potenciais estão em torno da Universidade Federal de Santa Maria. A “competição” do pólo da atração com a UFSM acaba por diminuir a influência desta no sistema, e é possível observar maiores potenciais de crescimento próximos das áreas militares (01) e ao norte, próximos aos morros (02), evidenciando uma tendência de urbanização para essas áreas. Os morros vizinhos ao pólo de atração (03) acabam também por acumular algum potencial ao resistir ao crescimento urbano.





fig110: comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

A comparação entre os outputs de Centralidade tipo1 mostra que o eixo de centralidade deslocou-se do centro da cidade para a área entre o centro e o pólo de atração (01), que concentrou os maiores valores de centralidade. Essa mudança na hierarquia das centralidades também pode ser vista para os valores de Centralidade tipo 2, indicando que a presença do pólo acaba por tornar os valores de CentR2 mais dispersos pelo sistema do que na simulação de crescimento padrão.

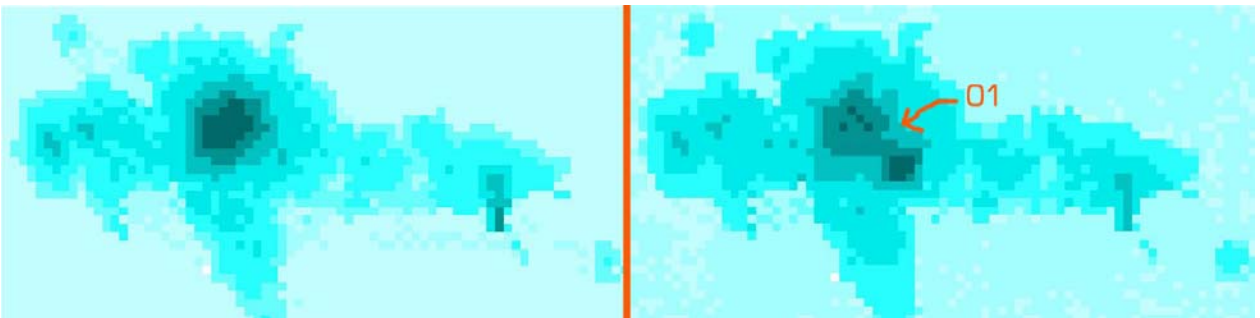


fig111: comparação entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com pólo de atração.

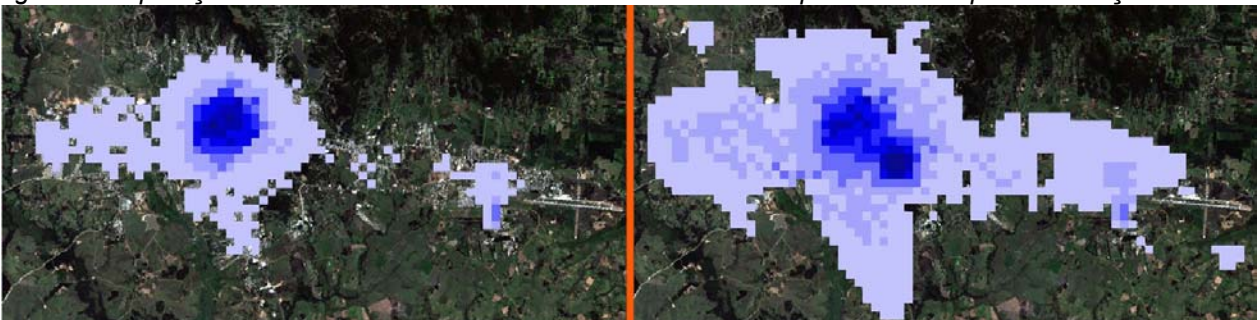


fig112: comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

O consumo das resistências naturais se deu de maneira semelhante ao caso padrão, porém com uma intensidade ligeiramente maior, principalmente nas bordas oeste (01) e sudeste (02). Nota-se também que a urbanização gerada pelo pólo de

atração avança sobre a área do morro Mariano da Rocha, que atualmente ainda conserva uma pequena área florestal (03).

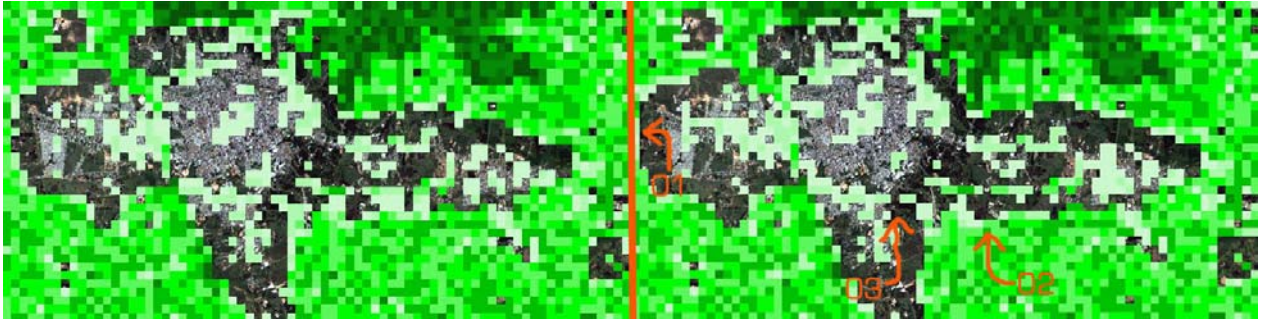


fig113: comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

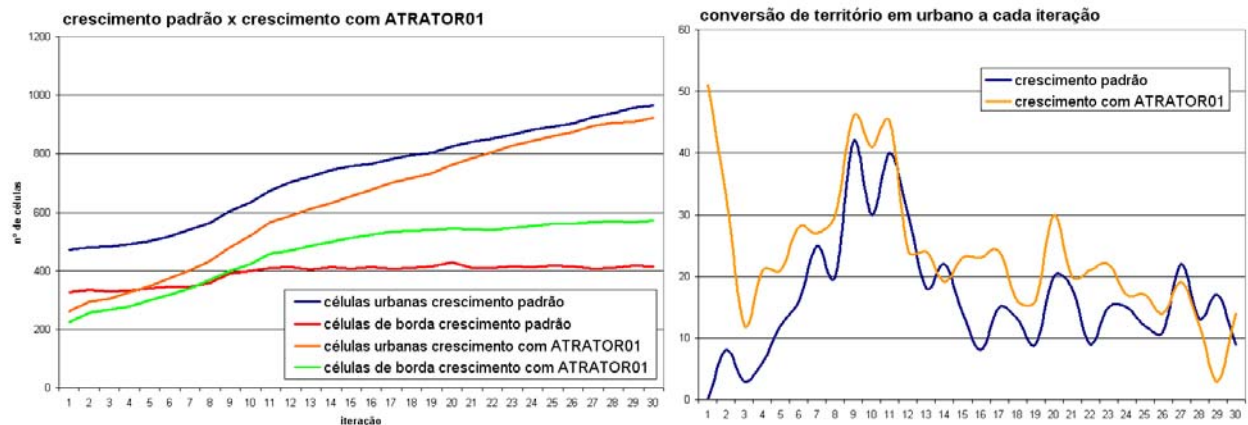


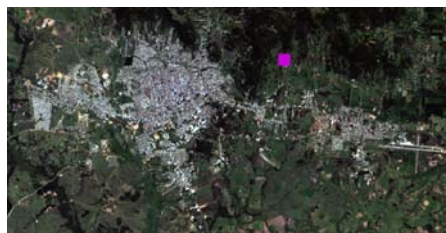
fig114: gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.

Os gráficos da evolução do crescimento urbano mostram que a simulação com pólo inicia com um número consideravelmente menor de células urbanas que o crescimento padrão, porém com sistema crescendo com velocidade mais acentuada, para no fim de 30 iterações alcançar um número semelhante de células urbanas (965 p/ crescimento padrão x 923 p/ crescimento com o pólo). As células de borda aumentaram no crescimento com pólo o que demonstra a maior fragmentação do sistema. A conversão de território em urbano por iteração mostra a diminuição de células urbanas da iteração inicial e o crescimento maior ao longo da simulação. É possível notar que apesar de possuírem intensidades diferentes, os crescimentos para as duas simulações seguem um padrão semelhante na conversão de território por iteração.

A partir da análise integrada dos resultados da simulação, é possível concluir que um pólo de atração de crescimento com um peso como o que foi utilizado acaba por interferir de maneira consistente na evolução urbana, com uma forte tendência de assumir os potenciais de crescimento, evitando que outras áreas da cidade desenvolvam maiores intensidades de carregamentos urbanos. Este comportamento acaba por aumentar a intensidade de crescimento intra-urbano das áreas próximas ao pólo e enfraquecer a de outras áreas, onde as centralidades e os carregamentos se mostram mais homogêneos.

### **7.3.2. Crescimento com pólo de atração de grande intensidade instalado em área remota da cidade**

Esta situação de crescimento tenta simular a os efeitos da implantação de um pólo de atração em uma localidade remota da cidade, em uma área de características predominantemente naturais. Foi escolhida uma área fora do perímetro urbano, próxima aos morros da Serra Geral, a nordeste do centro da cidade, onde foi localizado o atributo de atração do tipo *freezing* ATRATOR02, com peso na simulação igual a 2,5. O atributo ocupa 4 células, que corresponde a uma área de aproximadamente 32,5 hectares, podendo ser considerado, por exemplo, o parque de uma indústria de grande porte, ou o campus de uma universidade.



*fig115: pólo de atração remoto*

A seguir, os resultados da simulação para um intervalo de 30 anos:

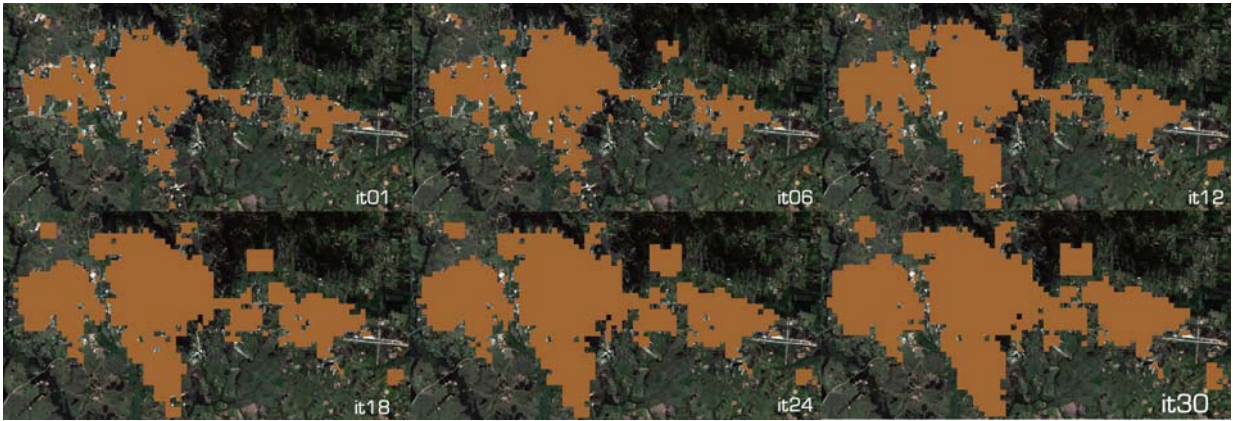


fig116: evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

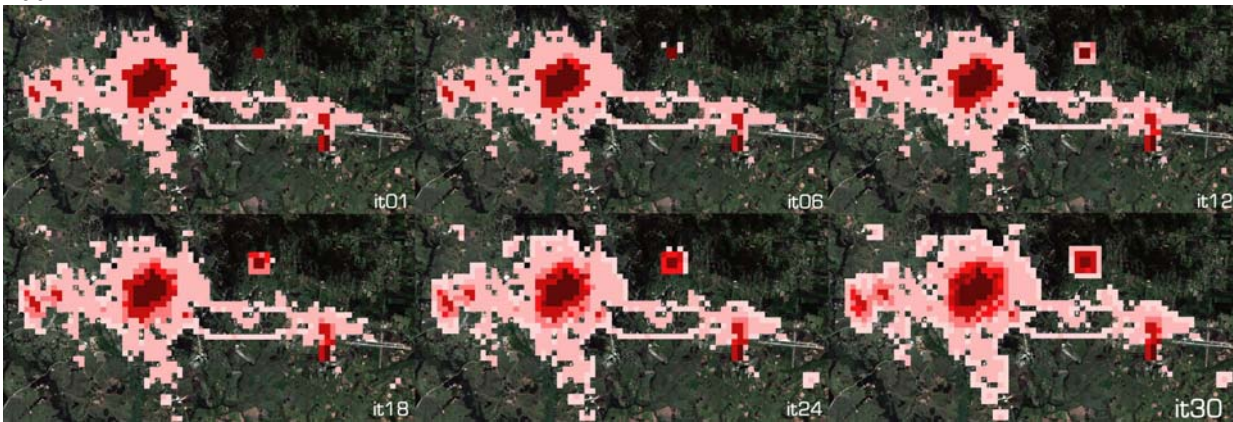


fig117: evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.



fig118: evolução dos resultados de Potencial a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

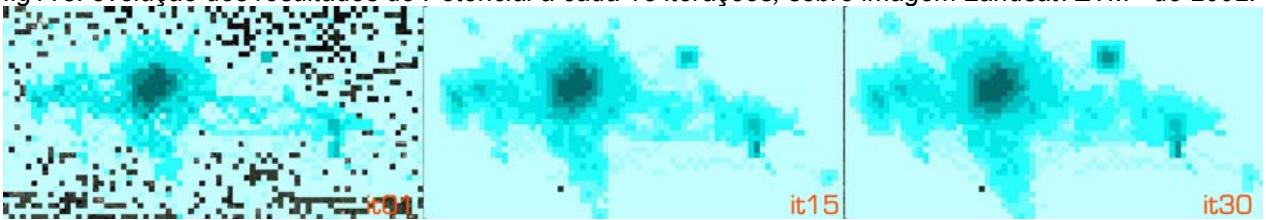


fig119: evolução dos resultados de CentR1 a cada 15 iterações.



fig120: evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002

Analisando a evolução da simulação é possível perceber que o crescimento em torno do pólo de atração ocorre de maneira radial, não havendo a formação de nenhum núcleo urbano nos espaços intermediários entre a área urbana e a área observada. Os carregamentos urbanos em torno do pólo aumentam de intensidade gradualmente e quando alcançam um valor considerável, dão origem a outro anel de carregamentos. Na primeira iteração é possível perceber que as células em torno do pólo de atração alcançam os maiores potenciais, que diminuem ao longo da simulação.

A comparação entre os resultados de CellType para este cenário de crescimento e para o crescimento padrão mostram que o pólo de atração praticamente não afetou a estrutura restante da cidade, convertendo em urbano apenas a área de seu entorno imediato (01). Uma exceção pode ser feita para uma área próxima (02) que apresentou certa alteração, influenciada pelas mudanças nos valores locais de potencial e das centralidades. Também outra área um pouco mais afastada (03) teve um crescimento ligeiramente maior, o que permite estabelecer um raio de influência para o pólo (04).



*fig121: comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com pólo de atração com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

A análise dos resultados de LoadU comparados com o crescimento padrão mostrou que o pólo de atração não teve influência sobre os carregamentos urbanos do resto da cidade. A distribuição dos valores em torno do pólo ocorre de maneira concêntrica, através de anéis de carregamentos que vão diminuindo de intensidade a medida em que se afastam do centro do pólo.

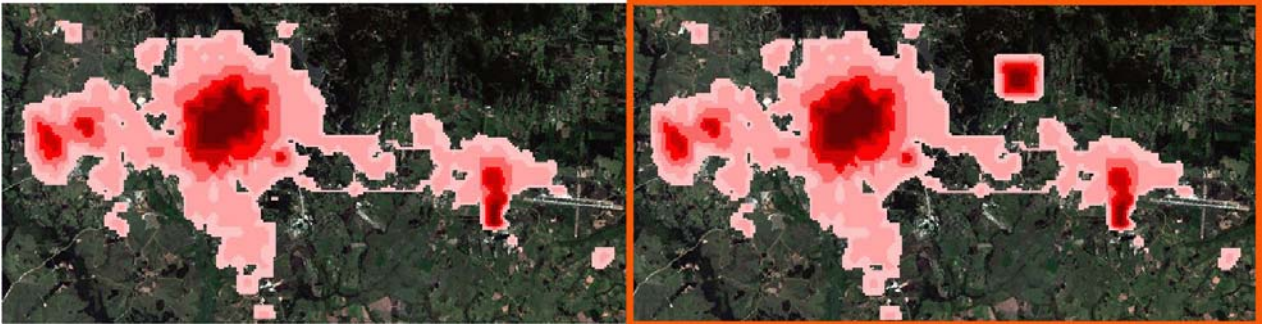


fig122: comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com pólo de atração em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

A análise comparada dos potenciais de crescimento mostra ao final de 30 iterações uma área de intenso potencial em torno do pólo de atração (01), o que evidencia a tendência desta área continuar a se desenvolver, na medida em que as resistências ao crescimento forem consumidas, sendo provável que ocorra uma integração da área urbana próxima ao pólo com o resto da cidade, se o crescimento mantiver as mesmas intensidades. É possível perceber, analisando também a evolução dos potenciais, que as zonas de maiores potenciais em torno do pólo iniciam menos abrangentes, porém mais intensas, e na medida que a cidade se desenvolve, essa área se torna mais abrangente porém com os potenciais mais baixos, ficando inclusive menores do que os gerados pela Universidade Federal de Santa Maria. O estímulo à urbanização ocasionado pelo pólo também provocou maiores potenciais no contato da cidade com uma área de morro e de maiores resistências ao norte (02). Para o restante da cidade os potenciais de crescimento mudaram pouco.



fig123: comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002

Para os resultados de CentralidadeR1, é possível identificar uma formação de linhas de centralidade convergindo para o pólo de atração (01), que não chegam, no entanto, a modificar de maneira considerável os valores das outras células do sistema.

Essas linhas de centralidades reforçam a impressão obtida na análise dos potenciais de uma provável urbanização futura das áreas entre a cidade e o pólo, sendo as células de maior centralidade as candidatas mais prováveis a essa urbanização. Para CentralidadeR2, praticamente não há modificações fora da área imediata ao pólo de atração, podendo se observar que os valores de centralidade dentro do pólo de atração apontam em direção ao centro da cidade (01).

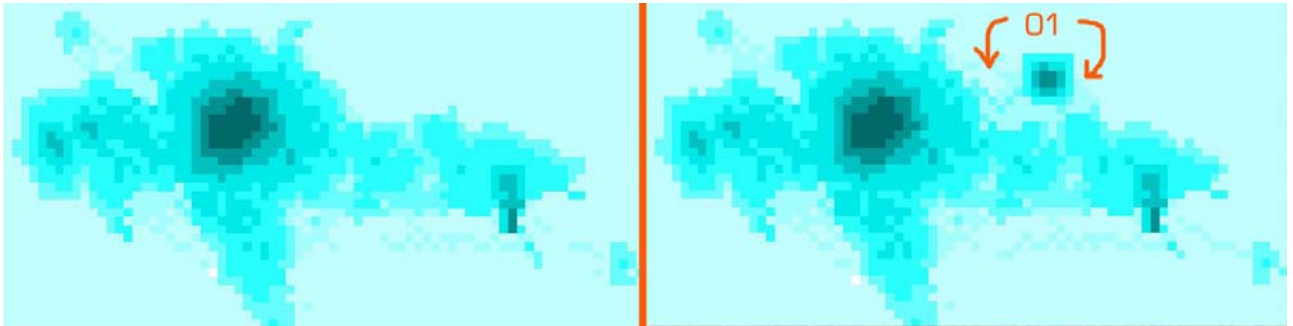


fig124: comparação entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com pólo de atração.



fig125: comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

Para os valores de Resistência Natural é possível destacar houve um consumo maior dos recursos naturais nas áreas em torno do pólo de atração do que nele próprio, dada a característica *freezing* do atributo, sendo possível notar que a urbanização tende a ser contida ao alcançar as áreas de morros ao norte. Para o restante da cidade as resistências permaneceram as mesmas nas duas simulações

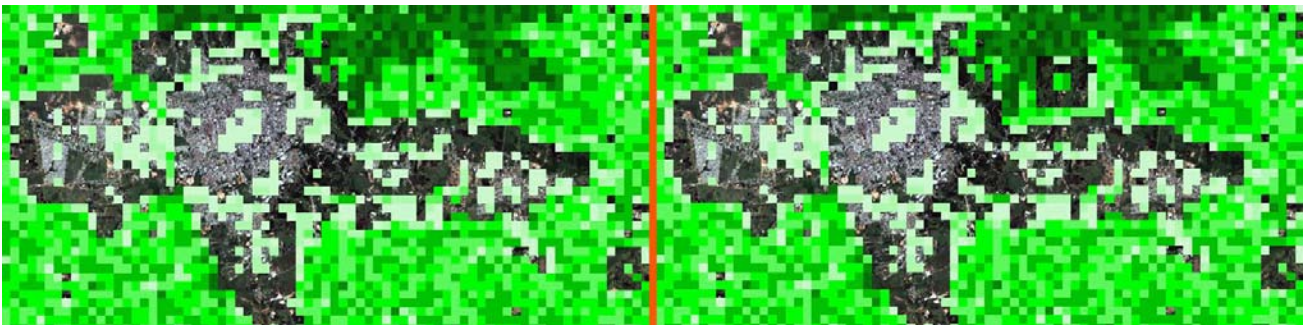


fig126: comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com pólo de atração sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002

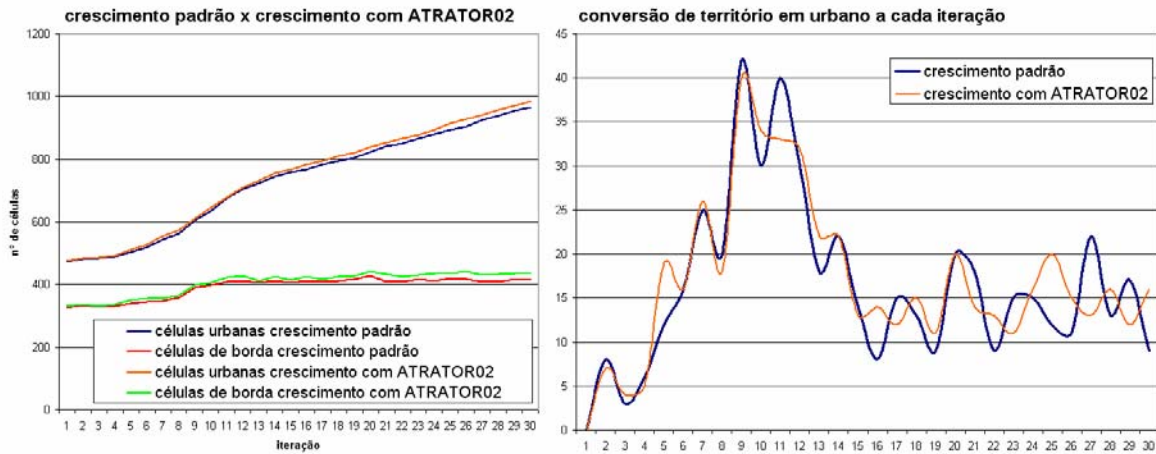


fig127: gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração

Analisando em conjunto os resultados da simulação é possível dizer que o pólo de atração instalado em local remoto da cidade teve muito pouca influência no sistema como um todo, sendo que seus efeitos no crescimento podem ser percebidos apenas de maneira local. A análise dos gráficos representando a evolução do número de células urbanas e da conversão de território a cada iteração reforçam essa conclusão, ao demonstrar pouca variação em comparação ao crescimento padrão. Devido à distância de maiores carregamentos, o crescimento em torno do pólo de atração aconteceu de maneira independente e relativamente homogênea. Por estar em área de preservação ambiental e fora do perímetro urbano, o crescimento encontrou resistências institucionais (atributos LEIAMB e RURAL) que frearam um maior crescimento e contribuíram para a sua menor influência no restante da cidade.

A observação geral dos resultados indica que no cenário de crescimento apresentado ocorreram fortes mudanças na escala local e fracas mudanças globais no sistema, sendo possível concluir que apenas um forte carregamento não é suficiente para uma localidade influenciar o crescimento da cidade como um todo, sendo de fundamental importância a posição relativa em que esta se encontra, refletida nos valores de centralidade, e as características físicas e institucionais do sítio.



#### 7.4. Cenário de crescimento com os índices de aproveitamento estipulados pelo novo plano diretor

A intenção na proposição deste cenário de crescimento é especular sobre os efeitos dos índices de aproveitamento do solo urbano propostos pelo novo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano que se encontra em fase de aprovação pelos órgãos públicos da cidade de Santa Maria. É evidente que os efeitos de um plano diretor na morfologia urbana não podem ser explorados apenas tendo em vista os índices de aproveitamento, mas estes correspondem às intenções dos planejadores quanto a forma desejada para a cidade e quanto a distribuição dos carregamentos urbanos. Assim, esta simulação de crescimento deve ser considerada como uma análise de um item específico do novo plano diretor e seu resultados interpretados como tal. Comparando os índices propostos pelo plano com a distribuição atual dos carregamentos urbanos é possível perceber que o plano busca reforçar as características atuais da cidade, sendo que as áreas mais centrais possuem os maiores índices de aproveitamentos, com destaque para as áreas correspondentes aos eixos das avenidas Presidente Getúlio Vargas, Medianeira e Dores.

O atributo utilizado funciona como uma resistência institucional ao crescimento urbano, que aumenta na medida que os índices se tornam mais restritivos, possuindo 5 níveis de intensidade. Utiliza um peso de na simulação igual a 1, e atua com um atributo do tipo estável, isto é, permite transformações internas mas não pode ser removido, estando estas características melhor detalhadas no capítulo 5.3.3.

A seguir, os resultados para as simulações de crescimento:

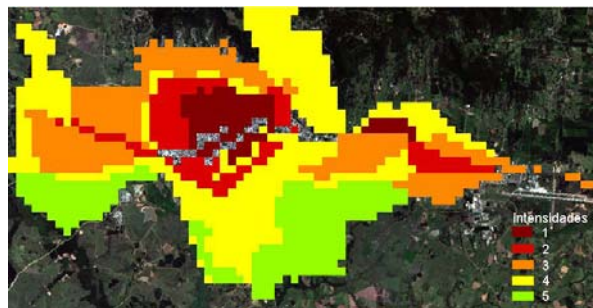


fig128: atributo institucional PLANO DIRETOR.



fig129: evolução dos resultados de CellType a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

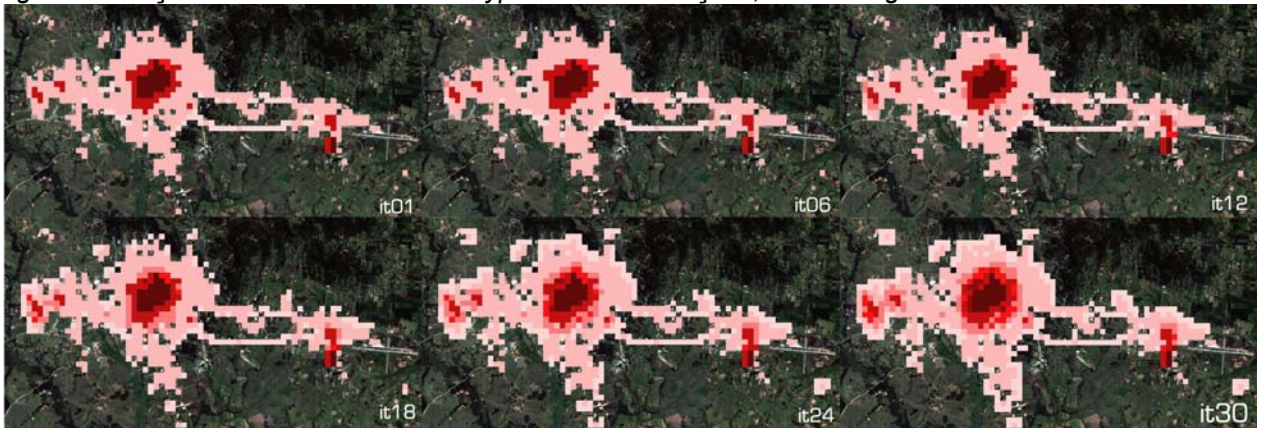


fig130: evolução dos resultados de LoadU a cada 6 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.



fig131: evolução dos resultados de Potencial a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

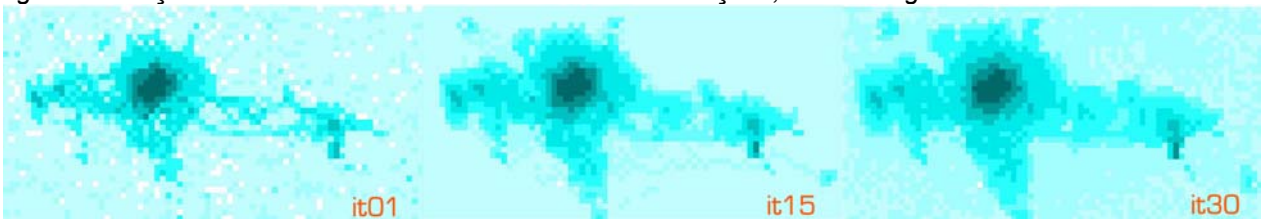


fig132: evolução dos resultados de CentR1 a cada 15 iterações

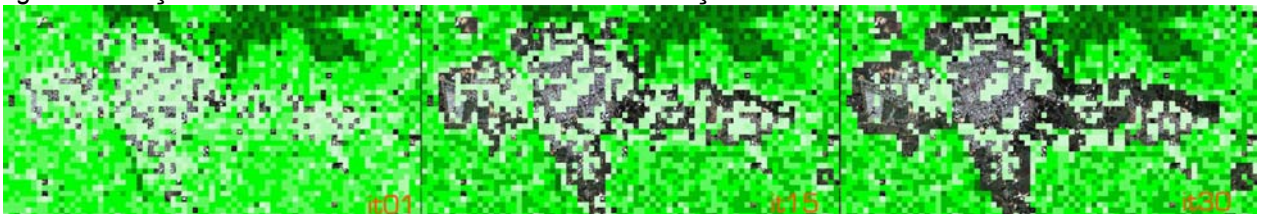


fig133: evolução dos resultados de ResistE a cada 15 iterações, sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002

A análise das seqüências de crescimento mostram um desenvolvimento muito parecido com o ocorrido no cenário de crescimento padrão, para praticamente todos os outputs oferecidos pelo modelo, que consiste em um desenvolvimento que se inicia mais fragmentado e vai se tornando mais compacto à medida que as iterações se sucedem. Os carregamentos urbanos desenvolvem-se com maior intensidade em torno do centro principal e de modo radial, aparecendo também carregamentos consideráveis na área entre os bairros Santa Marta e Tancredo Neves, a oeste, e próximos a UFSM, no bairro Camobi, a leste. A comparação entre os outputs desta simulação com o processo padrão ilustra bem esse resultado.

Para os resultados de CellType, as poucas diferenças que podem ser apontadas são em uma parte ao norte da cidade onde se identifica um crescimento mais regular e adequado à borda da zona de maior resistência à urbanização entre os valores de resistência 0 e 4 (01). No extremo oeste da cidade pode ser vista uma contenção do crescimento urbano, também na área de resistência com intensidade 4 (02), e ao sul a maior restrição ao crescimento evitou a formação de pequenos núcleos isolados que aparecem na hipótese padrão (03).



*fig134: comparações entre os resultados de CellType do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR com iteração 1 sobreposta a iteração 30, em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.*

Os resultados comparados de LoadU também não permitem apontar mudanças para o cenário com os índices do Plano Diretor. Observando as características do atributo PLANO DIRETOR, é possível identificar que de certa forma os resultados finais dos carregamentos urbanos ficaram similares às expectativas do plano quanto à distribuição da ocupação urbana, o que mostra que a proposta do plano está em conformidade com a tendência natural do crescimento. Isto pode ser visto também na manutenção do vazio urbano próximo ao bairro Camobi (01), que está exatamente em

uma área onde é proposta uma maior restrição. Uma área atualmente sem urbanização (02) onde é esperada uma indução de crescimento através de maiores índices de aproveitamento não apresentou carregamentos significativos, o que permite especular que só maiores índices construtivos não são suficientes para a indução da urbanização.

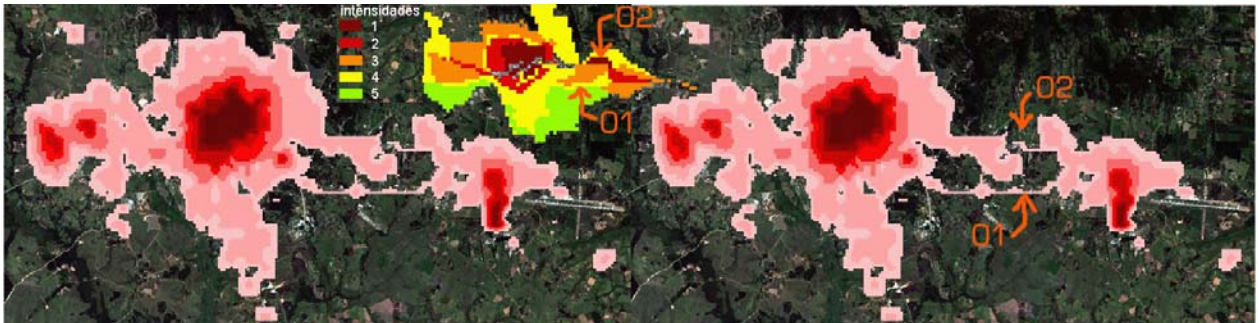


fig135: comparações entre os resultados de LoadU do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR em células de 85x85 sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002

Como pode ser observado a seguir, os potenciais de crescimento mantiveram-se praticamente os mesmos nas duas hipótese de crescimento.



fig136: comparações entre os resultados de Potencial do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

A comparação entre as Centralidades do tipo R1 mostra apenas uma sutil mudança nos resultados das centralidades, ficando mais distribuídas em direção aos vetores leste, oeste e sul para a hipótese com o Plano Diretor, além de uma maior irregularidade ou “ruído” nas células com baixas centralidades nas áreas mais remotas do sistema. As maiores centralidades mantiveram-se inalteradas, como também se verifica para a Centralidade tipo R2. Sem alterações significativas também permaneceram as Resistências Naturais.

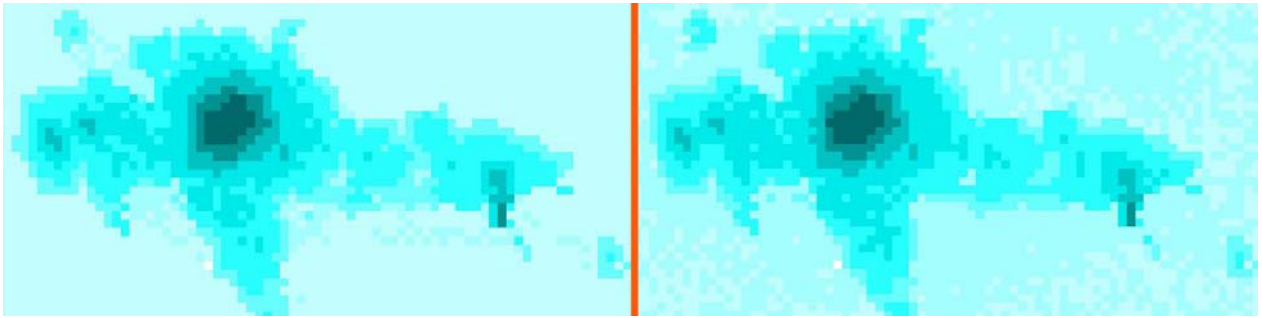


fig137: comparação entre os resultados de CentR1 do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR.



fig138: comparações entre os resultados de CentR2 do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

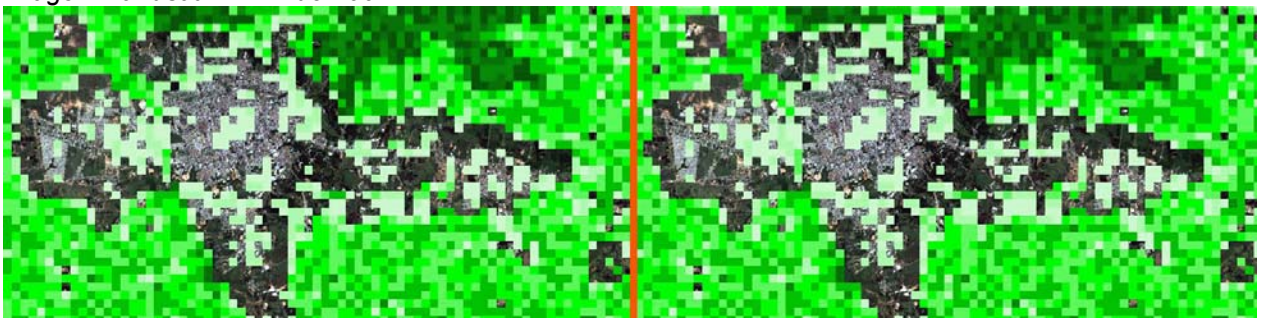


fig139: comparações entre os resultados de ResistE do crescimento padrão e com PLANO DIRETOR sobre imagem Landsat7ETM+ de 2002.

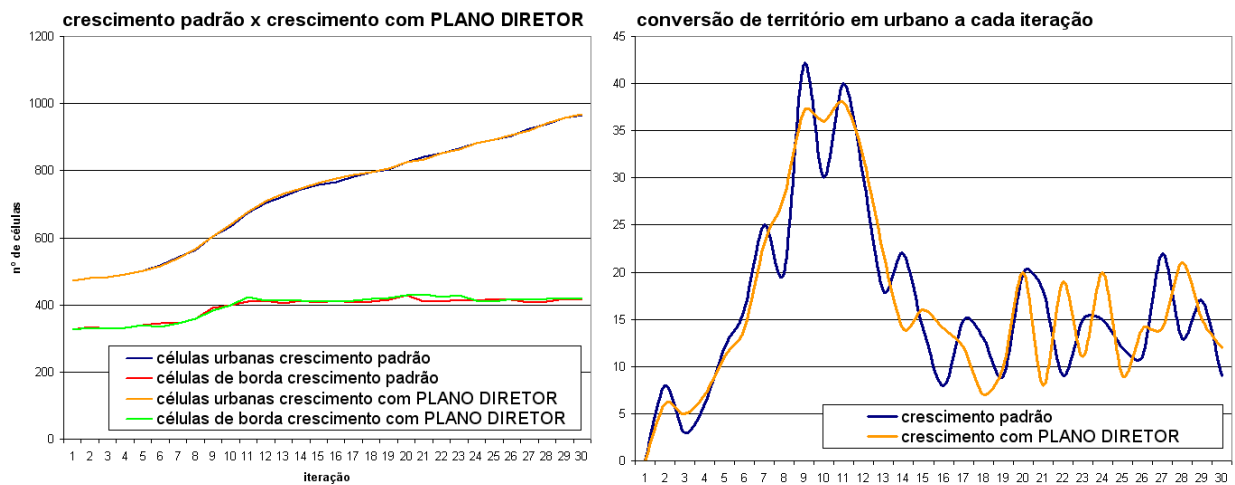


fig140: gráficos demonstrando a evolução do número de células urbanas e de borda e da conversão de células em urbana a cada iteração.

Os gráficos de evolução do crescimento seguem rigorosamente o mesmo padrão nos dois cenários de crescimento tanto pra o total de células como para as células de borda e a conversão de território em urbano por iteração também é semelhante, ficando apenas mais instável para o crescimento com os índices nas últimas iterações.

Como as análises dos outputs demonstraram, o crescimento com a presença dos índices propostos pelo Plano Diretor não apresentou considerável diferença do caso padrão, sendo uma das possíveis causas a semelhança da hierarquia dos índices com o input de carregamentos urbanos utilizados. O fato de o modelo implementar o crescimento a partir das características morfológicas da cidade e não intenções externas como um plano diretor justifica também a fraca atuação do atributo PLANO DIRETOR. A exploração do efeito da legislação no crescimento é um campo bastante específico a ser estudado e certamente requer um aprofundamento que vai além desta hipótese, na tentativa de reproduzir o efeito de intenções de planejamento através de simulações de crescimento. Seria o caso de serem testados também atributos com alguma capacidade de atração para casos de indução de crescimento ou de limiares de crescimento para certas áreas onde se espera algum controle da urbanização, o que pode ser feito, por exemplo, através da manipulação de parâmetros do modelo como o  $r_0$ , que indica quanto do potencial de crescimento resultante em cada iteração efetivamente se realiza e que pode ser aplicado para um grid específico do modelo.

## **7.5. Considerações sobre os cenários de crescimento**

As explorações de crescimento realizadas buscaram aumentar o conhecimento sobre a cidade de Santa Maria através da observação do comportamento de sua dinâmica espacial e das forças que a influenciam, sendo que para isto foram testados diferentes cenários de crescimento. A análise integrada dos resultados das simulações destes cenários é mais importante do que a observação dos resultados isolados de cada simulação, pois as possibilidades de crescimento aqui apresentadas são especulações sobre um futuro que certamente incluirá outros condicionantes e onde as velocidades de crescimento, representadas pelos parâmetros  $\lambda$ , não ocorrerão de maneira regular como foram aqui utilizadas. As possíveis tendências de crescimento da

cidade emergem da observação dos padrões de crescimento mais frequentes nas simulações, bem como do comportamento dos potenciais, das resistências e das hierarquias das centralidades que predominam nas simulações.

Após as 6 simulações aqui apresentadas, mais os esforços de calibração realizados utilizando o modelo SACI, é possível apontar algumas considerações sobre a dinâmica espacial, a estrutura urbana e as tendências de crescimento para a cidade de Santa Maria :

a) As especulações de crescimento sem a Universidade Federal de Santa Maria mostram que mesmo a universidade tendo um papel importante como pólo da atração de crescimento, a estrutura configuracional das áreas próximas é também fortemente influenciada pelo seu comportamento como resistência à expansão urbana. Se o crescimento hipotético sem a UFSM resultou em menores carregamentos urbanos para o Bairro Camobi, este comprovou ter uma dinâmica própria suficiente para manter o padrão urbano atual.

b) As áreas de maior desenvolvimento coincidem com a caracterização dos vetores de crescimento apontada no capítulo 4.2., com destaque para os bairros de Camobi a leste e Tancredo Neves a oeste. Mesmo em cenários de crescimento mais intenso a predominância do centro original foi mantida, o que demonstra a força da estrutura atual da cidade, pois além dos maiores carregamentos urbanos nas células do centro, sua posição relativa no sistema reforça suas centralidades, que tendem a concentrar os caminhos preferenciais entre os pares de células, já que fora da área urbana existem maiores resistências para que isso aconteça.

c) O crescimento da zona sul da cidade, apesar de não concentrar grandes carregamentos urbanos, mostrou uma tendência que chama a atenção, já que atualmente é uma área de baixo valor imobiliário, apesar de possuir uma boa infraestrutura urbana. Esta tendência de crescimento pode ser verificada em todos os cenários de crescimento e indica um crescente potencial para investimentos públicos e privados na região.

d) quanto à utilização das resistências é possível destacar o comportamento das áreas ao norte da cidade, onde o crescimento foi menos intenso do que em outras

áreas próximas ao centro. Esta tendência pode ser observada atualmente, devido ao isolamento dessa área causado pela presença da via férrea e dos morros da Serra Geral, que participam da simulação como atributos de resistência institucional e natural, respectivamente, e indicam que a sua forte influência tende a se manter no crescimento futuro da cidade. Isso pode apontar que se não forem criadas medidas para a integração dessas áreas, a tendência é que continuem isoladas e decadentes. Atualmente existem vários projetos parados na prefeitura municipal que visam essa integração, como o túnel para ligar a Av. Rio Branco e a rua Liberdade, passando por baixo da linha férrea, o parque da Gare, que traria mais atrativos para a região e a implantação do projeto Pró-Cadena, que visa a recuperação das áreas degradadas próximas a nascente o arroio Cadena.

e) A simulação com as intensidades de uso do solo propostas pelo novo Plano Diretor de Desenvolvimento urbano quase não alteraram a morfologia da cidade o que indica que este está de acordo com as tendências naturais de crescimento da cidade. Utilizados como resistências ao crescimento, os índices não oferecem muita diferenciação espacial, sugerindo que a exploração dos efeitos da legislação deve ser estendida a outros aspectos, como por exemplo, a indução de crescimento ou a criação de limiares de crescimento para determinadas áreas.

f) O grande crescimento da área conhecida como “Sem Teto”, a noroeste do município chama a atenção para a tendência natural de crescimento dessa região, que possui poucas resistências naturais e institucionais. Este crescimento tende a se intensificar com o maior desenvolvimento das áreas próximas, como os bairros Santa Marta e Tancredo Neves. Trata-se de uma zona de graves problemas urbanos e ambientais, como moradias precárias, falta de infra-estrutura, depósitos de lixo a céu aberto e poluição de cursos d’água e a falta de medidas para a regulamentação do seu crescimento poderá tornar estes problemas ainda mais sérios e de difícil solução.

g) Os morros Cerrito e Mariano da Rocha, localizados ao sul da cidade, que atualmente possuem uma cobertura florestal relativamente bem conservada, aparecem ameaçados pelo crescimento urbano nos próximos 30 anos, principalmente nas situações de maior intensidade de crescimento e de localização de um pólo da atração



em suas proximidades. Esse padrão de ocupação também pode ser percebido em algumas áreas de montanhas ao norte da cidade, mesmo onde existe o atributo de resistência institucional LEI AMBIENTAL. As simulações sugerem que apenas a legislação ambiental nacional não é suficiente para a proteção de matas de encostas, já que muitas áreas florestais encontram-se em cotas de menores altitudes (abaixo de 150metros) e inclinações (>30%), não protegidas pela lei, fazendo-se necessárias legislações específicas para este caso.

h) a dificuldade do modelo em assumir usos mais específicos como comercial ou industrial, por exemplo, impediu a particularização de algumas áreas como o Distrito Industrial ou os shopping centers da cidade, que poderiam interferir de maneira importante nas simulações de crescimento.

i) o excessivo aumento no tempo de processamento em simulações com maiores números de células impediu o uso de cenários de menor resolução, o que dificultou a utilização de maneira mais adequada do sistema viário, principalmente as vias internas da cidade, que se utilizadas como células de 285x285m iriam se sobrepor e acabar por distorcer os resultados.

## 8. Conclusões

Na apresentação do trabalho foi tratada de uma problemática de pesquisa que tinha como ponto principal a visualização da dinâmica espacial como ferramenta para a compreensão de um sistema urbano, e que no presente capítulo pode ser recuperada a partir do esquema a seguir:

1- buscar representações dos fenômenos urbanos que sejam dinâmicas e considerem a complexidade do processo de crescimento urbano

2- encontrar ferramentas adequadas para essa tarefa dentro do campo da modelagem urbana

3- adequar o modelo escolhido a uma situação real

4- através do uso do modelo, elaborar representações das tendências de crescimento e forças principais que atuam no sistema urbano escolhido.

Com o trabalho realizado, é possível elaborar o seguinte conjunto de conclusões sobre cada tópico específico apresentado anteriormente, o que permite identificar se os objetivos propostos pelo trabalho foram devidamente atendidos:

**1- Quanto a “buscar representações do fenômeno urbano que sejam dinâmicas e considerem a complexidade do processo de crescimento”**

A necessidade de representações urbanas dotadas de dinâmica e complexidade levaram ao campo de estudo dos autômatos celulares aplicados aos estudos urbanos, dada a capacidade destes de representar processos de crescimento sobre determinadas regras configuracionais pré-estabelecidas. Devido ao caráter genérico dos ACs, foi escolhido um modelo que implementasse o uso de Acs modificando algumas de suas características originais, na busca de aproximações com o comportamento do crescimento de cidades reais. O modelo utilizado, ao incorporar como regra de crescimento as teorias de Potencial/Centralidade, permitiu uma diferenciação territorial que indica células com maiores potenciais de urbanização do que outras, captando a lógica de crescimento dos sistemas urbanos.

## **2- quanto a “encontrar ferramentas adequadas para essa tarefa dentro do campo da modelagem urbana”**

O modelo Simulador do Ambiente de Cidade foi a ferramenta escolhida para a representação urbana proposta pela pesquisa, e sobre seu uso, vantagens, possibilidades de pesquisa e limitações é possível elaborar as seguintes considerações finais:

a) por se tratar de um modelo de recente desenvolvimento e este trabalho ser a primeira aplicação prática do SACI além das realizadas pelo seu autor, foram poucos os exemplos de uso a disposição, sendo necessário durante a execução do trabalho o desenvolvimento de metodologias próprias para a execução de algumas tarefas no modelo, o que aumentou o conhecimento prático na manipulação de modelos configuracionais urbanos.

b) a interface de utilização do modelo, implementada em um ambiente de SIG, na forma de um *project* do programa ARCVIEW, mostrou-se bastante amigável, sendo de manipulação direta e intuitiva e rico em informações visuais, o que facilita a sua apropriação por novos usuários.

c) a liberdade na escolha dos atributos a serem utilizados, bem como de seus pesos e comportamento de simulação (atração ou resistência; instáveis, estáveis ou *freezing*) possibilitou representações bastante aproximadas com a realidade urbana específica, facilitando também o procedimento de calibração. Apesar disso, devido ao fato da cidade ser composta por muitos fatores que não podem ser incluídos ou descritos pelo modelo, é sempre necessário ter em conta que as limitações das respostas encontradas aqui estão relacionadas com os limites de input de dados.

d) os diversos outputs oferecidos pelo modelo permitiram leituras variadas do sistema simulado, que foram feitas através da análise da evolução dos resultados ao longo da simulação, da análise integrada entre dois ou mais outputs, através de gráficos de correlação entre variáveis, tabelas, histogramas e etc. Quanto a esse aspecto do modelo, é possível concluir que a interpretação dos resultados no SACI, apesar da fácil leitura, é bastante intuitiva em alguns pontos, requerendo um adequado

conhecimento por parte do usuário das teorias subjacentes à lógica do modelo para alcançar suas conclusões.

e) o modelo oferece uma série de parâmetros que permitem diversos tipos de simulações para diversas finalidades de pesquisa, e no trabalho realizado foram exploradas apenas algumas destas potencialidades, que foi o estudo das tendências de crescimento de um caso real.

f) a questão do transcorrer do tempo no modelo requer uma certa atenção, já que não existe uma entrada específica de tempo, sendo a dimensão temporal incorporada em unidades discretas de tempo, dadas pela seqüência de iterações do modelo e que no trabalho teve de ser ajustada no processo de calibração através do controle dos parâmetros de velocidade de crescimento. A utilização do tempo como unidades discretas mostrou-se apropriada pra a representação do fenômeno do crescimento urbano, por permitir a elaboração de seqüências de estados configuracionais que demonstram a evolução do sistema.

g) procedimento de cálculo, por utilizar um sistema de grafos que calcula a relação topológica de cada célula com cada célula do sistema em um processo seqüencial, aumenta consideravelmente o tempo de processamento na medida em que aumentam o numero de células do sistema, o que se mostrou um forte limitador para a realização de mais experiências de crescimento e da inclusão mais adequada de elementos que necessitam uma maior resolução, como por exemplo, o sistema viário.

h) quanto às limitações encontradas no uso do modelo, algumas delas já tratadas, é possível resumi-las nos seguintes itens:

- a limitação no uso de células de menores dimensões devido ao tempo de processamento;

- a impossibilidade de se recuperar os atributos de input ao final das simulações, já que nos resultados estes aparecem incorporados aos outputs padrões do modelo e não podem ser visualizados separadamente;

- a impossibilidade de mudança dos parâmetros de crescimento durante o processamento;

- a limitação das explicações sobre o crescimento aos outputs gerados pelo modelo, sendo que especulações quanto a características mais específicas como, por exemplo, as apropriações do uso do solo em residencial, comercial ou industrial, devem ser feitas de maneira intuitiva.

### **3- quanto a “adequação do modelo a uma situação real”:**

A adequação do modelo a uma situação real consistiu na escolha de uma cidade como objeto de estudo e na conseqüente transformação de seus componentes em variáveis do modelo. Para se alcançar o padrão de crescimento da cidade escolhida, os parâmetros e tensões de crescimento do modelo tiveram de ser devidamente calibrados. Quanto a essas etapas do trabalho é possível listar as seguintes conclusões:

a) a escolha de Santa Maria parece ter sido adequada, já que foi possível transformá-la em um grid de 2850 células o que é uma quantidade razoável de células para serem processadas. Além disso, a cidade mostrou possuir componentes bastante significativos nas simulações, que puderam ser reproduzidos e terem seus efeitos testados, como é o caso, por exemplo, dos morros ou da rede ferroviária. É necessário lembrar que as representações de Santa Maria estiveram vinculadas à disponibilidade de dados existentes. A representação dos atributos urbanos, por exemplo, teve de ser realizada de maneira bastante simplificada devido a pouca disponibilidade de dados qualitativos sobre o uso e ocupação do solo urbano nos órgãos públicos como as Secretarias de Planejamento e de Obras da Prefeitura Municipal.

b) a calibração do modelo mostrou-se uma das etapas mais importantes do trabalho, pois foi onde o padrão de crescimento da cidade foi efetivamente “capturado” e, mesmo consumindo bastante tempo através de variadas simulações teste necessárias até a aproximação com os melhores resultados, foi possível compreender os efeitos de cada parâmetro e tensão de crescimento utilizadas, o que proporcionou um maior domínio do modelo. Quanto à manipulação dos parâmetros é possível afirmar que com as modificações dos lambdas foi possível captar o “tempo” de crescimento da cidade enquanto que com as distribuições das tensões se captou o padrão de distribuição do crescimento.

c) os valores encontrados na calibração para as correlações com o existente mostram que a dinâmica da cidade está representada maneira satisfatória, já que a média do resultado escolhido como o melhor ficou em 0,764, o que para modelos urbanos pode ser considerado um excelente resultado de correlação. Percebe-se que com o avanço da calibração os melhores resultados ficaram muito semelhantes, e o critério de escolha da melhor configuração, além de boas médias de correlações, levou em conta valores mais aproximados para o número de células de borda, que representa a morfologia das franjas urbanas.

d) a possibilidade de controlar tanto o crescimento interno como o externo permitiu realizar a sintonia fina da calibração com bastante apuro, e assim representar com maior acuidade o padrão de crescimento esperado. Quanto aos parâmetros, a impossibilidade destes serem modificados após o início da simulação representa uma limitação do modelo, já que em situações reais as taxas de crescimento dificilmente se mantêm estáticas por longos períodos de tempo.

e) um resumo da adequação do modelo a um caso real, realizada neste trabalho, pode ser resumida da seguinte forma:

- escolha de um estudo de caso.

- levantamento de dados sobre a cidade escolhida.

- escolha dos componentes urbanos mais relevantes para a sua adequação e utilização como atributos do modelo.

- transformação dos componentes urbanos em grids do programa ARCVIEW, devidamente georreferenciados.

- vinculação dos grids ao modelo através da transformação em atributos urbanos, naturais ou institucionais, com a atribuição de pesos relativos na simulação e comportamento (resistência ou atração).

- calibração do modelo através da utilização de simulações de um estado passado e a posterior comparação com um estado atual, manipulando-se as intensidades dos parâmetros  $\lambda$  externo e interno, as tensões de crescimento e o peso relativo dos atributos. Para as comparações foram utilizadas correlações entre os

outputs das simulações e do caso existente para uma data predeterminada (no caso, 2002) para Fenótipo Urbano (CellType), Carregamento Urbano (LoadU) e Centralidade Relativa tipo 1 (CentR1), bem como comparações dos números de células urbanas e de borda, buscando aproximar cada iteração do modelo com o decorrer de um ano.

**4-quanto a “elaborar representações das tendências de crescimento e forças principais que atuam no sistema urbano escolhido”:**

As especulações com diferentes cenários de crescimento consistiram na etapa final do trabalho e permitiram especular sobre propriedades da dinâmica espacial da cidade e seu comportamento diante de situações hipotéticas, partindo do pressuposto que o modelo calibrado representa satisfatoriamente o crescimento da cidade. Reforçando as conclusões já apresentadas no capítulo 7.5. é possível destacar como características principais do crescimento de Santa Maria identificadas pelo SACI:

a) a estrutura original da cidade, baseada nos dados de input para 2002, se mostrou bastante persistente, pois manteve um padrão semelhante em todos os cenários de crescimento, consistindo na preponderância do centro original, que cresceu de maneira radial.

b) além do centro, verificou-se a intensificação dos carregamentos urbanos pré-existente nas zonas oeste e leste e o crescimento intenso no sul, este com menores carregamentos, o que reforça a identificação de Santa Maria como cidade linear e fortemente dependente do centro.

c) a menor influência do que o esperado da Universidade Federal de Santa Maria como pólo de atração do crescimento e maior como resistência ao crescimento do bairro de Camobi

d) a persistência da estagnação da zona norte da cidade, na área entre a linha férrea e os morros da Serra Geral.

É possível afirmar que os 46 anos de exploração de crescimento (16 anos na calibração mais 30 anos de simulações futuras), foram importantes, sobretudo, para se adquirir conhecimento que auxilia a conhecer melhor o presente e entender o funcionamento dos mecanismos internos da cidade. Enfim, o trabalho realizado pode

ser considerado como um guia para a utilização do modelo SACI para futuros usuários, pois aqui foi descrita uma metodologia prática para a sua aplicação a um caso específico, contando com as etapas de escolha dos dados, transformação destes em atributos do modelo, com seus devidos pesos de simulação, a posterior montagem dos cenários com a regulagem inicial dos parâmetros e, por fim, os passos necessários para a calibração do modelo.



## **9. Considerações finais**

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa possibilitou um aprofundamento teórico de conceitos como complexidade, auto-organização e simulações artificiais de crescimento, que abrem novas perspectivas de pesquisa futuras que busquem a compreensão e visualização dos mecanismos que dão origem ao crescimento. Como a exploração aqui realizada tratou de um sistema urbano na sua macro escala, uma possível linha a ser seguida futuramente é o estudo de dinâmicas intra-urbanas, na busca pela identificação de fenômenos que ocorrem no interior do meio-urbano e que se complementam para formar sistemas maiores, buscando definir pontos de transição de uma escala para a outra através da identificação do alcance da influência de determinados agentes e estruturas que caracterizam uma determinada realidade local, como ruas, conjuntos de quarteirões ou bairros.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C.; CÂMARA, G.; VIEIRA, M. **Introdução a modelagem dinâmica cap.3: Modelos de Dinâmica Urbana: Conceitos, derivações de relações, Calibração, Exemplos.** XI Simpósio de Sensoriamento Remoto, 2003 [disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/Cap3\\_Modelos\\_Urbanos\\_Versao\\_Nova.pdf](http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/Cap3_Modelos_Urbanos_Versao_Nova.pdf) em 01/10/2004]

ALEXANDER, C. **A City is Not a Tree.** Architectural Forum (Vol. 122) No. 1, p. 58-61 e No. 2. p. 58-62. [Reprinted in: Design After Modernism. London: Thames and Hudson, 1988. p. 67-84]

ALEXANDER, C. (1979) **The Timeless Way of Building.** New York: Oxford University Press.

ALEXANDER, C. **The Nature of Order.** New York: Oxford University Press, 1998.

ALEXANDER, C. **A pattern language.** New York: Oxford University Press, 1977.

ALEXANDER, C.; NEIS, H.; ANNINOU, A.; KING, I. **A New Theory of Urban Design.** New York: Oxford University Press, 1987.

ANAS, A.; ARNOT, R.; SMALL, K. **Urban Spatial Structure.** Journal of Economic Literature- vol. XXXVI, september, 1998. p. 1426-1464

AXELROD, R. **The Evolution of Strategies in the Iterated Prisoner's Dilemma: Genetic Algorithms and Simulated Annealing,** ed. Lawrence Davis, 1987. p. 32-41

AXELROD, R. **Advancing the art of simulation in the social sciences.** International Conference on Computer Simulation and the Social Sciences. Cortona, Italy, 2001. [disponível em [www.santafe.edu](http://www.santafe.edu) , em 03/11/2003]

BARROS, J; SOBREIRA, F. **City of slums: self-organizatin across scales.** London: CASA, 2003. [disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm), em 04/10/2003]

BATTY, M. ; LONGLEY, P. **Fractal Cities.** London: Academic Press, 1994.

BATTY, M., XIE, Y., SUN, Z. **The dynamics of urban sprawl.** London: CASA, 2003. [disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) em 23/05/2004]

BATTY, M., STEADMAN, P, XIE, Y. **Visualization in Spatial Modelling.** London: CASA, 2003. [disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper79.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper79.pdf) em 12/05/2004]

BATTY, M. **Urban Modelling: Algorithms, Calibrations, Predictions.** Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 381p.

BATTY, M. **Urban growth and form: scaling, fractal geometry and diffusion limited aggregation.** Environment & Planning A. Vol. 21. London:Pion, 1989.

BATTY, M. **Urban evolution on the desktop: simulations with the use of extended cellular automata.** Environment & Planning B, vol 30,. London: Pion, 1998. p. 1943-1967.

BENGUIGUI, L.; CZAMANNSKI, D.; PORTUGALI, Y. **When and where is a city fractal.** Environment and Planning B: Planning and Design 28. London: Pion, 2000. p.687--705.

BEY, H. **TAZ: Zona Autônoma Temporária.** São Paulo. Conrad Editora do Brasil, 2001.

- BEVILACQUA, D. **Implantação do campus universitário de Camobi e repercussões na estrutura urbana da cidade de Santa Maria-RS**. 1994. Dissertação de mestrado-PROPUR/ UFRGS, Porto Alegre..
- BURGESS, E. G. **The Growth of the city**. In: R. E. PARK et al. *The city*. Chicago: University of Chicago Press, 1985.
- BURROUGH, P. **Dynamic Modelling and Geocomputation**. *Geocomputation: A Primer*. In: Longley, P.; Batty, M.; McDonnel, R. ed. London: John Wiley & Sons, 1998. p.165-192.
- CLARKE, K.; GAYDOS, I.; HOPPEN, S. (1997) **A self modifying cellular automaton model of historical urbanisation in the San Fransisco Bay area**. *Environment & Planning B*, vol 24, London: Pion, 1997. p. 247-261.
- COOPER, J. **Fractal assessment of street-level skylines: a possible means of assessing and comparing character**. London. *Urban Morphology*, 2003. p.73-82.
- COUCLELIS, H. **From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation**. *Environment & Planning B*, vol 24,. London: Pion, 1997.p.165-174
- DENDRINOS, D. SONIS, M. **Chaos and socio-spatial dynamics**. New York: Springer-Verlag, 1990.
- GLEICK, J. **Caos-A criação de uma nova ciência**. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, 1997.
- HILLIER B, HANSON J. **The social logic of space**. London: Cambridge University Press, 1985.
- HILLIER, B. **Natural movement**. *Environment & Planning B*. Vol 21. London: Pion, 1993. p.29-66
- INGRAM, D. **The concept of accessibility**. *Regional Studies*. Vol. 05, 1971.
- JACOBS, J. **The Death and Life of Great American Cities**. New York: Vintage Books, 1961.
- KRAFTA, R. **A história é um estado inicial**. In: 3º Seminário sobre História da Cidade e do Urbanismo, 1994, Porto Alegre: UFRGS, Faculdade de Arquitetura, 1994. 18p.
- KRAFTA, R. **Modelling intra-urban configurational development**. *Environment & Planning B*, vol 21, London: Pion, 1994. p.67-82
- KRAFTA, R. **Urban convergence: morphology and attraction**. in H. Timmermans (ed): *Decision support systems in Urban Planning*. London: E & FN Spon ed., 1997.
- KRAFTA, R. **Spatial self-organization and the production of the city**; *Urbana* 24. Caracas: IFA/LUZ, 1999. p.49-62.
- KRAFTA, R.; OLIVEIRA, D.; BORDINI, R. **The city as object of human agency**. In: *International Symposium of Space Syntax 4*, London, 2003.
- LORENZ, E. **Deterministic non-periodic flow**. *Journal of Atmospheric Science*. Vol.20, 1963.
- MANDELBROT, B. **Objetos Fractais**. Lisboa: Gradiva, 1991.
- MANDELBROT, B. **The Fractal Geometry of Nature**. New York: Ed. Freeman, 1983.
- NOVAES, A. G. **Modelos em Planejamento Urbano, Regional e de Transportes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.

PIETGEN, H.; JÜRGENS, H.; SAUPE, D. **Fractals For The Classroom - Part One, Introduction to fractals and Chaos**. New York: Springer-Verlag, 1993.

POLIDORI, M.; GRANERO J. **SACI- Simulador do Ambiente de Cidade®**. [software inédito]. Porto Alegre: PPGECCO-UFRGS, 2003. 1 CD-ROM.

POLIDORI, M. **Crescimento urbano em Pelotas, RS –Simulações com o SACI- Simulador do Ambiente de Cidade**. [apresentação em ambiente digital]. Porto Alegre: PPGECCO-UFRGS, 2004.

POLIDORI, M. **Modelando crescimento com o SACI- Simulador do Ambiente de Cidade: O caso de Barra do Ribeiro**. Porto Alegre: PPGECCO-UFRGS, 2004.

POLIDORI, M. **Crescimento Urbano e Ambiente: Um estudo exploratório sobre o futuro e o crescimento das cidades**. Tese (Doutorado em Ecologia de Paisagem) PPGECCO-UFRGS, Porto Alegre, 2005.

PORTUGALI, Y. **Notions concerning the nature of world urbanization**. Progress in Planning 46, London, 1999. p.145-160.

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

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

SALINGAROS, N. **The Laws of Architecture from a Physicist's Perspective**. Physics Essays, Vol. 8, 1995. p.638-643.

SALINGAROS, N. **Theory of the Urban Web**. Journal of Urban Design, vol.3. Carfax Publishing, Taylor & Francis Ltda, 1998. p. 53-71

SALINGAROS, N. **Complexity and Urban Coherence**. Journal of Urban Design, vol. 5.. Carfax Publishing, Taylor & Francis Ltda, 2000. p. 291-316

SOBREIRA, F. **Urban fragmentation: spatial scaling laws in squatter settlements**. 3# International Space Syntax Symposium, London, 2002.[ disponível em [www.spacesyntax.ucl.ac.uk](http://www.spacesyntax.ucl.ac.uk) em 06/06/2003 ]

SOJA, E. *in* URRY & GREGORY(ed). **Social relations and Spatial structures** ; London, Mac Millan, 1985.

TORRENS, P. **How should we model complex adaptive urban systems?** London: CASA, 2000. [disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/~david/ComplexitBib>, em 06/06/2003]

TORRENS, P. **How cellular models of urban systems work?** London: CASA, 2000.[disponível em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers), em 06/06/2003 ]

TORRENS, P.; O'SULLIVAN, D. **Cellular automata and urban simulation: were do we go from here ?** Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 28. London: Pion, 2000. p.163-168.

WAGNER, D. **Cellular automata and geographic information systems**. Environment & Planning B, vol 24, London: Pion, 1997. p.219-234

WHITE, R.; ENGELEN G. **Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling**. Environment & Planning B, vol 24, London: Pion, 1997. p. 235-246

WOLFRAN, S. **The statistical mechanics of cellular automata**. Review of Modern Physics, 1985. p.601-643.[disponível em <http://www.stephenwolfran.com/publications/articles/ca> , em 12/11/2003]

WOLFRAN, S. **Two-dimensional cellular automata**. London. Stephen Wolfran publications, 1985.[disponível em <http://www.stephenwolfran.com/publications/articles/ca/85-two> , em 12/11/2003]